

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO



CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**IMPLEMENTACION DEL ALGORITMO DE LOGICA FUZZY
APLICADO A LA DETERMINACION DEL GRADO DE
SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS EN EL AREA
MONJAS – FERROVIARIA – LA MAGDALENA – ITCHIMBIA
DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO**

**Previa a la obtención de Grado Académico o Título de:
INGENIERO GEOGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**ELABORADO POR:
LORENA PATRICIA ANDOCILLA LOPEZ**

SANGOLQUÍ, JULIO 2012

RESUMEN

En el presente proyecto se propone la implementación de la metodología de Lógica Fuzzy, en plataformas SIG, que es la generación de diferentes modelos probabilísticos de la ocurrencia de deslizamientos en el centro - sur de la ciudad de Quito, que se producen, ya sea por asentamientos urbanos ilegales, por la creación de infraestructura urbana, o por el mismo asentamiento de la ciudad en la zona geográfica donde se encuentra.

El método es desarrollado con la obtención de un inventario de deslizamientos observados a partir de fotointerpretación y un minucioso trabajo de campo. Consecutivamente se obtiene una serie de mapas, los cuales son los parámetros para comenzar el estudio de la metodología de Lógica Fuzzy. El resultado de esta metodología son diferentes modelos, que mediante un ajuste se definirá cuál de ellos concuerda con la realidad del terreno. Posteriormente con estos efectos se procederá a la implementación de la metodología Fuzzy en plataformas SIG. Que proporcionará un programa, el cual se podrá aplicar a cualquier terreno donde se presente este fenómeno, a la vez se elegirá el modelo que más se ajuste a cada terreno donde se aplique esta metodología

SUMMARY

This project proposes the implementation of the methodology of Fuzzy Logic, GIS platforms, which is the generation of probabilistic models of the occurrence of landslides in central - south of Quito, which occur either by illegal urban settlements, the creation of urban infrastructure, or by the settlement of the city in the geographical area where you are.

The first method is developed to obtain an inventory of landslides observed from a detailed photo interpretation and fieldwork. Running gives a series of maps, which are the parameters to begin the study of the methodology of fuzzy logic. The result of this methodology is different models, which will be defined by adjusting which one matches the reality on the ground. Then these effects will proceed to the implementation of the methodology Fuzzy GIS platforms. Will provide a program which can be applied to any land where this phenomenon, at the same time choose the model that best fits each spot where this methodology is applied.

CERTIFICACIÓN

Ing. Oswaldo Padilla A.

Ing. Mario Cruz D.

Certifican:

Que el trabajo titulado “**IMPLEMENTACION DEL ALGORITMO DE LOGICA FUZZY APLICADO A LA DETERMINACION DEL GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS EN EL AREA MONJAS – FERROVIARIA – LA MAGDALENA – ITCHIMBIA DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO**”, realizado por la Srta. LORENA PATRICIA ANDOCILLA LOPEZ, 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. Francisco León, 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, 20 de julio de 2012

Ing. Oswaldo Padilla A.

DIRECTOR

Ing. Mario Cruz D.

CODIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Lorena Patricia Andocilla López

Declaro que:

El proyecto de grado denominado **“IMPLEMENTACION DEL ALGORITMO DE LOGICA FUZZY APLICADO A LA DETERMINACION DEL GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS EN EL AREA MONJAS – FERROVIARIA – LA MAGDALENA – ITCHIMBIA DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”**, 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, 20 de julio de 2012

Lorena Patricia Andocilla López

AUTORIZACIÓN

Lorena Patricia Andocilla López

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo **“IMPLEMENTACION DEL ALGORITMO DE LOGICA FUZZY APLICADO A LA DETERMINACION DEL GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS EN EL AREA MONJAS – FERROVIARIA – LA MAGDALENA – ITCHIMBIA DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 20 de julio de 2012

Lorena Patricia Andocilla López

DEDICATORIA

“Esto va para los locos, los inadaptados, los rebeldes, los problemáticos, los que van en contracorriente, los que ven las cosas de diferente manera. Los que no siguen las reglas y no respetan lo establecido. Puedes citarlos, estar en desacuerdo, glorificarlos o satanizarlos. Pero lo único que no puedes hacer es ignorarlos. Porque ellos cambian las cosas e impulsan a la humanidad hacia delante. Y mientras que los demás los ven como locos. Yo los veo como genios. Porque la gente que está tan loca como para pensar que pueden cambiar al mundo, es quien lo logra”.

THINK DIFFERENT

Steve Jobs

A mi hermano Jimmy, no importa el tiempo, lo importante es terminar lo que un día se empezó. Busca siempre una sensación que sacuda tu corazón. Recuerda que en cada rincón de este planeta hay algo que espera por ti. Oye el canto de la razón, se enemigo de tu dolor y dale mecha a tu inspiración.

No olvides abrir tu mente para ser feliz hay que sacudirla fuerte.

A Teresa, siempre presente.

AGRADECIMIENTO

A mi Mamá, por enseñarme a ser como soy, a pensar como pienso, por ser como es, simple, descomplicada, genial e incondicional. Por ser la mejor persona y la mejor madre. Por ser mi compañera y porque es el andamio de mi vida, sin ella no sería nada. Por ser mi amiga.

A mi Papá, porque cuando nací, mi padre era un ser que a veces aparecía para aplaudir mis logros. Durante mi adolescencia era la autoridad que ponía límites a mis deseos. Ahora que soy adulta es el amigo que me presiona para seguir adelante. Porque espera que sus hijos sean tan buenos como él hubiera querido ser. Por estar siempre conmigo, por tenerlo a mi lado.

A mi hermano Mauro, por los lloros, las peleas, las risas, los gritos, las borracheras, los abrazos y una infinidad de cosas más. Por las muchas veces que me ayudaba a ser los deberes de programación y las madrugadas eternas trabajando. Por ser mi cómplice y mi mejor amigo.

Al amor de mi vida, Manuel Montenegro, porque a su lado aprendí a ser mejor persona, y a conocer el verdadero significado de la palabra amor. Y por mostrarme que en el mundo se puede encontrar algo más que crueldad.

A la Solecito, porque con ella cuento para lo que sea. Por ser una muy buena amiga.

Al profe Mario Cruz por la amistad, dedicación y apoyo mutuo durante mi vida universitaria.

Al profe Oswaldo Padilla, por la dedicación, apoyo y amistad, en este proyecto.

PROLOGO

La ocurrencia de los deslizamientos en los últimos años en la ciudad de Quito, ha tenido un incremento considerable y parece que tal tendencia se mantendrá. En efecto, el impacto provocado por este fenómeno, lejos de reducirse con el avance tecnológico y científico, tiende a incrementarse. Lógicamente hay que contemplar que ha existido un aumento en la población, mucha de ella viviendo en áreas inapropiadas, sin importar su estatus socio-económico; así como los cambios drásticos en el clima. Producto de esto, existen problemas paralelos como la pérdida de vidas humanas y materiales, grandes impactos ecológicos y ambientales que repercuten en la calidad de vida de la población. La mejor estrategia para reducir los impactos de los deslizamientos es la prevención, la evaluación de la peligrosidad y la adopción de medidas para mitigar los efectos.

Se conceptualizará en este proyecto, a los deslizamientos como una masa única en descenso, por acción de la gravedad y provocados por parámetros como la pendiente, la precipitación, la distancia menor o mayor o redes hídricas, a fallas geológicas y a vías de comunicación y su relación a la ocurrencia de deslizamientos, así como la influencia de que exista o no cobertura vegetal y la aplicación de un índice en base a la geología de la zona.

Existen ya varios métodos relacionados con proyectos de riesgos en el tema de deslizamientos, sin embargo, en el siguiente proyecto se presentará la implementación y la aplicación de los algoritmos de Lógica Fuzzy, que permitirán comparar diferentes modelos y acercarlos a la realidad actual de la zona.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1

PRESENTACION 1

1.1 INTRODUCCION..... 1

1.2 ANTECEDENTES 2

1.2.1 SITUACIÓN ACTUAL 5

1.2.2 SIG EN EL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS 9

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 10

1.4 OBJETIVOS 12

1.5 OBJETIVOS ESPECIFICOS 12

1.6 METAS 12

1.7 AREA DE INFLUENCIA..... 13

1.8 LOCALIZACION GEOGRAFICA 13

1.9 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO 14

CAPITULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS 15

2.1 DESLIZAMIENTOS 15

2.1.1	INTRODUCCIÓN	15
2.1.2	ELEMENTOS DEL DESLIZAMIENTO	18
2.1.3	CLASIFICACIÓN	20
2.1.4	POTENCIALIDAD DE MOVIMIENTO DEL TERRENO	25
2.1.5	FACTORES Y DETONANTES DE MOVIMIENTOS DEL TERRENO	26
2.1.6	SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A DESLIZAMIENTOS	33
2.2	SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA (SIG)	34
2.2.1	GENERALIDADES	34
2.2.2	CONSTRUCCIÓN DE BASES DE DATOS GEOGRÁFICAS	42
2.2.3	ANÁLISIS ESPACIAL	43
2.2.4	MODELOS CARTOGRÁFICOS	44
	CARACTERÍSTICAS	44
	MODELO VECTORIAL.....	45
	MODELO RASTER	46
	ALGEBRA DE MAPAS.....	48
2.2.5	GENERACIÓN MODELOS CARTOGRÁFICOS EN SOFTWARE	49
2.3	LOGICA FUZZY (DIFUSA)	51
2.4	SISTEMAS	61
2.5	TEORIA DE PROGRAMACION.....	62
2.5.1	MATLAB	63
2.5.2	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN EN MATLAB.....	64

CAPITULO 3

METODOLOGIA DE DESARROLLO	66	
3.1	INTRODUCCION.....	66
3.2	INFORMACION Y DATOS	66
3.2.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	67
3.2.2	GENERACIÓN DE DATOS	68
	INTERPRETACIÓN DE FOTOGRAFÍAS E IMAGEN SATELITAL	68

CONVERSIÓN DE FORMATOS Y SISTEMAS DE REFERENCIA	71
GENERACIÓN DE BASE DE DATOS ALFANUMÉRICA	72
3.2.3 ANÁLISIS DE DATOS	72
ANÁLISIS DE VARIABLES Y RELACIONES	72
ANÁLISIS DE PROXIMIDAD	77
INTERPOLACIÓN.....	78
RASTERIZACIÓN	79
3.3 ANALISIS DE METODOLOGIA DE LOGICA FUZZY	79
3.3.1 ANÁLISIS DE VARIABLES SEGÚN CASOS DE LÓGICA FUZZY	82
3.4 MODELOS CARTOGRAFICOS	87
3.4.1 OBTENCIÓN DE LOS MODELOS CARTOGRÁFICOS	87
COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN	70
PUNTOS DE MUESTRA.....	71
3.4.2 DESARROLLO DEL PROCESO SIG	93
MODELO DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS 1	93
MODELO DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS 2	95
MODELO DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS 3	96
MODELO DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS 4	98
3.4.3 AJUSTE DE LOS MODELOS.....	100
3.5 IMPLEMENTACION DEL ALGORITMO DE LOGICA FUZZY	103
3.5.1 TRANSFORMACIÓN DE FORMATOS DE LOS DATOS DE ENTRADA	103
3.5.2 PROCESO DE CÁLCULO.....	104
3.5.3 INTERFAZ DE USUARIO.....	105

CAPITULO 4

RESULTADOS.....	107
------------------------	------------

4.1 ANALISIS DE LOS MODLEOS OBTENIDOS.....	107
4.2 DESCRIPCION DE LOS MODELOS	107
4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS 1	109
4.2.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS 2	110
4.2.3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS 3	111
4.2.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS 4	112
4.2.5 COMPARACIÓN ENTRE MODELOS	113
4.3 IMPLEMENTACION DEL ALGORITMO EN MATLAB	114
4.3.1 PRESENTACIÓN DEL PROGRAMA	114
4.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	118
ANEXOS	119

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2.

Tabla 2.1. Clasificación simplificada de los mecanismos y tipos de deslizamientos.

Tabal 2.2. Tipos de Movimientos del Terreno.

Tabal 2.3. Caja de herramientas MATLAB.

CAPÍTULO 3.

Tabla 3.1. Índices litológicos propuestos por la FAO.

Tabla 3.2. Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio.

Tabla 3.3. Casos Lógica Fuzzy.

Tabla 3.4. Pertenencia de la variable a cada función de Lógica Fuzzy.

Tabla 3.5. Variables que intervienen en el Estudio.

Tabla 3.6. Desviaciones Estándar de los Modelos.

Tabla 3.7. Ajuste de los modelos.

CAPÍTULO 4.

Tabla 4.1. Semejanzas y Diferencias entre Modelos.

Tabla 4.2. Conclusiones y Recomendaciones.

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1.

Figura. 1.1. Áreas propensas a deslizamientos en Quito.

Figura. 1.2. Área de Influencia.

CAPÍTULO 2.

Figura 2.1. Partes de un Deslizamiento.

Figura 2.2. Movimiento de Terreno (Caída).

Figura 2.3. Movimiento de Terreno (Derrumbe).

Figura 2.4. Movimiento de Terreno (Trasnacional).

Figura 2.5. Movimiento de Terreno (Rotacional).

Figura 2.6. Movimiento de Terreno (Solufuxión).

Figura 2.7. Movimiento de Terreno (Flujos de Derrubio).

Figura 2.8. Movimiento de Terreno (Flujos de Tierra).

Figura 2.9. Movimiento de Terreno (Flujos de Lodo).

Figura 2.10. Movimiento de Terreno (Expansión Lateral).

Figura 2.11. Representación Gráfica de un SIG.

Figura 2.12. Influencia de cobertura vegetal.

Figura 2.13. Distancias a Fallas Geológicas.

Figura 2.14. Modelo Vectorial.

Figura 2.15. Modelo Raster.

Figura 2.16. Algebra de Mapas.

Figura 2.17. Probabilidad tomando una Variable.

Figura 2.18. Puntos importantes del modelo.

Figura 2.19. Probabilidad Creciente.

Figura 2.20. Probabilidad total con más de dos variables.

CAPÍTULO 3.

Figura 3.1. Modelo Digital del Terreno.

Figura 3.2. Puntos de muestro sobre el área de estudio.
Figura 3.3.Rango de Interés de la Función Seno.
Figura 3.4.Segundo Caso del Análisis Fuzzy.
Figura 3.5.Tercer caso del Análisis Fuzzy.
Figura 3.6.Caso 3. Lógica Fuzzy. Pendientes.
Figura 3.7.Caso 3. Lógica Fuzzy. Precipitación.
Figura 3.8.Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Vías de Comunicación.
Figura 3.9.Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Fallas Geológicas.
Figura 3.10.Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Red Hídrica.
Figura 3.11.Caso 2. Lógica Fuzzy. Influencia Cobertura Vegetal.
Figura 3.12. Caso 2. Lógica Fuzzy. Índice de Dureza de la Roca.
Figura 3.13. Modelo Cartográfico General.
Figura 3.14.Modelo Cartográfico Modelo 1.
Figura 3.15.Modelo Cartográfico Modelo 2.
Figura 3.16.Modelo Cartográfico Modelo 3.
Figura 3.17.Modelo Cartográfico Modelo 4.
Figura 3.18.Media y Desviación Estándar en ArcGIS.
Figura 3.19.Proceso que forman la rutina de Cálculo.

CAPÍTULO 4.

Figura 4.1. Parroquias dentro de la zona de estudio.
Figura 4.2. Modelo 1. Valores Originales.
Figura 4.3. Modelo 2. Valores máximo y mínimo de los puntos de muestra.
Figura 4.4. Modelo 3. Valores cercano y lejano.
Figura 4.5. Modelo 4. Diez Percentil.
Figura 4.6. Pantalla Principal.
Figura 4.7. Funcionalidad Total.

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

CAPÍTULO 1.

Fotografía 1.1. Construcción en taludes de vías quebradas.

Fotografía 1.2. Deslizamientos Av. Velasco Ibarra.

CAPÍTULO 3.

Fotografía 3.1. Fotografía de la zona de estudio.

ÍNDICE DE ANEXOS

- A1. Modelos probabilísticos de ocurrencia de deslizamientos.
 - A.1.1: Modelo probabilístico de ocurrencia de deslizamientos. (Modelo 1)
 - A.1.2: Modelo probabilístico de ocurrencia de deslizamientos. (Modelo 2)
 - A.1.3: Modelo probabilístico de ocurrencia de deslizamientos. (Modelo 3)
 - A.1.4: Modelo probabilístico de ocurrencia de deslizamientos. (Modelo 4)
- A2. Hojas de Datos
- A3. Datos con los que se trabajó los modelos de Lógica Fuzzy
- A4. Modelos Cartográficos de los modelos en base a Lógica Fuzzy
 - A4.1: Modelo Cartográfico General.
 - A4.2: Modelo Cartográfico del modelo de ocurrencia de deslizamientos 1.
 - A4.3: Modelo Cartográfico del modelo de ocurrencia de deslizamientos 2.
 - A4.4: Modelo Cartográfico del modelo de ocurrencia de deslizamientos 3.
 - A4.5: Modelo Cartográfico del modelo de ocurrencia de deslizamientos 4.
- A5. Modelo Digital del terreno y Fotointerpretación
- A6. Mapas de la obtención de cada variable.
- A7. Lenguaje de Programación.
- A8. Manual de Usuario.
- A9. Memorias Técnicas de cada Mapa Temático.

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

información de un elemento en un conjunto de campos.

CARTOGRAFÍA.- conjunto de técnicas utilizadas para la construcción de mapas.

CONJUNTOS DIFUSOS.- 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 $[0, 1]$.

DESLIZAMIENTOS.- consisten 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.

FOTOINTERPRETACIÓN.- es el arte o ciencia de examinar imágenes producidas por un instrumento a partir de radiaciones electromagnéticas emitidas o reflejadas por los objetos, con el propósito de identificarlos, deducir sus características y evaluarlos según el fin que se persigue.

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.- modelo gráfico de la superficie terrestre donde se representan objetos espaciales y sus propiedades métricas, topológicas y atributivas un mapa puede ser analógico (impreso sobre papel, por ejemplo) o digital (codificado en cifras, almacenado en un ordenador y presentado en una pantalla) existen mapas métricos, diseñados para representar distancias, superficies o ángulos y mapa topológicos, diseñados para representar vecindad, inclusión, conectividad y orden en el contexto de los SIG, un mapa es la presentación de cualquier estructura de datos usada para reflejar cartográficamente una variable espacial (nominal o cuantitativa) independientemente del modelo de datos utilizado (vectorial o raster).

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.

MDT.- (Modelo digital del terreno) se denomina modelo digital del terreno a una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, como puede ser la temperatura, la cota o la presión atmosférica. Relieve del suelo desnudo

PENDIENTE.- ángulo entre la línea normal a la superficie del terreno y la vertical la pendiente o inclinación del terreno es la derivada primera de la altitud y puede estimarse directamente a partir del modelo digital de elevaciones mediante filtros.

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.

RASTER.- modelo de datos en el que la realidad se representa mediante celdas que forman un mosaico regular cada celda del mosaico es una unidad de superficie que recoge el valor medio de la variable representada (altitud, reflectancia ...); las celdas pueden ser cuadradas (celdas) o no (triangulares, hexagonales...) un modelo de datos raster está basado en localizaciones.

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.

SUSCEPTIBILIDAD.- se define como la probabilidad de deslizamientos en el terreno.

CAPITULO 1.

PRESENTACION

1.1 Introducción.

En los últimos años, varios sectores de la ciudad de Quito, durante el período lluvioso, se han visto afectados por inestabilidades del terreno e inundaciones que han afectado a la población y a las vías principales (pasos deprimidos), en el Centro - Sur de Quito. Los taludes de las avenidas perimetrales de la ciudad, han presentado deslizamientos que han causado pérdida de vidas, bienes materiales y la interrupción del tráfico vehicular por algunos días, agravando los problemas de movilidad de esta ciudad. Un estudio de la Secretaría de Riesgos del Municipio de Quito, revela que hay 1500 familias que viven en zonas de riesgo por deslizamientos y derrumbes en todo el Distrito, (El Comercio 23/11/2010). Este tipo de eventos se han generado debido a la ocupación desordenada de las elevaciones que rodean la ciudad, asentamientos en zonas de relleno, carencia de políticas claras de ordenamiento urbano, falta de cultura de prevención y carencia 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. Por tanto, la determinación de la susceptibilidad a deslizamientos en Quito, con nuevas metodologías como el empleo de Lógica Fuzzy aplicada a la determinación de deslizamientos, es un instrumento vital para la toma de decisiones en lo relacionado a ordenamiento territorial y seguridad ciudadana.

1.2 Antecedentes

La ciudad de Quito se encuentra a una cota promedio de 2830 metros, al pie del complejo volcánico Pichincha y limitada al Este por elevaciones que son parte del bloque levantado de la falla inversa de Quito, que se extiende de Sur a Norte, y que separan a la ciudad, propiamente dicha, de los valles de Los Chillos y Tumbaco. Debido al alto crecimiento demográfico y al acelerado proceso de ocupación del suelo que experimentan las ciudades del país, Quito ha cuadruplicado su población en los últimos treinta años, (Subproyecto No. 5: Deslizamientos en Quito), estimándose su número actual en 2.239.191 habitantes (Censos decenales INEC, 2010). Según el Ilustre Municipio de Quito, dicho crecimiento ha sido, en gran parte, expansivo y especulativo, desbordando los límites sociales y naturales. En efecto, aproximadamente el 50% del área de Quito se desarrolla al margen de la legalidad urbana, fuera de control y con una preocupante invasión del área de protección ecológica¹.

Las zonas sobre las que no existe mayor presión y demanda por parte del mercado de bienes raíces (terrenos con pendientes fuertes y zonas aledañas a las quebradas), que son a la vez aquellas donde mayor es el riesgo frente a estas amenazas naturales, son las que, desafortunadamente, presentan una creciente densidad poblacional debido a los asentamientos marginales de hecho, tolerados por las sucesivas administraciones municipales en los últimos años.

¹ Orellana Hernán, Zea José, CODIGEM, 1993.

En Quito, los terrenos inestables se generan en lugares conformados por sedimentos eólicos de origen volcánico, con pendientes mayores al 25%, deforestados, e inadecuadamente ocupados. En periodos lluviosos se produce una erosión intensa del terreno evidenciada por la presencia de cárcavas, deslizamientos y flujos de lodo, entre otros fenómenos geodinámicos. Otras áreas críticas de la ciudad constituyen los flancos abruptos de quebradas (Fotografía 1.1), en cuyos filos se han construido irresponsablemente viviendas, a pesar de que existen ordenanzas municipales que lo prohíben. Otro tipo de terrenos inestables son los rellenos inadecuados de las 85 quebradas que atraviesan la ciudad (Subproyecto No. 5: Deslizamientos en Quito).



Fuente: Diario La Hora

Fotografía 1.1: Construcciones en taludes de vías y quebradas.

Así las zonas más vulnerables se ubican a lo largo de la Av. Simón Bolívar (nueva vía Oriental), y las laderas de: Puengasí, Panecillo, Itchimbía y Pichincha (vía occidental). Por este motivo la elaboración de mapas de susceptibilidad a

deslizamientos constituye una herramienta importante para el desarrollo urbano y su planificación.

Desde hace varios años se han desarrollado diversos métodos para cartografiar deslizamientos empleando tanto análisis cualitativos basados en la experiencia del operador, como técnicas cuantitativas donde la precisión de la base de datos es fundamental para obtener un mapa confiable. Debido a la complejidad del tratamiento de los datos obtenidos, los SIG han ofrecido una importante ayuda. En los últimos años los conceptos de lógica difusa se han utilizado para varias aplicaciones, entre ellas la elaboración de mapas de susceptibilidad a deslizamientos. Con la lógica Fuzzy se han desarrollado varios proyectos relacionados a movimientos del terreno:

- Campos Cecibel, Reyes Ximena, Rodríguez Ximena, Ing. Eduardo Aguilera, Ing. Oswaldo Padilla: “Desarrollo de una aplicación SIG orientada a la administración de riesgos volcánico y sísmico en el tramo de la carretera Papallacta- Lago Agrio, y por movimientos en masa en el tramo Papallacta – Baeza.” Tesis de Grado ESPE, Quito, 2003.
- Hermosa Lizzette, Avilés Marco, Ing. Oswaldo Padilla, Ing. Mario Cruz: “Análisis y Modelamiento de susceptibilidad a deslizamientos mediante SIG y Geoestadística en las parroquias de Papallacta y Cuyuja, Cantón Quijos.” Tesis de Grado ESPE, Quito, 2009.

- Padilla Oswaldo, “Fundamento teórico para modelación de variables ambientales mediante lógica Fuzzy”. Revista Geoespacial Número 4, ESPE, 2007.

1.2.1 Situación Actual

Los sucesivos inviernos que han azotado a la capital desde hace tres años están considerados como los más fuertes en los últimos 37 años. En el año 2011 hubo cinco precipitaciones categorizadas de alto nivel (INAMHI, 2011).

El temporal de estos últimos años ha causado infinidad de desastres como la caída de tres arboles en el de El Panecillo, derrumbes que sepultaron viviendas y que han provocado fallecimientos en Chaguarquingo, la presencia de tormentas, una cada dos días, que son de corta duración, pero con cantidades importantes de precipitaciones, (INAMHI, 2011). Además alrededor de 500 familias deben ser relocalizadas, ya que sus viviendas se ubican en zonas de riesgo.

En la temporada lluviosa del año 2011 la Empresa Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas reporto alrededor de 205 deslaves y derrumbes en diversos sitios de la ciudad. Las lluvias que cayeron en Quito durante abril dejaron 11 muertos, una decena de heridos y un daño económico que aún se está

cuantificando. Además, la infraestructura de la ciudad otra vez se puso a prueba con deslizamientos, inundaciones, dificultades en el tránsito y viviendas destruidas. Así, desde el 4 de abril del 2011, las lluvias han causado derrumbes, deslizamientos e inundaciones, han anegado casas y han bloqueado vías. El primer derrumbe registrado por la Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad sucedió en la escalinata Rodrigo Paz, en el sector de La Libertad. Tres días después, la fuerza del invierno lo sintieron los vecinos del barrio San Juan; un muro se desplomó en las calles Tegucigalpa y Nicaragua, dejando dos viviendas destruidas. Paluco, en el sector de Monjas, es otro de los sectores afectados, "... Después de un mes y 17 días del derrumbe en el que murió Manuel Mesías Sánchez, el lugar no ha cambiado. El plástico colocado por el Municipio, permanece sobre el talud..." (Diario EL COMERCIO, Abril 2011). Entre el 1 y el 27 de abril, el Municipio registró 320 emergencias atendidas. En la central del 911 se atendió más de 100 llamadas de emergencia al mes, relacionadas con inundaciones y deslizamientos.

"...En el Municipio de Quito, aún no se cuantifica el impacto económico del invierno. Lourdes Rodríguez, titular de la Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad del Cabildo, explica que se maneja un plan de emergencia que cuenta con USD 2,3 millones. De esa cifra, 920 000 se utilizaron en obras de mitigación contra el temporal. Los sectores productivos y los negocios particulares también acusan el efecto del invierno. En el sector de transporte público, por ejemplo, la demanda de pasajeros se redujo un 20% durante abril,

según José Santamaría, titular de la Cámara de Transporte Masivo de Quito. Las lavadoras de autos y las empresas repartidoras de mensajería y encomiendas también resultaron afectadas por las torrenciales lluvias. Para Eduardo Cadena, director del Centro de Estudios y Análisis de la Cámara de Comercio de Quito, todavía es temprano para cuantificar las pérdidas materiales de Quito. No obstante, Cadena calcula que el Municipio tiene que invertir unos USD 570 millones en vías, alcantarillado, obras de prevención, etc...” (Diario EL COMERCIO. Abril 2011).



Fuente: Diario El Comercio
Fotografía 1.2: Deslizamiento Av. Velasco Ibarra.

Durante la época invernal del año 2012 se han registrado varios deslizamientos en distintas zonas de la ciudad. El deslizamiento de mayor gravedad registrado se produjo en la avenida Velasco Ibarra (Fotografía 1.2), seiscientos metros cúbicos de tierra bloquearon el tránsito vehicular en sentido norte-sur. Según el informe del Cuerpo de Bomberos, la causa fue el

taponamiento de las alcantarillas en el barrio El Dorado. También se deslizaron tres árboles y otros dos metros cúbicos de pasto. (Diario EL COMERCIO, 10 de enero del 2012.)

“... Los aguaceros de las últimas horas dejaron al descubierto, una vez más, la vulnerabilidad de los taludes de la estratégica av. Simón Bolívar. Se han registrado 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 deslaves en la época invernal. Allí se ha detectado filtraciones de agua en los taludes. Jaime Rivera, gerente de Obras Públicas de la EPMMOP, aseguró que una brigada de emergencia monitorea y recorre las zonas donde hay más inestabilidad en los taludes. Los recorridos los realizan en las avenidas Simón Bolívar, Mariscal Sucre, la Autopista General Rumiñahui, Interoceánica y De los Conquistadores. En La Forestal IV, en la av. Simón Bolívar, se realizaron trabajos para reforzar el talud, luego de que en mayo del año pasado, un deslizamiento de una parte de la montaña cubrió a cinco vehículos y mató a cuatro personas. Según Rivera, las obras para estabilizar el talud concluyeron en la primera semana de este mes. “Está descartado que haya más deslizamientos en este sector”. Los trabajos en el talud de La Forestal IV tuvieron una inversión de USD 636 478. El revestimiento se iniciará en la última semana de este mes. Se aplicarán tres técnicas para el reforzamiento del talud. En la parte baja se colocará lo que se conoce como un muro de

tierra armada. Éste contará con una pared de hormigón desde la base y tendrá entre 10 y 18 metros de altura. Hacia arriba, lo cubrirá la vegetación sembrada bajo el sistema de terrazas, que ayudará a sostener el talud. Esta ocupará alrededor del 60% de la pared y ayudará a evitar que la tierra se erosione. Para asegurar la parte alta, se protegerá con hormigón lanzado. No hay una fecha establecida para la entrega de estas obras. Otro punto intervenido por la EPMMOP en la Av. Simón Bolívar es el talud de Catacuhancho, con una inversión de USD 140 000. Es la zona poblada del barrio Nueva Aurora, en el sur. El sector está ubicado en la parte alta de la montaña. Se ingresa por una calle cercana al filo del talud. Allí se construyó una terraza para dar forma a las cuentas de coronación y evitar filtraciones de agua en el talud. La EPMMOP aseguró que se están realizando los trabajos de perforación de drenes. La Simón Bolívar soporta el flujo diario de entre 60 000 y 100 000 vehículos diarios. El 15% es transporte pesado...” (Diario EL COMERCIO, 10 de enero del 2012.)

1.2.2 SIG en el análisis de susceptibilidad a deslizamientos

Para analizar la susceptibilidad del terreno a deslizamientos es importante contar con herramientas que nos permita trabajar con un correcto y rápido manejo de datos espaciales siendo en general el objetivo del uso de SIG. Los SIG en este tipo de estudios son muy útiles para el procesamiento de la base de datos georeferenciada, su principal ventaja es facilitar diferentes

operaciones que se pueden realizar con las distintas coberturas generadas en base a mapas temáticos de una determinada zona, generando de esta forma los mapas de susceptibilidad del terreno a deslizamientos².

1.3 Justificación e importancia

A pesar de los esfuerzos del I. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, es conocido por todos los habitantes de la capital que durante la época lluviosa, los sectores ubicados en las laderas, ya sean del Pichincha o de las elevaciones que rodean a Quito por el lado oriental, sufren serios daños por rotura de tuberías, especialmente del servicio de alcantarillado, frecuentes deslizamientos y deslaves que ocasionan el 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), Simón Bolívar (nueva vía oriental), la Vía Occidental, autopista General Rumiñahui, en el tramo el Trébol – Peaje, entre otras.

“... La Dirección Metropolitana de Seguridad Ciudadana del I. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito ha identificado las quebradas y laderas más peligrosas del Distrito, por la frecuencia con la que ocurre este tipo de fenómenos (Figura 1.1)...” (El Comercio, Junio, 2010).

²Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

Por las razones mencionadas, es necesario realizar un modelo predictivo de susceptibilidad a deslizamientos en el área de estudio, a fin de identificar las áreas donde existen la mayor probabilidad de ocurrencia de este tipo de inestabilidades de terreno, caracterizar y cuantificar esta clase de eventos, 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.



Fuente: El Comercio 03/06/2010
Figura 1.1: Áreas propensas a deslizamientos en Quito.

En esta propuesta de proyecto, se ha seleccionado el Centro – Sur de Quito (Lomas de Puengasí, Panecillo e Itchimbía) como área piloto para la generación de una cartografía de deslizamientos mediante el uso de nuevas metodologías como la aplicación del algoritmo de Lógica Fuzzy en plataformas SIG, por ser una zona que ha presentado, en los últimos períodos lluviosos, la mayor cantidad de eventos tipo deslizamiento, afectando sobre todo a la avenida Simón Bolívar y barrios aledaños.

1.4 Objetivo General.

Implementar el algoritmo de lógica Fuzzy, para la determinación del grado de susceptibilidad a deslizamientos en el área comprendida entre los sectores de: Monjas – Ferroviaria – La Magdalena - Itchimbía del Distrito Metropolitano de Quito.

1.5 Objetivos Específicos

- Estructurar la información cartográfica básica y temática obtenida.
- Identificar deslizamientos mediante técnicas de análisis tridimensional de objetos y comprobación en campo, previo a la definición del área de muestreo.
- Modelar las variables que intervienen en los fenómenos físicos relacionados con los deslizamientos para aplicarse en Lógica Fuzzy. Estos son:
Pendientes, Precipitación, Índice de Dureza de la roca a la erosión, Cobertura Vegetal, Distancia a vías de comunicación, Distancia al Recurso Hídrico, Distancia a Fallas geológicas.
- Implementar el módulo de lógica Fuzzy sobre plataformas SIG a utilizarse en software libre y propietario.

1.6 Metas.

- Estimar la susceptibilidad del terreno a deslizamientos, mediante fotointerpretación realizando el modelo digital del terreno. Localizar áreas potencialmente inestables (evaluación de la susceptibilidad).

- Estructurar la información obtenida de cada variable, en los distintos mapas para la obtención del mapa de la variable estudiada.
- Implementar la utilización de operadores Fuzzy en la realización de modelos estadísticos. Integrar los modelos de susceptibilidad del terreno a deslizamientos con dos diferentes sistemas de información Geográfica.
- Implementar el manual de usuario, posterior a la implementación del módulo de Lógica Fuzzy.

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,(Figura 1.2). 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.

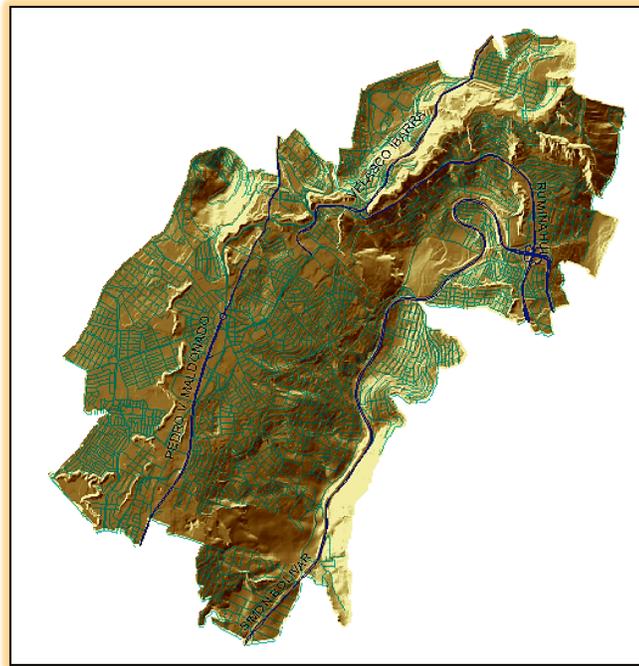


Figura 1.2: Área de influencia.

1.9 Descripción del proyecto.

El presente estudio es un aporte para la Administración Metropolitana de Quito, que se halla empeñada en considerarla gestión de riesgos como 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 que disparan deslizamientos.

CAPITULO 2.

FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 DESLIZAMIENTOS

Sharpe en 1938 definió los deslizamientos como la “caída perceptible o movimiento descendente de una masa relativamente seca de tierra, roca o ambas”. Según Crozier (1986) “un deslizamiento se define como el movimiento gravitacional hacia el exterior de la ladera y descendente de tierras o rocas sin la ayuda del agua como agente de transporte”³.

2.1.1 Introducción

Los movimientos de ladera o deslizamiento constituyen un riesgo geológico (Ayala et al., 1987) de origen natural o inducido, que debe tenerse en cuenta en la planificación del territorio sobretodo en áreas montañosas. Los 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 interferidas razonablemente o bien corresponder a una franja relativamente estrecha. Se considera que la masa movilizada se desplaza como un bloque único, y según la trayectoria descrita los deslizamientos pueden ser rotacionales o traslacionales. El

³ Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

movimiento dominante en las expansiones laterales es la extrusión plástica lateral, acomodada por facturas de cizalla o de tracción que en ocasiones pueden ser de difícil localización. Finalmente los flujos son movimientos de una más a desorganizada o mezclada donde no todas las partículas se desplazan a la misma velocidad ni sus trayectorias tienen que ser paralelas. Debido a ello la masa movida no conserva su forma en su movimiento descendente, adoptando a menudo morfologías lobuladas (Corominas, 1992).

En un deslizamiento el material se mueve como una masa única, no como varios elementos que se mueven a la vez, se efectúa a lo largo de una superficie de deslizamiento, que facilita la acción de la gravedad. Esta superficie se crea por la absorción de agua a una profundidad determinada, lo que implica un cambio de densidad de la capa subyacente que es lo que provoca la existencia de un plano de deslizamiento. Afecta tanto a tierras poco compactas como a rocas. Todo fenómeno o evento que produce el desplazamiento de un pequeño o gran volumen de suelo o roca, se considera como terreno inestable. Se basa en un concepto universal “todo terreno es inestable cualquiera sea su naturaleza y su contexto, porque está sometido a las leyes de la gravedad y procesos de erosión y degradación físico química”⁴.

⁴Curso CERIG 1995

La mejor estrategia para reducir los impactos de los deslizamientos es la prevención, que precisa de la percepción de la existencia del fenómeno de peligro, de su evaluación y la adopción de medidas para mitigar los efectos. En este sentido la primera fase en la prevención del peligro a deslizamiento es la identificación y caracterización de éste. La caracterización del peligro se expresa usualmente de forma cartográfica mediante la clasificación de zonas del territorio de acuerdo a la susceptibilidad a deslizamientos que presenten.

La ocurrencia de deslizamientos puede depender de las siguientes variables:

- Clase de rocas y suelos
- 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).

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 predicción⁵.

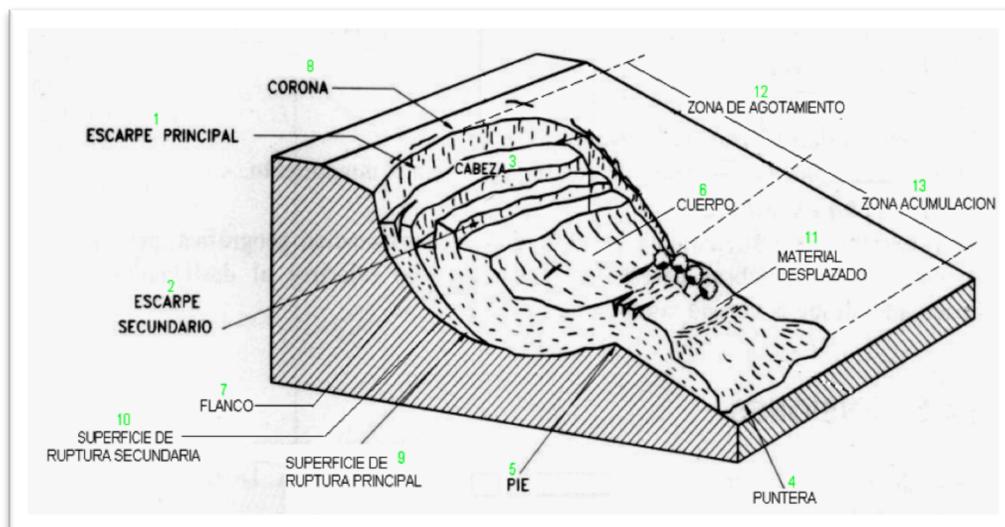
⁵Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

2.1.2 Elementos de los deslizamientos (Figura 2.1)⁶.

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.

⁶Curso CEREG 1995

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.



Fuente: Geomorfología. Blog spot
Figura 2.1: Partes de un Deslizamiento

2.1.3. Clasificación.

La clasificación utilizada es la propuesta por (Tipos de roturas en laderas y taludes)⁷, basada en la clasificación de Varnes, Hutchinson y Cruden, exceptuando lo que los autores definen como deformaciones sin rotura. El criterio básico que permite separar los distintos tipos de deslizamiento son los mecanismos de rotura. Se pueden encontrar 5 mecanismos de rotura principales:

- Un 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.
- Los 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.
- Los 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.

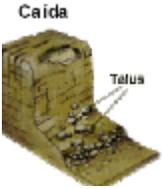
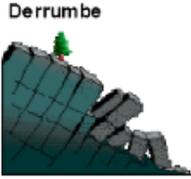
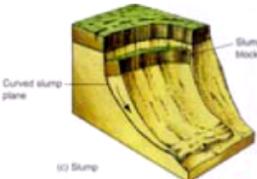
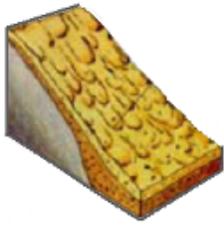
⁷Corominas y García (1997)

- El movimiento dominante en las expansiones laterales es la extrusión plástica lateral, acomodada por fracturas de cizalla o de tracción que en ocasiones pueden ser de difícil localización.
- Los Flujos son movimientos de una masa desorganizada o mezclada donde no todas las partículas se desplazan a la misma velocidad ni sus trayectorias tienen que ser paralelas. Debido a ello la masa movida no conserva su forma en su movimiento descendente, adoptando a menudo morfologías lobuladas.

Tabla 2.1: Clasificación simplificada de los mecanismos y tipos de deslizamientos. (Fuente: Corominas y García, 1984).

TIPO DE MECANISMO	SUBTIPO	TIPO DE DESLIZAMIENTO	TÉRMINO EN INGLÉS
Movimientos donde predomina la trayectoria vertical		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	Superficies de deslizamiento planas	Deslizamientos Traslacionales	Slides
	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

Tipos de movimientos del terreno

		Tabla 2.2: Tipos de Movimientos del Terreno ⁸ .
Caída	Es el movimiento de rocas, principalmente a través del aire y en forma rápida sin dar tiempo a eludirlas.	 <p style="text-align: center;">Figura 2.2 Caída</p>
Derrumbe o Volcamiento	Consiste en el giro hacia delante de una o varias rocas, ya sea por acción de la gravedad o presiones ejercidas por el agua.	 <p style="text-align: center;">Figura 2.3. Derrumbe</p>
Deslizamiento Traslacional	Consiste en movimientos de capas delgadas de suelo o rocas fracturadas a lo largo de superficies con poca inclinación.	 <p style="text-align: center;">Figura 2.4 D. Traslacional</p>
Deslizamiento Rotacional	Son los desplazamientos de suelos o rocas blandas a lo largo de una depresión del terreno.	 <p style="text-align: center;">Figura 2.5. D. Rotacional</p>
Soliflucción	Proceso geomorfológico característico de zonas de clima periglacial (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 style="text-align: center;">Figura 2.6. Soliflucción</p>

⁸ Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

CAPITULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICO

Flujos de derrubios Son movimientos complejos que engloban a fragmentos rocosos, bloques, cantos y gravas en una matriz fina de arenas, limos y arcilla.



Figura 2.7. Flujos de Derrubios

Flujos de Tierra Son movimientos lentos de materiales blandos. Estos flujos frecuentemente arrastran parte de la capa vegetal.



Figura 2.8. Flujos de Tierra

Flujos de lodo 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



Figura 2.9. Flujos de lodo

Expansión lateral Se caracteriza porque la ampliación lateral por corte progresivo y grietas de tracción es el modo predominante de este tipo de movimientos. 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.



Figura 2.10 Expansión lateral

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.
- (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.

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 rápidamente⁹.

2.1.4. Potencialidad de Movimiento del Terreno.

La predicción temporal de la ocurrencia de una rotura en una ladera es el aspecto más difícil de definir en la evaluación de la peligrosidad a deslizamientos, se le puede dividir en¹⁰:

- Los métodos basados en la observación de movimientos se basan en la constatación que tanto en suelos como en rocas la rotura suele estar precedida por deformaciones.
- Los métodos empíricos indirectos correlacionan los deslizamientos ocurridos en un área con los factores desencadenantes. Otros autores correlacionan los deslizamientos con otros factores como el área de la cuenca hidrográfica y la pendiente de la ladera.

⁹Campos Cecibel, Reyes Ximena, Rodríguez Ximena, 2003.

¹⁰Corominas, 1992

2.1.5. Factores y detonantes de movimientos de terreno

Los fenómenos de inestabilidad son una forma de procesos erosivos que dependen de tres factores principales:

Contexto geológico (rol pasivo)

Aporta un número de parámetros importante para comprender la inestabilidad de las laderas.

a) **LITOLOGÍA:** los tipos de rocas y la calidad de los suelos determinan en muchos casos la facilidad con que la superficie se degrada por la acción de los factores externos como la meteorización. Los movimientos en masa se dan principalmente en las siguientes condiciones:

- Importantes formaciones de terrenos sueltos
- Rocas detríticas poco consolidadas
- Rocas arcillosas o filíticas
- Rocas muy fragmentadas o descomprimidas
- Rocas químicamente solubles.

b) **Estructuras:** Determinan zonas de debilidad (fallas, diaclasas y plegamientos), y la colocación de materiales en posición favorable a la inestabilidad (estratos), esto da como resultado un contexto estructural desfavorable.

- c) **Sismicidad:** las vibraciones provocadas por sismos pueden ser lo suficientemente fuertes como generar deslizamientos de diversa magnitud, afectando extensas áreas.
- d) **Volcanismo:** es un elemento disparador de fenómenos de inestabilidad, tanto por la propia actividad volcánica (sismos volcánicos y deformación del aparato volcánico), como por la acumulación progresiva de materiales fragmentarios (cenizas, bloques, etc.); que debido a sus características físicas favorecen la inestabilidad de los terrenos en áreas aledañas al aparato volcánico¹¹.
- e) **Clima:** el clima con las características que presenta puede favorecer la inestabilidad del terreno al aportar una suficiente cantidad de agua; debido a la variabilidad de temperatura y las precipitaciones, principalmente. Ello debido a la presión que ejerce el líquido en los poros y fisuras del suelo. Así mismo, las lluvias y la formación de corrientes de agua por la superficie (escorrentía superficial), favorecen los procesos de erosión. Las altas precipitaciones en combinación con el tipo de suelo en algunos casos material muy alterado fomenta la formación y aceleración de los movimientos en masa ya que por ejemplo, un suelo arcilloso se satura por la cantidad de agua recibida, esto lo convierte en un suelo más pesado que unido con el grado de pendiente existente, se puede deslizar.

¹¹Tomado de Ch. BOnnard.

f) **Relieve:** las formas que adopta el terreno constituye un factor importante a ser considerado en la inestabilidad de terrenos. Todos los elementos descritos anteriormente forman parte del natural equilibrio geológico y que puede romperse con la actividad constructiva y destructiva del hombre. De esta manera el ser humano contribuye a provocar o acelerar estos fenómenos. Cuando la actividad humana se realiza sin una adecuada planificación, se dice que es una actividad destructiva, especialmente en obras viales (carreteras y puentes), desarrollos urbanísticos, rellanos mal hechos, canteras, presas, excavación, canales, corte en el perfil natural de laderas, deforestación: prácticas agrícolas deficientes en la conservación de suelos, entre otros. Todo esto promueve procesos de inestabilidad en suelos que en cierta medida son naturalmente vulnerables a esta clase de fenómenos y que tienen graves consecuencias en el futuro¹².

g) **Causas internas**

Que son las que llevan a un colapso sin que se verifique cualquier cambio en las condiciones geométricas del talud y que crean una disminución de la resistencia interna al corte (aumento de la presión hidrostática, disminución de la cohesión, y cambio del ángulo de fricción interna por procesos de alteración);

- Efectos de cambios de temperatura

¹²Campos Cecibel, Reyes Ximena, Rodríguez Ximena, 2003.

- Disminución de los parámetros de resistencia
- Ruptura progresiva
- Erosión interna.

h) Causas externas.

Provocan un aumento en los esfuerzos de cizallamiento, sin que haya una disminución en la resistencia del material (aumento en la inclinación del talud por procesos naturales o artificiales, depósito de material en la porción superior de los taludes, estructuras sísmicas y vibraciones).

- Cambios en la geometría del sistema
- Cambios naturales en la inclinación de los relieves
- Descarga del pie de la pendiente
- Carga en la cabeza de la pendiente
- Choques y vibraciones
- Cambios en el régimen hidrogeológico
- Descenso del nivel de agua subterránea.

i) Causas intermedias

- Elevación del nivel freático en masas homogéneas.
- Elevación en la columna de agua de las discontinuidades.
- Disminución rápida del nivel freático.
- Erosión subterránea retrogresiva.

Muchas veces varias causas externas e internas operan al mismo tiempo para reducir la resistencia al corte o aumentar el esfuerzo de corte¹³.

La inestabilidad de taludes se da por el desequilibrio entre las fuerzas que actúan en un talud, condicionadas por una serie de factores que actúan simultáneamente y dan lugar a la modificación de las condiciones iniciales de estabilidad del terreno.

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:

- La Geología permite conocer las características de los suelos y rocas. La formación geológica determina la presencia de materiales duros o de baja resistencia.
- El ángulo 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.

¹³Campos Cecibel, Reyes Ximena, Rodríguez Ximena, 2003.

- Fallas y discontinuidades Es un plano de ruptura de una roca, donde hay un desplazamiento provocado por esfuerzos tectónicos. La mayor parte de las fallas tienen lugar a lo largo de fracturas inclinadas. De acuerdo al sentido del movimiento las fallas se clasifican en:
 - Fallas normales: son aquellas en las que el bloque del techo se mueve hacia abajo con respecto al bloque del muro. Estas fallas suelen tener buzamientos moderados a altos, con un promedio de 60° . Con buzamientos menores a 45° pasan a denominarse fallas normales de bajo ángulo
 - Fallas transcurrentes: son aquellas que acomodan el movimiento horizontal de los bloques adyacentes con respecto al plano de falla. Estas dependiendo a su vez del movimiento relativo de un bloque con respecto al otro, pueden ser de dos tipos: dextrales o sinistralas
 - Fallas inversas: se caracterizan por un movimiento del bloque del techo hacia arriba con respecto al muro. Las fallas inversas tienen generalmente un buzamiento menor a 45° , en promedio 30° . Puede ocurrir que el plano de falla sea muy inclinado, en cuyo caso se originaría un cabalgamiento, es decir, que los estratos más antiguos solaparían a los más modernos (quedarían por encima).
 - Fallas activas: son aquellas que han presentado evidencia de movimiento en el pasado geológico reciente (cuaternario), y que es capaz de generar terremotos en el futuro próximo.

- 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.

Cuanto más factores se apliquen a un sitio específico, mayores serán las posibilidades de que el sitio experimente desprendimientos.

Las intervenciones antrópicas que pueden contribuir a generar riesgo de deslizamientos en áreas susceptibles a los fenómenos de deslizamientos son:¹⁴

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

¹⁴Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

- Remover plantas de raíces profundas desestabiliza el suelo en una ladera e incrementa el potencial de deslizamiento.
- El mal manejo de aguas superficiales o su superficiales en las laderas a través de la irrigación, o votando las aguas residuales sobre ellos.
- Rellenos en zonas de pendientes y con una pobre compactación.

2.1.6. 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.¹⁵

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

- Inventario de los deslizamientos.
- Topografía 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.

¹⁵Lana, et al 2004

2.2 Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfico (SIG) es un conjunto de procedimientos sobre una base de datos que tiene una representación gráfica, respecto al mundo real y que son susceptibles de algún tipo de medición respecto a su tamaño y dimensión relativa a la superficie de la tierra. Es un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para soportar la captura, administración, manipulación, análisis, modelamiento y graficación de datos u objetos referenciados espacialmente, para resolver problemas complejos de planificación, administración y gestión geográfica. Una definición más sencilla es: Un sistema informático capaz de mantener y usar datos con localizaciones exactas en una superficie terrestre. Además de ser una herramienta de análisis de información, la cual debe tener una referencia espacial y debe conservar una inteligencia propia sobre la topología y representación¹⁶.

2.2.1. Generalidades.

En un SIG se usan herramientas de gran capacidad de procesamiento gráfico y alfanumérico, estas herramientas van dotadas de procedimientos y aplicaciones para captura, almacenamiento, análisis y visualización de la información georeferenciada. 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

¹⁶Mappinginteractivo

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 influyentes¹⁷.

El estudio del medio natural constituye una de las grandes preocupaciones actuales pero son quizás los aspectos relacionados con los desastres naturales sobre los que más se ha hecho hincapié por las pérdidas económicas que entraña. En los últimos tiempos se ha tratado de buscar métodos y técnicas para conseguir una buena evaluación de los riesgos medioambientales que faciliten su eliminación o prevención.

Es por ello que se hace necesario proceder a la evaluación y cartografía de la susceptibilidad a los deslizamientos, la probabilidad a que se desarrolle este fenómeno en los distintos puntos del área de estudio. Este estudio se representó en forma de mapas de riesgo, los elementos fundamentales de predicción espacial e imprescindible para el diseño de medidas de prevención.

¹⁷Obermeyer y 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 podríamos obtener de otras formas de análisis (Figura 2.11.).

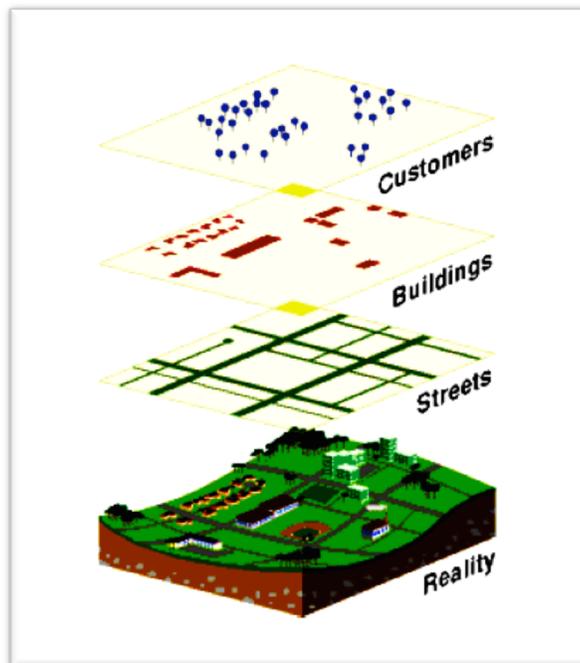


Figura 2.11: Representación gráfica de un SIG

Un SIG permite ingresar o recoger, editar, almacenar, administrar, recuperar, integrar, manipular, analizar, mostrar y modelar capas de datos geográficos y datos de unidades referenciadas espacialmente, usando las herramientas que ofrece el programa de análisis geográfico, para producir información fácil de interpretar y útil, frecuentemente aplicada a la toma de decisiones y a la planeación¹⁸.

Además de los equipos físicos, un SIG debe funcionar en condiciones adecuadas, en términos de la información o datos que se ingresan al sistema; su operación debe estar a cargo de personas capacitadas y se debe contar con un presupuesto suficiente. La difusión de estas tecnologías permite que actualmente no solo se desarrollen en el plano institucional sino también en otros ámbitos.

Gracias a los SIG es posible realizar tres actividades fundamentales:

- Visualizar datos en forma espacial,
- Manejar información corregida espacialmente para su análisis y
- Modelarla.

El beneficio de un SIG es que, una vez ingresada la base de datos y creadas las respectivas capas, cada una con sus atributos, permite visualizar esta

¹⁸Campos Cecibel, Reyes Ximena, Rodríguez Ximena, 2003.

información, capa por capa, a manera de mapas de presentación. Asimismo, se obtienen notas, imágenes y bases de datos ligadas a los objetos georeferenciados.

Los SIG son interactivos por lo que, además de generar mapas temáticos, permiten consultas directas, movimientos continuos sobre la carta geográfica, cambios de escala en la visualización (zoom), cambios de escala del objeto (si el sistema cuenta con dicha información), creación de reportes, consulta y visualización simultánea de datos estadísticos, gráficos, imágenes, notas relativas a un objeto georeferenciado específico seleccionado (reporte referente al centroide seleccionado) o de toda la base de datos. Asimismo, se puede alimentar a los SIG con información, en forma de bases de datos actualizados, en que se logra mostrar secuencias temporales que, de acuerdo con los ritmos de actualización, pueden llegar a operar casi en tiempo real.

Un producto derivado de este manejo visual interactivo es la publicación de mapas temáticos con información seleccionada (Figura 2.12), en segundo término, un SIG permite manejar información ya sea desplegándola sobre la misma imagen cartográfica para su exploración u ordenando las bases de datos y procesándolas para diversos análisis exploratorios.

Las capas o mapas de variables individuales pueden analizarse para extraer nueva información, ya sea por una simple comparación visual o combinando y comparando las capas por procedimientos específicos del programa, como la recodificación (asignación de nuevos valores para las clases o rangos de las variables) y la superposición (creación de nuevos archivos con valores específicos de las capas de entrada). Así se puede recuperar la nueva información que se genera. En los SIG, el análisis es el proceso de buscar, en la información geográfica, patrones y relaciones entre las características¹⁹.

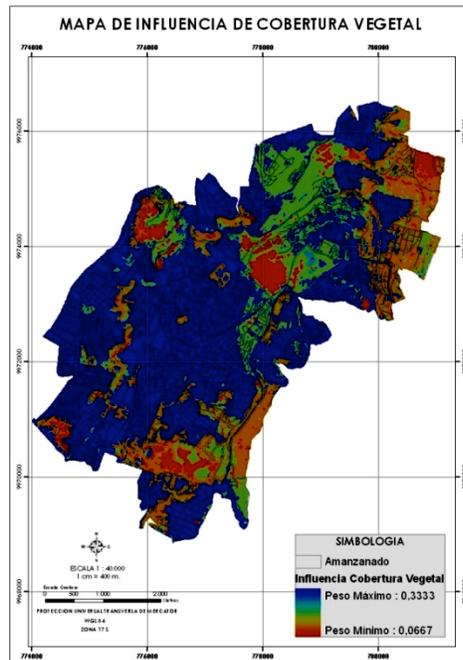


Figura 2.12: Influencia de Cobertura Vegetal

Algunos procedimientos de análisis espacial comúnmente incluidos en las rutinas de los programas de SIG son el análisis de proximidad, que implica el cálculo de distancias entre objetos georeferenciados con valores, rangos o

¹⁹ Mitchel 1994, citado por Gómez Solís, 2001. Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

clases específicas de una variable, y que permite identificar áreas cuya característica de análisis tiene el mismo valor o categoría y que mantienen continuidad, eliminando las áreas no significativas según un límite de inclusión (Figura 2.13); el análisis de vecindad que sirve para analizar las cualidades de las áreas vecinas de acuerdo con parámetros límite, de densidad, media, suma, etc.); la indización (agrega los valores de las capas de insumo), y el análisis matricial (para generar los valores para las áreas u objetos cuyas variables que sirvieron de insumo coinciden con el diseño solicitado).

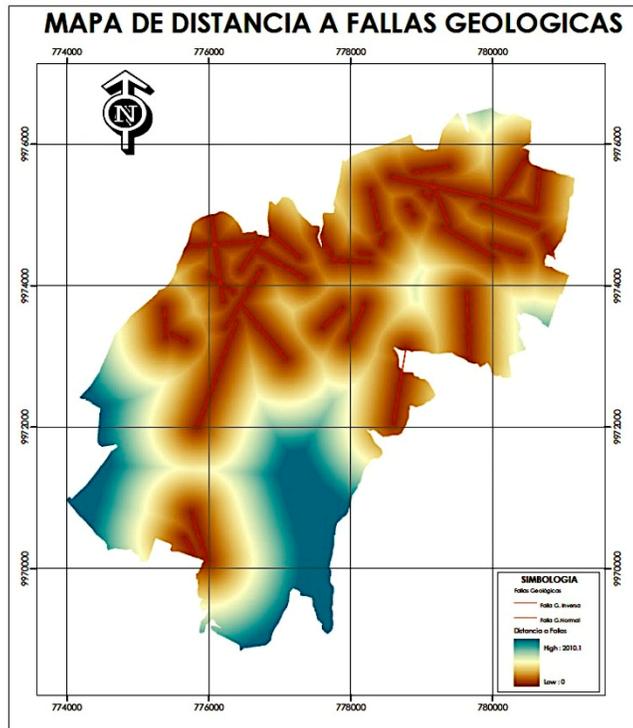


Figura 2.13: Distancias a fallas geológicas

Un SIG permite desarrollar modelos de datos (geográficos, ambientales, estadísticos, sociales o sus combinaciones) de simulaciones, de proyecciones o de corte explicativo, que ayuden a comprender mejor los fenómenos estudiados o de los cuales se deriven aplicaciones específicas.

Mediante el desarrollo de modelos de datos georeferenciados en los SIG es posible derivar y crear nueva información espacial o geoméricamente corregidos a partir de insumos de diversa índole y también vincular resultados de modelos de análisis estadístico a través de las rutinas y herramientas del programa geográfico, o bien a través del desarrollo externo (en un programa estadístico) y su vinculación a los objetos (puntos, líneas, áreas) rectificadas.

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 condicionales²⁰. 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.

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.

²⁰ERDAS IMAGINE, 2005. Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

2.2.2. 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.

Aunque a nivel geográfico las relaciones entre los objetos son muy complejas, siendo muchos los elementos que interactúan sobre cada aspecto de la realidad, la topología de un SIG reduce sus funciones a cuestiones mucho más sencillas, como por ejemplo conocer el polígono (o polígonos) a que pertenece una determinada línea, o bien saber qué agrupación de líneas forman una determinada carretera.

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 estructura²¹.

2.2.3. Análisis Espacial.

Análisis SIG es el conjunto de herramientas y procedimientos que permiten la manipulación y análisis de datos espaciales con el fin de obtener como resultado la solución de preguntas ó llevar a cabo la solución de problemas complejos. Mediante el análisis se interpretan las variables, los procesos y los resultados²².

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 (Urwin, 1981. Tomado de Bosque, 1992).²³

²¹Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

²²Cristancho, 2003. Ibidem.

²³Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009..

2.2.4. 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. Conceptos Básicos De Sistemas de Información Geográfica y Aplicaciones En Latinoamérica, 1995). Los modelos cartográficos son expresiones detalladas de la manipulación de los datos utilizando las funciones de software SIG, para la producción de nueva información que será almacenada en el computador, de manera permanente como nuevas entidades, o de manera virtual para análisis determinados IGAC. (Guía Metodológica para la Formulación del Plan de Ordenamiento Territorial Urbano. Aplicable a Ciudades, 1996).

- **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),
- 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.

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.

- **Modelo Vectorial.**

El modelo vectorial representa cada objeto geográfico de forma independiente (entidad) mediante gráficas de punto, línea, polígono, codificado explícitamente el límite que los separa del entorno (figura 2.14).

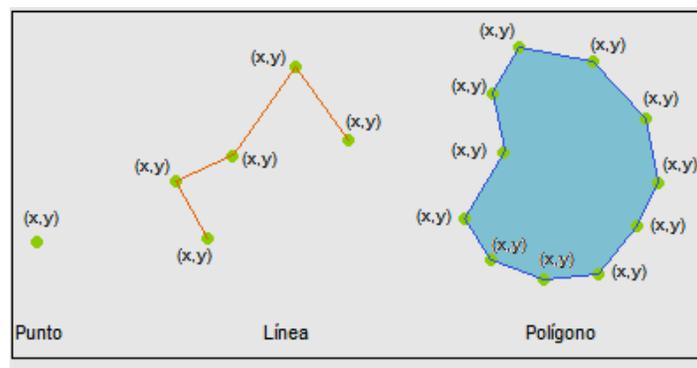


Figura 2.14: Modelo Vectorial

Los elemento puntuales se representan mediante un par de coordenadas x, y , que definen la posición geográfica del punto. Los elementos lineales están formados por uno o más segmentos lineales

que se unen en vértices representados mediante las coordenadas x, y . Los elementos superficiales se representan mediante las coordenadas x, y , de los vértices de las líneas que forman su perímetro.

El modelo vectorial es una estructura de datos utilizada para almacenar datos geográficos. La localización de los nodos y la estructura topológica se almacena de forma explícita. Las entidades quedan definidas por sus límites solamente y los segmentos curvos se representan como una serie de arcos conectados. Un SIG vectorial se define por la representación vectorial de sus datos geográficos. De acuerdo a las peculiaridades de este modelo de datos, los objetos geográficos se representan explícitamente y, junto a sus características espaciales, se asocian sus valores temáticos.

- **Modelo Raster.**

El modelo raster es un método para el almacenamiento, el procesado y la visualización de datos geográficos. Cada superficie a representar se divide en filas y columnas, formando una malla o rejilla regular. (Figura 2.15.)

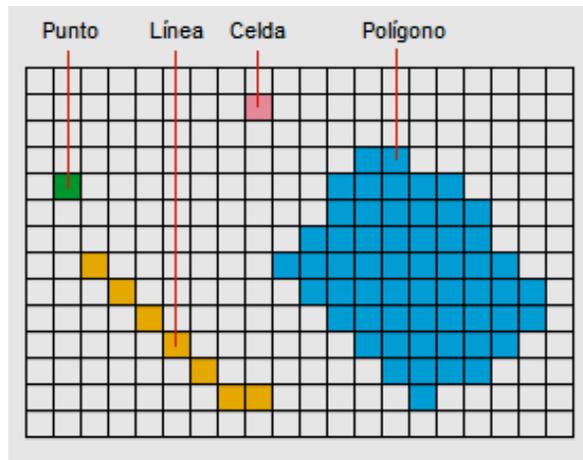


Figura 2.15. Modelo Raster

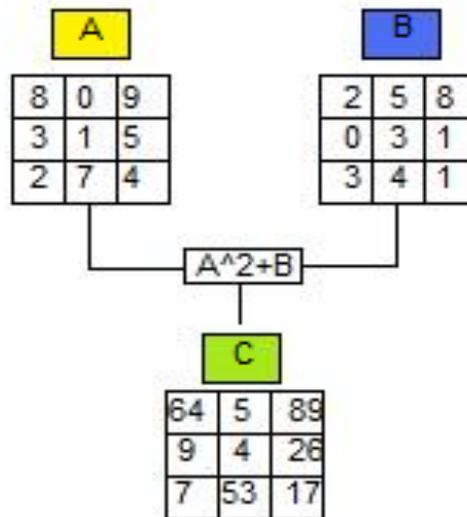
Cada celda ha de ser rectangular, aunque no necesariamente cuadrada. Cada celda de la rejilla guarda tanto las coordenadas de la localización como el valor temático. La localización de cada celda es implícita, dependiendo directamente del orden que ocupa en la rejilla, a diferencia de la estructura vectorial en la que se almacena de forma explícita la topología. Las áreas que contienen idéntico atributo temático son reconocidas como tal, aunque las estructuras raster no identifican los límites de esas áreas como polígonos en sí.

Los datos raster son una abstracción de la realidad, representan ésta como una rejilla de celdas, en la que la posición de cada elemento es implícita según el orden que ocupa en dicha rejilla. En el modelo raster el espacio no es continuo sino que se divide en unidades discretas.

Esto le hace especialmente indicado para ciertas operaciones espaciales como por ejemplo las superposiciones de mapas o el cálculo de superficies. Las estructuras raster pueden implicar en ocasiones un incremento del espacio, ya que almacenan cada celda de la matriz sin tener en cuenta si se trata de una entidad o simplemente de un espacio vacío.

- **Algebra de Mapas.**

Uno de los usos fundamentales de los Sistemas de Información Geográfica es la obtención de nuevas capas de información a partir de otras previamente disponibles. Para ello se dispone de un conjunto de herramientas de cálculo con matrices de datos que reciben el nombre genérico de álgebra de mapas. (Figura 2.16.)



Fuente: Avilés M, Hermosa L.
Figura 2.16: Algebra de Mapas

El álgebra de mapas incluye un amplio conjunto de operadores que se ejecutan sobre una o varias capas raster de entrada para producir una o varias capas raster de salida. Por operador se entiende un algoritmo que realiza una misma operación en todas las celdas de una capa raster. Estos operadores se definen mediante ecuaciones, por ejemplo el operador $C = A^2 + B$ genera una nueva capa (C) asignando a cada celda el valor de la celda correspondiente en la capa (A) multiplicado por su propio valor y sumado la capa B. Cada capa raster es una matriz de números y la operación se realiza para todos los números de la matriz, por tanto para todas las celdas de la capa raster. Sin embargo aunque ambas operan sobre matrices, el álgebra de mapas tiene poco más que ver con el concepto matemático de álgebra matricial²⁴.

2.2.5. 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

²⁴ Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

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 escenarios²⁵.

²⁵Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009

2.3. Lógica Fuzzy (Difusa).

Las metodologías para modelamiento de diferentes fenómenos o variables SIG más conocidas y usadas son de tipo determinístico. Una alternativa es utilizar elementos relacionados con la probabilidad, es decir que se produzca o no una determinada condición. Es por esta razón que se propone utilizar un método probabilístico para la determinación o modelamiento de diferentes elementos, usando los criterios de los operadores difusos o como se conoce en ingles Fuzzy (Hemetsberger et.al., 2002).

“...La Lógica Fuzzy o Difusa, es un método basado en la teoría de conjuntos que posibilita imitar el comportamiento de la lógica humana. Mediante ella, podemos definir qué elementos no están correctamente caracterizados como el uso del suelo, tipos de suelos, clasificación de la cobertura vegetal y tipos de vegetación. Básicamente la Lógica Fuzzy se usa para capturar la incertidumbre que muchos observadores sienten al definir una clasificación específica...” Benjamin Gossweiler H. MPr²⁶.

La lógica difusa fue investigada, por primera vez, a mediados de los años sesenta en la Universidad de Berkeley (California). La lógica difusa permite representar el conocimiento común, que es mayoritariamente del tipo lingüístico cualitativo y no necesariamente cuantitativo, en un lenguaje matemático a través de la teoría de

²⁶Oswaldo Padilla. Revista Geoespacial No.4

conjuntos difusos y funciones características asociadas a ellos. Permite trabajar a la vez con datos numéricos y términos lingüísticos, estos son inherentemente menos precisos que los datos numéricos pero en muchas ocasiones aportan una información más útil para el razonamiento humano.

El aspecto central de los sistemas basados en la teoría de la lógica difusa es que, a diferencia de los que se basan en la lógica clásica, tienen la capacidad de reproducir aceptablemente los modos usuales del razonamiento, considerando que la certeza de una proposición es una cuestión de grado. Más formalmente se puede decir que si la lógica es la ciencia de los principios formales y normativos del razonamiento, la lógica difusa o borrosa se refiere a los principios formales del razonamiento aproximado, considerando el razonamiento preciso (lógica clásica) como caso límite. Así pues, las características más atractivas de la lógica difusa son su flexibilidad, su tolerancia con la imprecisión, su capacidad para modelar problemas no-lineales, y su base en el lenguaje natural.

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 incompletos²⁷.

Si se acepta que las variables temáticas son continuas, el establecimiento de clases con límites absolutamente definidos, resulta problemático y parece más lógico pensar que la transición entre una clase y la siguiente debería ser gradual. Esta premisa permite denominar a cada una de estas clases, sin límites definidos, como conjunto difuso. Un conjunto difuso está caracterizado por una función de pertenencia a dicho conjunto, cuyo recorrido oscila entre cero y uno (desde la no pertenencia a la clase hasta la pertenencia absoluta).

En la lógica clásica una proposición sólo admite dos valores: verdadero o falso. Por ello se dice que la lógica usual es bivalente o binaria. Existen otras lógicas que admiten además un tercer valor posible (lógica trivaluada) e incluso múltiple valores de verdad (lógica multivaluada).

La lógica aristotélica sirve para explicar ciertos fenómenos y problemas, aunque la gran mayoría de ellos enmarcados en el mundo teórico de la matemática. Por el contrario, la lógica difusa puede usarse para explicar el mundo real, puesto que sigue el comportamiento humano de razonar, sacando conclusiones a partir de hechos observados. La lógica multivaluada incluye sistemas lógicos que admiten

²⁷López, Lógica difusa, 2001. Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

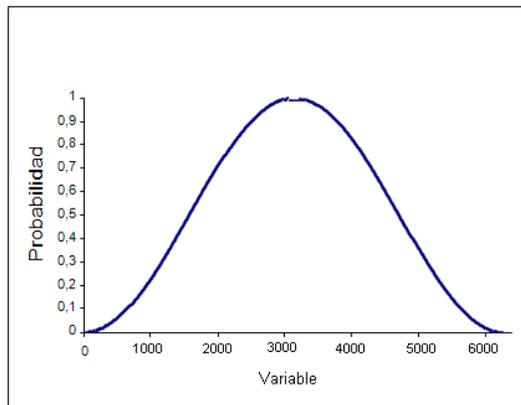
varios valores de verdad posibles. La lógica difusa permite representar de forma matemática conceptos o conjuntos imprecisos. Si P es una proposición, se le puede asociar un número $v(P)$ en el intervalo $[0,1]$ tal que:

Si $v(P) = 0$, entonces P es falso.

Si $v(P) = 1$, entonces P es verdadero.

La veracidad de P aumenta con $v(P)$ (Carranza, D. 2008)²⁸.

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 2.17).



Fuente: Revista Geoespacial No 4. Padilla Oswaldo.
Figura 2.17: Probabilidad tomando una variable

²⁸Carranza David, 2008.

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:

$$P = f(\text{sen } \alpha)$$

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.

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

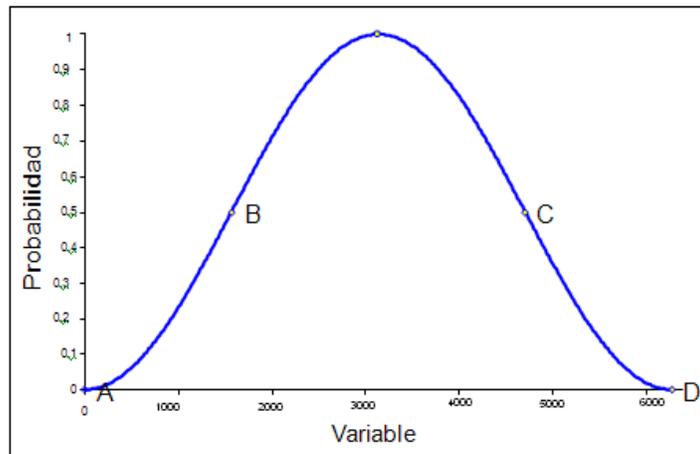
Puntos importantes en la función:

Estas funciones están controladas por cuatro puntos situados de la siguiente forma (Figura 2.19):

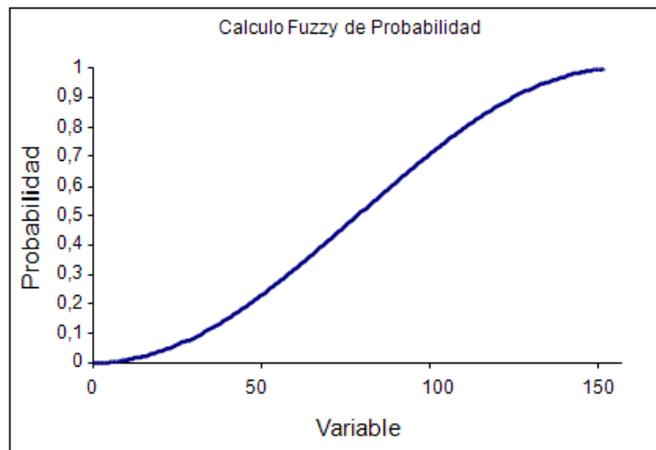
Punto A: Punto de valor mínimo en la variable a modelar

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.



Fuente: Revista Geoespacial No 4. Padilla Oswaldo
Figura 2.18: Puntos importantes del modelo.



Fuente: Revista Geoespacial No 4. Padilla Oswaldo.

Figura 2.19: Probabilidad Creciente

Puntos de inflexión de la curva: estos puntos pueden ser tomados como un caso particular para situar los puntos B y C de las variables (Figura 2.18). Se tienen tres casos de los que se va a tomar como ejemplo el de la curva simétrica (Figura 2.19).

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\alpha_1 = \pi / 4$$

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

Finalmente:

$$P1(A;0)$$

P2 (B; $\pi /4$)

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

P4 (D; π)

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

Fuente: Revista Geoespacial No. 4. Padilla Oswaldo.

Zonas bajo la curva

De la ecuación general de la recta se tiene:

$$y - y_1 = [(Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1)] * (x - x_1)$$

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

P1(A, 0)

P2 (B, $\pi/4$)

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

$$\alpha - 0 = \frac{\frac{\pi}{4} - 0}{B - A} (V - A)$$

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

Zona Ila (P2, P5)

P2 (B, $\pi/4$)

$$P5 \left(\frac{B+C}{2}, \frac{\pi}{2} \right) y - y_1 = \frac{(Y_2 - Y_1)}{(X_2 - X_1)} (x - x_1)$$

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

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

Zona IIb (P5, P3)

$$P5 \left(\frac{B+C}{2}, \frac{\pi}{2} \right)$$

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

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

$$\alpha - \frac{\pi}{2} = \frac{3\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2}}{C - \frac{B+C}{2}} \left(V - \frac{B+C}{2} \right)$$

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

Zona III (P3, P4)

P1(A, $3\pi/4$)

P2 (D, π)

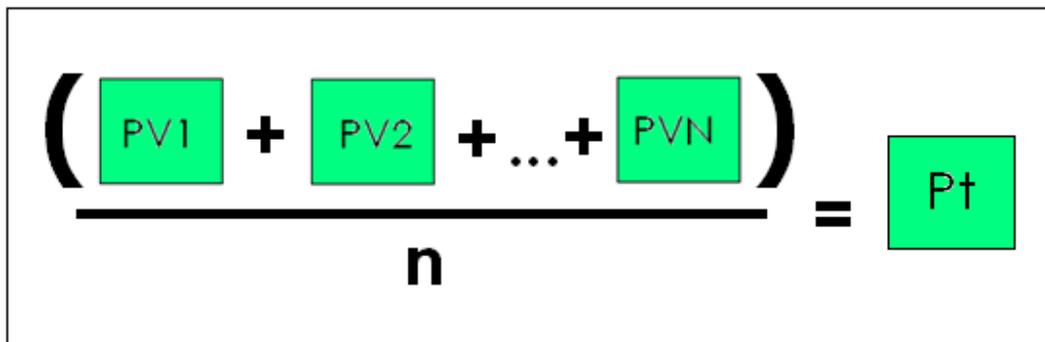
$$y - y_1 = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} (x - x_1)$$

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

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

Fuente: Revista Geoespacial No. 4. Padilla Oswaldo.

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 2.21).



Fuente: Revista Geoespacial No 4. Padilla Oswaldo.
Figura 2.20: Probabilidad total con más de dos variables

$$P_t = (PV_1 + PV_2 + PV_3 + \dots + PV_n) / n$$

Donde:

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

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

n: numero total de variables.²⁹

2.4. Sistemas

Un sistema es una fuente de datos del comportamiento de alguna parte del mundo real. Está formado por elementos que interactúan para lograr un objetivo, los cuales poseen características o atributos, parámetros y variables, que toman valores numéricos o lógicos. Un sistema puede ser natural o artificial, dinámico o estático, estable o inestable, adaptativo o no adaptativo, lineal o no lineal; puede tener variables independientes o dependientes, no controlables o controlables, continuas, discretas o mixtas, no observables u observables. Las reglas que especifican la interacción entre los elementos de un sistema, determinan la forma en que las

²⁹Padilla Oswaldo, Revista Geoespecial No. 4.

variables descriptivas cambian con el tiempo. Las variables que describen las entidades, los atributos y las actividades de un sistema en un instante particular de tiempo, que permiten predecir su comportamiento futuro, se denominan variables de estado y sus valores proporcionan el estado del sistema en ese instante, además relacionan el futuro del sistema con el pasado a través del presente. Si el comportamiento de los elementos del sistema puede predecirse con seguridad, el sistema es determinístico, de lo contrario es estocástico. Si la probabilidad de encontrarse en alguno de los estados no cambia con el tiempo el sistema es estático, de lo contrario es un sistema dinámico. Si el estado de un sistema cambia sólo en ciertos instantes de tiempo se trata de un suceso discreto, de lo contrario de un suceso continuo. Sea un sistema físico como por ejemplo la Tierra; o una estructura definida, como por ejemplo la corteza; o un estado de ella, por ejemplo la liberación de energía y reacomodamiento de esfuerzos producidos en un punto determinado. El interés puede ser la composición química en el interior de la Tierra; o un modelo de velocidades asociado a la corteza; o la identificación del punto en el interior de la Tierra a partir del cual se produjo la liberación de energía³⁰.

2.5. Teoría de programación.

Programar es el proceso de diseñar, codificar, depurar y mantener el código de fuente de programas computacionales. El código fuente es escrito en un lenguaje de programación. El propósito de la programación es crear programas que exhiban un

³⁰Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

comportamiento deseado. El proceso de escribir código requiere frecuentemente conocimientos en varias áreas distintas, además del dominio del lenguaje a utilizar, algoritmos especializados y lógica formal. Programar no involucra necesariamente otras tareas tales como el análisis y diseño de la aplicación (pero sí el diseño del código), aunque sí suelen estar fusionadas en el desarrollo de pequeñas aplicaciones.

2.5.1. MATLAB.

MATLAB es una abreviatura de Matrix Laboratory (laboratorio de matrices), es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) y cuenta con un lenguaje de programación propio (M).

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (block sets).

MATLAB es un programa de cálculo numérico orientado a matrices. Por tanto, será más eficiente si se diseñan los algoritmos en términos de matrices y vectores.

Cajas de herramientas y paquetes de bloques

Las funcionalidades de MatLab se agrupan en más de 35 cajas de herramientas y de bloques (para Simulink), clasificadas en las siguientes categorías³¹:

Tabla 2.3: Caja de Herramientas MATLAB

MATLAB (Cajas de herramientas)	Simulink
Matemáticas y Optimización	Modelado de punto fijo
Estadística y Análisis de datos	Modelado basado en eventos
Diseño de sistemas de control y análisis	Modelado físico
Procesado de señal y comunicaciones	Gráficos de simulación
Procesado de imagen	Diseño de sistemas de control y análisis
Pruebas y medidas	Procesado de señal y comunicaciones
Biología computacional	Generación de código
Modelado y análisis financiero	Prototipos de control rápido y SW/HW HIL
Desarrollo de aplicaciones	Tarjetas integradas
Informes y conexión a bases de datos	Verificación, validación y comprobación

2.5.2. Lenguaje de programación en MATLAB.

Los datos del proyecto son los archivos utilizados como datos de entrada en un modelo. Estos son los raster utilizados en la realización del proyecto, es decir las variables que intervienen en la metodología Fuzzy utilizada.

Las herramientas representan las operaciones de geoprocésamiento que serán ejecutadas sobre los datos del proyecto. Se pueden utilizar

³¹ Lista de productos MATLAB por categorías.

herramientas provistas por el sistema y otras creadas por el usuario. Los datos derivados son el resultado de la ejecución del modelo; estos datos pueden ser intermedios, que sirven como fuente para un siguiente proceso en el modelo o pueden constituir el resultado final.

CAPÍTULO 3.

METODOLOGÍA DE DESARROLLO

3.1. INTRODUCCIÓN.

Para representar un fenómeno en particular, como la susceptibilidad del terreno a deslizamientos y modelar las distintas variables espaciales que intervienen en dicho fenómeno, se debe tener en cuenta la ocurrencia del mismo en la zona de estudio, mediante distintas metodologías y técnicas, como lo es la metodología de Lógica Fuzzy aplicada en este proyecto.

Esta técnica se basa en 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.

3.2. Información y datos.

Para poder realizar la implementación del algoritmo de Lógica Fuzzy aplicado a la determinación del grado de susceptibilidad a deslizamientos en el área de estudio analizada, se requirió recopilar la información necesaria existente, generar y analizar el producto de esta, facilitando la organización y actualización de datos en esta zona.

3.2.1. Recopilación de información.

La información recopilada en diferentes instituciones fue:

- Fotografías aéreas a escala 1:5.000, correspondientes a la Ciudad de Quito.

FUENTE: Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento.

- 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.

- Imagen satelital landsat7 (ETM+), correspondiente a la zona de estudio.

FUENTE: Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento.

- Mapa de Cobertura Vegetal del Distrito Metropolitano de Quito.

FUENTE: Secretaría de Ambiente del 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.

3.2.2. Generación de Datos.

Con la información base adquirida, fue necesario organizarla para iniciar con la interpretación de fotografías aéreas, reconocer los deslizamientos en la zona de estudio y a través de esto obtener los puntos de muestra para el estudio posterior.

- **Interpretación de fotografías e imagen satelital.**

Al analizar las fotografías aéreas, las zonas susceptibles a deslizamientos, son extraídas mediante la descripción y observación de los elementos geográficos contenidos en las mismas. “Las claves de la interpretación se basan en principios de analogía: a una misma categoría de objetos (definida por sus propiedades) deberían corresponder imágenes fotográficas semejantes”³². Para lo cual se requirió de ciertos conocimientos acerca de procesos geomorfológicos, formaciones vegetales y uso del suelo del área de trabajo. Las zonas susceptibles a deslizamientos del terreno se definieron como los puntos de muestra para los posteriores análisis.

Fue completada esta información con observaciones de campo, donde se visualizo los movimientos en masa a lo largo de la zona de estudio, especialmente distribuidas en la Avenida Simón Bolívar, la ex vía Oriental, es decir la avenida Velasco Ibarra, la autopista General Rumiñahui y parte de las

³² Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

quebradas del río Machángara. Mediante la fotointerpretación, se pudo determinar la existencia de varios sectores donde existen deslizamientos tanto activos como paleo – deslizamientos y donde existirán áreas susceptibles a deslizamientos. En el área del domo del Panecillo existe gran parte de terreno susceptible a deslizamientos, considerados actualmente estables parte de ellos así como existen paleo - deslizamientos.



Fotografía 3.1: Fotografía de la Zona de Estudio.

Posteriormente a la determinación de áreas susceptibles a deslizamientos, se procedió a la realización del modelo digital del terreno (Figura 3.1) y basándose en una interpretación de las fotografías aéreas, se pudo observar distintos accidentes geográficos, todo esto con el fin de obtener una clasificación exhaustiva, de la situación geográfica de la zona anteriormente descrita. Destacándose las siguientes unidades:

- Escarpes
- Fallas geológicas Inversas y normales
- Cambios de Pendientes

- Conos de deyección
- Deposito de acumulación
- Deposito lagunar
- Desplazamientos Activos y paleo - deslizamientos
- Fluvio - lacustre
- Rellenos
- Terrazas Tectónica y terraza aluvial

Al partir de la fotointerpretación, se obtuvieron zonas visibles, susceptibles a deslizamientos y mediante estos se obtiene un segundo producto que son los puntos de muestreo (Figura 3.2), los cuales abarcan sitios propensos donde se pueden producir eventos de movimientos en masa.

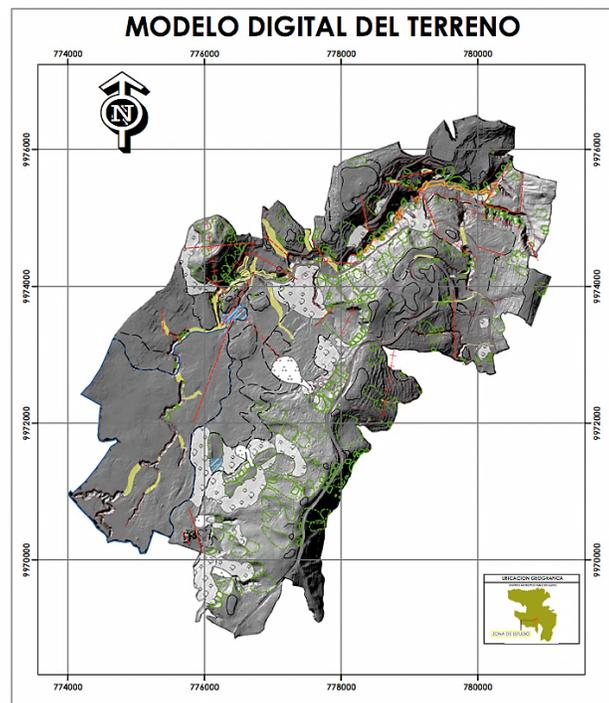


Figura 3.1: Modelo Digital del Terreno

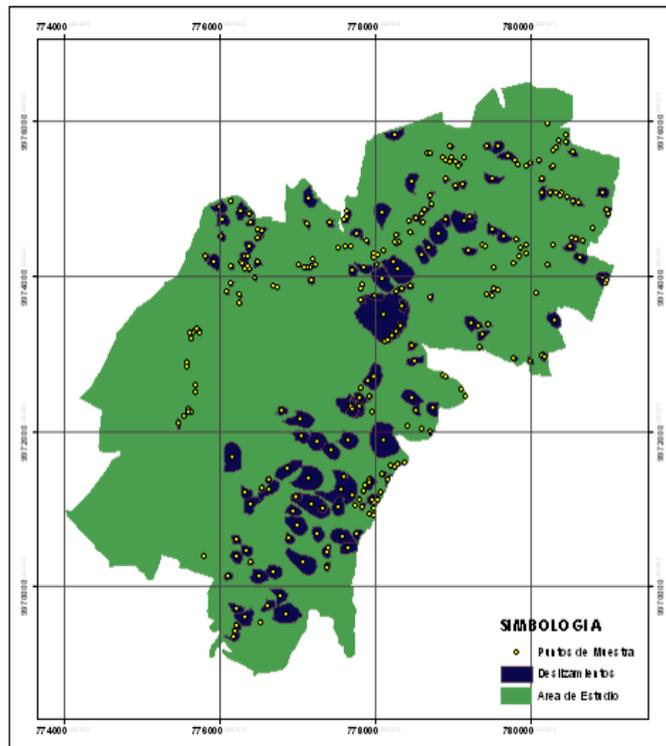


Figura 3.2: Puntos de muestreo sobre el área de estudio.

- **Conversión de formatos y sistemas de referencia**

La información recopilada en su totalidad se convirtieron al sistema de referencia WGS 84, ya que varias de estas se encontraban en diferentes formatos (shapefile, dwg, etc.); esto para trabajar de manera general. Así como los datos cartográficos y temáticos, fueron convertidos en shapefile, que consiste en un archivo principal, un archivo índice, y una base de datos. Esta base de datos contiene características propias del elemento.

- **Generación de base de datos alfanumérica.**

Una vez generado los archivos base, a partir de la información recopilada, se procedió a la actualización de su base de datos, obteniendo información temática de cada una de las variables a ser tomadas en cuenta.

3.2.3 Análisis de datos

El análisis y generación de datos se realizó de acuerdo a la actualidad y disponibilidad de datos así como la representación espacial del área de proyecto. Para este análisis se debió tomar en cuenta las diferentes variables que intervienen y su respectiva relación con la susceptibilidad del terreno a deslizamientos.

- **Análisis de variables y relaciones**

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 suelo³³), la estructura, el contenido en materia orgánica, la estabilidad de agregados o la capacidad de infiltración. De acuerdo a la Tabla 3.1. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Erosión (FAO), relaciona directamente la erosionabilidad del terreno con el sustrato litológico; y son estos índices los utilizados para la realización de este estudio, permitiendo conocer la tendencia del terreno o no, a un posible movimiento de su masa³⁴.

- **Pendiente**

Se analizo 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.

- **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

³³J. Cuevas, A. Osorio. SIAR. Limarí.

³⁴Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

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.

- **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 grandes 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 estable³⁵, pudiendo ser solamente un detonante en la inestabilidad del terreno.

³⁵Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

- **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.

- **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.

- **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. El movimiento causante por fuerzas tectónicas pueden tener diversas direcciones: vertical, horizontal o una combinación de ambas y producto de estas, se producen desplazamientos pequeños e imperceptibles. 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 alejadas³⁶.

Tabla 3.1: Índices Litológicos propuestos por la FAO

Fuente: Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico del MOP de Madrid-España, 1.986

UNIDAD	DESCRIPCIÓN	ÍNDICE DE RESISTENCIA DE LA ROCA
Lava indiferenciada y piroclastos. Lavas andesíticas, riocitas y tobas.	Roca volcánica reciente, algunas son parte de la Formación Pisayambo y otras del Antisana. Por el tipo de materiales que en mayor porcentaje están formadas (lava) estas unidades se las considera como rocas bien consolidadas.	0.8
Piroclastos y lavas	Piroclastos mezclados con roca volcánica reciente, tiene un índice de resistencia menor que el de la lava, ya que los piroclastos son roca blanda.	0.5
Terrazas	Los depósitos superficiales de hallan constituidos por cantos rodados, gujarros, arenas limos, arcillas, material detrítico acarreado por eventuales crecidas, torrentes, movimientos permanentes de agua o por hielo; esto da como resultado un material poco consolidado debido al mecanismo de transporte, arrastre y erosión.	0.4
Cono de deyección		0.3
Depósito coluvial Depósito fluvio glaciar		
Depósito aluvial	Depósitos superficiales de materiales como cantos rodados, quijarros, y arenas de diferente granulometría. Todo esto hace que presente una estructura poco consolidada y por lo tanto de baja resistencia.	0.1

³⁶ Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

- **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 variables³⁷.

- **Interpolación.**

La interpolación es una técnica de generalización y es definida como el método de predecir valores desconocidos de localizaciones vecinas³⁸. 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 zona³⁹.

³⁷ Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

³⁸ Vilar del Hoyo.

³⁹ *Ibidem*.

Tabla 3.2: Estaciones Meteorológicas cercanas a la Zona de Estudio.**Fuente:** INAMHI, Anuario meteorológico.

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

- **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.

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. Existen varios factores para determinar la resolución, la norma INEN determina que el error grafico debe ser de 0.5 milímetros. El IPGH (Instituto Panamericano de Geografía e Historia), determina el factor de 0.3 milímetros, que corresponde al grosor común de la mina de lápiz. En la actualidad por el uso de computadores se determina un factor de 0.1 milímetros⁴⁰. 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.

3.3 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 numéricos. El uso del concepto de variable en la teoría de Lógica Fuzzy conduce a tratar dominios que no están dentro

⁴⁰Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

del ámbito de la lógica clásica, como es el caso de la aplicación de esta teoría en la susceptibilidad del terreno a deslizamientos.

Como ya se ha dicho en el capítulo anterior 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.

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.

Tabla 3.3: Casos Lógica Fuzzy

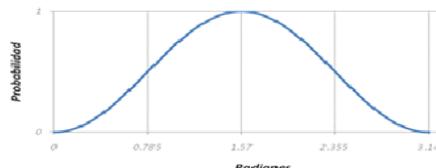
CASOS FUZZY	RANGO	FUNCION
<p>Primer Caso</p> 	<p>0° a 180° O en radianes 0 a π</p>	<p>Función Seno</p>

Figura 3.3: Rango de interés de la función Seno

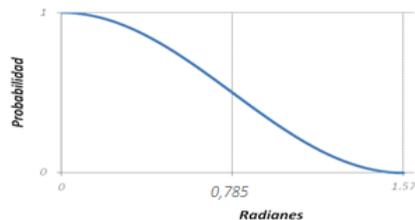
<p>Segundo Caso</p> 	<p>0° a 90° O en radianes 0 a $\frac{\pi}{2}$</p>	<p>Función Coseno</p>
--	--	---------------------------

Figura 3.4: Segundo caso del análisis Fuzzy

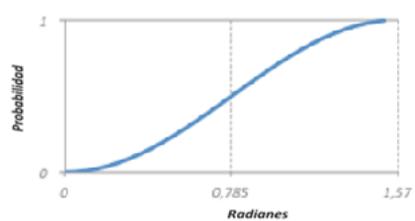
<p>Tercer Caso</p> 	<p>0° a 90° O en radianes 0 a $\frac{\pi}{2}$</p>	<p>Función Seno</p>
---	--	---------------------

Figura 3.5: Tercer caso del análisis Fuzzy

3.3.1 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.

- **Análisis de las variables.**

Pendientes (pend): en 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.

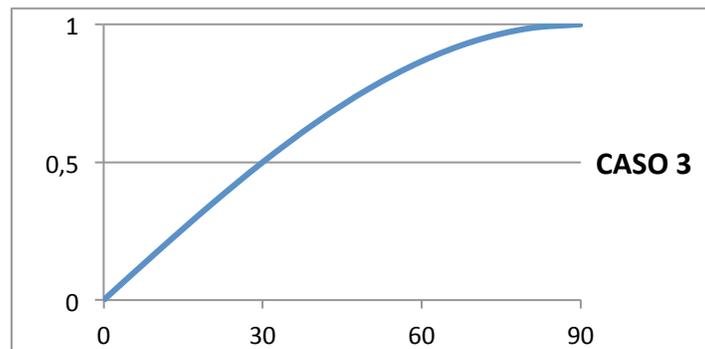


Figura 3.6: Caso 3. Lógica Fuzzy. Pendientes.

Precipitación (prec): en 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.

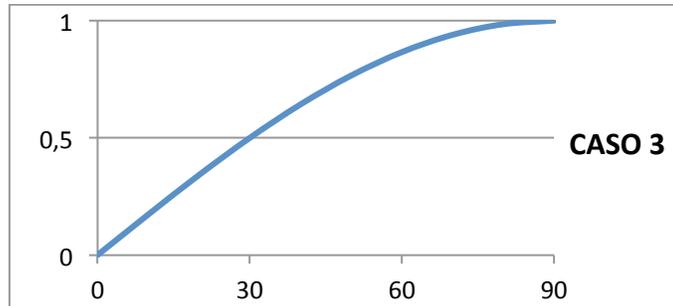


Figura 3.7: Caso 3. Lógica Fuzzy. Precipitación.

Distancia a Vías de Comunicación (dits_vias): 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.

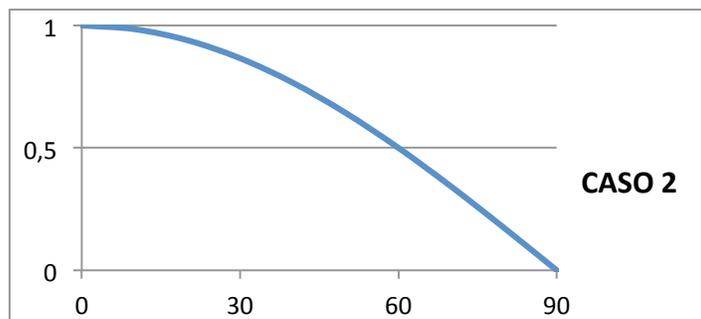


Figura 3.8: Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Vías de comunicación

Distancia a Fallas geológicas (dist_fallas): 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 tienes pocas probabilidades de que ocurran.

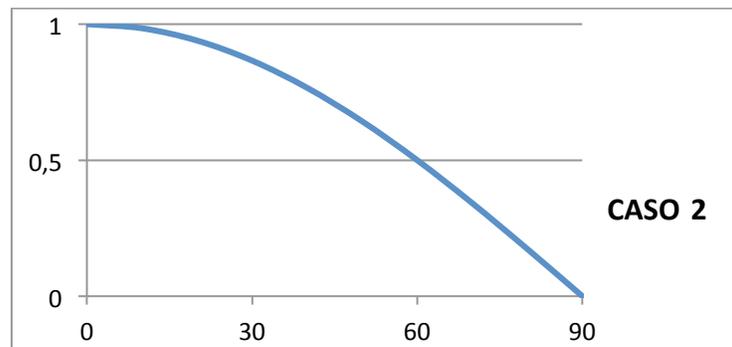


Figura 3.9: Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Fallas Geológicas

Distancia a Red Hídrica (dist_hidr): 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.

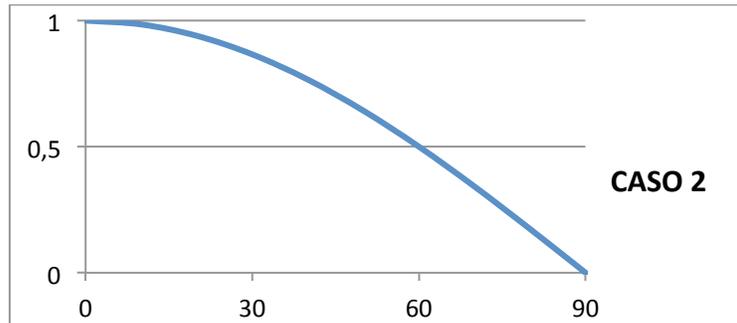


Figura 3.10: Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Red Hídrica.

Influencia de Cobertura Vegetal (vegetal): la presencia de cobertura vegetal indica que mientras mayor sea la cantidad de la misma en el terreno, existirá menos grado de ocurrencia de deslizamientos, así mismo la ausencia de esta, da lugar a la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en mayor grado.

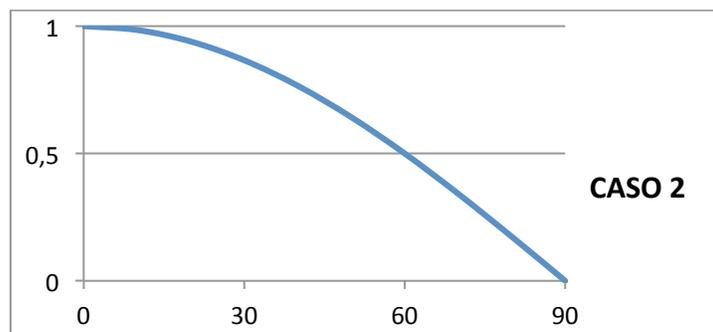


Figura 3.11: Caso 2. Lógica Fuzzy. Influencia Cobertura Vegetal.

Índice de Dureza de la Roca (dureza): 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 menos probabilidades de que existan deslizamientos.

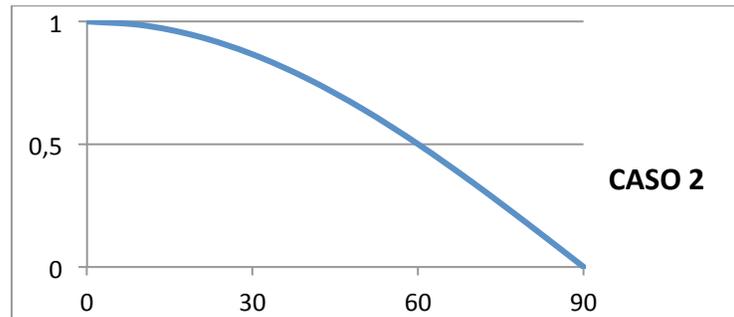


Figura 3.12: Caso 2. Lógica Fuzzy. Índice de Dureza de la Roca.

La tabla 3.4 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 3.4: Pertenencia de la variable a cada función de Lógica Fuzzy

VARIABLE	CASO	RANGO	FUNCION
Pend	Caso 3	$0 - \pi/2$	Seno
Precs	Caso 3	$0 - \pi/2$	Seno
Dits_vías	Caso 2	$0 - \pi/2$	Coseno
Dits_fallas	Caso 2	$0 - \pi/2$	Coseno
Dits_hidr	Caso 2	$0 - \pi/2$	Coseno
Vegetal	Caso 2	$0 - \pi/2$	Coseno
Dureza	Caso 2	$0 - \pi/2$	Coseno

3.4. Modelos cartográficos.

Mediante análisis Fuzzy, se realizó varios modelos de la susceptibilidad a deslizamientos de la zona de estudio, los cuales permitieron a continuación de un ajuste, conocer de mejor forma la realidad del fenómeno de deslizamientos en dicha zona.

El modelamiento cartográfico es un conjunto de operaciones de análisis y comandos interactivos utilizando mapas que actúan como una pila cuyo fin es procesar decisiones de tipo espacial⁴¹ (Figura 3.13 – Figura 3.17). La realidad está representada en mapas; el modelamiento está orientado a procesos y no a productos (ANEXO 4).

3.4.1. Obtención de los modelos cartográficos.

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: Valores máximo y mínimo de puntos de muestra que son los deslizamientos fotointerpretados.

⁴¹TOMLIN, 1990, citado por DEMERS, 1997. Avilés Marco, Hermosa Lizzette, 2009.

Modelo 3: Los valores máximo y mínimo de los puntos de muestra, además del valor más cercano y el más lejano.

Modelo 4: Percentil. Fuzzy al 90% y 10%.

Esto permite escoger que método y modelo se adapta más a la realidad del fenómeno.

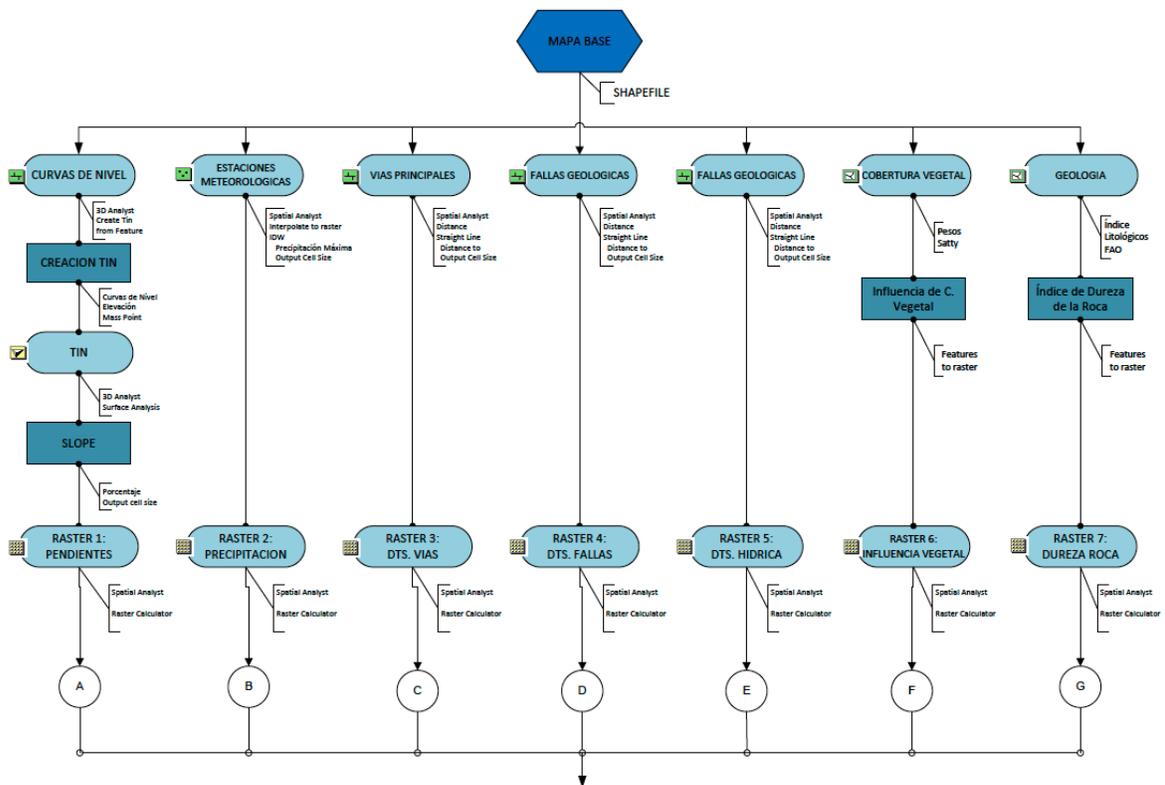


Figura 3.13: Modelo Cartográfico General

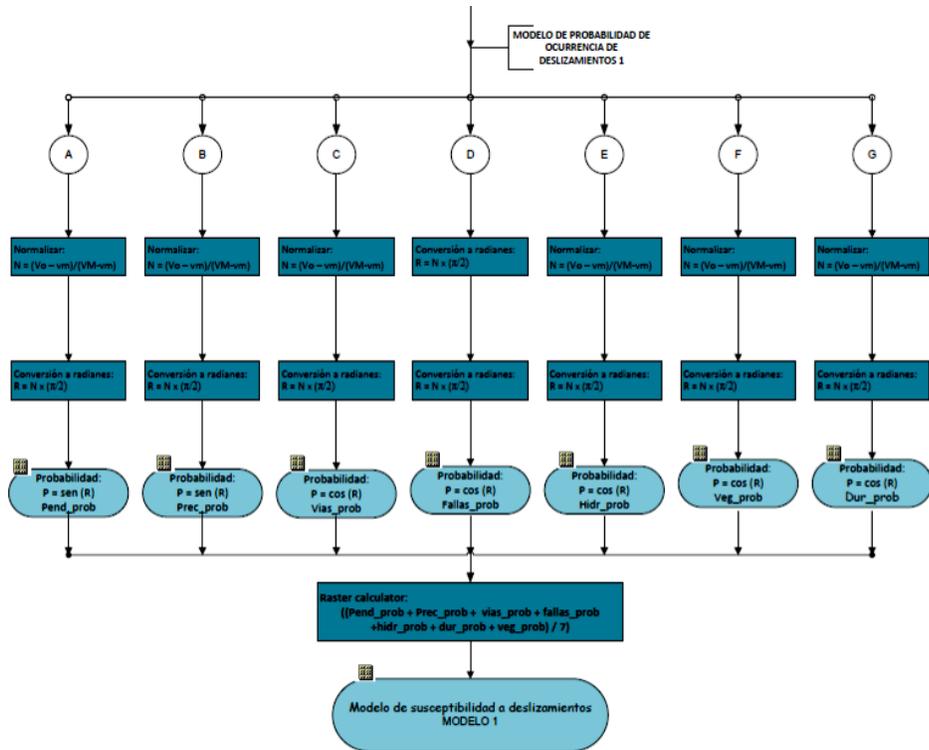


Figura 3.14: Modelo Cartográfico Modelo 1

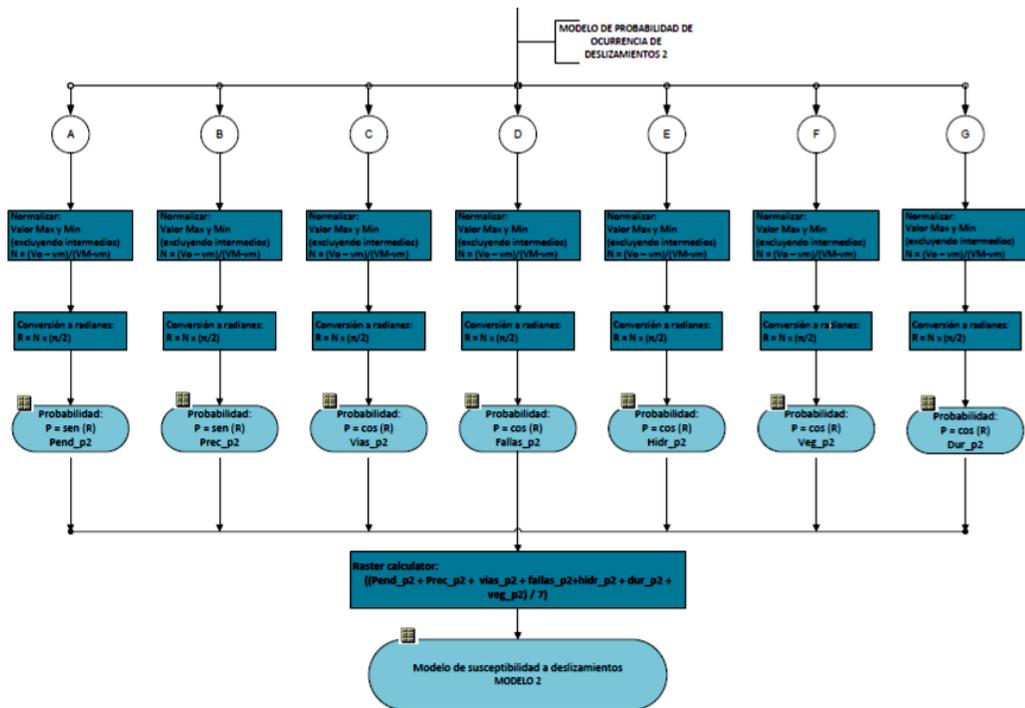


Figura 3.15: Modelo Cartográfico Modelo 2

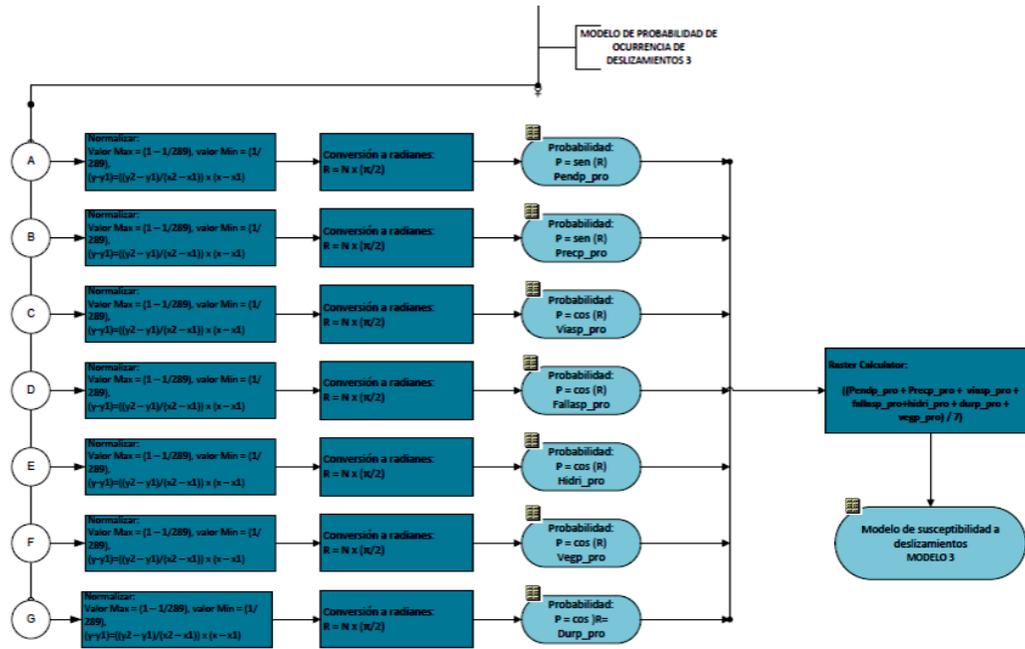


Figura 3.16: Modelo Cartográfico Modelo 3

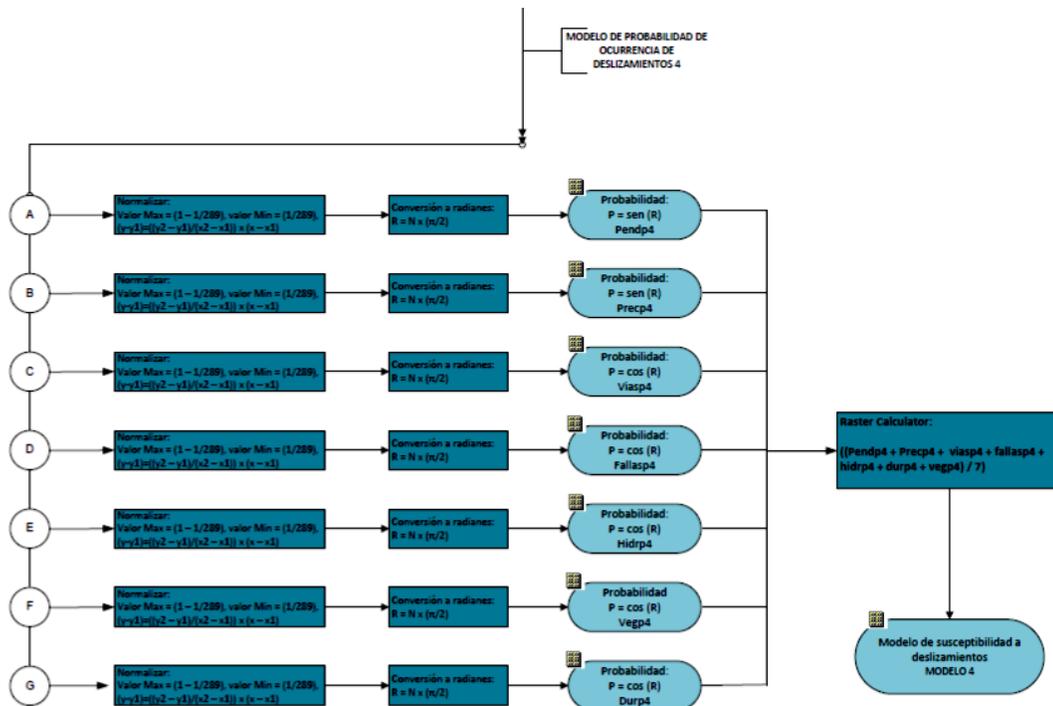


Figura 3.17: Modelo Cartográfico Modelo 4

- **Comportamiento de las variables que intervienen**

Para un mejor manejo de las variables, estas fueron codificadas de la siguiente manera:

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.

Tabla 3.5: Variables que intervienen en el estudio

VARIABLE	CODIGO
Pendiente	<i>Pend</i>
Precipitación	<i>Precs</i>
Distancia a fallas Geológicas	<i>dits_fallas</i>
Distancia a vías de comunicación	<i>dits_viasp</i>
Distancias a red hídrica	<i>dits_hidr</i>
Influencia de Cobertura vegetal	<i>Vegetal</i>
Índice de resistencia de la roca a la erosión	<i>Dureza</i>

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. 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, 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, análisis en campo como se menciona anteriormente y se demostró en la Figura 3.2 (página 73). Cada punto de muestra posee características referentes a cada variable utilizada en la determinación de susceptibilidad a deslizamientos en la zona de estudio.

3.4.2 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:

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

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:

$$P = \sin(R) \quad (1)$$

$$P = \cos(R) \quad (2)$$

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.

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

Donde:

Y = Promedio de probabilidades Modelo 1.

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

En el modelo 2 se utilizó los valores extremos de datos de los puntos de muestra, estos se obtienen a partir de un shapefile de deslizamientos fotointerpretados, excluyendo los valores intermedios. Con lo que se procede a la normalización, que es llevar los valores de la variable original entre 1 y 0,

la conversión a radianes y la obtención de probabilidades del modelo 2. Los procesos posteriores de la normalización, son similares a los del modelo 1.

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.

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

Donde:

Y = Promedio de probabilidades Modelo 2.

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

En el modelo 3 se utilizó al igual que el modelo 2 los valores máximo y mínimo, además de el valor más cercano y el más lejano. Que son:

$$\text{Valor más cercano} = \frac{1}{289} \quad \text{y} \quad \text{Valor más lejano} = \left(1 - \frac{1}{289}\right)$$

Estos valores son obtenidos del número total de deslizamientos foto interpretados, que son 289, los cuales son llevados a valores semejantes entre 0 y 1, o los valores más cercano o más lejano respectivamente. En este proceso se aplica la ecuación de la recta, que sirve para linealizar la

dispersión de los deslizamientos, y mediante lo cual obtenemos la normalización.

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

Analizando para cada variable:

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:

$$P_1 (V_m; \frac{1}{289})$$

$$P_2 (V_M; 1 - \frac{1}{289})$$

$$P_p = \left(\frac{288}{289}\right) - \left(\frac{287}{289 \times (V_M - V_m)}\right) \times (V_o - V_m) \quad (3)$$

Para el Tercer Caso:

$$P_1 (V_m; 1 - \frac{1}{289})$$

$$P_2 (V_M; \frac{1}{289})$$

$$P_p = \frac{1}{289} + \frac{287}{289 \times (V_M - V_m)} \times (V_o - V_m) \quad (4)$$

Donde:

P_p = pre probabilidad (que para el modelo 3 es la normalización)

V_o = Variable original

V_M = valor Máximo

Vm = Valor Mínimo

Las ecuaciones 3 y 4, son utilizadas para la normalización, es decir llevar las variables a valores entre 0 y 1. Los procesos siguientes son similares a los de los modelos anteriores, 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.

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

Donde:

Y = Promedio de probabilidades Modelo 3.

- **Modelo de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos 4**

En el modelo 4 se utilizó al igual que los dos modelos anteriores 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:

$$\text{Valor más cercano} = 0.1 \text{ y } \text{Valor más lejano} = 0.9$$

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.

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

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)

$$Pp = 0.1 + \left(\frac{0.8}{VM - Vm}\right) \times (Vo - Vm) \quad (3)$$

Y para el Tercer Caso:

P1 (Vm; 0.9)

P2 (VM; 0.1)

$$Pp = 0.9 - \left(\frac{0.8}{VM - Vm}\right) \times (Vo - Vm) \quad (4)$$

Donde:

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

Vo = Variable original

VM = valor Máximo

Vm = Valor Mínimo

Las ecuaciones 3 y 4, son utilizadas para la normalización, es decir llevar las variables a valores entre 0 y 1.

Los procesos siguientes son similares a los de los modelos anteriores, la conversión a radianes y la obtención de probabilidades.

Por último para la obtención del Modelo 4, se procede a extraer el promedio, que es la suma de todas las probabilidades de cada variable dividida para el número total de ellas.

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

Donde:

Y = Promedio de probabilidades Modelo 4.

3.4.3 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. Dicho de otra manera, la desviación estándar es simplemente el promedio o variación esperada con respecto a la

media aritmética⁴². El ajuste realizado en los procesos SIG, se basan en la siguiente fórmula:

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

O

$$N = 1 - Y$$

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. La información de la desviación estándar se encuentra en las propiedades del raster, en ArcGIS.

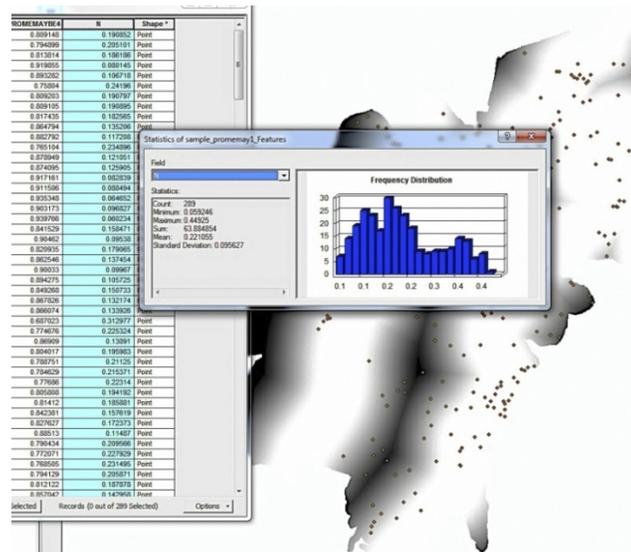


Figura 3.18: Media y Desviación estándar en ArcGIS.

⁴²Wikipedia.

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.

Se obtuvo las siguientes desviaciones estándar de los modelos aplicados:

Tabla 3.6: Desviaciones estándar de los modelos

MODELOS PREDICTIVOS				
	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3	MODELO 4
PROMEDIO	0.283363	0.287414	0.286305	0.221055
DESVIACION ESTANDAR	0.076784	0.086394	0.08549	0.095627

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

Tabla 3.7: Ajuste de los modelos

MODELOS PREDICTIVOS				
	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3	MODELO 4
AJUSTE	0.9232	0.91360	0.91451	0.90437

3.5. Implementación del algoritmo de Lógica Fuzzy.

Después de registrar los conceptos y la metodología de los análisis Fuzzy aplicados en la zona de estudio. Se procedió a la realización del programa en el cual la metodología demostró los modelos obtenidos. El proyecto está íntegramente realizado dentro del entorno de MATLAB, utilizando previamente las herramientas de trabajo de ArcMap para la preparación de los datos de entrada en el programa. Se aprovechó el potencial del mismo, para los cálculos, la presentación y generación de los resultados. Se puede dividir en tres bloques de trabajo para definir la presentación de la programación:

En primer lugar, se describe los datos de entrada, tales como las variables originales tipo raster.

En segundo lugar, el motor del proyecto está diseñado para realizar los cálculos, que son básicamente la aplicación de ecuaciones de lógica Fuzzy y presentar los resultados, donde se utilizó la totalidad del código de programación.

En tercer lugar se procede a la presentación de los resultados, tanto gráfica como numéricamente.

3.5.1. Transformación de formatos de los datos de entrada.

Para la realización del programa fue necesaria la respectiva conversión de las variables originales (formatos raster) a formato GeoTIFF, que es un estándar de metadatos de dominio público que permite que información

georeferenciada sea encajada en un archivo de imagen de formato TIFF. La información adicional incluye el tipo de proyección, sistema de coordenadas, elipsoide, datum y todo lo necesario para que la imagen pueda ser automáticamente posicionada en un sistema de referencia espacial. Se utiliza fundamentalmente para el manejo de ortofotos en SIG y otros programas con la posibilidad de manejar información espacial en imágenes raster.

3.5.2. Proceso de cálculo.

El motor del proyecto está constituido por la rutina creada para la obtención de los modelos de lógica Fuzzy.

La rutina está compuesta por los procesos secuenciales de los cálculos que son:

- La normalización
- Conversión a radianes
- Obtención de la probabilidad

De cada variable que interviene en la metodología Fuzzy. Y por último la obtención de los modelos de Lógica Fuzzy, mediante el promedio de todas las variables.

En si los procesos realizados son propiamente dicho el lenguaje de programación. Que se puede ver en el Anexo 8: lenguaje de programación.

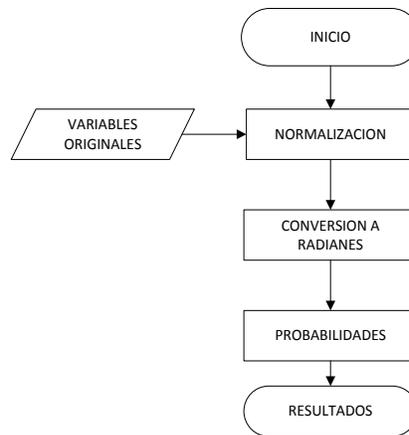


Figura 3.19: Proceso que forman la rutina del cálculo.

3.5.3. Interfaz de Usuario

Se utilizó el gran potencial que proporciona el paquete de aplicaciones de MATLAB, donde se desarrolló un entorno gráfico para la introducción de datos de entrada, cálculos según la metodología y basándose en los modelos cartográficos de los diferentes modelos desarrollados y presentación de los resultados de los mismos.

Para ello se utilizó la interfaz gráfica de usuario (Graphical User Interface) que permite a los usuarios realizar tareas de forma interactiva a través de controles, como botones y deslizadores. También se pueden crear interfaces gráficas de usuario personalizada para que otros puedan usar ya sea mediante la ejecución en MATLAB o como aplicaciones independientes.

Creación de una interfaz gráfica de usuario mediante programación MATLAB (versión 7.8.0 (R2009a)):

GUIDE (entorno gráfico de desarrollo) proporcionó herramientas para el diseño y la programación de las interfaces gráficas de usuario. GUÍA generó automáticamente el código de MATLAB donde se definió todas las propiedades de los componentes y se estableció un marco para las devoluciones de llamada interfaz gráfica de usuario (las rutinas que se ejecutan cuando un usuario interactúa con un componente de interfaz gráfica de usuario). Para obtener más control sobre el diseño y desarrollo del programa, también se creó un código donde se definió las propiedades y comportamientos de los componentes del mismo. MATLAB contiene una funcionalidad integrada lo cual ayudó para crear la interfaz gráfica de usuario mediante programación. Lo que incluye cuadros de diálogo, controles de interfaz de usuario como lo son los botones, contenedores y controles deslizantes.

CAPITULO 4.

RESULTADOS

4.1. Análisis de modelos obtenidos

En los análisis Fuzzy desarrollados se plantearon varias ecuaciones utilizando herramientas SIG lo que permitió conocer qué modelo se ajusta mejor a la realidad del terreno, considerando que, en todos los modelos generados, se evidenciaron pequeñas inconsistencias en ciertas partes del área de estudio debido a la distribución no homogénea de puntos de muestra. Los modelos obtenidos se muestran en Anexo 1, las Figuras A1.1, A1.2, A1.3, A1.4 respectivamente.

4.2 Descripción de los modelos

En los modelos se observa una escala de color determinada, ya que de esta forma se demostró con más claridad qué modelo concuerda con la realidad, es decir la semejanza que existe entre la metodología utilizada y la investigación en campo.

Cabe aclarar que en los modelos realizados con distintas ecuaciones pero muy semejantes entre ellos, las diferencias son muy escasas. Es decir que, se observó que las laderas del Panecillo, las vías principales que son Av. Simón Bolívar, Autopista General Rumiñahui, Av. Velasco Ibarra que parte de esta son las laderas orientales del parque Itchimbía y la zona de Monjas, están en tonalidades más oscuras, es decir las totalidades en color rojo más oscuro

manifiestan la más alta probabilidad de susceptibilidad del terreno a la ocurrencia de deslizamientos, las mismas que de acuerdo con los puntos de muestreo, concuerdan con la realidad del terreno verificada en campo. Las tonalidades en un rojo claro indican que la probabilidad de que ocurra un deslizamiento es módico y estas son en las zonas aledañas a las zonas donde existe máxima probabilidad de deslizamientos. Así como también las zonas de quebradas o rellenos que es por donde pasa el Río Machángara (Modelo Digital del Terreno Figura 3.1). Las zonas en tonos verdes nos indican la menor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, porque son zonas donde no existen los factores que intervienen en la producción de dicho fenómeno. La figura 4.1 explica las zonas específicas de la zona total de estudio, y en la cual se puede comparar la compatibilidad de las zonas propensas a deslizamientos mediante los diferentes modelos de Lógica Fuzzy.

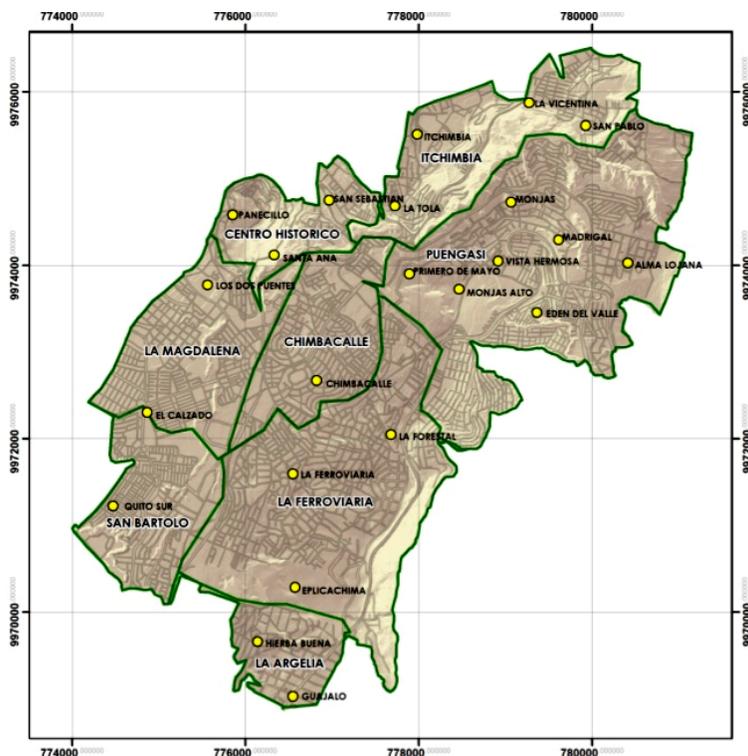


Figura 4.1: Parroquias dentro de la zona de estudio

4.2.1. Descripción del Modelo de Ocurrencia de deslizamientos 1.

Las zonas que se ven afectadas por deslizamientos en este modelo son las laderas del Panecillo e Itchimbía, San Ana, las Avenidas Velasco Ibarra, Autopista General Rumiñahui, y la Simón Bolívar, las zonas que circundan estas avenidas que son La tola, Monjas, San Pablo, Primero de Mayo, Alma Lojana, Edén del Valle. Al Sur por la avenida Simón Bolívar las zonas de la Forestal, parte sur de la Ferroviaria, Epicachima y Hierba Buena.; estas zonas están, en tonalidades rojas oscuras lo que es equivalente a zonas susceptibles a deslizamientos. Parte de las quebradas y rellenos del Río Machángara indican zonas de probabilidad media, es decir en tonalidades de un rojo claro. Las zonas verdes que son el Calzado, Chimbacalle, Guajalo al sur y la Vicentina Baja al norte, concuerda con la realidad ya que estas zonas son pobladas y relativamente planas. (Anexo1: A1.1)

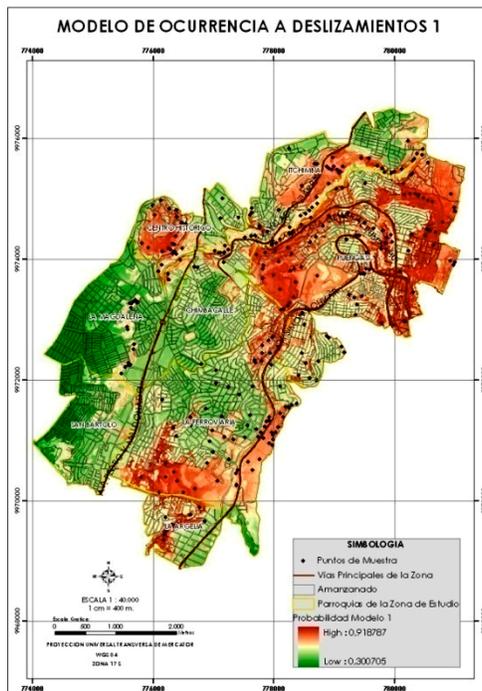


Figura 4.2: Modelo 1. Valores Originales.

4.2.2 Descripción del Modelo de Ocurrencia de deslizamientos 2.

En este modelo las laderas del Panecillo y del Itchimbía, Santa Ana, las zonas alrededor de la avenida Simón Bolívar de sur a norte de la zona de estudio (Alma Lojana, Edén del Valle, la Forestal), San Pablo, Monjas, Primero de Mayo, y al sur Hierba Buena, son zonas susceptibles a deslizamientos claramente detalladas en este modelo. Parte de la Ferroviaria, parte de las quebradas y rellenos del Río Machángara están en tonalidades rojas claras y oscuras lo que es equivalente a zonas susceptibles a deslizamientos. Las zonas del Calzado, Chimbacalle, Guajalo al sur y la Vicentina Baja al norte, se tornan entre una color amarillo muy claro y verde que son zonas relativamente planas con una pequeña probabilidad de ocurrencia de deslizamientos mas en las zonas amarillas claras. (Anexo1: A1.2)

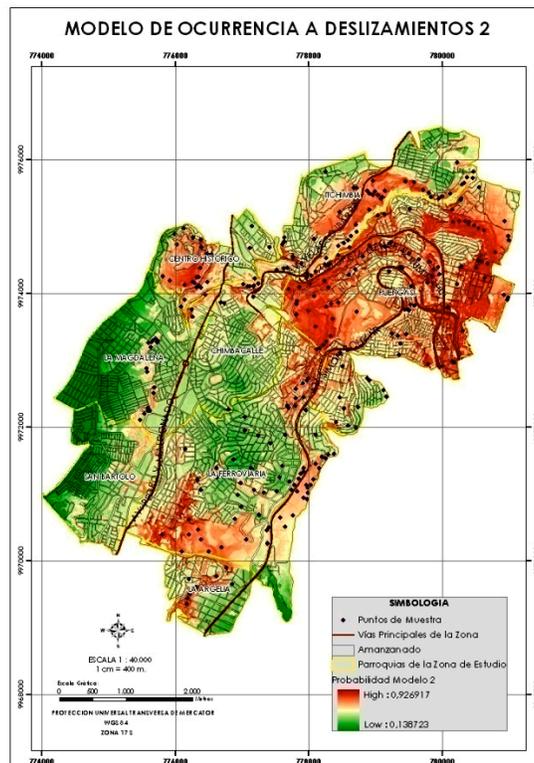


Figura 4.3: Modelo 2. Valores Máximo y Mínimo de puntos de muestra.

4.2.3 Descripción del Modelo de Ocurrencia de deslizamientos 3.

En este modelo las zonas que se ven de color rojo oscuro son las zonas susceptibles a deslizamientos, que básicamente son las mismas zonas que el modelo anterior, el Panecillo, las zonas alrededor de las Avenidas principales de la zona de estudio, y aumenta la totalidad rojo oscuro en las quebradas y rellenos del río Machángara, así como también aumenta la tonalidad amarillo claro en toda la zona de estudio. Las zonas verdes que son el Calzado, Chimbacalle, Guajalo al sur y la Vicentina Baja al norte, parte de la Ferroviaria al centro de la zona de estudio, concuerda con la realidad ya que estas zonas son pobladas y relativamente planas. (Anexo1: A1.3).

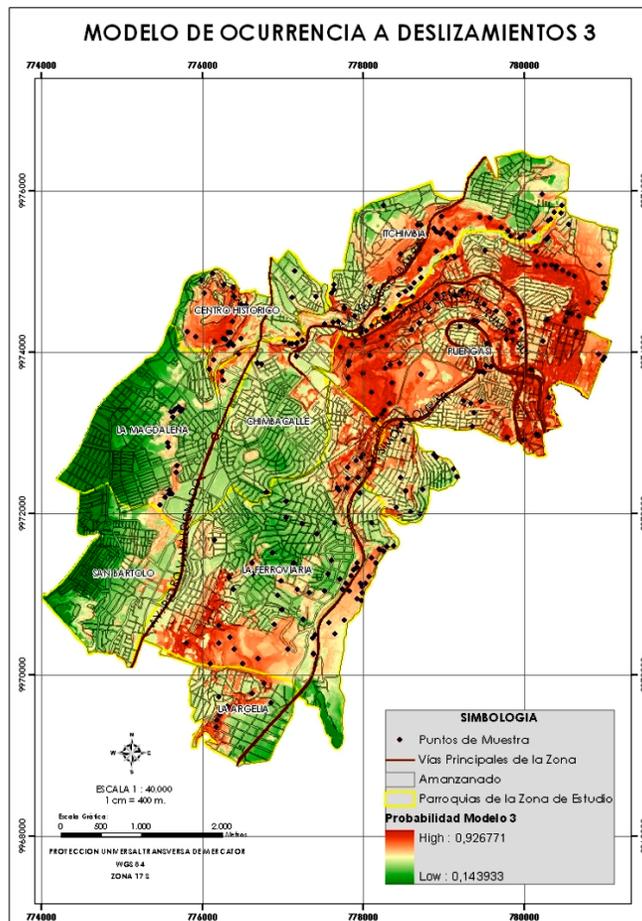


Figura 4.4: Modelo 3. Valores cercano y lejano.

4.2.4 Descripción del Modelo de Ocurrencia de deslizamientos 4.

Las zonas del Panecillo, Santa Ana, las laderas del Itchimbía que colindan con la Av. Velasco Ibarra como también es el límite de las zonas de Monjas, La tola y Primero de Mayo, al Este las zonas San Pablo, Edén del Valle, Alma Lojana, que colindan con la Av. Simón Bolívar al norte de la zona de estudio , además de las quebradas y rellenos del río Machángara, al occidente; son zonas en rojo oscuro lo cual quiere decir que son zonas susceptibles a deslizamientos. Se observa en este modelo el aumento de zonas en tonos rojos claros y amarillos claros alrededor de las zonas en tonos rojos oscuros. Además de un particular exceso de tonos verdes en la zona sur de la Av. Simón Bolívar lo que significa que el modelo elimina los puntos de deslizamientos con valores pequeños o mínimos. (Anexo1: A1.4).

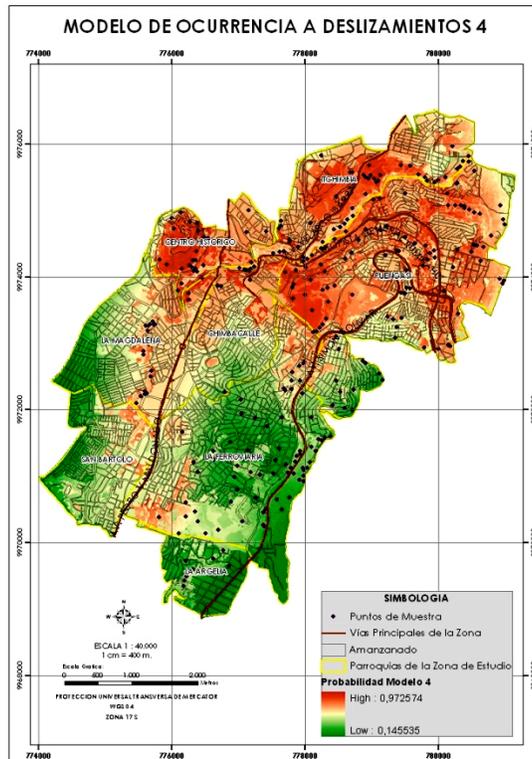


Figura 4.5: Modelo 4. Diez Percentil.

4.2.5 Comparación entre modelos

Según el valor del ajuste correspondiente a cada modelo (Tabla 3.7), indica que de acuerdo a los cambios de distancia que sufren las variables en relación a los deslizamientos fotointerpretados, que en sí, demuestran la realidad del terreno; se puede decir que el modelo que mejor se ajusta a esta es el cual en el que su valor de ajuste sea menor. Por lo que se encontraron semejanzas y diferencias entre los modelos realizados.

Tabla 4.1: Semejanzas y diferencias entre modelos

	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3	MODELO 4
SEMEJANZAS	<ul style="list-style-type: none"> • Gráficamente: Zonas aledañas a las vías principales, zonas de quebradas y rellenos del Río Machángara son susceptibles a deslizamientos. • Según la paleta de color utilizada: Las zonas susceptibles a deslizamientos son las que se encuentran en tonos rojos oscuros, y que son las mismas zonas en todos los modelos. Las zonas en tonos verdes son superficies relativamente planas o en función de acciones antrópicas. • En relación a deslizamientos fotointerpretados: Todos los modelos cubren en su mayoría los puntos de muestra que son los deslizamientos fotointerpretados. • Por los valores utilizados en los cálculos de funciones de lógica Fuzzy que son relativamente iguales. 			
DIFERENCIAS	<p>Por su valor del ajuste realizado:</p> <p>La desviación estándar del modelo 1 es: 0.076784 lo que indica que la incompatibilidad entre la realidad del terreno y el modelo es relativamente máxima ya que al restarle de 1 este valor es 0.923216.</p> <p>La del segundo modelo es: 0.086394 y la del tercer modelo es: 0.08549 es decir que varían en la milésima parte de sus decimales y estos restados de 1 son valores semejantes a 0.91.</p> <p>La del cuarto modelo es: 0.095627 lo que indica que la incompatibilidad entre la realidad del terreno y el modelo es mínima este valor restado de 1 es 0.904373.</p>			

4.3. Implementación del algoritmo en MATLAB.

La finalidad del proyecto es obtener los modelos resultantes mediante la aplicación de lógica Fuzzy y presentarlos de una forma sencilla, visual y en formatos informáticos compatibles con el software del mercado. Los resultados son archivos raster que contienen la información de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en la zona de estudio en este caso.

Se presenta como resultado los cuatro raster que pertenecen a los cuatro modelos aplicados en la metodología Fuzzy. En los cuales se pueden diferenciar las tonalidades aunque se utilicen la misma paleta de colores. Esto es por los valores y ecuaciones relativamente iguales, utilizados en cada modelo.

4.3.1 Presentación del Programa

El programa presenta en su pantalla principal la zona donde se plotea en primer lugar las variables que se va seleccionando, las cuales ingresan al programa como archivo GeoTIFF, y por último los modelos después de los procesos de cálculo (Figura 4.6).

CAPITULO IV: RESULTADOS

Existe un panel donde se imprimen los valores de los rangos que se va a utilizar en los cálculos de cada modelo. Así como también un menú desplegable donde se selecciona el modelo en el cual se quiere trabajar.

Además del botón de ayuda donde se describe el manual de usuario que explica claramente cómo funciona en si la totalidad del programa. Un botón de información que son los autores de este proyecto y el botón de salida del programa (Figura 4.7).



Figura 4.6: Pantalla Principal

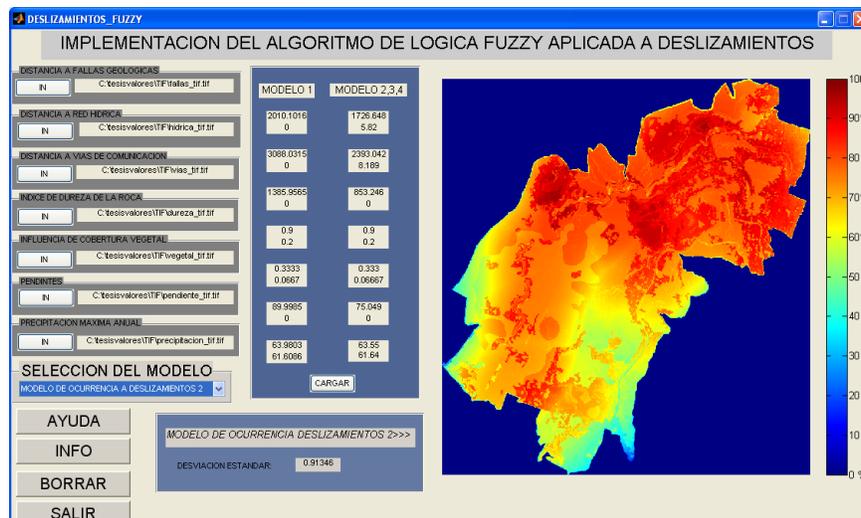


Figura 4.7: Funcionalidad Total

4.4 Conclusiones y Recomendaciones

Tabla 4.2: Conclusiones y recomendaciones.

CONCLUSIONES	RECOMENDACIONES
<p>Las zonas de alta susceptibilidad a deslizamientos se distribuyen a lo largo de las vías principales, como por ejemplo las Avenidas Simón Bolívar, Velasco Ibarra y la autopista General Rumiñahui en el tramo Trébol – peaje; por lo tanto la construcción de vías de comunicación, sin un estudio geológico geomorfológico previo, es un factor adicional para la ocurrencia de inestabilidades del terreno.</p>	<p>Se recomienda estabilizar taludes principalmente en las zonas aledañas a las vías de comunicación, que, como ya se ha dicho, son las zonas más propensas a producirse estos fenómenos</p>
<p>Las verificaciones de campo permiten calibrar los modelos Fuzzy, en consecuencia validar sus resultados.</p>	<p>Se debería estudiar las variables en relación a la zona de estudio para proveer de pesos a cada una de ellas en función de su mayor o menor influencia dentro de la zona de estudio.</p>
<p>La utilización de la metodología Fuzzy simplifica la elaboración de cartografía temática, debido a que no es necesario categorizar las variables que intervienen en los modelos generados.</p>	<p>Se debería utilizar esta metodología para el levantamiento de cartografía temática, en especial mapas de vulnerabilidad y de riesgos.</p>
<p>Las acciones antropicas inadecuadas (mal uso del suelo) constituyen uno de los factores más importantes para la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa.</p>	<p>El presente estudio debe ser tomado en cuenta para el ordenamiento territorial, planificación estratégica, nuevas construcciones y en proyectos de prevención en Quito.</p>
<p>El modelo de probabilidades de ocurrencia de deslizamientos diez percentil, es un posible mapa de vulnerabilidad física de la zona estudiada. Ya que la zona en tonos rojos mostraría la mayor vulnerabilidad y los tonos verdes la menor o tal vez la inexistencia de vulnerabilidad en la zona (Anexo1: A1.4).</p>	<p>Se debería realizar un estudio del percentil utilizado y otros que se podrían utilizar en futuras aplicaciones Fuzzy, que por ende darían una aplicación para llegar a detectar la vulnerabilidad en relación a la zona a estudiar.</p>

CAPITULO IV: RESULTADOS

<p>Existen varias propuestas de estudios de deslizamientos en la ciudad de Quito en general, la metodología Fuzzy es una alternativa eficiente en el modelamiento de deslizamientos en la zona. Mostrando resultados confiables matemáticamente en relación a la verificación en campo.</p>	<p>Se debería tener en cuenta la implementación del algoritmo de Lógica Fuzzy para la realización de futuros proyectos relacionados a la determinación del grado de susceptibilidad a deslizamientos en diferentes zonas del Ecuador.</p>
<p>El programa realizado es de mucha ayuda en proyectos de riesgo en relación a terrenos susceptibles a deslizamientos, aplicándose no solo en la ciudad de Quito propiamente dicho, sino en cualquier zona de nuestro país.</p>	<p>La zona de estudio abarca la parte Centro – Sur de la ciudad de Quito, es decir ya que por razones prácticas, se hizo la delimitación de la zona. Es necesario aplicarse la misma metodología en la parte Centro – Norte de la ciudad.</p>

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- **AVILES MARCO, HERMOSA LIZZETTE**, “Análisis y modelamiento de susceptibilidad a deslizamientos mediante SIG y geoestadísticas en las parroquias de Papallacta y Cuyuja, Cantón Quijos”. Tesis de Grado, ESPE, 2009.
- **CAMPOS CECIBEL, REYES XIMENA, RODRÍGUEZ XIMENA**, “Desarrollo de una aplicación SIG orientada a la administración de riesgos volcánico y sísmico en el tramo de la carretera Papallacta- Lago Agrio, y por movimientos en masa en el tramo Papallacta – Baeza.” Tesis de Grado, ESPE, 2003
- **CARRANZA DAVID**, “Aplicación de la lógica difusa para la ubicación de especies faunísticas y florísticas, y su comparación con otros métodos geoestadísticos”, Tesis de Grado, ESPE, 2008.
- **CEES VAN WESTEN**, “Introducción a los deslizamientos: Uso de los SIG en el mapeo de deslizamientos”, 2001.
- **CERECEDA, IRMA CRISTINA**, “Uso de los SIG en el análisis de susceptibilidad y predicción de deslizamientos”, 2005.
- **FUNDACIÓN WICKIPEDIA. INC.** “Licencia Creative Commons Atribución Compartir Igual 3.0”
- **GÓMEZ, J. GALINDO**, “Conjuntos y Sistemas Difusos”, 1997.
- **J. CUAVAS, A. OSORIO**, Sistema interactivo de apoyo al Riesgo, guías y manuales de Terreno. Determinación de la textura del suelo en el terreno. SIAR. Limarí.
- **MATHWOKS_ MATLAB**, “The lenguaje of Technical Computing”
- **OBERMEYER Y PINTO**, “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”, 1994.
- **ORELLANA HERNAN, ZEA JOSE**, “Peligrosidad de terrenos inestables en Quito, detección y mitigación. Sub – proyecto No. 5. CODIGEM.”, 1993
- **PADILLA OSWALDO**, “Fundamento teórico para la modelización de variables ambientales mediante operadores difusos”. Revista Geoespacial No.4.
- **PEREZ, MARCO ANTONIO**, “Sistemas de lógica Difusa”, 2003.
- **QUINTANILLA, IRMA CRISTINA**, “Uso de los SIG en el análisis de susceptibilidad y predicción de Deslizamientos”, 2004.
- **QUINTAS, NURIA**, “Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica”, 2003.
- **REYNA, ANGÉLICA**, “El uso de los sistemas de información geográfica (SIG) en el análisis demográfico de situaciones de desastre”, 2006.

ANEXOS

Anexo 1 (A1): Modelos de probabilidad de Ocurrencia de deslizamientos.

Anexo 2 (A2): Hojas de datos.

Anexo 3 (A3): Datos con los que se trabajo los modelos de Lógica Fuzzy.

Anexo 4 (A4): Modelos cartográficos de los modelos en base a Lógica Fuzzy.

Anexo 5 (A5): Modelo digital del terreno y fotointerpretación.

Anexo 6 (A6): Mapas de la obtención de cada variable o mapas temáticos.

Anexo 7 (A7): Lenguaje de programación.

Anexo 8 (A8): Manual de usuario.

Anexo 9 (A9): Memorias Técnicas de cada Mapa Temático.

