

SÍNTESIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS METODOLÓGICOS PARA LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA, ZONA ZARUMA-PACCHA ESCALA 1:50 000

SYNTHESIS OF RESULTS OF THE METHODOLOGICAL TESTS FOR THE ZONING OF SUSCEPTIBILITY TO MASS MOVEMENTS, ZONA ZARUMA-PACCHA SCALE 1:50 000

Roberto Pulupa¹, Fausto Carranco², Galo Plaza³, Tito Vélez⁴

¹ Dirección de Innovación, Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito-Ecuador. anibal.pulupa@geoenergia.gob.ec

² Dirección de Innovación, Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito-Ecuador. fausto.carranco@geoenergia.gob.ec

³ Escuela Politécnica Nacional. Departamento de Geología. Quito-Ecuador. g24plaza@yahoo.com

⁴ Dirección de Innovación, Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito-Ecuador. tito.velez@geoenergia.gob.ec

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 03-12-2019

Fecha de aceptación: 09-04-2020

Resumen

El Mapa de Zonificación de la Susceptibilidad a Movimientos en Masa, escala 1:50 000, de la zona Zaruma-Paccha, es elaborado utilizando un sistema de información geográfico, a partir de los resultados de varios ensayos metodológicos, considerando métodos empíricos y teóricos para evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa a escala regional. Para el análisis se utilizó varios factores como: la litología, la pendiente, las lluvias, la sismicidad, entre otros y, para la validación de los resultados, se utilizó el mapa inventario de los movimientos en masa de la zona. Un análisis comparativo de los resultados permitió, a través del uso de indicadores, escoger la mejor imagen representativa de la susceptibilidad. El mapa de zonificación representa una imagen de la susceptibilidad bajo las condiciones ambientales y con los factores utilizados al momento del análisis y, por su alcance, los resultados obtenidos sirven de fuente referencial y guía general para que las autoridades e instituciones encargadas los utilicen en la gestión del riesgo y a la vez, para la planificación regional y uso del suelo.

Palabras clave: susceptibilidad, movimientos en masa, métodos empíricos y teóricos, escala regional, validación.

Abstract

The Zoning Map of Susceptibility to Mass Movements, scale 1:50 000, from the Zaruma-Paccha area, is prepared using a geographic information system, based on the results of several methodological tests, considering empirical and theoretical methods for assess susceptibility to mass movements at regional scale. For the analysis, several factors were used, such as: lithology, slope, rainfall, seismicity, among others, and for the validation of the results, the inventory map of the mass movements of the area was used. A comparative analysis of the results allowed through the use of indicators to choose the best representative image of susceptibility. The zoning map of susceptibility represents an image of susceptibility under environmental conditions and with the factors used at the time of the analysis and by their scope, the results obtained serve as a reference source and general guide for the authorities and institutions in charge to use in the management of the at the same time for regional planning and land use.

Index terms: susceptibility, mass movements, empirical and theoretical methods, regional scale, validation.

1. INTRODUCCIÓN

El Ecuador, debido a sus características geográficas, geológicas, morfológicas y climáticas, está expuesto al impacto de amenazas naturales que han causado pérdidas humanas, materiales y efectos nocivos para el desarrollo. Una de las amenazas más frecuentes y de gran impacto ha sido los Movimientos en Masa (MM), conocidos en el país con términos populares como: deslizamientos, derrumbes, deslaves, caídas de piedras, avalanchas, aluviones, hundimientos [7].

En este marco, en el año 2012, el Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero, Metalúrgico (INIGEMM), hoy Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), propuso al Estado ecuatoriano, ejecutar el Proyecto “ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y PELIGROS/AMENAZAS A PROCESOS DE MOVIMIENTOS EN MASA, ESCALA 1:50 000, EN EL TERRITORIO ECUATORIANO, FASE I, en el cual se realizó varios ensayos metodológicos para evaluar la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa a escala 1:50 000, con el nivel de cartografía regional, en varias zonas del país, entre ellas, en la zona piloto de Zaruma-Paccha.

El área de estudio se encuentra ubicado en la parte suroccidental del país, en la provincia de El Oro, incluye los cantones Atahualpa, Piñas, Portovelo y Zaruma (Figura 1). La zona cubre una superficie aproximada de 420 Km² abarcando la parte norte de la Hoja Topográfica Zaruma y la parte sur de la Hoja Topográfica Paccha, a escala 1:50 000; (IGM, 1988).



Figura 1: Ubicación del área de estudio. Tomado del Proyecto de Zonificación de Amenazas [2].

2. MOVIMIENTOS EN MASA Y FACTORES DE ANÁLISIS.

2.1 El Inventario de Movimientos en Masa

Una identificación preliminar de los Movimientos en Masa (MM), se realizó a través de la interpretación de las curvas de nivel expuestas en la hoja topográfica de la zona Zaruma-Paccha escala 1:50 000, editada por el IGM en 1980. El inventario se elaboró mediante la interpretación de 6 fotos aéreas del año 1986 y 13 fotos aéreas del año 2000, a escala 1:60 000; así como también con 309 fotogramas digitales del año 2011 a escala 1:30 000. Un posterior reconocimiento en el terreno, con ayuda de un formato preparado para el efecto y algunas entrevistas a los moradores de la zona, fue realizado para el inventario.

Los MM están representados en un mapa de Inventario de MM (Figura 2), que se utilizó para el análisis de la susceptibilidad y para la validación de los resultados. En este mapa se representa el tipo y actividad de los movimientos, considerando la simbología cartográfica sugerida por [10] con algunas modificaciones.

Se identificaron por fotointerpretación, ochenta (80) MM, representados como polígonos a la escala 1:50 000, de los cuales 59 son del tipo deslizamientos (73,75%); 11 flujos (13,75%); 7 caídas de roca (8,75%) y 3 avalanchas de roca (3,75%). De los deslizamientos se tiene que doce (12) son de tipo complejo, diez (10) de tipo rotacional, dos (2) de tipo compuesto, uno (1) de tipo traslacional y treinta y cuatro (34) indiferenciados; de estos movimientos el 34% de los movimientos en masa fotointerpretados han sido identificados y caracterizados, durante el trabajo de campo.

Además, se identificaron por fotointerpretación 93 MM, que a la escala del trabajo son representados como un punto, de estos, 75 corresponden a deslizamientos (70 indiferenciados, 2 traslacionales, 2 rotacionales y 1 compuesto), 17 flujos y una avalancha.

El inventario total de MM (polígonos y puntos) permite apreciar que los deslizamientos predominan en el área de estudio con el 77,5%; los flujos corresponden al 16,2%, las caídas de roca al 4% y las avalanchas al 2,3%. De los deslizamientos el 77,6% no ha sido diferenciado; el 9% es de tipo complejo; 9% de tipo rotacionales; 2,2% de tipo traslacionales y 2,2% de tipo compuestos.



Figura 2: Mapa de inventario de movimientos en masa de la Zona Zaruma-Paccha, 1:50 000.

Tomado del Proyecto de Zonificación de Amenazas [2].

2.2 Los Factores de Análisis

En Ecuador los factores detonantes más importantes parecen ser: la lluvia, los sismos, la deforestación, los cortes o excavaciones de laderas, el cambio en el uso del suelo y, los factores intrínsecos más comunes son: la litología, el tipo de suelo, las estructuras geológicas desfavorables, el ángulo y forma de la pendiente [8].

Los factores de análisis corresponden a los utilizados por los métodos de evaluación escogidos y a los identificados como importantes en la zona de estudio por los especialistas, estos fueron: la pendiente, el relieve relativo, la litología, la geomorfología, la humedad del terreno, las precipitaciones y la sismicidad, los mismos que se describen a continuación.

2.2.1 El Factor Pendiente del Terreno

Fue elaborado a partir de la información topográfica digitalizada, correspondiente a las hojas topográficas Zaruma y Paccha, escala 1:50 000. Las pendientes son clasificadas en 7 clases de la siguiente forma: 0° - 2° , 2° - 4° , 4° - 8° , 8° - 16° , 16° - 35° , 35° - 55° y $>55^{\circ}$ [11]. En la zona de estudio se tienen los rangos y valoraciones entre 0 y 5.

2.2.2 El Factor Relieve Relativo

El factor relieve relativo fue determinado a partir de un modelo digital del terreno (DTM), bajo el concepto sugerido por Mora y Vahrson [5] y [6], y agrupado en seis clases a través de una distribución normal, valoradas de 0 a 5, de la siguiente manera: 0 – Muy bajo, 1 – Bajo, 2 – Moderado, 3 – Medio, 4 – Alto y 5 – Muy alto.

2.2.3 El Factor Litológico

Se obtiene a partir del “Mapa de Unidades Litológicas” [2], en el cual se encuentran veintiún (21) unidades litológicas, de las cuales nueve (9) pertenecen a rocas del basamento, dos (2) a unidades superficiales y diez (10) a unidades intermedias. La valoración se realizó de acuerdo a la propuesta expuesta en Mora y Vahrson [5] y [6], la cual va de 1 a 5, tomando en cuenta las características litológicas relevantes de las unidades y sub-unidades, como la fracturación, la meteorización y la permeabilidad. Las unidades con valoración más alta (5) corresponden a depósitos superficiales como aluviales y coluviales antiguos, con permeabilidad generalmente alta; mientras que las unidades con menor valoración (1) corresponden a cuarcitas y filitas, así como a rocas no metamorfizadas y ligeramente metamorfizadas.

2.2.4 El Factor Geomorfológico

Está representado en el “Mapa de Unidades Geomorfológicas” [2], que contiene doce (12) unidades: once (11) tienen un origen endógeno y una (1) de origen exógeno. Las unidades son valoradas de 1 a 5, considerando sus características morfométricas (desnivel relativo y densidad del drenaje), morfológicas (forma de cimas y laderas) y morfodinámicas (movimientos en masa, erosión fluvial, erosión antrópica). Las unidades con valoración más alta (5) corresponden a las montañas disectadas muy altas en rocas volcánicas, con desniveles mayores; mientras las unidades con valoraciones menores (2) pertenecen a fondos de valles con terrazas indiferenciadas y pequeños desniveles.

2.2.5 El Factor Humedad del Terreno

Se representa en el “Mapa del Factor de Humedad” generado mediante el método de Polígonos de Thiessen [2] y [9], considerando los valores promedios mensuales de la precipitación y el valor de la evapotranspiración media mensual, de acuerdo a la propuesta expuesta en Mora y Vahrson [5] y [6], y que permite posteriormente asignar una calificación que oscila de muy bajo (1) a medio (3).

2.2.6 El Factor Precipitación

Se representa en el “Mapa de Intensidad de Precipitaciones” elaborado para la zona, mediante el método de polígonos de Thiessen [2] y [9], considerando los valores de precipitaciones máximas mensuales en 24 horas, de acuerdo a la propuesta expuesta por Mora y Vahrson [5] y [6]. Los valores del factor Intensidad de Precipitaciones fueron categorizados de “muy bajos” y “medios” y se considera que este parámetro debe ser evaluado tomando en cuenta el valor de lluvias máximas en 24 horas del Ecuador (245mm) para un periodo de retorno de 100 años [9].

2.2.7 El Factor Sismicidad

Se identifica la intensidad sísmica de la zona de estudio en “El Mapa de Intensidades Sísmicas del Ecuador”, y su valoración se realiza considerando la intensidad sísmica de VIII a partir de la propuesta presentada por Mora [4], Mora y Vahrson [5] y [6]. De esta forma el factor sísmicidad para el área de estudio corresponde al valor único de ocho (8).

3. METODOLOGÍA

Se utilizó el sistema de información geográfico ArcGIS 10.1 para analizar y evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa con los siguientes métodos: Brabb, Ponderación de Parámetros, Mora y Vahrson, Mora-Vahrson-Mora, Estadístico Univariado, considerando el ámbito de zonificación regional del estudio, la utilización en paralelo de métodos empíricos y teóricos y la facilidad de obtener la información para caracterizar los factores de análisis a la escala 1:50000 [2]. El inventario de movimientos en masa fue utilizado en unos casos como factor de análisis y también para validar los resultados de los métodos utilizados como es sugerido por algunos autores [10].

3.1 El Método de Brabb (B)

Este método utiliza tres factores de análisis representados en mapas: el Inventario de MM, las Unidades Litológicas y las Pendientes.

Se determina en primera instancia la susceptibilidad relativa, relacionando el área de la masa deslizada (mapa de inventario de MM) con el área de las unidades litológicas (Mapa de Unidades Litológicas) y, posteriormente, la susceptibilidad total, considerando la frecuencia de MM en cada rango de pendientes (Mapa de Pendientes), de acuerdo a la susceptibilidad relativa de cada unidad litológica. El fundamento de este método empírico es la sobreposición de mapas y el cálculo de las áreas (Figura 3).

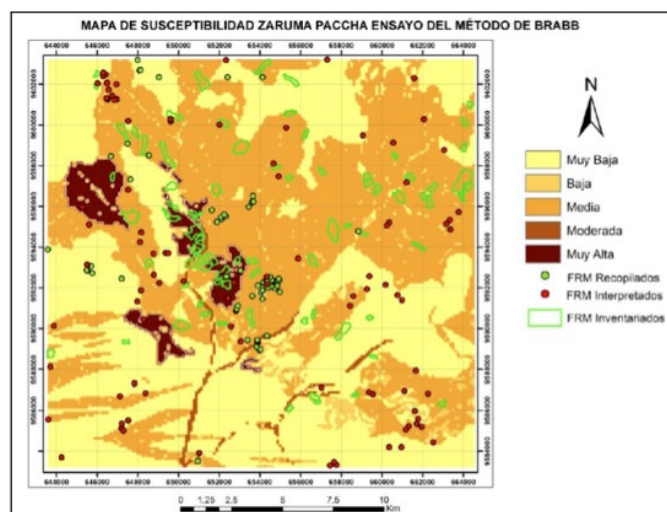


Figura 3: Mapa de susceptibilidad. Método de Brabb. Se consideran solo los MM representados como polígonos en el Mapa Inventario de MM.

Tomado del Proyecto de Zonificación de Amenazas [2].

3.2 El Método de Ponderación de Parámetros o Combinación de Mapas Cualitativos (PP).

Es un método heurístico o empírico, en el cual se utilizan factores de análisis que se combinan mediante el uso de puntajes ponderados para cada factor. Estos puntajes varían según el caso y dependen de la experiencia del especialista para seleccionar los parámetros y asignarles el peso. El algoritmo utilizado para evaluar la susceptibilidad es el siguiente [10]:

$$H = \frac{W_1(F_1) + W_2(F_2) + W_3(F_3) + W_4(F_4) + \dots + W_n(F_n)}{n} \quad (1)$$

Donde:

H: Valor de la susceptibilidad / amenaza

Fi: Factor de análisis

Wi: Ponderación del parámetro Fi

Para la ponderación de los factores de análisis se utilizó el Método de Jerarquización Analítica (MJA) [13].

Se realizaron dos ensayos con cinco variables (en los cuales se da mayor peso a la precipitación, a la pendiente y a la litología) y un ensayo con tres variables (litología, pendiente y geomorfología). Estos tres ensayos se los detalla a continuación.

3.2.1 El Método de Ponderación de Parámetros: 5 Factores (Ensayo 1)

Para este ensayo se consideraron los factores de análisis siguientes: el factor pendiente (F1), el factor litológico (F2), el

factor geomorfológico (F3), el factor intensidad de precipitaciones (F4) y el factor intensidad sísmica (F5). En este ensayo se ha dado mayor peso al factor precipitación (30%) por considerar a las lluvias como generador de movimientos en masa, seguido por el factor litológico (25%), factor pendiente (20%), factor geomorfológico (15%) y factor intensidad sísmica (10%). El mapa de susceptibilidad con cinco clases determinadas con una distribución en intervalos naturales se muestra en la Figura 4.

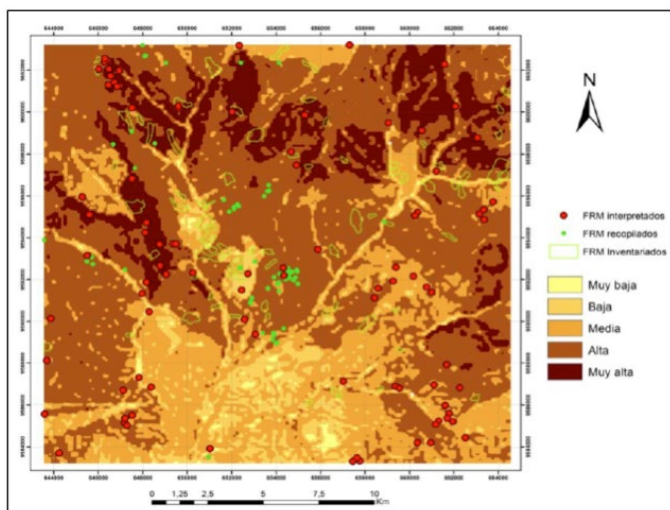


Figura 4: Mapa de susceptibilidad. Método de PP - 5 factores de análisis (Ensayo 1): pendiente, litológico, geomorfológico, intensidad de precipitaciones e intensidad sísmica. Tomado del Proyecto de Zonificación de Amenazas [2].

3.2.2 El Método de Ponderación de Parámetros: 5 Factores (Ensayo 2)

Para este ensayo se han considerado los mismos cinco factores de análisis del ensayo anterior.

Asignando un mayor peso a los factores pendiente (34%) y litológico (26%), seguidos por el factor precipitación (19%), factor geomorfológico (13%) y factor intensidad sísmica (8%). El resultado del mapa de susceptibilidad con cinco clases, determinadas con una distribución en intervalos naturales se muestra en la Figura 5.

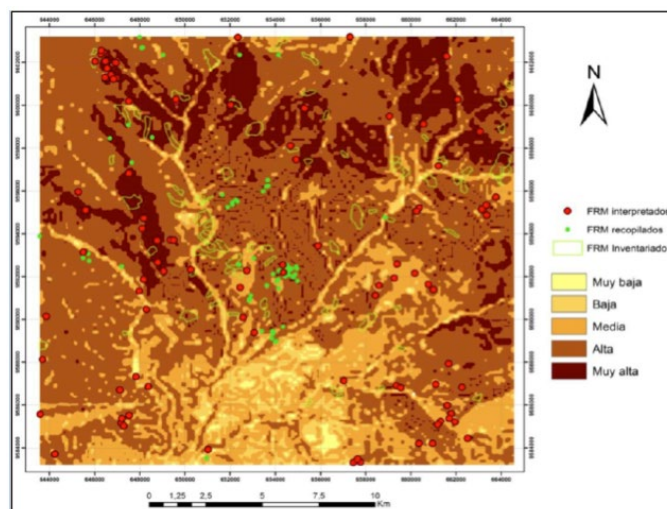


Figura 5: Mapa de susceptibilidad. Método de PP - 5 factores de análisis (Ensayo 2): pendiente, litológico, geomorfológico, intensidad de precipitaciones e intensidad sísmica. Tomado del Proyecto de Zonificación de Amenazas [2].

3.2.3 Método de Ponderación de Parámetros: Tres Factores (Ensayo 3)

Para este ensayo se consideró solo tres factores comúnmente agrupados dentro de los factores causales preparatorios: pendiente (F1), litológico (F2) y geomorfológico (F3). En este ensayo se da mayor peso al factor pendiente (48%), seguido por el factor litológico (33%) y factor geomorfológico (19%). El mapa de susceptibilidad con tres clases determinadas a través de una distribución normal se muestra en la Figura 6.

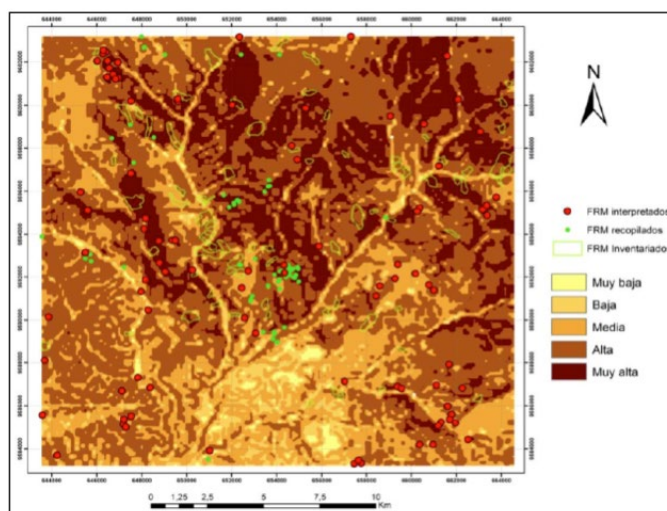


Figura 6: Mapa de susceptibilidad. Método de PP - 3 factores de análisis (Ensayo 3): pendiente, litológico y geomorfológico. Tomado del Proyecto de Zonificación de Amenazas [2].

3.3 El Método de Mora-Vahrson (MV)

Es un método de macrozonificación de la susceptibilidad, que considera cinco factores: el relieve relativo, las condiciones litológicas, la humedad del terreno, la sismicidad y la intensidad de precipitación. La combinación de los tres primeros (elementos pasivos), se realiza considerando que los MM ocurren cuando una ladera adquiere un grado de susceptibilidad debido a la interacción entre la pendiente, la litología y la humedad del suelo. Bajo estas condiciones, los factores como la sismicidad y las lluvias intensas (elementos activos), actúan como elementos detonantes. De esta forma el nivel de susceptibilidad/amenaza relativa es el producto de la susceptibilidad y de la acción de los elementos detonantes como se expresa en el algoritmo siguiente [5] y [6]:

$$H = (Sr * Sl * Sh) * (Ts + Tp)(2)$$

Donde:

H: Grado o nivel de susceptibilidad/amenaza

Sr: Valor del factor relieve relativo

Sl: Valor del factor litológico

Sh: Valor del factor humedad natural del terreno

Ts: Valor del factor detonante por sismicidad

Tp: Valor del factor detonante por lluvias

El resultado del ensayo se observa en la Figura 7.

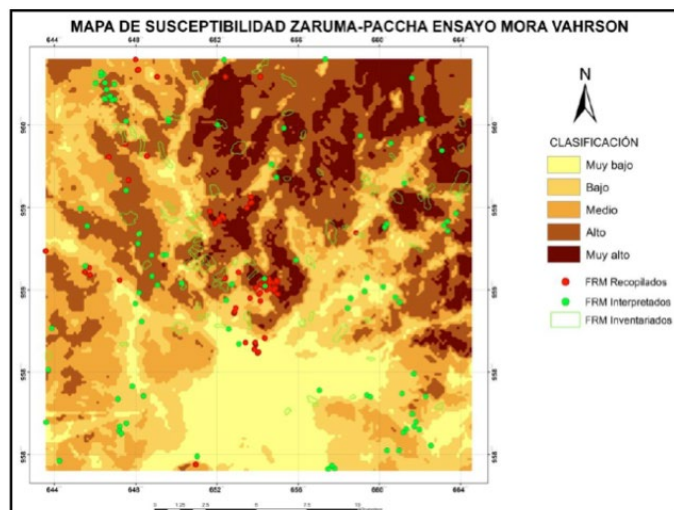


Figura 7: Mapa de susceptibilidad. Método de MV. Factores de análisis: litología, relieve relativo, humedad, sismicidad y precipitación. Tomado del Proyecto de Zonificación de Amenazas [2].

3.4 El Método de Mora-Vahrson-Mora (MVM)

Este método es una modificación de la metodología MV, que reemplaza el factor relieve relativo por el factor pendiente, caracteriza la litología mediante las clasificaciones de macizos rocosos de Bienawski y la de suelos SUCS; además, modifica la valoración del factor sismicidad, como lo expone Mora [12]. En el presente trabajo se usó el ángulo de la pendiente del terreno (Sp), en lugar del relieve relativo (Sr) y, la relación de [14], propuesta en [12], para establecer los valores correspondientes del parámetro de disparo por sismicidad (Ts).

El método de MVM utiliza el mismo algoritmo del método MV [5] y [6], destacando la influencia de la sismicidad y las lluvias como factores detonantes. El resultado del ensayo se observa en la Figura 8.

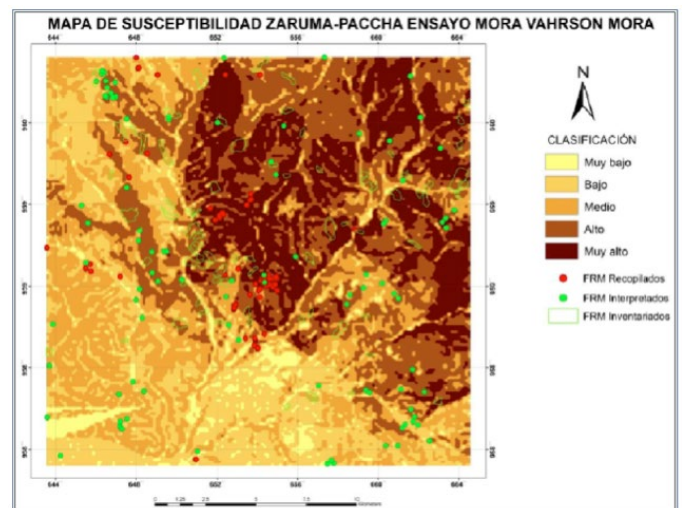


Figura 8: Mapa de susceptibilidad. Método de MVM, Factores de análisis: litología, pendiente, humedad, sismicidad y precipitación. Tomado del Proyecto de Zonificación de Amenazas [2].

3.5 El Método Estadístico Univariado (EU)

Es el método teórico más común para obtener una aproximación semicuantitativa y objetiva de la susceptibilidad a MM. En este método, se determina el peso que cada unidad de terreno tiene hacia la generación de MM y utiliza como variable independiente, el mapa de densidad de procesos morfodinámicos, que se aplica donde se tiene un buen registro de MM actuales o pasados.

El peso que cada factor tiene sobre la generación de deslizamientos se determina calculando la sumatoria de las áreas de cada tipo de movimiento en masa que se encuentra dentro de las áreas que abarca cada Unidad Cartográfica de Parámetro (UCP), de la siguiente forma [1]:

$$\%W = \frac{Dzx \cdot 100}{S} \quad (3)$$

Donde:

%W: Peso o susceptibilidad de la UCP respecto al MM analizado

Dzx: Superficie acumulada de MM de cada tipo x (km²) sobre la UCP

S: Superficie acumulada de la UCP (km²)

Para el análisis se utilizó tres factores: geomorfológico, pendientes y litológico, así como los movimientos en masa representados como polígonos en el Mapa Inventario de MM (Figura 9).

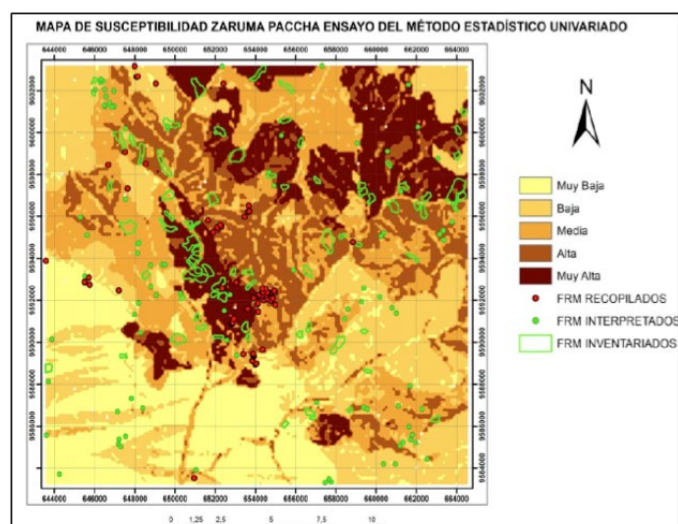


Figura 9: Mapa de susceptibilidad. Método EU. Factores de análisis: geomorfológico, pendientes y litología. Además del Mapa Inventario de MM. Tomado del Proyecto de Zonificación de Amenazas [2].

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y VALIDACIÓN

El análisis comparativo de los resultados de los ensayos metodológicos se realiza a través de indicadores, como se muestra en [2]. El objetivo de los indicadores de susceptibilidad relativa generalmente es, incluir el mayor número de MM en las clases altas de susceptibilidad, tratando al mismo tiempo de alcanzar el mínimo de superficie para estas clases. Esta condición del indicador es parte de la caracterización en una zonificación de la susceptibilidad, para lo cual se debe determinar: el porcentaje (%) del total de MM que se agrupan en cada clase de susceptibilidad, el (%) del total del área deslizada que se ubica en cada clase de susceptibilidad y el (%) de cada clase de susceptibilidad en relación al área total de estudio [3]

De esta manera, un primer análisis visual de los resultados, considerando el (%) del total de MM que se agrupa en cada clase de susceptibilidad, permite seleccionar a los ensayos que se ajustan a este criterio. Aunque los ensayos con el método MV original y MVM no se ajustan al indicador de susceptibilidad se incluyen en el análisis comparativo. Para considerar el segundo y tercer criterio se calcula el (%) de cada clase de susceptibilidad en relación al área total de estudio y el (%) de área deslizada en cada clase de susceptibilidad para cada método de los seleccionados.

En las figuras 10 y 11, se exponen gráficamente los resultados que expresan los criterios anteriormente mencionados. De la comparación de estos resultados se observa que los ensayos MVM y PP (3 Factores), presentan los valores más altos de (%) de área deslizada en las clases de susceptibilidad altas (alta y muy alta), esto es 69,2% y el 82,8% respectivamente. Los valores más bajos para esta relación los presentan los ensayos de B y MV, esto es 13,5% y 54,4% respectivamente.

En cuanto al (%) de cada clase de susceptibilidad en relación al área total de estudio, considerando la suma de las clases altas (alta y muy alta) son los ensayos B y EU, los que presentan los valores más bajos, esto es 4,2% y 30,7% respectivamente. Sin embargo, estos dos ensayos no se ajustan al criterio de alto porcentaje de área deslizada con respecto a la clase de susceptibilidad. Los ensayos que tienen el porcentaje más alto de la relación área de clase de susceptibilidad con respecto al área total son PP (3 factores), MV y MVM.

Los ensayos MVM y PP (3 factores) que presentan los valores más altos de la relación área deslizada con respecto al área de las clases más altas, tienen respectivamente los siguientes valores 46,8% y 68,5%, por lo tanto, el ensayo de PP (3 factores) se ajusta mejor a los criterios del indicador de susceptibilidad relativa.

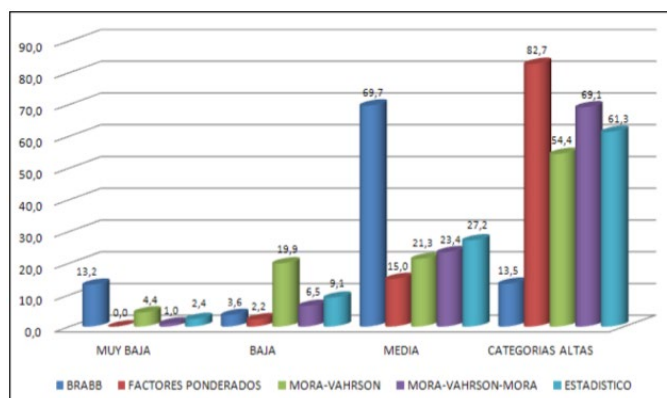


Figura 10: Porcentaje de masa deslizada en cada clase de susceptibilidad. Tomado del Proyecto de Zonificación de Amenazas [2].

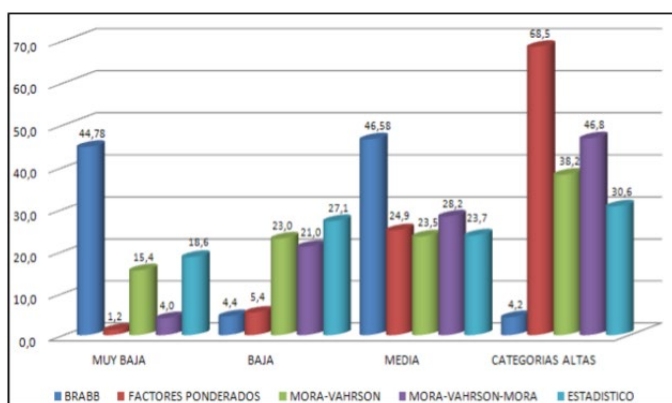


Figura 11: Área (%) de cada clase de susceptibilidad respecto al área total. Tomado del Proyecto de Zonificación de Amenazas [2].

Este análisis permitió establecer que, en el área de estudio, con los factores de análisis y con el algoritmo utilizado en el método de PP (3 factores), es el que representa de mejor manera los criterios escogidos para la susceptibilidad relativa. Por lo tanto, se recomienda elegir estos resultados para representar la Zonificación de la Susceptibilidad por movimientos en masa en el área de Zaruma-Paccha, para el ámbito regional.

El resultado que más se asemeja a la realidad de la zona de estudio, se observa en la Figura 6, para lo cual, se usó el algoritmo de la fórmula (1) pero modificado a tres factores, como se observa a continuación [2].

$$H = \frac{0.48(F_1) + 0.33(F_2) + 0.19(F_3)}{3} \quad (4)$$

Donde:

H: Valor de la susceptibilidad / amenaza

Fi: Factor de análisis

Wi: Ponderación del parámetro Fi

5. CONCLUSIONES

Se identificaron 173 MM, de los cuales 134 son del tipo deslizamientos (77,5%); 28 flujos (16,2%); 7 caídas de roca (4%) y 4 avalanchas de roca (2,3%). De los deslizamientos se tiene que 12 son de tipo complejo, 12 de tipo rotacional, 3 de tipo compuesto, 3 de tipo traslacional y 104 indiferenciados. Por lo tanto, el área de estudio tiene una densidad de movimientos en masa de 0,41MM/km², mayoritariamente del tipo deslizamiento.

El Mapa de Inventario de MM es indispensable para el análisis de susceptibilidad con el método de B y el EU, además, para el análisis comparativo, validación y calibración independiente de los resultados con los métodos de PP3, PP5, MV y MVM.

Con la información obtenida en este trabajo no se puede determinar la fecha de ocurrencia, frecuencia o período de reactivación, velocidad y recorrido o desplazamiento de los movimientos en masa y por lo tanto, sólo es posible realizar una evaluación de la susceptibilidad y no un análisis y evaluación de la amenaza.

El análisis y evaluación de la susceptibilidad con los métodos propuestos, se realizó con los MM representados como polígonos, a escala 1:50 000, por lo tanto, el resultado expresa la susceptibilidad para este tamaño de movimientos en masa, que pueden tener condiciones de origen y características diferentes a otros muy pequeños que se presentan en el área, de forma recurrente.

En la zona de estudio no se tiene información suficiente para realizar una evaluación detallada de la intensidad sísmica máxima y representar de mejor forma el factor sísmicidad que se utiliza en los métodos de MV y PP.

Se eligió el resultado del método de PP, para representar la Zonificación de la Susceptibilidad a movimientos en masa en la zona de Zaruma-Paccha en el ámbito regional, debido a que el análisis comparativo y las imágenes de la distribución de las clases de susceptibilidad, permiten establecer que los factores utilizados y el algoritmo determinado, representa de mejor manera los criterios escogidos para identificar la susceptibilidad.

6. RECOMENDACIONES

Utilizar al menos tres de estos métodos: Ponderación de Parámetros, Mora-Vahrson, Mora-Vahrson-Mora y Brabb; conjuntamente con el método Estadístico Univariado, para la zonificación a nivel regional de la susceptibilidad relativa por movimientos en masa, dependiendo de la información disponible.

Utilizar en lo posible una clasificación de macizos rocosos para las rocas del basamento y la clasificación SUCS para los suelos (depósitos superficiales), para una mejor evaluación del factor de susceptibilidad litológico o el factor geológico.

Para el análisis de susceptibilidad por métodos heurísticos es necesario considerar que los factores Pendiente y Litología, tengan una ponderación significativa dentro del algoritmo a utilizar, apoyado en el método de Jerarquización Analítica.

Utilizar fotos aéreas a escala 1:30 000 o mayor, captadas lo más reciente posible para realizar el inventario de movimientos en masa y otros procesos geodinámicos, para obtener las condiciones geoambientales representativas al tiempo del estudio y un mayor grado de precisión en la identificación de los movimientos en masa.

Cuando se tenga disponibilidad de fotos aéreas e imágenes captadas en diferentes periodos de tiempo se debe realizar un análisis multitemporal para identificar la fecha de ocurrencia de los

movimientos en masa, además de la recopilación sistemática de información en el terreno y de fuentes bibliográficas y hemerográficas sobre la fecha de ocurrencia de los movimientos en masa.

Tomar en cuenta que, la delimitación de las áreas de susceptibilidad en el mapa de zonificación de la zona Zaruma-Paccha, es referencial y no absoluta, por cuanto la amenaza es cambiante y debe ser actualizada conforme a las variaciones geoambientales del área.

Tomar en cuenta más variables para un análisis multicriterio, en el método de Ponderación de Parámetros, los cuales pueden ser: el uso y cobertura de suelo, las actividades mineras, construcción de obras viales y otras actividades antropogénicas generadoras de movimientos en masa, poniendo énfasis en la ubicación de depósitos de los materiales proveniente de estas actividades.

Realizar siempre la validación de los resultados para obtener mayor certidumbre de la imagen de la susceptibilidad y promover la investigación de nuevos indicadores para el análisis comparativo de los resultados.

El algoritmo de factores ponderados con 3 variables se podría utilizar para todo el país, considerando lo siguiente: 1) La escala de trabajo del estudio deber ser 1:50 000. 2) Se debe disponer de toda la información planteada en esta metodología, la misma que debe estar a la misma escala (1:50 000), debido a que no se debe mezclar escalas. 3) La presente metodología puede utilizarse para estudios a nivel cantonal, provincial o nacional.

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto Zonificación de Amenazas por Movimientos en Masa (PZA) del Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero, Metalúrgico (INIGEMM) actualmente Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), por permitir la utilización de los datos para la elaboración de esta publicación y a todo el personal técnico involucrado en el proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INGEOMINAS, “Evaluación del Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa, Guía Metodológica,” Primera Edición, Bogotá, 2001.

[2] INIGEMM, “Memoria Técnica Ensayos Metodológicos para la Zonificación de la Susceptibilidad /Amenaza por Movimientos en Masa, Zona de Zaruma-Paccha” Proyecto “Zonificación de Susceptibilidad y Peligros/Amenazas por procesos de Movimientos en Masa, Escala 1:50 000, 2013.

[3] JTC-1, “Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slope”. Guidelines for landslide susceptibility, hazard

and risk zoning for use planning. (<http://www.geoforum.com/jtc1>). Engineering Geology: 102, 83 – 84, 2008.

[4] R. Mora, “Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de San José”. Servicios Especializados de Laboratorio de Suelos y Rocas FUNDEVI 0960. San José-Costa Rica, 2004.

[5] S. Mora and W. Vahrson, “Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard”. The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundations Engineering Tokyo, Japan, 1993. Pp. 56-60.

[6] S. Mora and W. Vahrson, “Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination,” presented at the I Simposio Panamericano de Deslizamientos de Tierra. Sociedad Ecuatoriana de Mecánica de Suelos y Rocas, Guayaquil, Ecuador, 1994, pp. 406-431.

[7] V. Pazos and W. Vinueza, “Contribución al Estudio sobre los deslizamientos en el Ecuador,” Tesis de Grado, Departamento de Geología, EPN, Quito, Ecuador, 1990.

[8] G. Plaza, “La amenaza y vulnerabilidad por deslizamientos en la región andina del Ecuador,” presentado en Séptimo Congreso Ecuatoriano de Geología, Minas, Petróleos y Medio Ambiente. Trabajos técnicos, Tomo: II, Quito, Ecuador, 1996, pp. 513-526.

[9] O. Proaño, “Estudio sobre la definición de parámetros hidrológicos que determina la susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos en Riobamba y Zaruma,” Hidrología, Quito, Ecuador, 2012.

[10] PMA-GCA, “Movimientos en Masa en la Región Andina, una Guía para la Evaluación de Amenazas,” PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO, Canadá, 2007.

[11] R. A. Van Zuidam, “Aerial photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping”, The Hague: Smits Publishers, 1986.

[12] R. Mora, P. Baldi, G. Casula, M. Fabris, M. Ghirotti, E. Mazzini and A. Pesci. “Global Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements: application to the Ca’ di Malta landslide (northern Apennines, Italy)”. Elsevier Science B. V.2002.

[13] T. L. Saaty. “Multicriteria decisión Making – The Analytic Hierarchy process”, Volume I, AHP Series, McGrawHill, New York, NY, 1990.

[14] M.D. Trifunac and A. G. Brady. “On Correlation of seismocope response with earthquake magnitude and modified mercalli intensity”. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol 65, No. 2. 1975.