

EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS MEDIANTE LÓGICA FUZZY Y TÉCNICAS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO EN LA AVENIDA SIMÓN BOLÍVAR, QUITO

LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING USING FUZZY LOGIC AND MULTI-CRITERIA EVALUATION TECHNIQUES ON SIMÓN BOLÍVAR HIGHWAY, QUITO

DANIELA SALCEDO¹, OSWALDO PADILLA², BYRON MORALES³, THEOFILOS TOULKERIDIS⁴.

^{1,3} CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL, DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN, UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS “ESPE”. Avenida General Rumiñahui s/n Sangolquí, Ecuador, dasalcedo@espe.edu.ec; bomorales1@espe.edu.ec.

^{2,4} GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOESPACIAL, DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN, UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS “ESPE”. Avenida General Rumiñahui s/n Sangolquí, Ecuador, ovpadilla@espe.edu.ec; ttoulkeridis@espe.edu.ec.

Recibido: 01 de julio de 2017 /Aceptado: 07 de septiembre de 2017

RESUMEN

Los deslizamientos son uno de los fenómenos más recurrentes en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), debido a sus condiciones naturales e intervención antrópica. Consecuencia de ello, la infraestructura vial ha sido mayoritariamente afectada, por lo que la presente investigación propone la evaluación de susceptibilidad a deslizamientos mediante lógica Fuzzy y técnicas de evaluación multicriterio en Sistemas de Información Geográfica (SIG) de la Avenida Simón Bolívar. Basado en el principio “Hoy y el pasado son claves para el futuro”; se localizaron deslizamientos mediante la interpretación de ortofotos y trabajo en campo, con un total de 45 zonas afectadas. En base a las características de deslizamientos históricos, fotointerpretados e investigaciones anteriores, se utilizaron como factores causales: topografía, geología, litología, precipitación, red hídrica, cobertura vegetal, entre otros. Cada factor fue procesado, analizado y estandarizado de acuerdo a su relación con el desencadenamiento de deslizamientos, mediante una función de pertenencia sinusoidal que asigno a cada elemento del universo un grado de pertenencia de 0 a 1 al conjunto difuso. El mapa de susceptibilidad a deslizamientos fue obtenido de la combinación de factores causales mediante álgebra de mapas y técnicas de ponderación, donde se incluyen: el proceso de análisis jerárquico (AHP) y combinación lineal ponderada (WLC), cuya validación consideró las localizaciones de deslizamientos inventariados. De acuerdo con el mapa de susceptibilidad, 5% del área de estudio directa posee susceptibilidad crítica, 19% alta, 58% media y 18% baja. La calidad del resultado se validó de acuerdo a su desviación estándar y valor de ajuste, siendo 0,162 y 83,80%, respectivamente.

Palabras clave: Mapa de susceptibilidad a deslizamientos, Lógica Fuzzy, SIG, Avenida Simón Bolívar.

ABSTRACT

Landslides are the most recurrent hazards in Metropolitan District of Quito (DMQ), due to their natural conditions and anthropic intervention. As a consequence, the road infrastructure has been mostly affected. The present research proposes the landslide susceptibility mapping using Fuzzy logic and multicriteria evaluation methods in Geographic Information Systems (GIS) on the Simón Bolívar highway. Based on the “Today and the past son key to the future” principle; landslides have been located using photointerpreted orthophotos and fieldwork, with a total of 45 affected areas. Based on the characteristics of historical, photointerpreted

landslides, and previous studies, the causal factors were: topography, geology, lithology, precipitation, water network, vegetation cover, among others. Each factor has been processed, analyzed and standardized according to its relationship to the occurrence of landslides, by means of a sinusoidal linkage function that assigns to each element a degree of membership from 0 to 1 to the diffuse set. The landslide vulnerability map has been obtained from the combination of causal factors by map algebra and weighting techniques that include: the hierarchical analysis process (AHP) and the weighted linear line (WLC), whose validation considered the locations of inventoried landslides. According to the susceptibility map, 5% of the direct study area has critical, 19% high, 58% average and 18% low sensitivity. The quality of the result has been validated according to their standard deviation and adjustment value, being 0,162 and 83, 80%, respectively.

Keywords: Landslide susceptibility map, Fuzzy Logic, GIS, Simón Bolívar Highway.

INTRODUCCIÓN

La Avenida Simón Bolívar es la vía con mayor circulación vehicular del DMQ, por ella transitan aproximadamente 74.469 vehículos al día (El Comercio, 2015). Sin embargo, existen seis zonas propensas a deslizamientos en la época invernal (El Comercio, 2012). Su implementación en zona montañosa, cercanía a cauces naturales, deficiente o ausente canalización de aguas lluvias, asentamientos humanos, descargas antitécnicas de aguas residuales y deforestación, han influido en la frecuencia de deslizamientos, donde sus constantes trabajos de remoción de tierra y mantenimiento representan una elevada inversión pública en rehabilitación y reconstrucción, incurriendo en altos niveles de congestionamiento, pérdidas humanas y materiales, con afección a infraestructuras y sectores comerciales.

En el 2011, la vía fue inhabilitada completamente durante dos semanas en el sector de la Forestal IV, debido al deslizamiento de 2.000 m³ de tierra (El Universo, 2011), el cual registró 5 personas fallecidas y 120 familias evacuadas (El Comercio, 2011). El DMQ invirtió USD\$ 636.478 dólares en obras de estabilización (Prensa Alcaldía de Quito, 2011).

Entre octubre del 2016 a mayo del presente año, el DMQ atendió 443 emergencias por deslizamientos (El Universo, 2017), USD\$ 14,7 millones de dólares fueron destinados al plan de prevención y respuesta por temporada de lluvias (2017), más USD\$ 2 millones de dólares del Fondo de Emergencia, donde se movilizaron a 1.870 funcionarios para prevención y atención de desastres (Prensa Alcaldía de Quito, 2017) (La Hora, 2017), gestión que ha sido recurrente durante años anteriores.

Los deslizamientos constituyen una de las amenazas naturales más perjudiciales en zonas montañosas (Ayala, et al., 2006). De acuerdo con las estadísticas del Centro para la Investigación sobre la Epidemiología de Desastres (CRED), son los causantes del 17% de todas las fatalidades de peligro natural en todo el mundo (Lacasse, et al., 2010). Las pérdidas económicas y sociales podrían ser reducidas, mediante una efectiva planificación (Rajakumar, et al., 2007).

El riesgo de deslizamiento (R), es usualmente descrito como una función de probabilidad y de consecuencia (Andersson-Skold, et al., 2014) (Ecuación 1).

$$R = f(P, C_i) \quad (1)$$

Donde P es la probabilidad de riesgo, y C es un vector C_i para todas las consecuencias potenciales. Cuantificar las consecuencias potenciales C_i , como pérdidas de vidas humanas o daños es difícil, debido a registros históricos incompletos o limitados que afectan a la estimación de población e infraestructura expuesta a riesgo (Grahn y Jaldell, 2016). Sin embargo, la probabilidad de riesgo (P) ha sido analizada desde diferentes enfoques de evaluación: cualitativo, cuantitativo y semi cuantitativos (Castellanos Abella y Van Westen, 2007).

Los mapas de susceptibilidad a deslizamientos son desarrollados a través de varios métodos, siendo los más utilizados: inventario de deslizamientos en base a técnicas probabilísticas, determinístico, heurístico y estadístico (Chiessi, et al., 2016) (Guzzetti, et al., 1999). Actualmente, se aplican técnicas no paramétricas como: autómatas celulares, lógica Fuzzy y redes neuronales artificiales (Pradhan, 2013) (Saro, et al., 2016) (Falaschi, et al., 2009) (Pradhan y Lee, 2010).

Las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) como: Sistemas de Información Geográfica (SIG), Sistemas Satelitales de Navegación Global (GNSS - GPS), Sensores Remotos (RS) e Infraestructura de Datos Espaciales (IDE); permiten la evaluación, identificación y manejo del riesgo por deslizamientos. El uso de los SIG se ha posicionado debido a su facilidad de recopilación y análisis de datos espaciales (Bayes, 2015) (Pradhan, 2013). Su combinación con análisis de decisión multicriterio, como: proceso de jerarquía analítica (AHP), combinación lineal ponderada (WLC), promedio ponderado ordenado entre otros, constituyen poderosas técnicas para el análisis y predicción de riesgos (Feizizadeh y Blaschke, 2013).

Los enfoques y métodos más adecuados para la evaluación de susceptibilidad y amenazas a deslizamientos no están definidos (Brabb, 1984), su selección dependerá de las características de la zona de estudio: información base, histórica, investigaciones desarrolladas y escala de trabajo (Hervás, et al., 2012).

La evaluación de riesgos a deslizamientos por medio de cartografía, facilita la comunicación con involucrados directos por afectaciones futuras y autoridades públicas (Andersson-Sköld, et al., 2013) (Kjellgren, 2013) (Andersson-Sköld, et al., 2014), que permite el desarrollo de estrategias efectivas para la gestión y prevención de riesgos, planificación urbana e implementación de infraestructura (Dahal y Dahal, 2017). De acuerdo con Brabb (1993), el 90% de las pérdidas podrían evitarse si el problema fuera previamente reconocido antes del evento (Pardeshi, et al., 2013).

El propósito del presente estudio es proponer un mapa de susceptibilidad a deslizamientos de la Avenida Simón Bolívar, mediante metodología de lógica Fuzzy

y evaluación multicriterio en SIG, que permita identificar áreas vulnerables y aplicar acciones preventivas en zonas de riesgo, para de este modo evitar: pérdidas humanas, materiales y económicas.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio indirecta (AEI) cubre una superficie de 393,3 Km², incluye parte de las Administraciones Zonales: Los Chillos, Quitumbe, Eloy Alfaro, Manuela Sáenz, Tumbaco, Eugenio Espejo, Calderón y La Delicia, fue seleccionada a fin de convalidar los resultados con registros históricos. El área de estudio directa (AED) de 22,53 Km², abarca un radio de influencia de 275 m a cada lado del eje principal de la Avenida Simón Bolívar, desde Turubamba hasta la Panamericana Norte (Figura 1).

La Avenida Simón Bolívar forma parte del anillo periférico oriental del DMQ, fue concebida dentro del plan de movilidad como solución de tráfico, al conectar los sectores norte, sur y valles aledaños (Distrito Metropolitano de Quito, 2009), a través de vías principales como la: Av. Pedro Vicente Maldonado, Av. Morán Valverde, Juan Bautista Aguirre, Autopista General Rumiñahui, Ruta Viva, Av. de los Conquistadores, Av. Interoceánica, Av. de los Granados, de los Nogales, de las Palmeras, El Inca (Google Earth Pro, 2017) y Av. Bicentenario (DMQ).

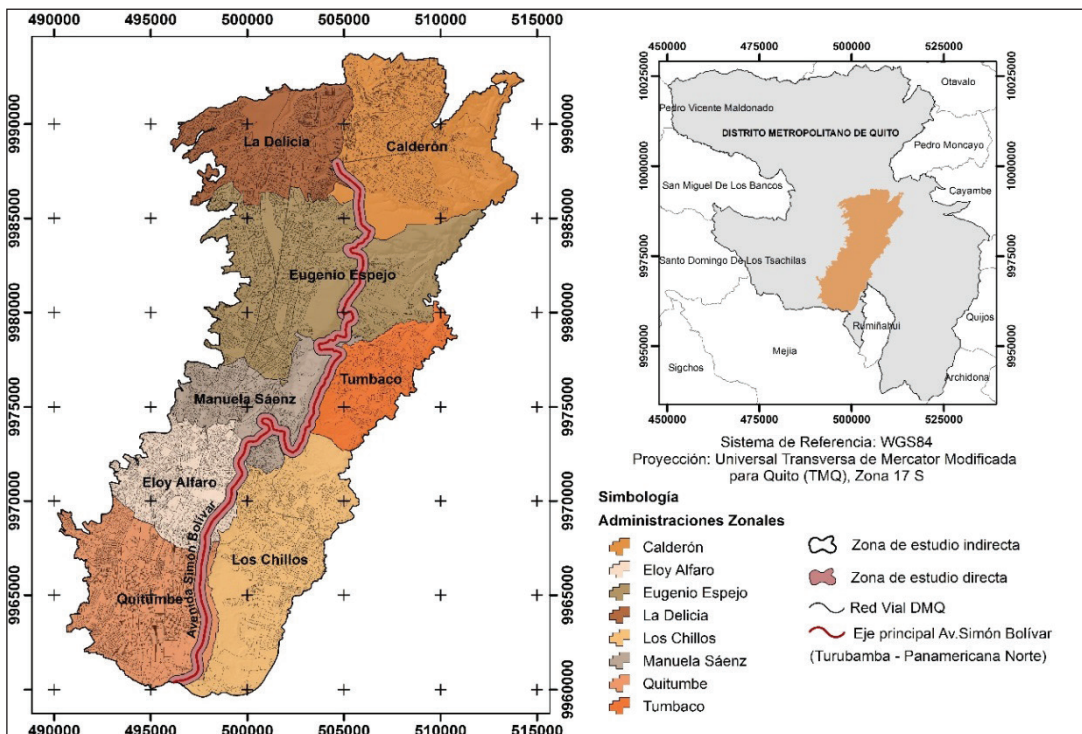


Figura 1. Mapa de localización área de estudio

Dentro del AED, el relleno volcánico – sedimentario comprende depósitos de lavas, aglomerados, tobas, cenizas volcánicas, capas de pómez y sedimentos indiferenciados contenidos en las formaciones geológicas: Machángara, Chiche y depósitos volcánicos primario y coluvial (INIGEMM). El río Machángara cruza la arteria vial en el sector de Guápulo, es una de las corrientes principales y más contaminada del DMQ (El Comercio, 2015), a la cual desembocan el 76,3% de las aguas residuales del Distrito (Reinoso, 2015). Las unidades de uso de suelo en esta zona son generalmente: infraestructura y cobertura vegetal, siendo esta última conformada por arbustos tanto húmedos como secos y vegetación cultivada latifoliadas. Las precipitaciones máximas se dan al sector sur y decrecen hacia el norte de la ciudad (Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad, 2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

Las áreas propensas a deslizamientos fueron determinadas por medio del método heurístico; análisis cualitativo donde se selecciona, jerarquiza, pondera y combina una serie de factores relacionados con la ocurrencia de deslizamientos, a través de herramientas de decisión aplicadas en SIG (Ciampalini, et al., 2016) (Andocilla, et al., 2012) que facilitan el manejo de información espacial, versatilidad de representación y calidad de resultados.

La metodología aplicada se basó en el principio “Hoy y el pasado son claves para el futuro”, el cual considera que: (1) Los deslizamientos futuros tendrán los mismos factores geológicos, geomorfológicos e hídricos que los ya suscitados en el pasado o en áreas cercanas anteriormente estudiadas; y (2) Los factores causales serán representados por medio de datos espaciales contenidos en una base de datos SIG que permitirá realizar la superposición difusa (Maryam, 2011).

Los factores causales fueron estandarizados por medio de una función de pertenencia, de acuerdo a la relación entre la variable dependiente (presencia o ausencia de deslizamientos) y, las variables independientes (deslizamientos/ factores causales). Los resultados obtenidos de cada mapa factor, se ponderaron mediante análisis jerárquico (AHP) de acuerdo a su relevancia con el desencadenamiento de deslizamientos.

DETERMINACIÓN DE FACTORES CAUSALES

Los factores causales o de inestabilidad se dividen en: condicionantes y desencadenantes. Los primeros, dependen de las características de la zona como: la topografía, geología, litología, tipo de suelo, drenajes y cobertura vegetal (Dahal y Dahal, 2017), mientras que, los segundos, incrementan la probabilidad de ocurrencia, siendo de origen natural como: sismos, intensidad de precipitación y erosión natural o de origen antrópico, debido al uso del suelo y operaciones de construcción (Singh, 2010). Ambos varían significativamente de una región a otra (Pardeshi, et al., 2013), por lo cual, es importante determinarlos por medio de un análisis retrospectivo. De acuerdo con Biju Abraham y Shaji (2013) los factores: geomorfológicos, pendiente, clima y la intervención humana juegan un rol importante.

La expansión de asentamientos en zonas inadecuadas como: laderas o bordes de cauces naturales, la implementación de caminos en región montañosa y los incendios forestales, han generado problemas de inestabilidad e incrementando el número de sectores vulnerables especialmente en invierno (Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad, 2015) (Silvers y Griffiths, 2010) (Fookes, et al., 1985).

En base al registro histórico de deslizamientos suscitados en la Avenida Simón Bolívar e investigaciones desarrolladas por el DMQ (Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad, 2015) y la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" (Andocilla, et al., 2012) (Zafir, et al., 2015) se establecieron como factores causales: topografía, geología, litología, cobertura vegetal, precipitación, red hídrica y vial, proporcionados por las fuentes descritas en la Tabla 1.

Tabla 1. Lista y fuente de cada variable usada en el estudio

Capas de datos	Fuente de información
Inventario de deslizamientos 1:5.000	Ortofotos: Ministerio de Agricultura Ganadería, Acuacultura y Pesca: Proyecto Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica SIGTIERRAS y Trabajo en campo
Topografía Red Hídrica 1:5.000	Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS)
Precipitación	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)
Red Vial 1:5.000	Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas
Fallas Geológicas 1:50.000	Secretaría del Ambiente del Municipio del Distrito Metropolitano Quito
Litología 1:50.000	
Cobertura Vegetal 1:25.000	

NORMALIZACIÓN, PONDERACIÓN Y EVALUACIÓN

Debido a que cada factor posee diferente escala de medida y representación cartográfica (vectorial o raster), para hacer un análisis multicriterio, las capas de entrada necesitaron ser estandarizadas (Ecuación 2) mediante lógica Fuzzy, donde se asigna a cada elemento un valor de membresía, de acuerdo al grado de pertenencia al conjunto. La función de membresía es de tipo sinusoidal cuyo valor oscilara entre 0 y 1, y está representada por las curvas seno (Figura 2) y coseno (Figura 3) en un rango de 0 a 90° ($\pi / 2$ radianes), su ocupación dependerá de la relación entre la variable analizada con la probabilidad de deslizamientos (Padilla, 2007) (Tabla 2). Los límites de la función corresponden a los valores máximos y mínimos de cada factor, donde se considera que todos los valores representan un nivel de riesgo.

$$N = \frac{V_o - V_{mín}}{V_{máx} - V_{mín}} \quad (2)$$

Donde: V_o : Valor original; V_{\min} : Valor mínimo y, V_{\max} : Valor máximo

A. Directamente proporcional (2^{do} Caso):

$$\mu_A(V_o) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{V_o - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}\right) \quad 0 \leq \mu_A(V_o) \leq 1 \quad (3)$$

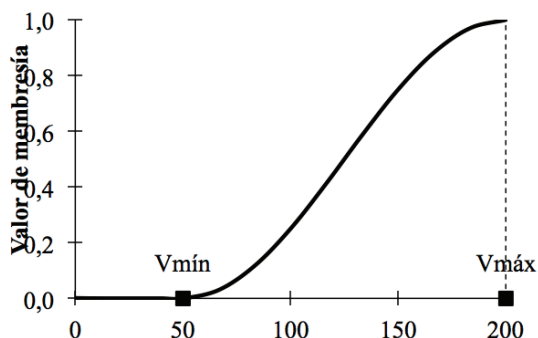


Figura 2. Función de pertenencia curva Seno rango de 0 a $\pi/2$ radianes (Padilla, 2007)

B. Inversamente proporcional (3^{er} Caso):

$$\mu_A(V_o) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{V_o - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}\right) \quad 0 \leq \mu_A(V_o) \leq 1 \quad (4)$$

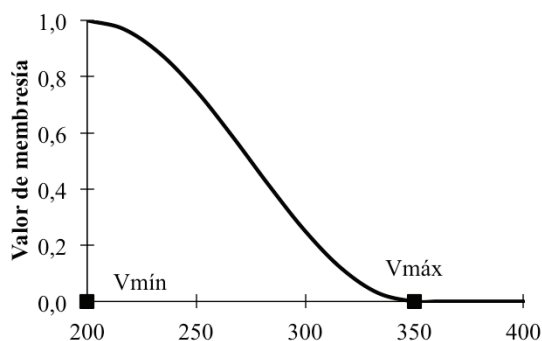


Figura 3. Función de pertenencia curva Coseno rango de 0 a $\pi/2$ radianes (Padilla, 2007)

Donde $\mu_A(V_o) = 1$, si V_o pertenece totalmente al conjunto, $\mu_A(V_o) = 0$ si V_o no pertenece al conjunto y $0 < \mu_A(V_o) < 1$ si V_o está parcialmente en el conjunto.

Tabla 2. Funciones de pertenencia para cada factor

Factor	Criterio de relación entre: Factor /Deslizamientos	Función de pertenencia sinusoidal
Pendiente, Precipitación y Cobertura Vegetal	Directamente proporcional	Senos
Litología, Distancia a: fallas geológicas, ríos y vías.	Inversamente proporcional	Cosenos

(*) Las funciones de pertenencia Seno y Coseno son evaluadas de 0° a 90°

Mapa de deslizamientos inventariados

Los deslizamientos fueron localizados e inventariados a través de ortofotos, donde se identificó: zonas de rotura, suelo desnudo y otras características geomorfológicas típicas. El mapa de deslizamientos inventariado permitió establecer la distribución espacial de los deslizamientos y determinar factores detonantes (Pradhan, 2013). Un total de 45 deslizamientos fueron identificados en la Avenida Simón Bolívar, por medio de fotointerpretación y comprobados en campo con el uso de GPS Navegador.

Mapa de pendientes

El mapa de pendientes del AEI fue generado a partir de las curvas de nivel; las altitudes varían desde los 1915 m.s.n.m. a 3380 m.s.n.m., donde la pendiente máxima es $88,68^\circ$, y la mínima corresponde a zonas planas con 0° (Figuras 4 y 5).

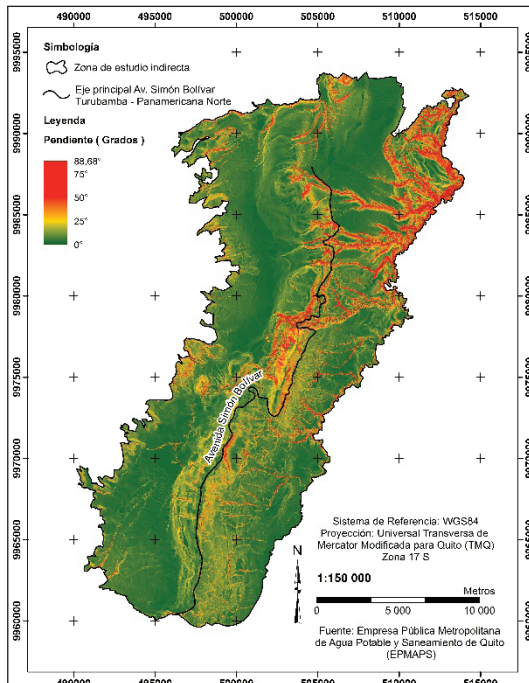


Figura 4. Mapa de pendientes

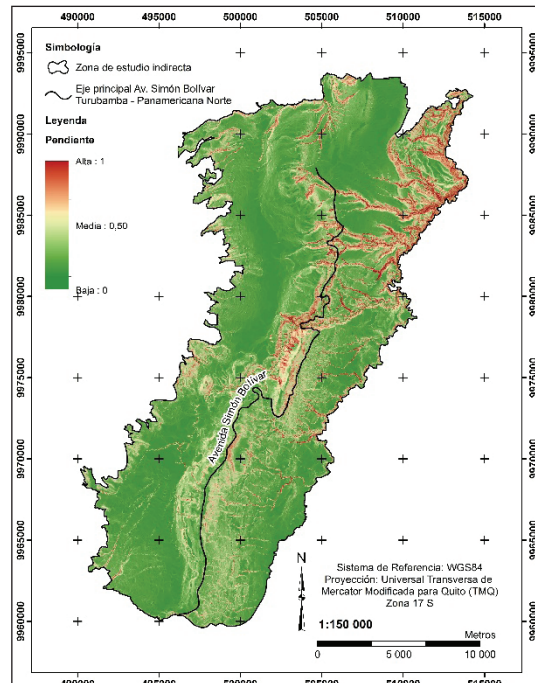


Figura 5. Pendiente normalizado

Mapa de cobertura vegetal

El mapa de cobertura vegetal fue ponderada de acuerdo a estudios similares dentro del DMQ (Zafirir, et al., 2015) (Loarte y Resl, 2013), para lo cual se utilizó un rango de susceptibilidad de 1 (Baja) a 5 (Muy Alta) (Tabla 3) (Figuras 6 y 7).

Tabla 3. Ponderación de Cobertura Vegetal Fuente: (Loarte y Resl, 2013)

NIVEL III	Ponderación
Vegetación cultivada coníferas: Pinos y Ciprés. Vegetación cultivada latifoliadas: Eucalipto adulto, Eucalipto joven y regeneración. Vegetación en regeneración natural: Bosque secundario, Matorral en regeneración, Suro con árboles y Suro con arbustos. Bosques húmedos: Bosques altimontanos norte andinos siempre verdes, Bosques bajos y arbustales altoandinos paramunos, Bosques montanos pluviales de los Andes del norte, Bosques pluviales piemontanos de los Andes del norte y Bosques siempre verdes estacionales montano bajos. Bosques secos: Bosque seco interandino y Vegetación ribereña del piso montano xerofítico. Agua en cauces artificiales: Reservorios.	1
Herbazales húmedos: Pajonales altimontanos y montanos paramunos y Pajonales edafoxerofilos altimontanos. Herbazales secos: Vegetación saxícola montana interandina de los Andes. Arbustos húmedos: Arbustales bajos y matorrales altoandinos paramunos y Arbustal montano de los Andes del norte. Arbustos secos: Arbustal secos interandinos. Infraestructura: Aeropuertos, Edificaciones e Invernaderos.	2
Pastos: Pasto natural. Agua en cauces naturales: Ríos.	3
Cultivos: Cultivos ciclo corto, Cultivos semipermanentes y permanentes y Suelos en preparación. Suelos desnudos de origen natural: Glaciares y Roca.	4
Pastos: Pasto cultivado. Suelos desnudos de origen natural: Arenales. Suelos desnudos de origen antropogénico: Suelos erosionados y Canteras.	5

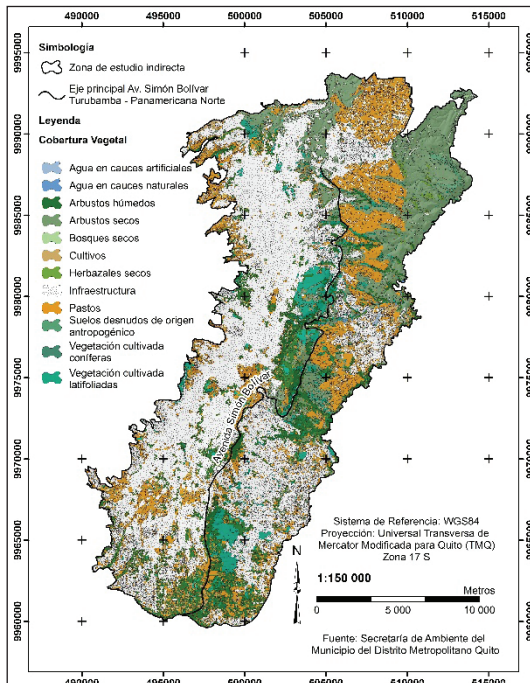


Figura 6. Mapa de cobertura vegetal

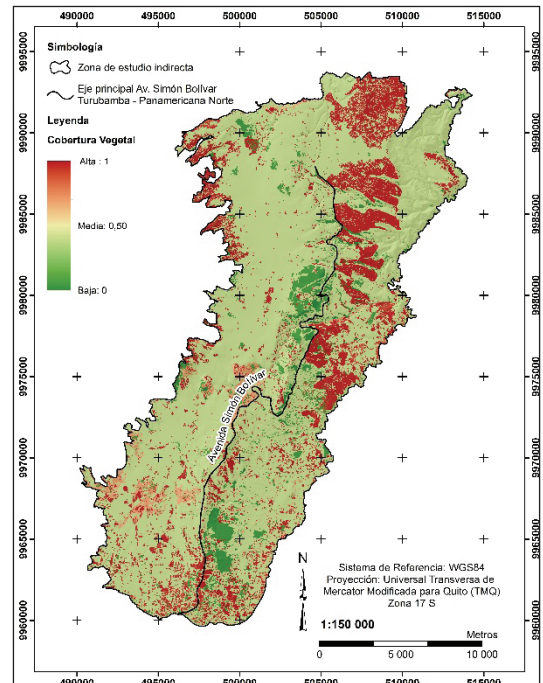


Figura 7. Cobertura vegetal normalizado

Mapa de precipitación

Los registros anuales de precipitación de 1991 – 2015 (25 años) fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), cuyas estaciones cercanas activas se describen en la Tabla 4. Los datos faltantes de precipitación, se estimaron por medio del el método de completación de razones promedio o de la razón normal (Ecuación 5), donde se considera la relación entre la estación “x” y sus estaciones cercanas en un período (UNESCO - ROSTALC, 1982).

$$P_x = \frac{1}{n} \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \dots + \left(\frac{N_x}{N_n} \right) P_n \right] \quad (5)$$

Donde: n: número de estaciones pluviométricas con datos registrados continuos cercanas a la estación “x”; P_x : Precipitación de la estación “x” durante el período de tiempo por completar; P_1 a P_n : Precipitación de las estaciones cercanas durante el período de tiempo a completar; N_x : Precipitación media anual de la estación “x” ; N_1 a N_n : Precipitación media anual de las estaciones cercanas (Monsalve, 2009).

La homogeneidad de los datos estimados se verificó por medio de análisis de dobles masas, que consiste en construir una curva doble acumulativa, en la que se relaciona los totales anuales acumulados de precipitación de la estación “x” y su estación cercana auxiliar (Monsalve, 2009). El coeficiente de correlación obtenido de la curva de doble masas para cada estación fue cercano a 1, lo que evidenció la homogeneidad de los datos. Los resultados se convalidaron mediante prueba de rachas, donde se ratificó su homogeneidad. La Tabla 4 expone los resultados de precipitación media anual de cada estación utilizada para la elaboración del mapa de Isoyetas (Figuras 8 y 9).

Tabla 4. Resultados precipitación media anual

Código	Estación	COORDENADAS		ELEVACIÓN	Precipitación Media Anual
		Latitud	Longitud	(m.s.n.m.)	(mm)
M0002	LA TOLA	0° 13' 54'' S	78° 22' 13'' W	2480	844,02
M0003	IZOBAMBA	0° 21' 57'' S	78° 33' 18'' W	3058	1467,21
M0335	LA CHORRERA	0° 12' 6'' S	78° 32' 6'' W	3165	1481,33
M0343	EL QUINCHE-PICHINCHA	0° 6' 31,2'' S	78° 17' 53'' W	2605	336,86
M0345	CALDERON	0° 5' 54'' S	78° 25' 15'' W	2645	546,00
M0353	R U M I P A M B A - PICHINCHA	0° 25' 51,8'' S	78° 25' 6,8'' W	2940	1853,86
M0354	SAN JUAN-P I C H I N C H A (CHILLOG.)	0° 17' 30,3'' S	78° 37' 27,6'' W	3440	1917,63
M0358	CALACALÍ INAMHI	0° 0' 5,9'' N	78° 30' 46,3'' W	2810	779,16
M0361	NONO	0° 2' 19,2'' S	78° 33' 50,8'' W	2710	946,81

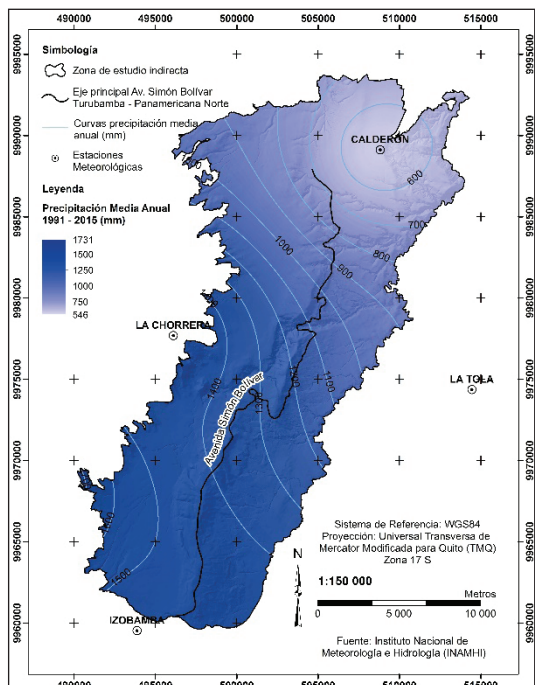


Figura 8. Mapa de isoyetas

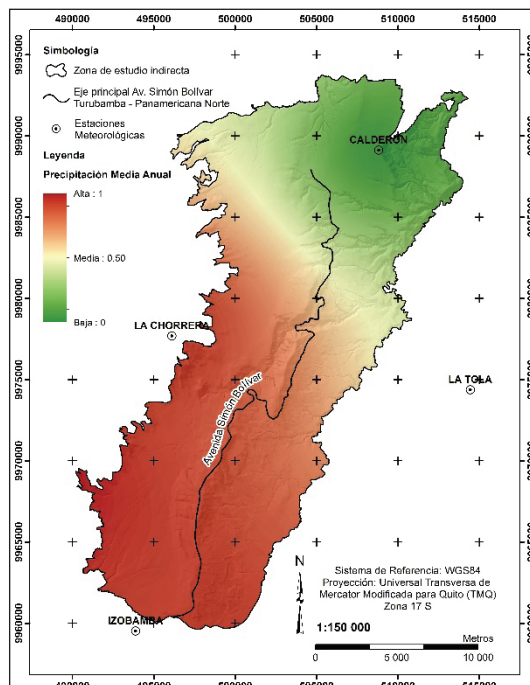


Figura 9. Isoyetas normalizado

Litología

El mapa de litología se ponderó con un rango de susceptibilidad de 1 (Muy Alta) a 6 (Baja) de acuerdo a la experiencia en campo (Ver Tabla 5). En zonas planas el efecto de la litología fue reducido por ausencia de vulnerabilidad a deslizamientos (Figuras 10 y 11).

Tabla 5. Ponderación Litología

Litología	Ponderación
Cauce de agua natural o artificial, Depósito Aluvial, Depósito lagunar de ceniza y Terraza Indiferenciada	6
Andesita	5
Aglomerado, Lava Indiferenciada y Depósitos Laharíticos	4
Cangahua sobre Depósitos Coluviales, Cangahua sobre sedimentos Chichi, Cangahua sobre sedimentos del Atacazo, Cangahua sobre Volcánicos del Pichincha, Cangahua sobre Volcánicos Ilaló, Cangahua sobre Volcánicos Indiferenciados, Cangahua sobre Volcano - sedimentos Machángara, Ceniza segunda fase, Ceniza y Lapilli de pómez	3
Terraza, tipo Cangahua y Volcano - sedimentos Machángara	2
Relleno y Relleno artificial	1,75
Depósito Coluvial, Terraza, Grava y Volcánicos Indiferenciados	1,50
Derrumbe , Sedimentos Chichi, Volcano - Sedimentos desordenados, Volcánicos Guayllabamba y Volcano - Sedimentos San Miguel	1

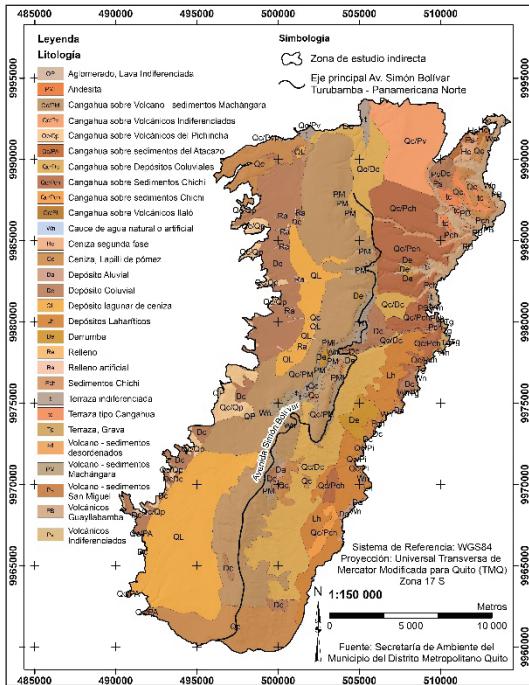


Figura 10. Mapa de litología

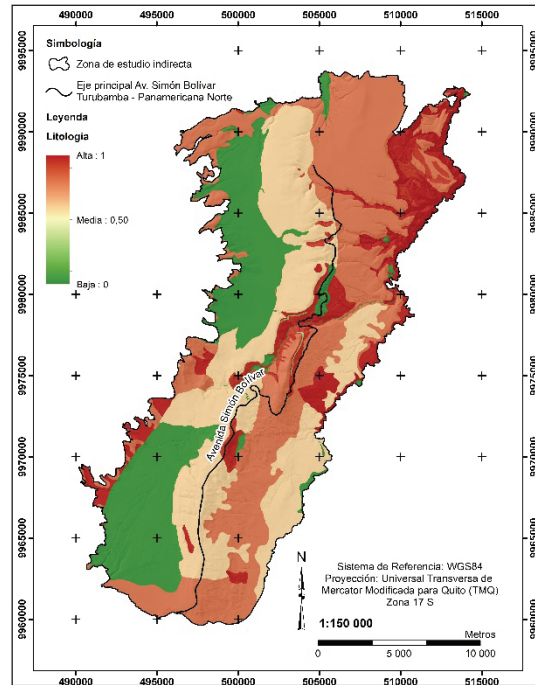


Figura 11. Litología normalizado

Otros mapas

Los parámetros geológicos, hídricos y viales se ejecutaron mediante un análisis de proximidad, donde se utilizó la herramienta “Euclidean Distance” (ArcGIS), la cual establece la distancia de cada celda en el raster hasta la fuente (falla geológica, río y vía) más cercana (Figuras 12, 13, 14, 15,16 y 17).

MÉTODO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP)

La ponderación depende de la comparación de criterios por pares y de la multiplicación entre los niveles jerárquicos respectivos (Castellanos Abella y Van Westen, 2007); los valores asignados oscilan entre 1/9 (“mucho menos importante que”); 1 (“igual importancia que”) y, 9 (“mucho más importante que”) (Saaty 1980) (Eastman, 2012).

Tabla 6. Análisis Jerárquico de factores causales

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	Ponderación
(1) Pendiente	1	3	9	2	8	7	6	0,379
(2) Precipitación	1/3	1	7	1/2	6	3	2	0,159
(3) Cobertura Vegetal	1/9	1/7	1	1/8	1/2	1/3	1/6	0,024
(4) Litología	1/2	2	8	1	7	6	3	0,246
(5) Distancia Vías	1/8	1/6	2	1/7	1	1/2	1/3	0,036
(6) Distancia Ríos	1/7	1/3	3	1/6	2	1	1/3	0,054
(7) Distancia Fallas Geológicas	1/6	1/2	6	1/3	3	3	1	0,102

*Coeficiente de consistencia (CR): 0,03

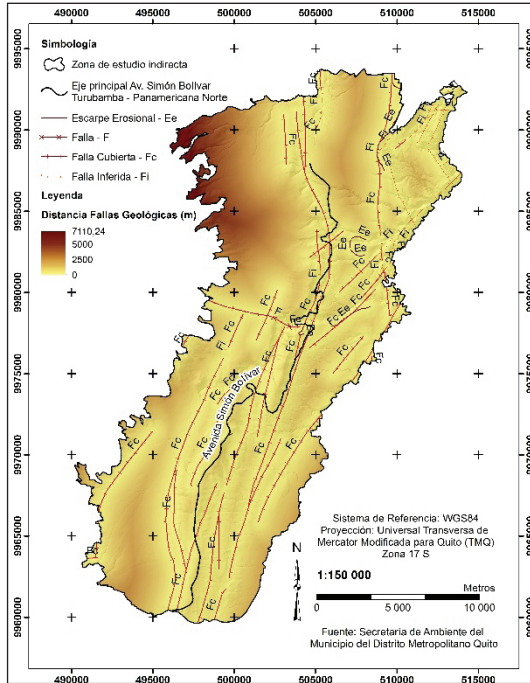


Figura 12. Mapa de distancia fallas geológicas

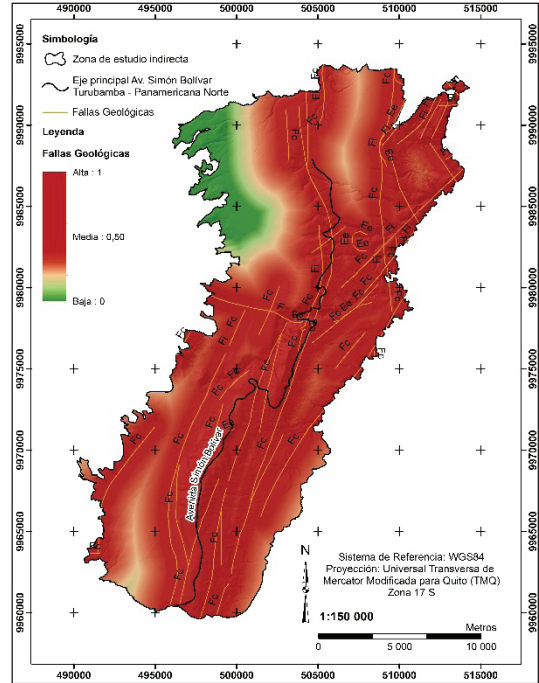


Figura 13. Fallas geológicas normalizado

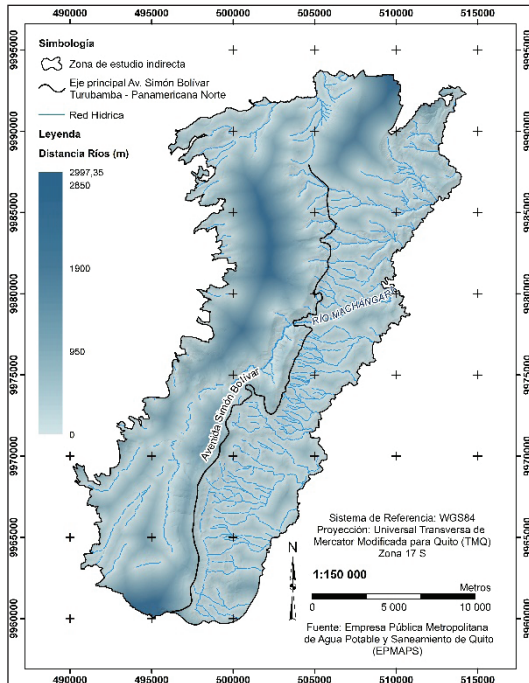


Figura 14. Mapa de distancia ríos

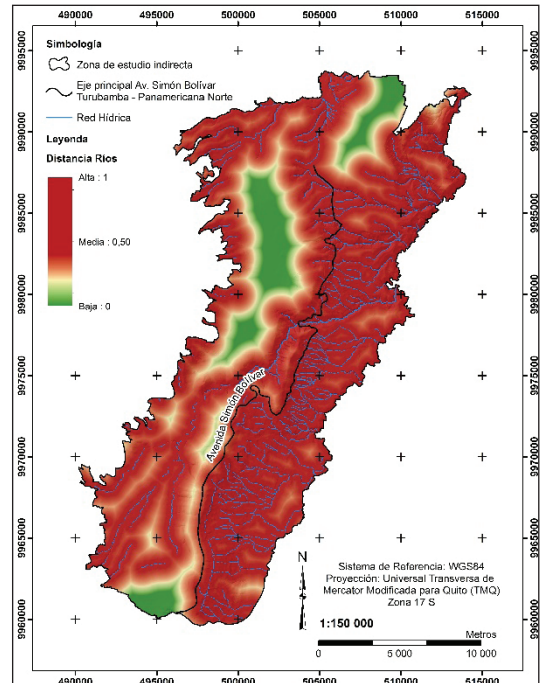


Figura 15. Distancia ríos normalizado

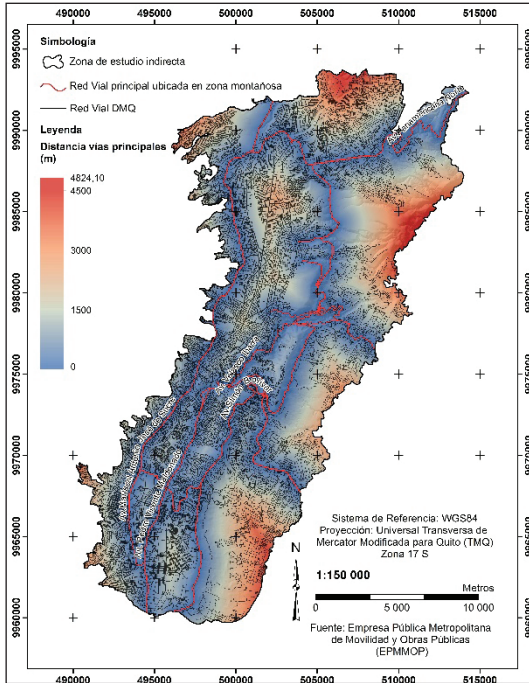


Figura 16. Mapa de distancia vías

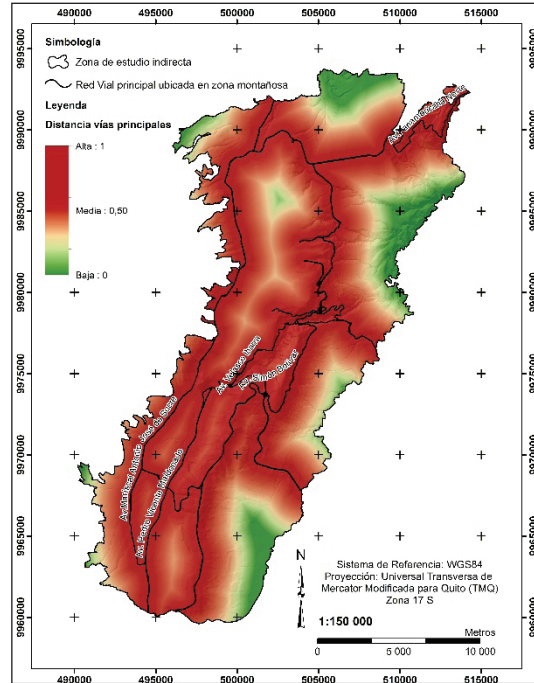


Figura 17. Distancia vías normalizado

SUMA LINEAL PONDERADA (WLC)

El mapa de susceptibilidad es el resultado de la combinación de factores causales con sus respectivas ponderaciones obtenidas del AHP como se muestra en la Ecuación 6.

$$I = \sum_{j=1}^n W_j \times x_{ij} \tag{6}$$

Dónde: I: índice de susceptibilidad, W_j : peso del factor j, x_{ij} : valor normalizado de cada mapa y n: número de factores.

Obteniendo como resultado:

$$f(x) = 0,379 x_1 + 0,246 x_2 + 0,159 x_3 + 0,102 x_4 + 0,054 x_5 + 0,036 x_6 + 0,024 x_7 \tag{7}$$

Donde: x_1 :Pendiente; x_2 :Litología; x_3 : Precipitación; x_4 : Distancia fallas geológicas; x_5 : Distancia ríos; x_6 : Distancia vías y, x_7 : Cobertura vegetal.

AJUSTE DEL MODELO

El ajuste se sustentó en base a la desviación estándar del mapa de susceptibilidad resultante (Ecuación 9).

$$N = Valor_{Medido} - Valor_{Calculado} \quad (8)$$

$$N = 1 - \sigma \quad (9)$$

Donde: N: Ajuste ; Valor_{Medido} : 1 o valor de los puntos de muestra y, Valor_{Calculado}: desviación estándar del mapa resultante (σ).

RESULTADOS

El nivel de riesgo por deslizamiento fue clasificado de acuerdo con (Anbalagan, 1992) basado en el modelo de lógica Fuzzy obtenido en un rango de 0 a 1 (Maryam, 2011) y representados en escalas de color (Tabla 7).

Tabla 7. Zonificación de susceptibilidad a deslizamiento de acuerdo a las funciones de membresía difusas de salida (Maryam, 2011).

Zona	Función de membresía Fuzzy	Descripción nivel de susceptibilidad	Escalas de color
I	< 0,10	Nula	Verde oscuro
II	0,10 – 0,40	Baja	Verde claro
III	0,40 – 0,60	Media	Amarillo
IV	0,60 – 0,75	Alta	Naranja
V	> 0,75	Crítica	Rojo

El mapa de susceptibilidad obtenido de la combinación de metodología Fuzzy y evaluación multicriterio posee una desviación estándar (σ) de 0,162 con un valor de ajuste (N) de 83,80%. Donde el 2% del AEI posee susceptibilidad crítica, 10% alta, 37% media, 49% baja y 2% nula. Dentro del AED, el 5% posee susceptibilidad crítica, 19% alta, 58% media y 18% baja. Los resultados obtenidos coinciden con la distribución espacial de deslizamientos inventariados, registros históricos en zonas como: La Ferroviaria, Guápulo, Oswaldo Guayasamín, Conexión Granados, entre otras (Figura 18) e investigaciones realizadas por la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", donde se destaca la vulnerabilidad de vías principales como la Av. Simón Bolívar (Zafrir, et al., 2015), Av. Velasco Ibarra y la Autopista General Rumiñahui (Andocilla, et al., 2012).

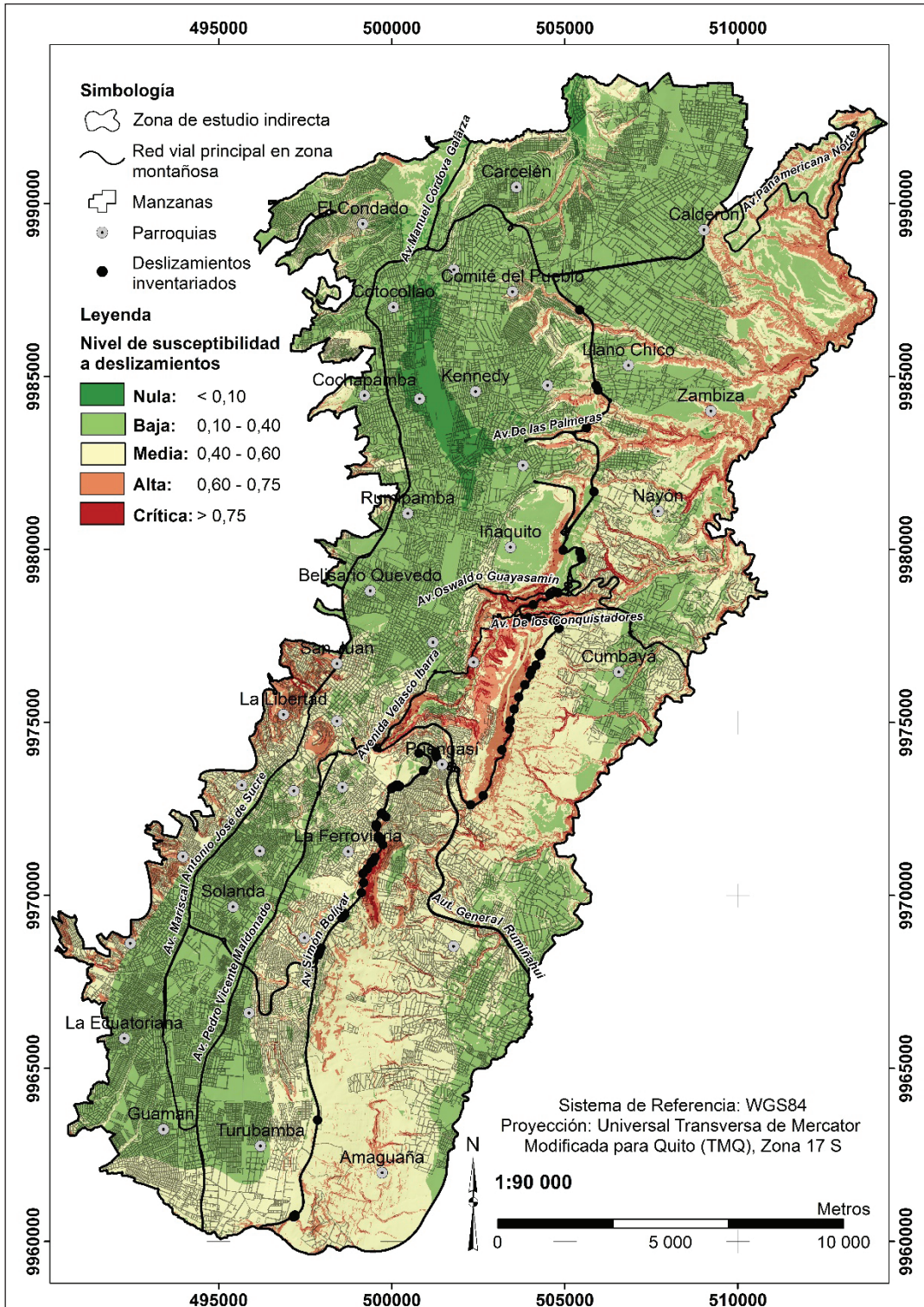


Figura 18. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos derivado del método de análisis jerárquico (AHP)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El nivel de susceptibilidad a deslizamientos en la Av. Simón Bolívar varía entre media a alta, donde los sectores más críticos se ubican en las parroquias: La Ferroviaria, Puengasí e Itchimbía. Un análisis preventivo de las zonas descritas, evitaría costos de mantenimiento y estabilización futuros.

Los parámetros y la metodología seleccionados para la zona de estudio, se consideran adecuados, debido a que coinciden con: los factores establecidos en campo, la distribución espacial de deslizamientos inventariados, estudios desarrollados por el DMQ y la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE". En donde se destaca la importancia de la topografía y la geología, debido a su efecto en factores detonantes como la precipitación e intervención antrópica. Los parámetros sociales como: uso del suelo, evolución de la mancha urbana en áreas ilegalmente constituidas e implementación de infraestructura estratégica al borde de laderas, deben ser incluidos dentro de los factores causales. El inventario de recursos afectados y en riesgo potencial por medio de análisis multitemporales, facilitaría estimar las pérdidas humanas y económicas que los deslizamientos han generado y que podrían generarse en el futuro afectando al sector público y privado.

A pesar de la limitada disponibilidad y calidad de los datos fuente, la cartografía de vulnerabilidad a deslizamientos expresa una buena estimación. Sin embargo, la metodología Fuzzy combinada con análisis multicriterio tendría una mejor correlación, si la información base de cada factor proporcionada por las entidades competentes, estuviera actualizada, validada y a escalas de mayor precisión.

La cartografía de susceptibilidad a deslizamientos, es una herramienta útil para planificación urbana e implementación de infraestructura estratégica como corredores viales; debido a que permite ubicar nuevas zonas vulnerables, más allá de las históricamente reconocidas. Constituye la línea base para desarrollar cartografía de zonificación geotécnica y sísmica dentro del DMQ.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Geografía y del Medio Ambiente, y a los docentes: Ing. Eugenio Villacis, Ing. Eduardo Kirby e Ing. Mario Cruz por su colaboración y asesoría técnica. El presente proyecto contó con el aporte documental de información geográfica de las instituciones estatales: Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS), El Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS), Instituto Geográfico Militar (IGM) y la Alcaldía del Distrito Metropolitano de Quito a través de sus distintas dependencias.

REFERENCIAS

- Anbalagan, R. (1992). Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology*, 32, 269 - 277.
- Andersson-Sköld, Y., Bergman, R., Johansson, M., Persson, E., y Nyberg, L. (2013). Landslide risk management—A brief overview and example from Sweden of current situation and climate change. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 3, 44 – 61.
- Andersson-Sköld, Y., Falemo, S., y Trembaly, M. (2014). Development of methodology for quantitative landslide risk assessment-Example Gota river valley. *Natural Science*, 6, 130 - 143.
- Andocilla, L., Padilla, O., y Cruz, M. (2012). Implementación del algoritmo de lógica Fuzzy aplicado a la determinación del grado de susceptibilidad a deslizamientos en el área Monjas - Ferroviaria - La Magdalena - Itchimbía del Distrito Metropolitano de Quito. *Revista Geoespacial*, 9, 12 - 29.
- Ayala, A., Chavez, E., y Parrot, J. (2006). Landsliding related to land- cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico. *CATENA*, 65, 152 - 165.
- Bayes, A. (2015). Landslide susceptibility mapping using multi-criteria evaluation techniques in Chittagong Metropolitan Area, Bangladesh. *Landslides*, 12, 1077 – 1095.
- Biju Abraham, P., y Shaji, E. (2013). Landslide hazard zonation in and around Thodupuzha-Idukki-Munnar road, Idukki district, Kerala: A geospatial approach. *Journal of the Geological Society of India*, 82, 649 – 656.
- Brabb, E. (1993). Proposal for worldwide landslide hazard maps. *Proceedings of 7th International Conference and field workshop on landslide in Czech and Slovak Republics*, 15 – 27.
- Brabb, E. (1984). Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. *4th International Symposium on Landslides*, 307 - 323.
- Castellanos Abella, E., y Van Westen, C. J. (2007). Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi - criteria evaluation. *Landslides*, 4, 311 – 325.
- Chiessi, V., Toti, S., y Vitale, V. (2016). Landslide susceptibility assessment using conditional analysis and rare events logistics regression: A case - Study in Antrodoco Area (Rieti, Italy). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 4, 12, 1 - 21.
- Ciampalini, A., Raspini, F., Bianchini, S., Lagomarsino, D., y Moretti, S. (2016). A landslide susceptibility map of the Messina Province (Sicily, Italy). *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*, 1, 657 – 661.
- Dahal, B. K., y Dahal, R. K. (2017). Landslide hazard map: tool for optimization of low-cost mitigation. *Geoenvironmental Disasters*, DOI: 10.1186/s40677-017-0071-3.
- Distrito Metropolitano de Quito. (2009). Plan Maestro De Movilidad Para El Distrito Metropolitano De Quito: 2009-2025. <http://bit.ly/2ut9GrJ>. Ingresado: 06 de febrero de 2017.
- Eastman, J. R. (2012). *The IDRISI Selva Tutorial Manual Version 17*. Clark Labs. <http://bit.ly/2v0RXuC>. Ingresado: 29 de mayo de 2017.
- El Comercio. (2011). Estudios En La Forestal No Terminan. <http://bit.ly/2eIqLDV>. Ingresado: 10 de julio de 2017.
- El Comercio. (2012). Deslizamientos e Inundaciones Por Lluvias. <http://bit.ly/2eI0lZk>. Ingresado: 10 de julio de 2017.
- El Comercio. (2015). La Mayor Contaminación En Ríos y Quebradas Está En 8 Sitios Del Sur. <http://bit.ly/1DEFo4C>. Ingresado: 3 de marzo de 2017.

- El Comercio. (2015). 2 Avenidas y 38 Barrios Propensos A Deslizamientos En Quito. <http://bit.ly/1MyS3Xz>. Ingresado: 10 de julio de 2017.
- El Comercio. (2015). La Mariscal Sucre, Segundo Puesto En El ‘Top Ten’ De Las Más Transitadas De Quito. <http://bit.ly/1KY3zhh>. Ingresado: 18 de enero de 2017.
- El Universo. (2011). Cinco Muertos Por Alud En Transitada Vía Quiteña. <http://bit.ly/2wgU3Hq>. Ingresado: 23 de julio de 2017.
- El Universo. (2017). Municipio De Quito Destinó Más De 15 Millones De Dólares Para La Época Invernal. <http://bit.ly/2uQrpfp>. Ingresado: 15 de junio de 2017.
- Falaschi, F., Giacomelli, F., Federici, P., Puccinelli, A., D’Amato Avanzi, G., Pochini, A., y Ribolini, A. (2009). Logistic regression versus artificial neural networks: Landslide susceptibility evaluation in a sample area of the Serchio River valley, Italy. *Natural Hazards*, 50, 551- 569.
- Feizizadeh, B., y Blaschke, T. (2013). GIS-multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: comparing three methods for the Urmia lake basin, Iran. *Natural Hazards*, 65, 2105 – 2128.
- Fookes, P., Sweeney, M., Manby, C., y Martin, R. (1985). Geological and geotechnical engineering aspects of low-cost roads in mountainous terrain. *Engineering Geology*, 21, 1-152.
- Grahn, T., y Jaldell, H. (2016). Assessment of data availability for the development of landslide fatality curves. *Landslides*, 14, 3, 1113–1126.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., y Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31, 181–216.
- Hervás, J., Barredo, J., y Lomoschitz, A. (2012). Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante SIG, Teledetección y Métodos de evaluación multicriterio. Aplicación a la depresión de Tirajana(Gran Canaria). Instituto Geológico y Minero de España, 169 - 180. <http://repositorio.ulpgc.es/bitstream/10553/1743/1/5272.pdf>. Ingresado: 25 de marzo de 2017.
- Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM). Mapas Geológicos A Escala 1:50000 De: Quito(1978), Sangolquí(1980) y El Quinche (1980). <http://bit.ly/2tEmChh>. Ingresado: 5 de enero de 2017.
- Kjellgren, S. (2013). Exploring local risk managers’ use of flood hazard maps for risk communication purposes in Baden-Württemberg. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 1857 – 1872.
- La Hora. (2017). Se Declara Emergencia Debido Al Temporal. <http://bit.ly/2tTUEJD>. Ingresado: 5 de abril de 2017.
- Lacasse, S., Nadim, F., y Kalsnes, B. (2010). Living with landslide risk. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 41,4. <http://bit.ly/2v0RqZU>.
- Loarte, G., y Resl, R. (2013). Determinación De Zonas Susceptibles A Movimientos En Masa Por Factores Condicionantes y Desencadenantes En La Parroquia Lloa, Del Cantón Quito en la provincia de Pichincha. Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador.
- Maryam, I. (2011). A comparative study of fuzzy logic approach for landslide susceptibility mapping using GIS: An experience of Karaj dam basin in Iran. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 19, 668 - 676.
- Monsalve, G. (2009). Hidrología En La Ingeniería (2da ed.). Colombia.
- Padilla, O.(2007). Fundamento teórico para modelización de variables ambientales mediante operadores difusos. *Revista Geoespacial*,4.

- Pardeshi, S. D., Autade, S. E., y Pardeshi, S. S. (2013). Landslide hazard assement: recent trends and techniques. SpringerPlus. DOI: 10.1186/2193-1801-2-523.
- Pradhan, B. (2013). A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences*, 51, 350 – 365.
- Pradhan, B., y Lee, S. (2010). Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling & Software*, 25, 747 – 759.
- Prensa Alcaldía de Quito.(2011). Última Fase Para Estabilizar Talud En La Forestal. <http://ow.ly/8SO730dS9bU>. Ingresado: 9 de julio de 2017.
- Prensa Alcaldía de Quito. (2017). Alcalde Rodas Declaró En Emergencia Al Distrito Metropolitano Por Fuerte Invierno. <http://ow.ly/fdpX30dS9iR>. Ingresado: 12 de julio de 2017.
- Prensa Alcaldía de Quito. (2017). Municipio Atiende Emergencias Por Deslizamientos. <http://ow.ly/tj1K30dS9sB>. Ingresado: 9 de julio de 2017.
- Rajakumar, R., Sanjeevi, S., Jayaseelan, S., Isakkipandian, G., Edwin, M., Balaji, P., y Ehanthalingam, G. (2007). Landslide susceptibility mapping in a hilly terrain using remote sensing and GIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 35, 31 – 42.
- Reinoso Chisaguano, I. C. (2015). Evaluación Ambiental Del Río Machángara. Escuela Politécnica Nacional. <http://bit.ly/2tuZYUr>. Ingresado: 25 de enero de 2016.
- Saro, L., Woo, J. S., Kwan-Young, O., y Mounng-Jin, L. (2016). The spatial prediction of landslide susceptibility applying artificial neural network and logistic regression models: A case study of Inje, Korea. *Open Geosciences*, 8, 117 - 132.
- Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad del DMQ. (2015). Atlas De Amenazas Naturales y Exposición De Infraestructura Del Distrito Metropolitano De Quito (Vol. Segunda Edición). Quito, Ecuador. <http://bit.ly/1jrolNv>. Ingresado: 18 de enero de 2017.
- Silvers, K., y Griffiths, J. (2010). Landslide Affecting The Vía Interoceánica, East Of Quito, Ecuador. IAEG2006. <http://bit.ly/2tDX5F1>. Ingresado: 5 de abril de 2017.
- Singh, A. K. (2010). Bioengineering techniques of slope stabilization and landslide mitigation. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 19, 384 - 397.
- UNESCO - ROSTALC. (1982). Guía Metodológica Para La Elaboración Del Balance Hídrico Para América Del Sur. Montevideo, Uruguay: Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe. <http://bit.ly/2tuY1ao>. Ingresado: 4 de febrero de 2017.
- Zafirir, R., Padilla, O., y Cruz, M. (2015). Estimación De La Probabilidad De Ocurrencia De Deslizamiento Mediante El Método Fuzzdes En La Zona Urbana De La Administración Zonal Norte Eugenio Espejo del Distrito Metropolitano De Quito. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE - Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. Sangolquí, Ecuador.