

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Posgrados

**Metodología y modelo para movimientos en masa (Deslizamientos,
Derrumbes, Caída, Flujo y Reptación) utilizando técnicas de SIG y
Teledetección**

Sandra Mireya Buitrón Vinueza

Richard Resl, Ph.Dc., Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito

Para la obtención del título de Magister en Sistemas de Información Geográfica

Quito, agosto de 2014

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Posgrados

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Metodología y modelo para movimientos en masa (Deslizamientos,
Derrumbes, Caída, Flujo y Reptación) utilizando técnicas de SIG y
Teledetección**

Sandra Mireya Buitrón Vinueza

Richard Resl, Ph.Dc.
Director de Tesis

Pablo Cabrera, MSc.
Miembro del Comité de Tesis

Richard Resl, Ph.Dc.
**Director de la Maestría en Sistemas
De la Información Geográfica**

Stella de la Torre, Ph.D.
**Decana del Colegio de Ciencias
Biológicas y Ambientales**

Víctor Viteri Breedy, Ph.D.
Decano del Colegio de Posgrados

Quito, agosto de 2014

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Sandra Mireya Buitrón Vinuesa

C. I.: 1716311210

Quito, agosto de 2014

RESUMEN

En la reducción de los desastres provocados por los movimientos en masa un paso primordial es la elaboración de mapas de amenaza, no obstante la mayoría de las metodologías eficaces resultan muy costosas y requieren de un fuerte entrenamiento técnico para su implementación. A manera de investigación se aplica la metodología conocida internacionalmente como Mora-Vahrson con las modificaciones propuestas, en la cual se consideró para la aplicación de la metodología modificada como zona de estudio, el Cantón Cayambe; en el cual se obtuvo resultados que corroboran que el territorio Ecuatoriano es muy propenso a los movimientos en masa los cuales ocasionan gran daño a la población y a los recursos naturales.

La metodología utilizada consistió en la redefinición de la ponderación de parámetros condicionantes y desencadenantes para los movimientos en masa, debido a las variaciones existentes en relación al lugar donde se generó dicha metodología; es así que se considera como base los factores predominantes como: relieve relativo, litología, humedad del suelo, sismicidad e intensidad de lluvias, lo cual permitió representar mediante el mapa de zonificación la inestabilidad de los terrenos y prediciendo de esta manera la amenaza causada en la zona de estudio.

ABSTRACT

In the reduction of disasters caused by landslide a key step is the preparation of hazard maps, however, most effective methodologies are very expensive and require a strong technical training for implementation. As a research methodology known internationally as Mora-Vahrson with the proposed amendments, which it was considered for the application of the methodology amended as study area, the Canton Cayambe applies; in which results corroborate that the Ecuadorian territory is very prone to landslides which cause great harm to the population and natural resources were obtained.

The methodology consisted in redefining the balance of constraints and triggers for landslides parameters due to the variations in relation to the place where the methodology was generated; Thus is kept fixed as the predominant factors: relief relative, lithology, soil moisture, and rainfall intensity seismicity, which represent allowed by the zoning map the instability of the land and thereby predicting the threat caused in the study area.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 5 |
| ABSTRACT | 6 |
| CAPITULO 1 | 10 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 10 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 11 |
| 3. JUSTIFICACIÓN..... | 13 |
| 4. OBJETIVOS | 13 |
| a. Objetivo General | 13 |
| b. Objetivos Específicos..... | 14 |
| 5. MARCO TEÓRICO..... | 14 |
| 6. COMPONENTES | 16 |
| a. Amenaza..... | 16 |
| b. Vulnerabilidad..... | 17 |
| c. Riesgo..... | 17 |
| d. Desastre | 18 |
| e. Catástrofe | 18 |
| 7. CARACTERÍSTICAS | 19 |
| a. Litología del suelo..... | 19 |
| b. Pluviometría de la zona..... | 20 |
| c. Sismicidad | 20 |
| d. Régimen hídrico fluvial..... | 21 |
| e. Pendiente | 21 |
| f. Eventos excepcionales ENOS y el Cambio Climático actual | 21 |
| g. Erosión | 22 |
| CAPITULO 2 | 22 |
| 8. METODOLOGÍA | 22 |
| a. Información preliminar o secundaria | 22 |
| b. Determinación de la susceptibilidad según Mora-Vahrson..... | 23 |
| c. Metodología y Modelo Planteado | 24 |
| d. Factor Morfométrico (<i>Sm</i>)..... | 27 |

| | | |
|------------------|--|----|
| e. | Factor Litológico (Sl)..... | 29 |
| f. | Factor de cobertura vegetal (Sc) | 32 |
| g. | Factor de disparo por sismos (Ts)..... | 35 |
| h. | Factor de disparo por precipitaciones (Tp)..... | 36 |
| i. | Grado de amenaza de las unidades geomorfológicas | 38 |
| CAPITULO 3 | | 39 |
| 9. | DESARROLLO | 39 |
| a. | Información Base | 39 |
| b. | Determinación del grado de amenaza para movimientos en masa..... | 39 |
| c. | Ponderación del factor morfométrico para movimientos en masa | 39 |
| d. | La longitud de vertiente se los considera de la siguiente manera:..... | 40 |
| e. | Ponderación del factor litológico para movimientos en masa..... | 41 |
| f. | Ponderación del factor cobertura vegetal para movimientos en masa..... | 41 |
| g. | Grado de susceptibilidad para movimientos en masa..... | 43 |
| h. | Factores detonantes | 43 |
| i. | Valor de la amenaza para el fenómeno de movimientos en masa | 45 |
| CAPITULO 4 | | 45 |
| 10. | RESULTADOS..... | 45 |
| a. | Cartografía Base..... | 45 |
| b. | Geomorfología | 47 |
| c. | Pendientes..... | 50 |
| d. | Cobertura Vegetal | 52 |
| e. | Precipitación..... | 54 |
| f. | Análisis del grado de amenaza para movimientos en masa | 56 |
| 11. | DISCUSIÓN | 60 |
| 12. | REFERENCIAS | 63 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Tabla 5.1 Tipos comunes de deslizamiento del terreno y otros movimientos de ladera | 14 |
|--|----|

LISTA DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Factores para la generación del Modelo | 26 |
| Cuadro 2. Categorías de la pendiente | 27 |
| Cuadro 3. Categorías de la longitud de vertiente..... | 28 |
| Cuadro 4. Categorías del factor litológico..... | 29 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1. Mapa Base del Cantón Cayambe..... | 46 |
| Gráfico 2. Mapa Geomorfológico del Cantón Cayambe | 48 |
| Gráfico 3. Mapa de Pendientes del Cantón Cayambe | 50 |
| Gráfico 4. Mapa de Cobertura Vegetal del Cantón Cayambe | 52 |
| Gráfico 5. Mapa de Precipitación del Cantón Cayambe | 54 |
| Gráfico 6. Mapa de Movimientos en Masa | 59 |

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En el Ecuador en las últimas décadas se ha generado una serie de fenómenos de origen natural de gran magnitud y de gran extensión. Estos eventos fueron en ocasiones catastróficos; es decir, su carácter destructivo causó desequilibrios socioeconómicos y ambientales muy graves, que en algunos casos tuvieron consecuencias a largo plazo.

Siendo un país andino, el Ecuador tiene un conjunto de características físicas que condicionan el advenimiento de las amenazas naturales, entre ellas:

- Precipitaciones pluviométricas abundantes con intensidad elevada
- Sucesión de estaciones secas y lluviosas
- Desnivel importante
- Vertientes empinadas y de gran extensión
- Formaciones geológicas sensibles a la erosión
- Ubicación ecuatorial a la orilla del océano Pacífico
- Planicies fluviales con pendiente débil
- Zona de subducción de la placa de Nazca con la placa Sudamericana
- Entre otras.

La historia del Ecuador está marcada por eventos catastróficos, de acuerdo a los registros históricos encontrados, siendo los movimientos en masa uno de los eventos que causaron las consecuencias más graves; por lo cual, es necesario conocer acerca del tema.

Nuestro territorio, por su geomorfología, se ha visto afectado por importantes deslizamientos que han generado enorme pérdidas económicas e impactos negativos de tipo político y social, resultando particularmente vulnerables aquellas poblaciones situadas en las áreas rurales y con más bajo nivel escolar, podemos mencionar los siguientes: el deslizamiento de la Josefina sucedido el 29 de marzo de 1993, el deslizamiento ocurrido el 29 de junio de 2010 en el cantón Santa Isabel, provincia del Azuay; los deslizamientos desatados en el norte de la ciudad de Loja y otros sucedidos en la provincia de Manabí, Imbabura.

La principal causa de éstos deslizamientos se deben a las características litológicas de la zona, en particular al predominio de rocas sedimentarias y metamórficas, que por su estructura son propensas a la fracturación y meteorización, y a la presencia de lutitas y limolitas motorizadas y convertidas en arcillas expansivas. Además, pueden influir otros elementos, como la alta pluviometría de la zona, el régimen hídrico pluvial, la pendiente y las actividades humanas. (Demoraes y D'Ercole 2001).

En esta investigación se propone aplicar una metodología sencilla y de bajo costo, que permita identificar las áreas susceptibles a inestabilidad de terrenos, con el fin de mostrar su aplicabilidad y eficacia.

2. ANTECEDENTES

En el informe de cartografía y capacidades de riesgos (Demoraes y D'Ercole, 2001), se describe que el Ecuador se encuentra dentro de las áreas de mayor afectación por deslizamientos de tierra, donde uno de los eventos de más connotación historia es el

desastre de la Josefina, sucedido el 29 de marzo de 1993 el cual afectó a la denominada Región Austral, constituida por las provincias de: Azuay, Cañar, ubicadas en el callejón interandino y Morona Santiago, provincia amazónica. Este día se produjo un deslizamiento del Cerro Tamuga, de alrededor de 20 millones de m³, en la región centro-sur, a 20 km al noreste de la ciudad de Cuenca capital provincial del Azuay.

El deslizamiento causó aproximadamente la muerte de 100 personas, originó el represamiento de los ríos de Paute y Jadán, ocasionó un embalse de 191 millones de m³ y 10 km de largo que inundó tierras agrícolas, viviendas, la central termoeléctrica del Descanso, la carretera Panamericana y la línea férrea; otro de los eventos de gran magnitud fue en el Cantón Santa Isabel, provincia del Azuay en julio del año 2010, donde una falla geológica que se activó por la saturación del suelo, al cual se unió el agua que se filtra de los reservorios que se encontraban construidos por los agricultores de la zona, sin ninguna de las especificaciones técnicas que se requiere, esto provocó el continuo deslizamiento del Cerro Tugula, obligando a los habitantes de la zona a dejar sus tierras que por años sirvieron para el cultivo de varios productos que servían para el sustento de la población aledaña (El Tiempo, 2010).

Según (Aguirre, 2005) existe en el Ecuador un sector representativo susceptible a deslizamientos, debido a la gran cantidad de movimientos de masas registrados, y esto ocurre en la Provincia de Manabí, donde por la cercanía de las costas de Manabí al frente de una subducción activa, convierte a la parte centro norte de la provincia en una zona sísmica activa, esto se evidencia en la sismicidad histórica y durante el seguimiento del sismo del 4 de agosto de 1998 y sus réplicas, lo que ocasiona la gran cantidad de deslizamientos.

En base a lo expuesto y considerando los registros históricos de graves movimientos en masa, se procede a realizar el estudio y análisis respectivo.

3. JUSTIFICACIÓN

Los deslizamientos desatados en el Ecuador, por factores condicionantes y desencadenantes, constituyen en la actualidad una tarea de gran interés para la educación ambiental, siendo esencial para la gestión de riesgos y por ende un elemento importante en las tareas del Ordenamiento Territorial.

El incremento de la población en las ciudades, ha repercutido en que con el transcurrir del tiempo, los sectores con alto peligro de deslizamiento, están siendo ocupados por obras de infraestructura, ya que no existen los suficientes conocimientos de las consecuencias que ello implica.

Por estas razones en esta investigación, se establecerá una metodología y modelo sencillo, con el fin de analizar los resultados obtenidos requiriendo de menor densidad de datos y que arroje resultados válidos que proporcionen un apoyo para aplicar en zonas no cubiertas con estudios realizados anteriormente.

4. OBJETIVOS

a. Objetivo General

Determinar una metodología sencilla y de bajo costo para generar un modelo eficaz de movimientos en masa utilizando técnicas de SIG y Teledetección.

b. Objetivos Específicos

- i. Analizar diferentes tipos de movimientos en masa con el modelo generado.
- ii. Aplicación del modelo en un área piloto

5. MARCO TEÓRICO

Movimientos en masa es un término amplio para designar cualquier tipo de movimiento ladera abajo del terreno. En un sentido más restringido, los movimientos en masa se refieren a un rápido movimiento ladera debajo de rocas o suelo en forma de una masa más o menos coherente.

Los materiales geológicos que constituyen las laderas pueden fallar y moverse o deformarse de varias maneras (Tabla 5.1).

Tabla 5.1 Tipos comunes de deslizamiento del terreno y otros movimientos de ladera

| Mecanismo | Tipo de movimiento | Características |
|------------------|---------------------------|---|
| Caída | Caída de roca | Caen rocas individuales por el aire y pueden acumularse como talud |
| | Deslizamiento | Bloques cohesivos de material blando de la tierra se desprenden en una superficie curva; también se denomina desprendimiento rotacional |

| | | |
|---------------|-------------------------|---|
| Deslizamiento | Deslizamiento del suelo | Suelo y otros materiales de la tierra erosionados se desprenden en una superficie inclinada de lecho de roca o sedimento cohesivo; también denominado desprendimiento de detritos o de tierra |
| | Desprendimiento de roca | Grandes bloques de lecho de roca se desprenden en una superficie plana, como planos de estratificación o foliación metamórfica |
| Flujo | Avalancha | Flujo granular de diferentes combinaciones de nieve, hielo, detritos orgánicos, rocas sueltas o suelo que se mueve con mucha rapidez pendiente abajo |
| | Arrastre | Movimiento muy lento ladera bajo de rocas y suelo |
| | Flujo de tierra | Masa de suelo y roca erosionada húmeda, parcialmente cohesiva e internamente deformada |
| | Flujo de detritos | Mezcla fluida de rocas, arena, lodo y agua que es intermedia entre un deslizamiento de tierra y un flujo de agua; incluye flujos de lodo y lahars |

Caída se refiere a la caída libre de material de la tierra, como desde el escarpe libre de un cantil. **Desprendimiento** es el movimiento pendiente debajo de un bloque coherente de material de la tierra. **Deslizamiento de roca o suelos** es el desprendimiento a lo largo de un plano de deslizamiento curvo que produce bloques de deslizamientos. **Flujo** es el movimiento ladera debajo de material sin consolidar en el cual las

partículas se trasladan y se mezclan en masa, el flujo muy lento se denomina arrastre; un flujo rápido puede ser un flujo de tierra, un flujo de detritos o una avalancha.

Muchos movimientos en masa son combinaciones complejas de deslizamientos y flujo. Por ejemplo, un deslizamiento puede empezar en un desprendimiento, mezclarse con agua y al descender por la ladera transformarse en un flujo de tierra en la parte inferior del deslizamiento. Algunos deslizamientos de tierra complejos pueden formarse cuando fluyen los materiales del terreno saturados de agua desde la parte inferior de una ladera, socavando la parte superior y provocando que se formen bloques de desplome.

6. COMPONENTES

a. Amenaza

Es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.

- **Amenazas naturales**

Son aquellas originadas por las fuerzas de la naturaleza y en las cuales el ser humano no interviene. Pueden ser de origen geológico e hidrometeorológico como: vulcanismo, sismicidad, sequías, huracanes, tsunamis, inundaciones y deslizamientos.

- **Amenaza antrópicas**

Son aquellas causadas por acciones inadecuadas de los seres humanos en el manejo de sustancias peligrosas, como son los hidrocarburos y otras sustancias

químicas que en ocasiones generan contaminación ambiental ya sea del aire, el suelo o el agua, provocando además daños irreparables.

- **Zona de amenaza**

Es aquella donde convergen un conjunto de factores que generan la probabilidad de la ocurrencia de un evento.

b. Vulnerabilidad

Es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo.

c. Riesgo

Se define como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la probable ocurrencia de un suceso particular desastroso.

El riesgo puede entenderse como la probabilidad de pérdida durante un período de tiempo dado y se le puede expresar de la siguiente forma (ecuación 1.1):

$$R = P * V * C \quad [1.1]$$

Donde **R** el riesgo específico, **P** es la peligrosidad o amenaza, **V** la vulnerabilidad de los elementos expuestos y **C** el costo de los mismo. Como P y V no tienen unidades, el resultado final de R tendría las unidades de C (Mas-Pla y Bach, 2008).

Respecto al término vulnerabilidad, éste ha evolucionado para contemplar la capacidad de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, y de absorber un suceso potencialmente desastroso. Desde un punto de vista más social (Blaikie, 1996) lo

asocia a la capacidad de una comunidad bajo riesgo de anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza. A partir del aporte de las ciencias sociales, se ha afirmado que la vulnerabilidad se la puede analizar desde diferentes ángulos o dimensiones, como lo son: la vulnerabilidad física, social, económica, política, técnica, entre otras (Wilches, 1989). La lista puede ser muy extensa y no hay un consenso al respecto, no obstante este enfoque es muy útil al evidenciar que la vulnerabilidad es una condición compleja y dinámica. Desde este enfoque la vulnerabilidad global o total viene determinada por las vulnerabilidades individuales antes mencionadas. Así la vulnerabilidad global puede ser entendida como un indicador que expresarse la suma de las distintas vulnerabilidades (Ecuación 1.2):

$$V_{\text{Global}} = V_{\text{Fís.}} + V_{\text{Soc.}} + V_{\text{Econ.}} + V_{\text{Polít.}} + V_{\text{Tec.}} + \dots + V_n \quad [1.2]$$

d. Desastre

Es el efecto de un riesgo en la sociedad, normalmente en forma de un suceso que ocurre en un período de tiempo limitado y en una zona geográfica definida. El término desastre se utiliza cuando la interacción entre seres humanos y un proceso natural tiene como resultado un daño considerable en la propiedad, heridas o pérdidas de vidas.

e. Catástrofe

Es un desastre masivo que requiere un gasto considerable de tiempo y dinero para la recuperación.

7. CARACTERÍSTICAS

a. Litología del suelo

La litología dentro de una formación geológica es un elemento indispensable en el estudio de los deslizamientos ya que la composición química y la estructura mineralógica de los suelos juegan un papel determinante para la resistencia o vulnerabilidad de estos frente a los fenómenos de remoción en masas.

Los minerales de arcillas y los filosilicatos juegan en todos los casos un rol muy negativo para las condiciones de estabilidad. Tienen la particularidad de absorber las moléculas de agua en su estructura molecular en forma de hojas, con un efecto en el inflamamiento y contracción de la cohesión débil entre hojas.

Los principales terrenos corrientemente implicados en los deslizamientos de terrenos son en orden decreciente de sensibilidad:

- Arcillas rápidas tixotrópicas
- Arcillas sensibles
- Arcillas expansivas
- Depósitos lacustre arcillo-limos orgánicos de débil compacidad
- Depósitos lacustre, arcillo limosos
- Depósitos aluviales, coluviales de descomposición de rocas arcillo carbonaceas.
- Masas rocosas descompuestas por episodios de deslizamientos anteriores (grandes deslizamientos de versantes)

- Depósitos aluviales y coluviales de rocas volcánicas y las formaciones de cenizas volcánicas.
 - Depósitos areno gravosos, fluvioglaciares.
 - Las morrenas de fondo sobre consolidadas
- b. Pluviometría de la zona

En los movimientos en masa es importante tomar en cuenta la cantidad, intensidad y frecuencia de las lluvias ya que esta tiende a debilitar el terreno, pues las precipitaciones muy fuertes y de poca duración afectan sensiblemente a los taludes de material permeable con alta capacidad de infiltración, aportando peso que contribuye a la desestabilización de la masa.

c. Sismicidad

La actividad sísmica del Ecuador está relacionada con su contexto geodinámico donde interactúan tres placas tectónicas: la placa oceánica de Nazca, la Placa continental Sudamericana y el Bloque Norandino. En este ambiente, y debido a la colisión y subducción de la placa oceánica bajo las dos placas continentales, se identifican varias fuentes sísmicas: la primera relacionada con el fenómeno de subducción propiamente dicho, la segunda relacionada con la deformación y movimiento relativo de las dos placas continentales debido al choque con la placa oceánica, ambas de carácter superficial y la tercera, asociada a una deformación en la placa oceánica subducida y de carácter profundo.

d. Régimen hídrico fluvial

Se refiere al agua superficial, subterránea e hipodérmica que al saturar los suelos o las rocas proporcionan un aumento en el peso propio de los materiales, siendo desfavorable para la estabilidad del área. Lo mismo ocurre con el agua en quebradas, las cuales pueden erosionar el pie de una ladera quitando el soporte de la misma y generar fenómenos de inestabilidad ríos o de terrenos. (Rivera, 2007).

e. Pendiente

Todo terreno montañoso con cierta pendiente, es inestable, cualquiera sea su naturaleza o contexto geológico, porque está sometido a las leyes de la gravedad y a los procesos climáticos de erosión y degradación Físico-Química-Biológica.

f. Eventos excepcionales ENOS y el Cambio Climático actual

Los factores climáticos que afectan la ocurrencia de amenazas de origen natural son influidos por fenómenos que suceden irregularmente, tales como el fenómeno El Niño y La Niña. De acuerdo con las proyecciones de algunos modelos de circulación atmosférica y oceánica, a medida que se vaya calentando el clima de la tierra en los próximos 100 años, lo más probable es que persistan condiciones similares a las generadas por el fenómeno El Niño. Esto aumentaría la incidencia de inundaciones, sequías y deslizamientos en muchos lugares del mundo. La acción del fenómeno de El Niño en 1982-1983 y 1997-1998, los más intensos registrados hasta la fecha, tuvo devastadores impactos para los países de la cuenca del Pacífico, cuyos efectos se sintieron en todo el mundo (CEIRD: ONU, 2004).

g. Erosión

La erosión corresponde al arrastre de partículas y formas de vida que conforman el suelo, principalmente por medio del agua (erosión hídrica), ya sea por agua de lluvia o riego, y el aire (erosión eólica), aunque también puede ocurrir erosión por el desplazamiento de hielos. Ocurre principalmente en suelos secos y desprovistos de vegetación, las principales causas que influyen en la erosión son los factores climáticos como la lluvia y el viento afectando todo tipo de relieve aunque siempre serán más vulnerables los terrenos con pendientes, y aquellos donde la influencia del hombre ha ejercido efecto.

CAPITULO 2

8. METODOLOGÍA

La metodología utilizada consiste en la ponderación de parámetros condicionantes y desencadenantes para los tipos de movimientos en masa.

a. Información preliminar o secundaria

Es necesaria la recopilación de información preliminar que permita tener una base sustentable para la elaboración del presente estudio, la información secundaria a utilizarse es la siguiente:

- Cartografía base a escala 1:25000
- Mapa de uso y cobertura del suelo a escala 1:25000
- Mapa de geomorfología escala 1:25000
- Mapa de zonificación sísmica de Ecuador
- Registro de sismos de la zona a analizarse
- Información meteorológica

Esta información secundaria se la recopiló en instituciones rectoras como son: IGM, IEE, MAGAP, IGEPN, INAMHI E INIGEMM.

b. Determinación de la susceptibilidad según Mora-Vahrson

Existen varios modelos para la determinación de la susceptibilidad a la inestabilidad de terrenos, la más conocida internacionalmente es la propuesta por Mora-Vahrson. Dicha metodología permite predecir la amenaza por fenómenos de remoción en masa y se consideran los siguientes factores: relieve relativo, litología, humedad del suelo, sismicidad e intensidad de lluvias.

La combinación del relieve relativo, litología y humedad del suelo se realiza considerando que los fenómenos de remoción en masa ocurren cuando una ladera adquiere un grado de susceptibilidad, debido a la interacción entre los tres elementos. Bajo estas condiciones, los factores desencadenantes, como la sismicidad y las lluvias intensas actúan como elementos de disparo dando lugar a la destrucción de las laderas. De esta forma se considera que el grado o nivel de amenaza es el producto de la susceptibilidad y la acción de los elementos de disparo.

La determinación de la zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa está dada por la siguiente fórmula:

$$H = (S_r * S_h * S_l) * (T_s + T_p) \quad [1]$$

Dónde:

H : Grado de amenaza

S_r : Factor de relieve relativo

S_h : Factor humedad del suelo

S_l : Factor litología

T_s : Factor de disparo por sismos

T_p : Factor de disparo por precipitaciones

Esta metodología por si misma resulta aplicable a países en vías de desarrollo, debido a que requiere de pocas variables morfo dinámicas y su aplicación es relativamente sencilla, incluye los factores más significativos desde el punto de vista de la inestabilidad de laderas, se basa en parámetros que puedan determinarse de manera ágil y económica.

Los mapas generados con esta metodología pueden ser utilizados como insumos en la toma de decisiones para los procesos de planificación del uso del terreno, planificación urbana y de líneas vitales (Mora, 1992), evaluaciones de amenazas por deslizamientos y en planes de gestión de riesgo.

La metodología no sustituye a los estudios geotécnicos de campo y laboratorio, necesarios para el diseño y concepción de las obras civiles y sus complementos de protección y mitigación correspondientes, y que tampoco es capaz de pronosticar el tipo de deslizamiento que podría presentarse (Mora, 1992).

c. Metodología y Modelo Planteado

Para la determinación de la amenaza por movimientos en masa se tomará como base el método de Mora-Vahrson 1993, considerando la información recopilada, de donde obtenemos la siguiente fórmula.

$$H = (S_m * S_c * S_l) * (T_s + T_p) \quad [2]$$

Dónde:

H : Grado de amenaza

S_m : Factor morfométrico

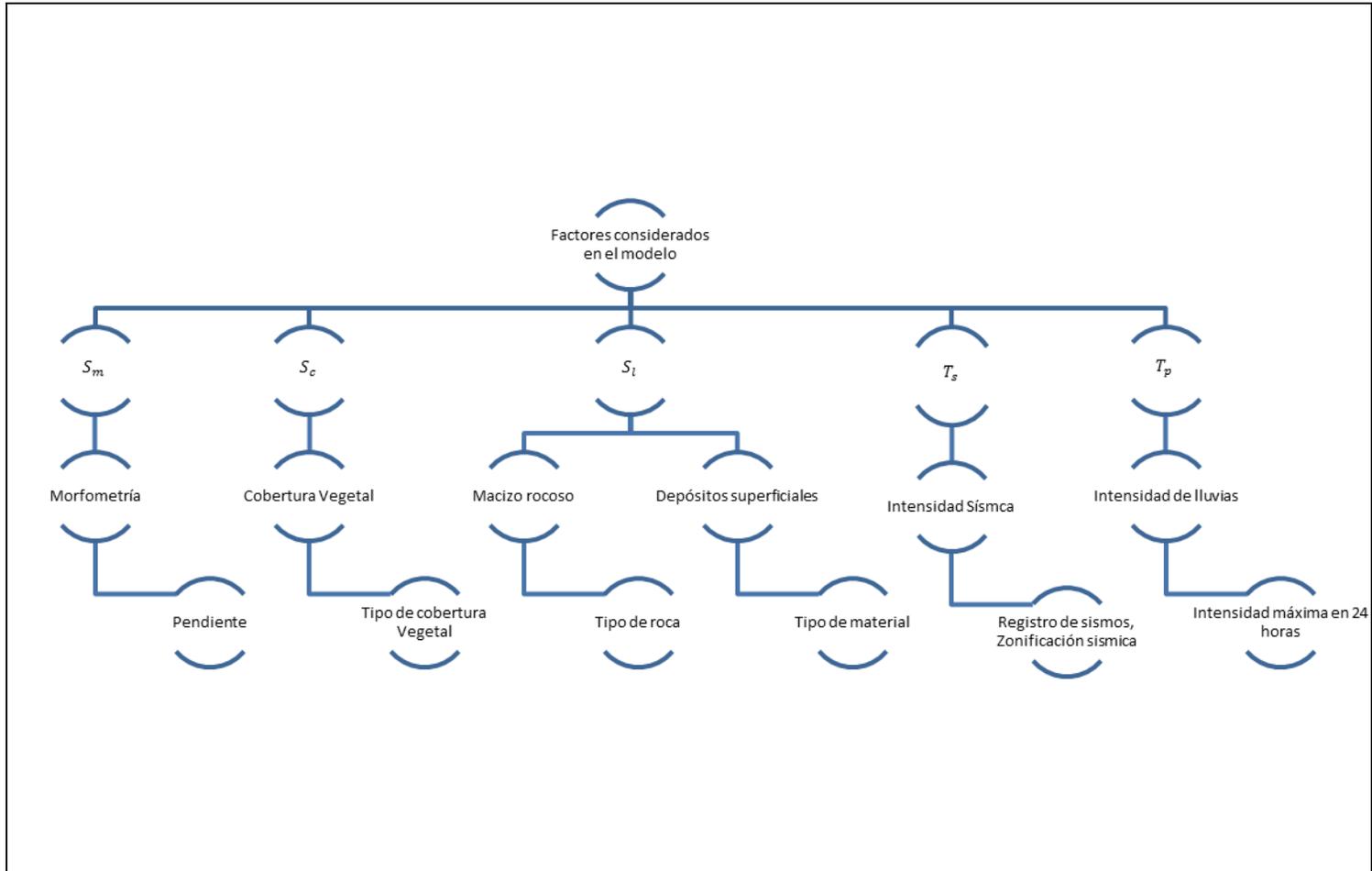
S_c : Factor de cobertura vegetal

S_l : Factor litológico

T_s : Factor de disparo por sismos

T_p : Factor de disparo por precipitaciones

Cuadro 1. Factores para la generación del Modelo



d. Factor Morfométrico (S_m)

Constituye las características numéricas de las unidades geomorfológicas, considerando de forma particular dos factores como son: la pendiente del terreno y longitud de las vertientes.

- Pendiente.- se refiere al grado de inclinación de las vertientes con relación a la horizontal y se expresa en porcentaje.

Cuadro 2. Categorías de la pendiente

| Porcentaje | Condiciones del terreno | Valor |
|-------------------|---|--------------|
| 0 - 5 | Relieves planos, pendiente muy baja, peligro de erosión | 1 |
| 5 – 12 | Pendiente baja, peligro severo de erosión | 2 |
| 12 -25 | Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro severo de erosión. | 3 |
| 25 - 40 | Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos | 4 |
| 40 - 70 | Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible | 5 |
| 70 – 100 | Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, | 6 |

| | | |
|-------|--|---|
| | procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada | |
| > 100 | Zonas reconocidas como mayores a >100 | 7 |

Fuente: Modificado de (Mora R, 2004).

- Longitud de vertiente.- corresponde a la distancia inclinada existente entre la parte más alta y la más baja de una forma del relieve y se mide en metros.

Cuadro 3. Categorías de la longitud de vertiente

| Longitud (m) | Calificativo |
|---------------------|---------------------|
| < a 15 | Muy corta |
| >15 a 50 | Corta |
| >50 a 250 | Media |
| >250 a 500 | Larga |
| >500 | Muy larga |

Fuente: IEE

Una vez determinado los valores para los parámetros contemplados se obtiene un factor, el cual da mayor peso a la pendiente, ya que este parámetro tiene una influencia alta en la probabilidad de ocurrencia de fenómenos de movimiento en masa en relación a la longitud de vertiente.

$$S_m = 4P + L_v \quad [3]$$

e. Factor Litológico (S_l)

La clasificación del factor litológico aproxima los aspectos del comportamiento físicos – mecánicos; al contemplar los espesores, grado de meteorización, estado de fracturamiento, ángulo de buzamiento, resistencia al corte y nivel freático [Cuadro 4].

Cuadro 4. Categorías del factor litológico

| Valor del parámetro | Litología | Características físico-mecánicas típicas |
|---------------------|---|--|
| 1 | <p>Aluviones: gruesos, permeables, compacto, con nivel freático bajo.</p> <p>Calizas: duras, permeables. Intrusivos: poco fisurados, bajo nivel freático.</p> <p>Basaltos, andesita, ignimbritas y similares: sanas, permeables y poco fisuradas.</p> <p>Rocas metamórficas: sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo</p> | <p>Sanos con poco o ninguna meteorización, resistencia al corte elevada, fisuras sanas sin rellenos.</p> |
| 2 | <p>Rocas sedimentarias: poco alteradas, estratificación maciza (decamétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo.</p> <p>Rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas o metamórficas: medianamente fisuradas o</p> | <p>Resistencia al corte media a elevada, fracturas cizallables.</p> |

| | | |
|---|---|--|
| | alteradas, nivel freático a profundidades intermedias. | |
| 3 | Rocas sedimentarias, rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas, tobas poco soldadas o metamórficas: medianamente alteradas. Coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados: drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos | Resistencia al corte: moderada a media, fracturación importante. |
| 4 | Aluviones fluvio-lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificaciones y foliaciones a favor de la pendiente, con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros. | Resistencia al corte: moderada a baja. |
| 5 | Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica: con estado de alteración avanzado, drenaje pobre, se incluyen las categorías 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos muy elevados. | Resistencia al corte: muy baja, materiales blandos con muchos finos. |

Un aporte importante en la definición de este parámetro lo realiza Mora al incluir las descripciones de los macizos rocosos y la evaluación de la propiedad geotécnica de los suelos, para lo cual incorpora cuadros para obtener la valoración de los parámetros (Mora R., 2004).

En el [Cuadro 5] se muestra la categorización de macizos rocosos RMR (Bieniawski, 1989, citado por Mora, 2004), y el [Cuadro 6] presenta la modificación propuesto por Miles & Keafer (2002), citado por Mora (2004).

Cuadro 5. Valoración del parámetro susceptibilidad litológica

| Caso macizos rocosos según RMR. Valoración RMR | Número de clase RMR | Descripción RMR | Valoración del factor S_l |
|---|----------------------------|------------------------|---|
| < 20 | I | Muy pobre | 5 |
| 21-40 | II | Pobre | 4 |
| 41-60 | III | Medio | 3 |
| 61-80 | IV | Bueno | 2 |
| 81-100 | V | Muy Bueno | 1 |

Fuente: Tomado de (Mora R., 2004)

Cuadro 6. Valoración del parámetro susceptibilidad litológica

| Ángulo de fricción efectiva [grados] | Cohesión efectiva [kPa] | Descripción | Valoración del factor S_l |
|---|--------------------------------|--------------------|---|
| | | | |

| | | | |
|-------|-------|----------|---|
| 0-15 | 0-10 | Muy bajo | 5 |
| 15-20 | 10-15 | Bajo | 4 |
| 20-25 | 15-20 | Medio | 3 |
| 25-30 | 20-25 | Alto | 2 |
| > 30 | > 25 | Muy alto | 1 |

Fuente: Tomado de (Mora R., 2004)

f. Factor de cobertura vegetal (S_c)

El efecto de la vegetación sobre la estabilidad de los taludes ha sido muy debatido en los últimos tiempos, incluso ha dejado muchas dudas e inquietudes en relación a la cuantificación de los efectos de estabilización de las plantas sobre el suelo; sin embargo la experiencia ha demostrado el efecto positivo de la vegetación, para evitar problemas de erosión, reptación y fallas subsuperficiales (Suárez, 1998).

Rice y Krames (1970) sugirieron que el clima determina el efecto relativo de la vegetación para prevenir deslizamientos donde la precipitación es muy grande, el efecto de la cobertura vegetal sobre la estabilidad es mínimo y en áreas de clima árido la cobertura vegetal puede afectar en forma significativa la ocurrencia de deslizamientos. Dicha ocurrencia a este tipo de movimientos en masa es mayor en áreas cultivadas que en los bosques naturales.

Las características de las raíces dependen de la especie vegetal, la edad, las propiedades del perfil de suelo y el medio ambiente. La profundidad de las raíces generalmente, no supera los

cinco metros en árboles grandes, dos metros en los arbustos y 30 centímetros en los pastos (Suárez, 1998).

La cobertura vegetal se ha categorizado por los siguientes grupos:

Cuadro 7. Categorías del factor de cobertura vegetal Sc

| Categoría | Calificativo | Descripción |
|--|---------------------|--|
| Bosques Cultivos permanentes Manglares | Alta cobertura | <p>Bosque: Ecosistema arbóreo, primario o secundario, regenerado por sucesión natural, que se caracteriza por la presencia de árboles de diferentes especies nativas, edades y portes variados, con uno o más estratos.</p> <p>Cultivos: Comprenden aquellas tierras dedicadas a cultivos agrícolas cuyo ciclo vegetativo es mayor a tres años, y ofrece durante éste periodo varias cosechas.</p> |
| Vegetación arbustiva Vegetación herbácea Páramos Cultivos | Baja cobertura | <p>Vegetación Arbustiva: Áreas con un componente substancial de especies leñosas nativas cuya estructura no cumple con la definición de bosque.</p> <p>Vegetación Herbácea: Vegetación dominante constituida por especies</p> |

| | | |
|--|--|--|
| <p>semipermanentes</p> <p>Cultivos anuales</p> <p>Agropecuario mixto</p> | | <p>herbáceas nativas con un crecimiento espontáneo, que no reciben cuidados especiales, utilizados con fines de pastoreo esporádico, vida silvestre o protección. Vegetación desarrollada en abruptos o sobre cangagua. Páramo: Incluye ecosistemas de páramo denso y en distintas etapas de recuperación después de disturbios antrópicos.</p> <p>Cultivo Semipermanente: Comprenden aquellas tierras dedicadas a cultivos agrícolas cuyo ciclo vegetativo dura entre uno y tres años.</p> <p>Cultivo Anual: Comprende aquellas tierras dedicadas a cultivos agrícolas, cuyo ciclo vegetativo es estacional, pudiendo ser cosechados una o más veces al año.</p> <p>Agropecuario mixto: Comprende las tierras usadas para diferente clase de cultivos donde se uso está caracterizado</p> |
|--|--|--|

| | | |
|--|----------------------------------|--|
| | | por variedad de productos |
| Sin cobertura Zonas erosionadas Proceso de erosión | Sin cobertura | Áreas con poca o ninguna cobertura vegetal. Incluye playas, desiertos, gravas, salina industrial, salina natural, afloramientos rocosos y áreas erosionadas por procesos naturales o de origen antrópico |
| Infraestructura | Mediana cobertura (antrópica) | Establecimiento de un grupo de personas en un área determinada, incluyendo la infraestructura civil que lo complementa. |

Fuente: IEE

g. Factor de disparo por sismos (T_s)

Para la categorización del factor de disparo por sismos, se utiliza el criterio de Mora-Vahrson (1993), como lo muestra el [Cuadro 8]:

Cuadro 8. Calificación del factor de disparo por sismos (T_s)

| Intensidad de Mercalli Modificado | Calificativo | Magnitud Richter (estimada) |
|--------------------------------------|--------------|--------------------------------|
| III | Leve | 3.5 |
| IV | Muy bajo | |
| V | Bajo | |
| VI | Moderado | |

| | | |
|------|-----------------------|-----|
| VII | Medio | 4.5 |
| VIII | Elevado | 6 |
| IX | Fuerte | |
| X | Bastante Fuerte | 7 |
| XI | Muy Fuerte | 8 |
| XII | Extremadamente Fuerte | |

Fuente: Tomado de Mora-Vahrson, 1993. Magnitud estimada de acuerdo a intensidad. IGEPN

Considerando los efectos que tiene la magnitud de los sismos en la superficie se deberá seguir la siguiente ponderación para el factor de disparo por sismos.

Cuadro 9. Categorías del factor de disparo por sismos (T_s)

| Rango | Ponderación |
|------------|-------------|
| 3.9 – 4.5 | 0 |
| >4.5 – 5.5 | 1 |
| >5.5 – 6 | 2 |
| >6 | 3 |

Fuente: IEE

h. Factor de disparo por precipitaciones (T_p)

Para obtener los promedios mensuales de precipitación, los autores proponen realizar un balance hídrico simplificado, en donde se asume una evapotranspiración de 125 mm/mes, lo que implica que precipitaciones mensuales inferiores a 125 mm no producen un almacenamiento de humedad en el suelo, mientras que una precipitación entre 125 y 250 mm si lo representan, y precipitaciones mensuales superiores a 250 mm conducen a una alta

humedad del suelo. Con estos valores se definen valoraciones para este parámetro en cada uno de los meses del año [Cuadro 10]:

Cuadro 10. Categorías del factor de disparo por precipitaciones (Ts)

| Promedio de precipitación mensual [mm] | Valor asignado |
|---|-----------------------|
| < 125 | 0 |
| 125-250 | 1 |
| >250 | 2 |

Fuente: Tomado de (Mora R., 2004)

No obstante al comparar los valores obtenidos con las estaciones meteorológicas denotó que estos rangos no resultan apropiados para ser aplicados en el Ecuador, razón por la cual se investigaron datos de evapotranspiración potencial referidos al Ecuador que sirvieran de base para ser modificados. Al analizar los valores de evapotranspiración potencial para las zonas entre los 0° y los 10° de latitud en el caso del continente americano, se propone un valor promedio anual, que al dividirlo entre doce, es aproximadamente 90 mm (Instituto de Hidrología \ UNESCO, 1980) (SENAGUA, 2002), de manera similar al evaluar los datos de evaporación disponibles para estaciones próximas se encontró un valor promedio mensual de 88 mm (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 1990). Sin embargo estos valores seguían resultando muy altos por lo que se optó por el valor de 75 mm como evapotranspiración potencial mensual, a partir del cual se redefinió la clasificación del parámetro de humedad de suelo como se muestra el [Cuadro 11] que fue el empleado en esta investigación.

Cuadro 11. Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia, para el caso del Ecuador

| Promedio de precipitación mensual [mm] | Valor del factor |
|--|------------------|
| >75 | 0 |
| 75 – 140 | 1 |
| <140 | 2 |

i. Grado de amenaza de las unidades geomorfológicas

Para la determinación del grado de amenaza de las unidades geomorfológicas se tomará en cuenta el resultado de la fórmula 2:

$$H = (S_m * S_c * S_l) * (T_s + T_p) \quad [2]$$

Teniendo en cuenta los máximos valores obtenidos por esta fórmula se categorizará la amenaza de las unidades geomorfológicas en cuatro clases con grados que irán desde nulo a alto. Los cuadros de ponderación de amenaza se mostrarán en la aplicación del modelo de amenaza por movimientos en masa. Los factores que intervienen para el análisis de la susceptibilidad tienen diferentes ponderaciones de acuerdo al tipo de movimiento en masa, no así los factores desencadenantes, cuya ponderación será la misma para todo tipo de movimiento.

CAPITULO 3

9. DESARROLLO

a. Información Base

Para la elaboración de los mapas síntesis se utilizó la siguiente información:

- Cartografía base a escala 1:25000
- Mapa de uso y cobertura del suelo a escala 1:25000
- Mapa de geomorfología escala 1:25000
- Mapa de zonificación sísmica de Ecuador
- Registro de sismos de la zona a analizarse
- Información meteorológica

b. Determinación del grado de amenaza para movimientos en masa

En base a la caracterización de los movimientos en masa (Suárez, 1998; PMA, 2007) descrita anteriormente, se procedió a determinar las ponderaciones para cada factor condicionante y de disparo.

c. Ponderación del factor morfométrico para movimientos en masa

El factor morfométrico tiene un peso importante como condición de susceptibilidad para la ocurrencia de movimientos en masa, dentro de este modelo se dio mayor importancia al grado de pendiente que a la longitud de la vertiente, en base a esto, las ponderaciones para la obtención del factor morfométrico se presentan de la siguiente manera:

Cuadro 12. Ponderación del factor pendiente

| Rango (%) | Ponderación |
|------------------|--------------------|
|------------------|--------------------|

| | |
|----------|---|
| 0 – 5 | 0 |
| 5 – 12 | 0 |
| 12 – 25 | 1 |
| 25 – 40 | 1 |
| 40 – 70 | 2 |
| 70 – 100 | 2 |
| >100 | 3 |

d. La longitud de vertiente se los considera de la siguiente manera:

Cuadro 13. Ponderación del factor longitud de vertiente

| Longitud de vertiente (m) | Ponderación |
|----------------------------------|--------------------|
| < a 15 | 1 |
| >15 a 50 | 2 |
| >50 a 250 | 3 |
| >250 a 500 | 4 |

Utilizando la fórmula [3], se tiene la combinación de los condicionantes de pendientes y longitud de vertiente, lo que permite obtener el campo del factor morfométrico para movimiento en masa.

Cuadro 14. Ponderación del factor morfométrico

| Rango | Valores obtenidos | Ponderación |
|--------------|------------------------------|--------------------|
| | | |

| | | |
|---------|---------------|---|
| 0 – 4 | 0, 1, 2, 3, 4 | 0 |
| 5 – 7 | 5, 6, 7 | 1 |
| 8 – 10 | 8, 9, 10 | 2 |
| 11 – 13 | 11, 12 | 3 |

e. Ponderación del factor litológico para movimientos en masa

La litología es un factor de susceptibilidad importante para la ocurrencia del fenómeno de movimientos en masa, y se ha determinado las siguientes ponderaciones:

Cuadro 15. Ponderación del factor litológico

| Rango | Valores obtenidos | Ponderación |
|--------------|------------------------------|--------------------|
| 0 – 4 | 0, 1, 2, 3, 4 | 0 |
| 5 – 7 | 5, 6, 7 | 1 |
| 8 – 10 | 8, 9, 10 | 2 |
| 11 – 13 | 11, 12 | 3 |

f. Ponderación del factor cobertura vegetal para movimientos en masa

La cobertura vegetal tiene influencia en la estabilidad de taludes pero muchas veces no actúa como un factor determinante para disminuir la susceptibilidad de zonas propensas a los movimientos en masa. El factor de cobertura vegetal se caracteriza de acuerdo a las siguientes ponderaciones:

Cuadro 16. Ponderación del factor cobertura vegetal

| Cobertura vegetal | Calificativo | Ponderación |
|--------------------------|---------------------|--------------------|
|--------------------------|---------------------|--------------------|

| | | |
|--|-------------------|---|
| <p>-Plantación forestal (balsa, caña guadua o bambú, samán, teca, pachaco) -Bosque húmedo, bosque seco, - Cultivos permanentes (piñón, mango, higuera, achiote, cacao, café, cocotero, limón)</p> | Alta cobertura | 1 |
| <p>-Vegetación arbustiva (matorral húmedo, matorral seco) -Vegetación herbácea (pastizal) -Cultivos semipermanentes (caña de azúcar artesanal, badea, maracuyá, papaya, plátano) - Cultivos anuales (arroz, maíz, pimiento, frejol, cebolla perla, yuca, haba pallar, maní, melón, pepinillo, sandía, tomate riñón,) Agropecuario mixto</p> | Baja cobertura | 2 |
| <p>-Infraestructura (cementerio, zona urbana, centro poblado,</p> | Mediana cobertura | |

| | | |
|---|--|---|
| complejo, salud, complejo recreacional, centro poblado) -No Aplicable (embalse, cuerpos de agua, ríos dobles, áreas de inundación) | | 3 |
|---|--|---|

g. Grado de susceptibilidad para movimientos en masa

Se calcula el grado de susceptibilidad para movimientos en masa, utilizando los campos ponderados de cada factor condicionante, utilizando la siguiente fórmula:

$$SMM = (S_m) * (S_l) * (S_c) \quad [4]$$

Obteniendo así, la siguiente tabla que determina el grado de susceptibilidad:

Cuadro 17. Ponderación del factor susceptibilidad

| Rango | Valore obtenido | Ponderación | Grado |
|---------|-----------------|-------------|-------|
| 0 - 2 | 0, 1, 2 | 0 | Nulo |
| 3 - 8 | 3, 4, 6 | 1 | Bajo |
| 9 - 12 | 9, 12 | 2 | Medio |
| 13 - 36 | 18, 24, 27, 36 | 3 | Alto |

h. Factores detonantes

Para obtener el grado de amenaza, se consideró como factores desencadenantes, la precipitación y la sismicidad.

La precipitación media anual que fue analizada mediante un mapa de isoyetas, elaborado en función de los registros de estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

El segundo factor es la sismicidad que fue analizado mediante un mapa de isosistas generado en base a un registro de sismos y también se utilizó el mapa de intensidades sísmicas con un período de retorno de 200 años.

Cuadro 18. Ponderación del factor precipitación

| Rango | Valores obtenidos | Ponderación |
|--------------|------------------------------|--------------------|
| 20 – 50 | 30, 40, 50 | 1 |
| >50 – 70 | 60, 70 | 2 |
| >70 | 90, 100, 110, 120 | 3 |

Cuadro 19. Ponderación del factor sismos

| Rango | Valores obtenidos | Ponderación |
|--------------|------------------------------|--------------------|
| 3,9 – 4,5 | 4 – 4,5 | 0 |
| >4,5 – 5,5 | 4,6 – 4,9 | 1 |

La fórmula de los factores detonantes para la ocurrencia de los movimientos en masa es la siguiente:

$$FC = (T_s + T_p) \quad [5]$$

- i. Valor de la amenaza para el fenómeno de movimientos en masa

Una vez establecidas todas las ponderaciones de susceptibilidad, sismos y precipitación, se generó el mapa de amenazas para deslizamientos. Como fórmula final para la determinación del grado de amenaza para deslizamientos se tiene la siguiente:

$$HMM = SMM * FC \quad [6]$$

CAPITULO 4

10. RESULTADOS

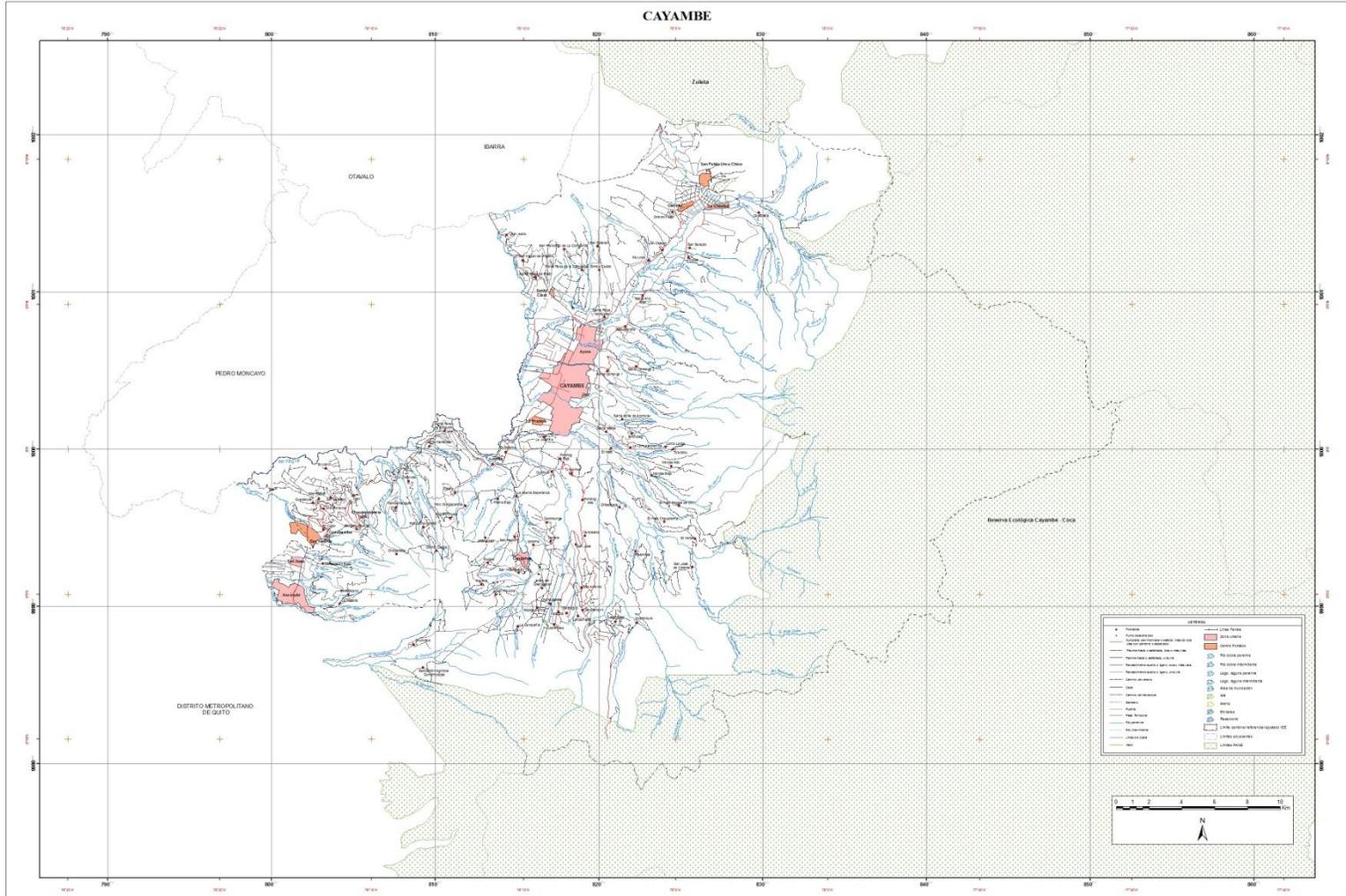
- a. Cartografía Base

La cartografía con fines especiales, científica o temática tiene que ser reflejada sobre información geográfica precisa del área de estudio, que para el caso del tema, la información generada actuará como insumo del estudio temático.

La cartografía realizada es una herramienta útil para la evaluación de nuestro estudio, ya que representa información valiosa que permite mostrar detalles de la zona de interés, se utilizó como base la información recopilada y obtenida a través del geoportal del Instituto Geográfico Militar a escala 1:50000, así como imágenes Landsat para la digitalización de elementos visibles que no se encontraban en la cartografía utilizada del IGM.

La información recopilada y generada, es la base para la continuar nuestro estudio, ya que se debe seguir un proceso lógico que permita cumplir con los objetivos planteados.

Gráfico 1. Mapa Base del Cantón Cayambe¹



¹ IGM, Escala 1:25000; IEE, Escala 1:25000; UTM WGS 84, ZONA 17 S

b. Geomorfología

El cantón Cayambe está ubicado entre la zona interandina y la cordillera Real del Ecuador, razón por la cual tiene una orografía variada. La formación de la cordillera inicia con la acreción de los bloques litotectónicos que en la actualidad están levantados y metamorfizados por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, y constituyen el basamento de la misma, posteriores eventos volcánicos como los del Angochagua, Cayambe y Cusin han cubierto todos estos bloques con potentes capas de productos volcánicos, dando como resultado la formación de los aparatos volcánicos, relieves y flujos de lava que se evidencian en la parte Oriental y Norte del cantón. La última etapa de la actividad volcánica Cuaternaria está representada por la formación Cangahua que cubre casi la totalidad del cantón como una capa de recubrimiento de toba volcánica y ceniza. Finalmente la acción de las glaciaciones ha bajado los relieves preexistentes formando circos glaciares, valles en U y morrenas.

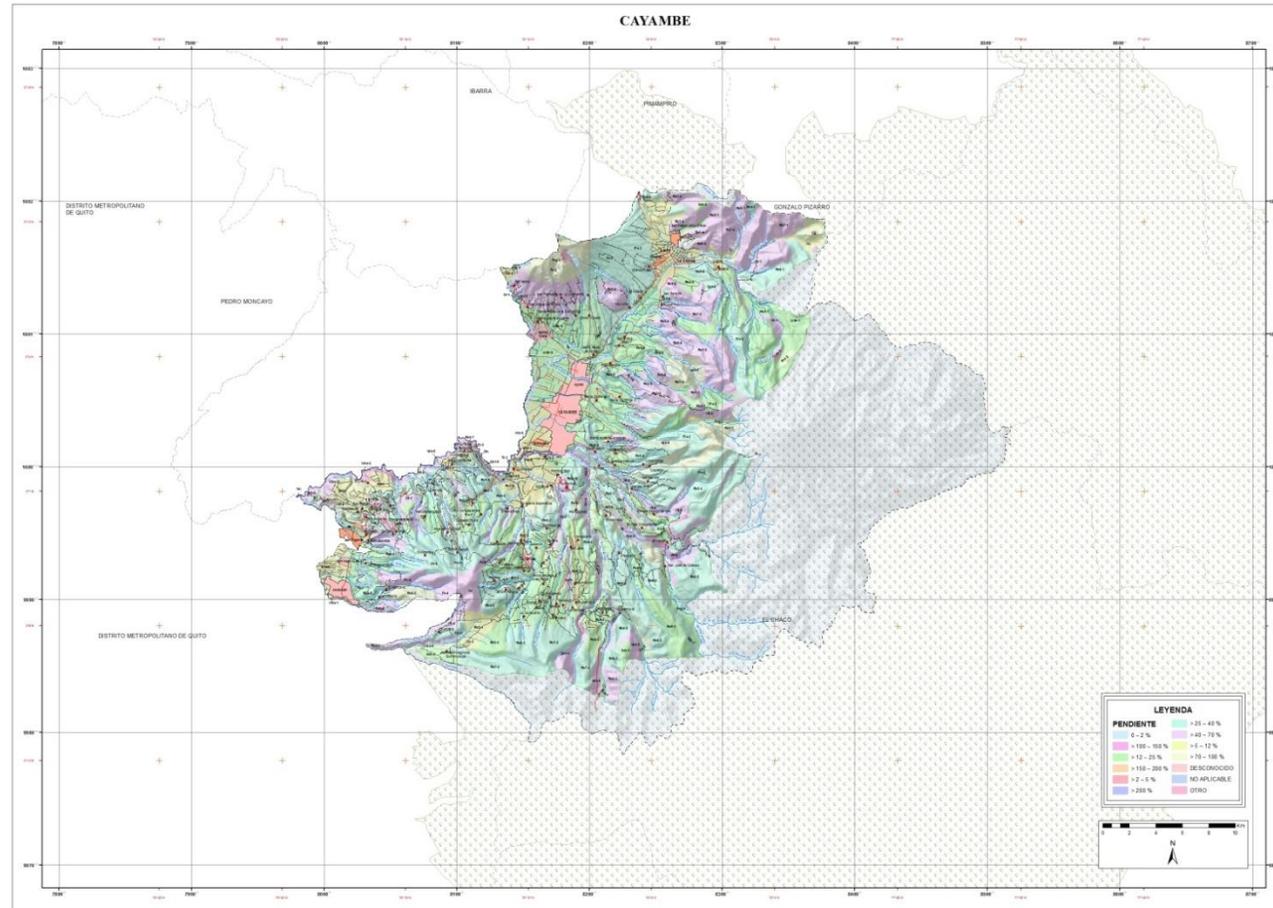
La zona interandina tiene una historia compleja comprendiendo fases tectónicas de compresión y extensión, además comprende fases de depositación volcánicas (Formación Cangahua) y fluvio lacustres (Formación Chiche) que han proporcionado el modelado primario de este sector. En el cantón también se han desarrollado procesos denudativos sobre los materiales, siendo claramente identificables los depósitos coluviales y coluvio aluviales. Como proceso final de origen de las geoformas se reconoce la acción fluvial ligada a la unidad ambiental Medio Aluvial, siendo la causante de la aparición de geoformas fluviales como los diferentes niveles de terraza, así como de la erosión continua de los relieves presentes en todo el cantón.

La interpretación geomorfológica se ha obtenido a partir de las áreas homogéneas determinadas por sus características físicas, bióticas y por su relación con procesos ecológicos; donde el criterio básico utilizado para la delimitación es el del paisaje, entendido como la interrelación o articulación de los elementos: relieve, litología, suelos, uso del suelo y vegetación (Acosta, 2009). El paisaje no es la simple suma de elementos geográficos separados, sino que es el resultado de las combinaciones dinámicas, a veces inestables de elementos físicos, biológicos y antropológicos, que concatenados hacen del paisaje un cuerpo único, indisociable, en perpetua evolución (Winckell, 1997).

El cantón Cayambe está ubicado entre la zona interandina y la cordillera Real del Ecuador, razón por la cual tiene una orografía variada. La formación de la cordillera inicia con la acreción de los bloques litotectónicos que en la actualidad están levantados y metamorfizados por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, y constituyen el basamento de la misma, posteriores eventos volcánicos como los del Angochagua, Cayambe y Cusin han cubierto todos estos bloques con potentes capas de productos volcánicos, dando como resultado la formación de los aparatos volcánicos, relieves y flujos de lava que se evidencian en la parte Oriental y Norte del cantón. La última etapa de la actividad volcánica Cuaternaria está representada por la formación Cangahua que cubre casi la totalidad del cantón.

Como proceso final de origen de las geoformas se reconoce la acción fluvial ligada a la unidad ambiental Medio Aluvial, siendo la causante de la aparición de geoformas fluviales como los diferentes niveles de terraza, así como de la erosión continua de los relieves presentes en todo el cantón.

c. Pendientes

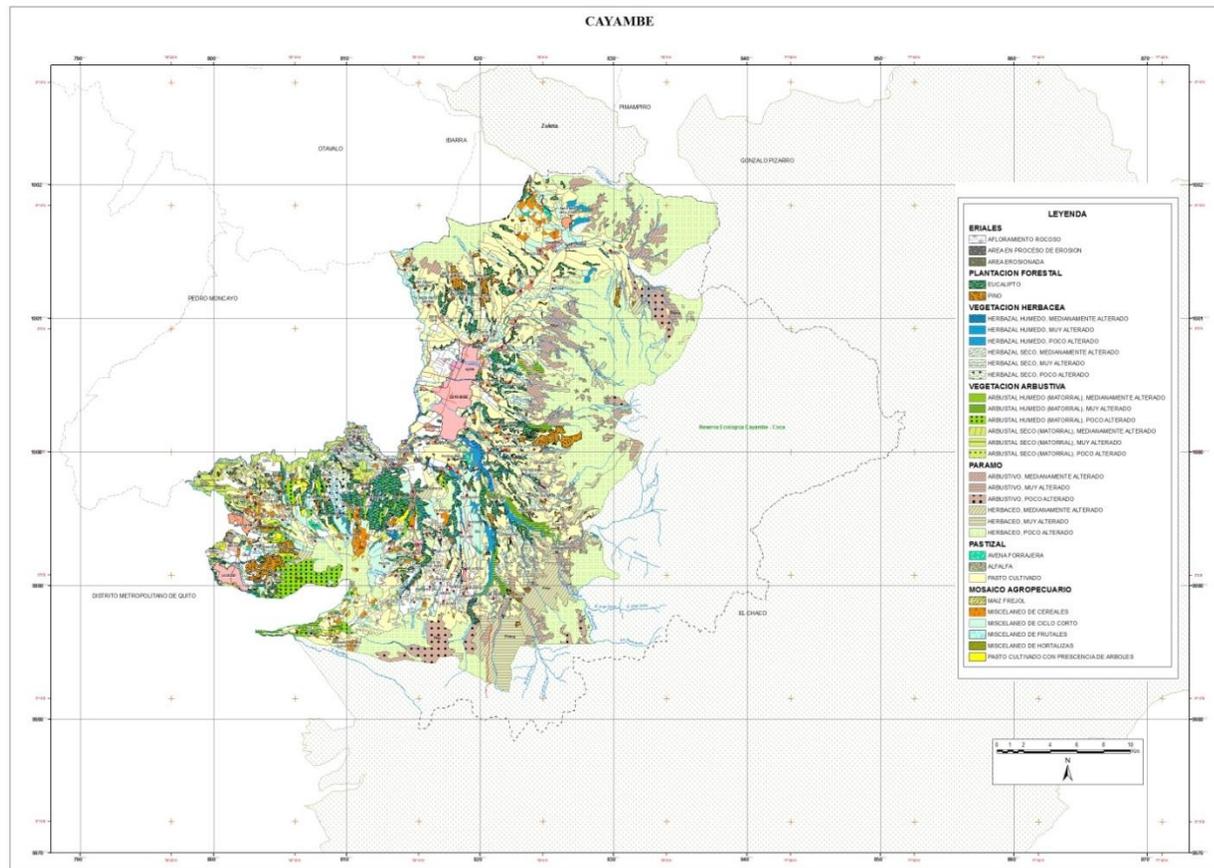
Gráfico 3. Mapa de Pendientes del Cantón Cayambe³

³ IGM, Escala 1:25000; IEE, Escala 1:25000; UTM WGS 84, ZONA 17 S

El mapa de pendientes se obtuvo mediante el grado de inclinación de las vertientes con relación a la horizontal, y se la categorizó de la siguiente manera:

| Tipo | Descripción |
|----------------|--------------------|
| Plana | 0 a 2% |
| Muy suave | 2 a 5% |
| Suave | 5 a 12% |
| Media | 12 a 25% |
| Media a fuerte | 25 a 40% |
| Fuerte | 40 a 70% |
| Muy fuerte | 70 a 100% |
| Escarpada | 100 a 150% |
| Muy escarpada | 150 a 200 % |
| Abrupta | > a 200 % |

d. Cobertura Vegetal

Gráfico 4. Mapa de Cobertura Vegetal del Cantón Cayambe⁴

⁴ IGM, Escala 1:25000; IEE, Escala 1:25000; UTM WGS 84, ZONA 17 S

La caracterización de la cobertura vegetal natural, se realiza tomando en consideración el Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental generado por el MAE.

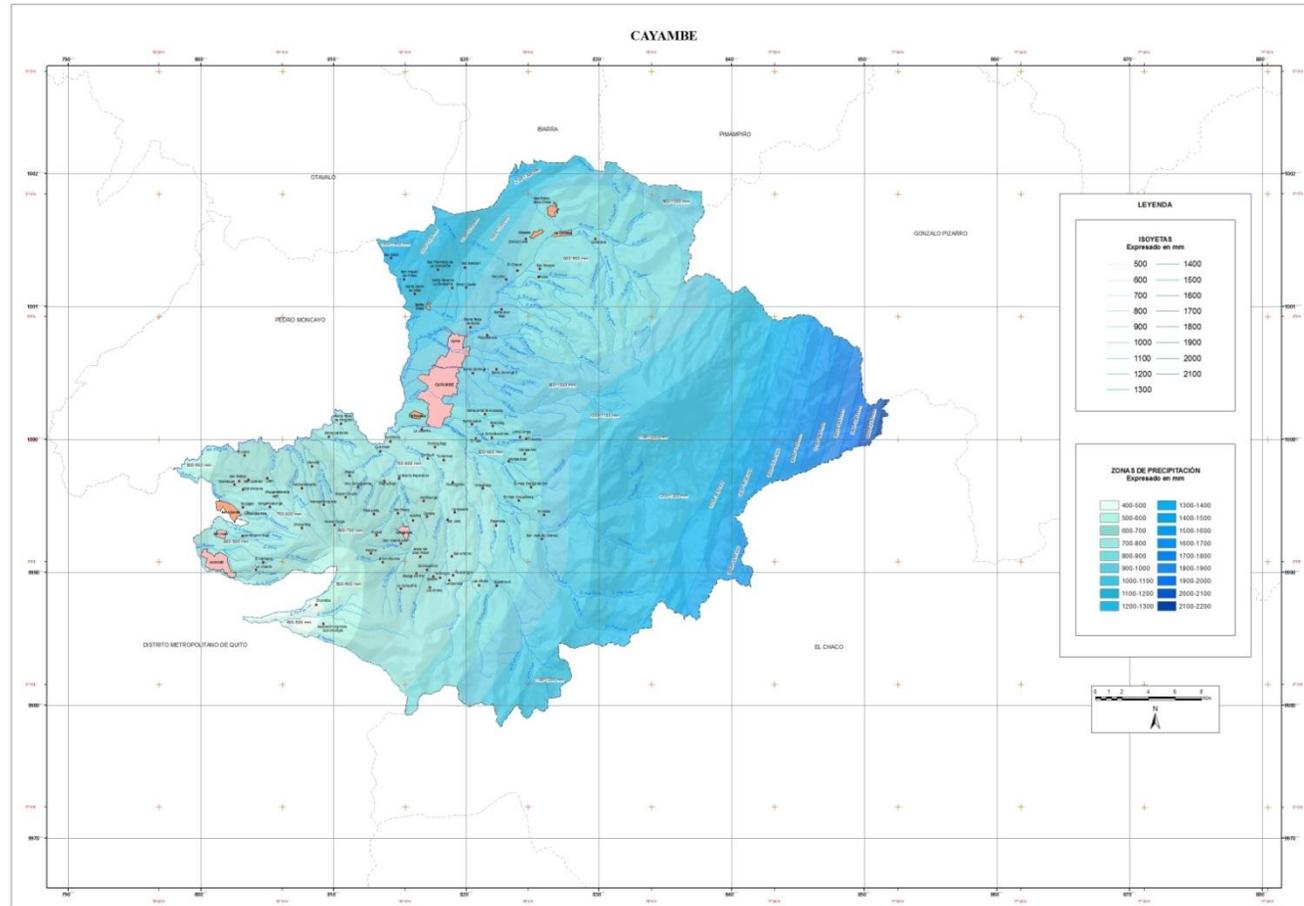
El cantón Cayambe se observaron siete formaciones vegetales las cuales se describe sus características, fisonomía y composición florísticas. En el siguiente cuadro se puede observar la superficie de cada una de las formaciones vegetales.

Formaciones vegetales naturales con relación a la cobertura vegetal natural del cantón Cayambe.

| FORMACIÓN VEGETAL | SUPERFICIE (ha) | PORCENTAJE % |
|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| MATORRAL HÚMEDO | 2987,9 | 8,55 |
| MATORRAL SECO | 1671,59 | 4,79 |
| PÁRAMO ARBUSTIVO | 5404,1 | 15,47 |
| PÁRAMO HERBACEO | 22826,27 | 65,32 |
| VEGETACIÓN HERBÁCEA HÚMEDA | 1058,68 | 3,03 |
| VEGETACIÓN HERBÁCEA SECA | 991,76 | 2,84 |
| TOTAL | 34940,3 | 100 |

Fuente: IEE, 2013

e. Precipitación

Gráfico 5. Mapa de Precipitación del Cantón Cayambe⁵

⁵ IGM, Escala 1:25000; IEE, Escala 1:25000; UTM WGS 84, ZONA 17 S

Para la obtención del mapa de precipitaciones se utilizaron datos de observaciones que son valores aleatorios, cuya variabilidad en el tiempo es grande.

Se tiene por consiguiente que recurrir a las estadísticas para realizar el análisis, a fin de alcanzar la precisión requerida. Por lo que, los estudios climáticos tienen necesariamente que apoyarse en datos que tengan series de períodos los más extensas posibles. Las series climáticas deben tener como un mínimo 20 años de registros continuos según la OMM (Organización Meteorológica Mundial); de no existir series extensas pueden utilizarse hasta de 10 años evitando en lo posible las series que tengan interrupciones.

Esta información se logra únicamente contando con el contingente de estaciones de funcionamiento regular y permanente, en donde se efectúan observaciones climáticas completas.

La recopilación de los historiales de precipitación tanto diarios, mensuales como anuales de todas las estaciones de la zona en estudio, han sido actualizados hasta diciembre del 2009, en base a los registros originales (anuarios meteorológicos o en formato digital) del INAMHI y de la DGAC.

Analizando las series de precipitaciones mensuales conjuntamente con los días de lluvia del mismo lapso de tiempo y relacionándolos con los valores de estaciones vecinas, se han eliminado algunos datos ilógicos. Los cálculos para obtener valores medios mensuales y anuales de las alturas de precipitaciones, fueron hechos en base a todo el período de años de observación de cada estación y detallado año por año.

f. Análisis del grado de amenaza para movimientos en masa

El modelo de amenaza para deslizamientos aplicado al cantón Cayambe presenta cuatro niveles de amenaza (alto, medio, bajo y nulo), localizándose principalmente en la parte Oriental del cantón.

Las zonas con grado de amenaza alto afecta un 24,91% (29 875,68 ha.) de la superficie del cantón (119 946,03 ha.), ubicados en los sectores San Isidro del Cajas, San Francisco de la Compañía, Santo Domingo 2, Santa Ana de Ancholay, Monjas Bajo, Tundantse y Chumillos.

Las zonas afectadas se encuentran asociadas principalmente a domos volcánicos, flujos de lava, flancos de volcán, relieve volcánico colinado alto, montañoso y vertiente abrupta de la Formación Cangahua, la cual está formada por toba andesítica color café claro, ceniza y lapilli y a flujos de lava, flancos de volcán, relieve volcánico montañoso, muy alto, alto y vertiente abrupta de los Volcánicos Cayambe, los cuales presentan pendientes predominantes del 40 al 70%. La cobertura vegetal predominante en estos sectores está asociado a páramo arbustivo, páramo herbáceo y pasto cultivado, presentando un ambiente propicio para la existencia de este fenómeno.

El factor sismológico dentro de estas zonas no inciden en el grado de amenaza debido a que su magnitud máxima registrada es de 3,1 a 3,9 grados en la escala de Richter, lo cual representa una ponderación de valor cero dentro del modelo; lo contrario sucede con las precipitaciones debido a que las mismas poseen un calificativo alto, haciendo que la susceptibilidad se vea incrementada en dichos sectores.

Las zonas con grado de amenaza medio se encuentran al Norte y Sur-oriente del cantón en los sectores Cantadera, Chinchin Alto, cerca de Monjas Alto, Cachicunga, San José de Caleras, Paccha, Chinchinloma, Santa Marianita y Cangahuapungo, se encuentran asociadas principalmente a relieves volcánicos montañoso, colinados muy altos, circo glaciar de los Volcánicos Angochagua (lavas andesíticas y basálticas columnares, brechas y aglomerados), a relieves volcánicos colinados muy altos y flujos de lava de los volcánicos Cayambe (lavas andesíticas, brechas volcánicas con aglomerados y piroclastos), mientras que en la parte Nor-occidental del cantón se encuentran el poblado Santa Marianita, inmerso en este sector se encuentran las unidades morfológicas Relieve volcánico colinado medio y ondulado de la Formación Cangahua.

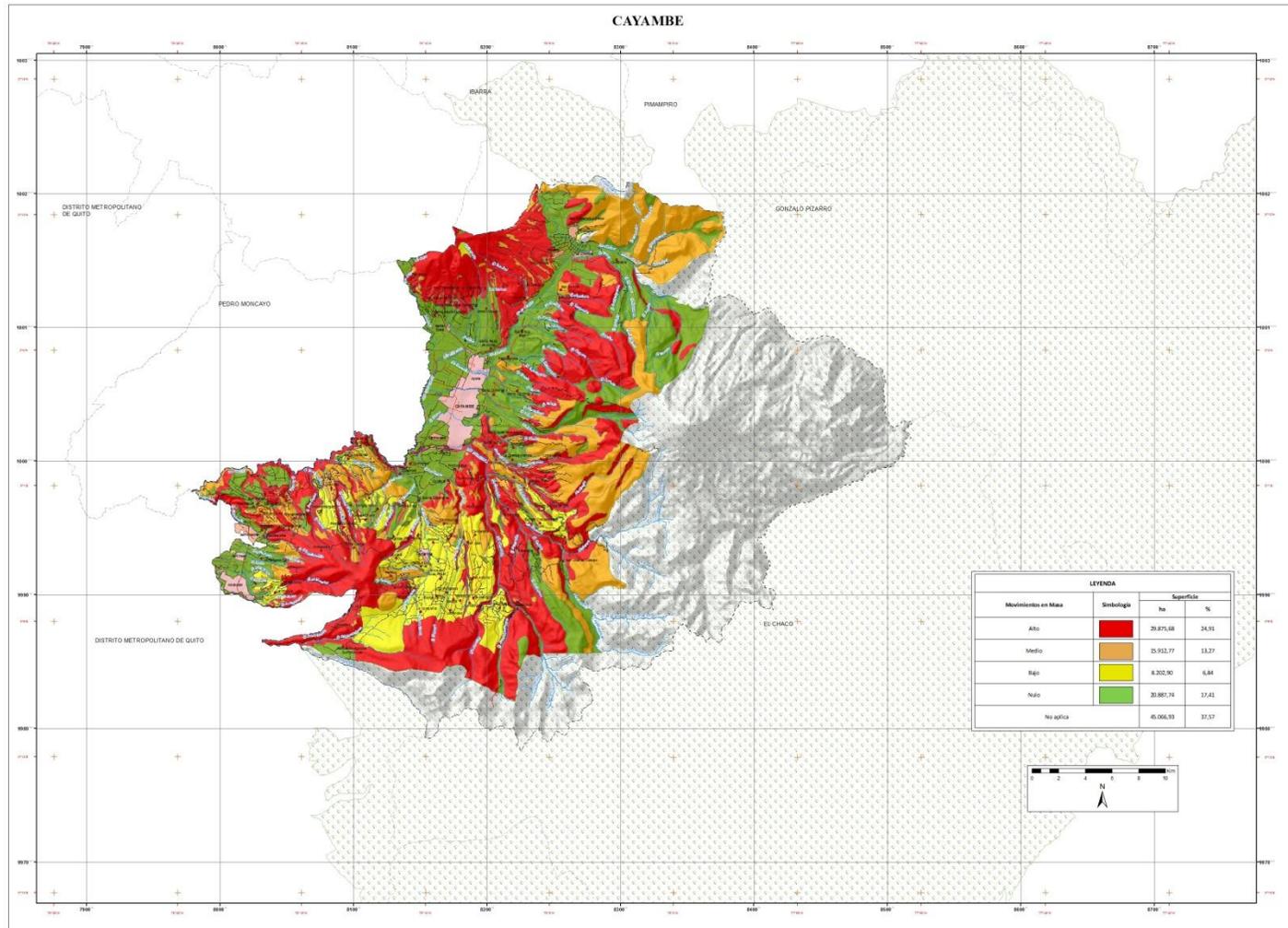
Las pendientes características de estas geoformas varían entre 25 a 70%, las zonas con grado de amenaza medio afecta un 13,27% (15 912,77 ha.) de la superficie del cantón, la cobertura vegetal predominante en este tipo de amenaza está asociada a páramo herbáceo, herbazal seco, matorral seco, pasto cultivado y misceláneos de ciclo corto.

La zona con grado de amenaza baja se encuentra distribuido en la parte Sur-central del cantón, involucrando los sectores: Izoloma, San José, San Vicente, San Antonio, La Compañía, Los Andes, Las Moras, La Victoria Pambamar Quito y Santa Rosa de Pingulmi presentando un total de 8 202,90 ha., correspondiendo a un 6,84% de la superficie intervenida del cantón.

Las unidades morfológicas ubicadas en estos sectores corresponden a los flujos de lava, relieve volcánico colinado muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo y ondulado de la Formación Cangahua y a flujos de lava, pertenecientes a la Volcánicos Cayambe (lavas andesíticas, brechas volcánicas con aglomerados y piroclastos).

Dichas unidades se encuentran asociadas en su gran mayoría a pastos cultivados, páramo herbáceo y misceláneos de ciclo corto además presentan pendientes que no exceden el 25%, siendo este el limitante para que no exista grados de amenaza medios o altos.

Las zonas con grado de amenaza nulo corresponden a llanura de depósitos volcánicos de la Formación Cangahua, este tipo de geoformas poseen una pendiente menor al 25%, por lo cual no presentan las condiciones necesarias para que se suscite este tipo de movimiento. Esta zona tiene un total de 20 887,74 ha., que representa el 17,41% de la superficie intervenida del cantón.

Gráfico 6. Mapa de Movimientos en Masa⁶

⁶ IGM, Escala 1:25000; IEE, Escala 1:25000; UTM WGS 84, ZONA 17 S

11. DISCUSIÓN

- Se ha generado el modelo de amenaza para movimientos en masa en el cantón Cayambe, el análisis de estos eventos son de gran importancia, para la planificación y toma de decisiones.
- La mayor concentración de tipos de movimientos en masa se presenta sobre las geoformas relieves volcánicos montañosos, colinados muy altos, altos, medios tanto de la Formación Cangahua como de los Volcánicos del Cayambe.
- El modelo presenta un grado de amenaza alto que afecta un 24,91% (29 875,68 ha.) de la superficie intervenida del cantón (119 946,03 ha.); los valores altos se ubican principalmente en los sectores San Isidro del Cajas, San Francisco de la Compañía, Santo Domingo 2, Santa Ana de Ancholay, Monjas Bajo, Tundantse y Chumillos, caracterizándose por sus pendientes que oscilan entre 40 y 70% y la cobertura vegetal predominante está asociado a páramo arbustivo, páramo herbáceo y pasto cultivado, el grado de amenaza medio representa el 13,27% (15 912,77 ha.) de la superficie intervenida del cantón y se encuentra ubicado al Norte y Sur-oriente del cantón en los sectores Cantadera, Chinchin Alto, cerca de Monjas Alto, Cachicunga, San José de Caleras, Paccha, Chinchinloma, Santa Marianita y Cangahuapungo, el grado de amenaza bajo representa el 8 202,90 ha., correspondiendo a un 6,84% de la superficie intervenida del cantón, las unidades morfológicas asociadas a esta amenaza son flujos de lava, relieve volcánico colinado muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo y ondulado de la Formación Cangahua y a flujos de lava, pertenecientes a la Volcánicos Cayambe (lavas andesíticas, brechas volcánicas con aglomerados y piroclástos), finalmente el grado de

amenaza nulo, de 20 887,74 ha., que representa el 17,41% de la superficie intervenida del cantón, y tiene como predominio de geoforma a la llanura de depósitos volcánicos de la Formación Cangahua.

- Cayambe es una población que se ubica en un área propensa a los movimientos en masa por su contexto geológico y morfodinámico que conjugan en un mismo espacio condiciones de materiales litológicos de mala calidad con condiciones hidrometeorológicas que propician el almacenamiento de humedad en el suelo.
- La necesidad de adaptar la metodología para su aplicación en el Ecuador, requiere de referentes sobre los parámetros que sirva para hacer una clasificación más acorde a la situación geográfica.
- La aplicación de la metodología Mora-Vahrson Modificada en el ámbito ecuatoriano requiere de una redefinición de los parámetros hidrometeorológicos, debido a que el nivel de pluviosidad es menor en este país con relación a Costa Rica, sitio en el que se genera la metodología.
- La información disponible en el Ecuador permite la aplicación de la metodología Mora-Vahrson Modificada de manera satisfactoria, lo que representa la posibilidad de construir mapas de zonificación de susceptibilidad a inestabilidad de terrenos a bajo costo.
- Entre los aspectos positivos que presentó la aplicación de esta metodología es el mostrar zonas potenciales a la inestabilidad de laderas en los cuales no han ocurrido deslizamientos, lo que permite hacer una gestión del riesgo con miras a disminuir un desastre futuro.

- Al comparar los resultados de la metodología con las zonas inestables reportadas, se nota una gran coincidencia espacial entre las zonas de alta y muy alta peligrosidad con los fenómenos de remoción en masa activos que se reporta.
- De acuerdo a otros resultados obtenidos en la zona, se encuentran áreas con muy alta y alta susceptibilidad a inestabilidad del terreno en los cuales se debe limitar o restringir el uso urbano de los mismos con el fin de evitar daños en las infraestructuras y pérdidas de vidas humanas.
- Se recomienda mejorar la calidad y disponibilidad de la información cartográfica, meteorológica y geológica a escala a detalle para el país, de manera que este tipo de aplicaciones puedan implementarse en otras áreas del país.
- Es importante que la experiencia de la aplicación de la metodología se extienda a otras regiones del país para servir de base en los programas de ordenamiento territorial.
- Uno de los primeros pasos en la gestión de riesgos por movimientos en masa es la determinación de las zonas de amenaza, para esto existen una serie de modelos, cada cual con un nivel de complejidad y detalle, cuya selección dependerá del tipo y calidad de datos disponibles en cada región, así como de utilidad de la información generada para el tomador de decisiones.
- Para estudios futuros no es conveniente aplicar la metodología a escala mayor a 1:50000; en razón de la dificultad que se puede presentarse al conseguir información litológica a detalle, así como información meteorológica.

12. REFERENCIAS

- Basabe, P., Almeida, E., Ramón, P., Zeas, R., & Álvarez, L. (1996). Avance en la prevención de desastres naturales en la cuenca del río Paute, Ecuador. Bull. Inst. fr. études andines, 25 (3), 443-458.
- Biblioteca del equipo de sistemas de información geográfica. (s.f.). Recuperado el 10 de agosto de 2010, de <http://sig.utpl.edu.ec/sigutpl/biblioteca/mapas.php>
- CEIRO-ONU. (2004). Vivir con el Riesgo. Ginebra.
- COE Provincial analizo la situación actual del deslizamiento en Santa Isabel. (10 de Julio de 2010). El Mercurio.com.
- Demoraes, F. y. (sf). Cartografía de riesgos y capacidades en el Ecuador. En el Diagnóstico Previo a Planes de intervención de la ONG.
- DIPECHO (2005).upload.savgis.org. Etudes realisees
- Donoso Correa, M. E. (2002). La cuenca del rio Paute: diagnóstico y propuesta del manejo integral. Ecuador: FLACSO.
- Egred, J. (1999). Los terremotos y su incidencia en el Ecuador. Instituto Geofísico EPN. Quito: Instituto Geofísico Nacional
- Estadísticas, I. N. (2001). Censo Nacional de Población y Vivienda.
- Fernández, M. A. (1993). Geoespacio. Cuenca, Ecuador: Serie Ciudades Intermedias.
- INAMHI-FAO. (2006). Estudio Hidrológico de Inundaciones en la cuenca alta del río Chone. Quito.
- Instituto de Hidrología \ UNESCO. (1980). Balance hídrico mundial y recursos hidráulicos de la tierra. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (1990). Anuario meteorológico 1985. Quito, Ecuador.
- Keller, E., & Blodgett, R. (2004). Riesgos Naturales. España: Pearson, Prentice Hall.
- Monkhouse, F. J. (1978). Diccionario de términos geográficos.
- Mora, R. (julio de 2004). cidbimena. Recuperado el 10 de agosto de 2010, de cidbimena.desastres
- Mora, R., Vahrson, W., & Mora, S. (1992). Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica. CEPREDENAR.

- Mora, S., & Vahrson, W. (1991). Determinación a priori de la Amenaza de Deslizamientos sobre grandes. Memoria sobre el primer simposio, (págs. 259 – 273). Bogotá.
- Noberraz, F. (2007). RISQUES LIES AUX TERRAINS INSTABLES.
- Othon, C. M. (1994). www.eird.org/deslizamientos/pdf/spa/.../doc5089.htm.
- Rivera, M. (2007). Peligro por Fenómenos de Inestabilidad de Terrenos en la construcción de Obras de Infraestructura. Secretaria Técnica de Gestión de Riesgos.
- Salazar, L. (1991). Centro de Estudios Hidrográfico.
- SENAGUA. (febrero de 2002). Mapa a nivel cantonal de la Evapotranspiración Potencial multianual (mm/año). Estudio Exploratorio. Problemática y Conflictos sobre los Recursos Hídricos por efectos del cambio Climático. Ecuador: Convenio DED-SENAGUA.
- Skinner, B., & Porter, S. (570). The dynamic earth: an introduction to physical geology. New York: John Wiley & Sons. inc.