



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA VIAL

Análisis de los deslizamientos en la vía Loja – Zamora abscisa 30+600 hasta 55+200, a partir de la integración lluvia, pendiente y formación geológica superficial.

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTOR: Álvarez Benítez, Marco Antonio

DIRECTOR: Oñate Valdivieso, Fernando Rodrigo, PhD

LOJA - ECUADOR

2018



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2018

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

PhD.

Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación, denominado Análisis de los deslizamientos en la vía Loja – Zamora abscisa 30+600 hasta 55+200, a partir de la integración lluvia, pendiente y formación geológica superficial, realizado por Álvarez Benítez Marco Antonio, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, abril de 2018

f).....

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo Álvarez Benítez Marco Antonio declaro ser el autor del presente trabajo de titulación: Análisis de los deslizamientos en la vía Loja – Zamora abscisa 30+600 hasta 55+200, a partir de la integración lluvia, pendiente y formación geológica superficial, de la Titulación Magister en Ingeniería Vial, siendo Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, concepto, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigado, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Formar parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f).....

Autor: Álvarez Benítez Marco Antonio.

Cedula: 1900521533

DEDICATORIA

El presente trabajo se está dedicado para la gloria y honra de Jesucristo, pues Él coloca en nuestros corazones el poder como el hacer.

A mis apreciados padres y enamorada por el apoyo brindado en este proceso.

Marco Antonio

AGRADECIMIENTO

A Jesucristo por darme sabiduría y discernimiento para cumplir los objetivos planteados.

A mis queridos padres Marco y Sonia por su amor y comprensión.

A mis queridos hermanos Diego Fernando, María Belén y Marco Vinicio por su aprecio y estima.

A mi querida enamorada Dalila, gracias su apoyo incondicional.

Al PhD Fernando Oñate y Mgs Carmen Esparza por su orientación y ánimos a continuar hacia la excelencia.

Marco Antonio

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
1. MARCO TEÓRICO	6
1.1. Umbrales de precipitación.....	7
1.2. Mapas de susceptibilidad a movimientos en masa.....	8
2. MATERIALES Y MÉTODOS	10
2.1. Características de la zona de estudio	11
2.1.1. Ubicación geográfica.....	11
2.1.2. Modelo elevación digital.....	11
2.1.3. Hidrografía.....	12
2.1.4. Cobertura Vegetal.....	13
2.1.5. Precipitaciones.....	14
2.1.6. Características geológicas.....	15
2.2. Umbrales de precipitación.....	18
2.2.1. Datos y metodología.....	18
2.3. Mapas de susceptibilidad.....	21
2.3.1. Procesamiento de imágenes satelitales.....	21

2.3.2. Variables consideradas para elaborar el mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.	22
2.3.3. Valoración y normalización de variables.	23
2.3.4. Determinación de los valores de ponderación.....	24
2.3.5. Algebra de mapas.....	25
2.3.6. Rangos de susceptibilidad.	25
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	26
3.1. Definición de umbrales críticos de lluvia.....	27
3.2. Mapas de susceptibilidad.....	32
3.2.1. Normalización de variables.	32
3.2.2. Resultado de la ponderación mediante el análisis multicriterio propuesto por Saaty.	34
3.2.3. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa.	35
CONCLUSIONES.....	39
RECOMENDACIONES.....	40
BIBLIOGRAFIA.....	41
ANEXOS.....	43
ANEXO 1. PRECIPITACIONES DE LA ESTACIÓN SAN FRANCISCO.....	44
ANEXO 2. INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA EN LA ZONA DE ESTUDIO.	47
ANEXO 3. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA DE LA VÍA LOJA ZAMORA TRAMO 30+600 HASTA 55+200.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Precipitación y movimientos en masa periodo 2013-2016.....	3
Figura 2.1: Ubicación del área de estudio	11
Figura 2.2: Modelo de elevación de la zona de estudio.....	12
Figura 2.3: Recursos hídricos de la zona de estudio.....	13
Figura 2.4: Cobertura vegetal de la zona de estudio	14
Figura 2.5: Precipitación promedio anual del periodo 1998-2008 de la zona de estudio	15
Figura 2.6: Mapa geológico de la zona de estudio	16
Figura 2.7: Deslizamiento traslacional en el kilómetro 35+850.....	17
Figura 2.8: Desprendimientos de rocas en el kilómetro 49+235.....	17
Figura 2.9: Movimientos en masa en la zona de estudio.....	19
Figura 2.10. Definición de umbrales de precipitación	20
Figura 2.11: Imagen satelital y puntos evidencia para fotointerpretación	22
Figura 2.12: Mapa de cobertura vegetal.....	24
Figura 3.1: Lluvia acumulada (LA) de 1 día contra Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días.	27
Figura 3.2: Lluvia acumulada (LA) de 3 días contra Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días.....	28
Figura 3.3: Lluvia acumulada (LA) de 5 días contra Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días.....	29
Figura 3.4: Lluvia acumulada (LA) de 7 días contra Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días.....	30
Figura 3.5: Mapa de pendientes de la zona de estudio	33
Figura 3.6: Mapa de susceptibilidad y detalle movimientos en masa en la zona de estudio.	36
Figura 3.7: Deslizamiento traslacional y tipo de material predominante ubicado en la abscisa 30+600,	37
Figura 3.8 Movimiento en masa complejo (movimiento traslacional en cabecera y flujo de pie) en la abscisa 44+200.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Escala fundamental para comparación a pares.....	9
Tabla 1.2: Esquema del método de evaluación Multicriterio de las Jerarquías Analíticas para asignación de pesos.	9
Tabla 2.1. Inventario de deslizamientos.....	19
Tabla 2.2: Ubicación de la estación pluviométrica.....	20
Tabla 2.3: Variables consideradas para la evaluación de susceptibilidad	22
Tabla 2.4: Rango de pendiente considerados por diferentes investigadores.....	23
Tabla 3.1: Normalización de la variable geología en la zona de estudio.	32
Tabla 3.2: Normalización de la variable pendiente en la zona de estudio.	32
Tabla 3.3: Normalización de la variable cobertura vegetal en la zona de estudio.....	33
Tabla 3.4: Normalización de la variable precipitación de la zona de estudio.	34
Tabla 3.5: Resultados de la ponderación de variables consideradas para la elaboración del mapa de susceptibilidad.....	34

RESUMEN

Los movimientos en masa en la vía Loja – Zamora, han ocasionado malestar e inseguridad a sus usuarios, con la finalidad de identificar las zonas con mayor probabilidad a movimientos en masa y determinar las lluvias críticas para la ocurrencia de movimientos en masa se planteó el proyecto Análisis de los deslizamientos en la vía Loja – Zamora abscisa 30+600 hasta 55+200, a partir de la integración lluvia, pendiente y formación geológica superficial, el análisis corresponde a determinar los umbrales de precipitación y la elaboración de un mapa de susceptibilidad para la ocurrencia de movimientos en masa. Para determinar los umbrales de precipitación se utilizó el método empírico, y para elaborar el mapa de susceptibilidad se empleó el método heurístico con el análisis multicriterio de SAATY las variables consideradas son la geología, pendiente, cobertura de suelo y precipitación. Los resultados indican que la lluvia acumulada antecedente es el detonante en la ocurrencia de movimientos en masa. Del análisis multicriterio la geología es el condicionante con mayor incidencia para la ocurrencia de movimientos en masa.

Palabras clave: movimientos en masa; umbrales de precipitación; susceptibilidad.

ABSTRAC

The mass movements in the Loja - Zamora road have caused discomfort and insecurity in its users, in order to identify the areas most likely in mass movements and determined the rains critical for the occurrence of movements in the mass the project Analysis of landslides on the Loja - Zamora road abscissa 30 + 600 up to 55 + 200 was proposed, based on the information rain, slope and shallow geological formation, the analysis corresponds to the thresholds of precipitation and the preparation of a susceptibility map for the occurrence of mass movements. To determine the precipitation thresholds, the empirical method was used, and to elaborate the susceptibility map, the heuristic method was used with the multicriteria analysis of SAATY. The variables considered are geology, slope, soil cover and precipitation. The results indicate that the previous accumulated rain is the trigger in the occurrence of mass movements. From the multicriteria analysis, geology is the determining factor with the greatest incidence for the occurrence of mass movements.

Keywords: mass movements; precipitation thresholds; susceptibility

INTRODUCCIÓN

Los movimientos de ladera son eventos que han generado cuantiosas pérdidas económicas y humanas alrededor de todo el mundo, especialmente en países montañosos debido a sus características fisiográficas y socioeconómicas, presentan una alta probabilidad de ocurrencia de este tipo de procesos (Aristizábal et al., 2011). De acuerdo a (Guha-Sapir, Hoyois, & Below, 2014) en el año 2014 se presentaron 324 desastres naturales alrededor del mundo, que afectan a 140,8 millones de personas y han generado pérdidas económicas superiores a 99.820 millones de dólares. Del total de desastres ocurridos, el 47.2 % corresponden a eventos hidrológicos (inundaciones y movimientos de masa detonados por lluvias). Los datos indicados pueden dimensionar la problemática de la influencia de las lluvias en la ocurrencia de movimientos en masa.

La presente investigación se basa en el análisis de los deslizamientos en la vía estatal Loja – Zamora “E50”, a partir de la integración lluvia, pendiente y formación geológica superficial, el análisis corresponde a determinar los umbrales de precipitación y la elaboración de un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa.

La vía E50 durante el periodo 2011 – 2017 el Ministerio de Transportes y Obras Públicas “MTO” ha reportado 483 movimientos en masa, estos eventos ocurren en los meses de invierno en sectores antes intervenidos y en sectores que se activan por primera vez. En la figura 1.1, se evidencia la estrecha relación que existe entre la cantidad de lluvia y movimientos en masa, también se puede desatacar que en los meses enero y julio se producen la mayor cantidad de movimientos en masa.

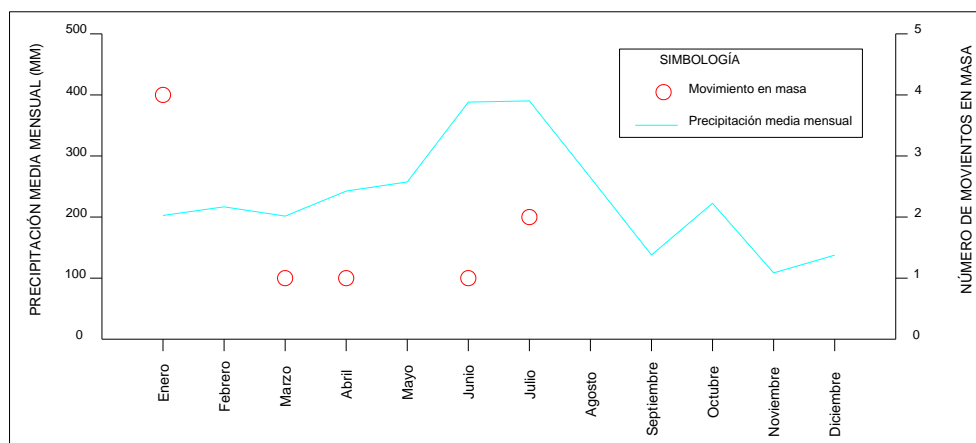


Figura 1.1: Precipitación y movimientos en masa periodo 2013-2016

Fuente: MTO, INAMHI

Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

De los proyectos realizados en la vía E50 sobre la inestabilidad de las laderas determinan la incidencia de factores condicionantes y desencadenantes (Correa, 2013; MTOP, 2010) para la ocurrencia de movimientos en masa, entre los que se destacan: geología, hidrogeología, factores antrópicos y condiciones climatológicas.

En la actualidad existen varios modelos para aproximar la ocurrencia de movimientos en masa en el tiempo y espacio, los resultados son de gran utilidad para planificar, identificar y puesta en marcha de un plan de contingencia por las entidades encargadas de la seguridad y bienestar de la población.

El estudio del pronóstico de precipitaciones, la definición de umbrales de precipitación se han convertido en una herramienta útil para la implementación de sistemas de alerta temprana (Aristizábal et al., 2011). Los umbrales nos proporcionan información valiosa para establecer en términos de tiempo la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa.

La principal medida para la prevención y mitigación de las pérdidas producidas por los procesos de inestabilidad de laderas es la elaboración de mapas de susceptibilidad del terreno a los movimientos de ladera (Jiménez, 2005).

Para la elaboración de mapas de susceptibilidad del terreno a movimientos en masa existen métodos determinísticos, heurísticos y probabilísticos. En la presente investigación se utilizó el método heurístico con el análisis jerárquico desarrollado por SAATY, mismo que consiste en procesos de ponderación y calificación de variables que intervienen en la ocurrencia de los movimientos de ladera.

El objetivo principal de la investigación es analizar los deslizamientos en la vía Loja – Zamora abscisa 30+600 hasta 55+200, a partir de la integración lluvia, pendiente y formación geológica superficial durante el periodo 2013-2016.

Para lograr el objetivo principal, es necesario cumplir con tres etapas previas mismas que se constituyen como objetivos secundarios:

- El primer objetivo consiste en seleccionar los factores determinantes para el análisis de susceptibilidad a los movimientos de ladera.
- El segundo objetivo consiste en determinar los umbrales de precipitación que ocasionan movimientos en masa.
- El tercer y último objetivo es la presentación de mapa de susceptibilidad a movimientos en masa a lo largo de la zona de estudio.

Para lograr los objetivos de la investigación los métodos de estudio se pueden resumir en métodos de campo y gabinete.

El trabajo de campo consiste en el reconocimiento físico, geológico, y la generación de cartografía de los movimientos en masa en la zona de estudio.

El trabajo de gabinete consiste en la recopilación bibliográfica regional y específica de la zona, estudio de precipitaciones y elaboración de mapas de susceptibilidad a movimientos en masa en Sistemas de Información Geográfica.

El proceso para realizar la investigación se puede sistematizar en:

1. Recopilación de fuentes bibliográficas, movimientos en masa ocurridos durante los últimos cuatro años en la vía Loja – Zamora en el tramo especificado, anuarios de las estaciones pluviométricas cercanas a la zona de estudio (INAMHI) y cartografía del Instituto Geográfico Militar.
2. Del total de movimientos en masa ocurridos en la vía Loja – Zamora del tramo en estudio, se seleccionó los de mayor incidencia considerando la disponibilidad de datos morfológicos, fechas de la ocurrencia de deslizamientos y de su ubicación.
3. Determinación de los umbrales de precipitación para la ocurrencia de los movimientos en masa.
4. Determinación de los pesos de las variables geología, pendiente, cobertura vegetal, y precipitación mediante la metodología multicriterio propuesta por SAATY.
5. Generación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa.
6. Redacción de la presente memoria.

Cabe indicar que durante el desarrollo de la investigación se irán describiendo a detalle las técnicas y metodologías empleadas.

La presente investigación está estructurada en tres capítulos. El capítulo 1 se detalla los conceptos para la determinación de umbrales de precipitación y la elaboración de mapas de susceptibilidad. En el capítulo 2 se realiza una descripción de la zona de estudio y se describe las metodologías empleadas para el desarrollo del proyecto. El capítulo 3 se presentan los resultados: umbrales de precipitación empíricos y el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, al final del capítulo se presentan una discusión de resultados.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Umbrales de precipitación

La caracterización de la precipitación que detonan movimientos en masa son útiles para mitigar el riesgo de accidentes (Chleborad, 2000).

Los movimientos en masa son el producto de la pérdida de resistencia al corte, resultado de un incremento de presión de poros causado por las intensas lluvias que se infiltran por suelos permeables superficiales que se localizan sobre la matriz rocosa u horizontes menos permeables (Aristizábal, 2008).

Varios autores han determinado una relación entre la lluvia acumulada antecedente “LAA” de 15 días y lluvia acumulada “LA” de 3 días como una combinación ideal para la ocurrencia de un movimiento en masa (Aristizábal, 2008; Echeverri & Valencia, 2004), sin embargo en un estudio realizado en el Valle de Aburrá, Colombia (Aristizábal et al., 2011) se confirma que la LAA y LA son propias de cada región, dependiendo de variables hidrogeológicas y físicas.

Los umbrales de precipitación para la generación de sistemas de alerta temprana tienen que ser generados a escalas locales de tal manera que se tenga en cuenta las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de la zona (Ramos, Trujillo, & Prada, 2015).

Estudios relacionados al pronóstico de lluvias, y la definición de umbrales críticos de precipitación se han convertido en una herramienta muy importante para sistemas de alerta temprana (Aristizábal et al., 2011).

Los umbrales de precipitación para el pronóstico de movimientos en masa se pueden clasificar de dos maneras (Guzzetti, Peruccacci, & Stark, 2008):

- a) Método empírico o estadístico: se basan en datos históricos de precipitación y movimientos en masa; en general este método relaciona la intensidad de lluvia, la duración de la lluvia o la lluvia acumulada antecedente.
- b) Modelos físicos: se basan en modelos numéricos que relacionan los resultados hidrológicos y geotécnicos (precipitación, infiltraciones, presión de poros y estabilidad de vertientes), para emplear este método se requiere información morfológica, litológica, hidrológica, y las propiedades del suelo que controlan la activación de movimientos en masa

El umbral mínimo representa la cantidad de lluvia por arriba del cual la probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa se incrementa drásticamente, por lo contrario el umbral máximo es la cantidad de lluvia en la cual se han producido la mayor cantidad de movimientos en masa (Aristizábal et al., 2011).

Cuando se dispone de información confiable de precipitación y movimientos en masa, los umbrales se pueden definir por métodos estadísticos, si la información que disponemos es restringida o escasa, los modelos físicos son los recomendados. Los modelos físicos proporcionan información sobre la distribución espacial de la amenaza por movimientos en masa, y los modelos empíricos brindan información de la distribución temporal de los movimientos en masa (Terlien, 1998).

El estudio de umbrales críticos de precipitación para la ocurrencia de movimientos en masa han sido ampliamente estudiados e incorporados a sistemas de alerta temprana en varias partes del mundo, en nuestro país y específicamente en las provincias del sur Loja y Zamora no se han realizado estudios referentes a la influencia de la precipitación como un factor detonante en la ocurrencia de movimientos en masa.

1.2. Mapas de susceptibilidad a movimientos en masa

La susceptibilidad es una propiedad de una zona, que indica que tan favorable o desfavorable son las condiciones de esta, para que pueda ocurrir un movimiento en masa (Suarez, 2008).

Para la elaboración de mapas de susceptibilidad a movimientos en masa, existen varios métodos:

- Método determinístico.
- Método heurístico.
- Método probabilístico.

En la presente investigación se utilizó el método heurístico con Evaluación Multicriterio, este método permite evaluar cuantitativamente la consistencia de asignación de pesos a los factores condicionantes y desencadenantes involucrados en la ocurrencia de movimientos en masa, con la finalidad de reducir la subjetividad (Abril, 2011).

El método heurístico se basa en la identificación de factores condicionantes y desencadenantes que provocan la inestabilidad de las laderas, se los pondera según su importancia, considerando la experiencia del técnico encargado de la ponderación, el resultado puede tener subjetividad (Correa, 2013).

Varios artículos (Muñiz & Hernández, 2012; Tenorio, Herrera, Ramírez, & Herrera, 2017) relacionados a la generación de mapas de susceptibilidad a movimientos en masa, indican la importancia de conocer el área de estudio y elegir las variables que condicionan y detonan un movimiento en masa.

En la presente investigación el peso relativo de las variables condicionantes y desencadenantes se determina por medio del método de evaluación Multicriterio de las Jerarquías Analíticas (MJA) desarrollado por Saaty (1980).

El método MJA parte de una matriz cuadrada, las filas y columnas están definidas por el número de variables a ponderar, estableciendo una matriz de comparación de importancia, para posteriormente determinar el peso relativo de cada variable.

Tabla 1.1: Escala fundamental para comparación a pares.

Nivel de importancia	Definición	Descripción del criterio i, al compararse con j:
1	Igual	Los criterios (i, j) contribuyen de igual manera al proceso de deslizamiento
3	Moderada	Pasadas experiencias favorecen ligeramente al criterio (i) sobre el (j)
5	Fuerte	Prácticamente la dominancia del criterio (i) sobre otro (j) está demostrada
7	Absoluta	Existe evidencia que determina la suprema del criterio (i)

Fuente: Abril (2011)

Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

Tabla 1.2: Esquema del método de evaluación Multicriterio de las Jerarquías Analíticas para asignación de pesos.

Factores	A	B	C	D	Peso relativo
A	X_{AA}	X_{AB}	X_{AC}	X_{AD}	W_A
B	X_{BA}	X_{BA}	X_{BA}	X_{BA}	W_B
C	X_{CA}	X_{CA}	X_{CA}	X_{CA}	W_C
D	X_{DA}	X_{DA}	X_{DA}	X_{DA}	W_D

Fuente: Abril (2011)

Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Sobre la base de la investigación recabada y bibliografía de relevancia relacionada al proyecto de investigación se describe a continuación los materiales y métodos.

2.1. Características de la zona de estudio

2.1.1. Ubicación geográfica.

En la figura 2.1 se visualiza la ubicación de la vía Loja – Zamora, misma que se encuentra al sur del Ecuador, atraviesa las provincias de Loja y Zamora Chinchipe, tiene una longitud de 57,235 km. El tramo de estudio engloba las abscisas 30+600 hasta 55+200.

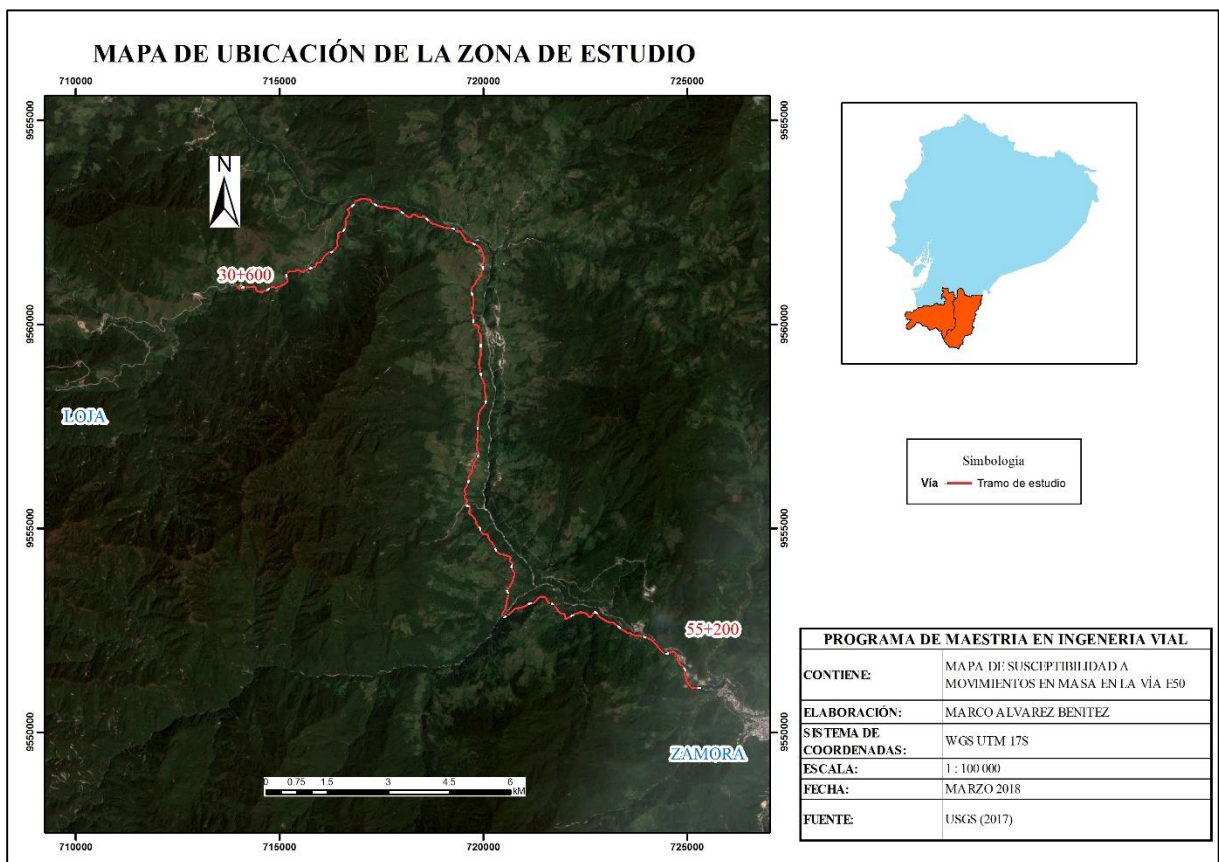


Figura 2.1: Ubicación del área de estudio

Fuente: USGS (2017)

Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

2.1.2. Modelo elevación digital.

La vía Loja – Zamora inicia en la cuenca hidrográfica de Loja. A medida que avanza en dirección a la ciudad de Zamora, la morfología cambia a una zona de premontaña que se constituye en el límite oriental de la cuenca sedimentaria (Abad, 2016; Correa, 2013). Gradualmente conservando la misma dirección se produce otro cambio de morfología a una zona de montaña con elevaciones de hasta 3400 msnm, posteriormente el relieve abrupto cambia a un relieve moderado con elevaciones que alcanzan los 2850 msnm (Correa, 2013).

En la figura 2.2 se puede visualizar las zonas altas de color café oscuro y las zonas bajas de color blanco.

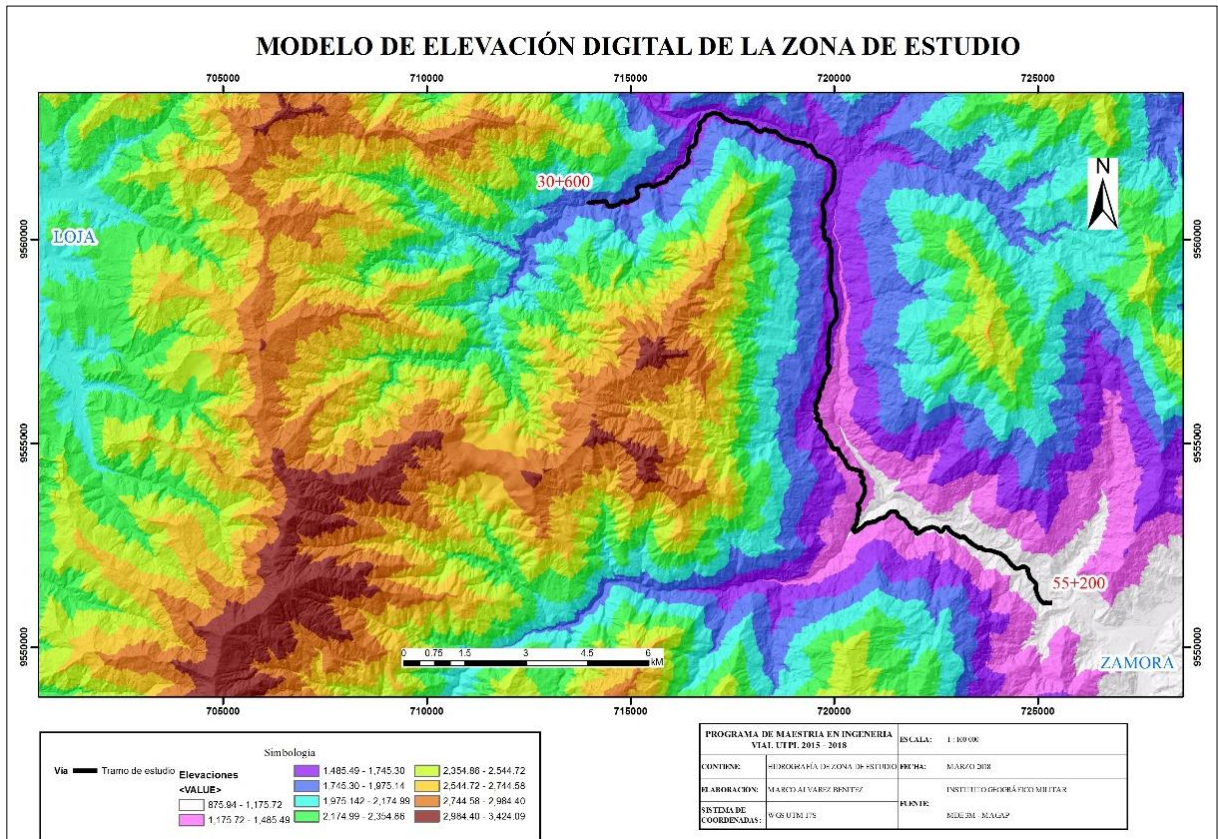


Figura 2.2: Modelo de elevación de la zona de estudio

Fuente: Ministerio de Agricultura y Pesca (2015)

Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

2.1.3. Hidrografía.

A partir de la información recabada referente a la hidrografía de la zona de estudio se puede visualizar en la figura 2.3, los afluentes del río Zamora son el río Sabanillas y San Francisco. La mayor parte de la vía E50 sigue la dirección del río Zamora.



Figura 2.3: Recursos hídricos de la zona de estudio
 Fuente: Ministerio de Agricultura y Pesca (2015)
 Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

2.1.4. Cobertura Vegetal.

La mayor parte de la vía E50 atraviesa por zonas cubiertas con pastos, a su vez también se puede diferenciar en el tramo 50+400 – 53+200 la existencia de bosques naturales.

En la figura 2.4 se puede visualizar los pastos de color verde claro y los bosques de color verde oscuro.

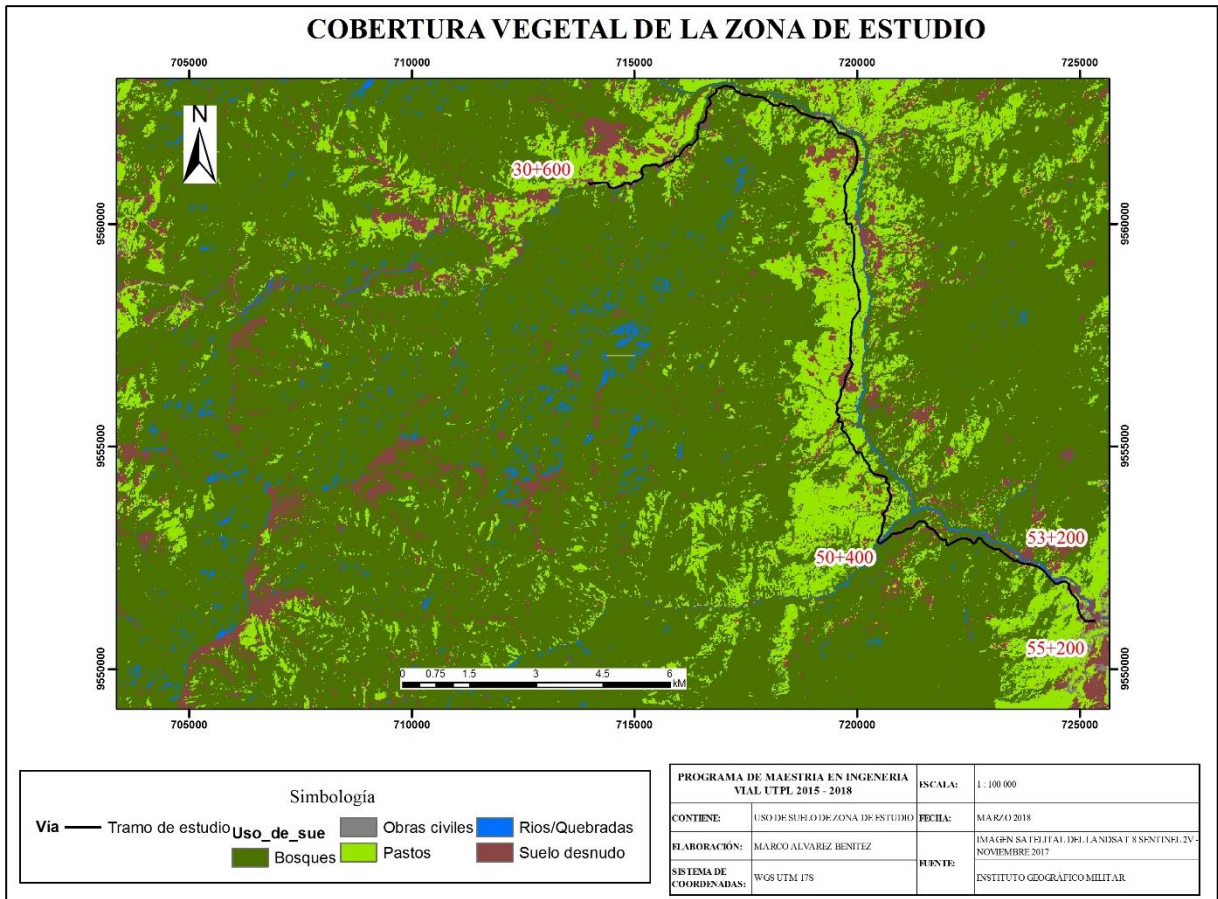


Figura 2.4: Cobertura vegetal de la zona de estudio

Fuente: USGS (2017)

Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

2.1.5. Precipitaciones.

La precipitación promedio anual que existe en la zona de estudio tiene rangos de 1500 mm a 3000 mm, la precipitación aumenta de oeste a este.

En la figura 2.5 se han ubicado los movimientos en masa lo que permite mostrar la estrecha relación con la cantidad de precipitación.

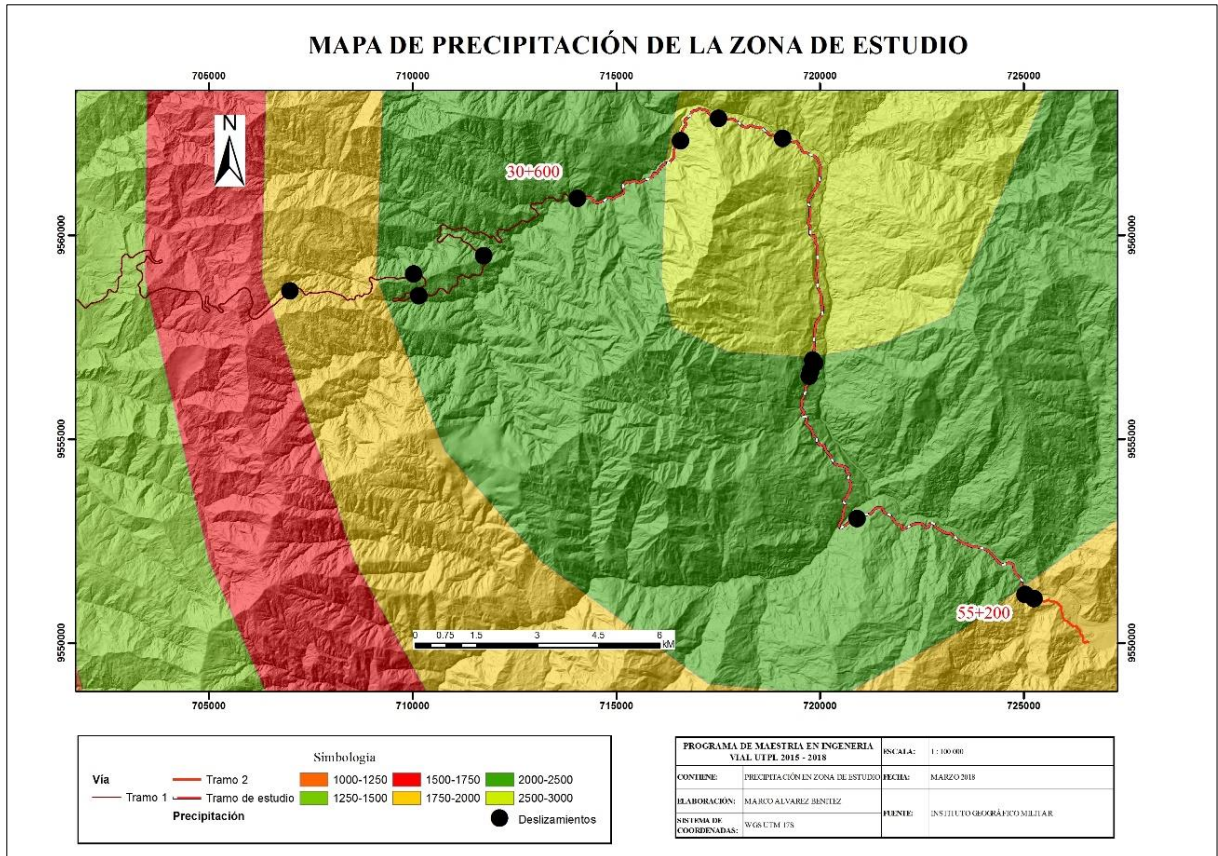


Figura 2.5: Precipitación promedio anual del periodo 1998-2008 de la zona de estudio
Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2008)
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

2.1.6. Características geológicas.

La zona de estudio de la vía Loja – Zamora atraviesa las unidades geológicas Chinguida y Gneis Sabanilla.

Las características litológicas observadas en el trazado de la vía se describen a continuación (figura 2.6):



Figura 2.6: Mapa geológico de la zona de estudio
Fuente: Litherland (1994)
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

Para la descripción de las unidades geológicas existentes en la zona de estudio se toma como referencia los trabajos realizados por Correa (2007) y (2013).

2.1.6.1 Rocas metamórficas.

a) Unidad Chinguinda (Paleozoico)

Esta unidad aflora desde el kilómetro 6+500 hasta el 38+600, litológicamente está compuesta por esquistos, filitas gráficas y cuarcitas, muchas de estas rocas se encuentran plegadas y locamente falladas. La principal propiedad de la unidad es la formación de suelo residual, misma que puede alcanzar espesores de 25 m.

En esta unidad se presentan movimientos en masa de tipo: Deslizamientos, flujos, vuelcos y desprendimientos (Correa, 2007).

En la figura 2.7 se aprecia un deslizamiento rotacional ocurrido en la abscisa 35+850.



Figura 2.7: Deslizamiento traslacional en el kilómetro 35+850.
 Fuente: Ministerio de Transportes y Obras Públicas (2017)
 Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

b) Unidad Gneis Sabanilla (Paleozoico y Triásico)

Esta unidad aflora desde el kilómetro 38+600 hasta 55+200, litológicamente se caracteriza por la presencia de orto y paragnesis con cuarcitas. A lo largo de la vía se puede observar una característica, es la presencia de escombros al pie de talud y suelo de tipo residual.

En la figura 2.8 se observa un movimiento en masa de tipo desprendimiento de rocas.

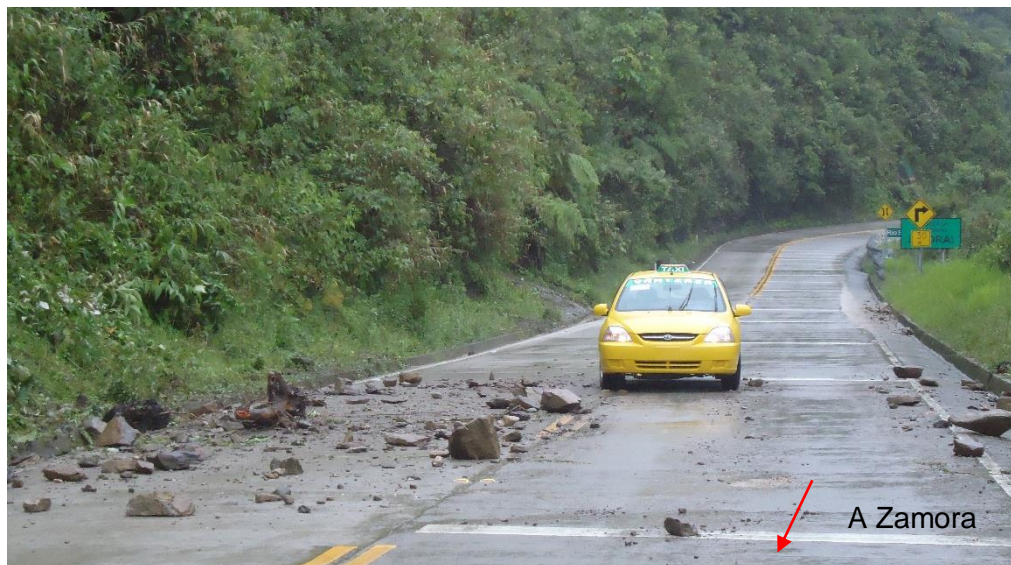


Figura 2.8: Desprendimientos de rocas en el kilómetro 49+235.
 Fuente: Ministerio de Transportes y Obras Públicas (2017)
 Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

En esta unidad se presentan movimientos en masa de tipo desprendimiento, deslizamientos y flujos (Correa, 2007).

2.2. Umbrales de precipitación

2.2.1. Datos y metodología.

El método utilizado en el análisis de umbrales de precipitación para el pronóstico de ocurrencia de movimientos en masa es el método empírico o estadístico, en el cual se elaboró una base de datos de los movimientos en masa y una base de datos de precipitación a una escala diaria; a cada movimiento en masa se le asignó una precipitación histórica, finalmente se determinó la lluvia acumulada (1, 3, 5 y 7 días) y la lluvia acumulada antecedente (5, 10, 15, 30, 60 y 90 días) para cada movimiento en masa.

La metodología se respalda en el estudio realizado por Aristizabal (2011) en el valle de Aburrá, Colombia.

2.2.1.1 Base de datos de movimientos en masa.

Se elaboró una base de datos de los movimientos en masa detonados por la precipitación a partir de los datos proporcionados el Ministerio de Transportes y Obras Públicas “MTOB”. El MTOB realiza reportes de movimientos en masa, asentamiento de vía, accidentes de tránsito, desbordamiento de quebradas a través del Sistema de Información de Transporte y Obras Públicas “SITOP”. El registro de los movimientos en masa en la vía E50 según el SITOP inicia en el año 2011 con un total de 483 movimientos en masa hasta el 2017.

La base de datos de movimiento en masa se seleccionó en base a los siguientes criterios:

- a) Eventos ocurridos en el tramo 30+600 hasta 55+200 en dirección Loja – Zamora.
- b) Eventos ocurridos en el periodo 2013 – 2016, esto debido al buen manejo de la información que se dispone en el SITOP.
- c) Eventos ocurridos a causa de la precipitación.
- d) Eventos en el cual se disponga su localización con una exactitud de 100m.
- e) Eventos con fechas precisas en la ocurrencia de movimiento en masa.

Considerando los cinco criterios descritos los 483 movimientos en masa se redujeron a 8. Posteriormente se procedió a georeferenciar los 8 movimientos en masa empleando ArcMap (figura 2.9).



Figura 2.9: Movimientos en masa en la zona de estudio
Fuente: Ministerio de Transportes y Obras Públicas (2017)
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

Tabla 2.1. Inventario de deslizamientos.

Nro.	Abscisa	Fecha de ocurrencia
1	30+600	25/03/2016
2	35+850	01/01/2016
3	44+080	10/07/2014
4	44+200	28/07/2014
5	44+400	16/01/2013
6	49+235	17/01/2013
7	52+995	23/04/2016
8	55+035	12/06/2016

Fuente: Ministerio de Transportes y Obras Públicas (2017)
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez.

2.2.1.2 Base de datos de precipitación.

Los datos de precipitación se obtuvieron a través del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología "INAMHI" de la estación M503 San Francisco-San Ramón. La estación M503 suministra información sobre el año, mes y el día de precipitación.

La estación M503 se ubica en las coordenadas descritas en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Ubicación de la estación pluviométrica.

Código	Nombre de estación pluviométrica	Norte	Este
M503	San Francisco – San Ramón	9561247	713833

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2008)
 Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

Cabe indicar que la estación pluviométrica M503 es la única que se encuentra en la zona de estudio, la distancia del movimiento en masa más lejano abscisa 55+035 a la estación pluviométrica es de 13.80 km en línea recta.

Una vez que se procesó la información de precipitación, la cantidad de movimientos en masa descritos en la tabla 2.1 se redujo a siete (7). El deslizamiento de la abscisa 55+035 no se consideró por la falta de datos de precipitación en el mes junio del 2016.

2.2.1.3 Proceso para la definir umbrales de precipitación.

El proceso para determinar los umbrales de precipitación se detalla a continuación:

- Se identifica la fecha en la cual ocurrió el movimiento en masa.
- Posteriormente al movimiento en masa se le asigna una cantidad de lluvia acumulada LA de 1, 3, 5 y 7 días y lluvia acumulada antecedente LAA de 5, 15, 30, 60, y 90 días.
- Los pares ordenadas de LA y LAA se los representa en un plano cartesiano, en el eje de las X el valor de LAA y el eje Y el valor de LA.
- Luego se observa la dispersión de los pares ordenadas para definir visualmente los umbrales de precipitación.
- En la figura 2.10 se puede indicar la definición de los umbrales de precipitación en base al comportamiento estadístico de datos de precipitación, las líneas de color rojo representan los umbrales mínimos y máximos de precipitación para LA y LAA.

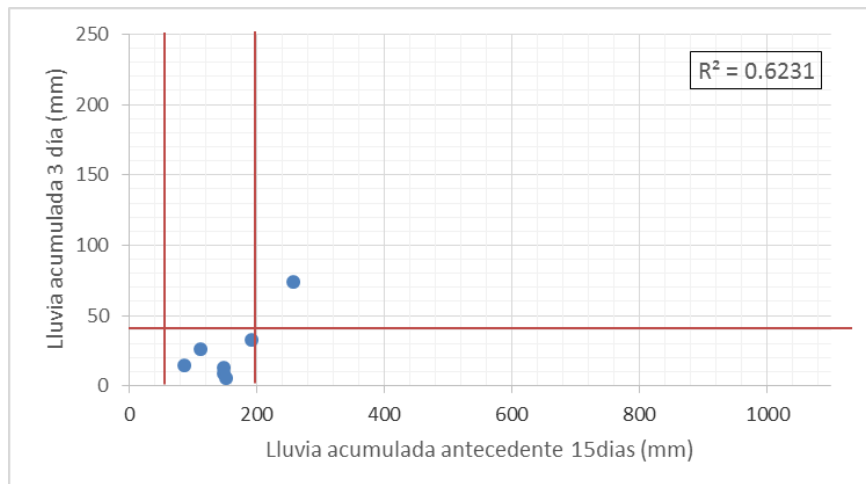


Figura 2.10. Definición de umbrales de precipitación
 Fuente: Ministerio de Transportes y Obras Públicas (2017)
 Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

2.3. Mapas de susceptibilidad

El método empleado para la elaboración del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa fue el método heurístico, y para establecer los pesos de los factores condicionantes y desencadenante se empleó el análisis jerárquico multicriterio elaborado por Saaty (1980).

La información que se utilizó para la elaboración del mapa de susceptibilidad es la siguiente:

- Mapa Geológico de la Republica de Ecuador, escala 1:1'000,000 (Litherland, 1994).
- Modelo de elevación digital "MED", escala 1:3,000 (Ministerio de Agricultura y Pesca, 2015).
- Imagen Satelital del Landsat 8 sentinel 2V, resolución espacial de 30m (USGS, 2017).
- Isoyetas, año 2008, escala 1:1'000,000 (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2008).
- Información recolectada en campo.

La información descrita anteriormente se procesó mediante Sistemas de Información Geográfica "SIG", el software empleado fue el ArcMap 10.3.

2.3.1. Procesamiento de imágenes satelitales.

2.3.1.1 Clasificación supervisada.

Con la finalidad de determinar la ocupación del suelo en la zona de estudio se realizó un proceso de interpretación de la fotografía de Landsat 8 Sentinel 2V, el proceso que se realizó es el siguiente:

- a) Selección de la imagen satelital del Landsat 8 Sentinel 2V.
- b) Se crea puntos de referencia con identificación de clases: Bosques, Obras Civiles, Ríos/Quebradas, Pastos y suelo desnudo, en la figura 2.11 se detalla la ubicación de los puntos de referencia.
- c) Se genera la firma espectral de las cinco clases (Spatial Analyst Tools -> Multivariate -> Create Signatures).
- d) Finalmente se genera el mapa de los puntos de referencia mediante una clasificación supervisada (Spatial Analyst Tools -> Multivariate -> Maximum Likelihood Classification)

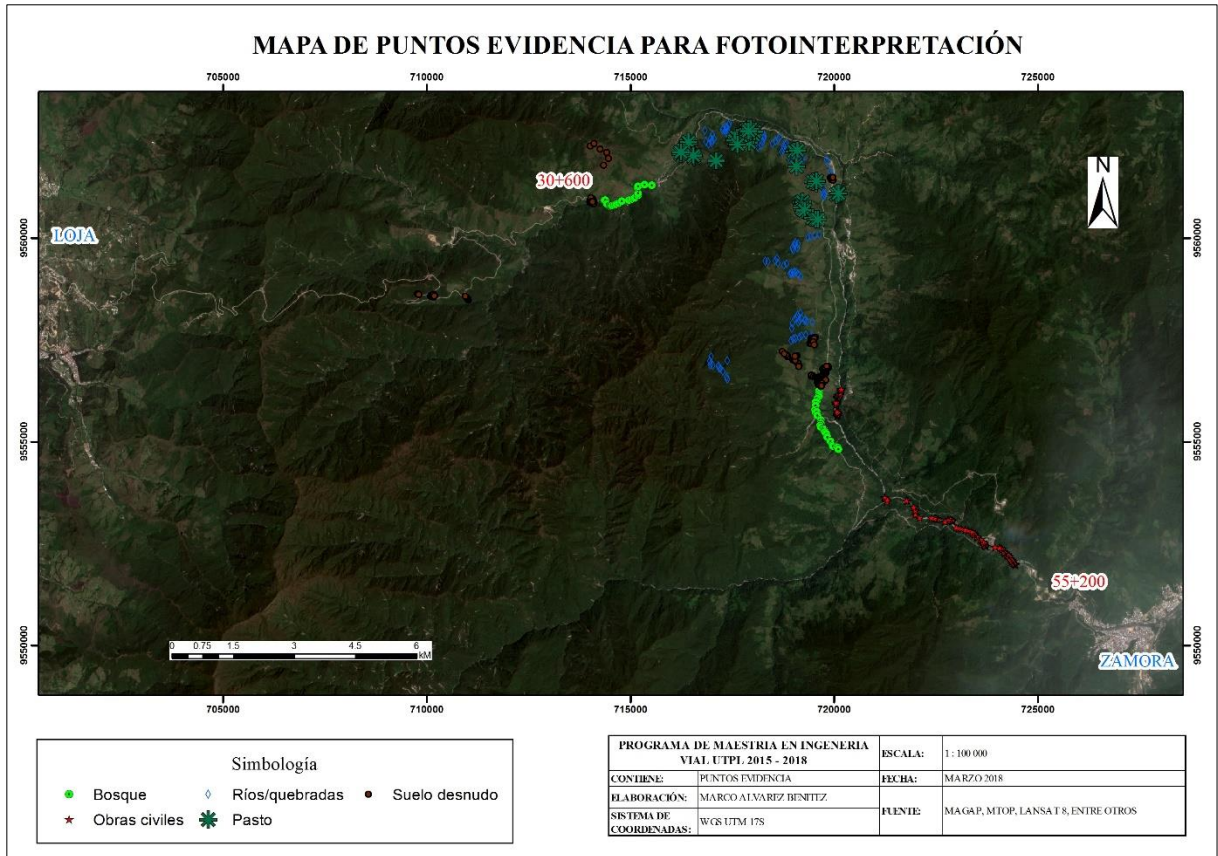


Figura 2.11: Imagen satelital y puntos evidencia para fotointerpretación
Fuente: USGS (2017)
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

2.3.2. Variables consideradas para elaborar el mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Las variables para la elaboración del mapa de susceptibilidad, fueron tomadas en base a trabajos desarrollados en el lugar de estudio Correa (2013), así como también los estudios que se han realizado por MTOP (2010), en los que destacan la importancia de la geología, pendiente, cobertura vegetal y la precipitación, para la ocurrencia de movimientos en masa.

A continuación se presenta en tabla 2.3 las variables consideradas para la elaboración del mapa de susceptibilidad.

Tabla 2.3: Variables consideradas para la evaluación de susceptibilidad

Variable	Fuente
Geología	Litherland (1994)
Pendiente	Ministerio de Agricultura y Pesca (2015)
Cobertura Vegetal	USGS (2017)
Precipitación	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2008)

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2008); Litherland (1994); Ministerio de Agricultura y Pesca (2015); USGS, (2017)
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez.

Cabe indicar que la variable cobertura vegetal fue integrada durante el desarrollo de la investigación, debido a la influencia en los procesos de remoción en masa y a las recomendaciones de los tutores del proyecto.

2.3.3. Valoración y normalización de variables.

La normalización de las variables se las efectuó en base a la comparación del número de movimientos en masa y la variable analizada, a continuación se detalla el procedimiento:

- Establecer la variable: geología, pendiente, uso de suelo y precipitación.
- Posteriormente se proyectan los movimientos en masa.
- Se realiza un análisis comparativo entre la variable seleccionada y la cantidad de movimientos en masa, y se los normaliza con una escala numérica del 1 al 5, donde 1 representa la más baja potencialidad y 5 la más alta potencialidad a desarrollar movimientos en masa.

a) Geología.

La geología de la zona de estudio se obtuvo de los estudios publicados por Litherland (1994), en la figura 2.6 se puede visualizar las unidades geológicas que abarca la zona de estudio.

b) Pendiente.

El mapa de pendientes se genera a partir del MED obtenido del Ministerio de Agricultura y Pesca (2015), posteriormente se reclasifico el mapa en cinco rangos.

La reclasificación de pendientes resulto de un análisis de los movimientos en masa ocurridos en la vía de estudio, además se consideró los estudios realizados por: Jiménez (2005), Cardozo (2013) y Abril (2011), los estudios fueron desarrollados en áreas de montaña, llanura y premontaña respectivamente, en la tabla 2.4 se detallan los rangos de pendiente considerados en los estudios.

Tabla 2.4: Rango de pendiente considerados por diferentes investigadores.

Jiménez (2005),		Cardozo (2013)		Abril (2011)	
Rango en grados		Rango en grados		Rango en porcentaje	
0	5	0	7	0	5
5	15	7	15	5	15
15	25	15	30	15	30
25	35	> 30		30	50
35	90			50	70
				> 70	

Fuente: Abril (2011); Cardozo (2013); Jiménez, (2005)
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez.

c) Cobertura vegetal.

En la figura 2.12 se puede visualizar los tipos de cobertura vegetal obtenidos mediante el análisis de fotointerpretación, los mismos que son: pastos, bosques, y suelo desnudo.

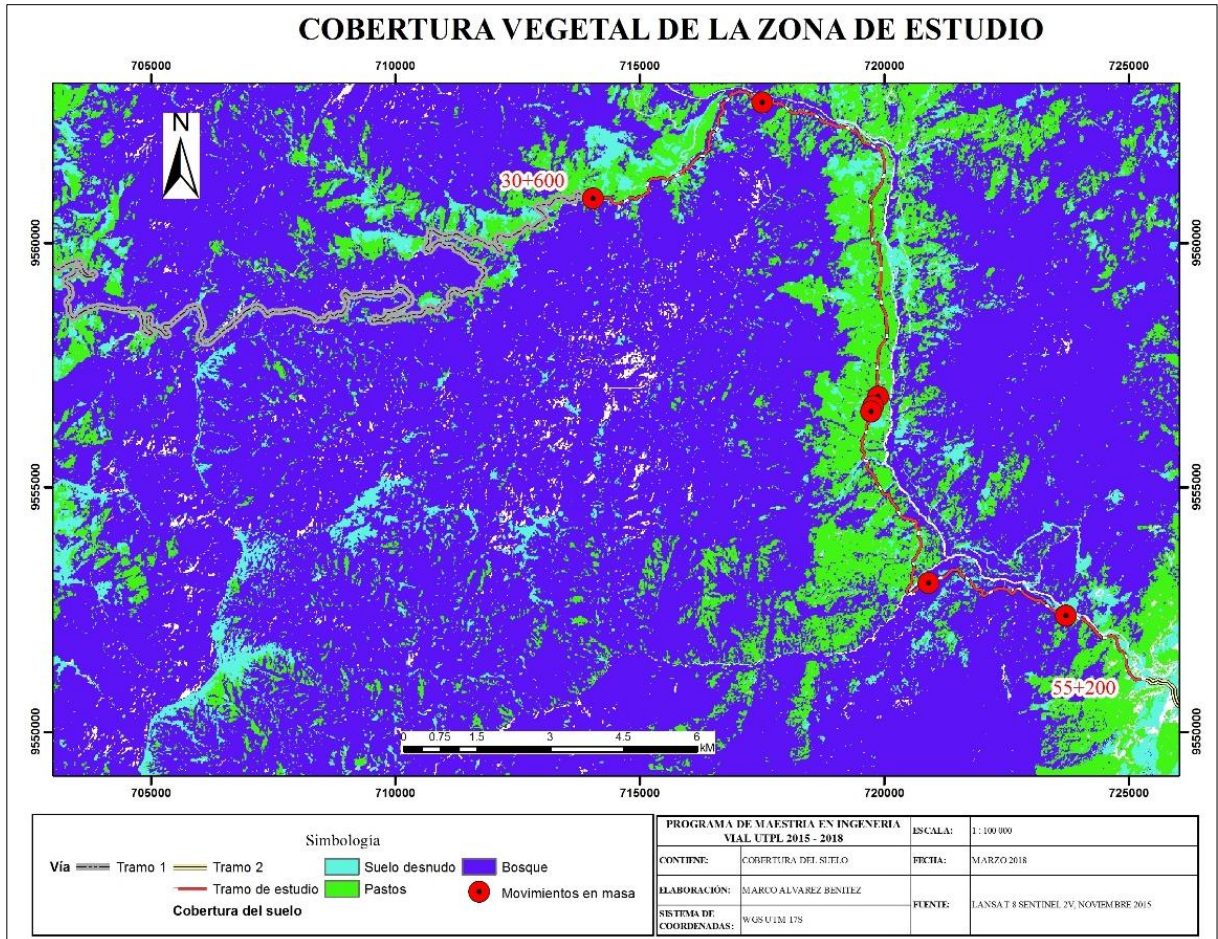


Figura 2.12: Mapa de cobertura vegetal

Fuente: USGS (2017)

Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

d) Precipitación.

En la figura 2.5 se puede visualizar el mapa de Isoyetas tomado del portal del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología "INAMHI".

2.3.4. Determinación de los valores de ponderación.

Para establecer los pesos de las variables condicionantes y desencadenantes para la elaboración del mapa de susceptibilidad a movimientos masa, se empleó el análisis multicriterio propuesto por Saaty (1980).

El proceso consiste en realizar una comparación de las variables consideradas para la elaboración del mapa de susceptibilidad, las relaciones son las siguientes:

- a) Relación Geología – Pendiente.
- b) Relación Geología – Uso de suelo.
- c) Relación Geología – Precipitación.
- d) Relación Pendiente y Uso de suelo.
- e) Relación Pendiente y Precipitación.
- f) Relación Uso de Suelo y Precipitación.




2.3.5. Álgebra de mapas.

Una vez normalizadas las variables y determinados los valores de ponderación, se procede a realizar el álgebra de mapas, el procedimiento es el siguiente:

- Spatial Analyst Tools -> Map Algebra -> Raster Calculator.
- Posteriormente se detalla la ecuación resultante: $0.49 * \text{Geología} + 0.25 * \text{Pendiente} + 0.19 * \text{Uso de suelo} + 0.07 * \text{Precipitación}$.
- Con la ecuación anterior se obtiene el mapa de susceptibilidad.

2.3.6. Rangos de susceptibilidad.

Para la clasificación de los rangos de susceptibilidad se tomó como referencia los estudios realizados en la vía Loja – Zamora por Correa (2013), los mismos que se detallan a continuación:

- Susceptibilidad Baja (); limitada ocurrencia de movimientos en masa aún con la presencia de eventos detonantes (precipitaciones).
- Susceptibilidad Media (); sectores con probabilidad leve de ocurrencia de movimientos en masa. Algunos flujos de detritos, desprendimientos, y deslizamiento de tipo planar y rotacional, se generan por la presencia de precipitaciones.
- Susceptibilidad Alta (); se esperan tener deslizamientos rotacionales y traslacionales, pero especialmente flujo de derrumbios.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Definición de umbrales críticos de lluvia

La Lluvia Acumulada “LA”, representa la cantidad de lluvia caída antes de la ocurrencia del movimiento en masa, incluyendo las 24 horas del día que ocurrió el evento.

La Lluvia Acumulada Antecedente “LAA”, representa la cantidad de lluvia caída en los días anteriores a los considerados en la Lluvia Acumulada.

En las figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 presentan las posibles combinaciones de lluvia acumulada de 1, 3, 5, y 7 contra la lluvia acumulada antecedente 5, 10, 15, 30, 60 y 90, evaluadas para cada uno de los siete movimientos en masa descritos en la tabla 2.1.

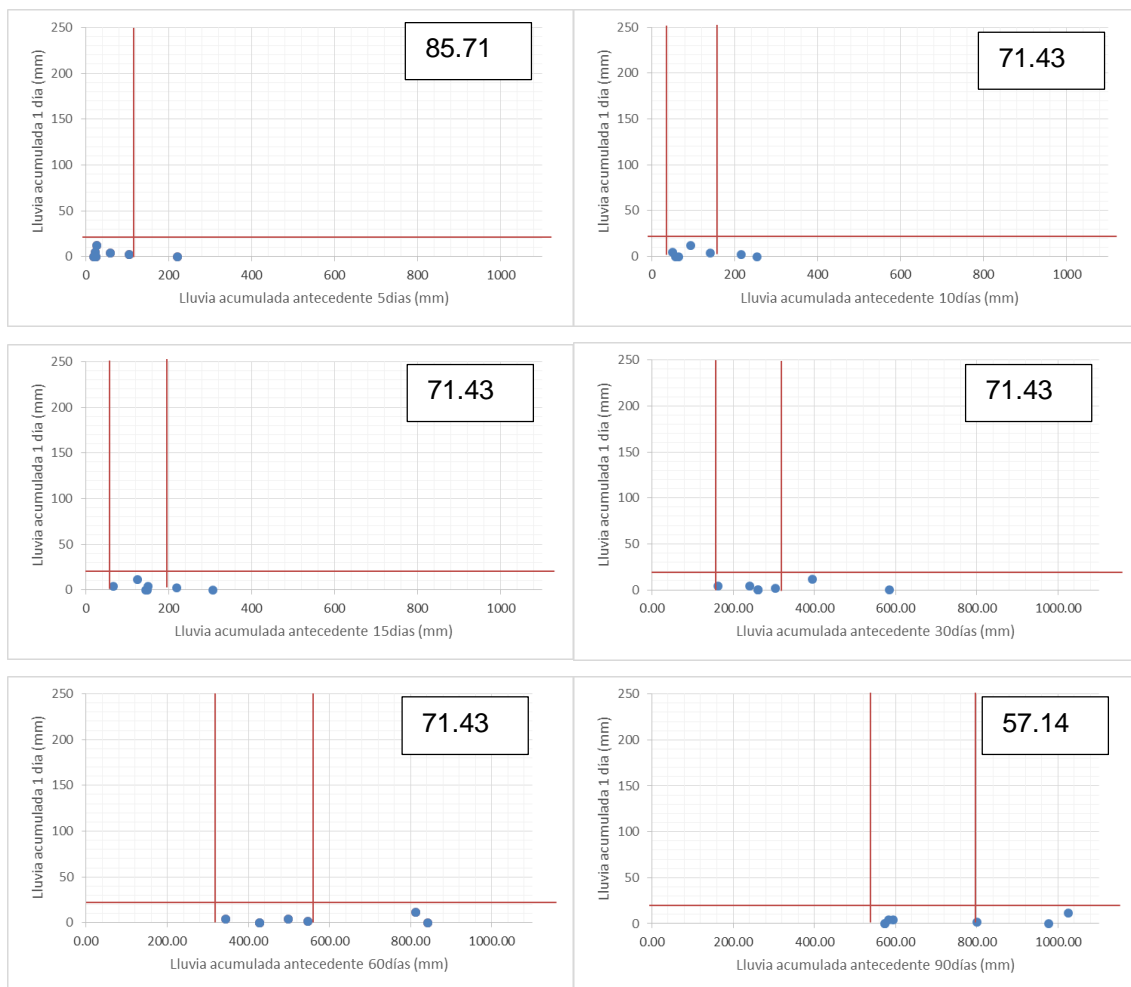


Figura 3.1: Lluvia acumulada (LA) de 1 día contra Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días.

Fuente: Marco Antonio Álvarez

Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

La LA de 1 día presenta un umbral máximo de 20 mm para todas las combinaciones de LAA, por otro lado la LAA presenta un umbral de máximo de 120 mm para LAA de 5 días hasta 800 mm para LAA de 90 días, se puede identificar un umbral mínimo a partir de LAA de 10 días y es igual a 40 mm llegando hasta 540 mm para LAA 90 días.

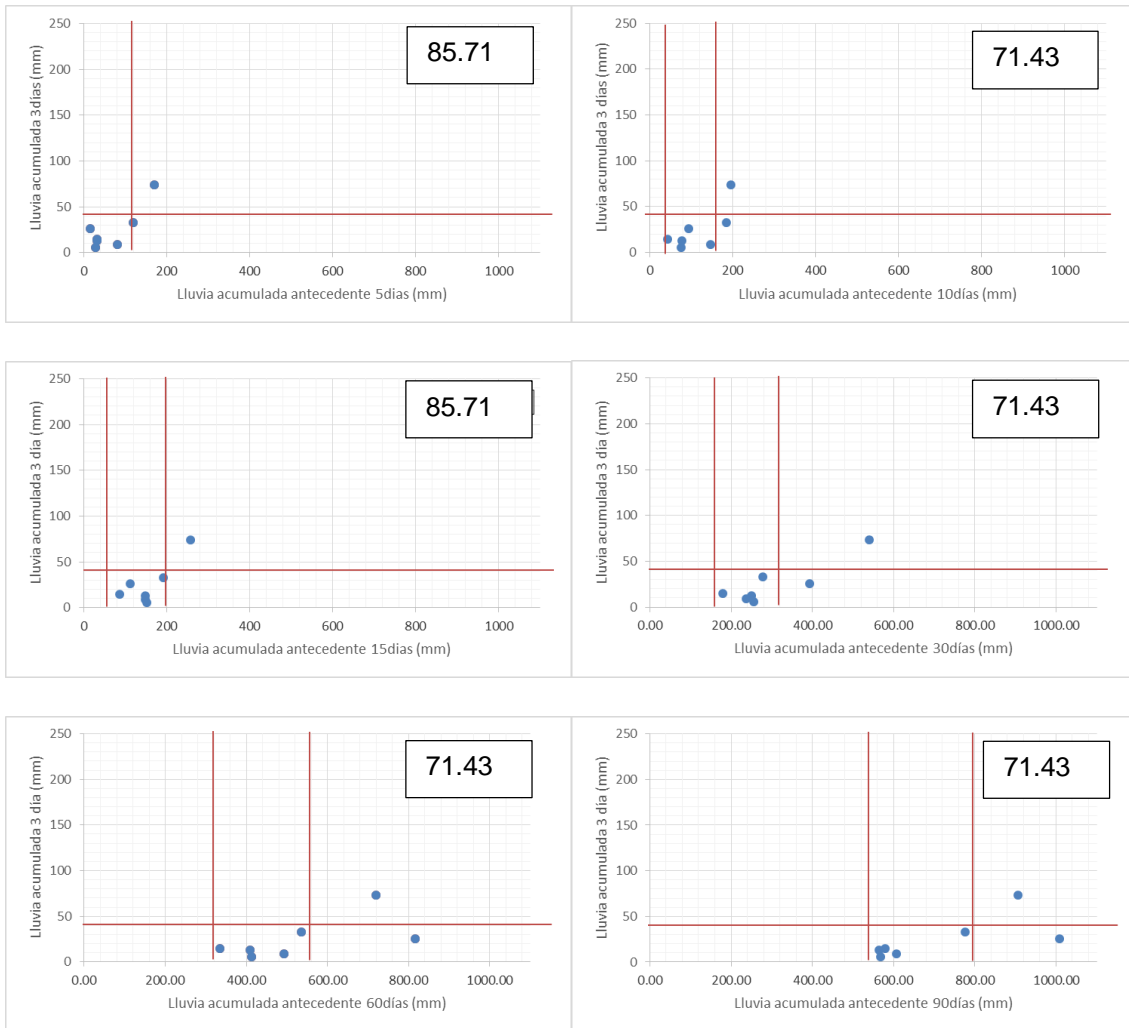


Figura 3.2: Lluvia acumulada (LA) de 3 días contra Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días.

Fuente: Marco Antonio Álvarez

Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

La LA de 3 días presenta la menor dispersión es decir entre los umbrales máximos y mínimos ocurren el mayor porcentaje de movimientos en masa, la LA tiene un umbral máximo de 40 mm para todas las combinaciones de LAA, por otro lado la LAA presenta un umbral de máximo de 120 mm para LAA de 5 días hasta 800 mm para LAA de 90 días, se puede identificar un umbral mínimo a partir de LAA de 10 días igual a 40 mm llegando hasta 540 mm para LLA 90 días.

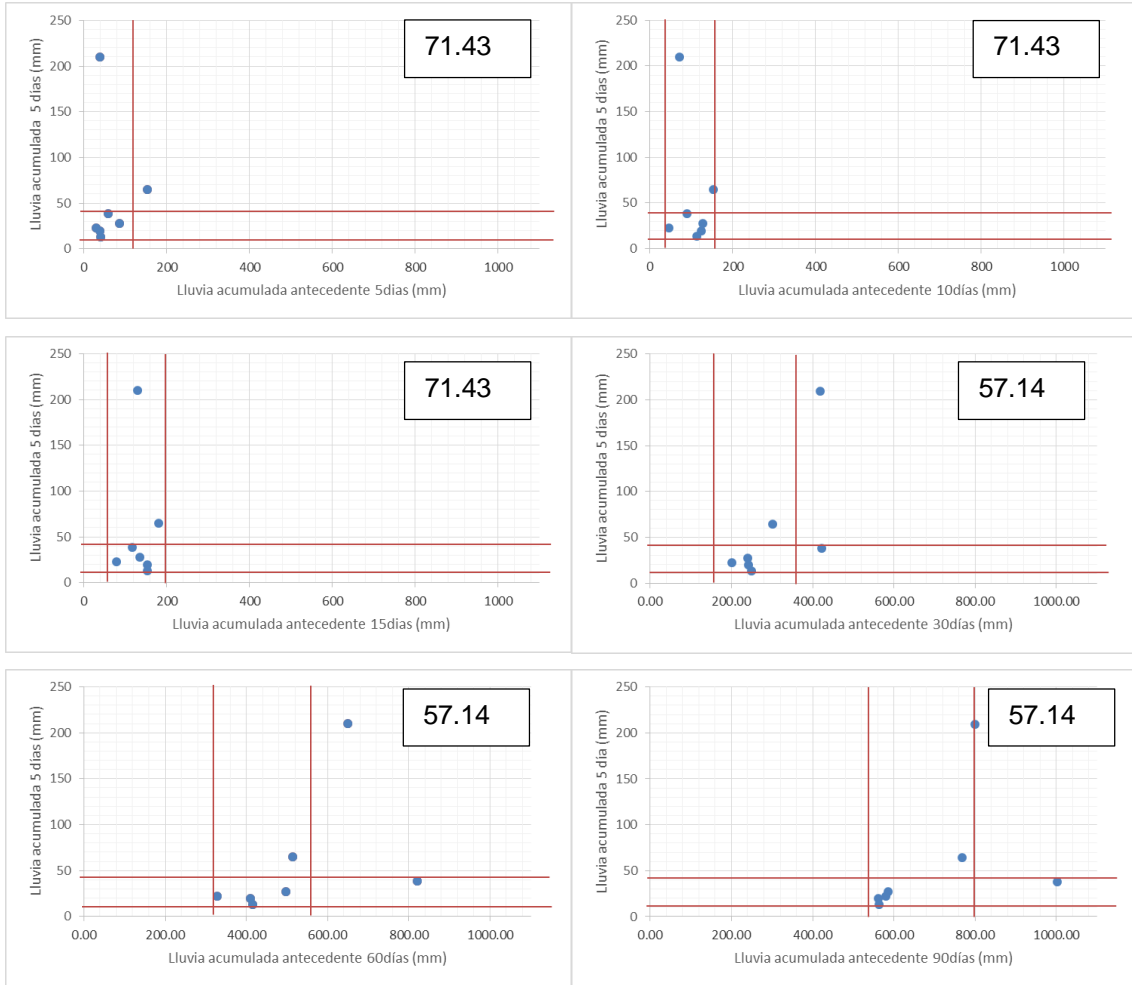


Figura 3.3: Lluvia acumulada (LA) de 5 días contra Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días.

Fuente: Marco Antonio Álvarez

Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

La LA de 5 día presenta un umbral máximo de 40 mm para todas las combinaciones de LAA y un mínimo de 10 mm, por otro lado la LAA presenta un umbral de máximo de 120 mm para LAA de 5 días hasta 800 mm para LAA de 90 días, se puede identificar un umbral mínimo a partir de LAA de 10 días igual a 40 mm llegando hasta 540 mm para LLA 90 días.

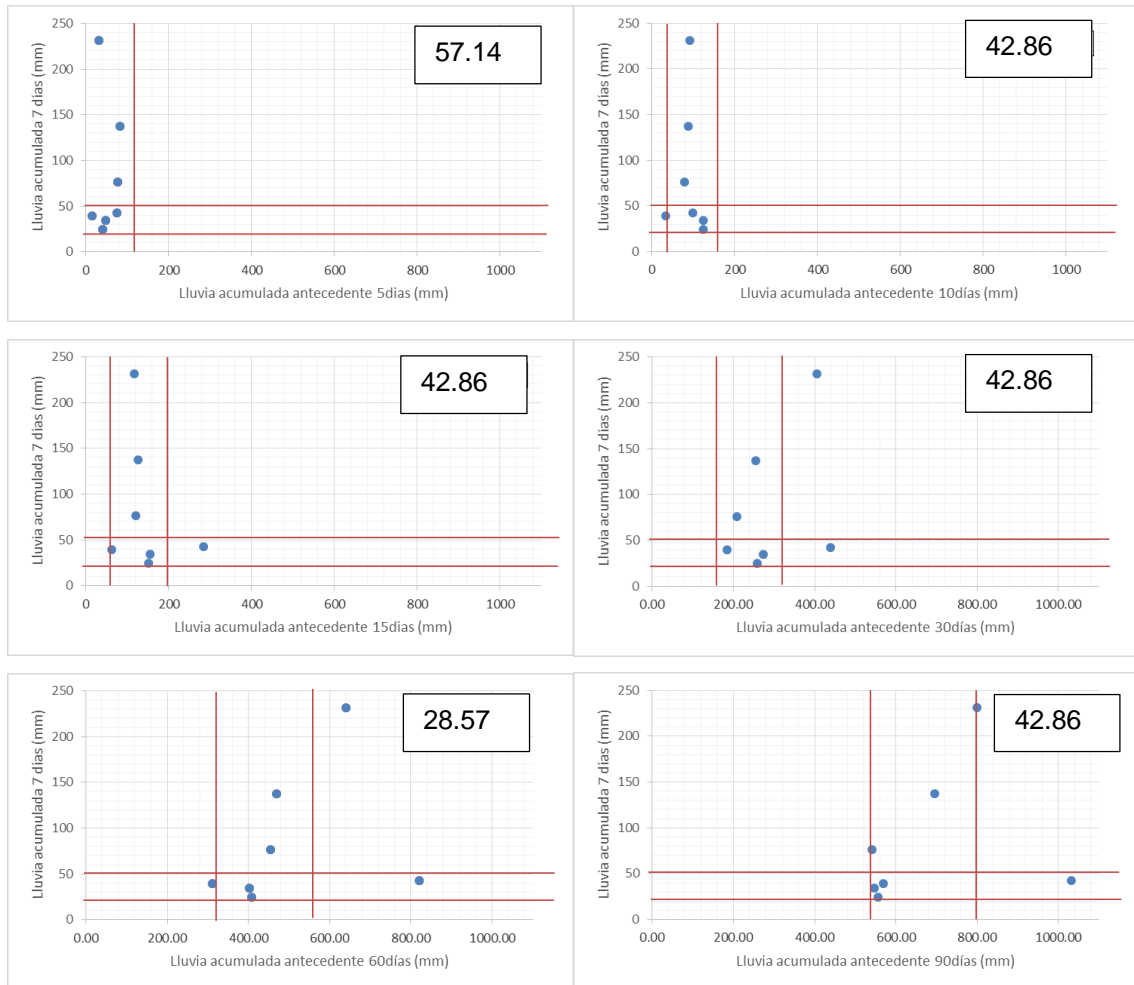


Figura 3.4: Lluvia acumulada (LA) de 7 días contra Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días.

Fuente: Marco Antonio Álvarez

Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

La LA de 7 día presenta la mayor dispersión entre las combinaciones de precipitaciones, la LA de 7 día presenta un umbral máximo de 50 mm y un mínimo de 20 mm para todas las combinaciones de LAA, por otro lado la LAA presenta un umbral de máximo de 120 mm para LAA de 5 días hasta 800 mm para LAA de 90 días, se puede identificar un umbral mínimo a partir de LAA de 10 días igual a 20 mm llegando hasta 540 mm para LLA 90 días.

De los resultados obtenidos, el umbral máximo de Lluvia Acumulada (LA) varía de 20mm cuando se considera 1 día y 50mm cuando se consideran 7 días y el umbral mínimo varía de 10mm cuando se considera 5 días y 20mm cuando se considera 7 días, el umbral máximo de LA desde 1 al 5 día se observa un incremento de 20mm, y del 5 día al 7 día aumenta 10mm. A partir del 5 día se puede identificar umbrales mínimos que varían de 10 mm hasta 20 mm para el 7 día.

El umbral máximo de Lluvia Acumulada Antecedente varía desde 120 mm cuando se considera el 5 día hasta 800 mm cuando se consideran 90 días.

Cabe destacar que las combinaciones de precipitación que consideran LAA superiores a 5 días se pueden establecer umbrales mínimos.

El mayor porcentaje de movimientos en masa dentro de los umbrales mínimos y máximos se presentan para LA de 3 días, todos por encima de 71.43%.

Estos umbrales estadísticos, son altamente conocidos en el campo de prevención de riesgos por ser un excelente indicador del tiempo, intentan responder cuando existe la mayor probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa, pero no intentan responder donde ocurrían. Para aplicar los umbrales de precipitación empíricos se deben determinar en base a las condiciones locales de una región y combinarlos con cartografía de amenaza y vulnerabilidad para la zona que fueron determinados.

De los resultados obtenidos se observa que los días más recientes a la ocurrencia de movimientos en masa permiten diferenciar umbrales mínimos para LA en el 5 y 7 día para cualquier combinación de LAA, por otro lado los umbrales de lluvia mínimos para LAA se diferencian a partir de 10 días hasta 90 días y permanecen constantes para cualquier combinación de LA.

El hecho de que no se logre identificar umbrales mínimos para LA igual a 1 y 3 días, y ocurran movimientos en masa, aparentemente se indica una mayor influencia de LAA.

Los umbrales máximos de LA para todas las combinaciones de LAA indican la poca influencia de la lluvia en el día del movimiento en masa. Como se puede observar en la figura 3.3 la combinación LA de 1 día y LAA de 5 días, correspondería indicar la influencia de LA, por el motivo que los días considerados para la combinación son pocos, si en caso la LA tuviera una fuerte influencia en la ocurrencia de movimientos en masa se registrarían valores altos de LA para 1 día en el margen superior izquierdo. Por lo contrario se identifica umbrales mínimos para LA igual a 5 y 7 días para todas las combinaciones de LAA, con valores igual a 10 y 20 mm respectivamente, en términos de cantidad el valor de precipitación es poco probable que incremente la presión de poros para que sea detonado un movimiento en masa. Sin embargo cabe explicar que 10 y/o 20 mm en 24 h podrían no son críticos, pero en periodos cortos pueden ser eventos suficientes para detonar movimientos en masa, sin importar las condiciones antecedentes.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el mayor porcentaje de movimientos en masa dentro de los umbrales definidos se establece que las combinaciones para LA de 3 días son las que mejor representan los umbrales de precipitación.

3.2. Mapas de susceptibilidad

3.2.1. Normalización de variables.

3.2.1.1 Geología.

En la figura 2.6 se evidencia que la unidad Sabanilla tiene el mayor número de procesos de remoción en masa, seguido por la unidad Chinguinda.

En la tabla 3.1, en función al levantamiento de información de los movimientos en masa a lo largo del tramo de vía en estudio, se muestra la normalización efectuada:

Tabla 3.1: Normalización de la variable geología en la zona de estudio.

Geología en la zona de estudio	Normalización
Unidad Chinguinda	4
Unidad Sabanilla	5

Fuente: Marco Antonio Álvarez
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

3.2.1.2 Pendiente.

De la información recopilada y detallada en el apartado 2.3.3 se determina que el número de categorías y ancho de clase de pendientes, son propias de cada sector de estudio.

De la información recopilada en campo, en el caso de estudio se establecieron 5 categorías con un ancho de clase igual a 17 grados, a continuación (tabla 3.2) se presenta la normalización de variable pendiente.

Tabla 3.2: Normalización de la variable pendiente en la zona de estudio.

Rango en grados		Valor de ponderación
0.00	17.00	1
17.00	34.00	2
34.00	51.00	4
51.00	68.00	5
68.00	85.00	3

Fuente: Marco Antonio Álvarez
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

De los datos obtenidos en campo sobre la inclinación de las laderas se evidenció que el mayor número de procesos de remoción en masa ocurren en el rango de pendientes 51° - 68°, y las zonas propensas a movimientos en masa se encuentran en el rango de 34° - 54°.

Las pendientes de las laderas mayores a 68° presentan estabilidad, esto debido a que se encuentran conformadas por un macizo rocoso competente.

En la figura 3.5 se puede visualizar el mapa de pendientes y los movimientos en masa

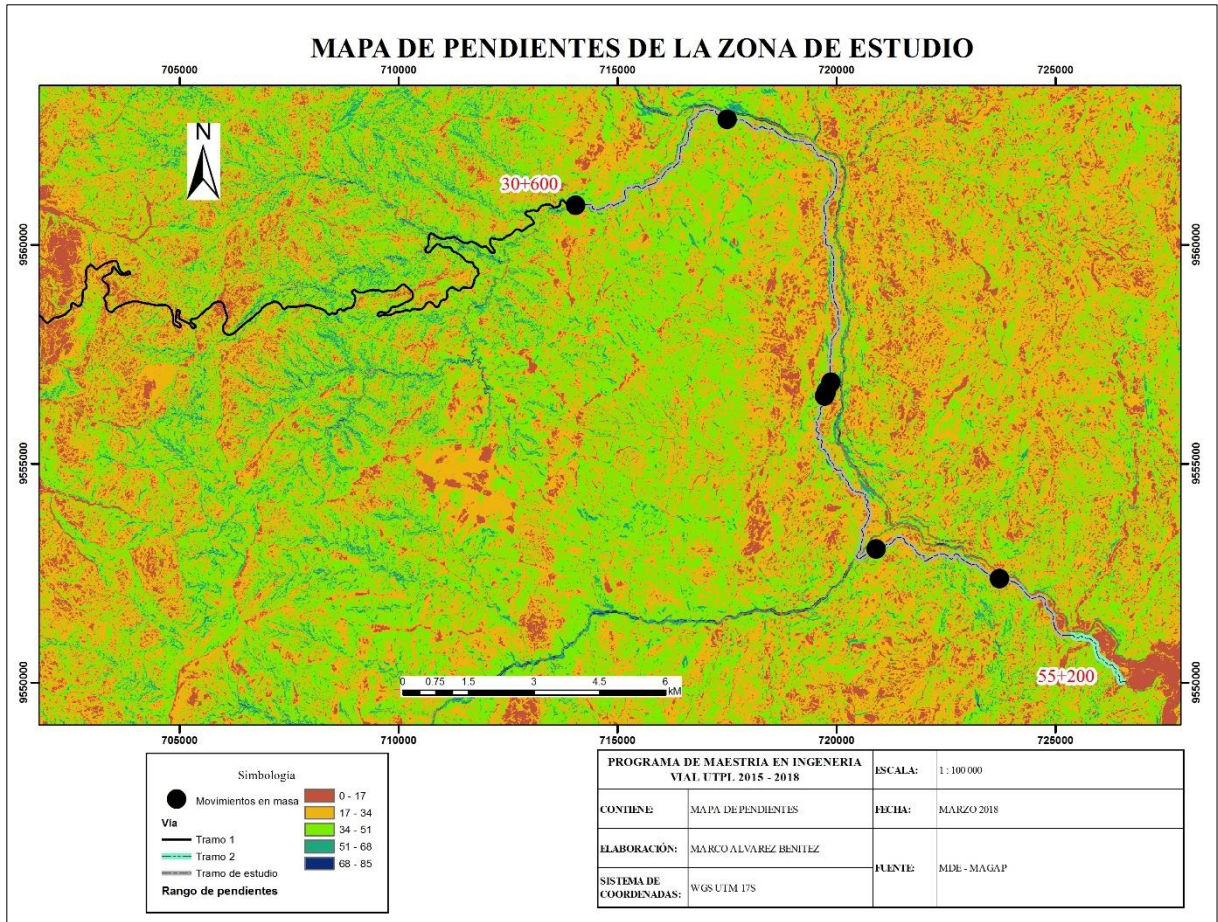


Figura 3.5: Mapa de pendientes de la zona de estudio
Fuente: Ministerio de Agricultura y Pesca (2015)
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

3.2.1.3 Cobertura vegetal.

Como se puede visualizar en la figura 2.12 a lo largo de la zona de estudio existe una franja de pastos en la cual se han producido la mayor cantidad de movimientos en masa seguido del suelo desnudo.

Tabla 3.3: Normalización de la variable cobertura vegetal en la zona de estudio.

Uso de suelo	Valor de ponderación
Bosques (arboles principalmente)	1
Pastos (lugares dedicados a la ganadería)	3
Suelo sin cobertura vegetal)	2

Fuente: Marco Antonio Álvarez
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

3.2.1.4 Precipitación.

Como puede visualizarse en la figura 2.5, los movimientos en masa y la precipitación existe una relación directa, a lo mencionado podemos corroborar las versiones de los moradores y

usuarios de la vía Loja – Zamora, que entre los meses de enero y julio se producen la mayor cantidad de movimientos en masa.

La normalización de la variable precipitación se realizó en función de la cantidad de movimientos en masa, en el rango de precipitación de 2000 – 2500 mm se presentan la mayor cantidad de movimientos en masa, y en el rango 2500 – 3000 mm en un porcentaje menor.

Tabla 3.4: Normalización de la variable precipitación de la zona de estudio.

Rango (mm)		Valor de ponderación
2000.00	2500.00	5
2500.00	3000.00	4

Fuente: Marco Antonio Álvarez
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

3.2.2. Resultado de la ponderación mediante el análisis multicriterio propuesto por Saaty.

A continuación se presenta los resultados de la ponderación de variables para la elaboración del mapa de susceptibilidad.

Tabla 3.5: Resultados de la ponderación de variables consideradas para la elaboración del mapa de susceptibilidad.

Variables	Geología	Pendiente	Uso de suelo	Precipitación	$(\sum(X_i)) / n$	Peso relativo
Geología	1.00	7.00	1.00	5.00	3.50	0.49
Pendiente	0.14	1.00	3.00	3.00	1.79	0.25
Cobertura vegetal	1.00	0.33	1.00	3.00	1.33	0.19
Precipitación	0.20	0.33	0.33	1.00	0.47	0.07
				Total	7.09	1.00

Fuente: Marco Antonio Álvarez
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

a) Relación Geología – Pendiente.

Considerando la información recopilada en campo sobre los movimientos en masa, se observa que la geología tiene absoluta influencia sobre la pendiente, como puede observarse en la tabla 3.2 el valor de la pendiente no se relaciona con el nivel de ponderación, se destaca que los movimientos en masa dependen del estado de la litología mas no de la pendiente.

b) Relación Geología – Cobertura vegetal.

En la presente relación se ha considerado que la cobertura vegetal tiene que valorarse con igual importancia que el factor litológico, debido a que el material de la ladera cubierto por una

buena cobertura vegetal (bosques) presenta mayor resistencia a la ocurrencia de movimientos en masa.

c) Relación Geología – Precipitación.

Para esta relación se ha considerado una fuerte preferencia de la Geología sobre la Precipitación, por la razón que el estado de los materiales que componen la ladera (fisurado, agrietado) depende la infiltración de las aguas provenientes de la precipitación.

d) Relación pendiente y cobertura vegetal.

En la presente relación se ha asignado una preferencia moderada de la pendiente sobre la cobertura vegetal, debido a que la vía está construida en zonas de montaña y atraviesa por zonas cubiertas de pasto (figura 2.12).

e) Relación pendiente y precipitación.

Considerando que la vía Loja – Zamora está construida en zonas de montaña, la pendiente es moderadamente preferente sobre la precipitación, se asume el concepto de pendientes fuertes, baja o nula infiltración.

f) Relación cobertura vegetal y precipitación.

Se ha considerado que la cobertura vegetal tiene una moderada preferencia sobre la precipitación, por el motivo que la cantidad de agua infiltrada depende de la cobertura de vegetal del suelo.

3.2.3. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa.

A continuación se presenta el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa del tramo de vía E50 kilómetro 30+600 hasta 55+200.

Cabe recalcar que mediante vistas de campo a la vía en estudio se delimito la zona de influencia de 100 m desde el eje vial hacia el margen derecho e izquierdo.

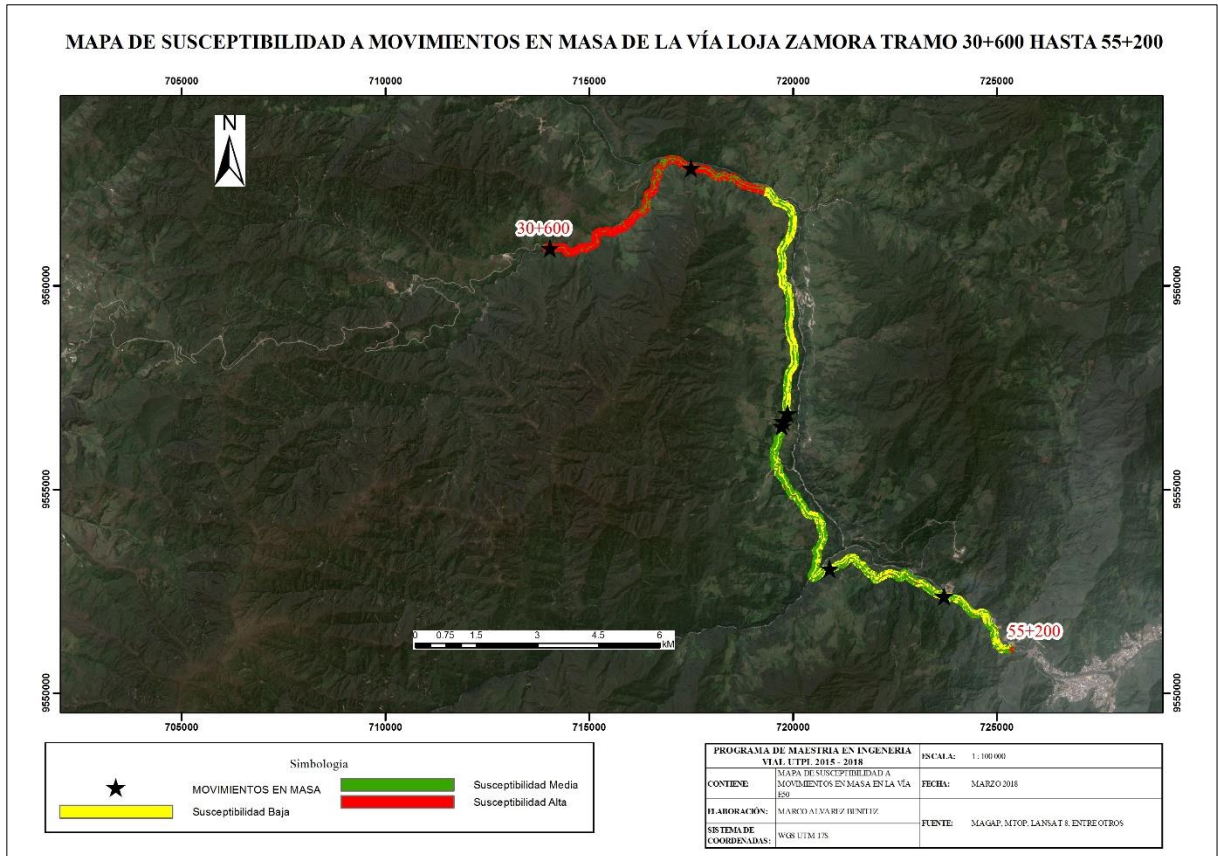


Figura 3.6: Mapa de susceptibilidad y detalle movimientos en masa en la zona de estudio.

Fuente: USGS (2017)

Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

El mapa de susceptibilidad resalta zonas que concentran grados altos y bajos de susceptibilidad a movimientos en masa a lo largo del tramo de estudio 30+600 hasta 55+200 de la vía E50 Loja – Zamora, lo que indica que las laderas de la zona de estudio son potencialmente inestables.

Según el Análisis Jerárquico Multicriterio propuesto se evidencia que la geológica del tramo de estudio tiene mayor influencia; Geología 49%, Pendiente 25%, Uso de Suelo 19% y Precipitación 7%.

Como puede observarse en los primeros 8 kilómetros del tramo de estudio se evidencia una susceptibilidad alta a movimientos en masa, esto se debe a la influencia de la geología, en este tramo se observan movimientos en masa de tipo traslacional, flujo de derrubios (fragmentos rocosos y bloques en una matriz fina de limo y arcilla), desprendimientos (caída de bloques).



Figura 3.7: Deslizamiento traslacional y tipo de material predominante ubicado en la abscisa 30+600,
Fuente: Marco Antonio Álvarez
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

En el mapa de susceptibilidad, desde el kilómetro 38+600 hasta 55+200 se observa un tramo que resalta una susceptibilidad media, sin embargo dentro de aquel tramo existen áreas con susceptibilidad alta a movimientos en masa cabe mencionar el tramo: 44+080 hasta 44+200.

En el tramo 44+080 hasta 44+200 existe la evidencia de la ocurrencia de movimientos en masa, de tipo complejos. Los movimientos complejos ocurridos en el tramo especificado son una combinación de movimientos traslacionales en cabecera y un flujo de pie. Los resultados obtenidos en la figura 3.6 se validan con los eventos ocurridos (figura 3.7 y 3.8).



Figura 3.8 Movimiento en masa complejo (movimiento traslacional en cabecera y flujo de pie) en la abscisa 44+200.
Fuente: Marco Antonio Álvarez
Elaborado por: Marco Antonio Álvarez

Según los eventos suscitados en el pasado a lo largo del tramo de vía en estudio, es evidente (figura 3.7 y 3.8) que los movimientos en masa ocurridos en el tramo definido con

susceptibilidad media han sido potencialmente más perjudiciales que los primeros 8 km del tramo de estudio.

CONCLUSIONES

- En base a la recopilación de bibliografía y proyectos, relacionados al análisis de movimientos en masa, mediante la integración de factores condicionantes y desencadenantes, y considerando información disponible de fuentes confiables, para el desarrollo de la presente investigación se escogió las siguientes variables: geología, pendiente, cobertura vegetal, y precipitación.
- Para obtener los umbrales de precipitación se elaboró un inventario de movimientos en masa confiables en el que se puede corroborar la fecha y ubicación de ocurrencia del evento, el número de eventos considerados para determinar los umbrales son siete (7), de los resultados obtenidos se evidencia que el mayor condicionante para la ocurrencia de movimientos en masa es la lluvia acumulada antecedente "LAA" o lluvia de largo plazo, los datos indican que los movimientos en masa analizados ocurrieron para LAA superiores a 40 mm para 10 días, 50 mm para 15 días, 160 mm para 30 días, 320 mm para 60 días y 540 mm para 90 días.
- De las combinaciones de la lluvia acumulada "LA" y lluvia acumulada antecedente "LAA" para determinar los umbrales de precipitación, se concluye que la combinación de LA igual a 3 días para todos las LAA son las que presentan menor dispersión estadística.
- El estudio realizado por el método multicriterio propuesto por SAATY, constituye una herramienta eficiente y eficaz para la elaboración de mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, debido a que permite al usuario integrar distintas cartografías relativas al problema planteado y finalmente la obtención de un resultado a corto tiempo.
- La susceptibilidad a movimientos en masa del tramo en estudio, calculado mediante el método heurístico, es mayoritariamente media en tramo 38+600 – 55+200, no obstante existen 8 kilómetros con una susceptibilidad alta tramo 30+600 - 38+600.

RECOMENDACIONES

- Para futuros proyectos se recomienda integrar variables tales como: relieve relativo, distancia a cursos de agua, distancia a vías y riesgo sísmico, para el análisis de movimientos en masa en base a mapas de susceptibilidad.
- Se recomienda a las entidades encargadas en la operación y mantenimiento de infraestructura vial, seguir registrando movimientos en masa con la finalidad de seguir enriqueciendo una base datos para a futuro poder emplear un método determinismo, es conveniente integrar información referente el tipo de movimiento en masa, el material y volumen involucrado, y características geométricas.
- Los resultados obtenidos correspondientes a los umbrales de precipitación son válidos para utilizarse como herramientas para la toma de decisiones en la prevención de desastres mediante la implementación de un sistema de alerta temprana.
- Se recomienda al MTOP realizar inspecciones periódicas a las zonas que se detallan con una susceptibilidad alta, con la finalidad de tomar decisiones a priori.

BIBLIOGRAFIA

- Abad, K. (2016). *Ensayo metodológico para la evaluación y zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa, Cuenca de Loja*. Universidad Politécnica Nacional. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2440>
- Abril, A. (2011). *Estudio e implementación de un modelo para la zonificación de áreas susceptibles a deslizamiento mediante el uso de sistemas de información geográfica: caso de estudio sector Quimsacocha*. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/739>
- Aristizábal, E. (2008). Características, dinámica y causas del movimiento en masa del barrio El Socorro (31 de mayo de 2008) en Medellín. *Revista EIA*, 10, 19–29.
- Aristizábal, E., González, T., Montoya, J. D., Vélez, J. I., Martínez, H., & Guerra, A. (2011). Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia. *Revista EIA*, 8(15), 95–111.
- Cardozo, C. (2013). Zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina).
- Chleborad, A. F. (2000). Preliminary Method for Anticipating the Occurrence of Precipitation-Induced Landslides in Seattle, Washington. *Open-File Report 2000-469*, Open file, 29. <https://doi.org/Open-File Report, vol. 00-469>
- Correa, C. (2007). *Análisis de la susceptibilidad de los fenómenos de remoción en masa de la carretera Loja-Zamora*.
- Correa, C. (2013). *Análisis de la Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa en Estructuras Lineales mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica*. Universidad San Francisco de Quito.
- Echeverri, O., & Valencia, Y. (2004). Análisis de los deslizamientos en la cuenca de la quebrada La Igua de la ciudad de Medellín a partir de la integración lluvia-pendiente-formación geológica. *Dyna*, 142(September 2015), 33–45.
- Guha-Sapir, D., Hoyois, P., & Below, R. (2014). Annual Disaster Statistical Review 2010: The numbers and trends. *Review Literature And Arts Of The Americas*, 1–50. <https://doi.org/10.1093/rof/rfs003>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., & Stark, C. P. (2008). The rainfall intensity--duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5(1), 3–17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>

- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2008). Isoyetas, Estaciones Pluviométricas. Retrieved from <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>
- Jiménez, J. (2005). *Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de Rules, Granada*. UNIVERSIDAD DE GRANADA.
- Litherland, M. (1994). *The metamorphic belts of Ecuador*. Keyword, Nottingham: British Geological Survey.
- Ministerio de Agricultura y Pesca. (2015). Modelo de Elevación Digital. Retrieved from <http://www.agricultura.gob.ec/>
- Ministerio de Transportes y Obras Públicas. (2017). Movimientos en masa periodo 2013-2016. Retrieved from <http://www.obraspublicas.gob.ec/>
- MTOP. (2010). *Estudio de Estabilidades de Taludes, Carretera Loja-El Tiro-San Francisco - Zamora*.
- Muñiz, J. A., & Hernández, V. M. (2012). Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta , Jalisco , mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico, 103–114.
- Ramos, A., Trujillo, M., & Prada, L. (2015). Niveles umbrales de lluvia que generan deslizamientos: Una revisión crítica, 61–80.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=Xxi7AAAAIAAJ>
- Suarez, J. (2008). Zonificación de Susceptibilidad Amenaza y Riesgo. In *Deslizamientos: Análisis Geotécnico* (p. 56). Bucaramanga. Retrieved from www.erosion.com.co
- Tenorio, J. A. P., Herrera, R. G., Ramírez, M. G., & Herrera, J. A. V. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa , análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez , Chiapas. *Investigaciones Geográficas: Boletín Del Instituto de Geografía*, 2017(92), 128–143. <https://doi.org/10.14350/rig.52822>
- Terlien, M. T. J. (1998). The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. *Environmental Geology*, 35(2), 124–130. <https://doi.org/10.1007/s002540050299>
- USGS. (2017). Imagen Satelital Landsat 8. Retrieved from <http://www.usgs.gov/>

ANEXOS

Viene Tabla 3.6

2015	5	0	0	10.9	4.3	5.5	2.6	0	0.8	0	14.2	17.2	24.5	13.7	8.9	1	10	1	9.8	12	10	0.6	3.2	1.2	0	3.9	5.2	0	0	10.1	0	9.5
2015	6	12.5	18.5	12.3	45.6	28.3	21.9	10.1	8.5	0	2.2	7.5	37	1.5	0	9.2	30	35.1	21.9	38.8	4.2	0	0	2.3	54.2	30.1	18.5	2.2	14	4	1.3	
2015	7	2.1	16.7	6	37	4.9	3.3	8	23.8	6.7	12.7	12.2	14.4	0	0	4.8	0	30	35.7	0	0	16.5	32.5	0	11.3	8.7	11.8	11.3	17.5	76.3	24.7	3.2
2015	8	0	2.2	0	8.4	2	0	0	10.6	0	12.8	3.1	5.4	2.6	11.8	9	0	1.8	0	8.3	6.4	0	0	0	2.2	0	0	16.6	31.5	27.9	12.3	25.1
2015	9	32.3	15.1	0	0	23.3	17	10.4	3.4	0	0	0	0	0	0	0	0	6.7	12.4	2.8	1.2	1.2	1.7	0	1.6	6.8	4.7	0	0	9.3		
2015	10	2.7	4.6	35.6	45.5	14.5	0	0	3.7	2.1	10.5	3.5	2	0	2.3	42.4	7.7	18.2	37.2	2.9	0	0	5.9	1.1	0	0	0	1.2	0	1.4	0.3	0
2015	11	0	0	0	0	0	0	0	1.6	9.2	15.1	11.9	16.7	2.6	4.6	8.6	4.5	0	0.9	11.7	5.9	0	6.5	0	2.2	23.1	0	0	0	17.5	10.2	
2015	12	29.8	8.5	0	0	0	8.9	10.7	20.3	6.1	10.3	0	0	0	0.5	27.7	1.8	3	5.9	4.3	4.2	0	2.4	4.7	0	7.5	12.6	4.3	3.6	4.1	0	10.5

Tabla 3.7: Precipitaciones en el año 2016 de la estación San Francisco.

DIA/EST	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO
1	4.3	0.0	0	4.1	0
2	0.0	0.0	1.5	18	9.8
3	0.0	4.5	9.9	0	4
4	0.0	0.0	34.2	14.5	1.9
5	11.5	4.1	1.2	5.1	14.6
6	5.1	3.8	0	1.2	1.2
7	2.1	0.7	5.4	3.2	5.8
8	0.0	67.8	1.3	2.8	1.9
9	0.0	30.6	0	0	0
10	0.0	17.6	0	0	0.8
11	0.0	9.6	0	0	7.4
12	0.0	4.1	0	0	12.3
13	0.0	1.1	1.4	0	5.9
14	0.0	11.5	8.2	55.5	49.6
15	0.0	16.2	32.3	10.8	32.9
16	0.0	16.9	10.1	15.1	77.1
17	9.6	21.4	12.5	31.1	13.9
18	0.0	7.8	14.5	41.4	0.1
19	0.0	9.2	12	10.5	1.6
20	21.0	0.0	36.7	21.3	9.4
21	1.9	2.1	17.2	1.9	6.8
22	5.9	18.1	1.4	29.0	12.8
23	0.0	2.6	4.7	1.9	19.4
24	0.0	12.6	0.0	1.4	67.4
25	0.0	0.0	4.1	0.0	0.0
26	1.2	0.0	9.0	0.0	0.0
27	2.1	0.0	0.7	43.2	0.0
28	0.0	15.8	0.0	0.3	0.0
29	0.0	7.8	10.2	0.0	0.0
30	3.4		13.7	5.1	0.0
31	0.7		0.0		11.8

ANEXO 2. INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA EN LA ZONA DE ESTUDIO.



Km. 3 vía Zamora-Loja, campamento La Toquilla Fono: 073 060538

SUBSECRETARIA DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS REGIONAL 7 DIRECCIÓN DISTRITAL DE ZAMORA CHINCHIPE

INGENIERA
XIMENA TOLEDO VASQUEZ
ANALISTA DE INFRAESTRUCTURA PROVINCIAL
DIRECCIÓN DISTRITAL DEL MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS ZAMORA
CHINCHIPE

A petición verbal del interesado:

CERTIFICO:

Que el Ing. Marco Antonio Álvarez Benitez, ha permanecido en las Instalaciones del Ministerio de Transportes y Obras Publicas en la provincia de Zamora Chinchipe, investigando en los registros que mantiene esta cartera de estado sobre los deslizamientos ocurridos en la RVE E50 tramo Loja-Zamora entre la abscisa 30+600 hasta la 55+200, de acuerdo al siguiente detalle:

Nro.	Abscisa	Fecha del deslizamiento
1	30+600	25/03/2016
2	35+850	01/01/2016
3	44+080	10/07/2014
4	44+200	28/07/2014
5	44+400	16/01/2013
6	45+400	10/01/2017
7	49+235	17/01/2013
8	52+995	23/04/2016
9	55+035	12/06/2016

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al interesado hacer uso del presente documento en lo que estime conveniente.

Zamora, 02 de agosto de 2017.


Ing. Ximena Toledo V.
ANALISTA DE INFRAESTRUCTURA PROVINCIAL

ANEXO 3. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA DE LA VÍA LOJA ZAMORA TRAMO 30+600 HASTA 55+200.

