



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

AUTOR: CAROLINA ALEXANDRA JARAMILLO CASTELO

**TEMA: DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE
DESLIZAMIENTOS APLICANDO LÓGICA FUZZY VS MORA VAHRSON,
EN EL ÁREA MONJAS – ITCHIMBÍA – PANECILLO, DEL DISTRITO
METROPOLITANO DE QUITO, (DMQ) Y SIMULACIÓN EN 3D**

DIRECTOR: ING. OSWALDO PADILLA

CODIRECTOR: ING MARIO CRUZ

SANGOLQUÍ, MARZO 2014

CERTIFICACIÓN

Ing. Oswaldo Padilla A.

Ing. Mario Cruz D.

Certifican:

Que el trabajo titulado “**DETERMINACIÓN Y DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS APLICANDO LÓGICA FUZZY VS MORA VAHRSON, EN EL ÁREA MONJAS – ITCHIMBÍA – PANECILLO, DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, (DMQ) Y SIMULACIÓN EN 3D**”, realizado por la Srta. CAROLINA ALEXANDRA JARAMILLO CASTELO, 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, 17 de Marzo del 2014

Ing. Oswaldo Padilla A.

DIRECTOR

Ing. Mario Cruz D.

CODIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Carolina Alexandra Jaramillo Castelo

Declaro que:

El proyecto de grado denominado “**DETERMINACIÓN Y DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS APLICANDO LÓGICA FUZZY VS MORA VAHRSON, EN EL ÁREA MONJAS – ITCHIMBÍA – PANECILLO, DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, (DMQ) Y SIMULACIÓN EN 3D**”, 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, 17 de Marzo del 2014

Carolina Alexandra Jaramillo Castelo

AUTORIZACIÓN

Carolina Alexandra Jaramillo Castelo

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo **“DETERMINACIÓN Y DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS APLICANDO LÓGICA FUZZY VS MORA VAHRSON, EN EL ÁREA MONJAS – ITCHIMBÍA – PANECILLO, DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, (DMQ) Y SIMULACIÓN EN 3D”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 17 de Marzo del 2014

Carolina Alexandra Jaramillo Castelo

DEDICATORIA

*“La perfección se alcanza
No cuando no hay nada más que agregar
Sino cuando no hay nada más que quitar”*

ANTOINE DE SAINT-EXUPERY

Dedico este proyecto a todas esas personas
Víctimas de los riesgos naturales y antrópicos
Que por falta de prevención y mitigación
Pagaron con sus vidas.

AGRADECIMIENTO

El universo, un mundo lleno de fantasías, realidades que conllevan a un solo fin sin importar los caminos y el tiempo que tome, siempre conspirará para que logres tu cometido.

Ser agradecido con la gente que te trata de entender, te comprende, te aprecia y te demuestra que eres único es el mayor regalo que se les puede brindar.

Agradezco a mis padres, María Eugenia y Eduardo, ya que por ellos soy lo que soy, ellos son los que creen en mi a todo costa sin importar lo que suceda y me brindan su apoyo incondicional.

A mi hermano Santiago el interés y entusiasmo que me brindó siempre.

A mis amigos que incondicionalmente han estado en cada situación que se ha presentado y me han apoyado contra viento y marea.

A mi profesor Ing. Mario Cruz que gracias a su visión, apoyo y lealtad he podido avanzar y nunca caer a pesar de los tropiezos que hay en la vida.

A mi profesor Ing. Oswaldo Padilla que con su conocimiento y cariño me ha ayudado para poder culminar este proyecto.

Muchas Gracias a todos...

INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación.....	5
1.4. Objetivo General	7
1.5. Objetivos Específicos	7
1.6. Metas	8
1.7. Área de Influencia	8
1.8. Localización Geográfica	9
1.9. Definición del problema.....	10
1.10. Descripción del proyecto.....	10
CAPITULO II.....	11
FUNDAMENTOS TEORICOS.....	11
2.1. DESLIZAMIENTOS	11
2.1.1.Introducción	11
2.1.3.Clasificación de deslizamientos	15
2.1.4.Tipos de movimientos del terreno	18
2.1.5.Susceptibilidad del Terreno a Deslizamientos	30
2.2. Integración de los métodos de susceptibilidad a deslizamientos con Sistemas de Información Geográfica.....	30
2.2.1.Generalidades	31
2.2.2.Animación 3D en ArcGIS	33
2.2.2.1.Beneficios del 3D	36
2.2.3.Construcción de bases de datos geográficas.....	37
2.2.5.1.Características	39
2.2.5.2.Tipos de modelos de Datos Espaciales	40
2.2.6.Algebra de Mapas.....	42
2.2.7.Generación de modelos cartográficos en software (SIG)	43
2.3. Lógica Fuzzy (Difusa).....	44

2.3.1.Generalidades	44
2.4.1.Descripción de los parámetros de la metodología	55
2.5. Criterios para la definición de amenaza por inestabilidad de ladera	61
2.5.1.Significado de los mapas de amenazas por deslizamientos	63
2.6. Método de Thornthwaite.....	64
2.7. Método de Gumbel.....	65
2.8. Pruebas de bondad de ajuste para los resultados de la distribución de Gumbel.....	68
2.8.1.Test Kolmogorov-Smirnov	68
CAPÍTULO III.....	69
METODOLOGÍA.....	69
3.1. Generalidades.....	69
3.2. Información y datos.....	70
3.2.1.Recopilación de información	70
3.2.2.Generación de Datos	71
3.2.2.1.Modelación y Análisis de variables para Mora – Vahrson	71
3.3. Análisis de datos – Lógica Fuzzy	102
3.3.1.Análisis de variables y relaciones	102
3.4. Análisis de proximidad	111
3.4.1.Interpolación	111
3.4.2.Rasterización	112
3.5. Análisis de Metodología de Lógica Fuzzy	113
3.5.1Análisis de variables según casos de Lógica Fuzzy	116
3.5.2Análisis de las variables.....	116
3.6. Modelos cartográficos Mora Varhson.....	118
3.6.1.Obtención de los modelos cartográficos.	119
3.6.2.Obtención de variables para Lógica Fuzzy	122
3.7. Ajuste de los modelos	135
CAPITULO IV.....	138
RESULTADOS.....	138
4. Análisis de los modelos obtenidos.....	138
4.1. Descripción de los modelos Fuzzy	138

4.2.	Modelos Mora-Vahrson.....	143
4.3.	Semejanzas y diferencias	147
	4.3.1.Modelos Fuzzy.....	147
	4.3.2.Modelos Mora Vahrson.....	148
4.4.	Simulación en 3D en ArcScene.....	149
	CAPITULO V.....	153
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	153
5.1.	Conclusiones.....	153
5.2.	Recomendaciones	155
	BIBLIOGRAFÍA.....	157
	ANEXOS	162

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Clasificación simplificada de los mecanismos de ladera modificada y tipos de deslizamientos.....	18
Tabla N°2. Tipos de movimientos del terreno	19
Tabla N°3: Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento	54
Tala N°4: Índice de relieve relativo	55
Tabla N°5: Clases de pendientes y valoración del parámetro Sp	56
Tabla N°6: Valoración del parámetro de susceptibilidad litológica	57
Tabla N°7: Valoración del parámetro de la susceptibilidad litológica	57
Tabla N°8: Valores a los promedios mensuales de lluvia	58
Tabla N°9: Valoración del parámetro humedad del terreno S_h	59
Tabla N°10: Valoración del parámetro de disparo por sismicidad DS	60
Tabla N°11: Valoración del parámetro de disparo por lluvias D_{ll}	61
Tabla N°12: Valores de " Y_T " para distintos períodos de retorno T	67
Tabla N°13: Valores de " y_n " y " S_n " según número de observaciones	67
Tabla N°14: Pendientes, condiciones del terreno y valoración de parámetros.....	71
Tabla N° 15: Datos para la evapotranspiración de la estación La Tola.	74
Tabla N°16: Datos de evapotranspiración de la estación meteorológica zobamba.....	76
Tabla N°17: Datos de evapotranspiración de la estación meteorológica Iñaquito.....	77
Tabla N°18: Evapotranspiración promedio de cada estación	78
Tabla N°19: Humedad del suelo promedio mensual de cada estación.....	78
Tabla N°20: Humedad del suelo promedio mensual de cada estación.....	79
Tabla N°21: Humedad del suelo promedio mensual de cada estación.....	79
Tabla N°22: Descripción litológica de la zona de estudio en el DMQ	82
Tabla N°23: Valoración de la susceptibilidad del factor litológico	84
Tabla N°24: Equivalencias entre escala de Richter vs MKS.....	87
Tabla N°25: Sismos históricos de la ciudad de Quito	88
Tabla N°26: Sismos en la ciudad de Quito desde 1990 hasta el 2013	88

Tabla N°27: Estadísticos de sismología en la ciudad de Quito	92
Tabla N°28: Valor del parámetro de sismología.....	93
Tabla N°29: Datos de precipitaciones máximas en 24 horas de cada estación.....	95
Tabla N°30: Calculo de la distribución de Gumbel para La Tola.....	96
Tabla N°31: Calculo de la distribución de Gumbel para Izobamba	97
Tabla N°32: Valores de precipitación para la estación La Tola.....	98
Tabla N°33: Valores de precipitación para la estación Izobamba	99
Tabla N°34: Promedio de las series de La Tola e Izobamba	99
Tabla N°35: Valoración de la intensidad de lluvia.	99
Tabla N°36: Estaciones Meteorológicas cercanas a la Zona de Estudio	112
Tabla N°37: Casos Lógica Fuzzy	115
Tabla N°38: Análisis de Variables Lógica Fuzzy	116
Tabla N°39: Desviaciones estándar de los modelos	118
Tabla N°40: Desviaciones estándar de los modelos	136
Tabla N°41: Ajuste de los modelos	137
Tabla N°42: Descripción del Modelo N°1 de Ocurrencia a deslizamientos.....	139
Tabla N°43: Descripción del Modelo N°2 de Ocurrencia a deslizamientos	140
Tabla N°44: Descripción del Modelo N°3 de Ocurrencia a deslizamientos ...	142
Tabla N°45: Descripción del Modelo N°4 de Ocurrencia a deslizamientos ..	144
Tabla N°46: Descripción del Modelo N°5 de Ocurrencia a deslizamientos ..	145
Tabla N°47: Descripción del Modelo N°6 de Ocurrencia a deslizamientos ..	146

INDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Elementos de un Deslizamiento	15
Figura N°2: Mecanismos principales de roturas de deslizamientos	16
Figura N°3: Deslizamiento rotacional en El Salvador	23
Figura N°4: Deslizamiento traslacional en San Antonio de Pascua	23
Figura N°5: Representación gráfica de un SIG	32
Figura N°6: Modelo raster y modelo vector	41
Figura N°7: Algebra de Mapas	42
Figura N°8: Probabilidad tomando una variable	46
Figura N°9: Puntos importantes del modelo	48
Figura N°10: Probabilidad Creciente	48
Figura N°11: Probabilidad total con más de dos variables	50
Figura N°12: Caso 3. Lógica Fuzzy. Pendientes	116
Figura N°13: Caso 3. Lógica Fuzzy. Precipitación	116
Figura N°14: Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Vías de comunicación	116
Figura N°15: Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Fallas Geológicas	117
Figura N°16: Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Red Hídrica	117
Figura N°17: Caso 2. Lógica Fuzzy. Influencia Cobertura Vegetal	117
Figura N°18: Caso 2. Lógica Fuzzy. Índice de Dureza de la Roca	117

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico N°1: Área de influencia	9
Gráfico N°2: Modelamiento en 3D.	36
Gráfico N°3: Modelo cartográfico.	39
Gráfico N°4: Ffactor pendiente	73
Gráfico N°5: Polígonos de Thiessen generados de cada estación.	80
Gráfico N°6: Factor humedad del suelo poligonos (Sh)	81
Gráfico N°7: Factor humedad del suelo (Sh)	85
Gráfico N°8: Ffactor de disparo por sismicidad.....	94
Gráfico N°9: Grafica de dispersión de la estación La Tola.	97
Gráfico N°10: Grafica de dispersión Izbamba	98
Gráfico N°11: Polígonos de Thiessen precipitación (mm).....	100
Grafico N°12: Factor de disparo por precipitaciones.	101
Gráfico N°13: Factor dureza de Roca	103
Gráfico N°14: Factor Pendidente	104
Gráfico N°15: Factor Cobertura Vegetal	105
Gráfico N°16: Factor Precipitaciones	107
Gráfico N°17: Factor distancia a Vías	108
Gráfico N°18: Factor distancia a Ríos	109
Gráfico N°19: Factor distancia a Fallas Geológicas	111
Gráfico N°20: Modelo Cartográfico variable pendiente	119
Gráfico N°21: Modelo Cartográfico variable humedad	119
Gráfico N°22: Modelo Cartográfico variable precipitación	119
Gráfico N°23: Modelo Cartográfico variable litología	120
Gráfico N°24: Modelo Cartográfico variable sismología	120
Gráfico N°25: Modelo Cartográfico amenazas	121
Gráfico N°26: Modelo Cartográfico amenazas por lluvia	121
Gráfico N°27: Modelo Cartográfico amenazas por sismos	122
Gráfico N°28: Modelo Cartográfico general	123
Gráfico N°29: Modelo Cartográfico modelo 1	124
Gráfico N°30: Modelo Cartográfico modelo 2	125
Gráfico N°31: Modelo Cartográfico modelo 3	126

Gráfico N°32: Parroquias dentro de la zona de estudio	139
Gráfico N°33: Modelo de ocurrencia N°1 a deslizamientos	140
Gráfico N°34: Modelo de ocurrencia N°2 a deslizamientos	141
Gráfico N°35: Modelo de ocurrencia N°3 a deslizamientos.	142
Gráfico N°36: Modelo de ocurrencia N°4 a deslizamientos	144
Gráfico N°37: Modelo de ocurrencia N°5 a deslizamientos	145
Gráfico N°38: Modelo de ocurrencia N°6 a deslizamientos	146
Gráfico N°39: Muestro de Deslizamientos	150
Gráfico N°40: grupo de Animación.....	151
Gráfico N°41: Administración de Animación	152
Gráfico N°42: Línea de Tiempo – Administrador de Animación	152
Gráfico N°43: MDT con ortofoto y los deslizamientos fotointerpretados	152

INDICE DE FOTOS

Foto N°1: Corte del terreno para construcción de carreteras.....	27
Foto N°2: Muro de contención	28
Foto N°3: Remoción de la vegetación de las laderas . . .	28
Foto N°4: Irrigación en terrazas en pendiente	29
Foto N°5: Relleno y compactación en zonas de pendiente.....	29

INDICE DE CUADROS

Cuadro N°1: Factores intrínsecos y externos... ..	25
Cuadro N°2: Niveles de amenaza por inestabilidad de ladera	61
Cuadro N°3: Significado de los mapas de amenazas para la planificación del territorio	63

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación [1].....	46
Ecuación [2].....	47
Ecuación [3].....	50
Ecuación [4].....	51
Ecuación [5].....	52
Ecuación [6].....	52
Ecuación [7].....	52
Ecuación [8].....	52
Ecuación [9].....	52
Ecuación [10].....	55
Ecuación [11].....	64
Ecuación [12].....	64
Ecuación [13].....	64
Ecuación [14].....	65
Ecuación [15].....	65
Ecuación [16].....	66
Ecuación [17].....	68
Ecuación [18].....	68
Ecuación [19].....	68
Ecuación [20].....	129
Ecuación [21].....	130
Ecuación [22].....	130
Ecuación [23].....	130
Ecuación [24].....	131
Ecuación [25].....	132
Ecuación [26].....	132
Ecuación [27].....	134
Ecuación [28].....	134
Ecuación [29].....	143
Ecuación [30].....	143
Ecuación [31].....	143

NOMENCLATURA UTILIZADA

ALGORITMO.- secuencia explícita y finita de operaciones que conduce a la solución de un problema aplicado a los SIG suele tratarse de un conjunto de operaciones de álgebra de mapas o sobre bases de datos que permiten obtener un resultado mediante combinación de información espacial y alfanumérica.

AMENAZA.- Varnes (1984) define amenaza como la probabilidad de ocurrencia de un potencial fenómeno destructivo dentro de un específico período de tiempo y en una determinada área. En concreto expresa la probabilidad de ocurrencia de un potencial fenómeno destructivo en espacio y tiempo definidos.

CONJUNTOS DIFUSO.- la teoría de conjuntos borrosos/difusos permite la evaluación progresiva de la composición de elementos en un conjunto, lo que se describe con la ayuda de una función algebraica en el intervalo $[0, 1]$.

DESLIZAMIENTO.- consiste en un descenso masivo y relativamente rápido, a veces de carácter catastrófico, de materiales, a lo largo de una pendiente. El material se mueve como una masa única, no como varios elementos que se mueven a la vez.

FUZZY.- lógica difusa; es una forma de lógica de obtener varios valores derivados de los conjuntos borrosos para hacer frente a la teoría del razonamiento donde los valores son aproximados y no exactos.

IMPLEMENTACIÓN.- la realización de una aplicación, o la ejecución de un plan, idea, modelo científico, diseño, especificación, estándar, algoritmo o política.

MAPA TEMÁTICO.- permiten modelar y representar el conocimiento de forma intercambiable y procesable por máquina, y ofrecen un marco unificado para la gestión del conocimiento y de la información, que también es comprensible para los humanos. Los mapas temáticos permiten, además, describir estructuras de conocimiento y asociarlas con otros recursos de información

MODELO.- representación simplificada de un objeto o proceso en la que se representan algunas de sus propiedades un modelo reproduce solamente algunas propiedades del objeto o sistema original que queda, por tanto, representado por otro objeto o sistema de menor complejidad; los modelos se construyen para conocer o predecir propiedades del objeto real.

PROBABILIDAD.- mide la frecuencia con la que se obtiene un resultado (o conjunto de resultados) al llevar a cabo un experimento aleatorio, del que se conocen todos los resultados posibles, bajo condiciones suficientemente estables.

RIESGO.- pérdidas esperadas de los elementos vulnerables ante la ocurrencia de un fenómeno determinado el riesgo suele valorarse en unidades monetarias (ver vulnerabilidad) riesgo específico: grado de pérdidas esperadas como consecuencia de un fenómeno determinado; es igual a la peligrosidad por la vulnerabilidad.

SIG/GIS.- sistema de información geográfica; sistema de gestión de bases de datos (SGBD) con herramientas específicas para el manejo de información espacial y sus propiedades los tipos de propiedades que un SIG debe poder

analizar tanto independiente como conjuntamente son tres: métricas, topológicas y atributivas.

SIMULACION EN 3D.- Es una experimentación con un modelo de la realidad en 3 dimensiones basado en una o varias hipótesis, para las simulaciones en 3D se hace uso de diversos programas para representar modelos, efectos y resultados más realistas.

SUSCEPTIBILIDAD.- La susceptibilidad de un terreno a fallar es definida por Brabb (1984) como la tendencia de un deslizamiento a ser generado en el futuro en un área específica. En el mismo sentido, Soeters y van Western (1996) definen susceptibilidad como la posibilidad de que un fenómeno ocurra en un área de acuerdo con las condiciones locales del terreno, y especifican que factores detonante tales como precipitación o sismicidad no son considerados.

VULNERABILIDAD.- es el grado de daño o pérdida que pudiera sufrir un elemento o grupo de elementos bajo riesgos (personas, edificaciones, instalaciones, ecosistemas, bienes, servicios públicos, ambiente) como resultado de la ocurrencia de un evento de cierta magnitud e intensidad, expresada en una escala desde 0 (sin daño) a 1 (pérdida total).

RESUMEN

En el presente proyecto se propone la comparación entre metodologías heurísticas tradicionales (Mora - Vahrson) y estadísticas (Lógica Fuzzy) para la determinación de la susceptibilidad a deslizamientos y la simulación en 3D de los deslizamientos fotointerpretados; la importancia del proyecto es la validación de la metodología Fuzzy, ya que este disminuye la subjetividad de los métodos heurísticos además de obtener resultados aparentemente más cercanos a la realidad, independientemente de que el investigador conozca a profundidad los fenómenos geodinámicos que intervienen en la ocurrencia de inestabilidades del terreno. El Distrito Metropolitano de Quito se ha caracterizado por tener sectores propensos a inundaciones y deslizamientos en la época de lluvias. Las zonas más vulnerables a este tipo de eventos se ubican a lo largo de la Av. Simón Bolívar (nueva vía Oriental), laderas de Puengasí, laderas del Panecillo, Itchimbía y Pichincha (vía occidental). El resultado de estas metodologías son diferentes modelos, que mediante un ajuste se define cuál de ellos concuerda con la realidad del terreno. Por lo tanto, la validación de la susceptibilidad a deslizamientos en este sector de Quito, con nuevas metodologías como la propuesta, será un instrumento vital para la elaboración de cartografía de riesgos en otros sectores del DMQ.

**Palabras Clave: Fuzzy, Susceptibilidad, Metodología, Mora & Vahrson,
Cartografía**

SUMMARY

The present project proposes the comparison among traditional heuristic methodologies (Mora - Vahrson) and statistical (Logical Fuzzy) for the determination of the susceptibility to landslides and the 3D simulation of the Landslides photointerpretated; the importance of the project is the validation of the Fuzzy Methodology , because it diminishes the subjectivity of the heuristic methods besides obtaining seemingly nearer results to the reality, independently that the investigator knows the geomorphodynamic phenomena that intervene in the occurrence of uncertainties of the land. The Metropolitan District of Quito has been characterized for having prone sectors to floods and landslides in the rainy season. The most vulnerable areas to this type of events are located along the Simón Bolívar Avenue (New Oriental Road), hillsides of Puengasí, Itchimbía and Pichincha hillsides. The result of these methodologies are different models that are defined by means of an adjustment is defined which of them agrees with the reality of the land. Therefore, the validation of the susceptibility to landslides in this sector of Quito, with new methodologies like the proposal, will be a vital instrument for the elaboration of risk cartography in other sectors of the DMQ.

**Key Words: Fuzzy, Susceptibility, Methodology, Mora & Vahrson,
Cartography**

CAPITULO I

PRESENTACION

1.1. Generalidades

La ciudad de Quito frecuentemente ha sufrido accidentes de origen tanto climático como geomorfológico relacionados con los escurrimientos de superficie perturbados por la urbanización: inundaciones, avenidas de lodo, derrumbes y hundimientos. (Peltre. P, 1989)

Los movimientos de tierra son los que más preocupan, porque las “precipitaciones de lluvia, sean estas fuertes o mínimas hacen que el terreno tienda a aflojarse y por ende ocurren los deslizamientos de tierra”. (Marcos Villacís, EPN)

Según la intensidad de la lluvia, el suelo puede absorber agua; si esta es tenue la infiltración del agua será buena en comparación a una precipitación intensa la cual satura a los macro y micro poros lo cual provoca un que el agua se empoce separando y removiendo el suelo provocando deslizamientos.

Un estudio de la Secretaría de Seguridad del DMQ, realizado en el 2011 determinó que a lo largo de la Av. Simón Bolívar hay seis zonas susceptibles a deslaves en la época invernal. Allí se ha detectado filtraciones de agua en los taludes. (El Comercio, 10-01-2012)

Este tipo de eventos se han generado debido a la ocupación desordenada de las colinas que rodean a la ciudad y zonas de relleno, debido a la carencia de políticas de ordenamiento urbano y de cartografía de riesgos; factores que impiden a las entidades seccionales elaborar un adecuado plan de ordenamiento territorial que procure una ocupación racional del suelo.

1.2. Antecedentes

Existen diferentes métodos para la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos. Entre ellos están el heurístico y el estadístico. En el método heurístico predomina el criterio del experto de los procesos geomorfodinámicos que actúan en el terreno donde se realiza el estudio. El método estadístico se basa en predicciones estadísticas por combinaciones de variables generadoras de deslizamientos.

La cartografía de los movimientos en masa y su contexto geomorfológico son el principal elemento para la determinación de la amenaza. Se pueden distinguir dos tipos de análisis heurístico: el análisis geomorfológico y la combinación cualitativa de mapas.

En el análisis geomorfológico, conocido también como el método de cartografía directa, el grado de susceptibilidad del terreno es determinado por el geólogo directamente en el campo. El proceso se basa en su experiencia.

La combinación cualitativa de mapas busca superar el problema de los “criterios ocultos” (subjetividad) del análisis geomorfológico. En este método, el técnico usa su criterio de experto para asignar pesos (valores que representan un determinado grado de importancia) a una serie de mapas parámetro (mapas de condiciones del terreno que se consideran relacionadas, en diferente grado, con la ocurrencia de deslizamientos).

Este método ha adquirido bastante popularidad para la zonificación de inestabilidad de laderas. Su problema es que la asignación exacta de pesos a los diversos mapas parámetro se basa en ocasiones en un insuficiente conocimiento de campo de los factores cruciales, por lo que su confiabilidad es directamente dependiente de qué tanto y qué tan bien el investigador conozca los procesos geomorfológicos que actúan en el terreno (Carrara et al., 1995).

El método Mora-Vahrson (Mora et al., 1992) es de tipo heurístico, específicamente una combinación cualitativa de mapas. Se aplica mediante la combinación de varios factores y parámetros, los cuales se obtienen de la observación y medición de indicadores morfo dinámicos y su distribución espacio-temporal. La combinación de los factores y parámetros se realiza considerando que los deslizamientos ocurren cuando en una ladera, compuesta por una litología determinada, con cierto grado de humedad y con cierta pendiente, se alcanza un cierto grado de susceptibilidad (elementos pasivos). Bajo estas condiciones, los factores externos y dinámicos, como son la

sismicidad y las lluvias intensas (elementos activos), actúan como factores de disparo que perturban el equilibrio, la mayoría de las veces precario, que se mantiene en la ladera.

El enfoque estadístico se basa en la relación observada entre cada factor y la distribución de deslizamientos pasada y presente. Así, la evaluación de la susceptibilidad de deslizamiento puede volverse tan objetiva como sea posible, por el hecho de que los factores de inestabilidad y sus interrelaciones son evaluados con base estadística. La fortaleza de este enfoque depende directamente de la calidad y cantidad de datos recolectados.

La lógica Borrosa, Difusa o Fuzzy se basa en lo relativo de lo observado. Este tipo de lógica toma valores aleatorios, pero contextualizados y referidos entre sí. La lógica difusa se adapta mejor al mundo real, e incluso puede comprender y funcionar con nuestras expresiones, del tipo "hace mucho calor", "no es muy alto", "el ritmo del corazón está un poco acelerado". La clave de esta adaptación al lenguaje, se basa en comprender los cuantificadores de nuestro lenguaje (como por ejemplo, "mucho", "muy", "un poco").

La comparación entre metodologías heurísticas tradicionales (Mora - Vahrson) y estadísticas - lógica fuzzy- (Padilla, 2006) para la determinación de la susceptibilidad a deslizamientos y la simulación en 3D de los deslizamientos fotointerpretados, es de suma importancia para validar el método Fuzzy, ya que este disminuye la subjetividad de los métodos heurísticos además de obtener

resultados aparentemente más cercanos a la realidad, independientemente de que el investigador conozca a profundidad los fenómenos geodinámicos que intervienen en la ocurrencia de inestabilidades del terreno.

El Distrito Metropolitano de Quito se ha caracterizado por tener sectores propensos a deslizamientos en la época de lluvias. Las zonas más vulnerables a este tipo de eventos se ubican a lo largo de la Av. Simón Bolívar laderas de Puengasí, laderas del Panecillo, Itchimbía y Pichincha (vía occidental).

Por lo tanto, la validación de la susceptibilidad a deslizamientos en este sector de Quito, con nuevas metodologías como la propuesta, será un instrumento vital para la elaboración de automatizada de cartografía de riesgos en otros sectores del DMQ.

1.3. Justificación

Las lluvias en la época de invierno dejan al descubierto la vulnerabilidad de los taludes de la estratégica Av. Simón Bolívar. Se registran deslizamientos, en los sectores Oriente Quiteño y San Isidro de Puengasí. Un estudio de la Secretaría de Seguridad, realizado en el 2011 determinó que a lo largo de la Av. Simón Bolívar hay seis zonas propensas a deslizamientos en la época invernal, donde se ha detectado filtraciones de agua en los taludes. (Diario El Comercio, 2012).

A pesar de los esfuerzos del I. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, los barrios ubicados en sectores de laderas, del Pichincha o de las elevaciones que rodean a Quito, sufren serios daños, frecuentes deslizamientos que devienen en flujos de lodo en la zona plana de la ciudad, los que, potencialmente, ocasionan colapso de viviendas y la interrupción de la circulación vehicular en calles y avenidas de alto flujo de tránsito como las avenidas Velasco Ibarra (vieja vía oriental), Av. Simón Bolívar la Vía Occidental, autopista General Rumiñahui, en el tramo el Trébol – Peaje, entre otras (Andocilla, L. 2012)

Por las razones mencionadas, es imprescindible ensayar nuevas metodologías que conduzcan a realizar modelos predictivos mucho más objetivos para determinar susceptibilidad a deslizamientos en el DMQ, a fin de proporcionar a los Organismos competentes documentos cartográficos imprescindibles para la toma de decisiones en los ámbitos de la prevención, atención, remediación y ordenamiento urbano. En esta propuesta de proyecto, se ha seleccionado el Centro – Sur de Quito (Lomas de Puengasí, Panecillo e Itchimbía) porque ya existe cartografía de deslizamientos realizada con el algoritmo de lógica fuzzy en plataforma SIG (Andocilla, L. 2012), en consecuencia el sector se presta para realizar el mismo tipo de cartografía aplicando el método más popular (Mora-Vahrson) y comparar el comportamiento y resultados de estos modelos a fin de determinar las bondades de cada uno. Mediante la lógica fuzzy aplicando el diez percentil se

obtuvo un mapa que podría representar la vulnerabilidad física a deslizamientos, en el sector estudiado por Andocilla, L. (Tesis de Grado, 2012).

Esta propuesta pretende resolver esta hipótesis mediante la comparación de resultados, usando métodos alternativos.

1.4. Objetivo General

Comparar el método de lógica Fuzzy para la determinación de inestabilidades del terreno con métodos tradicionales ampliamente aplicados (Mora – Vahrson) para la simulación 3D y generación automatizada de cartografía de riesgos por fenómenos de remoción en masa, en el área Monjas – Itchimbía – Panecillo, del Distrito Metropolitano de Quito, (DMQ) y comprobar que usando el algoritmo Fuzzy al diez percentil se obtiene un mapa de vulnerabilidad física a deslizamientos en el área de estudio.

1.5. Objetivos Específicos

- Homogenizar la información cartográfica básica y temática obtenida.
- Determinar y caracterizar las variables que, según Mora Vahrson, intervienen en los deslizamientos identificados en la zona de estudio.
- Modelar las variables que intervienen en los fenómenos físicos relacionados con los deslizamientos para aplicarse en Mora-Vahrson y Lógica Fuzzy

- Modelamiento en 3D del mapa de deslizamientos resultante.
- Análisis y comparación de resultados.

1.6. Metas

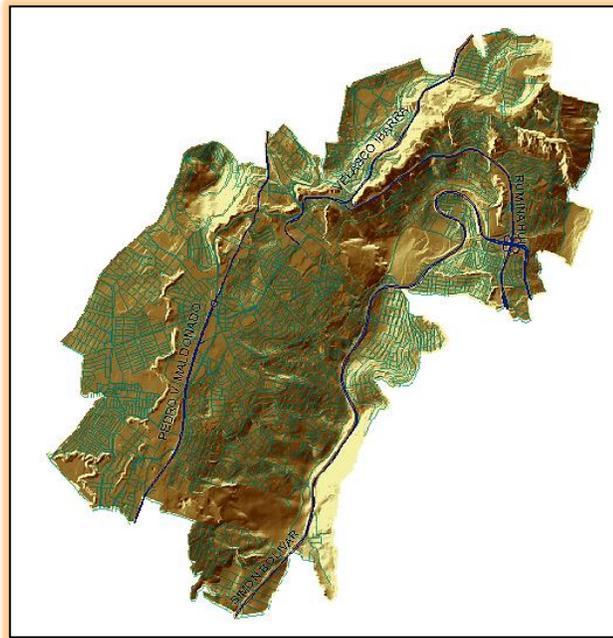
- Una geodatabase debidamente estructurada de acuerdo al estándar ISO 19100.
- Un mapa de deslizamientos escala 1:10000, utilizando Mora-Vahrson y comprobación en campo.
- Un mapa de vulnerabilidad física ante deslizamientos.
- Modelamiento y simulación en 3D de fenómenos de remoción de masas (deslizamientos)

1.7. Área de Influencia

El área del proyecto se ubica en el Centro – Sur de Quito, Distrito Metropolitano, dentro de un polígono delimitado por la Avenida Simón Bolívar por el lado oriental, la Vía Occidental, autopista General Rumiñahui, en el tramo El Trébol – Peaje. Incluye los barrios de Monjas, Vista Hermosa (Puengasí); por el occidente a lo largo de la Avenida Velasco Ibarra (vieja vía oriental), Parque Itchimbía hasta La Vicentina Alta y el Panecillo hacia el sur por la avenida Pedro V. Maldonado.

1.8. Localización Geográfica

El área de estudio se encuentra dentro del Distrito Metropolitano de Quito, (Ver Figura N°1). El Distrito Metropolitano de Quito está localizado en la provincia de Pichincha, situada en la zona central norte de la Cordillera de los Andes, que atraviesa el Ecuador de Norte a Sur. La provincia tiene un área de 1.358.100 hectáreas (IMQ, 1992b), de las cuales el Distrito Metropolitano comprende más de 290.746 hectáreas, incluyendo a la ciudad de Quito propiamente dicha así como a 24 parroquias suburbanas y rurales que rodean al núcleo urbano.



Fuente: Andocilla, 2012

Gráfico N° 1: Área de influencia.

1.9. Definición del problema

Existen muchas metodologías para la simulación y generación automatizada de cartografía de riesgos por fenómenos de remoción en masa. El más utilizado es el método heurístico Mora Vahrson que tiene un alto componente de subjetividad debido a la experiencia del investigador, (Cruz, M. com. Pers.). El método estadístico de lógica fuzzy podría ser una alternativa que represente más fielmente a la realidad frente a inestabilidades del terreno, por lo que es necesario analizar el comportamiento y los resultados de este algoritmo en comparación con los métodos convencionales, para validar sus resultados.

1.10. Descripción del proyecto.

El presente estudio aportará a la comparación de los dos modelos para la ocurrencia de deslizamientos y verificar cual otorga un mapa de vulnerabilidad física más adecuado a la realidad, que es un factor clave para el desarrollo de la ciudad de Quito. Las fases del presente estudio incluyen: recopilación, análisis y validación de datos, aplicando los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en los sitios donde se identificaron deslizamientos activos o potenciales. El objetivo principal del análisis ha sido generación automática de áreas susceptibles a deslizamientos, considerando los factores de disparo de deslizamientos.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1. DESLIZAMIENTOS

Según Cruden, 1991 un deslizamiento es un movimiento de una masa de roca, detritos o tierra pendiente abajo por acción de la gravedad, cuando el esfuerzo de corte excede el esfuerzo de resistencia del material. Además para Hutchinson, 1998 deslizamiento es el movimiento relativamente rápido pendiente debajo de suelo y roca, que toma lugar característicamente en uno o más límites discretos de una superficie de desliz que define el movimiento de la masa.

2.1.1. Introducción

Existen una amplia variedad de nombres para los procesos denudacionales donde el suelo o roca es desplazado a lo largo de la pendiente por fuerzas gravitacionales. También llamados movimientos de masa o de ladera.

Los movimientos de ladera o deslizamiento constituyen un riesgo geológico de origen natural o inducido, que debe tenerse en cuenta en la planificación del territorio sobretodo en áreas montañosas. Los deslizamientos, en general tiene lugar en zonas de difícil acceso y poco pobladas lo que causa

impacto a pequeña escala y de poca consideración, a excepción de algunos eventos catastróficos como el de Aberfan en el reino Unido o el del Nevado Huascarán en Perú. (Ayala *et al.*, 1987)

La mejor estrategia para reducir los impactos de los deslizamientos es la prevención, que precisa de la percepción de la existencia del fenómeno peligroso, de la evaluación de la peligrosidad y la adopción de medidas para mitigar los efectos (Corominas, 1992) La caracterización del peligro se expresa usualmente d forma cartográfica mediante la zonación del territorio. Los mapas resultantes de susceptibilidad y de peligrosidad son una herramienta básica para a planificación del territorio sobre todo en zonas montañosas. (Irigaray *et al.*, 2000)

Hoy en día los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos, y también la elaboración de mapas de los mismos de manera rápido y eficiente.

La ocurrencia de deslizamientos puede depender de las siguientes variables:

- Clase de rocas, suelos. Dureza de la roca y permeabilidad
- Orientación de las fracturas o grietas en la tierra.
- Cantidad de lluvia en el área.
- Cobertura vegetal

- Actividad sísmica.
- Actividad humana (cortes en ladera, falta de canalización de aguas, etc.).
- Erosión (por actividad humana y de la naturaleza).
- Pendiente

Los deslizamientos o movimientos de masa no son iguales en todos los casos, y para evitarlos o mitigarlos es indispensable saber las causas y la forma como se originan, por tanto para el área de estudio se considerará las variables que expresen la mejor correlación del fenómeno, para ser tomadas en cuenta en el modelo de predicción.

2.1.2. Elementos de los deslizamientos (Figura N°1)

- 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.

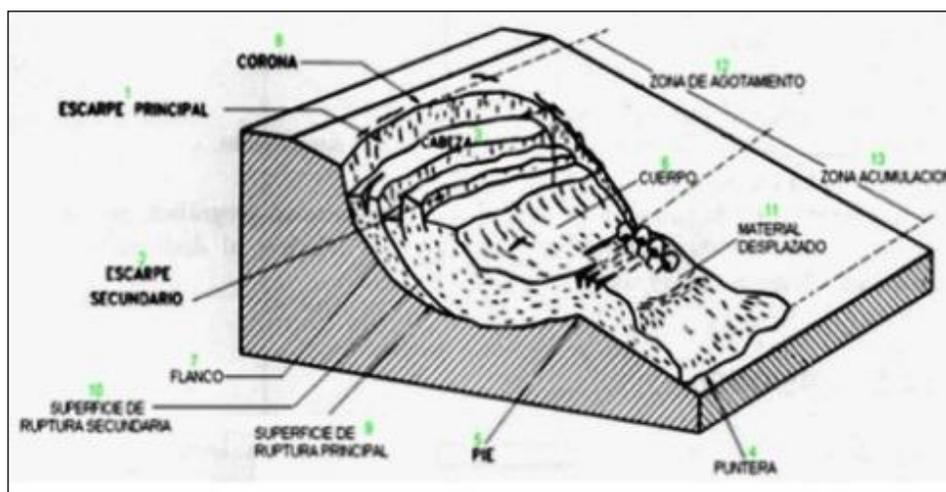


Figura N° 1: Elementos de un Deslizamiento

Fuente: Corominas y García, 1989

2.1.3. Clasificación de deslizamientos

Existen varias clasificaciones de deslizamiento; la mayoría se enfoca principalmente en el mecanismo de rotura y en la naturaleza de los materiales involucrados (Varnes, 1984; Hutchinson, 1988; Cruden y Varnes, 1996). La clasificación de Corominas y García (1997) usando los criterios anteriores (exceptuando lo que los autores definen como “deformaciones sin rotura”) los categorizan en: (Figura N°2 y Tabla N°1)

- Desprendimientos o caídas
- Vuelcos
- Deslizamientos propiamente dichos
- Flujos

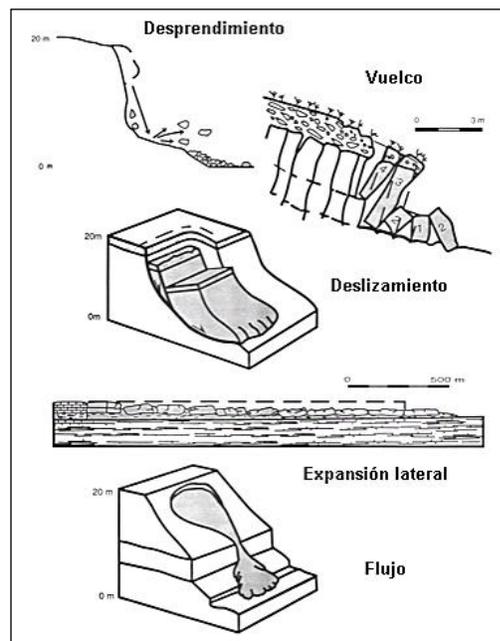


Figura N°2. Mecanismos principales de roturas de deslizamientos.
Fuente: Corominas y García, 1989

❖ Desprendimiento

Es aquel movimiento de una porción de suelo o roca, en forma de bloques aislados o masivamente que, en una gran parte de su trayectoria desciende por el aire en caída libre, volviendo a entrar en contacto con el terreno, donde se producen saltos, rebotes y rodaduras. (Corominas, 1989)

❖ **Vuelcos**

Son movimientos de rotación hacia el exterior, de una unidad o conjunto de bloques, alrededor de un eje pivotante situado por debajo del centro de gravedad de la masa movida.

❖ **Deslizamientos**

Son movimientos descendentes relativamente rápidos de una masa de suelo o roca que tiene lugar a lo largo de una o varias superficies definidas que son visibles o que pueden ser inferidas razonablemente o bien corresponder a una franja estrecha.

❖ **Extrusión plástica lateral**

Es el movimiento dominante en las expansiones laterales, acomodada por fracturas de tracción que en ocasiones pueden ser de difícil localización.

❖ **Flujos**

Son movimientos de una masa desorganizada o mezclada donde no todas las partículas se desplazan a la misma velocidad ni sus trayectorias son paralelas. Por ello la masa movida no conserva su forma en su movimiento descendente, adoptando a menudo morfologías lobuladas.

Tabla 1: Clasificación simplificada de los mecanismos de ladera modificada y tipos de deslizamientos.

TIPO DE MECANISMO	SUBTIPO	TIPO DE DESLIZAMIENTO	TÉRMINO EN INGLÉS
Movimientos donde predomina la trayectoria vertical	Superficies de deslizamiento planas	Desprendimientos o caídas	Falls
Movimiento de giro en Bloques por fractura en escarpes		Derrumbe o Volcamiento	Topples
Movimientos de grandes bloques al iniciarse la rotura		Deslizamientos Traslacionales	Slides

CONTINUACION DER TABLA

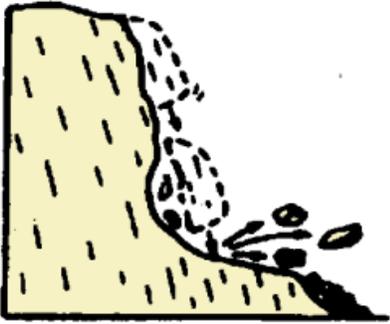
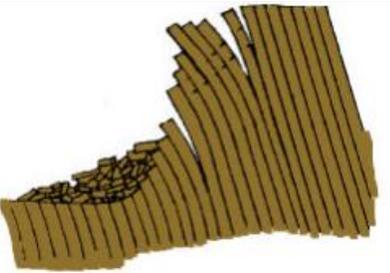
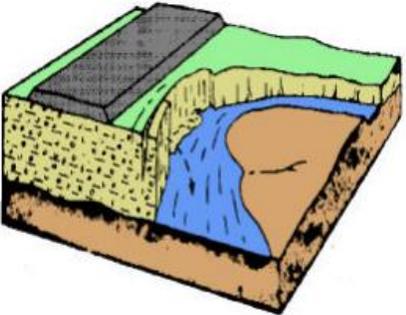
TIPO DE MECANISMO	SUBTIPO	TIPO DE DESLIZAMIENTO	TÉRMINO EN INGLÉS
Movimientos de grandes bloques al iniciarse la rotura	Deslizamientos sobre superficies curvadas	Deslizamientos Rotacionales	Rotacional Slides
Movimientos de una masa desorganizada	Flujos	Reptación Soliflucción Flujos de Derrubios Flujos de Tierra Flujos de Lodo	Creep Solifluction Debris flows Earthflows Avalanches
Movimientos con extrusión plástica lateral		Expansión Lateral	Lateral spreading

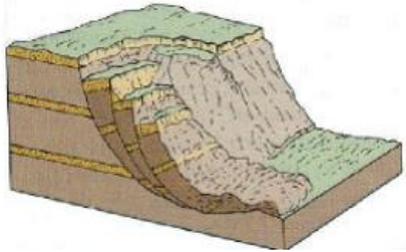
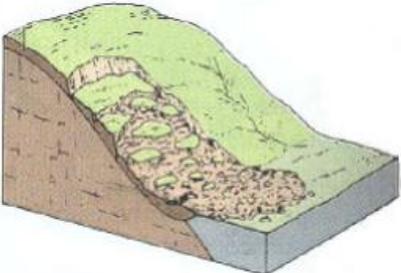
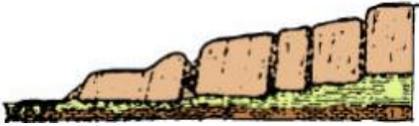
Fuente: Corominas y García, 1984

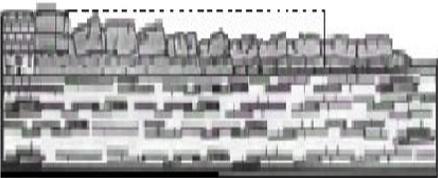
2.1.4. Tipos de movimientos del terreno

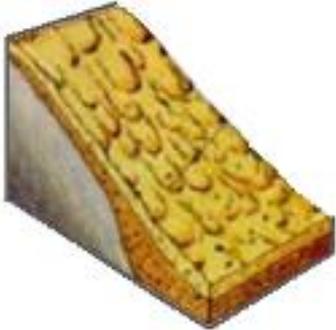
Como se muestra en la tabla N°2 a continuación:

Tabla N°2. Tipos de movimientos del terreno.

	DEFINICION	GRAFICO
<p>CAIDAS</p>	<p>Todas las caídas se inician con un desprendimiento de suelo o roca de una ladera muy empinada, a lo largo de una superficie en la que poco o ningún desplazamiento cortante se desarrolla.</p>	
		<p>Caída de rocas (Varnes, 1978)</p>
		
		<p>Basculamiento de columnas de roca (Cruden & Varnes, 1996)</p>
<p>BASCULAMIENTOS</p>	<p>Un basculamiento es la rotación hacia adelante de una masa de suelo o roca, alrededor de un punto o eje bajo el centro de gravedad de la masa desplazada.</p>	<p>CONTINUACION DE LA TABLA</p>
		
		<p>Basculamiento de detritos (Varnes, 1978)</p>
		<p>CONTINÚA →</p>

	DEFINICION	GRAFICO
DESLIZAMIENTO ROTACIONAL	Estos deslizamientos se mueven a lo largo de superficies de rupturas curvas y cóncavas, con poca deformación interna del material, la cabeza del material se mueve verticalmente hacia abajo.	 <p>Deslizamiento rotacional (Skinner & Porter, 1992)</p>
DESLIZAMIENTO TRASLACIONAL	La masa se desplaza a lo largo de una superficie de ruptura plana o suavemente ondulada y superponiéndose a superficie original del terreno.	 <p>Deslizamiento traslacional de detritos (Skinner & Porter, 1992)</p>
SEPARACIONES LATERALES	Es una extensión de masa cohesiva de suelo o roca combinada con la subsidencia del material fracturado en un material subyacente más blando.	 <p>Separación lateral en roca (Varnes, 1978)</p>
FLUJOS DE DERRUBIOS	DEFINICION	GRAFICO
	Son movimientos complejos que engloban a fragmentos rocosos, bloques, cantos y gravas en una matriz fina de arenas, limos y arcilla.	 <p>Flujo de derrubios (Skinner & Porter, 1992)</p>
CONTINÚA →		

	DEFINICION	GRAFICO
<p>FLUJOS DE LODO</p>	<p>Se forman en el momento en que la tierra y la vegetación son debilitadas considerablemente por el agua, alcanzando gran fuerza cuando la intensidad de las lluvias y su duración es larga</p>	 <p>Flujo de lodo (Skinner & Porter, 1992)</p>
<p>FLUJO DE TIERRA</p>	<p>Son movimientos lentos de materiales blandos. Estos flujos frecuentemente arrastran parte de la capa vegetal.</p>	<p>Flujo</p>  <p>Posición original Masa movida</p> <p>Flujo de tierra (Skinner & Porter, 1992)</p>
<p>EXPANSIÓN LATERAL</p>	<p>Se caracteriza porque la ampliación lateral por corte progresivo y grietas de tracción es el modo predominante de este tipo de movimiento. Los fragmentos de la capa superior pueden hundirse, desplazarse, rotar o desintegrarse, o licuarse y fluir. El mecanismo de falla puede entonces englobar rotación, traslación y flujo por lo cual éste tipo de falla puede considerarse como compleja.</p>	<p>GRAFICO</p>  <p>Expansión lateral (Skinner & Porter, 1992)</p>
<p style="text-align: right;">CONTINÚA →</p>		

	DEFINICION	GRAFICO
SOLIFLUXIÓN	Proceso geomorfológico característico de zonas de clima peri glacial (aunque puede darse incluso en los trópicos), consiste en el desplazamiento masivo y lento por gravedad de formaciones arcillosas u otros tipos de suelo sobre el permafrost a causa de la plasticidad y fluidez adquirida por aquéllos cuando absorben gran cantidad de agua.	 <p data-bbox="971 699 1386 726">Solifluxión (Skinner & Porter, 1992)</p>

Fuente: Modificado de Cruden & Varnes, 1996

Dependiendo de la profundidad a la que se encuentre la superficie del deslizamiento, el movimiento en masa puede ser superficial, y que afecta a poco volumen, o profundo, y que afecta a grandes volúmenes. En este caso presenta un perfil cóncavo que imprime a la masa, en el deslizamiento, un movimiento de rotación.

En los deslizamientos propiamente dichos, el movimiento se debe a fallas por corte a lo largo de una o varias superficies visibles o que pueden inferirse razonablemente, existen dos grupos de deslizamientos:

(a) Rotacionales: la masa en movimiento sufre un giro alrededor de un punto situado arriba del centro del centro de gravedad y la superficie de rotura es curva y cóncava; por lo general la masa es hundida en la corona y con elevación en el pie; en la depresión que se forma en la cabeza puede almacenarse agua que se infiltra a través de grietas o de la

superficie de falla, esta hincha el material y origina presiones excesivas que hacen que el deslizamiento se mantenga activo. (Figura N°3)

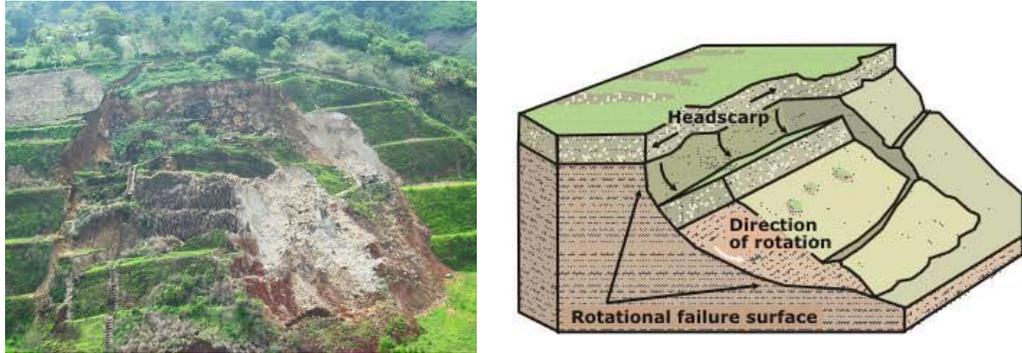


Figura N°3. Deslizamiento rotacional en El Salvador
Fuente: Mora, 1992

(b) Traslacionales: la masa se desliza hacia afuera o hacia abajo a lo largo de una superficie más o menos plana o de ondulación suave y tiene poco o ningún movimiento de rotación.(Figura N°4)

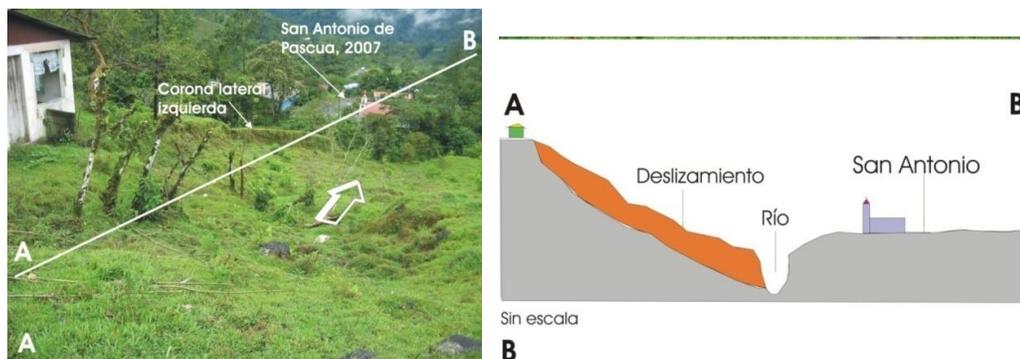


Figura N°4. Deslizamiento traslacional en San Antonio de Pasqua, Costa Rica

Fuente: Revista Letras Verdes, 2007

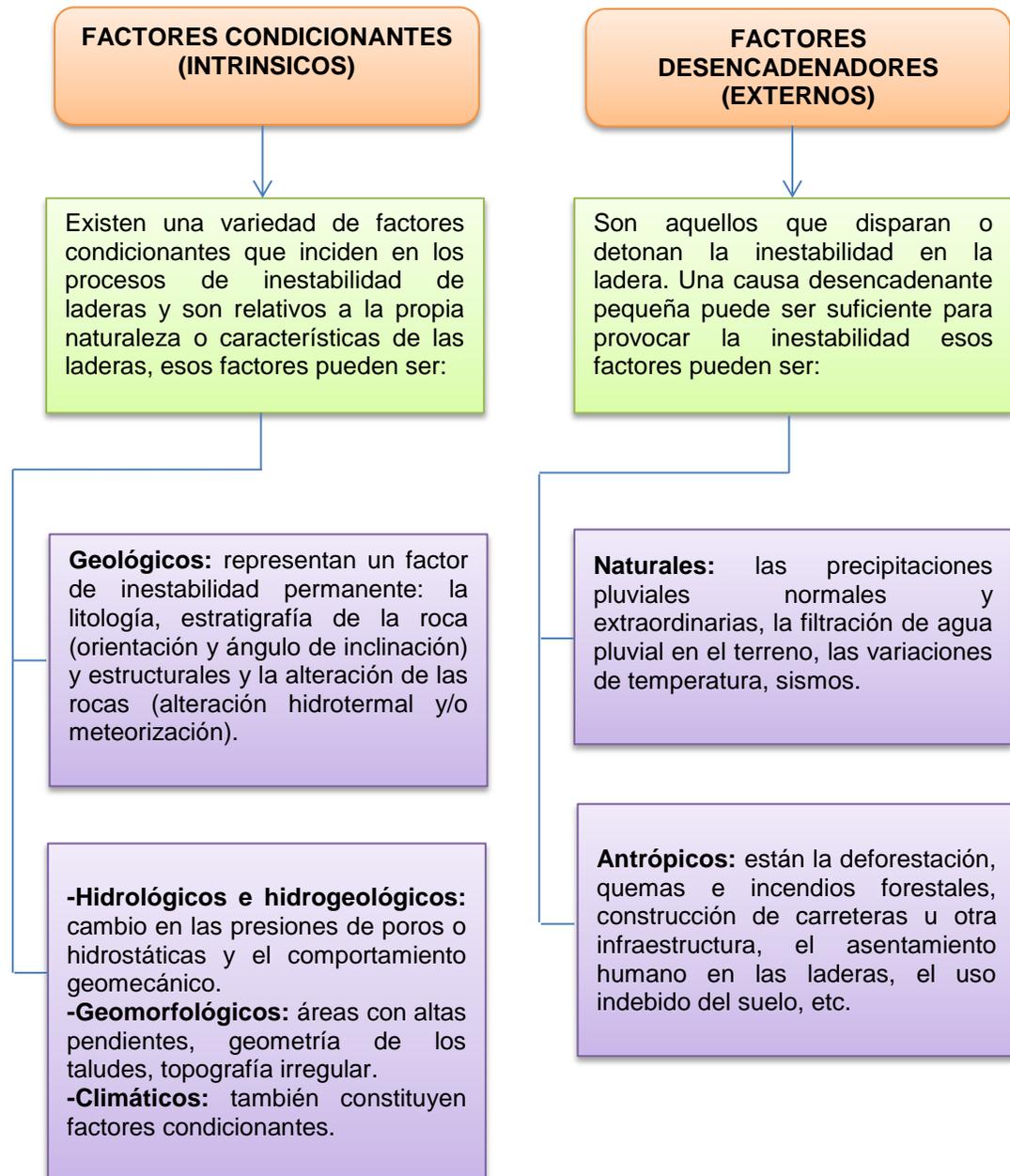
La principal diferencia entre estos dos movimientos radica en el momento de planear medida correctivas; así en el primero, ciertas medida con la descarga

en la cabeza y el contrapeso en el pie serán efectivas en los rotacionales se inútiles en los traslacionales.

Existen otros dos tipos de deslizamientos entre los que se puede citar a: deslizamientos de bloque, deslizamientos en forma de cuña, deslizamientos planares, etc. Los deslizamientos sobre discontinuidades sencillas en roca se les denomina deslizamientos de bloque, cuando ocurren a lo largo de dos discontinuidades se le conoce como deslizamiento en forma de cuña.

Pueden ser muy destructivos especialmente en regiones montañosas donde los deslizamientos masivos de roca resultan desastrosos y en muchos casos no pueden ser prevenidos. Los deslizamientos planares consisten en el movimiento de un bloque (o Bloques) de suelo o roca a lo largo de una superficie de falla plana bien definida. Estos deslizamientos pueden ocurrir lenta o rápidamente (Campos, C, 2003)

Factores y detonantes de movimientos de deslizamientos



Cuadro N° 1: Factores intrínsecos y externos

Fuente: INETER, 2005

Para el presente estudio se usaran ciertos factores de inestabilidad que son denominados “parámetros” que se clasifican en tres grandes grupos: Geológicos, Topográficos y Ambientales:

- **Litología** permite conocer las características de los suelos y rocas.
- **Angulo de talud** referido a las pendientes; generalmente las pendientes más pronunciadas tienen mayor probabilidad de deslizamientos. Esto no impide que ocurran deslizamientos en pendientes suaves y viceversa, las pendientes más pronunciadas pueden no ser siempre las más peligrosas.
- **Clima** promedio de precipitación anual expresada en mm/año, permite conocer la cantidad de lluvia en una determinada zona.
- **Cobertura vegetal** (índices de protección del suelo) referido al tipo de vegetación, madurez, estado y protección que brinda al suelo.
- **Fallas y discontinuidades** Es un plano de ruptura de una roca, donde hay un desplazamiento provocado por esfuerzos tectónicos.
- **Red hidrográfica** conformada por todos los cuerpos de agua: ríos, lagunas, lagos, quebradas, entre otros.
- **Geología**_(índice de resistencia de la roca a la erosión)
- **Suelos**_(% retención de humedad).

En general, el mecanismo disparador de los movimientos en masa está asociado con la realización de cortes en terreno natural inestable sin la debida

protección geotécnica, otros factores que pueden dinamizar los movimientos en masa, incluyen la actividad sísmica, la saturación del suelo por fluidos y la incidencia de procesos erosivos. Cuantos más factores se apliquen a un sitio específico, mayores serán las posibilidades de que el sitio experimente desprendimientos. (Andocilla, L., 2012)

Las intervenciones antrópicas que pueden contribuir a generar riesgo de deslizamientos en áreas susceptibles a los fenómenos de deslizamientos son:

- Cortes en el terreno como de carreteras, cortes para construcción de casas, que crean masas inestables de material sin apoyo, generando pendientes negativas. (Foto N°1)



Foto N°1. Corte del terreno para construcción de carreteras.

- Construcción de muros sin posibilidad para drenaje. El agua del suelo retenida detrás de los muros incrementa la presión en los poros y el peso en el material retenido, desestabiliza la masa retenida. (Foto N°2)



Foto N°2. Muro de contención

- Remover plantas de raíces profundas desestabiliza el suelo en una ladera e incrementa el potencial de deslizamiento. (Foto N°3)



Fuente: Greenpeace

Foto N°3. Remoción de la vegetación de las laderas.

- El mal manejo de aguas superficiales o su superficiales en las laderas a través de la irrigación, o votando las aguas residuales sobre ellos. (Foto N°4)



Foto N°4. Irrigación en terrazas en pendiente.

- Rellenos en zonas de pendientes y con una pobre compactación. (Hermosa, L., 2009) (Foto N°5)



Foto N°5. Relleno y compactación en zonas de pendiente.

2.1.5. Susceptibilidad del Terreno a Deslizamientos

La susceptibilidad es la potencialidad de un terreno o área, a la ocurrencia de deslizamientos y no, implica el aspecto temporal del fenómeno, (Lana et al, 2004).

En el estudio de la susceptibilidad de los deslizamientos se consideran tres aspectos importantes:

- Inventario de los deslizamientos.
- Morfología de la zona de estudio.
- Análisis de los factores de ocurrencia.

La metodología usada para el estudio de la susceptibilidad del terreno a deslizamientos es un proceso de análisis de los factores o variables que los condicionan, y que logran interrelacionarse en función a la realidad del terreno. (Lana et al, 2004)

2.2. Integración de los métodos de susceptibilidad a deslizamientos con Sistemas de Información Geográfica

Cuando se pretende realizar una cartografía de una zona se mezclan dos conceptos: la situación georeferenciada del dato o información que se va a cartografiar y el dato temático. Estas dos características, la componente

espacial y la información temática configuran la base para entender los SIG. (Bosque, 1992)

2.2.1. Generalidades

Un sistema de Información Geográfica se puede definir como un conjunto de mapas de la misma porción del territorio, donde un lugar concreto tiene la misma localización en todos los mapas incluidos en el sistema de temáticas para obtener un mejor conocimiento de esa zona. Un SIG se puede considerar esencialmente como una tecnología (un sistema de hardware y software) aplicada a la resolución de problemas territoriales. (Bosque, 1992)

Un SIG está relacionado con la capacidad que posee éste de construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales, esto se logra aplicando una serie de procedimientos específicos que generan aún más información para el análisis. La construcción de modelos de simulación, se convierten en una valiosa herramienta para analizar fenómenos que tengan relación con tendencias y así establecer diferentes factores influyentes. (Obermeyer & Pinto, 1994)

El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma,

señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, facilitando al profesional la posibilidad de analizar la información existente, con el fin de generar otra nueva que no se podría obtener de otras formas de análisis. (Figura N°5)

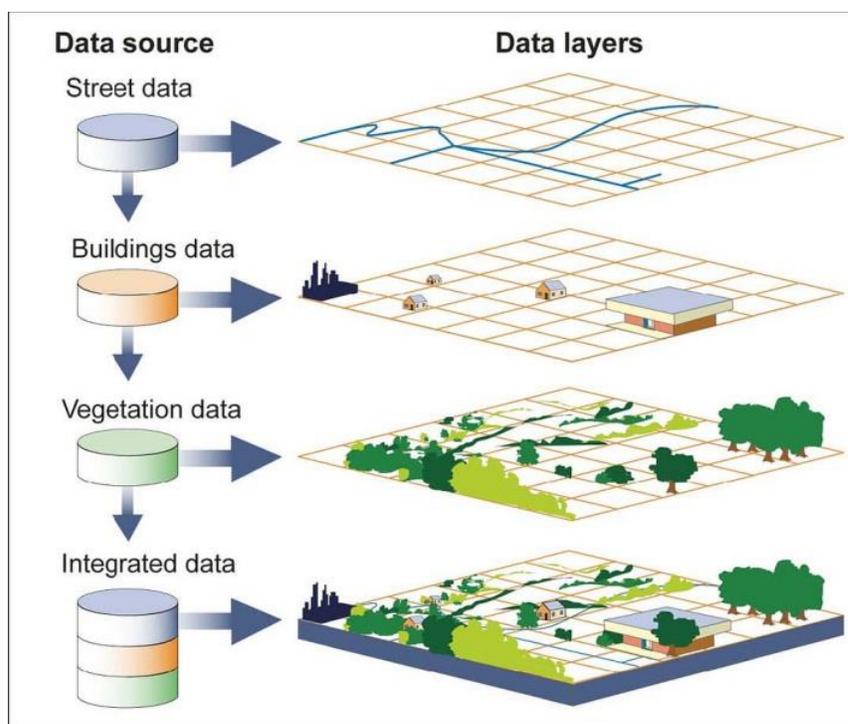


Figura N°5: Representación gráfica de un SIG

Fuente: National Geographic

El beneficio de un SIG es que, una vez ingresada la base de datos y creadas las respectivas coberturas, cada una con sus atributos, permite visualizar esta información, capa por capa, a manera de mapas de presentación. Asimismo, se obtienen notas, imágenes y bases de datos ligadas a los objetos georeferenciados.

Algunos procedimientos de modelización comúnmente incluidos en las rutinas de los programas de SIG son la modelización gráfica, que permite combinar capas de datos en un número ilimitado de formas, y la modelización script, que permite combinar las capas de datos a través de operadores y condicionales (Avilés, Hermosa, 2009). Esto puede hacerse para información de un momento específico (transversal) o a lo largo del tiempo (longitudinal), de acuerdo con su disposición y el tipo de modelo estadístico, de simulación o visual que se plantee.

2.2.2. Animación 3D en ArcGIS

Las animaciones hacen que los documentos 3D cobren vida al almacenar acciones para que puedan ser reproducidas. Pueden ayudar a visualizar los cambios de perspectiva, los cambios en las propiedades del documento, los movimientos geográficos y los cambios temporales.

Se puede crear animaciones con la barra de herramientas Animación. ArcGIS permite crear diferentes tipos de animaciones en ArcMap, ArcScene y ArcGlobe, por ejemplo, para manipular datos, navegar a través de diferentes perspectivas o ayudarlo a comprender los patrones en los datos con el tiempo.

Una animación consiste en uno o más pistas. Las pistas controlan los cambios dinámicos de las propiedades de un objeto, como el color de fondo de un documento, la visibilidad de una capa o la ubicación de una cámara. El objeto puede ser una escena o un globo, una capa o una cámara.

Las pistas de animación se almacenan en el documento actual. También se pueden guardar como un archivo individual que puede ser compartido por varios documentos de escena. Una animación también se puede exportar como un archivo Audio Video Interleaved (.avi) o QuickTime (.mov) para poder reproducirla con reproductores de video de terceros.

Se utiliza las animaciones para automatizar los procesos que se deben realizar para mostrar puntos que sólo se pueden hacer a través de dinámicas visuales. (ArcGIS Resource Centre – Desktop 10)

La modelización espacial permite construir zonas, estimar movimientos o desplazamientos y velocidades de elementos sobre áreas y vectores, estimar volúmenes de elementos, así como la valoración de su evolución en el tiempo, y

valorar procesos en el territorio, incluida la interacción de distintas variables según supuestos definidos y formalizados.

Con la vista en 3D se llega a un nivel avanzado de visualización, análisis y generación de superficie porque se ve grandes conjuntos de datos en tres dimensiones desde múltiples puntos de vista. Sus herramientas permiten:

- Analizar terrenos y sus datos, descubriendo nuevas perspectivas.
- Modelizar entornos bajo tierra: minas, afluentes, redes de servicio bajo tierra.
- Compartir vistas tridimensionales, animaciones y análisis

Una visión tridimensional crea una simulación realista de un proyecto o situación para ayudar a planificar momentos críticos y preparar al equipo de trabajo de forma proactiva. Hoy en día, la extensión se utiliza en diversos sectores, desde urbanismo (donde se visualiza el impacto de una propuesta), la geología (examen de estructuras subterráneas, cálculo de volúmenes), seguridad (mejor conciencia de las situaciones de riesgo), hasta el ámbito militar para la simulación realista de operaciones. (ESRI, ArcGIS Resources)

(Gráfico N°2)

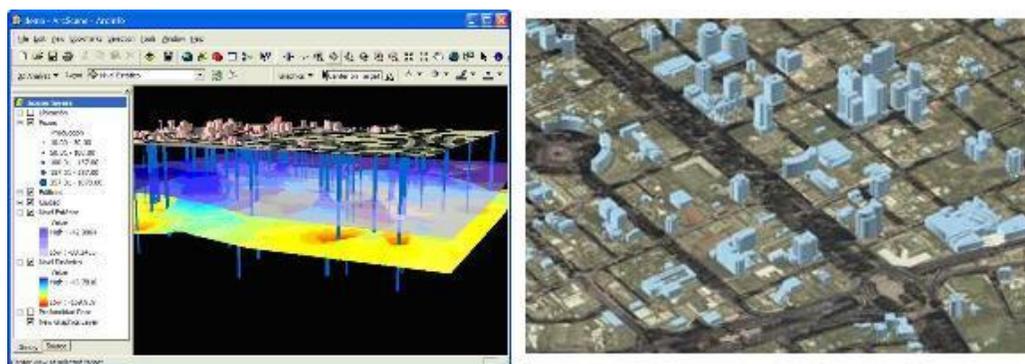


Gráfico N°2. Modelamiento en 3D.

Fuente: ESRI, ArcGis grafico

2.2.2.1. Beneficios del 3D

Una perspectiva tridimensional crea una simulación realista de un proyecto, un entorno o una situación crítica para ayudar a planificar y preparar de forma proactiva cualquier suceso.

- Los planificadores urbanos pueden visualizar el impacto de los proyectos que proponen y compartir las líneas clave con influenciadores dentro de la comunidad.
- Los geólogos pueden examinar estructuras subterráneas y calcular volúmenes.
- Los responsables pueden crear y mantener los edificios, infraestructura y redes de servicios.

- Los ingenieros de obras públicas y arquitectos pueden llevar a cabo análisis temporales, de sombras provocadas, infraestructura de servicios, entre otros.
- La policía y personal de seguridad tienen mejor conciencia de las situaciones.
- El personal militar puede simular y analizar misiones y vuelos con patrones realistas. (ESRI, ArcGIS Resources)

2.2.3. Construcción de bases de datos geográficas

La construcción de una base de datos geográfica implica un proceso de abstracción para pasar de la complejidad del mundo real a una representación simplificada asequible para el lenguaje de los ordenadores actuales. Este proceso de abstracción tiene diversos niveles y normalmente comienza con la concepción de la estructura de la base de datos, generalmente en capas; en esta fase, y dependiendo de la utilidad que se vaya a dar a la información a compilar, se seleccionan las capas temáticas a incluir.

Pero la estructuración de la información espacial procedente del mundo real en capas conlleva cierto nivel de dificultad. Existen relaciones espaciales entre los objetos geográficos que el sistema no puede obviar; es lo que se

denomina topología, que en realidad es el método matemático-lógico usado para definir las relaciones espaciales entre los objetos geográficos.

Existen diversas formas de para modelar estas relaciones entre los objetos geográficos, dependiendo de la forma en que ello se lleve a cabo se tiene uno u otro tipo de Sistema de Información Geográfica dentro de una estructura. (Avilés, Hermosa, 2009)

2.2.4. Análisis Espacial

El análisis espacial es la denominación habitualmente empleada para referirse a un amplio conjunto de procedimientos de estudio de los datos geográficos en los que se considera de alguna manera sus características espaciales. El análisis espacial importa la metodología estadística y su adaptación al estudio de los datos espaciales (Bosque, 1992).

2.2.5. Modelos cartográficos.

Los modelos cartográficos se basan en la utilización de las funciones de análisis de un sistema de información geográfica bajo una secuencia lógica de tal manera que se puedan resolver problemas espaciales complejos (IGAC, 1995). (Gráfico N°3)

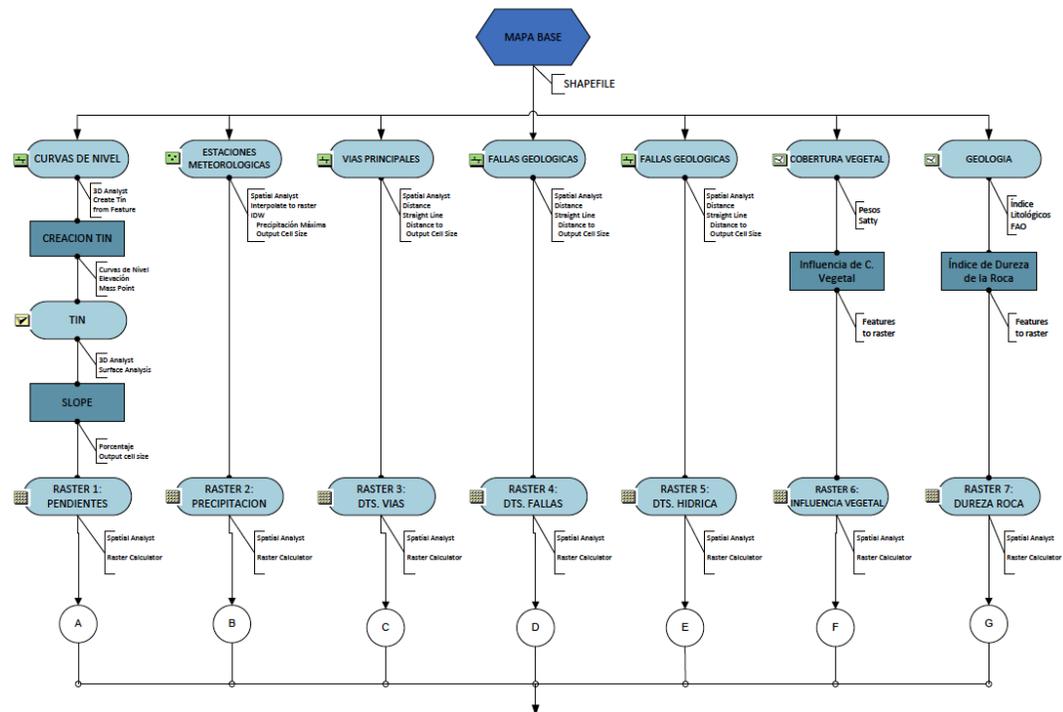


Gráfico N°3. Modelo cartográfico

Fuente: Andocilla, 2012

2.2.5.1. Características

Las principales características de los modelos cartográficos son:

- ❖ Presentación de una secuencia lógica de operaciones analíticas expresadas en diagramas de flujo.
- ❖ Usualmente están codificadas en macros (lenguajes de comando muy simples),
- ❖ Apoyan el uso de SIG en planeamiento, realización de consensos y resolución de conflictos.

- ❖ Los esquemas de flujo son la implementación SIG de los modelos conceptuales del problema y su solución, son el modelo SIG.
- ❖ Son replicables (que se pueden copiar el modelo), reciclables (se modifica el modelo y se lo vuelve a utilizar) y reutilizables (se puede cambiar solamente de cobertura y utilizar el modelo).

En el esquema de flujo se presentan primero los datos o mapas primitivos de entrada, luego los mapas derivados, a continuación los mapas de interpretación y finalmente el resultado ó interpretación final integrada. Un mapa de entrada puede ser el de altitudes, el mapa derivado podría ser el de pendientes y el mapa interpretado sería por ejemplo el mapa con pendientes seleccionadas.

2.2.5.2. Tipos de modelos de Datos Espaciales

La mayoría de los elementos que existen en la naturaleza pueden ser representados mediante formas geométricas (puntos, líneas o polígonos, esto es, **vectores**) o mediante celdillas con información (**raster**). Son formas de ilustrar los espacios intuitivos y versátiles, que ayudan a comprender mejor los elementos objeto de estudio según su naturaleza.

En función de la forma de representar el espacio de la que hacen uso podemos clasificar los SIGs en dos grandes modelos o formatos: (Figura N°6)

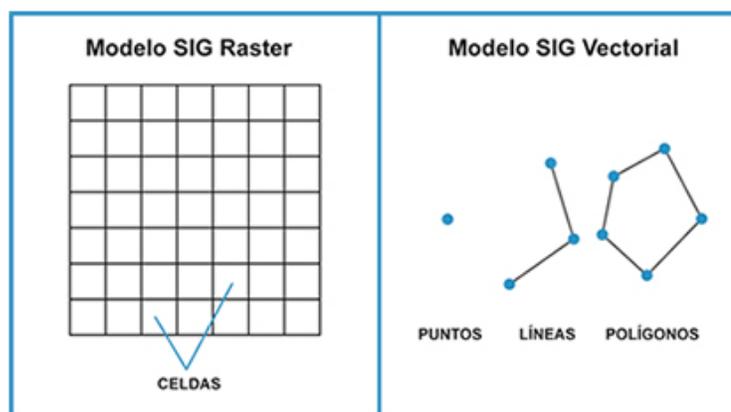


Figura N°6. Modelo raster y modelo vector

Fuente: CEA, SIG

La elección de un modelo u otro dependerá de si las propiedades topológicas son importantes para el análisis. Sí es así, el modelo de datos vectorial es la mejor opción, pero su estructura de datos, aunque muy precisa, es mucho más compleja y esto puede ralentizar el proceso. Por ello, si el análisis que nos interesa no requiere acudir a las propiedades topológicas, es mucho más rápido, sencillo y eficaz el uso del formato raster.

También es más fácil decantarse por una estructura de datos vectorial cuando hay que reflejar más de un atributo en un mismo espacio. Usar un formato raster nos obligaría a crear una capa distinta para cada atributo. (CEA-SIG)

2.2.6. Álgebra de Mapas

El álgebra de mapas es un lenguaje diseñado específicamente para sistemas geográficos basados en celdas. El lenguaje permite al usuario ordenar sus pensamientos y ofrece las reglas y sintaxis necesaria para que el usuario se pueda comunicar con el computador. (Figura 7)

Para manipular los mapas o producir nuevos mapas se utilizan comandos y operadores. Los comandos son instrucciones principalmente para el manejo de los grids. Por ejemplo listar, copiar, borrar, los comandos no crean nuevos grids. Los operadores desarrollan cálculos matemáticos dentro y entre grids, con valores enteros o flotantes, generando nuevos grids. Los valores enteros o flotantes están relacionados con el concepto de precisión, el cual a su vez tiene implicaciones en capacidad de almacenamiento.

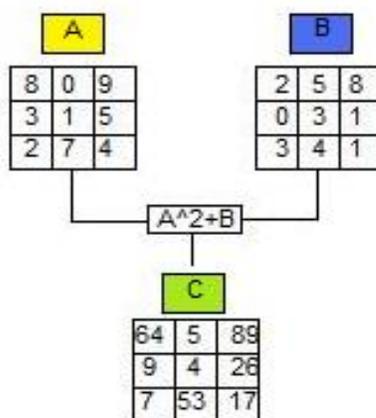


Figura N°7: Álgebra de Mapas

Fuente: Avilés M, Hermosa L.2009

2.2.7. Generación de modelos cartográficos en software (SIG)

Para crear un Modelo SIG que ayude a resolver algún problema requiere de diferentes etapas, como:

- **Conceptualización**, es el análisis del sistema real, definición de las partes relevantes y de los procesos clave: identificación y planteamiento claro del problema a solucionar. Límites del problema en cuanto alcance a analizar. Se define el dominio espacial y temporal del estudio.
- **Diseño**, la etapa de diseño consiste en establecer las variables de estado, selección y exclusión de partes y relaciones, así como las escalas temporal y espacial en las cuales se desarrollan las partes. Se definen las operaciones analíticas a realizar entre los grupos de variables. Se crea un modelo físico de datos.
- **Implementación**, en esta fase se traduce a código el modelo esquemático; implica la solución a problemas de programación (lenguajes, planteamiento de ecuaciones, escritura de código).
- **Análisis y modelamiento**, en la fase de análisis y modelamiento propiamente dicha se seleccionan los métodos y operaciones específicas para los análisis de datos. Se identifican y definen las interfaces de análisis externos. Se detallan esquemas de flujo.
- **Verificación funcional**, es la fase de análisis de estabilidad. En esta fase se examina si el modelo genera resultados razonables de sensibilidad. Se ve la variación de los resultados ante cambios en las

variables dentro del rango de variación natural; un parámetro crítico es aquél que induce cambios fuertes de incertidumbre, analizar los resultados ante cambios en los parámetros dentro del error estándar de cada uno.

- **Validación**, es la comprobación del modelo con datos independientes. La validación nunca es absoluta; unos buenos resultados no garantizan un comportamiento correcto en todos los escenarios. (Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009)

2.3. Lógica Fuzzy (Difusa)

La Lógica Fuzzy es una de las herramientas de la inteligencia artificial que utiliza la experiencia del ser humano para generar un razonamiento que permite la toma de decisiones. Mediante esta herramienta se puede representar un sistema de gestión a través de un modelo matemático no-lineal, para ello se hace uso de variables lingüísticas y una serie de condiciones o reglas previamente definidas.

2.3.1. Generalidades

La Lógica Fuzzy también es conocida como Lógica Difusa o Lógica Borrosa, y se basa en lo relativo de lo observado. En la lógica clásica (binaria o booleana) se tiene solo dos estados posibles: verdadero y falso (1 ó 0), en la

lógica Multivaluada se incluyen sistemas lógicos que admiten varios valores de verdad posibles. En cambio en la lógica Difusa se asigna valores intermedios dentro de una escala a fin de cuantificar una incertidumbre.

Según la lógica clásica un elemento pertenece o no pertenece al conjunto, sin embargo la lógica borrosa lo que hace es poner un grado de pertenencia al conjunto. Este grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso: para cada valor que puede tomar la variable x , la función característica $\mu_A(x)$ proporciona el grado de pertenencia de ese valor x al conjunto difuso A . (Durán & Benito, 2008)

Los subconjuntos difusos (o partes borrosas de un conjunto) fueron inventados para modelar la representación humana de los conocimientos (por ejemplo para medir nuestra ignorancia o una imprecisión objetiva) y mejorar así los sistemas de decisión, de ayuda a la decisión, y de inteligencia artificial.

Esta teoría nos permite manejar y procesar ciertos tipos de información en los cuales se manejen términos inexactos, imprecisos o subjetivos. De una manera similar a como lo hace el cerebro humano, es posible ordenar un razonamiento basado en reglas imprecisas y en datos incompletos (López, 2001)

La clasificación difusa, borrosa o Fuzzy evalúa la posibilidad de que

cada elemento o pixel pertenezca a un determinado sistema o fenómeno (Guo *et. al.*, 2004), este puede ser el caso de pixeles que pertenezcan o no a una clase específica en una banda de una imagen satelital. (Figura N°8)

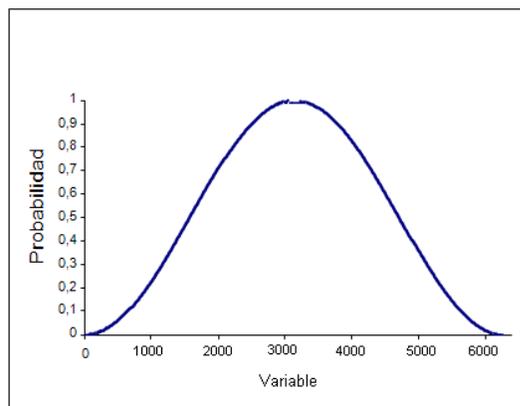


Figura N°8: Probabilidad tomando una variable
Fuente: Padilla, 2006

Las funciones sinusoidales o cosinusoidales se ajustan bastante bien a este tipo de representaciones, es por esto que utilizaremos ecuaciones en función de seno de alfa y coseno de alfa, (Ruiz, *et. Al.* 2007) donde alfa estará en función del fenómeno o variable que se desea modelar o representar, como se dijo antes este puede ser una clase en una imagen satelital.

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

$$P = f(\text{sen}\alpha) \quad \text{Ecuación [1]}$$

Donde:

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.

$$P = \text{sen}^2 \alpha \quad \text{Ecuación [2]}$$

Puntos importantes en la función:

Estas funciones están controladas por cuatro puntos situados de la siguiente forma (Figura N° 9):

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.

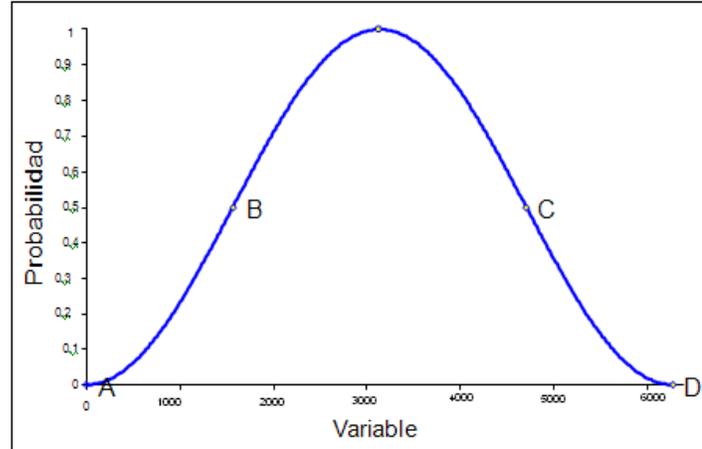


Figura N°9: Puntos importantes del modelo.

Fuente: Padilla, 2006

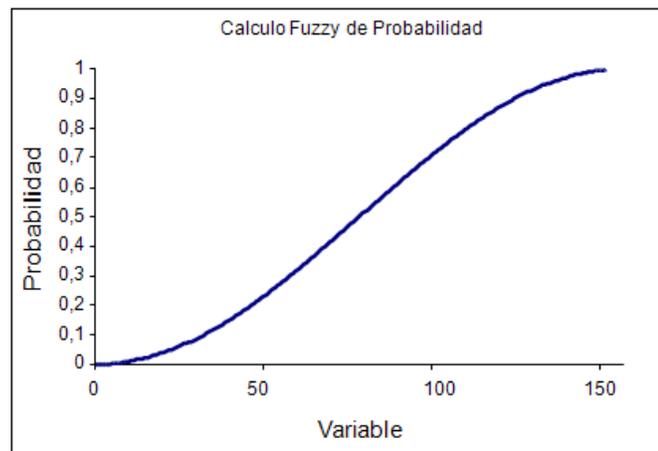


Figura N°10: Probabilidad Creciente

Fuente: Padilla, 2006

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 (Ver Figura N°9). Se tienen tres casos de los que se va a tomar como ejemplo el de la

curva simétrica (Figura N°10).

$$P = \text{Sen}^2\alpha$$

$$P' = 2 * \text{Sen}\alpha * \text{Cos } \alpha$$

$$P'' = 2 * \text{Sen}\alpha * - \text{Sen}\alpha + 2 * \text{Cos } \alpha * \text{Cos } \alpha$$

$$P'' = 2 * \text{Cos}^2\alpha - \text{Sen}^2\alpha$$

$$\text{Cos}^2\alpha - \text{Sen}^2\alpha = 0$$

$$1 - \text{Sen}^2\alpha - \text{Sen}^2\alpha = 0$$

$$1 - 2 * \text{Sen}^2\alpha = 0$$

$$\text{Sen}^2\alpha = 1/2$$

$$\alpha_1 = \pi / 4$$

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

Finalmente:

$$P1(A; 0)$$

$$P2 (B; \pi / 4)$$

$$P3 (C; 3 \pi / 4)$$

$$P4 (D; \pi)$$

$$P5 ((B + C)/2; \pi/2), \text{ donde } P5 \text{ corresponde al punto medio de la}$$

curva.

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 colase 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. (Figura N°11)

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

Figura N°11: Probabilidad total con más de dos variables

Fuente: Revista Geoespacial No 4.

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

Ecuación [3]

Donde:

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

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

n: número total de variables.

2.4. Método Mora Vahrson

Mora-Vahrson es un método para clasificar la amenaza por deslizamientos en **áreas tropicales con alta sismicidad** (Mora, S. & Vahrson, W.G, 1991).

Se considera como un método explícito, probabilístico de análisis multivariado, basado en indicadores morfodinámicos, los mismos que se puede obtener de manera sencilla.

Los indicadores morfodinámicos conocidos como factores pasivos (o factores de susceptibilidad) y factores de disparo, se combinan mediante una ponderación que define su grado de influencia, dando como resultado un valor relativo de la amenaza por movimientos en masa.

Los factores de susceptibilidad toman en cuenta no sólo las condiciones litológicas, freáticas, humedad, espesor de suelos, sino también la rugosidad del terreno. Los factores de disparo de los deslizamientos son: intensidades sísmicas y lluvias intensas.

Es así como se considera que el grado de susceptibilidad al deslizamiento es el producto de los elementos pasivos y de la acción de los factores de disparo (Mora, R. et al., 1992):

$$H = EP * D \qquad \text{Ecuación [4]}$$

Donde:

H = grado de susceptibilidad al movimiento en masa,

EP = valor producto de la combinación de los elementos pasivos, y

D = valor del factor de disparo.

Por su parte el valor de los elementos pasivos se compone de los siguientes parámetros (Mora, R. et al., 1992):

$$\mathbf{EP = SI * Sh * Sp} \qquad \mathbf{Ecuación [5]}$$

Donde:

SI = valor del parámetro de susceptibilidad litológica,

Sh = valor del parámetro de humedad del terreno, y

Sp = valor del parámetro de la pendiente.

El factor de disparo se compone de los siguientes parámetros (Mora, R. et al., 1992):

$$\mathbf{D = Ds + DII} \qquad \mathbf{Ecuación [6]}$$

Donde:

Ds = valor del parámetro de disparo por sismicidad, y

DII = valor del parámetro de disparo por lluvia.

Sustituyendo los parámetros apropiados, la ecuación original se puede expresar como (Mora, R. et al., 1992):

$$\mathbf{H = (SI * Sh * Sp) * (Ds + DII)} \qquad \mathbf{Ecuación [7]}$$

De esta ecuación se pueden derivar las relaciones (Mora, R. et al., 1992):

$$\mathbf{Hs = (SI * Sh * Sp) * (Ds)} \qquad \mathbf{Ecuación [8]}$$

$$\mathbf{HII = (SI * Sh * Sp) * (DII)} \qquad \mathbf{Ecuación [9]}$$

Donde:

Hs = susceptibilidad a movimientos en masa por sismicidad, y

Hll = susceptibilidad a movimientos en masa por lluvias.

Para los resultados de la combinación de todos los factores no se puede establecer una escala de valores única, pues los mismos dependen de las condiciones de cada área estudiada. Por este motivo, se sugiere dividir el rango de valores obtenidos, para el área de estudio, en cinco clases de susceptibilidad y asignar los calificativos que se presentan en la Tabla N° 3.

El calificativo de susceptibilidad es una representación cuantitativa de los diferentes niveles de amenaza, que muestra solamente el rango de amenaza relativa en un sitio en particular y no la amenaza absoluta. Se sugiere que la asignación de rangos se efectúe con la utilización de un histograma de los resultados de la combinación de parámetros.

Se debe enfatizar en que esta clasificación relativa de la susceptibilidad, se basa en la influencia que tienen las diferentes condiciones examinadas en un área específica; es decir, las áreas de susceptibilidad determinadas para un sitio son válidas únicamente para este sitio. Condiciones similares, encontradas fuera del sitio, pueden producir un resultado diferente por una pequeña diferencia en alguno de los factores. (Mora Rolando, 2004)

Tabla 3: Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento

CLASE	CALIFICATIVO DE SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO	CARACTERISTICAS
I	Muy baja	Sectores estables, no se requieren medidas correctivas. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc.
II	Baja	Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado.
III	Moderada	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos urbanos de baja densidad.
CONTINUACION DE LA TABLA		
IV	Alta	Probabilidad de deslizamiento alta (< 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Para su utilización se deben realizar estudios estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.
V	Muy alta	Probabilidad de deslizamiento muy alta (> 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Prohibido su uso con fines urbanos, se recomienda usarlos como áreas de protección.

Fuente: Mora, 1993

2.4.1. Descripción de los parámetros de la metodología

- **Parámetro de la pendiente**

Es el parámetro utilizado para analizar la rugosidad del terreno, involucra el concepto de pendiente de las laderas y se define como:

$$Rr = dhmax / A \quad \text{Ecuación [10]}$$

Donde:

Rr: Índice de Relieve Relativo (m/Km²)

dhmax: máxima diferencia de elevación por unidad de área (m)

A: área (km²)

Tabla N° 4. Índice de relieve relativo

Índice de relieve relativo (n/km ²)	Calificativo	Valor del parámetro
0-75	Muy bajo	0
76-175	Bajo	1
176-300	Moderado o medio	2
301-500	Alto	3
501-800	Muy alto	4
>800	Extremo	5

Fuente: Mora, 1992

Este parámetro utiliza las clases de pendiente de van Zuidam (1986), con las cuales se describen los procesos característicos y esperados, y las condiciones del terreno, (Ver Tabla N°5). Las clases de pendientes pueden coincidir con los sectores críticos, donde los procesos de deslizamiento son dominantes (van Zuidam, 1986).

Tabla N° 5: Clases de pendientes, condiciones del terreno, colores sugeridos y valoración del parámetro Sp.

Clase de pendiente		Condiciones del terreno	Valor del parámetro Sp
Grados	Porcentaje		
0-2	0-2	Planicie, sin denudación apreciable	0
2-4	2-7	Pendiente muy baja, peligro de erosión	1
4-8	7-15	Pendiente baja, peligro severo de erosión	2
8-16	15-30	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro severo de erosión.	3
Clase de pendiente	Condiciones del terreno	Valor del parámetro Sp	Clase de pendiente Grados
Grados	Porcentaje		
16-35	30-70	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos	4
35-55	70-140	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible	5
>55	>140	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada	6

Fuente: Mora, 1992

- Parámetro de susceptibilidad litológica S_l

Los tipos de suelos y rocas juegan un papel preponderante en el comportamiento dinámico de las laderas (Mora, R. et al., 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, etc., influyen claramente en la estabilidad o inestabilidad de las laderas (Mora, R. et al., 1992).

La evaluación de este parámetro puede realizarse según las sugerencias de Mora, R. et al., (1992), sin embargo, si se cuenta con descripciones de los macizos rocosos y la evaluación de propiedades geotécnicas de suelos. La tabla 6 se ha confeccionado con la utilización de la clasificación de macizos rocosos RMR (Bieniawski, 1989), y la Tabla N° 6 y N°7 con la modificación del cuadro propuesto por (Miles & Keafer, 2002)

Tabla N°6. Valoración del parámetro de susceptibilidad litológica

Valoración RMR	Numero de clase RMR	Descripción RMR	Valoración del parámetro S_i
<20	I	Muy pobre	1
21-40	II	Pobre	2
41-60	III	Medio	3
61-80	IV	Bueno	4
81-100	V	Muy bueno	5

Fuente: Mora, 1992

Tabla N°7. Valoración del parámetro de la susceptibilidad litológica

Angulo de fricción efectiva (grados)	Cohesión afectiva (kPa)	Descripción	Valoración del parámetro S_i
0-15	0-10	Muy bajo	1
15-20	10-15	Bajo	2
20-25	15-20	Medio	3
25-30	20-25	Alto	4
>30	>25	Muy alto	5

Fuente: Mora, 1992

- **Parámetro de humedad del terreno (S_h)**

En este caso se recurre a los promedios mensuales de precipitación, efectuando con ellos un balance hídrico simplificado, en donde se asume 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 (Mora, R. et al., 1992).

Seguidamente, a los promedios mensuales se les asignan los valores de la tabla 8 y se efectúa la suma de estos valores para los doce meses del año, con lo que se obtiene un valor que puede oscilar entre 0 y 24 unidades.

El resultado refleja los aspectos relacionados con la saturación y la distribución temporal de humedad en el terreno (Mora, R. et al., 1992). La valoración del parámetro se presenta en la Tabla N° 8 y N°9.

Tabla N°8. Valores a los promedios mensuales de lluvia

Promedio de precipitación mensual (mm)	Valor asignado
<125	0
125-250	1
>250	2

Fuente: Mora, 1992

Tabla N°9. Valoración del parámetro humedad del terreno S_h

Suma de valores asignados a cada mes	Descripción	Valoración del parámetro S_h
0-4	Muy bajo	1
5-9	Bajo	2
10-14	Medio	3
15-19	Alto	4
20-24	Muy alto	5

Fuente: Mora, 1992

- **Parámetro de disparo por sismicidad**

La sismicidad es el evento natural que ha causado la mayor destrucción por deslizamientos en Costa Rica (Mora, R. et al., 1992). Se ha observado que el potencial de generación de deslizamientos por actividad sísmica puede correlacionarse con la escala de intensidades Mercalli-Modificada (Mora, R. et al., 1992).

En caso de contar con datos sobre aceleraciones pico (PGA), se ha utilizado la relación de Trifunac & Brady (1975), para establecer los valores correspondientes del parámetro de disparo por sismicidad (D_s) (Tabla N°10). Existen otras relaciones entre intensidad y aceleración que pueden ser utilizadas, a criterio de las personas que pongan en práctica esta metodología.

Tabla N° 10. Valoración del parámetro de disparo por sismicidad DS

Intensidad Mercalli- Modificada	Aceleración pico (%g) (Trifunac & Brady, 1975)	Valoración del parámetro D_S
I	0.3-0.6	1
II	0.6-1.1	2
CONTINUACION DE LA TABLA		
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

Fuente: Mora, 1992

- **Parámetro de disparo por lluvia**

En este parámetro se consideran las intensidades de lluvias potencialmente generadoras de deslizamientos, se utiliza la lluvia máxima en 24 horas con un período de retorno de 100 años, aplicando la distribución de valores extremos Gumbel tipo I o LogPearson tipo III a series temporales con más de 10 años de registro (Mora, R. et al., 1992). En el cuadro 8 se aprecia la valoración del parámetro DII. (Tabla N°11)

Tabla N° 11. Valoración del parámetro de disparo por lluvias D_{II}

Lluvia máxima en 24 horas, periodo de retorno 100 años (mm)	Descripción	Valor del parámetro
<100	Muy bajo	1
100-200	Bajo	2
200-300	Medio	3
300-400	Alto	4
>400	Muy alto	5

Fuente: Mora, 1992

2.5. Criterios para la definición de amenaza por inestabilidad de ladera

Los valores de frecuencia e intensidad que se obtienen y se trasladan a diagramas que relacionan estas dos variables. Estos diagramas han sido desarrollados en base a experiencia de Suiza y modificados y aplicados en Venezuela y Ecuador. En Nicaragua han sido utilizados por el proyecto PRAAC para el análisis de zonas inundables. Los valores presentados para esta propuesta han sido adaptados a las características de los fenómenos que más comúnmente se producen en Nicaragua. Se propone su uso para la evaluación de la amenaza de inestabilidades en Nicaragua. (INETER, 2005) (Cuadro N°2)

INTENSIDAD	ALTA	ALTA	ALTA	MEDIA	RESIDUAL
	MEDIA	ALTA	MEDIA	BAJA	
	BAJA	MEDIA	BAJA	BAJA	
	Frecuencia Tr	ALTA 1-10	MEDIA 10-50	BAJA 50-200	MUY BAJA >200
		FRECUENCIA			

Cuadro N° 2. Niveles de amenaza por inestabilidad de ladera

Fuente: INETER, 2005

Un mapa de amenazas por inestabilidad de laderas, refleja zonas que presentan características similares de frecuencia y de intensidad del evento, representada cada una con el color correspondiente.

En caso de no existir registros para el cálculo de probabilidades o frecuencias, esta puede ser estimada en base a la experiencia del equipo técnico, a las consideraciones de actividad del fenómeno identificado en el campo y a criterios cualitativos de campo.

2.5.1. Significado de los mapas de amenazas por deslizamientos

Los niveles de amenaza (intensidad vs frecuencia o probabilidad) son utilizados en los procesos de planificación y gestión territorial, por lo que deben representar el uso que se le puede dar y los daños potenciales a que este uso estaría expuesto. (Cuadro N°3)

Significado de los mapas de amenazas para la planificación del territorio			
Leyenda	Pérdidas y daños previsibles en caso de uso para asentamientos humanos		Implicaciones para el ordenamiento territorial
	Zonas urbanizadas	Zonas rurales	
Amenaza Alta (Rojo)	Las personas están en peligro tanto adentro como afuera de las viviendas. Existe un alto peligro de destrucción repentina de viviendas y muertes de sus habitantes.	Exposición directa a la amenaza. Grandes afectaciones y pérdidas totales o casi totales de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales de la ladera y la vida humana.	Zona de prohibición e intervención inmediata: tierras no aptas para el desarrollo de asentamientos humanos ni de infraestructura importante (hospitales, etc) u ocupados de forma permanente. Áreas ya edificadas o viviendas deben ser reubicadas, o protegidas con medidas de reducción de riesgo, sistemas de alerta temprana, evacuación temporal y modificación paulatina del uso de los territorios.
Amenaza Media (Naranja)	Las personas están en peligro afuera de las viviendas, pero no o casi no adentro. Se debe contar con daños en las viviendas, pero no destrucción repentina de éstos, siempre y cuando su modo de construcción haya sido adaptado a las condiciones del lugar.	Exposición directa a la amenaza. Moderadas afectaciones y pérdidas parciales de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales de la ladera y la vida humana.	Zona de alta restricción y reglamentación del uso y manejo de los territorios, en la cual se puede permitir cierto desarrollo de asentamientos humanos de baja densidad, siempre y cuando se realicen estudios de riesgo detallados previos y apliquen normas de construcción y obras de mitigación. Construcciones existentes que no cumplan con las normas deben ser reforzadas, protegidas o reubicadas.
Amenaza Baja (Amarillo)	El peligro para las personas es débil o inexistente. Los edificios pueden sufrir daños leves, pero puede haber fuertes daños al interior de los mismos.	Exposición directa o indirecta a la amenaza. Bajas afectaciones y pocas pérdidas de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales.	Zona de moderada restricción y sensibilización, para el manejo del territorio, se permite el desarrollo de asentamientos humanos de baja densidad. La población debe ser informada de la existencia de potenciales amenazas para que apliquen medidas de protección.
Amenaza residual (Rayas amarillas)	Existen amenazas que tienen una probabilidad de ocurrencia muy débil y que se pueden manifestar con una intensidad fuerte.	Exposición directa o indirecta a la amenaza. Bajas afectaciones y pocas pérdidas de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales.	Zona de sensibilización, apta para el desarrollo de asentamientos humanos. Los usuarios del suelo deben ser informados ante la existencia de amenazas muy poco probables pero de alta intensidad.
Zona de susceptibilidad (Rayas rojo/azul)	Zona cuyo grado de amenaza no se ha podido identificar con un nivel de precisión suficiente y que podría incluir, por consiguiente, áreas de amenaza alta. Incluye áreas protegidas por obras de protección cuyo diseño y estado de mantenimiento no se han podido verificar.	Exposición directa e indirecta a la amenaza. Relativamente se pueden esperar afectaciones y pérdidas de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales de la ladera y la vida humana.	Zona de restricción y reglamentación del uso del territorio, no apta, temporalmente, para la instalación, expansión o densificación de asentamientos humanos, mientras no se determine su grado de amenaza por medio de investigaciones adicionales de detalle.
Verde Claro: Amenaza no detectada: ninguna amenaza conocida, o despreciable según el estado actual de conocimientos			

Cuadro N°3: Significado de los mapas de amenazas para la planificación del territorio.

Fuente: INETER, 2005

2.6. Método de Thornthwaite

Los cálculos de Thornthwaite están basados en la determinación de la evapotranspiración en función de la temperatura media, en una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes. El método es muy empleado en hidrología y en la estimación del balance hídrico para climatología e Hidrología de cuencas. (Aparicio, 1994)

Thornthwaite comprobó que la evapotranspiración era proporcional a la temperatura media afectada de una coeficiente exponencial, a . Se propone la fórmula:

$$D = 16 (10 \text{ tm}/I)^a \quad \text{Ecuación [11]}$$

Dónde:

e = evapotranspiración mensual sin ajustar en mm (mm/mes)

tm = temperatura media mensual en °C

I = índice de calor mensual

$$I = \sum I_j : j = 1, \dots, 12 \quad \text{Ecuación [12]}$$

Que se calcula a partir del índice de calor mensual, i , como suma de los doce índices de calor mensuales: $i_j = (tm/5)^{1,514}$

a = parámetro que se calcula, en función del I según la expresión:

$$a = 0,000000675 I^3 - 0,0000771 I^2 + 0,01792 I + 0,49239 \quad \text{Ecuación [13]}$$

La fórmula de Thornthwaite tiene en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar, y llega a la expresión

$ETP = K \cdot e$ e donde:

ETP = evapotranspiración potencial (mm/mes)

$$K = N/12 \cdot d/30 \cdot e \quad \text{Ecuación [14]}$$

N = número máximo de horas de sol, según la latitud

d = número de días del mes

e = valor obtenido de la fórmula $e = 16(10 t/l)a$

2.7. Método de Gumbel

Esta es una distribución de valores extremos, formulada por Gumbel (1941) y posteriormente por Chow (1954) que es una distribución logarítmica normal, para lo cual, el valor extremo o valor máximo X se obtiene mediante el análisis de frecuencias.

El “valor máximo” que se quiere determinar para un determinado período de retorno se determina por medio de la expresión:

$$x = X_m + D \quad x = X_m + k \cdot s \cdot n^{-1} \quad \text{Ecuación [15]}$$

x : valor máximo (caudal o precipitación) para un período de retorno T .

X^m : media de la serie dada de valores máximos

D x: desviación respecto a la media, que se estima mediante el producto: $k \cdot s_{n-1}$

Donde:

k: factor de frecuencia, que indica el número de veces de desviación típica en que el valor extremo considerado excede a la media de la serie.

s_{n-1} : desviación estándar, desviación típica de los valores extremos.

El valor de la variable "k" se estima a partir del conocimiento del período de retorno en años y del número de años disponibles en la serie. Así:

$$k = (Y_T - y_n) / S_n \quad \text{Ecuación [16]}$$

Y_T : variable de Gumbel para el período de retorno T. Se determina a partir del valor del período de retorno. El valor se puede obtener de la tabla adjunta. $Y_T = -\ln \ln (T/T-1)$

y_n: valor que se obtiene a partir del número de años de la serie, mediante tablas

S_n: valor que se obtiene a partir del número de años de la serie, mediante tablas

Valores de " Y_T " para distintos períodos de retorno T

Tabla N° 12. Valores de " Y_T " para distintos períodos de retorno T

T	2	5	10	25	30	50	75	100	250	500
Y	0.3665	1.4999	2.2503	3.1995	3.3842	3.9019	4.3107	4.6001	5.519	6.213
T	1	4	7	3	9	4	8	5	4	6

Fuente: Gumbel

Valores de " y_n " y " S_n " según número de observaciones**Tabla N°13.** Valores de " y_n " y " S_n " según número de observaciones

N°datos	y_n	S_n	N°datos	y_n	S_n	N°datos	y_n	S_n
1	0,36651	0,00000	35	0,54034	1,12847	69	0,55453	1,18440
2	0,40434	0,49838	36	0,54105	1,13126	70	0,55477	1,18535
3	0,42859	0,64348	37	0,54174	1,13394	71	0,55500	1,18629
4	0,44580	0,73147	38	0,54239	1,13650	72	0,55523	1,18720
5	0,45879	0,79278	39	0,54302	1,13896	73	0,55546	1,18809
6	0,46903	0,83877	40	0,54362	1,14131	74	0,55567	1,18896
7	0,47735	0,87493	41	0,54420	1,14358	75	0,55589	1,18982
8	0,48428	0,90432	42	0,54475	1,14576	76	0,55610	1,19065
9	0,49015	0,92882	43	0,54529	1,14787	77	0,55630	1,19147
10	0,49521	0,94963	44	0,54580	1,14989	78	0,55650	1,19227
11	0,49961	0,96758	45	0,54630	1,15184	79	0,55669	1,19306
12	0,50350	0,98327	46	0,54678	1,15373	80	0,55689	1,19382
13	0,50695	0,99713	47	0,54724	1,15555	81	0,55707	1,19458
14	0,51004	1,00948	48	0,54769	1,15731	82	0,55726	1,19531
15	0,51284	1,02057	49	0,54812	1,15901	83	0,55744	1,19604
16	0,51537	1,03060	50	0,54854	1,16066	84	0,55761	1,19675
17	0,51768	1,03973	51	0,54895	1,16226	85	0,55779	1,19744
18	0,51980	1,04808	52	0,54934	1,16380	86	0,55796	1,19813
19	0,52175	1,05575	53	0,54972	1,16530	87	0,55812	1,19880
20	0,52355	1,06282	54	0,55009	1,16676	88	0,55828	1,19945
21	0,52522	1,06938	55	0,55044	1,16817	89	0,55844	1,20010
22	0,52678	1,07547	56	0,55079	1,16955	90	0,55860	1,20073
23	0,52823	1,08115	57	0,55113	1,17088	91	0,55876	1,20135
24	0,52959	1,08646	58	0,55146	1,17218	92	0,55891	1,20196
25	0,53086	1,09145	59	0,55177	1,17344	93	0,55905	1,20256
26	0,53206	1,09613	60	0,55208	1,17467	94	0,55920	1,20315
27	0,53319	1,10054	61	0,55238	1,17586	95	0,55934	1,20373
28	0,53426	1,10470	62	0,55268	1,17702	96	0,55948	1,20430
29	0,53527	1,10864	63	0,55296	1,17816	97	0,55962	1,20486
30	0,53622	1,11237	64	0,55324	1,17926	98	0,55976	1,20541
31	0,53713	1,11592	65	0,55351	1,18034	99	0,55989	1,20596
32	0,53799	1,11929	66	0,55378	1,18139	100	0,56002	1,20649
33	0,53881	1,12249	67	0,55403	1,18242	101	0,56015	1,20701
34	0,53959	1,12555	68	0,55429	1,18342			

2.8. Pruebas de bondad de ajuste para los resultados de la distribución de Gumbel

2.8.1. Test Kolmogorov-Smirnov

Para la aplicación de este test es necesario determinar la frecuencia observada acumulada. Para la frecuencia observada acumulada en el caso especial de Gumbel, se ordena la información de menor a mayor y se aplica la siguiente ecuación.

$$F_n = \frac{n}{N+1} \quad \text{[Ecuación 17]}$$

Donde;

F_n Frecuencia observada acumulada

n Número de orden

N Número de datos

En el caso de la frecuencia teórica acumulada ésta se determina mediante la función de Gumbel.

$$F(x) = 1 - e^{-e^{-(x-u)}} \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Una vez determinadas ambas frecuencias, se obtiene el máximo de las diferencias entre ambas, en la i -ésima posición de orden, que se denomina D .

$$D = \text{Sup} |F_n(x_i) - F(x)_i| \quad \text{[Ecuación 19]}$$

Luego, asumiendo un valor de significancia, se recurre a la tabla de valores críticos de D en la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov- Smirnov, y considerando el tamaño de la muestra, se establece lo siguiente: Si $D < D_t$, se acepta que el ajuste es adecuado, con el nivel de confiabilidad asumido. (Pizarro et, al. S.F)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Generalidades

Para representar un fenómeno en particular, como la susceptibilidad del terreno a deslizamientos y modelar las distintas variables espaciales que intervienen en dicho fenómeno para proporcionar un mapa de vulnerabilidad física, se debe tener en cuenta la ocurrencia del mismo en la zona de estudio, mediante distintos métodos y técnicas, como lo es Lógica Fuzzy así como Mora Vahrson. Para con el modelo generado poder realizar una simulación en 3D para el proyecto.

Lógica difusa, mediante la combinación de varios métodos matemáticos que permitan la obtención de modelos que representen el fenómeno estudiado, a través de esto conocer el modelo que se ajuste a la realidad espacial de la zona de estudio. Este método proporciona valores positivos, negativos y valores intermedios

Mora Vahrson aplica distintos parámetros ya sean de disparo como de elementos pasivos para obtener la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos.

3.2. Información y datos

Para poder realizar la implementación del algoritmo de Lógica Fuzzy y el método Mora Vahrson para la determinación del grado de susceptibilidad a deslizamientos su simulación en 3D en el área de estudio analizada, se requirió recopilar la información necesaria existente, generar y analizar variables físicas, facilitando la organización y actualización de datos en esta zona.

3.2.1. Recopilación de información

La información recopilada en diferentes instituciones fue:

- Base digital de la Ciudad de la ciudad de Quito, escala 1:1.000 en formatos dwg.

FUENTE: Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento.

- Mapa vial de la Ciudad de Quito Metropolitana.

FUENTE: Ilustre Municipio de Quito.

- Datos de Estaciones meteorológicas obtenidas de los anuarios meteorológicos de los años 2000 al 2008.

FUENTE: INAMHI.

- Hojas Geológicas, Sangolquí (400) y Quito (398), escala 1:50.000.

FUENTE: INIGEMM, 1980

- Datos sismológicos obtenidos de los informes anuales de los años 1990 al 2013.

FUENTE: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

3.2.2. Generación de Datos

3.2.2.1. Modelación y Análisis de variables para Mora – Vahrson

- Pendiente (Sp)

Este parámetro utiliza las clases de pendiente de van Zuidam (1986), con las cuales se describen los procesos característicos y esperados y las condiciones del terreno. Las clases de pendientes pueden coincidir con los sectores críticos, donde los procesos de deslizamiento son dominantes. Este factor valora las condiciones topográficas del terreno, por medio de la creación de un mapa de pendientes del área de estudio, con valores en grados, de acuerdo al método MVM (Mora et al., 2002). (Tabla N°14)

Tabla N°14. Cuadro de pendientes, condiciones del terreno y valoración de parámetros.

Clases de pendientes		Condiciones del terreno	Valor de Sp	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
				CONTINÚA →

8-16	15-30	Pendiente moderada deslizamientos ocasionales peligro de erosión severo	3	Moderada
16-35	30-70	Pendiente fuerte, procesos denudaciones intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos	4	Fuerte
35-55	70- 140	Pendiente muy fuerte, afloramiento rocosos procesos denudacionales intensos, reforestación posible	5	Muy fuerte
Clases de pendientes		Condiciones del terreno	Valor de Sp	Valoración
>55	>140	Extremadamente fuerte afloramientos rocosos procesos denudacionlaes severos (caída de rocas) cobertura vegetal limitada.	6	Extremadamente fuerte

Fuente: Van Zuidam, 1986

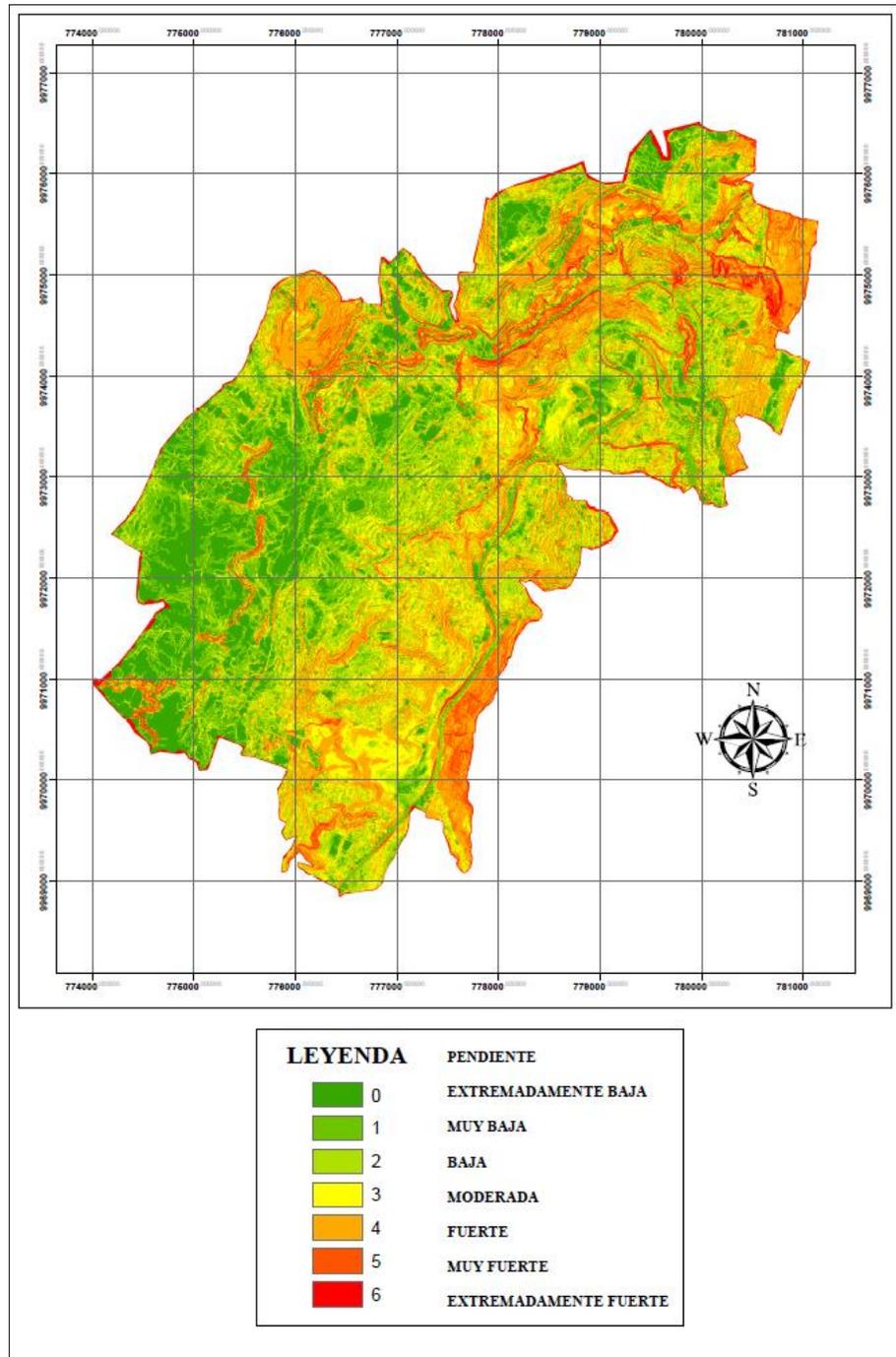


Gráfico N° 4. Factor pendiente
Fuente: Elaboración Propia

- Humedad del suelo (Sh)

Este factor representa la humedad del suelo considerando que puede ser expresada como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración.

Para evaluar este parámetro se utilizan los datos de temperaturas medias mensuales y precipitaciones medias mensuales de las estaciones: La Tola, Izobamba e INAMHI-Iñaquito; por ser las más cercanas e influyentes en el área de estudio. Con los datos de las temperaturas medias mensuales (Tabla N°15, N°16 y N°17) se determina el valor de la evapotranspiración promedio para cada estación, mediante el método de Thornwaite que calcula la evapotranspiración potencial como una función de las temperaturas medias mensuales (Aparicio, F. J., 1994). Se escogió este método porque considera un único parámetro, la temperatura, del cual se tienen registros de 3 estaciones hidrometeorológicas cercanas a la zona de estudio.

- Estación La Tola:

Tabla N° 15. Datos para cálculo de la evapotranspiración de la estación meteorológica La Tola.

MES	TEMPERATURA °C	ETP sin corregir mm/mes	N° días del mes	N° horas de luz
Enero	15,5545	58,8	30	5,72082111
Febrero	15,6091	59,1	31	5,29837662
Marzo	15,5364	58,7	30	4,03929619
Abril	15,6545	59,4	31	4,34666667
				CONTINÚA



MES	TEMPERATURA °C	ETP sin corregir mm/mes	N° días del mes	N° horas de luz
Mayo	15,7273	59,8	31	5,11642229
Junio	15,6545	59,4	28	6,13818182
Julio	15,5545	59	31	7,04750733
Agosto	15,8545	60,5	30	7,28123167
Septiembre	15,7727	60,1	31	6,26181818
Octubre	15,6909	59,6	30	5,62463343
Noviembre	15,5818	58,9	31	5,39333333
Diciembre	15,5182	58,5	31	5,29941349

MES	ETP corregida (mm/mes)
Enero	28,9
Febrero	24,6
Marzo	20,4
Abril	21,5
Mayo	26,3
Junio	30,4
Julio	35,8
Agosto	38,1
Septiembre	31,3
Octubre	28,9
Noviembre	26,5
Diciembre	26,7
Enero	28,9

Fuente: Elaboración Propia

- **Estación Izobamba**

Tabla N°16. Datos de evapotranspiración de la estación meteorológica Izobamba.

MES	TEMPERATURA °C	ETP sin corregir mm/mes	N° días del mes	N° horas de luz
Enero	12,0455	52	30	5,1568915
Febrero	12,0364	52	31	4,64155844
Marzo	11,9182	51,9	30	3,57214076
Abril	12,0273	52,9	31	3,98
Mayo	12,2091	51,7	31	4,74604106
Junio	11,9727	51,3	28	5,54787879
Julio	11,9364	52,5	31	6,76803519
Agosto	12,1364	53,2	30	6,64545455
Septiembre	12,2636	53,2	31	5,5230303
Octubre	12,2455	53,1	30	5,22785924
Noviembre	12,0091	51,9	31	5,11545455
Diciembre	11,9636	51,6	31	4,97478006

MES	ETP corregida (mm/mes)
Enero	23,1
Febrero	18,9
Marzo	15,8
Abril	17,2
Mayo	21,6
Junio	23,9
Julio	29,9
Agosto	29,8
Septiembre	24,5
Octubre	23,9
Noviembre	22,1
Diciembre	22,1
Enero	23,1

Fuente: Elaboración Propia

- Estación Iñaquito

Tabla 17. Datos de evapotranspiración de la estación meteorológica Iñaquito.

MES	TEMPERATURA °C	ETP sin corregir mm/mes	N° días del mes	N° horas de luz
Enero	15,0091	52,1	30	5,35014663
Febrero	14,9727	51,9	31	4,94902597
Marzo	14,8182	51	30	4,18768328
Abril	14,9455	51,7	31	4,25030303
Mayo	15,2364	53,4	31	4,82991202
Junio	15,2909	53,7	28	5,81333333
Julio	15,4400	54,4	31	6,5202346
Agosto	15,7273	56,3	30	6,74017595
Septiembre	15,6818	56	31	6,39233333
Octubre	15,1909	53,1	30	5,45953079
Noviembre	14,8636	51,2	31	5,08727273
Diciembre	14,7545	50,6	31	5,25612903

MES	ETP corregida (mm/mes)
Enero	24
Febrero	20,1
Marzo	18,4
Abril	18,3
Mayo	22,2
Junio	26
Julio	30,5
Agosto	32,5
Septiembre	29,9
Octubre	25
Noviembre	21,7
Diciembre	22,9
Enero	24

Fuente: Elaboración Propia

Evapotranspiración promedio de cada estación

Tabla N° 18. Evapotranspiración promedio de cada estación.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Evapotranspiración promedio (mm)
La Tola	28,9	24,6	20,4	21,5	26,3	30,4	35,8	38,1	31,3	28,9	26,5	26,7	28,2833
Izobamba	23,1	18,9	15,8	17,2	21,6	23,9	29,9	29,8	24,5	23,9	22,1	22,1	22,7333
Ñaquito	24	20,1	18,4	18,3	22,2	26	30,5	32,5	29,9	25	21,7	22,9	24,2917
Área de estudio	25,3333	21,20	18,20	19,00	23,3667	26,7667	32,0667	33,4667	28,5667	25,9333	23,4333	23,90	25,1028

Fuente: Elaboración Propia

Humedad del suelo promedio mensual de cada estación

Tabla N° 19. Humedad del suelo promedio mensual de cada estación.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	valor
La Tola	45.9427	47.8427	100.6790	89.6518	38.5972	5.8790	-12.157	-11.630	16.6063	76.6790	89.0427	58.6245	
humedad valor	17.0427	23.2427	80.2790	68.1518	12.2972	-24.52	-47.957	-49.730	-14.693	47.7790	62.5427	31.9245	
La Tola	0	0	2	2	0	0	0	0	0	1	2	1	8
Izobamba	113.6790	126.4699	176.9154	184.0518	130.7790	49.051	59.154	11.106	48.015	94.660	135.879	124.033	
humedad valor	90.5790	107.5699	161.1154	166.8518	109.179	25.151	29.254	-18.693	23.515	70.760	113.779	101.933	
Izobamba	2	2	2	2	2	1	1	0	1	2	2	2	19
Ñaquito	58.1881	81.3972	123.9154	147.5336	81.1154	10.124	-6.5755	-11.042	24.497	84.724	86.5336	86.5972	
humedad valor	34.1881	61.2972	105.5154	129.2336	58.9154	-15.875	-37.075	-43.542	-5.4028	59.724	64.8336	63.6972	
Ñaquito	1	2	2	2	2	0	0	0	0	2	2	2	15

Fuente: Elaboración Propia

Una vez obtenido el valor promedio de evapotranspiración para cada estación, se procede a evaluar las condiciones hidrometeorológicas de la zona, considerando las precipitaciones mensuales registradas en las estaciones.

Se determina el valor de la precipitación media mensual promedio, para cada estación. Con estos valores promedio; y, con el promedio de evapotranspiración antes calculado, se calcula la humedad del suelo que es restando la precipitación menos la evapotranspiración, luego por medio de los polígonos de Thiessen se otorga los valores de vulnerabilidad a la zona de estudio. (Tabla N°20 y N°21)

Tabla N° 20. Humedad del suelo promedio mensual de cada estación.

VALORES DE SUMA		Rangos de valoración	Factor humedad del suelo	
La Tola	8	<10,2	1	Muy bajo
Izobamba	19	10,2- 12,4	2	Bajo
Iñaquito	15	12,4 –14,6	3	Medio
		14,6 – 16,8	4	Alto
		>16,8	5	Muy alto

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N°21. Humedad del suelo promedio mensual de cada estación.

Valoración del factor humedad del suelo	
Estación	Valor del factor humedad del suelo (Sh)
La Tola	1
Izobamba	5
Iñaquito	4

Fuente: Elaboración Propia

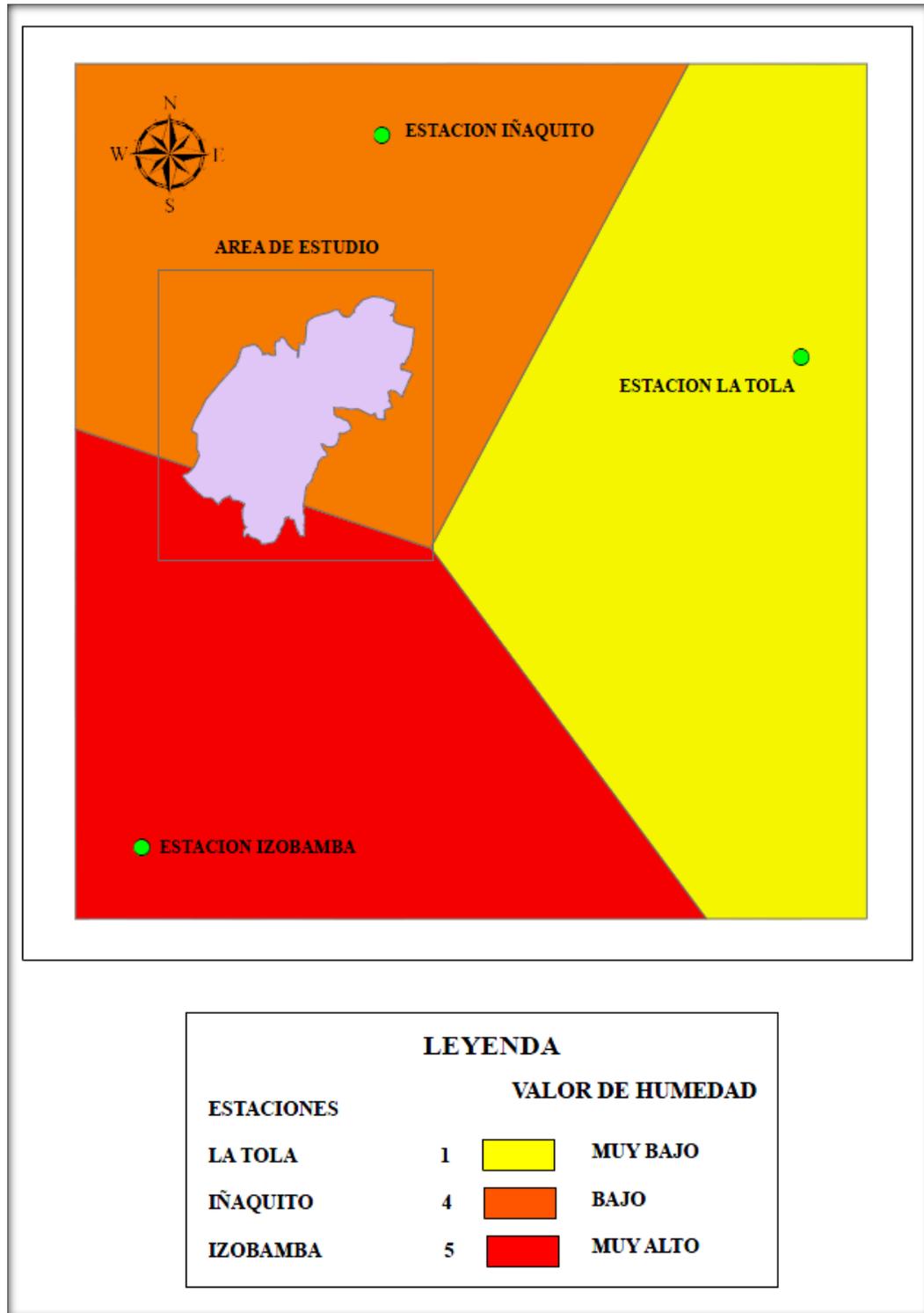


Gráfico N°5. Polígonos de Thiessen generados de cada estación.

Fuente: Elaboración Propia

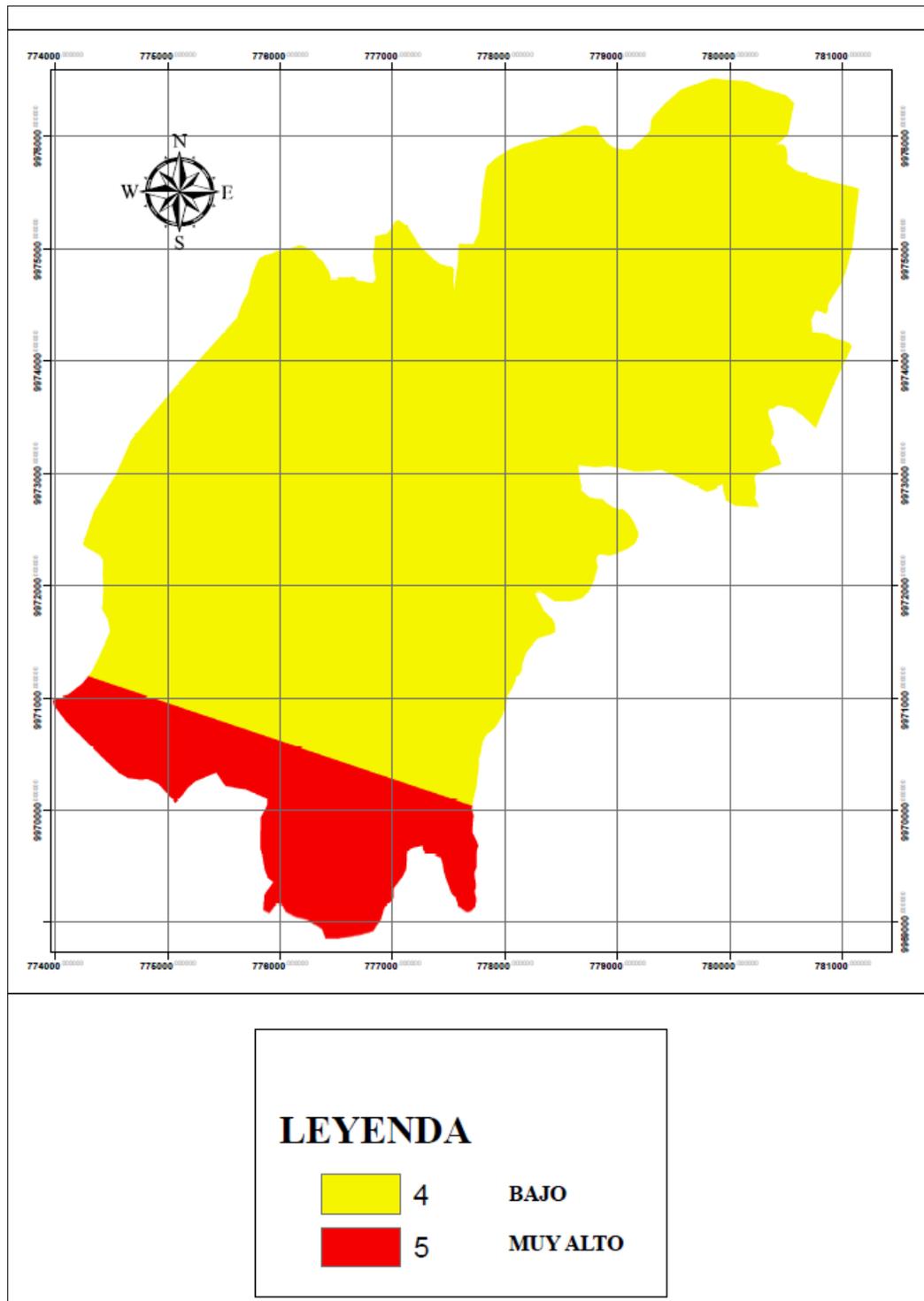


Gráfico N°6. Factor humedad del suelo (Sh)
Fuente: Elaboración Propia

- Factor Litológico (SI)

Para evaluar este factor se utilizan las descripciones de las unidades litológicas representadas en el mapa geológico y las características geotécnicas de algunas de estas unidades. A partir de las características litológicas, de meteorización y resistencia a la compresión simple se valora el factor litológico (SI) para cada unidad o formación litológica. (Tabla N°22)

Tabla N° 22. Descripción litológica de la zona de estudio en el DMQ.

DESCRIPCION LITOLOGICA	CARACTERISTICAS GEOTECNICAS
<p>Cobertura de cangahua (Qc): depósito de más de 30 metros de espesor de ceniza volcánica litificada y meteorizada; se trata de partículas volcánicas finas de color café amarillento y diámetros menores a los 4 mm, constituidas de plagiclasas, oblendas, biotita, augita y ocasionalmente cuarzo. Esta secuencia no se presenta estratificada y se caracteriza por formar taludes completamente verticales en las quebradas profundas labradas por los ríos de montaña.</p>	<p>Roca blanda 50 – 250 kg/cm² de resistencia a la compresión simple.</p>
<p>Depósitos lagunares de ceniza (Qw): bien estratificada, y capas de pómez. La ceniza lacustre es de color café oscuro de grano fino, intercalada con conglomerados finos y arenas gruesas limo arcillosas y paleosuelo, todos bien estratificados, se estima que el espesor de esta ceniza puede alcanzar hasta 100 metros.</p>	<p>Ceniza Roca muy blanda 10 -15 kg/cm² de resistencia a la compresión simple</p> <p>Conglomerado Roca dura 1400 kg/cm² de resistencia a la compresión simple</p>
<p>Intercalaciones de pómez y lahares: en estratos finos, ceniza de pómez. Los lahares son muy compactos con líticos angulares de andesitas en matriz de lapilli y limo color café rojizo.</p>	<p>Pómez Roca muy blanda de 10 – 15 kg/cm² de resistencia a la compresión simple</p> <p>Lahar Roca dura 1500 kg/cm² de resistencia a la compresión simple</p>

CONTINÚA



DESCRIPCION LITOLOGICA	CARACTERISTICAS GEOTECNICAS
<p>Volcánico-sedimentos Machángara (Pm): aflora a lo largo del valle del rio Machángara. Es una secuencia de lavas tipo andesita piroxénica, aglomerados muy compactos con clastos redondeados mal clasificados en matriz de ceniza gruesa; las tobas y sedimentos fluviales son generalmente mal clasificados y se presentan en capas (estratos). Se estima que el espesor de esta secuencia pudiera sobrepasar los 300 m.</p>	<p>1500 – 2500 kg/cm² de resistencia a la compresión simple.</p>

Fuente: Cruz Mario, 2012

Según la descripción litológica del área de estudio la cobertura destacada es la Cangahua la cual por ser integrada por depósitos de ceniza volcánica litificada, ésta se comporta como limos mayoritariamente los cuales en estado seco son fuertemente resistentes pero con el factor disparo de las precipitaciones se ablanda y deja de ser cohesiva lo que provoca derrumbes y deslizamientos de tierra.

LIMO	ANGULO DE FRICCION	COHESION EFECTIVA	PESO ESPECIFICO
	26 – 35 °	0,02 kg/cm ²	2000 kg/cm ²

Según Mora & Vahrson, 2003 se clasifica al factor litológico de la siguiente forma: (Tabla N° 23)

Tabla N°23. Valoración de la susceptibilidad del factor litológico.

Resistencia compresión simple (kg/cm ²)	Descripción	Susceptibilidad	Factor litológico (SI)
10 -15	Muy blanda	Muy alta	5
50 - 250	Blanda	Alta	4
250 – 500	Media	Media	3
500 – 1000	Moderadamente dura	Moderada	2
1000 - 2500	Dura	Baja	1

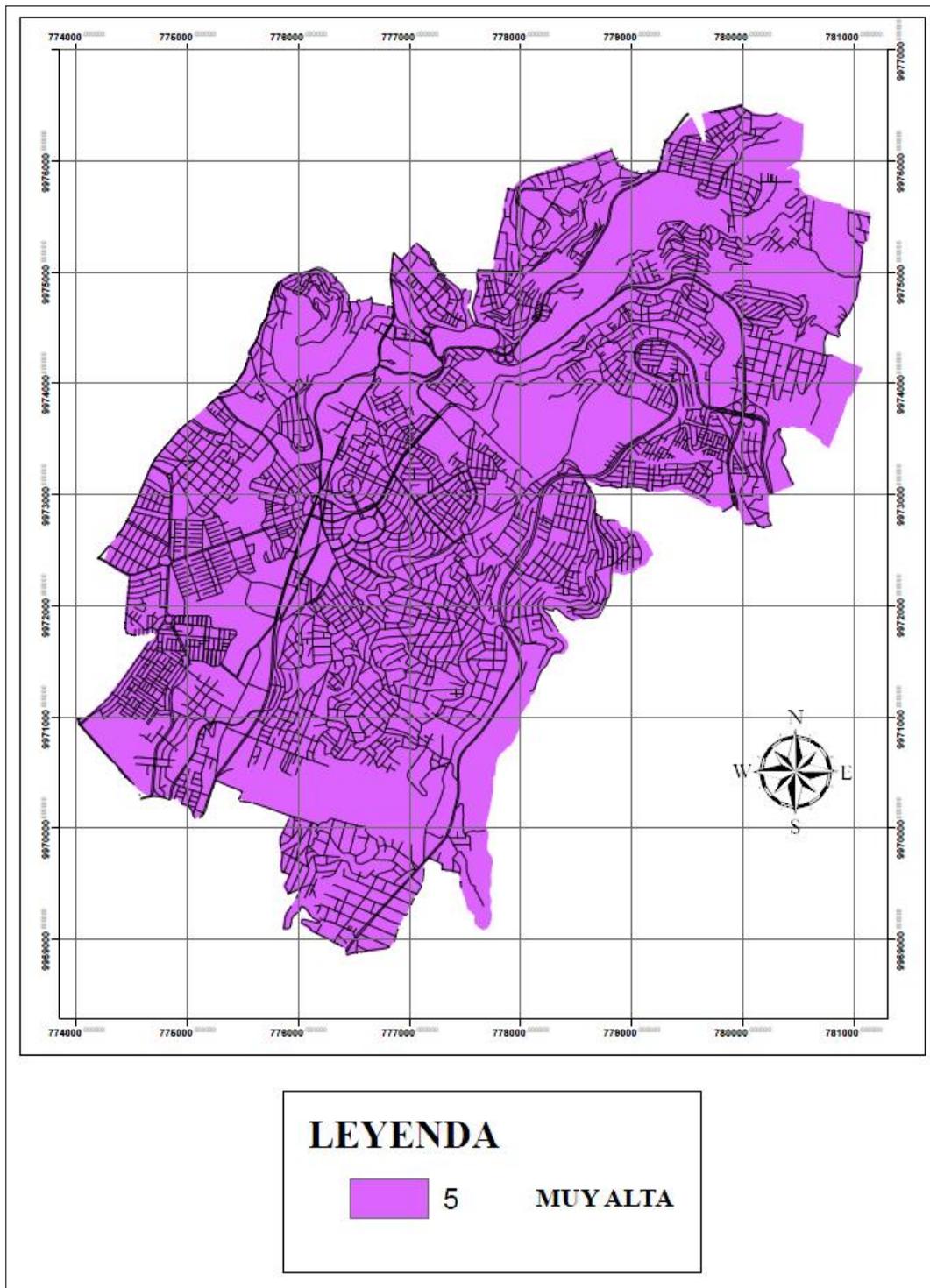


Gráfico N°7. Factor litología del suelo (Sh)

Fuente: Elaboración Propia

- **Factor sísmico (Ts)**

ESCALAS DE RICHTER Y MERCALLI

En el año 1902, el vulcanólogo italiano **Giuseppe Mercalli** creó una **escala de intensidades** de I a XII para indicar los efectos de los terremotos en un punto determinado. Posteriormente, esta escala fue modificada y así surgió la escala Mercalli, tal como se la conoce en la actualidad, y poco tiempo después, la escala de intensidad MSK.

En 1935, el sismólogo estadounidense **Charles F. Richter** (1900-1985) ideó una escala para determinar la magnitud de los terremotos utilizando un sismógrafo. Midió el terremoto de menor magnitud que éste podía registrar y le adjudicó el grado 0 (cero) en lo que sería su **escala de magnitudes** sísmicas, más conocida como escala de Richter. Luego fue adjudicando valores sucesivos y obtuvo una escala de tipo logarítmico. Hoy los sismógrafos modernos pueden medir terremotos menores a los detectados por Richter en su época, por lo que se usan valores negativos en la escala.

La intensidad de un terremoto no indica la energía que libera, sino simplemente expresa el grado de destrucción que ha alcanzado, al analizar las consecuencias sobre las personas y las construcciones. La magnitud de un terremoto, en cambio, es una medida física de la energía que libera y es, en consecuencia mensurable. (Tabla N° 24)

Tabla N°24. Equivalencias entre escala de Richter vs MKS.

MAGNITUD, INTENSIDAD Y EFECTOS DE LOS SISMOS		
Magnitud (escala 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, etc. 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

Sismos históricos de la ciudad de Quito desde 1500 hasta 1990

Tabla N°25. Sismos históricos de la ciudad de Quito desde 1500 hasta 1990.

AÑO	INTENSIDAD (MM/MSK)
	QUITO
1541	VII – VIII
1587	VIII
1627	VI – VII
1645	VI – VII
1660	VI – VII
1662	VI – VII
1698	VI –VII
1736	VI
1751	VI – VII
1755	VIII – IX
1757	VI – VII
1759	VI
1764	VI
1787	VI
1797	VII – VIII
1859	IX
1868	IX
1870	VI
1906	VI
1914	VI
1923	VII
1942	VI
1987	VI –VII
1990	V

Fuente: Hibsich, et al. 1996

Sismos en la ciudad de Quito desde 1990 hasta el 2013

Tabla N°26. Sismos en la ciudad de Quito desde 1990 hasta el 2013.

FECHA	TIEMPO	LAT.	LONG.	PROF. (km)	Mag (Richter)	MKS	DIST. (km)	AZIMUT
1990/01/18	06:27:10	0.43S	79.26W	25.8	4	III	87.96	253.4 °
1990/02/02	23:28:34	0.59S	78.29W	22.8	4	III	48.96	151.2°
1990/03/01	10:55:20	0.32S	79.14W	23.9	4	III	72.13	259.1°
1990/07/16	07:46:24	0.46S	78.43W	2.1	4.9	V	29.70	164.4°
1990/08/11	03:00:06	0.03S	78.43W	4.1	4.9	V	20.23	23.4°
1990/08/11	04:04:42	0.10S	79.29W	74.7	4	III	88.22	277.4°
1990/08/11	04:05:05	0.00S	78.44W	14.0	4.1	III	23.01	16.3°
1990/08/11	10:52:27	0.01S	78.42W	3.3	4.1	III	22.54	23.5°
1990/08/11	18:48:18	0.05S	78.41W	1.1	4	III	19.94	31.2°
1990/08/11	19:50:05	0.03S	78.42W	1.3	4.2	III	20.70	25.0°
1990/08/12	04:42:03	0.02S	78.46W	23	4	III	20.86	13.3°

CONTINÚA



FECHA	TIEMPO	LAT.	LONG.	PROF. (km)	Mag (Richter)	MKS	DIST. (km)	AZIMUT
1990/08/12	09:02:53	0.01S	78.45W	22.5	4.1	III	21.30	14.7°
1990/08/12	12:24:45	0.03S	78.46W	20.4	4	III	18.93	13.2°
1990/08/17	23:00:02	0.14S	78.70W	18	4	III	22.84	288.3°
1990/08/20	12:27:38	0.04S	78.41W	3.0	4	III	20.42	27.7°
1990/08/22	02:31:09	0.05S	78.45W	10.4	4	III	17.37	20.0°
1990/09/02	15:50:37	0.00S	78.60W	6.3	4.4	IV	24.38	332.8°
1990/09/02	21:59:18	0.01S	78.60W	4.7	4	III	23.92	331.9°
1990/09/12	16:09:36	0.01S	78.46W	15.2	4.2	III	21.54	13.1°
1990/09/13	12:44:14	0.00N	78.47W	11.8	4.1	III	22.53	7.3°
1990/09/13	12:49:14	0.02S	78.46W	19.9	4.2	III	20.73	11.0°
1990/09/20	10:01:26	0.03S	78.44W	17.5	4.1	III	20.25	20.8°
1990/10/26	04:22:00	0.03S	78.42W	11.1	4	III	20.46	26°
1990/11/06	10:14:42	0.05S	78.64W	28.6	4.2	III	37.27	205.2°
1990/11/23	22:36:41	0.11N	78.67W	122.8	5	V	39.14	331.9°
1991/02/17	08:36:50	0.16S	78.58W	1.3	4.3	IV	10.17	298.9°
1991/02/17	18:10:27	0.13S	78.61W	1.7	4.5	IV	14.30	301.5°
1991/03/12	13:42:12	0.59°S	78.27W	117.1	4.7	IV	50.06	149.7°
1991/04/01	13:01:07	0.18S	78.41W	27.0	4.4	IV	10.46	76.3°
1991/04/22	11:03:08	0.29S	79.03W	12.8	4.6	IV	59.17	260.5°
1991/05/28	07:18:45	0.11N	78.46W	10.3	4	III	34.91	8.0°
1991/06/05	18:12:03	0.15N	79.23W	42.7	4.1	III	90.41	295.8°
1991/09/06	04:01:52	0.10N	78.43W	10.0	4.2	III	33.59	12.6°
1991/12/02	17:31:12	0.18S	78.22W	2.5	4.3	IV	31.19	85.4°
1992/04/13	16:42:49	0.39S	78.49W	13.0	4.1	III	21.20	177.5°
1992/05/12	16:38:34	0.38S	78.48W	5.6	4	III	19.58	174.7°
1992/05/25	23:44:30	0.10N	78.45W	13.8	4.2	III	34.31	9.9°
1992/09/04	18:34:42	0.09N	79.03W	101.0	4	III	66.85	298.3°
1993/03/07	15:08:44	0.06N	78.77W	17.7	4	III	41.79	313.6°
1993/04/29	06:34:24	0.38S	79.05W	14.1	4.1	III	64.09	251.4°
1993/04/30	18:12:00	0.28N	79.16W	26.5	4	III	90.57	305.9°
1993/08/10	01:10:02	0.08N	78.86W	111.3	4.2	III	51.04	308.1°
1993/10/02	00:11:20	0.16S	79.25W	159.8	4.3	IV	83.26	273.4°
1994/03/19	02:10:05	0.43S	78.60W	20.8	4.2	III	27.58	203.1°
1994/03/30	13:48:15	0.00N	79.15W	40.0	4	III	75.17	287.4°
1994/07/13	12:04:36	0.00N	79.45W	48.2	4.9	V	108.09	282.0°
1994/09/02	21:39:31	0.28S	79.01W	23	4.4	IV	57.79	260.9°
1994/09/25	07:20:02	0.07S	78.37W	9.7	4	III	20.64	46.2°
1994/10/17	17:05:45	0.11S	78.47W	1.6	4	III	10.69	16.3°
1995/01/13	19:13:02	0.10S	78.39W	13.9	4.5	IV	16.48	49.2°
1996/01/17	16:41:29	0.04S	78.41W	13.1	4.4	IV	20.58	27.4°
1996/01/17	19:46:00	0.02S	79.00W	19.6	4.6	IV	59.69	290.1°
1996/03/14	17:34:06	0.23S	79.06W	32.8	4	III	61.94	267.4°
1996/04/30	07:12:22	0.19N	79.15W	23.00	4.4	IV	84.65	301.1°
1996/06/26	23:34:02	0.13S	78.47W	8.5	4.1	III	8.52	20.6°
1996/08/26	03:51:26	0.16S	78.83W	113.8	4	III	36.46	276.2°
1996/08/30	21:25:41	0.17N	78.88W	122.8	4.1	III	59.12	314.3°
1996/09/08	08:31:28	0.17S	78.98W	12	4	III	53.92	273.4°

CONTINÚA



FECHA	TIEMPO	LAT.	LONG.	PROF. (km)	Mag (Richter)	MKS	DIST. (km)	AZIMUT
1996/10/06	19:27:48	0.32S	77.81W	2.5	4.1	III	77.86	99.9°
1996/11/08	12:03:04	0.18S	79.21W	89.3	4	III	78.86	271.2°
1997/05/02	02:16:03	0.08N	78.44W	11.4	4.3	IV	31.94	12.3°
1997/05/02	17:46:38	0.09N	78.46W	12.1	4	III	32.59	8.5°
1997/05/27	12:19:51	0.12S	78.49W	14.2	4	III	9.16	6.5°
1997/05/27	17:49:34	0.46S	78.69W	17.9	4	III	36.29	216.6°
1997/06/17	06:15:44	0.40S	78.65W	17.9	4.2	III	27.24	217.0°
1997/07/25	19:37:57	0.11S	78.43W	11.5	4	III	13.00	37.2°
1997/10/07	05:58:08	0.03S	78.43W	10.3	4.2	III	20.40	22.2°
1997/10/07	06:01:40	0.11S	78.33W	3.2	4.2	III	21.15	61.7°
1997/10/09	12:14:30	0.59S	78.37W	5.9	4.2	III	45.91	162.4°
1997/10/30	20:01:07	0.23S	78.28W	2.2	4	III	25.05	97.9°
1997/11/10	19:30:08	0.03S	78.35W	12.0	4	III	25.04	42.1°
1997/12/03	03:53:00	0.30S	77.87W	0.0	4	III	70.47	99.5°
1997/12/08	00:35:46	0.09N	78.44W	10.8	4.1	III	32.54	11.4°
1998/01/03	18:01:49	0.05N	78.57W	17.2	4.4	IV	28.46	343.9°
1998/02/03	16:39:50	0.19S	78.35W	12.4	4.1	III	17.01	85.6°
1998/04/03	08:58:50	0.30S	78.65W	11.7	4	III	30.23	237.6°
1998/04/25	19:10:52	0.03S	78.49W	3.8	4	III	19.34	2.2°
1998/05/23	02:17:55	0.17S	78.73W	18.7	4	III	25.61	277.2°
1998/06/09	09:37:16	0.17S	78.61W	1.1	4.1	III	12.77	287.0°
1998/06/10	03:20:01	0.22S	78.61W	9.7	4.3	IV	13.01	258.0°
1998/06/28	08:37:32	0.14S	78.59W	0.0	4.5	IV	11.92	301.4°
1998/07/08	07:56:29	0.16S	78.49W	11.3	4.1	III	4.91	10.6°
1998/07/21	13:55:43	0.07S	78.49W	15.1	4.1	III	14.37	3.4°
1998/07/21	14:02:20	0.06S	78.49W	18.4	4.1	III	15.57	4.5°
1998/07/31	19:50:34	0.06S	78.48W	13.0	4.1	III	15.46	8.4°
1998/07/31	20:01:50	0.11S	78.46W	10.0	4.1	III	10.62	22.7°
1998/07/04	09:03:04	0.43S	78.11W	8.0	4.5	IV	50.39	121.0°
1998/08/06	23:53:44	0.05S	78.46W	9.8	4.1	III	16.85	15.2°
1998/08/09	14:52:56	0.06S	78.46W	13.4	4.1	III	15.82	15.4°
1998/08/08	23:44:11	0.05S	78.47W	8.8	4.2	III	16.53	11.0°
1998/08/11	18:09:00	0.15S	78.46W	9.6	4	III	6.65	39.9°
1998/08/10	00:15:04	0.07S	78.51W	16.2	5	V	14.72	356.5°
1998/08/10	00:36:30	0.08S	78.48W	13.2	5	V	13.26	10.3°
1998/08/10	00:40:45	0.08S	78.47W	8.9	5	V	14.16	14.5°
1998/08/10	01:44:08	0.07S	78.48W	12.3	5	V	14.38	8.7°
1998/08/11	11:38:25	0.06S	78.48W	12.9	4.2	III	16.27	9.3°
1998/08/17	13:01:46	0.06S	78.48W	13.3	4.1	III	15.71	8.4°
1998/08/23	05:56:37	0.14S	78.99W	316.5	4.4	IV	54.37	277.4°
1998/09/20	13:02:09	0.26N	78.91W	82.9	4	III	68.53	317.8°
1998/09/24	21:02:18	0.22S	78.45W	8.3	4	III	6.27	112.2°
1998/10/20	09:35:02	0.03S	78.49W	13.1	4.1	III	19.32	2.6°
1998/11/17	08:16:40	0.17S	78.65W	2.5	4.7	IV	16.93	280.8°
1998/12/31	13:56:13	0.15N	78.95W	109.1	4.3	IV	63.10	308.1°
1999/01/22	04:30:25	0.04S	78.45W	9.0	4.3	IV	18.51	16.2°
1999/03/14	02:15:47	0.03S	78.52W	13.5	4	III	20.39	354.9°
1999/03/28	14:36:08	0.26S	79.35W	35.1	4.1	III	95.01	265.9°
1999/03/26	17:33:01	0.05N	78.93W	19.1	4.1	III	55.85	300.2°

CONTINÚA



FECHA	TIEMPO	LAT.	LONG.	PROF. (km)	Mag (Richter)	MKS	DIST. (km)	AZIMUT
1999/04/04	15:23:17	0.05N	78.95W	9.8	4.2	III	57.26	299.3°
1999/05/07	01:32:23	0.04N	78.93W	11.4	4.2	III	54.67	299.8°
1999/05/16	04:17:03	0.00N	78.92W	17.0	4.3	IV	52.24	295.4°
1999/06/27	00:40:36	0.03S	78.48W	6.9	4	III	18.92	7.8°
1999/06/27	01:52:05	0.04S	78.47W	8.4	4.1	III	17.87	9.8°
1999/06/27	05:07:55	0.03S	78.48W	6.0	4	III	18.73	8.1°
1999/08/11	01:10:01	0.09N	79.33W	39.2	4.1	III	97.72	289.3°
1999/08/30	14:59:34	0.03S	78.47W	7.9	4.2	III	19.00	9.2°
1999/12/14	02:29:24	0.53S	78.43W	22.1	4	III	37.84	169.0°
2000/01/01	14:54:00				3.9	II		
2000/01/02	18:01:00				3.5	II		
2000/04/15	01:16:00				4.2	III		
2000/06/03	09:41:00				3.5	II		
2001/01/15	05:04:13	0.34N	78.78W	101.3	4.3	IV	67.31	332.5°
2001/02/19	16:15:42	0.01N	78.35W	10.9	4.1	III	29.12	35.9°
2001/04/06	11:37:21	0.08N	78.35W	11.6	4.2	III	35.59	28.2°
2001/04/06	23:06:42	0.45S	78.04W	8.5	4	III	58.12	118.9°
2001/04/13	09:53:21	0.01N	78.75W	13.2	4.2	III	36.54	309.3°
2001/04/20	21:38:39	0.04S	78.42W	13.2	4	III	19.88	27.6°
2001/05/04	06:50:52	0.09N	78.37W	3.3	4	III	35.10	23.9°
2001/06/01	22:01:47	0.03S	78.46W	6.4	4.2	III	19.87	13.3°
2001/08/03	20:43:16	0.55S	78.45W	10.6	4	III	39.58	171.9°
2001/08/07	00:08:45	0.13S	78.75W	13.0	4.1	III	29.21	284.9°
2001/08/07	09:10:26	0.01S	78.75W	22.1	4.4	IV	34.91	307.5°
2001/09/25	07:48:15	0.32N	78.77W	103.8	4	III	64.77	332.2°
2001/11/09	09:37:06	0.06S	78.97W	29.2	4.6	IV	52.14	263.2°
2001/11/09	10:33:18	0.24S	78.96W	22.8	4	III	51.07	264.8°
2001/12/14	20:09:25	0.03S	78.47W	11.7	4	III	18.66	9.6°
2002/01/01	01:42:26	0.31S	77.84W	6.0	4.1	III	74.69	99.7°
2002/01/16	07:36:33	0.51S	78.67W	24.8	4	III	39.46	208.8°
2002/07/08	02:02:01	0.13S	78.80W	21.6	4.3	IV	34.44	283.9°
2002/08/10	04:55:10	0.13S	78.79W	20.7	4.1	III	32.50	282.9°
2002/09/08	20:18:13	0.13S	78.76W	16.1	4.1	III	29.53	285.4°
2002/12/04	05:11:37	0.44S	78.20W	10.0	4.2	III	42.30	128.9°
2002/12/04	06:08:36	0.43S	78.22W	10.0	4.2	III	40.04	129.2°
2003/03/09	08:00:18	0.10N	78.95W	106.1	4	III	60.52	303.5°
2003/09/14	04:39:18	0.27S	79.54W	33.6	4	III	115.69	266.2°
2003/09/15	04:00:31	0.05N	78.33W	12.0	4.1	III	33.56	35.2°
2003/12/09	23:52:44	0.04N	78.46W	9.4	4	III	27.55	9.1°
2004/01/08	00:07:45	0.42S	77.93W	22.4	4.1	III	67.61	111.2°
2004/01/08	00:15:04	0.41S	77.95W	15.2	4	III	65.31	110.9°
2004/01/08	02:51:27	0.42S	77.94W	9.4	4	III	66.98	111.9°
2004/01/10	18:47:40	0.44S	78.47W	12.5	4	III	26.72	174.0°
2004/03/08	05:37:18	0.25S	78.49W	10.7	4	III	5.46	173.7°
2004/05/22	18:29:32	0.09N	78.85W	19.7	4.1	III	50.44	309.2°
2004/05/30	10:51:36	0.27N	78.73W	111.1	4.1	III	58.23	333.5°
2004/08/16	15:23:06	0.34S	78.53W	13.2	4.2	III	15.42	193.2°
2004/09/24	07:42:53	0.52S	78.70W	16.1	4	III	41.94	211.5°

CONTINÚA



FECHA	TIEMPO	LAT.	LONG.	PROF. (km)	Mag (Richter)	MKS	DIST. (km)	AZIMUT
2005/06/14	06:05:12	0.15S	78.50W	10.9	4	III	5.18	359.4°
2005/07/30	10:53:19	0.06S	78.44W	13.6	4	III	17.44	23.5°
2005/08/05	05:28:43	0.15S	78.50W	9.8	4	III	5.49	354.8°
2005/09/19	20:01:48	0.21S	78.54W	10.7	4	III	4.26	253.6°
2005/10/10	10:28:08	0.27N	78.94W	102.0	4	III	71.57	317.1°
2005/10/15	14:53:43	0.09N	78.44W	12.0	4	III	33.02	10.9°
2005/12/19	03:47:04	0.10N	78.92W	97.4	4.1	III	57.61	306.0°
2006/02/04	21:52:00	0.389S	78.59W	14.0	4.1	III	23.4	26.2°
2006/02/24	21:13:00	0.21S	78.51W	9.3	4	III	1.9	39.0°
2006/08/01	19:20:00	0.029N	78.48W	9.2	4	III	25.5	184.1°
2006/10/15	10:34:00	0.11S	78.50W	7.7	4.2	III	9.6	175.9°
2006/10/15	10:44:00	0.12S	78.49W	8.0	4	III	8.7	183.0°
2006/12/17	04:40:00	0.25S	79.09W	15.1	4.2	III	65.8	84.5°
2007/01/20	15:38:00	0.09S	78.52W	8.9	4.2	III	12.5	168.7°
2007/04/04	14:06:00	0.067N	78.41W	12.0	4.2	III	31.3	198.4°
2007/07/11	11:36:00	0.23S	78.90W	11.6	4.3	IV	45.0	84.4°
2007/07/11	11:59:00	0.27S	78.90W	8.8	4.1	III	44.9	83.3°
2007/11/26	07:19:00	0.27S	78.78W	14.3	4	III	32.2	74.6°
2010/01/12	00:21:00			11.72	3.9	II		
2010/01/12	15:15:00			12.76	3.6	II		
2011/02/16	19:04:00	0.25S	78.48W	14.89	4.1	III		
2011/02/16	19:46:00	0.24S	78.49W	11.78	3.9	II		
2011/06/24	21:31:00	0.21S	78.49W	10.69	3.4	I		
2011/06/25	11:35:00	0.20S	78.49W	12.88	3.4	I		
2011/07/17	09:11:00	0.32S	78.50W	22.03	3.5	II		
2011/08/01	22:18:00	0.14S	78.43W	10.93	3.4	I		
2011/10/06	06:09:00	0.13S	78.38W	5.32	3	I		
2011/10/29	08:50:00	0.12S	78.38W	16.90	4.3	IV		
2011/11/25	20:50:00	0.14S	78.39W	16.95	3.7	II		
2013/02/09	09:16:00	1.1N	77.67W	152	4	III		

Fuente: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

Estadísticos de sismología en la ciudad de Quito, moda y promedio en la Escala MKS y Richter

Tabla N° 27. Estadísticos de sismología en la ciudad de Quito, moda y promedio en la Escala MKS y Richter.

	Escala de Richter	Escala MKS
Moda	4	III
Promedio	4.054	III

Fuente: Elaboración Propia

Se procede a la valoración del factor sísmico. No se toma en cuenta el concepto de distribución Gumbel, debido a que la intensidad no es una variable continua y por tanto no se puede utilizar ninguna distribución de probabilidad conocida. En este caso se adoptó el valor de la moda de la intensidad sísmica. (Tabla N°28)

Tabla N°28. Valor del parámetro de sismología.

Intensidad Mercalli Modificada	Calificativo	Valor del Parámetro Ts
II	Leve	1
III	Muy bajo	2
IV	Bajo	3
V	Moderado	4
VI	Medio	5
VII	Elevado	6
VIII	Fuerte	7
IX	Bastante fuerte	8
X	Muy fuerte	9
XI	Extremadamente fuerte	10

Fuente: Mora & Vahrson, 1993

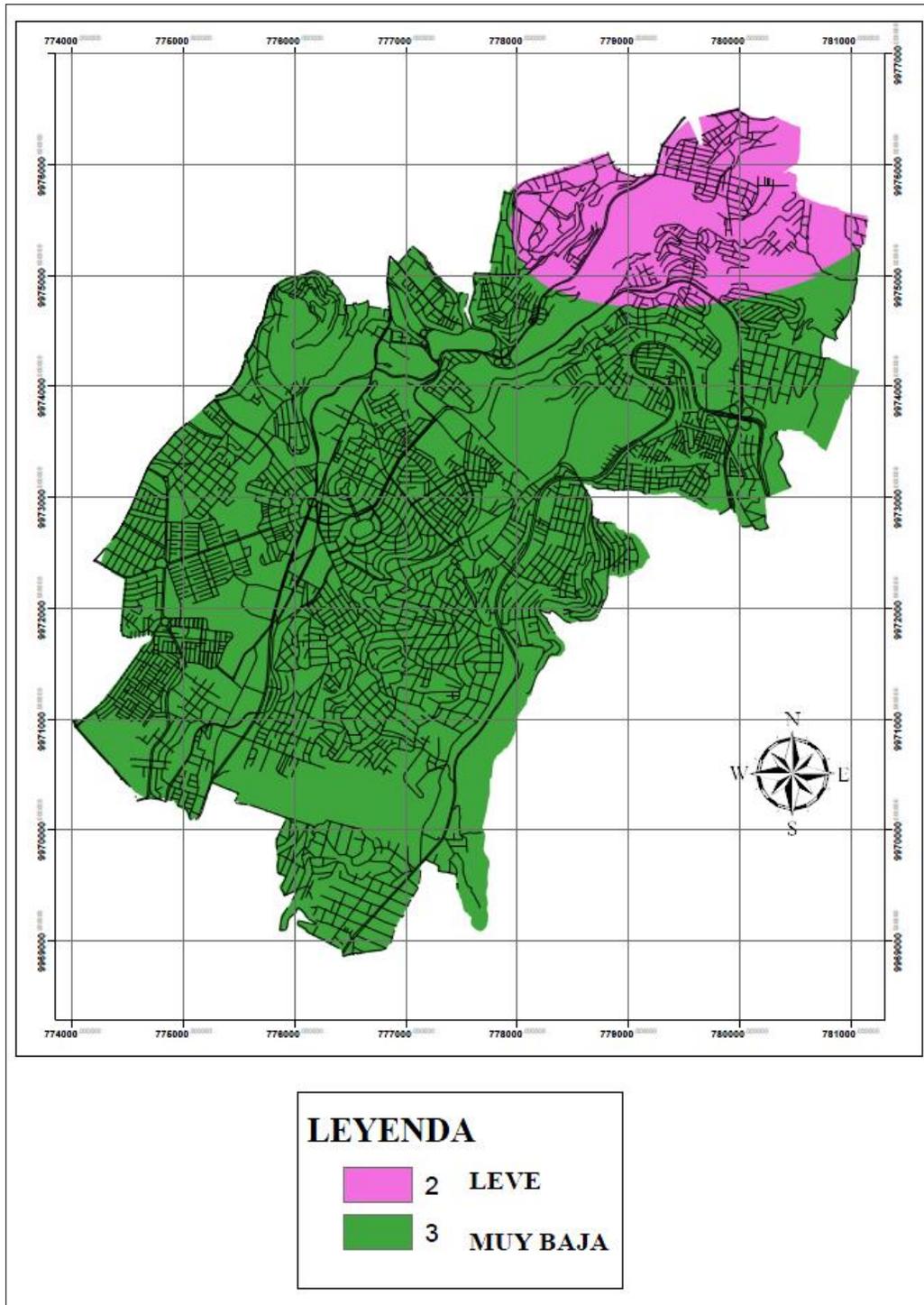


Gráfico N°8. Factor de disparo por sismicidad.
Fuente: Elaboración Propia

- **Factor precipitaciones (Tp)**

Para la valoración y representación cartográfica de este factor, se consideran las precipitaciones máximas en 24 horas de las estaciones: La Tola e Izobamba; no se tomó en cuenta la estación de Ñaquito ya que no cuenta con las series de datos completas requeridas para el área de estudio.. (Anexo1). Para el cálculo se empleó el método de Gumbel o de valores extremos, para lo cual se recomienda utilizar una serie de datos mayor a 10 años (Mora y Vahrson, 1993).

Datos de precipitaciones máximas en 24 horas de cada estación

Tabla N°29. Datos de precipitaciones máximas en 24 horas de cada estación

ESTACION	PRECIPITACIONES MAXIMAS EN 24 HORAS (mm)	
	LA TOLA	IZOBAMBA
1998	20,3417	24,2667
2000	24,5750	22,0167
2001	22,1917	21,1917
2002	22,4667	25,6583
2003	17,4167	25,3167
2004	19,7167	23,1167
2005	19,5583	24,3417
2006	18,4917	21,7750
2007	21,2750	26,4500
2008	19,2333	26,4667
2009	18,5333	24,2000

Fuente: INAMHI

Se estiman los parámetros de la distribución teórica de probabilidad; debido a que los datos corresponden a precipitaciones máximas anuales, se decide trabajar con la distribución Gumbel para obtener el umbral de precipitaciones de cada estación meteorológica.

Se calcula la media, desviación estándar, valor de la variable K, desviación respecto a la media y el valor máximo para cada estación, para obtener el umbral de precipitaciones.

Calculo de la distribución de Gumbel para la estación de La Tola

Tabla N°30. Calculo de la distribución de Gumbel para la estación de La Tola.

Año	Datos
1998	20,3417
2000	24,5750
2001	22,1917
2002	22,4667
2003	17,4167
2004	19,7167
2005	19,5583
2006	18,4917
2007	21,2750
2008	19,2333
2009	18,5333

desviación		n
media	típica	
20,34545455	2,102641737	11
0,9676	0,4996	
alfa	beta	
0,460183008	19,25979951	

Gumbel		
T	Precipitación	Prob(Pmax<=x)
2	20,06	0,5
5	22,52	0,8
10	24,15	0,9
25	26,21	0,96
50	27,74	0,98
100	29,26	0,99
200	30,77	0,995
500	32,76	0,998

Fuente: Elaboración Propia

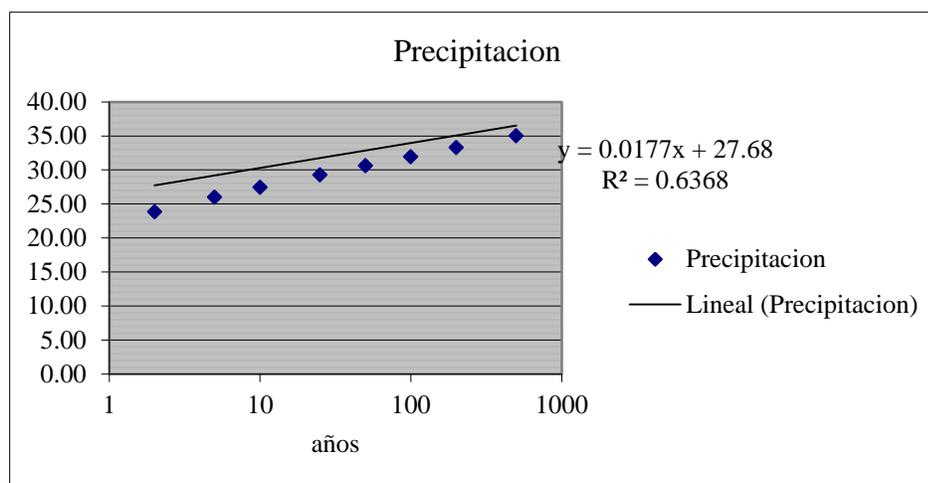


Gráfico N°9. Grafica de dispersión de la estación La Tola.

Fuente: Elaboración Propia

Calculo de la distribución de Gumbel para la estación Izobamba

Tabla N°31. Calculo de la distribución de Gumbel para la estación Izobamba.

Año	Datos
1998	24,2667
2000	22,0167
2001	21,1917
2002	25,6583
2003	25,3167
2004	23,1167
2005	24,3417
2006	21,7750
2007	26,4500
2008	26,4667
2009	24,2000

desviación típica		
media	desviación típica	n
24,07272727	1,851797516	11

0,9676 0,4996

alfa	beta
0,522519331	23,1165904

Gumbel		
T	Precipitación	Prob(Pmax<=x)
2	23,82	0,5
5	25,99	0,8
10	27,42	0,9
25	29,24	0,96
50	30,58	0,98
100	31,92	0,99
200	33,25	0,995
500	35,01	0,998

Fuente: Elaboración Propia

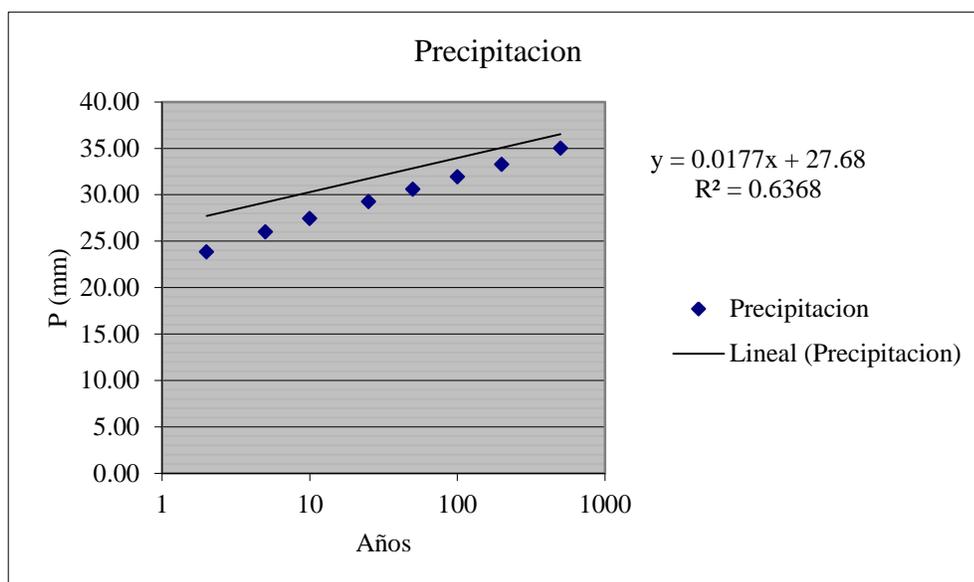


Gráfico N° 10. Grafica de dispersión Izbamba.

Con este valor umbral (valor mínimo) calculado para cada estación (La tola 20,06 mm – Izobamba 23,82 mm), se construyen los rangos para la valoración del factor intensidad de lluvias, como lo indica la Tabla N°33 y N°34. Se tiene que señalar que se mantuvieron los valores ponderados desde 1 a 5, como está propuesto en la metodología de Mora y Vahrson (1993).

Tabla 32. Valores de precipitación para la estación La Tola.

Rangos	Valores de precipitación	Susceptibilidad
20,06 - 22,6	1	Muy baja
22,6 - 25,14	2	Baja
25,14 - 27,68	3	Media
27,68 - 30,22	4	Alta
30,22 - 32,76	5	Muy alta

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N°33. Valores de precipitación para la estación Izobamba.

Rangos	Valores de precipitación	Susceptibilidad
< 23,82	1	Muy baja
23,82 – 28,296	2	Baja
28,296 – 30,534	3	Media
30,534 – 32,772	4	Alta
>32,772	5	Muy alta

Fuente: Elaboración Propia

Luego se calcula el promedio de las precipitaciones máximas en 24 horas de cada una de las series de las estaciones involucradas en el análisis, como lo muestra la Tabla N°34.

Tabla N°34. Promedio de las series de las dos estaciones La Tola e Izobamba.

ESTACION	Promedio de las series (mm)
La Tola	20,3454
Izobamba	24,0727

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los valores de la Tabla N°33 y N°34, se valora el factor intensidad de lluvias (Tp) para cada una de las estaciones, como se observa en la Tabla N°35.

Tabla 35. Valoración de la intensidad de lluvia.

Estación	Promedio de las precipitaciones máximas en 24 horas (mm)	Susceptibilidad	Factos intensidad de lluvia (Tp)
La Tola	20,3454545	Muy baja	1
Izobamba	24,0727273	Baja	2

Fuente: Elaboración Propia

Para expresar estos resultados, se utilizan los polígonos de Thiessen, determinando el área de influencia de cada estación y asignando el valor de intensidad de lluvia que correspondiente a cada estación meteorológica.

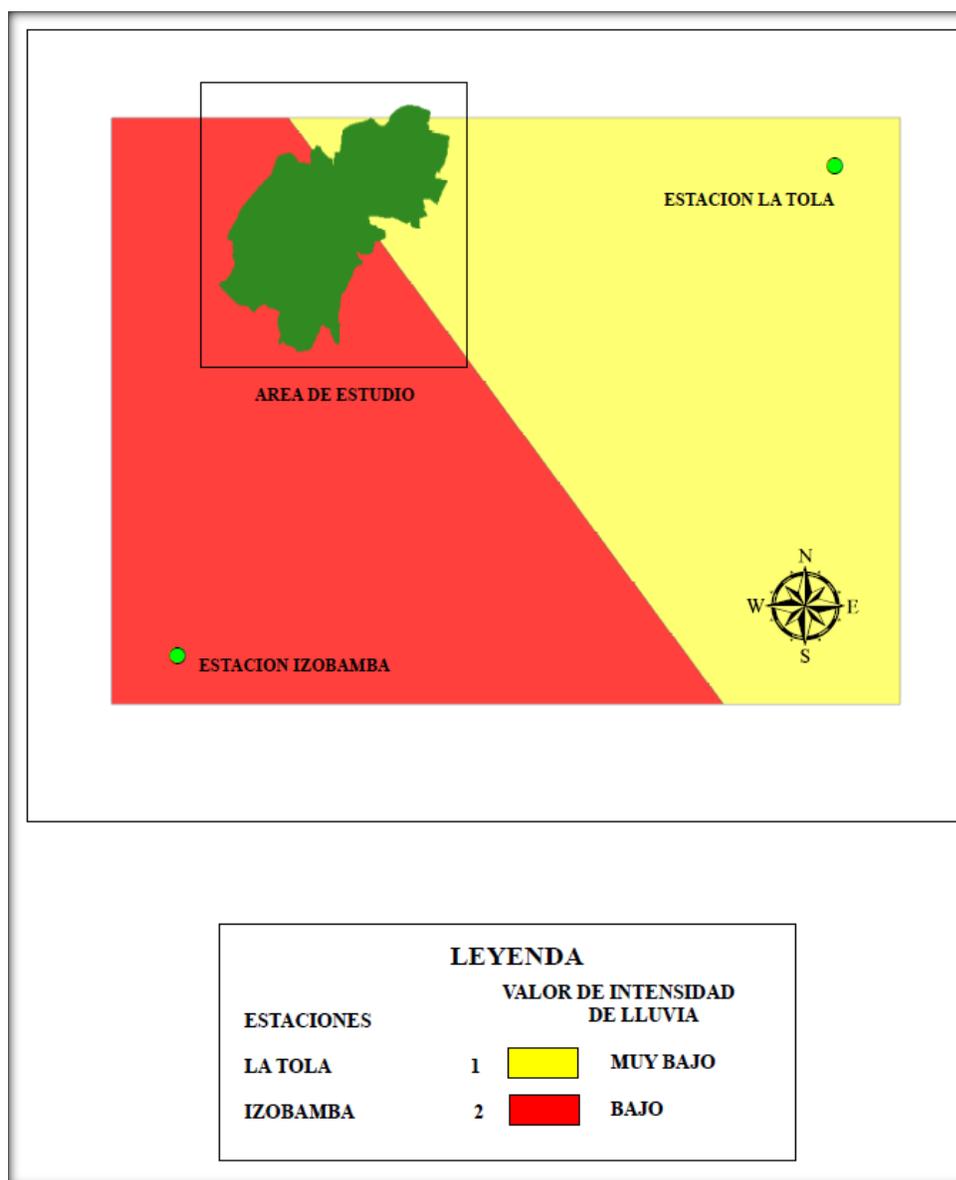


Gráfico N°11 Polígonos de Thissen factor precipitación (mm).
Fuente: Elaboración propia

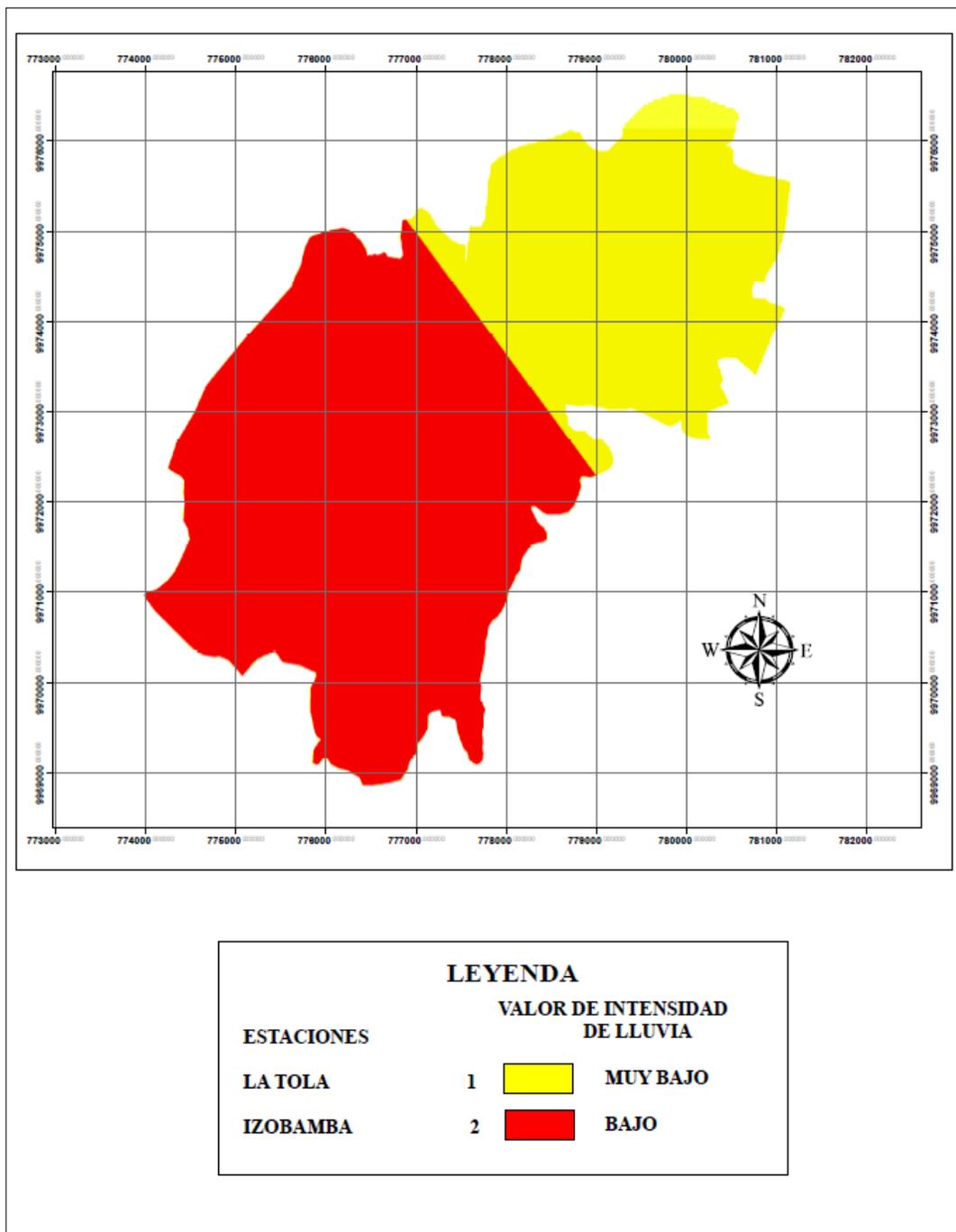


Gráfico N°12. Factor de disparo por precipitaciones.
Fuente: Elaboración Propia

3.3. Análisis de datos – Lógica Fuzzy

3.3.1. Análisis de variables y relaciones

El fundamento teórico para realizar este análisis es el método Lógica Fuzzy (Padilla, 2006) y también se hace referencia a varios proyectos de tesis (Andocilla, 2012, Avilés & Hermosa, 2009 y Carranza, 2008). Para determinar las variables que intervienen en el análisis, se tomó en cuenta eventos históricos, criterios técnicos, zona de estudio, y la disponibilidad de información; obteniendo datos que permitan analizar de la mejor forma la susceptibilidad del terreno a deslizamientos.

De acuerdo al análisis de cada variable, en relación a la susceptibilidad, permitió conocer como cada una de estas afecta al análisis de deslizamientos. Las variables son:

- **Dureza de la roca**

La resistencia del suelo a la erosión depende en parte de la posición topográfica, la pendiente del terreno o la incidencia directa de las actividades humanas y las propiedades del suelo son los condicionantes más importantes.

Existen varios índices que expresan la erosionabilidad de un suelo en función de su textura (un suelo esta expresado por la distribución del tamaño de las partículas sólidas que comprenden el suelo), la

estructura, el contenido en materia orgánica, la estabilidad de agregados o la capacidad de infiltración. (Avilés & Hermosa, 2009)

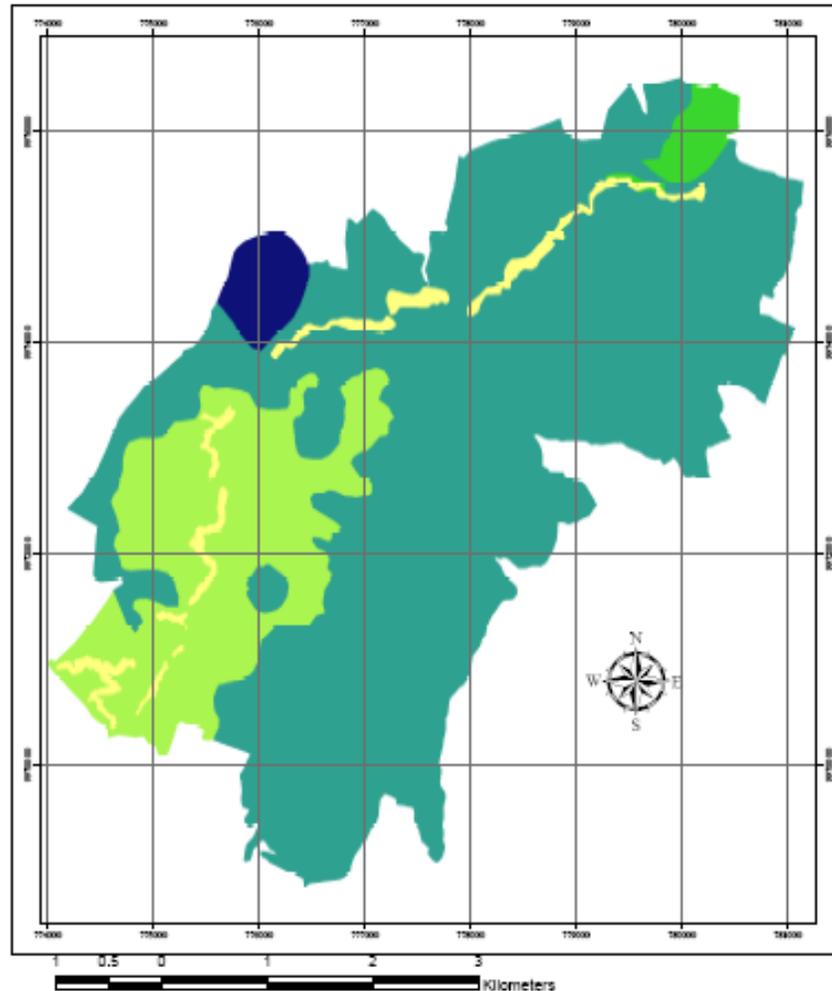


Grafico N°13. Variable física Dureza de Roca
Fuente: Elaboración Propia

- **Pendiente**

Se analizó esta variable porque en la zona de estudio se presentan grandes cambios de pendientes, la pendiente es un factor que condiciona la aparición de movimientos del terreno. (Andocilla, 2012)

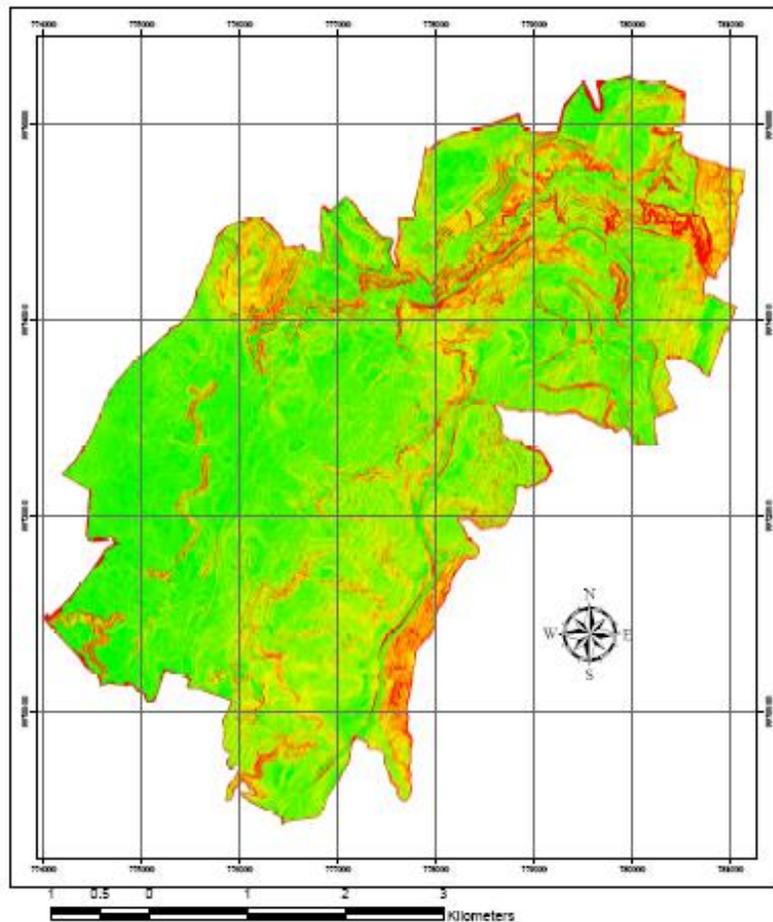


Grafico N°14. Variable física Pendiente
Fuente: Elaboración Propia

- **Cobertura Vegetal**

Se analizó esta variable según el mapa de cobertura vegetal del Distrito Metropolitano de Quito realizado en la Secretaría de Ambiente del Municipio de Quito. Dirigido a la zona de estudio, este permite relacionar la mayor o menor influencia de la cobertura del suelo a provocar deslizamientos. Ya que se ha comprobado la influencia de la vegetación en el control de los procesos de erosión del suelo. La

protección de la cobertura vegetal depende de su naturaleza, que puede brindar diferentes grados de protección al suelo según su forma. Utilizando para esto la metodología Satty, para ubicar pesos a cada una de las clasificaciones y obtener un valor ponderado de la relación entre la cobertura vegetal y la susceptibilidad a deslizamientos. (Andocilla, 2012)

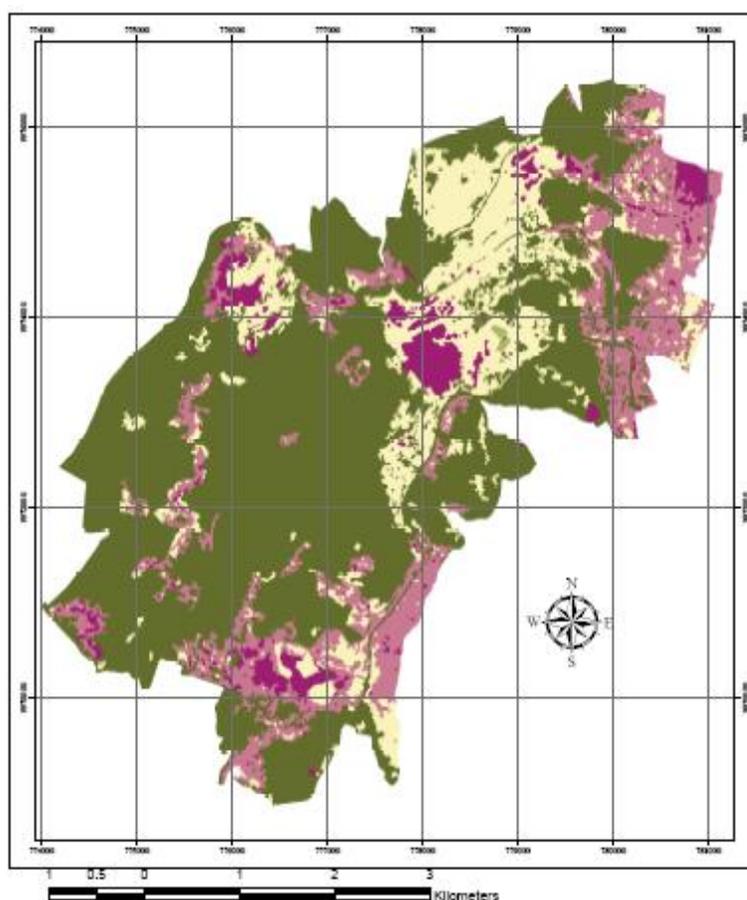


Gráfico N°15. Variable física Cobertura Vegetal
Fuente: Elaboración Propia

- **Precipitación**

Indica la cantidad de precipitaciones máximas en el área de estudio, durante el periodo del año 2000 al 2008, factor que influye considerablemente en la estabilidad de los taludes, ya que después de épocas de intensas lluvias se suelen producir grandes deslizamientos, esto es debido a que la infiltración de agua en terreno, puede ocasionar un incremento de las fuerzas que tienden al deslizamiento, la importancia de esta variable se establece que cuanto más saturado este el suelo de agua, este tiende a ser menos estable pudiendo ser solamente un detonante en la inestabilidad del terreno. (Avilés & Hermosa, 2009)

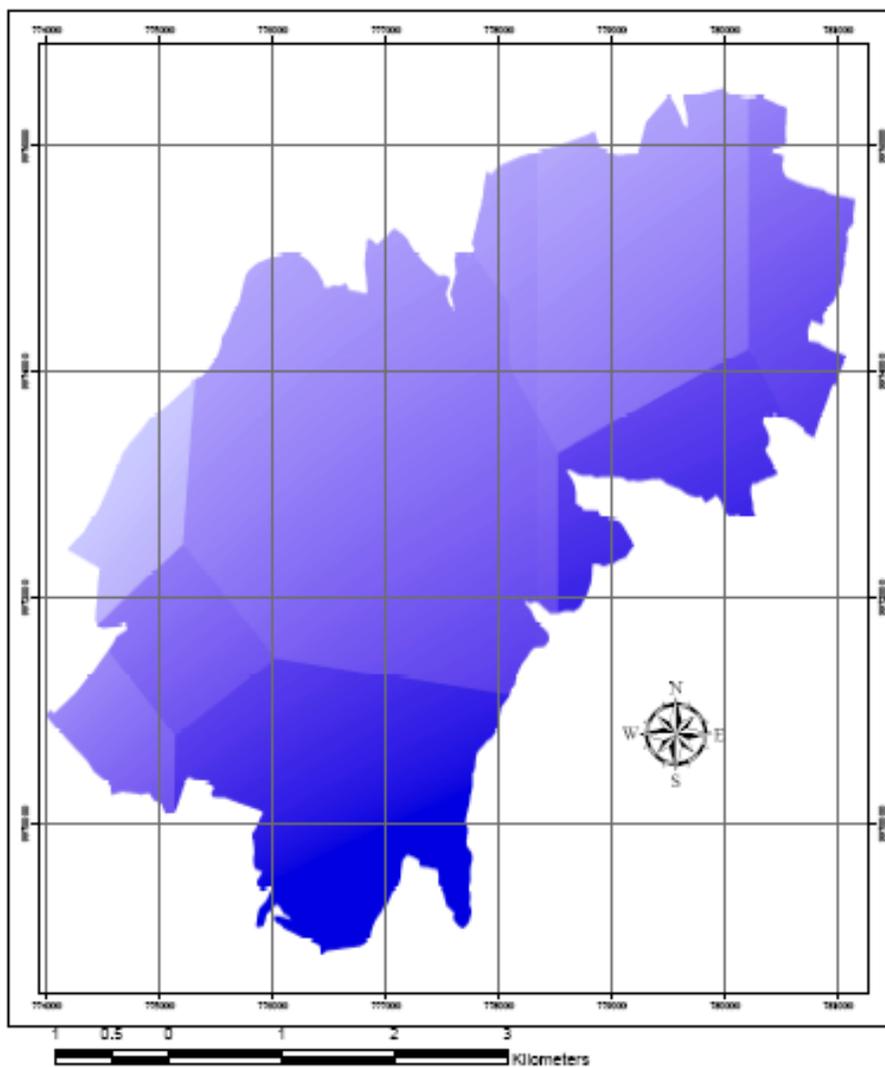


Grafico N°16. Variable física Precipitaciones
Fuente: Elaboración Propia

- **Distancia a vías de comunicación.**

La construcción de vías en esta zona, ha afectado directamente a la estabilidad del terreno, causando derrumbes, pequeños deslizamientos, esto puede evidenciarse que cuanto más próximo al tipo de construcción vial, el terreno se vuelve menos estable. Se

estima la estabilidad del terreno en función de sus características de construcción antrópica. (Andocilla, 2012)

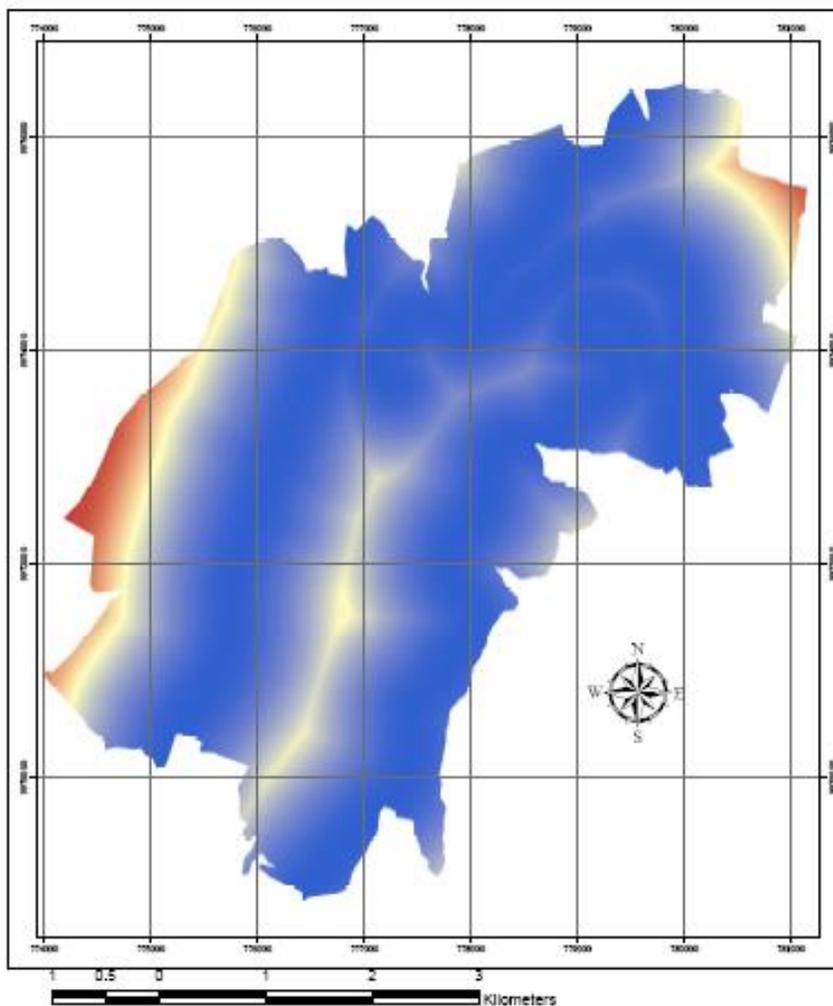


Grafico N°17. Variable física Distancia a Vías

Fuente: Elaboración Propia

- **Distancia a recursos hídricos**

La presencia de una red hídrica es inversamente proporcional a la erosión producida por esta y la menor distancia de una zona a una red hidrológica implica el aumento de movimientos en masa. (Andocilla, 2012)

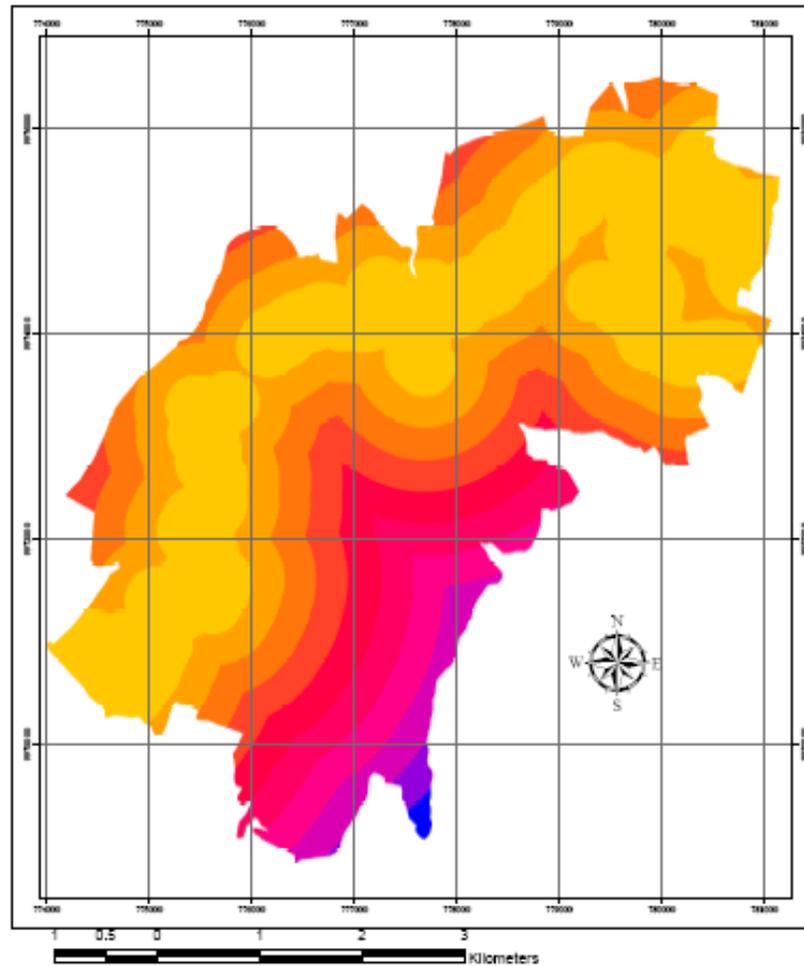


Gráfico N°18. Variable física Distancia a Ríos
Fuente: Elaboración Propia

- **Distancia a fallas geológicas**

Una falla geológica es una discontinuidad que se forma en las rocas superficiales de la Tierra (hasta unos 200 km de profundidad) por fractura, 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. La zona de

estudio cuenta con fallas, transcurrentes, inferida, diaclasa y fracturas, al hacer un análisis de proximidad, las zonas que se encuentren cerca se verán más afectadas a movimientos de terreno, que zonas más alejadas. (Avilés & Hermosa, 2009)

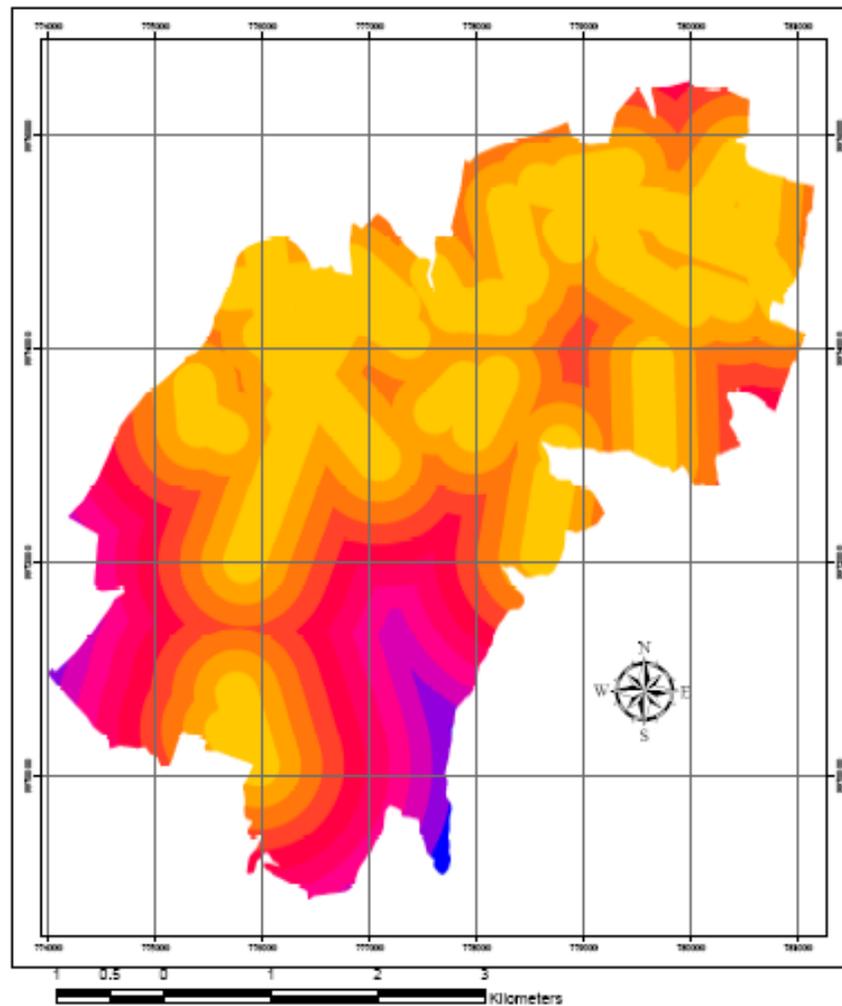


Grafico N°19. Variable física Distancia a Fallas Geológicas
Fuente: Elaboración Propia

3.4. Análisis de proximidad

Con referencia a un conjunto de objetos, se pueden obtener mapas que ilustran como se reparte un territorio en términos de diferencia de distancias a cada objeto (mapa de distancias) o cómo se asigna a cada parte del territorio su objeto más cercano (mapa de proximidad). El análisis de proximidad es una forma de analizar localizaciones o rasgos mediante medición de distancias entre ellos y otros rasgos en el área.

Las variables distancia a vías, distancia a fallas, y distancia a recursos hídricos son analizadas de acuerdo a su proximidad, demostrando que mientras más cercano se encuentre un punto a estas variables su probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento es mayor, que un punto que se encuentre más alejado a cada una de estas variables. (Avilés & Hermosa, 2009)

3.4.1. Interpolación

La interpolación es una técnica de generalización y es definida como el método de predecir valores desconocidos de localizaciones vecinas. La interpolación trata de predecir datos de sitios no muestreados, se utiliza esta técnica para construir el mapa de isoyetas, tomando como base los datos meteorológicos de estaciones cercanas a la zona de estudio. Para la realización del mapa de isoyetas se obtuvo los puntos de ubicación de las estaciones meteorológicas de la zona. (Villar del Hoyo)

Estaciones Meteorológicas cercanas a la Zona de Estudio

Tabla N°36. Estaciones Meteorológicas cercanas a la Zona de Estudio.

NOMBRE	CODIGO	ALTURA	UTM X	UTM Y	PRE_MEDIA (mm)	PRE_MAXIMA (mm)
LA TOLA	M002	2480	793125,6434	9974612,504	72,75740741	67,3
IZOBAMBA	M003	3058	772701,7846	9959434,982	124,5046296	71,3
INAMHI	M024	2812	780131,5112	9981560,42	89,23796296	60,3
CHILLOGALLO	M354	3440	763515,7441	9968502,571	135,8472222	53

Fuente: INAMHI, Anuario meteorológico.

3.4.2. Rasterización

Para procesar la información, se requiere transformarla a formato raster, que es una estructura más simple de asimilación más directa a datos de sensores remotos, las operaciones de superposición son más sencillas y brinda mayor facilidad en el análisis espacial como distribución, densidad de superficie, etc. La unidad espacial conserva la misma forma y tamaño de modo que se facilitan las simulaciones. Este formato es útil para análisis de grandes extensiones con baja precisión de propiedades espaciales. Sin embargo, las ventajas se presentan, primeramente, en que el espacio es definido de una manera uniforme y muy visual. Como resultado, los sistemas raster tienen mayor poder analítico que el vectorial en el análisis del espacio continuo, y por tanto, es idóneo para el estudio de fenómenos cambiantes en el espacio como

las variables de los suelos, elevación del terreno, los índices de vegetación, precipitaciones entre otros. (Andocilla, 2012)

Para cambiar las variables a formato raster se procede a determinar la resolución espacial necesaria para mantener la información a escala 1:1000, escala determinada para el proyecto. Para el análisis de deslizamiento se utilizará un factor de 0.3 milímetros. Ya que el presente proyecto se basa y complementa, a proyectos anteriormente desarrollados.

3.5. Análisis de Metodología de Lógica Fuzzy

La contribución fundamental del razonamiento aproximado o Lógica Fuzzy es el uso que hace de las variables en términos de valores lingüísticos (cualitativos) y la representación de estas en términos de variables numéricas. El uso del concepto de variable en la teoría de Lógica Fuzzy conduce a tratar dominios que no están dentro del ámbito de la lógica clásica, como es el caso de la aplicación de esta teoría en la susceptibilidad del terreno a deslizamientos. (Andocilla, 2012)

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

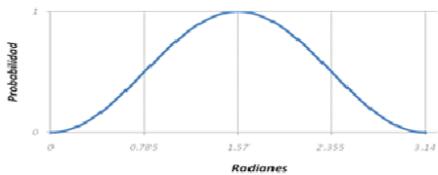
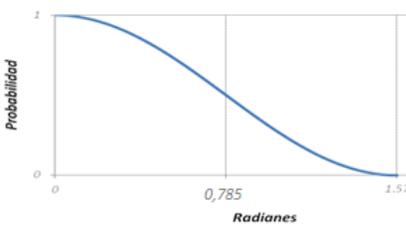
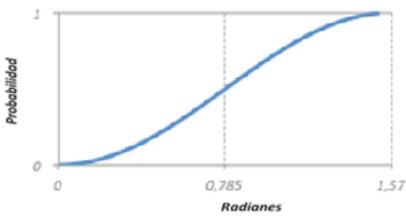
Fuzzy las funciones que se aplican son el Seno y el Coseno ya que, el rango en el que se trabaja es entre 0 y 1. (Andocilla, 2012)

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

Las variables que intervienen en este proyecto no cumplen los parámetros de ocurrencia del primer caso, por lo que el análisis de este, queda descartado en el análisis para este evento. (Ver Tabla N°37) (Andocilla, 2012)

Tabla N°37. Casos Lógica Fuzzy

CASOS FUZZY	RANGO	FUNCION
<p style="text-align: center;">Primer Caso</p>  <p style="text-align: center;">Rango de interés de la función Seno</p>	<p>0° a 180° O en radianes 0 a π</p>	<p>Función Seno</p>
CASOS FUZZY	RANGO	FUNCION
<p style="text-align: center;">Segundo Caso</p>  <p style="text-align: center;">Segundo caso del análisis Fuzzy</p>	<p>0° a 90° O en radianes 0 a $\frac{\pi}{2}$</p>	<p>Función Coseno</p>
<p style="text-align: center;">Tercer Caso</p>  <p style="text-align: center;">Tercer caso del análisis Fuzzy</p>	<p>0° a 90° O en radianes 0 a $\frac{\pi}{2}$</p>	<p>Función Seno</p>

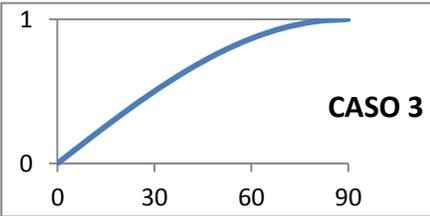
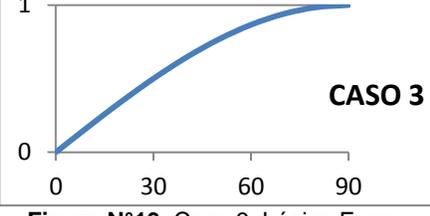
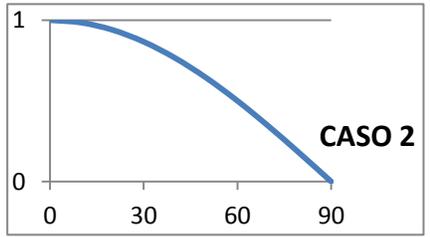
Fuente: Padilla Oswaldo

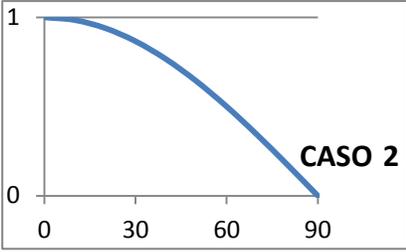
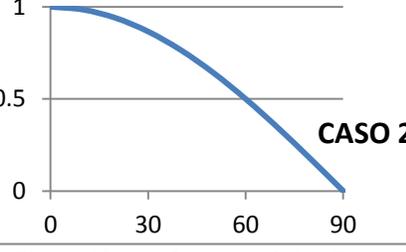
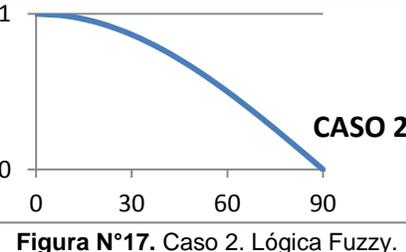
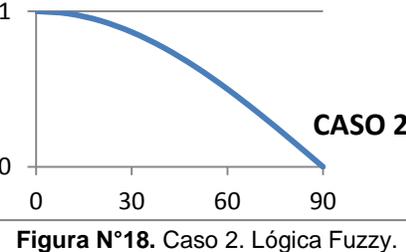
3.5.1 Análisis de variables según casos de Lógica Fuzzy

A continuación se analizará el comportamiento de cada variable que intervienen en los movimientos en masa, de acuerdo a los diferentes casos que existen en la metodología Fuzzy. Los casos serán explicados con más detalle posteriormente cuando se trate el tema de la metodología Fuzzy.

3.5.2 Análisis de las variables

Tabla N°38. Análisis de Variables Lógica Fuzzy

VARIABLE	DESCRICION	CASO FUZZY
<p>Pendientes (pend)</p>	<p>La variable pendiente existe una relación directamente proporcional, es decir que mientras a mayor grado de pendiente exista, mayor será la probabilidad de ocurrencia de grandes o pequeños deslizamientos. (Andocilla, 2012)</p>	 <p>Figura N°12. Caso 3. Lógica Fuzzy. Pendientes.</p>
<p>Precipitación (precip)</p>	<p>La variable precipitación existe una relación directamente proporcional, es decir, que la influencia del agua lluvia en el terreno, provoca inestabilidad, por la tanto la ocurrencia de deslizamientos. (Andocilla, 2012)</p>	 <p>Figura N°13. Caso 3. Lógica Fuzzy. Precipitación.</p>
<p>Distancia a Vías de Comunicación (Vias_dist)</p>	<p>La presencia de vías han influenciado en la inestabilidad del terreno, lo que provoca pequeños o grandes deslizamientos, es decir que mientras más corta sea la distancia de una vía en relación al terreno, mayor es la probabilidad de que se produzca dicho fenómeno y viceversa. (Andocilla, 2012)</p>	 <p>Figura N°14. Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Vías de comunicación</p>
		<p>CONTINUA</p> <p style="text-align: right;">➔</p>

VARIABLE	DESCRIPCION	CASO FUZZY
Distancia a Fallas geológicas (Fallas_dist)	<p>La actividad en una falla geológica, causan movimientos en el terreno, sean lentos o violentos, estos aumentan la probabilidad de que se produzcan eventos. Es decir que mientras la distancia del terreno a las fallas es pequeña, más probabilidades de que el terreno sea susceptible a deslizamientos. Si la distancia aumenta los deslizamientos tienen pocas probabilidades de que ocurran. (Andocilla, 2012)</p>	 <p>Figura N°15. Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Fallas Geológicas</p>
Distancia a Red Hídrica (Rios_dist)	<p>El agua de ríos es causante de erosión con el tiempo, por lo mismo es causante de la inestabilidad del terreno, es decir, que mientras más pequeña es la distancia a estos es mayor la ocurrencia de deslizamientos y si la distancia va aumentando la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos es menor. (Andocilla, 2012)</p>	 <p>Figura N° 16. Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Red Hídrica.</p>
Influencia de Cobertura Vegetal (vegetal)	<p>La presencia de cobertura vegetal indica que mientras mayor sea la cantidad de la misma en el terreno, existirá menor grado de ocurrencia de deslizamientos, así mismo la ausencia de esta, da lugar a la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en mayor grado. (Andocilla, 2012)</p>	 <p>Figura N°17. Caso 2. Lógica Fuzzy. Influencia Cobertura Vegetal.</p>
Índice de Dureza de la Roca (dureza)	<p>Existe una relación indirectamente proporcional entre la resistencia de la roca a la erosión y la ocurrencia de deslizamientos, ya que mientras más resistente sea la roca existe menor probabilidades de que existan deslizamientos. (Andocilla, 2012)</p>	 <p>Figura N°18. Caso 2. Lógica Fuzzy. Índice de Dureza de la Roca.</p>

La tabla N°39 resume el análisis previo de pertenencia de cada variable a cada función de Lógica Fuzzy, en ella se puede visualizar al caso de Lógica Fuzzy y la función que se aplica en cada una de las variables y su vez el rango al que pertenece.

Tabla N°39. Pertenencia de la variable a cada función de Lógica Fuzzy

VARIABLE	CASO	RANGO	FUNCION
Pend	Caso 3	$0 - \pi/2$	Seno
Precip	Caso 3	$0 - \pi/2$	Seno
Vías_dist	Caso 2	$0 - \pi/2$	Coseno
Fallas_dist	Caso 2	$0 - \pi/2$	Coseno
Ríos_dist	Caso 2	$0 - \pi/2$	Coseno
Vegetal	Caso 2	$0 - \pi/2$	Coseno
Dureza	Caso 2	$0 - \pi/2$	Coseno

3.6. Modelos cartográficos Mora Varhson

Mediante la metodología de Mora & Vahrson y Lógica Fuzzy, se realizó varios modelos de la susceptibilidad a deslizamientos de la zona de estudio, los cuales permitieron conocer de mejor forma la realidad del fenómeno de deslizamientos en dicha zona.

3.6.1. Obtención de los modelos cartográficos.

3.6.1.1. Obtención de variables para Mora -

Vahrson

a) Pendiente

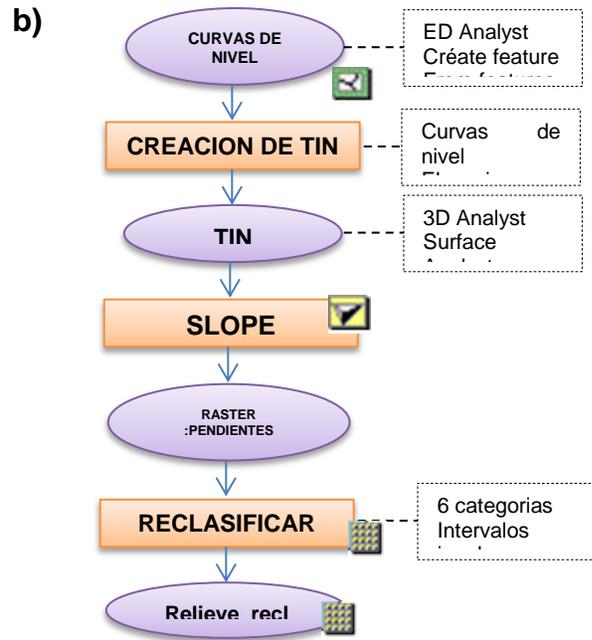


Gráfico N°20. Modelo Cartográfico variable pendiente

c) Humedad del Suelo

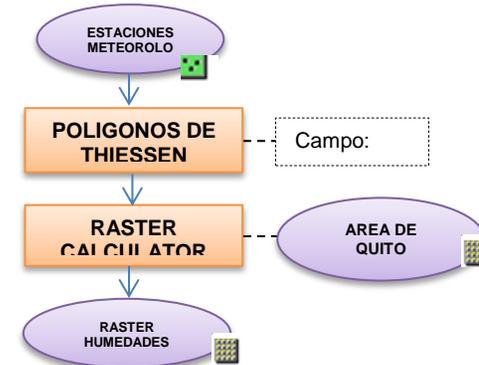


Gráfico N°21 Modelo Cartográfico variable humedad

d) Precipitaciones

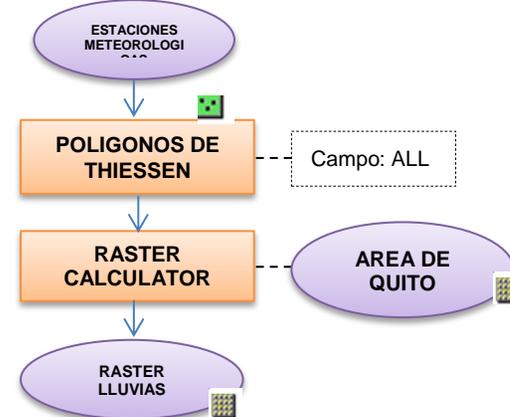


Gráfico N°22. Modelo Cartográfico variable precipitación

e) Geología

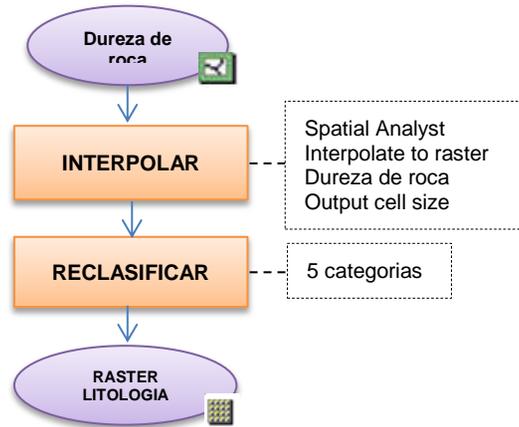


Gráfico N°23. Modelo Cartográfico variable litología

f) Sismología

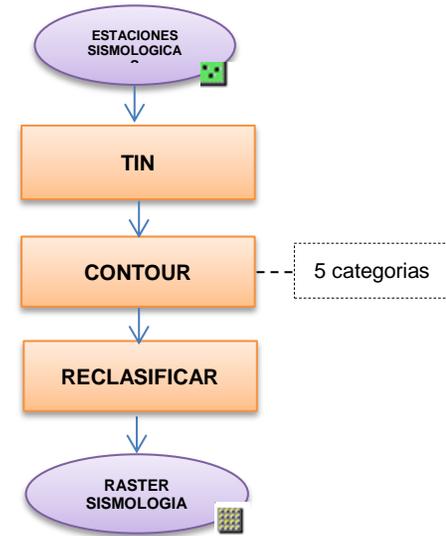


Gráfico N°24. Modelo Cartográfico variable sismología

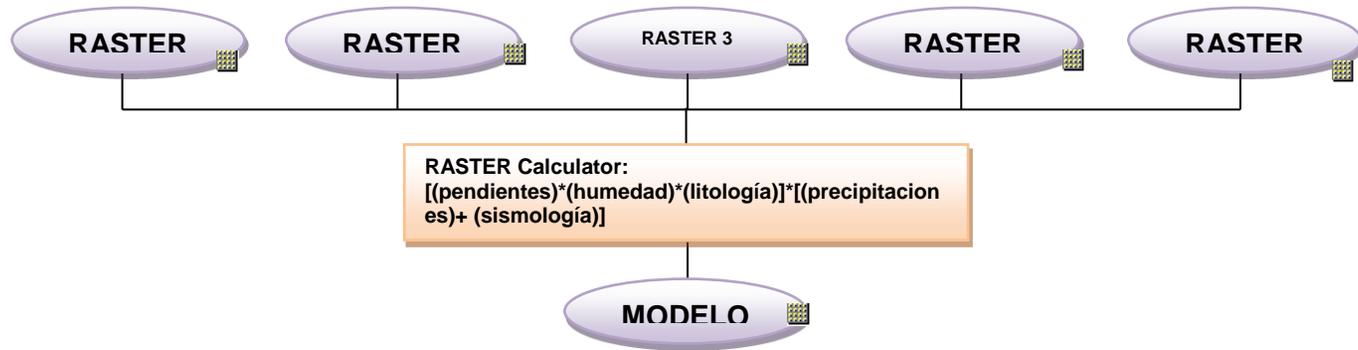


Gráfico N°25. Modelo Cartográfico

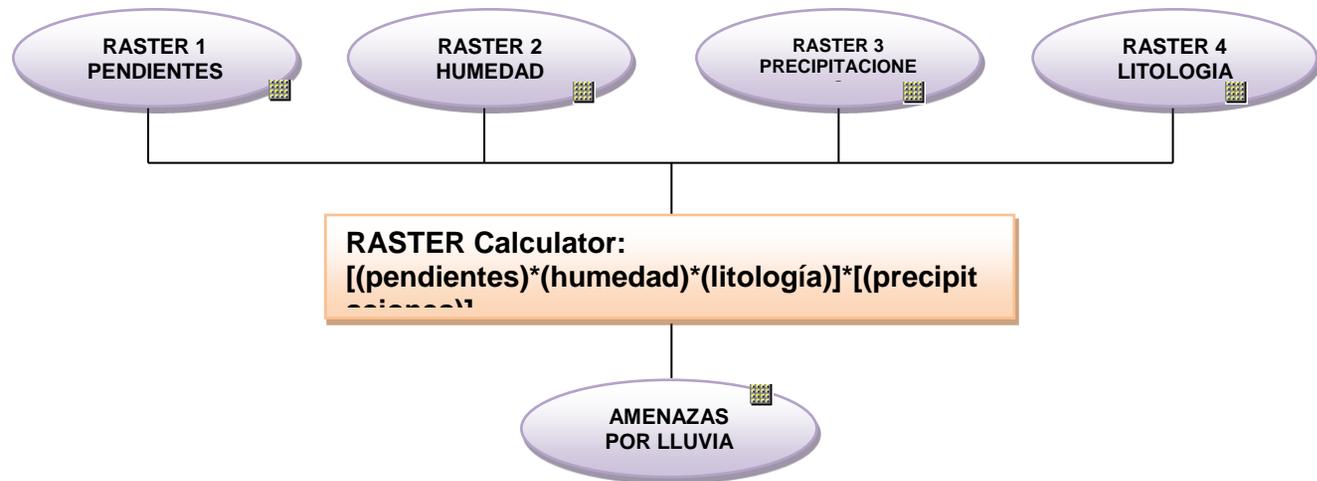


Grafico N°26. Modelo Cartográfico
amenaza por lluvias

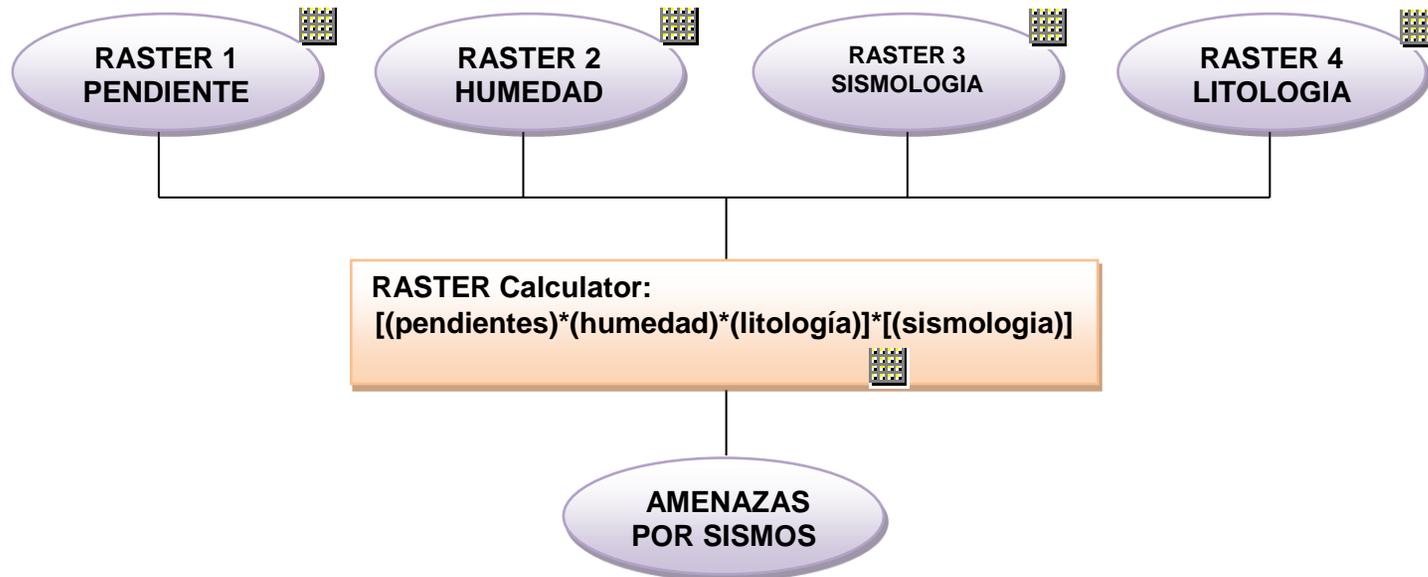


Gráfico N°27: Modelo Cartográfico
Amenaza por Sismos

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

Modelo 1: Valores de variables originales dados por el programa.

Modelo 2: Percentil. Fuzzy al 95% y 5%.

Modelo 3: Percentil. Fuzzy al 90% y 10%.

3.6.2. Obtención de variables para Lógica Fuzzy

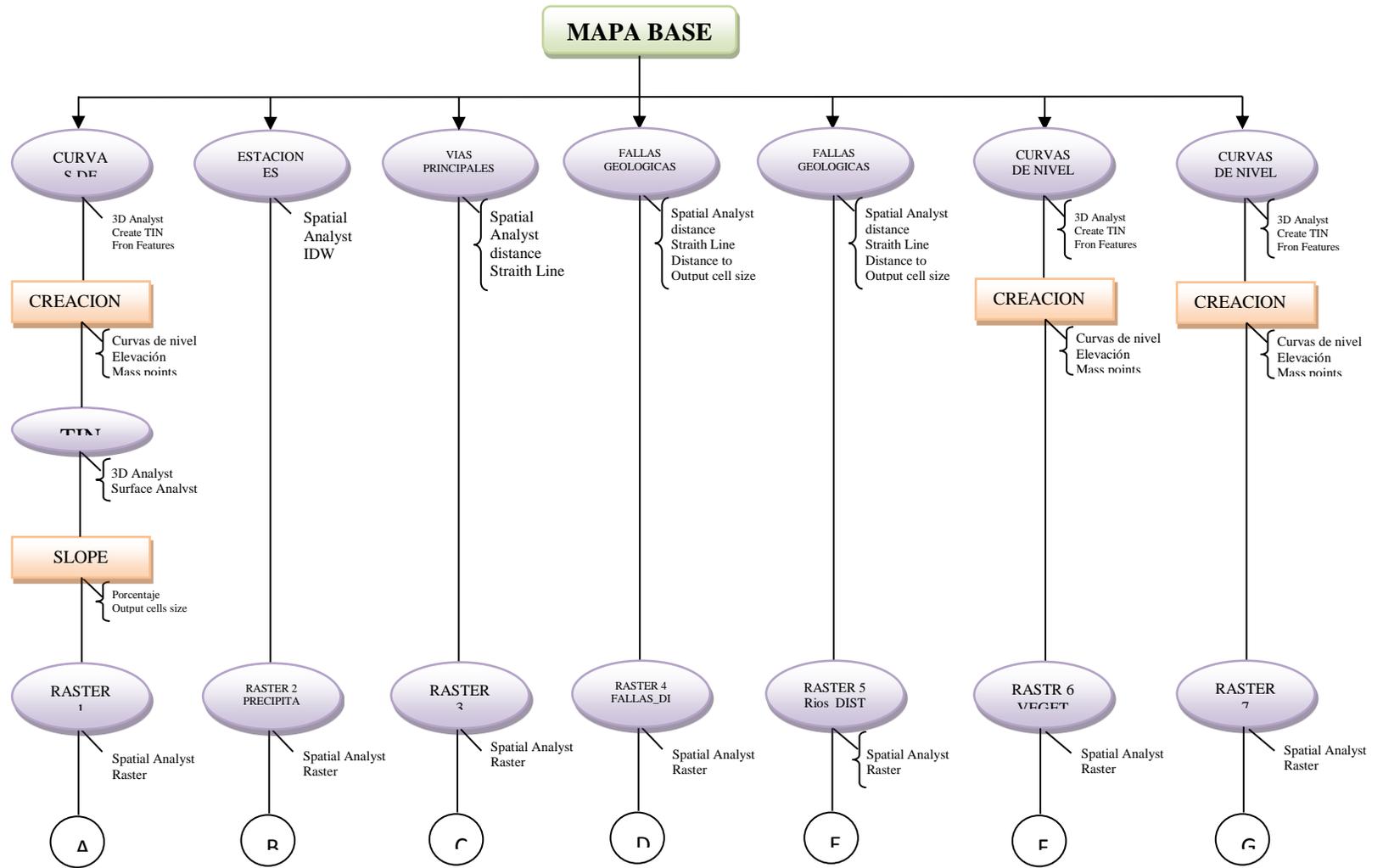


Gráfico N°28. Modelo Cartográfico general

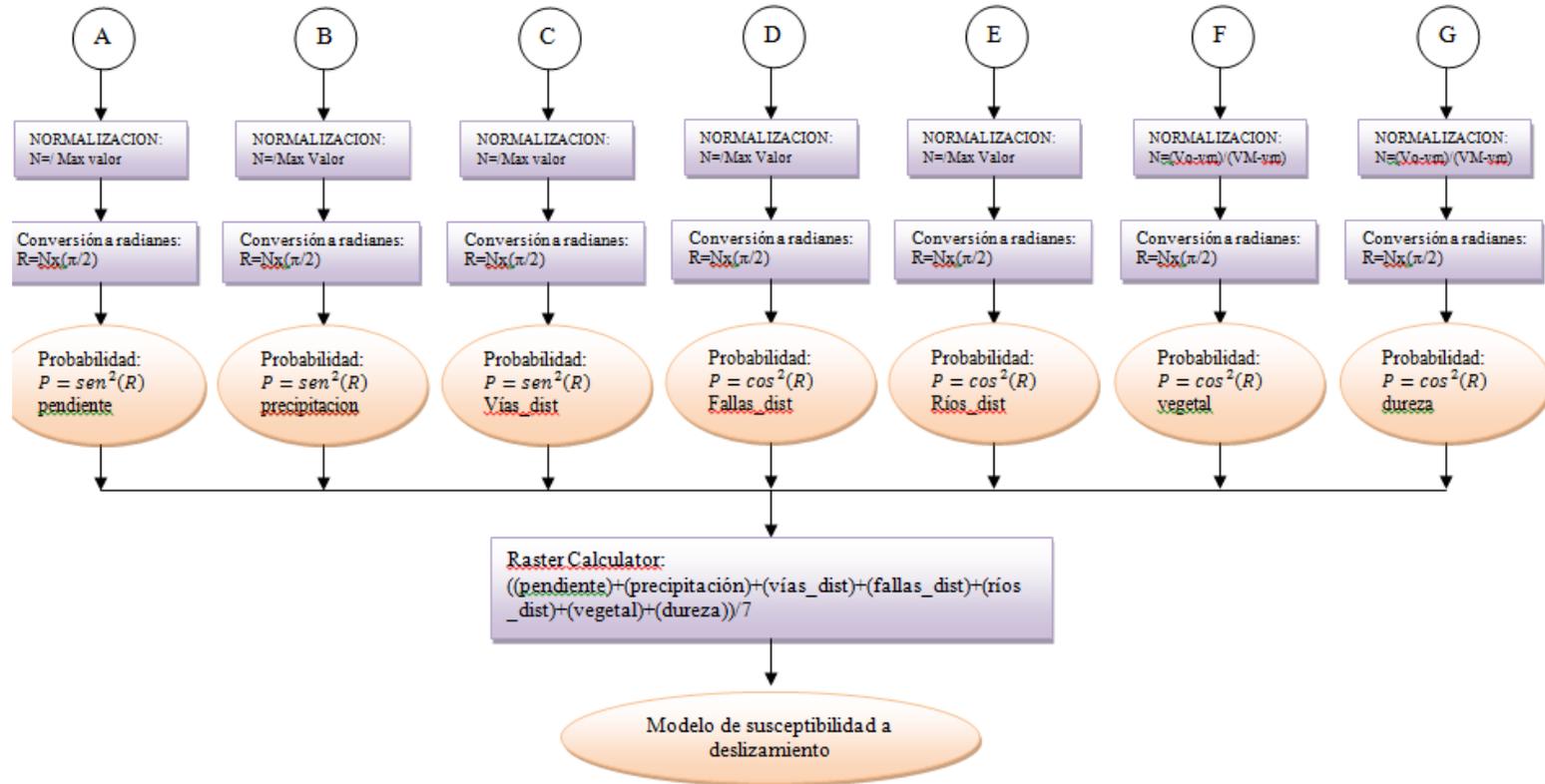


Gráfico N°29. Modelo Cartográfico

- Modelo percentil 5 %

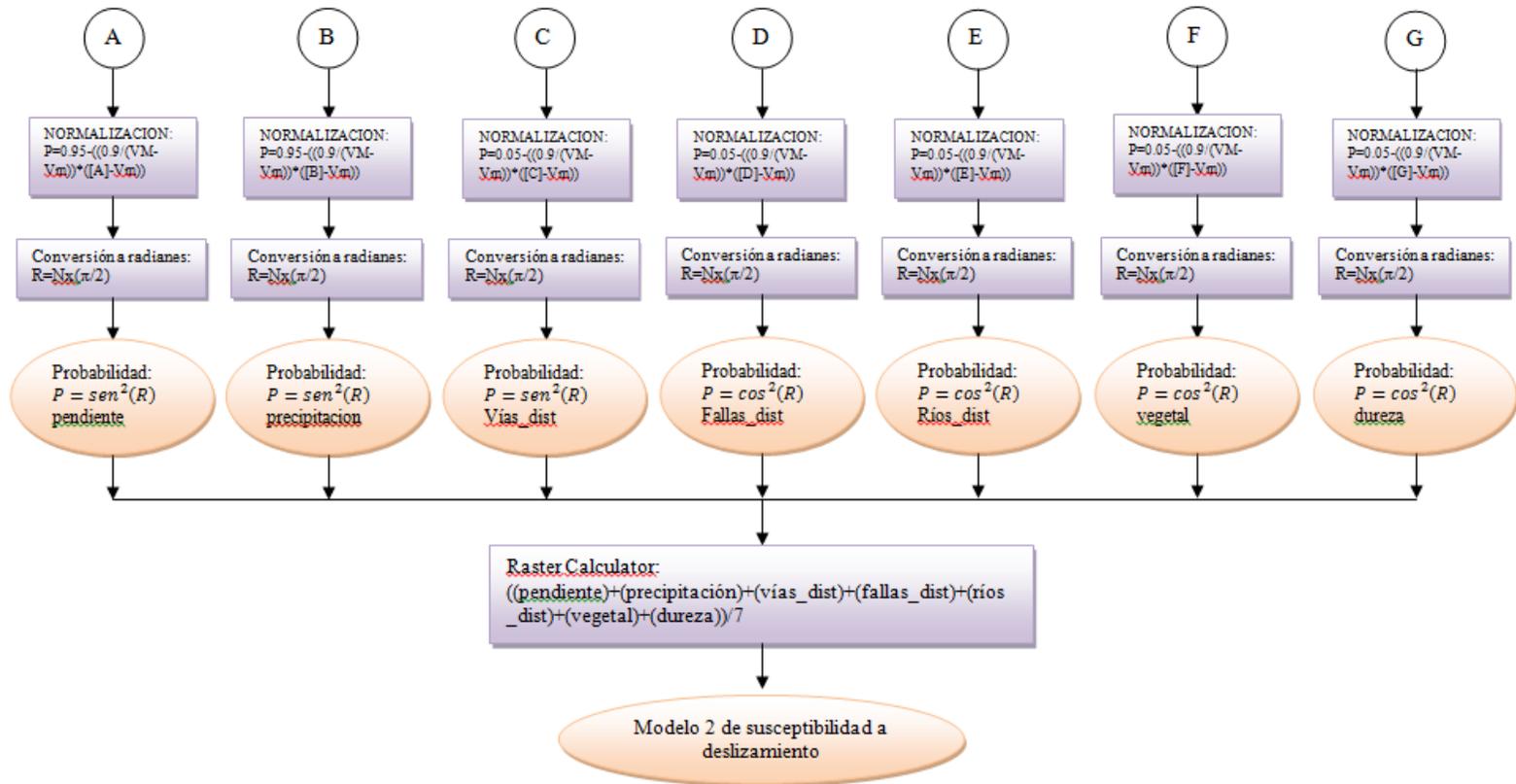


Gráfico N°30. Modelo Cartográfico modelo 2

- Modelo percentil 10%

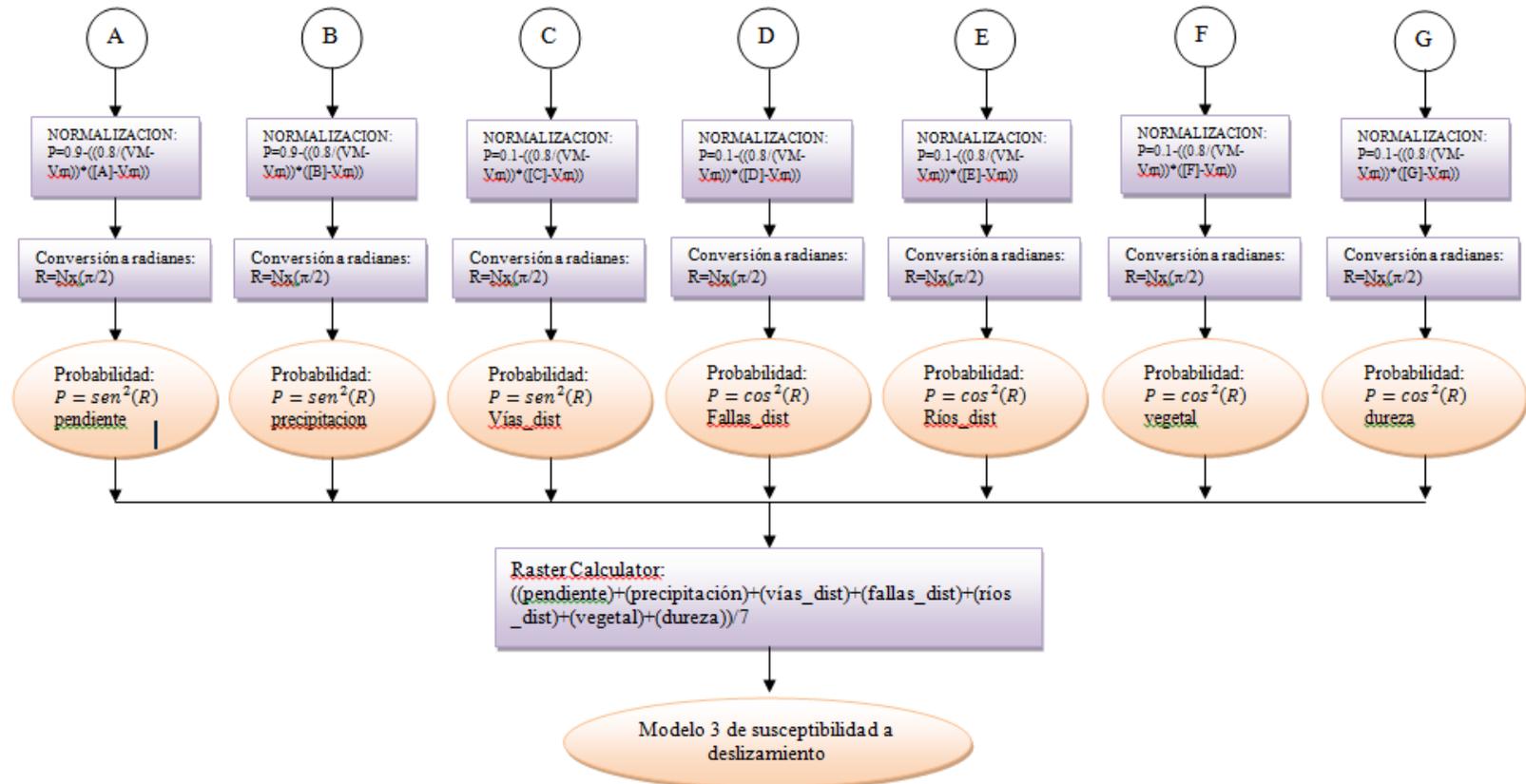


Gráfico N°31 Modelo Cartográfico modelo 3

- **Comportamiento de las variables que intervienen**

Cada variable se analizó según la probabilidad de ocurrencia del fenómeno, logrando así conocer la reacción de cada una de ellas. Para la realización del análisis se tomó, la variable independiente en relación con la variable dependiente, es decir estudiar el fenómeno de movimiento en masa. (Andocilla, 2012)

El comportamiento de las variables independientes en función de la probabilidad, realizando el análisis Fuzzy, puede generalizarse en dos grupos:

- El comportamiento del primer grupo es directamente proporcional a su variable dependiente, mientras aumenta el valor de X, aumenta el valor de Y, es decir, que existe la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos mientras el valor de la variable independiente sea superior. (Andocilla, 2012). Las variables que pertenecen a este grupo son:

- Pendiente
- Precipitación

El comportamiento del segundo grupo es inversamente proporcional, disminuye el valor de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, mientras el valor de la variable independiente aumenta, (Andocilla, 2012) las variables que pertenecen a este grupo son:

- Distancia a vías de comunicación

- Distancia a fallas geológicas
 - Distancia a red hídrica
 - Influencia de cobertura vegetal
 - Índice de dureza de la roca
-
- **Puntos de muestra**

Los puntos de muestra se realizaron con fotointerpretación y análisis en campo. Cada punto de muestra posee características referentes a cada variable utilizada en la determinación de susceptibilidad a deslizamientos en la zona de estudio.

3.6.3. Desarrollo del proceso SIG

Los diferentes modelos creados, se realizaron en un SIG, mediante operaciones algebraicas, posterior a ello se realizó su análisis. Para la obtención de los modelos se utilizó un software de sistemas de información geográfica, en este caso ArcGIS 9.3 y la herramienta Raster Calculator. Para obtener los modelos expuestos anteriormente es necesario agrupar las fórmulas, y escribirlas de forma que pueda ser utilizado en un programa SIG:

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

En el modelo 1 se utilizó las variables originales, es decir las variables en formato raster obtenidas a partir de Shapefile y de los procesos posteriores en el software.

De este raster se obtuvo valores de máximo y mínimo (que son valores que el programa genera por default) con lo que se procede a la normalización, que es llevar los valores de la variable original entre 1 y 0, con la siguiente fórmula:

$$N = \frac{V_o - V_m}{VM - V_m} \quad \text{Ecuación [20]}$$

Donde:

N= Normalización

Vo= Variable Original

Vm = Valor Mínimo

VM = Valor Máximo

Después de normalizado, se convirtió a radianes cada variable dependiendo del rango al cual pertenece cada una de ellas.

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

$$R = N \times 1.5707963268$$

Donde:

R = Radianes

Se procede a la obtención de las probabilidades del primer modelo, aplicando la función que pertenece a cada variable, con la siguiente fórmula:

$$P = \sin^2(R) \quad \text{Ecuación [21]}$$

$$P = \cos^2(R) \quad \text{Ecuación [22]}$$

Donde

P = Probabilidad.

Cabe recalcar, que las fórmulas (1) o (2) se utiliza dependiendo de la pertenencia de cada variable a su función.

Por último para la obtención del Modelo 1, se procede a extraer el promedio, que es la suma de todas las probabilidades de cada variable dividida para el número total de ellas.

$$Y = (\text{pendientes} + \text{precipitación} + \text{d. vías} + \text{d. fallas} + \text{d. hídrica} + \text{vegetal} + \text{dureza}) / 7 \quad \text{Ecuación [23]}$$

Donde:

Y = Promedio de probabilidades Modelo 1.

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

En el modelo 2 se utilizó los valores máximo y mínimo, obtenidos del número total de deslizamientos foto interpretados, que son 289, a los cuales se les aplica el diez percentil (10%), analizando para cada variable, su correspondencia.

Los valores más cercano y el más lejano, son:

Valor más cercano = 0.1 y Valor más lejano = 0.9

El resultado de la aplicación de estos dos valores, en la ecuación de la recta; que sirve para linealizar la dispersión de los deslizamientos; es llevar los valores de los raster de cada variable a valores semejantes entre 0 y 1. La aplicación de la ecuación de la recta es la obtención de la normalización en este modelo.

$$y - y_1 = \frac{(Y_2 - Y_1)}{(X_2 - X_1)} (x - x_1) \quad \text{Ecuación [24]}$$

Las fórmulas para los dos casos de Lógica Fuzzy empleados en este proyecto y aplicadas en la ecuación de la recta son:

Para el Segundo Caso:

P1 (Vm;0.1)

P2 (VM; 0.9)

$$P_p = 0.1 + \left(\frac{0.8}{VM - V_m}\right) \times (V_o - V_m) \quad \text{Ecuación [25]}$$

Y para el Tercer Caso:

P1 (Vm; 0.9)

P2 (VM; 0.1)

$$P_p = 0.9 - \left(\frac{0.8}{VM - V_m}\right) \times (V_o - V_m) \quad \text{Ecuación [26]}$$

Donde:

P_p = pre probabilidad (que para el modelo 4 es la normalización)

V_o = Variable original

VM = valor Máximo

V_m = Valor Mínimo

Las ecuaciones 28 y 29, son utilizadas para la normalización, es decir llevar las variables a valores entre 0 y 1.

Los procesos siguientes son similares al del modelo anterior, la conversión a radianes y la obtención de probabilidades.

Por último para la obtención del Modelo 2, se procede a extraer el promedio, que es la suma de todas las probabilidades de cada variable dividida para el número total de ellas. (Andocilla, 2012)

$$Y = (\text{pendientes} + \text{precipitación} + \text{d. vías} + \text{d. fallas} + \text{d. hídrica} + \text{vegetal} + \text{dureza}) / 7$$

Donde:

Y = Promedio de probabilidades Modelo 2.

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

En el modelo 3 se utilizó los valores máximo y mínimo, obtenidos del número total de deslizamientos foto interpretados, que son 289, a los cuales se les aplica el cinco percentil (5%), analizando para cada variable, su correspondencia.

Los valores más cercano y el más lejano, son:

$$\text{Valor más cercano} = 0.05 \text{ y Valor más lejano} = 0.95$$

El resultado de la aplicación de estos dos valores, en la ecuación de la recta; que sirve para linealizar la dispersión de los deslizamientos; es llevar los valores de los raster de cada variable a valores semejantes entre 0 y 1. La

aplicación de la ecuación de la recta es la obtención de la normalización en este modelo.

$$y - y_1 = \frac{(Y_2 - Y_1)}{(X_2 - X_1)} (x - x_1)$$

Las fórmulas para los dos casos de Lógica Fuzzy empleados en este proyecto y aplicadas en la ecuación de la recta son:

Para el Segundo Caso:

P1 (Vm;0.05)

P2 (VM; 0.95)

$$Pp = 0.05 + \left(\frac{0.9}{VM - Vm}\right) \times (Vo - Vm) \quad \text{Ecuación [27]}$$

Y para el Tercer Caso:

P1 (Vm; 0.95)

P2 (VM; 0.05)

$$Pp = 0.95 - \left(\frac{0.9}{VM - Vm}\right) \times (Vo - Vm) \quad \text{Ecuación [28]}$$

Donde:

Pp = pre probabilidad (que para el modelo 4 es la normalización)

Vo = Variable original

VM = valor Máximo

Vm = Valor Mínimo

Las ecuaciones 30 y 31, son utilizadas para la normalización, es decir llevar las variables a valores entre 0 y 1. Los procesos siguientes son similares al del modelo anterior, la conversión a radianes y la obtención de probabilidades.

Por último para la obtención del Modelo 3, se procede a extraer el promedio, que es la suma de todas las probabilidades de cada variable dividida para el número total de ellas. (Andocilla, 2012)

$$Y = (\text{pendientes} + \text{precipitación} + \text{d. vías} + \text{d. fallas} + \text{d. hídrica} + \text{vegetal} + \text{dureza}) / 7$$

Donde:

Y = Promedio de probabilidades Modelo 3.

3.7. Ajuste de los modelos

Se realizó el ajuste de los modelos en base a 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)

$$N = \left| \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor Calculado}}{O} \right|$$

$$N = \left| 1 - Y \right|$$

Donde:

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.

De acuerdo a este ajuste, todos los modelos muestran a su forma, la realidad de ocurrencia del fenómeno de deslizamientos, ya que al plantear los casos de Lógica Fuzzy, cada modelo muestra que su variabilidad es semejante a los datos reales tomados en campo. Esto permite conocer que los diferentes modelos de deslizamientos, muestran semejanza con la realidad, dependiendo de los valores de desviación estándar de cada uno de ellos, se puede saber qué modelo representa de mejor manera la realidad del terreno. (Andocilla, 2012)

Se obtuvo las siguientes desviaciones estándar de los modelos aplicados:

Tabla N°40. Desviaciones estándar de los modelos

MODELOS PREDICTIVOS						
	MODELO 1 Fuzzy original	MODELO 2 Fuzzy 10 percentil	MODELO 3 Fuzzy 5 percentil	MODELO 4 Mora- Varhson	MODELO 5 Mora- Varhson sismos	MODELO 6 Mora- Varhson precipitació n
PROMEDIO	0.67350742 5	0.67349252 8	0.68617966 1	0.83806228 4	0.88858131 5	0.761245675
DESVIACION ESTANDAR	0.10809154 8	0.11570122 3	0.12331094 9	0.17659309 5	0.15692707	0.237214386

Fuente: Elaboración Propia

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

Tabla N°41. Ajuste de los modelos

MODELOS PREDICTIVOS						
	MODELO 1 Fuzzy original	MODELO 2 Fuzzy 10 percentil	MODELO 3 Fuzzy 5 percentil	MODELO 4 Mora- Varhson	MODELO 5 Mora- Varhson sismos	MODELO 6 Mora- Varhson precipitació n
AJUST E	0.89190845 2	0.88429877 7	0.87668905 1	0.82340690 5	0.8430729 3	0.76278561 4

Fuente: Elaboración Propia

Tomando de cada método el modelo con el mayor ajuste, se analizó para cada modelo la probabilidad de ocurrencia, se la normalizó entre 0 y 1 y al final se realizó una resta para poder observar cuanto se diferencian entre sí los dos modelos. Los resultados obtenidos entre los dos modelos fueron de:

- **Media:** 0.888581
- **Desviación Estándar:** 0.156655

Por lo tanto los modelos no difieren mucho entre sí, pero tomando en cuenta que el modelo de Fuzzy con las variables originales es el que más se acerca a la realidad.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4. Análisis de los modelos obtenidos

En el presente proyecto se obtuvo seis modelos de probabilidad, en los cuales se observa una escala de colores la cual ayuda a identificar el grado de amenaza y de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos.

4.1. Descripción de los modelos Fuzzy

En los modelos se observa una escala de tonalidades (Rojo Oscuro= Muy Alta; Rojo= Alta; Naranja= Media; Amarillo= Baja; Verde= Muy Baja probabilidad de ocurrencia a deslizamientos), de esta forma se observa gráficamente cual modelo se aproxima a la realidad. Cada uno de los modelos se realizó con su propia ecuación, por lo que los resultados son diversos.

Las tonalidades rojas indican la mayor probabilidad de ocurrencia a deslizamientos, las tonalidades en naranja indican que la probabilidad de que ocurra un deslizamiento es media y estas son en las zonas aledañas a las zonas donde existe máxima probabilidad de deslizamientos. Como también las zonas de quebradas o rellenos donde se localiza el cauce del Río Machángara. Las zonas en tonalidades amarillas señalan una probabilidad baja de ocurrencia de deslizamientos y las zonas verdes indican la menor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, porque son zonas donde no existen los factores

que intervienen en la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de remoción en masa.

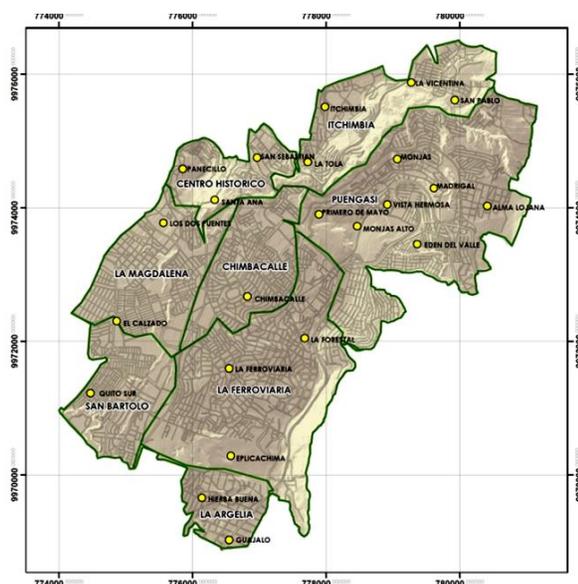


Gráfico N° 32: Parroquias dentro de la zona de estudio

4.1.1. Descripción del Modelo N°1 de Ocurrencia a deslizamientos

Las zonas que se ven afectadas por deslizamientos en este modelo son:

Tabla N°42: Descripción del Modelo N°1 de Ocurrencia a deslizamientos

PROBABILIDAD	SECTOR
MUY ALTA	Cauce del Río Machángara, Av. Pedro Vicente Maldonado, calle Ricardo Jaramillo, 5 de Junio, siguiendo la calle Alberto Larrea, Velasco Ibarra subiendo por la 24 de Mayo hasta la calle Manuela de Santa Cruz y Espejo.
ALTA	Entre la Av. Velasco Ibarra y la Av. General Rumiñahui.
MEDIA	Sector de El Trébol, Av. General Rumiñahui, desde la calle Manuel Guamaní circundando por la Pedro Pinto hasta la Juan Bautista Aguirre, siguiendo la Juan José Guerrero, Zonas aledañas a la Av. General Rumiñahui partiendo desde El Trébol.
BAJA	Sector de Chimbacalle, San Sebastián, parte del Itchimbía, Monjas Alto, La Ferroviaria sector aledaño a la loma de Puengasí, parte de La Argelia.
MUY BAJA	Sector de La Ferroviaria, La Magdalena, La Argelia, parte del sector de Chimbacalle.

Fuente: Elaboración Propia

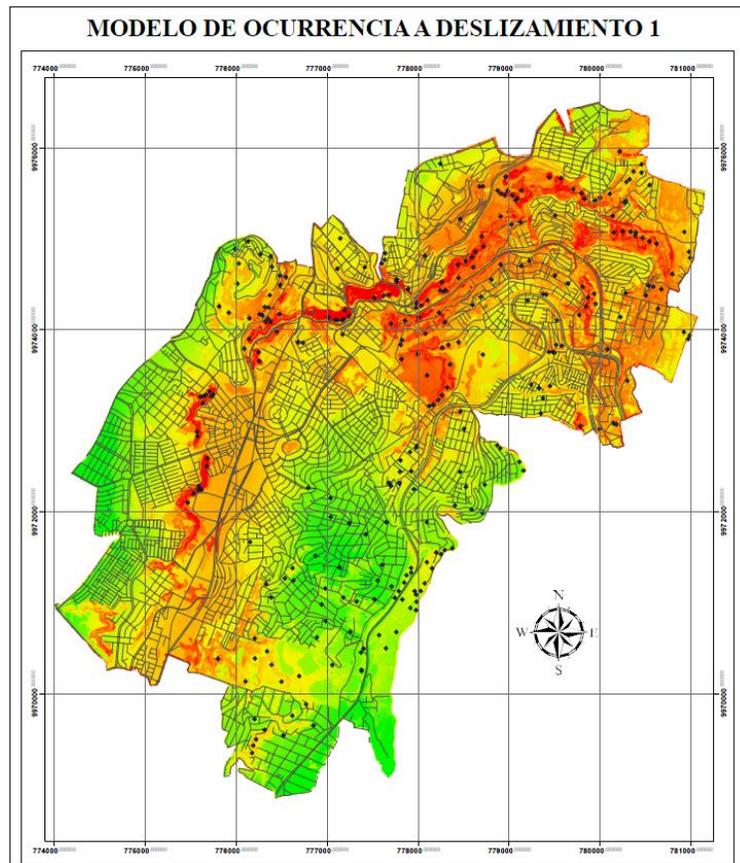


Gráfico N°33: Modelo de ocurrencia N°1 a deslizamientos
Fuente: Elaboración Propia

4.1.2. Descripción del Modelo N°2 de Ocurrencia de deslizamientos

Tabla N°43: Descripción del Modelo N°2 de Ocurrencia a deslizamientos

PROBABILIDAD	SECTOR
MUY ALTA	Cauce del Río Machángara, Av. Pedro Vicente Maldonado, calle Ricardo Jaramillo, 5 de Junio, siguiendo la calle Alberto Larrea, Velasco Ibarra subiendo por la 24 de Mayo hasta la calle Manuela de Santa Cruz y Espejo.
ALTA	Sector de San Pablo y la Vicentina
MEDIA	Sector de Chimbacalle, La Magdalena, Primero de Mayo, Vista Hermosa.

CONTINÚA

PROBABILIDAD	SECTOR
BAJA	San Bartolo, entre las calles Hugo Ortiz, Antonio Rodríguez, Pinllopata, Moraspungo, Andrés Pérez, Baltazar González, Gonzalo Martín, Alonso Gómez Montero, Ana Paredes de Alfaro, Francisco Cobo, Gualberto Pérez, Juan Cueva, Manuel Adrián Navarro, hasta la Catamara en el sector de Epicachima.
MUY BAJA	La Argelia, La Forestal, loma de Puengasí,

Fuente: Elaboración Propia

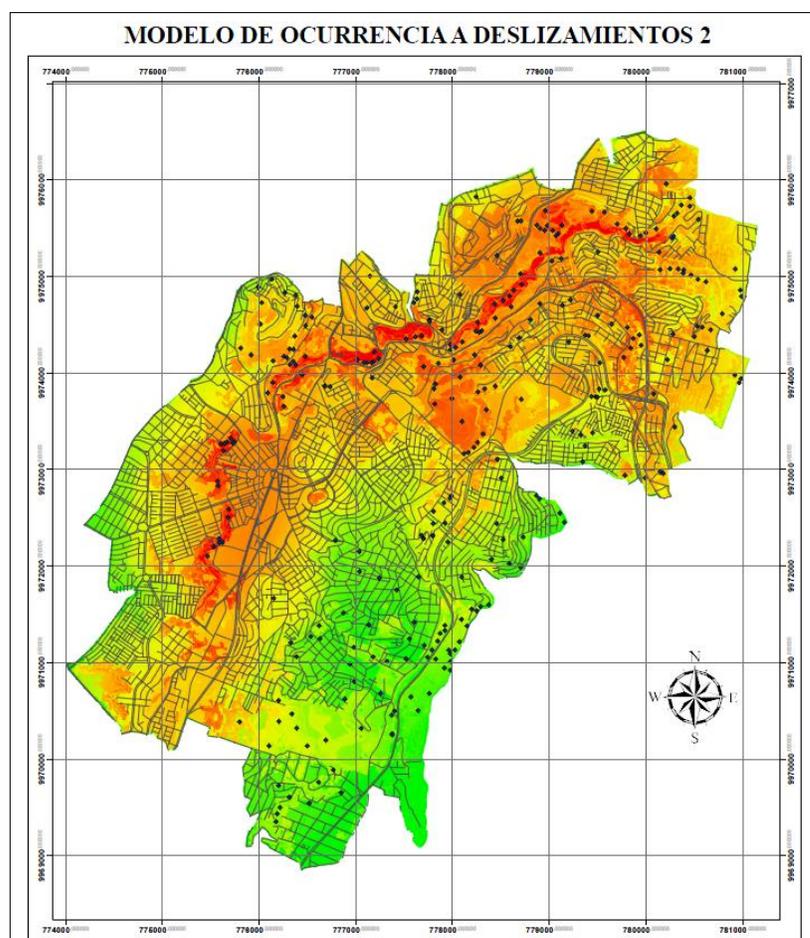


Gráfico N°34: Modelo de ocurrencia N°2 a deslizamientos
Fuente: Elaboración Propia

4.1.3. Descripción del Modelo N°3 de Ocurrencia de deslizamientos

Tabla N°44: Descripción del Modelo N°3 de Ocurrencia a deslizamientos

PROBABILIDAD	SECTOR
MUY ALTA	Cauce del Río Machángara, Av. Pedro Vicente Maldonado, calle Ricardo Jaramillo, 5 de Junio, siguiendo la calle Alberto Larrea, Velasco Ibarra subiendo por la 24 de Mayo hasta la calle Manuela de Santa Cruz y Espejo.
ALTA	Parte del sector del Itchimbía
MEDIA	Sector del Itchimbía, Puengasí, Chimbacalle, La Magdalena, Primero de Mayo, Vista Hermosa, La Vicentina entre Pablo Guevara y Pedro Anagoytia.
BAJA	Monjas Alto entre Juan José Guerrero, Javier Loyola, Av. Simón Bolívar, San Bartolo y Epicachima.
MUY BAJA	La Ferroviaria, la Forestal y La Argelia

Fuente: Elaboración Propia

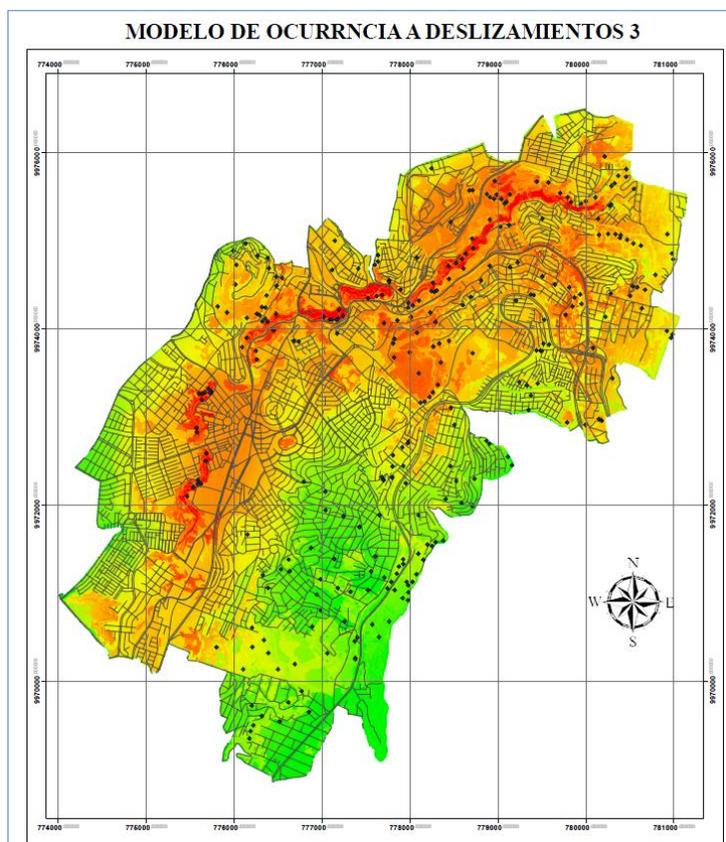


Gráfico N°35: Modelo de ocurrencia N°3 a deslizamientos

Fuente: Elaboración Propia

4.2. Modelos Mora-Vahrson

- Mapa de Amenazas (Ht)

Una vez obtenidos los mapas de los factores que intervienen en la zonificación, se procede a determinar el nivel de Amenaza Total (Ht) por FRM, así:

$$Ht = (Sr \times Sh \times SI) \times (Ts + Tp) \quad \text{Ecuación [29]}$$

Donde:

Ht = (Mapa de Factor relieve Relativo * Mapa de Factor Humedad del Suelo * Mapa de Factor Litológico)*(Mapa de Factor sísmico + Mapa de Factor Intensidad de Lluvias). Con ayuda de Spatial Analyst, se calculan los valores a partir de los mapas de factores correspondientes. Los valores de Ht, fueron posteriormente reclasificados en los intervalos requeridos. Se construye el Mapa de probabilidad de ocurrencia por deslizamientos con cinco rangos. El método ofrece la posibilidad de obtener el nivel de amenaza (Ht), en función de cada uno de los factores de disparo, a partir de la ecuación:

$$Hts = (Sr * Sh * SI) * Ts \quad \text{Grado de Amenaza por Sismos} \quad \text{Ecuación [30]}$$

$$Htp = (Sr * Sh * SI) * Tp \quad \text{Grado de Amenaza por Lluvias} \quad \text{Ecuación [31]}$$

De esta forma, se pueden elaborar mapas de probabilidad de ocurrencia por deslizamientos considerando como factor detonante solamente los sismos o las lluvias.

4.2.1. Descripción del Modelo N°4 de Ocurrencia de deslizamientos

Tabla N°45: Descripción del Modelo N°4 de Ocurrencia a deslizamientos

PROBABILIDAD	SECTOR
MUY ALTA	El Panecillo, La Argelia, Loma de Puengasí.
ALTA	Cauce del Río Machángara, La Ferroviaria hasta la Juan Bautista Aguirre, Alonso Gómez Montero, Manuel Adrián Navarro y Abelardo Andrade
MEDIA	Primero de Mayo, La Tola, San Pablo
BAJA	Monjas Alto, Itchimbía, La Magdalena, Chimbacalle,
MUY BAJA	San Bartolo, Itchimbía, Quito Sur

Fuente: Elaboración Propia

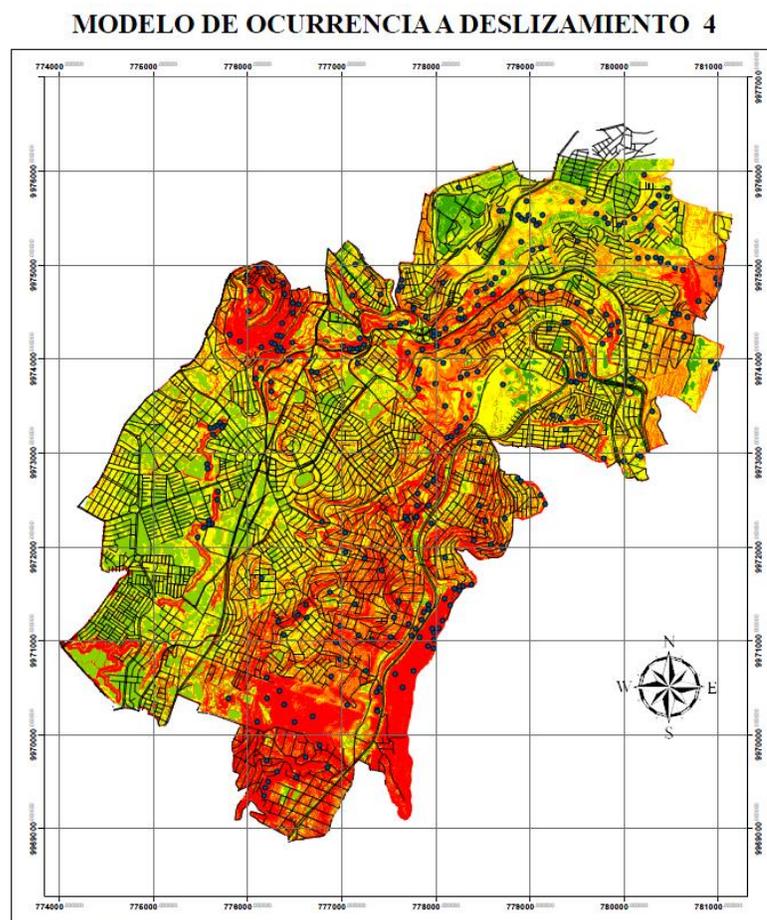


Gráfico N°36: Modelo de ocurrencia N°4 a deslizamientos

Fuente: Elaboración -propia

4.2.2. Descripción del Modelo N°5 de Ocurrencia de deslizamientos

Tabla N°46: Descripción del Modelo N°5 de Ocurrencia a deslizamientos

PROBABILIDAD	SECTOR
MUY ALTA	El Panecillo, La Argelia, Loma de Puengasí, Epicachima, Centro Histórico, Primero de Mayo, Monjas, Alma Lojana
ALTA	Cauce del Río Machángara, La Ferroviaria hasta la Juan Bautista Aguirre, Alonso Gómez Montero, Manuel Adrián Navarro y Abelardo Andrade
MEDIA	Itchimbía, La Tola, San Pablo, Monjas
BAJA	Los Dos Puentes, Chimbacalle, Monjas Alto,
MUY BAJA	San Bartolo, El Calzado, La Vicentina

Fuente: Elaboración Propia

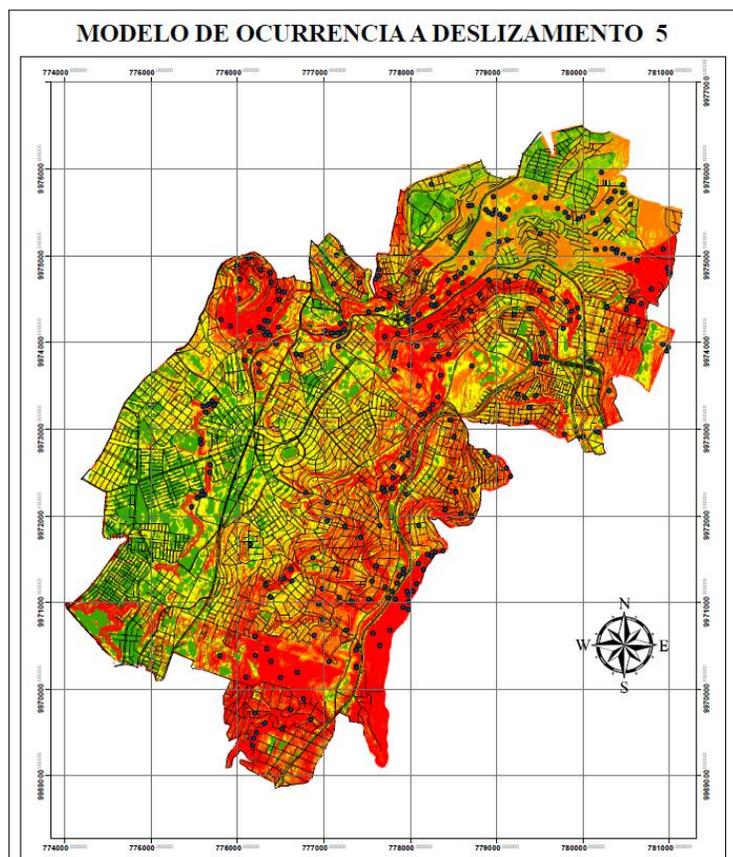


Gráfico N°37 Modelo de ocurrencia N°5 a deslizamientos

Fuente: Elaboración Propia

4.2.3. Descripción del Modelo N°6 de Ocurrencia de deslizamientos

Tabla N°47: Descripción del Modelo N°6 de Ocurrencia a deslizamientos

PROBABILIDAD	SECTOR
MUY ALTA	El Panecillo, La Argelia, Loma de Puengasí.
ALTA	Cauce del Río Machángara, La Ferroviaria hasta la Juan Bautista Aguirre, Alonso Gómez Montero, Manuel Adrián Navarro y Abelardo Andrade, La Forestal.
MEDIA	Monjas, San Pablo y parte de Chimbacalle en áreas cercanas al Estadio de El Aucas.
BAJA	Primero de Mayo, Parte de la Ferroviaria.
MUY BAJA	Itchimbía, La Magdalena, San Bartolo, Puengasí, Monjas, Edén del Valle, Alma Lojana

Fuente: Elaboración Propia

MODELO DE OCURRENCIA A DESLIZAMIENTO 6

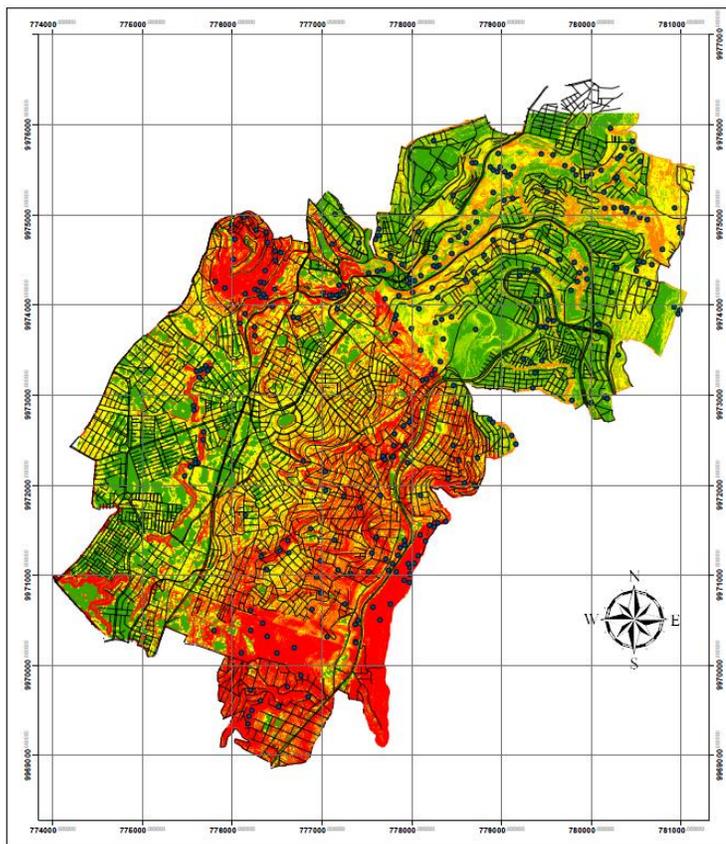


Gráfico N°38: Modelo de ocurrencia N°6 a deslizamientos

Fuente: Elaboración Propia

4.3. Semejanzas y diferencias

4.3.1. Modelos Fuzzy

Semejanzas:

Gráficamente:

- Zonas aledañas a las vías principales, zonas de quebradas y rellenos del Río Machángara son susceptibles a deslizamientos.
- Las zonas con probabilidad de ocurrencia de deslizamiento son las que se encuentran en tonos rojos y naranjas que son casi los mismos sectores en todos los modelos.
- Las zonas en tonos verdes son superficies relativamente planas donde no hay probabilidad de deslizamientos.
- Todos los modelos cubren la mayoría de puntos de muestra de los deslizamientos fotointerpretados.

Diferencias:

Por valor de ajuste:

- La desviación estándar del modelo 1 es: 0.108091548 lo que indica que la incompatibilidad entre la realidad del terreno y el modelo es relativamente mínima ya que al restarle de 1 este valor es 0.891908452.
- La del segundo modelo es: 0.115701223y la del tercer modelo es: 0.123310949es decir que varían en sus partes decimales y estos

restados de 1 son valores de 0.884298777 y 0.876689051 respectivamente.

4.3.2. Modelos Mora Vahrson

Semejanzas:

Gráficamente:

- Zonas aledañas a La Ferroviaria, La Argelia, Puengasí, El Panecillo y las quebradas y rellenos del río Machángara son susceptibles a deslizamientos.
- Las zonas con probabilidad de deslizamiento son las que se encuentran en tonos rojos y naranjas que son parecidos en los modelos 4 y 5, pero en el modelo 6 se diferencian.
- Las zonas en tonos verdes son superficies relativamente planas donde no hay probabilidad de deslizamientos.
- Todos los modelos cubren la mayoría de puntos de muestra de los deslizamientos fotointerpretados.

Diferencias:

Por valor de ajuste:

- La desviación estándar del cuartomodelo es: 0.176593095 y el quinto modelo es 0.15692707 lo que indica que la incompatibilidad entre la

realidad del terreno y el modelo es significativo ya que al restarle de 1 este valor es 0.823406905 y 0.84307293 respectivamente.

- La del sexto modelo es: 0.237214386 es decir que este es el modelo que más se aleja de la realidad con una ajuste del 0.762785614.

4.4. Simulación en 3D en ArcScene

La zona de estudio en el DMQ sufre de numerosos focos de deslizamientos de tierra, los cuales fueron fotointerpretados y debidamente comprobados en campo, estos movimientos en masa están integrados por Zonas Activas de Movimientos en Masa y por la presencia de Paleodeslizamientos.

Para la simulación en 3D se tomaron en cuenta todos éstos deslizamientos realizando una expansión a partir del centroide del polígono hasta llegar a la forma original que está representada en el terreno.

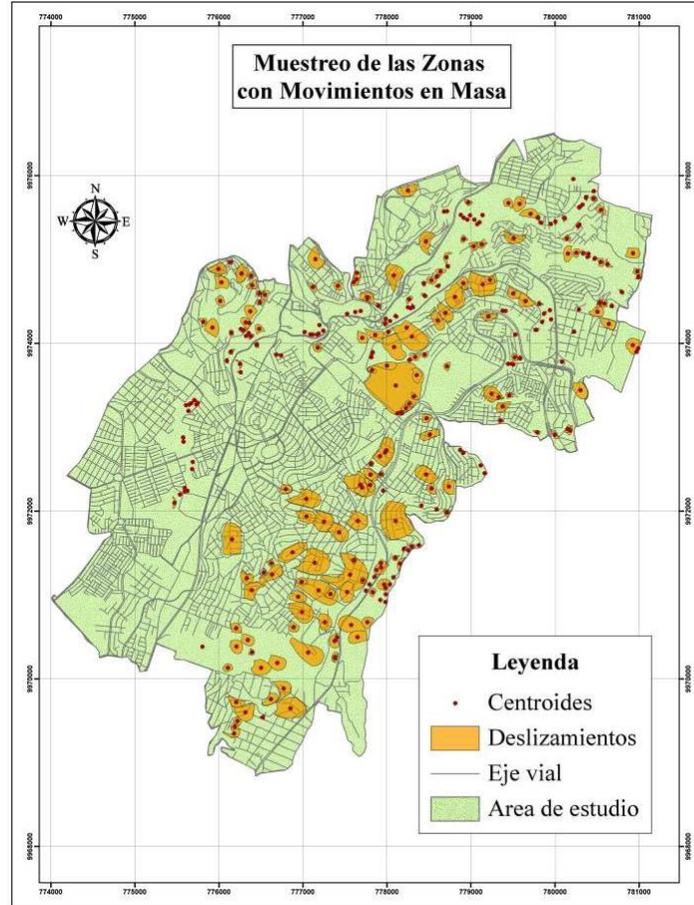


Gráfico N°39: Muestreo de Deslizamientos
Fuente: Elaboración Propia

El modelo digital del terreno (MDT) es necesario para la simulación, el cual da la visión en 3D deseada, con ayuda de la orto foto del área de estudio que servirá como fondo del MDT, se añaden los deslizamientos fotointerpretados y se comienza a colocar las bases de alturas del MDT.

Para realizar la animación en expansión de los deslizamientos fotointerpretados se procedió a realizar un grupo de animación (Gráfico N°40),

el cual une las coberturas de expansión y les da un tiempo de inicio y otro de final, luego se crea un keyframe (Gráfico N°41) en el cual se coloca le grupo de animación, en la línea de tiempo se coloca la escala de tiempo requerida (Gráfico N° 42), se otorgan los espacios necesarios para que la animación se ajuste perfectamente al tiempo que se estimó para la animación. Posteriormente se integra el tiempo de duración de la animación y se oprime “play” para poder visualizar la simulación. (Gráfico N°43)

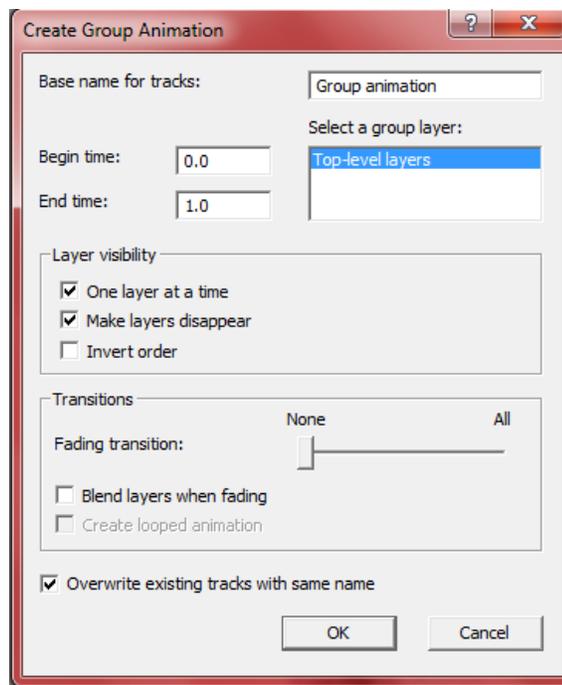


Gráfico N°40: Grupo de Animación
Fuente: ArcScene

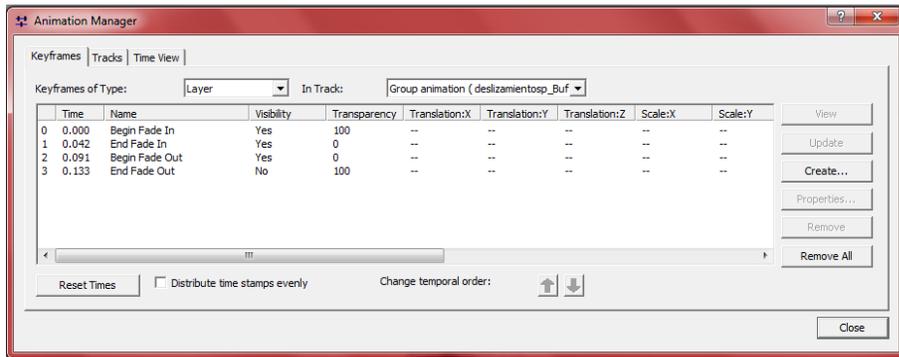


Gráfico N°41: Administración de Animación
Fuente: ArcScene

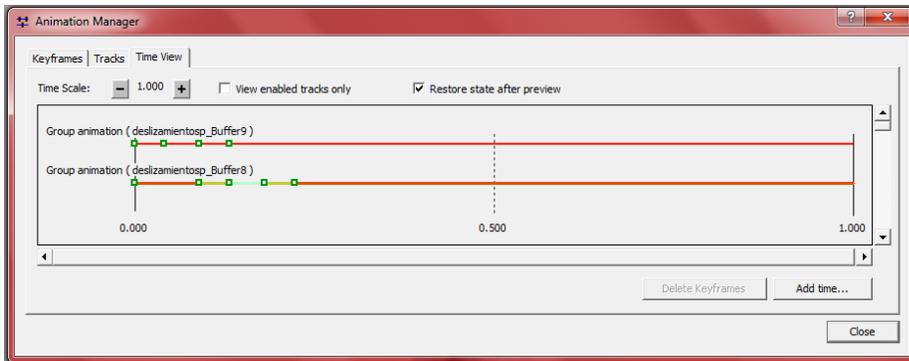


Gráfico N°42: Línea de Tiempo – Administrador de Animación
Fuente: ArcScene

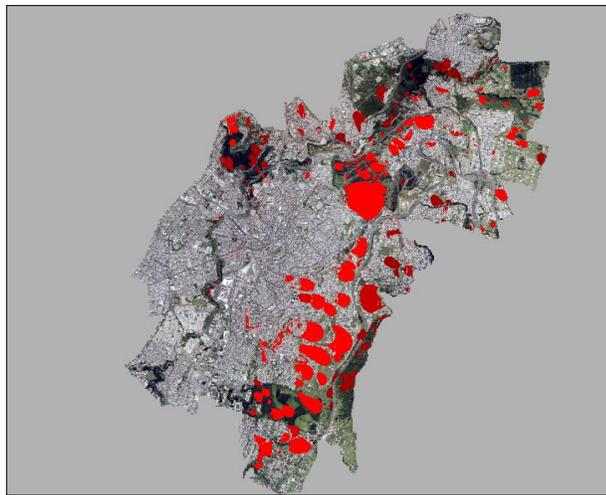


Gráfico N°43: MDT con ortofoto y los deslizamientos fotointerpretados
Fuente: ArcScene

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Luego de obtener los seis modelos de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos utilizando las diferentes metodologías (Lógica Fuzzy & Mora Vahrson) y compararlos uno a uno realizando el ajuste necesario para cada modelo se obtuvo los siguientes resultados:

- ❖ Los modelos Fuzzy N° 1 (Variables Originales) y N°2 (10 percentil) cada uno con un ajuste de 0.8919 y 0.8842 respectivamente, son muy similares entre sí, por lo tanto se acoplan a la realidad del terreno y proporcionan una buena información acerca de los fenómenos en remoción en masa.
- ❖ Entre los tres modelos de Lógica Fuzzy existe una buena concordancia entre las zonas de amenaza alta, media y baja, por lo tanto se ajusta de manera ideal a la realidad del terreno.
- ❖ Entre los modelos obtenidos con la metodología Mora & Vahrson tienen similitud entre sí, sin embargo el modelo de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos N°6 cuyo factor de disparo es la Intensidad de Lluvia muestra el menor ajuste de todos los valores obtenidos de cada modelo.
- ❖ Comparando los modelos de Lógica Fuzzy vs Mora & Vahrson no coinciden en varios puntos de muestreo, los mejores ajustes de los

modelos son los modelos de Lógica Fuzzy, por lo tanto son los que más se ajustan a la realidad del terreno.

- ❖ La metodología de Mora & Vahrson es utilizada para escalas de trabajo pequeñas (1:10 000 – 1:25 000 – 1:50 000), para zonas tropicales y con alta sismicidad, por ende al aplicarla en un sector interandino, con diversas características geológicas, climáticas y sismológicas no demuestra con exactitud un modelo que sea representativo representando la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en la zona de estudio.
- ❖ La metodología Mora-Vahrson aplica como herramienta los polígonos de Thiessen; el cual es uno de los métodos de interpolación más simples, basado en la distancia euclidiana, aplicada para datos cualitativos. Por lo cual no es apropiado para dicha metodología ya que se utilizan variables continuas de tipo físico.
- ❖ De acuerdo al modelo que más se ajusta a la realidad (Modelo N° 1 de Lógica Fuzzy con las variables originales) las zonas de mayor probabilidad de ocurrencia a deslizamiento son los sectores de laderas del Panecillo e Itchimbía, las Avenidas Velasco Ibarra, Autopista General Rumiñahui, la avenida Simón Bolívar de sur a norte de (Alma Lojana, Edén del Valle), abarcando los barrios Centro histórico, Puengasí e Itchimbía.

- ❖ La metodología de Lógica Fuzzy es útil para determinar zonas susceptibles a amenaza por deslizamiento, lo cual aporta a dirigir recursos, dinero y tiempo en áreas a detalle, para así poder disminuir las diversas vulnerabilidades y efectos de amenaza por los fenómenos de remoción en masa.
- ❖ El método Mora & Vahrson toma en consideración primordial el factor pendiente, por lo tanto se debe considerar la aplicación de varias variables que sean de mayor peso en la ecuación y analizarlas de forma correcta para su debida aplicación.
- ❖ Las zonas más afectadas por deslizamientos son los sectores aledaños a las vías principales como la Av. Simón Bolívar, la cual se debería reforzar para evitar futuros y posibles deslizamientos de tierra.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda que las Junta Provincial de Gestión de Riesgos de Pichincha y la Unidad de Gestión de Riesgos del DMQ realice un censo socioeconómico para obtener información de la población que vive en las zonas propensas a deslizamientos, para así poder tener planes de prevención y mitigación ante este riesgo.
- La metodología de Mora-Vahrson fue desarrollada para Centroamérica, con zonas de altas precipitaciones y gran actividad sísmica por lo tanto

no es recomendable su utilización en el Ecuador ya que no cumple con los parámetros esenciales para la aplicación de esta metodología.

- En estudios para fenómenos de remoción en masa cuando se trata de zonas con una pequeña escala de trabajo (1:1000 – 1:5000) no se recomienda que los técnicos o Gestores del Riesgo utilicen la metodología Mora – Vahrson debido a que es un método heurístico y muy subjetivo con los parámetros a emplearse, razón por la cual es la metodología Fuzzy es apropiada para este tipo de estudios.
- Las zonas cercanas a las vías son propensas a fenómenos de remoción en masa por lo que se recomienda al Municipio de Quito realizar planes de ordenamiento territorial, para así poder prevenir futuros accidentes que afectan a la población aledaña.
- Para calcular la probabilidad de ocurrencia a deslizamientos con la metodología Mora Vahrson, es recomendable utilizar variables continuas y no discretas como los Polígonos de Thiessen.

BIBLIOGRAFÍA

- Andocilla, L. (Julio de 2012). Implementación del Algoritmo de Lógica Fuzzy aplicado a la determinación del grado de susceptibilidad a deslizamientos en el área Monjas-Ferroviana-La Magdalena-Itchimbía del Distrito Metropolitano de Quito. *Tesis de Grado ESPE*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Aparicio , F. J. (1994). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico DF: LIMUSA S.A.
- Avilés, M., & Lizzette, H. (2009). Análisis y modelamiento de susceptibilidad a deslizamientos mediante SIG y geoestadística en las parroquias de Papallacta y Cuyuja, Cantón Quijos. *Tesis de Grado ESPE*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador.
- Ayala, F. J., Andreu, F. J., Ferrer, M., De Simón, A., Fernández, I., Olalla, C., . . . Cienfuegos, F. J. (1987). *Manual de Taludes*. Madrid: IGME.
- Bosque Sendra, J. (1992). *Sistemas de Información Geográfica* . Madrid: Rialp.
- Campos , C., Reyes, X., & Rodríguez , X. (2003).
- Carranza, D. (2008). Aplicación de la Lógica Fuzzy para la ubicación de especies faunísticas y florísticas y su comparación con otros métodos gepestadísticos. *Tesis de Grado ESPE*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador.
- Carrera, A., Cardinali, F., & Reichenbach, P. (1995). *GIS Technology in Mapping Landslide Hazzard*. Londres: Kluwer Academic Publishers.

- Coromidas, D. (1989). Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera. *Monografía N°3*. Zaragoza, España: Sociedad Española de Geomorfología Zaragoza.
- Coromidas, J., & Alonso, E. (1984). Inestabilidad de laderas en el Pirineo Catalán, tipología y causas. *Jornadas de Inestabilidad de Laderas en el Pirineo*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Barcelona.
- Coromidas, J., & Garcia Yaqüe, A. (1997). Terminología de los Movimientos de Ladera . *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Granada.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide Types and Processes in Turner. En *Specil Report* (págs. 27-29 - 43). AK & Schuster.
- Deslizamiento e inundaciones por lluvias en Quito. (10 de Enero de 2012). *Diario El Comercio*.
- Durán, & Benito. (2008). *Lógica Borrosa*.
- El Comercio, D. (10 de Enero de 2012). Deslizamientos e inundaciones por lluvias en Quito.
- EPN. (2013). Instituto Geofísico. *Informes Sísmicos Anuales*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Hibsch, C., Alvarado, A., Yepes, H., Sebrier, M., & Pérez, H. (1996). Falla Activa de Quito y Fuentes Sismogénicas Regionales: Un estudio del Riesgo Sísmico de Quito con el Análisi de los sedimentos cuaternarios. Quito, Ecuador.

- Hutchinson, J. N. (1988). Fifth International Symposium on Landslides. En *General Report Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in relation to Geology and Hydrology* (págs. 1, 3-35). Rotterdam: Bonnard.
- IGAC. (1996). Conceptos Básicos de Sistemas de Información Geográfica y Aplicaciones en Latinoamérica . *Guía Metodológica para la Formulación del Plan de Ordenamiento Territorial Urbano Aplicable a ciudades*.
- INETER. (2005). Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. *Inestabilidad de Laderas - Mapas de Amenaza*.
- Irigaray, C., Lamas, F., Hamdouni, R., Fernandez, T., & Chacón, J. (2000). *The Importance of Precipitation and The Susceptibility of the Slopes for the Trggeriong of Landslides along The Roads*. Vol 21 n°1: Natural Hazards.
- Lana, H. X., Zhou, L. J., Wang, H. Y., & Li, R. H. (2004). *Landslide Hazard Spatial Analysis and Prediction using GIS in the Xiaojiang Watershed*. Yunnan , China.
- López, R. (2001). *Modelo de un Sistema Experto a partir de la Aplicación de la Lógica Difusa para Ayudar en las Decisiones Bursátiles* .
- Mora, R. (2004). *Evaluación de la Susceptibilidad a Deslizamiento del Cantón de San José, Provincia de San José, Costa Rica*.
- Mora, R., Vahrson, W., & Mora, S. (1992). *Determinación de la Amenaza de Deslizameinto sobre Grandes Áreas, Utilizando Indicadores Morfodinámicos*.

- Moya Anegón, F., López Gijón, J., & García Caro, C. (1996). *Técnica y Documentación Cuantitativas Aplicadas a la Biblioteconomía*. Síntesis.
- Nancy, J., Obermeyer, & Jeffrey, K. (2008). *Managing Geographic Information Systems*. New York: Segunda Edición.
- Obermeyer, & Pinto. (1994). *Lo que aportan los SIG de diferente respecto a otro tipo de sistemas de información es su dependencia de la referencia espacial como también su organización y su capacidad de realizar análisis geográfico*.
- Padilla, O. (2006). *fundamento teórico para la modelización de variables ambientales mediante operadores difusos* . Quito: Revista Geoespacial No.4.
- Peltre, P. (1989). *Quebradas y Riesgos Naturales en Quito Período 1900-1980*. Quito.
- Rojas, N. (2011). MINAET Ministerio del Ambiente y Telecomunicaciones - Instituto Meteorológico Nacional. En *Curvas de Intensidad Duración Frecuencia de Algunas Estaciones Meteorológicas Automáticas*.
- Skinner , B. J., & Porter, S. C. (1992). *An Introduction to Physical Geology*. En *The dynamic Earth*. New York : John Wiley & Sons.
- Van Zuidam, R. (1986). *Aerial photo-interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic mapping*. The Netherlands .

Varnes, D. (1978). Slope Movement Types and Processes. En *Landslide: Analysis and Control Transportation Research Board* (págs. Spetial Report 176: 11-33).

Varnes, D. (1984). *Landslide hazard zonation*. Paris.

Yanhuiguo, Cheng, H. D., Jianhua Huang, Jiawei Tian, Wei Zhao, Litao Sun, & Yanxin Su. (2004). *Breast Ultrasound Image Enhancement Using Fuzzy Logic* .