

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluación de amenazas por deslizamientos asociados a factores
hidroclimáticos en sectores de Loja y Manabí

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Geología

Presentado por:

Angel Jesús Clavijo Rivera
Jenifer Allison Malavé Hernández

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

A mis padres José Clavijo y Jenny Rivera, a quienes recuerdo con cariño.

A mi prima Nelly Carabajó y su esposo Xavier Morán, quienes me han apoyado incondicionalmente en el transcurso de mi carrera.

Al Instituto de Fomento al Talento Humano por brindarme los recursos para seguir estudiando.

A los tíos y primos cuyo apoyo y compañía me ayudo a seguir adelante.

Angel Jesús Clavijo Rivera

Con cariño y amor

A mis padres, Diógenes Malavé y Gloria Hernández; a mis hermanos, Sandra, Darwin, Jimmy; a mi pequeño sobrino Ian, por su amor, paciencia y constante apoyo.

A mis amigas del colegio, por su compañía en todos estos años.

A mis amigos geólogos y eléctricos, por esas amanecidas de estudio, tardes de almuerzo, risas, valiosos consejos y reuniones, que perdurarán por siempre.

A mis profesores.

A mis amadas mascotas Ruffo, Max, Wichí, Cielo y Dulce.

Jenifer Allison Malavé Hernández

AGRADECIMIENTOS

Al CIIFEN, por confiar en nosotros y facilitarnos su tiempo y recursos.

A la Máster Eva Rivas, por su paciencia y consejos en la elaboración de este trabajo.

A Rubén Velasco, por sus aportes a la realización de este proyecto.

Angel Jesús Clavijo Rivera

A Dios, a mis familiares y amigos.

A las ingenieras Diana Espinoza y Pilar Ycaza, por abrirnos las puertas del CIIFEN para el desarrollo de este proyecto, y por su constante guía profesional.

A mi tutor académico, Miguel González y a la M.Sc. Eva Rivas, por sus consejos y apoyo.

A los ingenieros Andrés Velástegui y Roberto Chang, encargados del laboratorio de Geomática de la FICT, por permitirme el uso de las instalaciones.

A mí, por no desistir en este reto llamado universidad, por la entrega y dedicación todos estos años...

Jenifer Allison Malavé Hernández

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Angel Jesús Clavijo Rivera y Jenifer Allison Malavé Hernández, damos nuestro consentimiento para que la ESPOLE realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Angel Jesús Clavijo
Rivera



Jenifer Allison Malavé
Hernández

EVALUADORES

Ing. Eva Rivas, M. Sc

PROFESOR DE LA MATERIA



Ing. Miguel González, Ph. D.

PROFESOR TUTOR



Ing. María Ramírez, M. Sc

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Los cantones de Flavio Alfaro (Manabí) y Loja (Loja) son algunos de los cantones con mayores deslizamientos registrados desde 1970. En un futuro, con el efecto del cambio climático se espera que las precipitaciones, el principal desencadenante de los deslizamientos, aumenten, afectando de alguna forma la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en estos sectores. Así, el objetivo principal de este proyecto es evaluar la amenaza de deslizamientos debido al factor hidroclimático de precipitaciones en los cantones mencionados, tanto a presente (2020) y futuro (2040).

Se utilizó la metodología Mora-Vahrson para la determinación de la amenaza actual y futura, la cual integra factores relacionados a la ocurrencia de deslizamientos como litología, pendiente, humedad, intensidad sísmica y de precipitaciones; la cual fue ajustada de acuerdo con los datos disponibles.

Los resultados mostraron principalmente que, en Flavio Alfaro, las áreas en amenaza alta de deslizamiento (IV), pasaron de cubrir 153 km² en 2020 a cubrir 251 km² en 2040, es decir aumentaron 1.6 veces en tamaño; mientras que, en Loja, las áreas en amenaza de nivel moderado (III) pasaron de cubrir un 58.2% de terreno (1 109 km²) en 2020 a cubrir un 60% (1 132 km²) en el 2040, aumentando 1.8% su tamaño.

En conclusión, fue posible establecer el impacto del cambio climático a través del cambio en las precipitaciones en el desarrollo de los deslizamientos.

Palabras Clave: deslizamientos, precipitaciones, cambio climático, Flavio Alfaro, Loja

ABSTRACT

The cantons of Flavio Alfaro (Manabí) and Loja (Loja) are some of the cantons with the highest number of landslides recorded since 1970. In the future, with the effect of climate change, it is expected that rainfall, the main trigger for landslides, will increase, affecting in some way the frequency or occurrence of landslides in these sectors. Thus, the main objective of this project is to evaluate the threat of landslides due to the hydroclimatic factor of precipitation in the mentioned cantons, both at present (2020) and in the future (2040).

The Mora-Vahrson methodology was used to determine the current and future threat, which integrates factors related to the occurrence of landslides such as lithology, slope, humidity, seismic and precipitation intensity; which was adjusted according to the available data.

The results showed that, in Flavio Alfaro, the areas at high risk of landslides (IV) went from covering 153 km² in 2020 to 251 km² in 2040, that is, they increased 1.6 times in size; while in Loja, the areas at moderate risk (III) went from covering 58.2% of the land (1 109 km²) in 2020 to 60% (1 132 km²) in 2040, increasing their size by 1.8%.

In conclusion, it was possible to establish the impact of climate change through changes in rainfall on the development of landslides.

Keywords: landslides, rainfall, climate change, Flavio Alfaro, Loja

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	VII
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE GENERAL	X
ABREVIATURAS.....	XIII
SIMBOLOGÍA.....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVII
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Ubicación.....	4
1.5 Marco teórico.....	5
1.5.1 Definición de Terminología.....	5
1.5.2 Movimientos de ladera	6
1.5.3 Cambio climático y su impacto	9
1.5.4 Estado del arte	11
1.6 Clima y Geología	14
1.6.1 Cantón Flavio Alfaro, Manabí	14
1.6.2 Cantón Loja, Loja	16
1.7 Antecedentes	21

1.7.1	Flavio Alfaro	21
1.7.1	Loja	21
CAPÍTULO 2		24
2.	Metodología	24
2.1	Propuestas	25
2.1.1	Método Mora-Vahrson	25
2.1.2	Método de Evaluación Multicriterio.....	27
2.2	Restricciones	29
2.3	Selección del método	29
2.4	Recursos	30
2.5	Detalle de la Metodología Aplicada: Mora-Vahrson	31
2.5.1	Amenaza actual: año 2020.....	31
2.5.2	Amenaza futura: año 2040	41
2.6	Cronograma	43
CAPÍTULO 3		44
3.	Resultados y Análisis.....	44
3.1	Caso de Estudio Flavio Alfaro.....	44
3.1.1	Amenaza presente 2020	44
3.1.2	Amenaza futura 2040.....	45
3.2	Caso de Estudio Loja.....	47
3.2.1	Amenaza presente 2020	47
3.2.2	Amenaza futura 2040.....	48
3.3	Discusión.....	50
3.4	Análisis de costos	51
CAPÍTULO 4		53
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	53

4.1	Conclusiones Técnicas.....	53
4.2	Conclusiones Generales.....	54
4.3	Recomendaciones.....	55
	BIBLIOGRAFÍA	56
	APÉNDICES.....	59

ABREVIATURAS

CIIFEN	Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GAD	Gobierno autónomo descentralizado
GEI	Gases de efecto invernadero
IGM	Instituto Geográfico Militar
IPCC	Comité de expertos sobre el cambio climático
MAE	Ministerio del Ambiente
MAGAP	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca
MMV	Método Mora-Vahrson
PDOT	Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial
SIG	Sistemas de Información Geográfica
TCN	Tercera Comunicación Nacional

SIMBOLOGÍA

km	kilómetro
m.s.n.m.	metros sobre el nivel del mar
mm/mes	milímetros al mes
mm/año	milímetros al año
%g	porcentaje de gravedad

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Histograma de deslizamientos registrados en el cantón Loja y sus causantes. Fuente: Basado en DesInventar (2019).....	2
Figura 1.2 Histograma de deslizamientos registrados en el cantón Flavio Alfaro y sus causantes. Fuente: Basado en DesInventar (2019).....	2
Figura 1.3 Ubicación de las zonas de estudio. Caso Flavio Alfaro, Manabí y Caso Loja, Loja. Fuente: Autores.	5
Figura 1.4. Clasificación general de los movimientos de ladera. Fuente: González de Vallejo et al. (2002).....	7
Figura 1.5 Representación mundial del cambio observado en la temperatura superficial desde 1901 a 2012. Fuente: (IPCC, 2014)	10
Figura 1.6 Gráfica del aumento anual de las emisiones de CO2 desde 1950 con proyección al 2100. Fuente: (IPCC, 2014).....	11
Figura 1.7 Representación esquemática de un método cualitativo usando SIG. Fuente: Suarez (1998).....	12
Figura 1.8 Representación esquemática de un método estadístico usando SIG. Fuente: Suarez (1998).....	13
Figura 1.9 Representación esquemática de un método determinístico usando SIG. Fuente: Suarez (1998).....	13
Figura 1.10 Mapa de isoyetas del cantón Flavio Alfaro. Fuente: PDOT Cantón Flavio Alfaro, (2015).....	14
Figura 1.11 Mapa geológico del cantón Flavio Alfaro. Color Azul: Formación Borbón. Color Amarillo: Formación Onzole. Fuente: PDOT Cantón Flavio Alfaro, (2015).	15
Figura 1.12. Mapa geomorfológico del cantón Flavio Alfaro. Fuente: PDOT Cantón Flavio Alfaro, (2015).	16
Figura 1.13. Mapa de isoyetas del cantón Loja. Fuente: PDOT Municipio de Loja (2014)	17
Figura 1.14. Mapa geológico del Cantón Loja. Fuente PDOT Municipio de Loja (2014)	19
Figura 1.15 Mapa de movimientos de masa del cantón Flavio Alfaro. Fuente: Fuente: PDOT Cantón Flavio Alfaro, (2015).	22

Figura 1.16 Mapa de movimientos de masa del cantón Flavio Alfaro. Fuente: Fuente: IEE y MAGAP, (2015).....	22
Figura 1.17. Mapa de deslizamientos del Cantón Loja. Fuente PDOT Municipio de Loja (2014).....	23
Figura 2.1 Mapa nacional de precipitaciones máximas diarias con período de retorno de 100 años. Fuente: Autores.....	37
Figura 2.2. Representación del tratamiento SIG de los datos en el Método de Mora-Vahrson. INET (s.f.).....	40
Figura 3.1 Mapa de amenaza actual de deslizamientos del Cantón Flavio Alfaro, Manabí. Fuente: Autores	44
Figura 3.2 Mapa de amenaza futura de deslizamientos para el año 2040 del Cantón Flavio Alfaro, Manabí. Fuente: Autores.....	45
Figura 3.3 Histograma representando los porcentajes de área bajo distintos niveles de amenaza para los años 2020 y 2040.	46
Figura 3.4 Mapa de amenaza de deslizamientos del Cantón Loja al año 2020. Fuente: Autores.....	47
Figura 3.5 Mapa de amenaza de deslizamientos del Cantón Loja al año 2040. Fuente: Autores.....	49
Figura 3.6 Histograma representando los porcentajes de área bajo distintos niveles de amenaza en Loja para los años 2020 y 2040.	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Factores condicionantes y desencadenantes y su influencia en las condiciones de los materiales y de las laderas. Fuente: González de Vallejo et al. (2002)	9
Tabla 1.2. Geología del cantón Flavio Alfaro	15
Tabla 1.3. Geología del cantón Loja. Fuente: Modificado de PDOT Municipio de Loja (2014).....	18
Tabla 1.4. Unidades geomorfológicas del cantón Loja. Fuente: Basado en PDOT Municipio de Loja (2014)	20
Tabla 2.1 Comparación de los métodos. Fuente: Autores	24
Tabla 2.2. Factores condicionantes y desencadenantes Método MV. Fuente: Basada en Mora & Vahrson (1994)	26
Tabla 2.3. Fórmulas para el cálculo del nivel de amenaza por el Método de Mora-Vahrson. Fuente: Basada en Mora & Vahrson (1994)	27
Tabla 2.4. Factores condicionantes y desencadenantes Método multicriterio.....	28
Tabla 2.5. Factores limitantes del proyecto. Fuente: Autores	29
Tabla 2.6 Comparación Método MV y Evaluación Multicriterio	30
Tabla 2.7. Información base utilizada en el proyecto. Fuente: Autores	30
Tabla 2.8. Clasificación del factor pendiente (Sp). Fuente: Van Zuidam (1986).....	32
Tabla 2.9. Clasificación del factor litología (Sl) valorando la susceptibilidad a inestabilidad de laderas. Fuente: Mora & Vahrson (1994)	33
Tabla 2.12 Clasificación de los valores mensuales de precipitación. Fuente: Mora & Vahrson (1994).....	34
Tabla 2.13. Clasificación del factor humedad del suelo (Sh). Fuente: Mora & Vahrson (1994).....	34
Tabla 2.14 Cuadro de clasificación del factor precipitación 24h. Fuente: INAMHI, 1999	35
Tabla 2.15. Clasificación del factor precipitación adaptado (Dp). Fuente: Autores....	36
Tabla 2.16. Clasificación del factor sismicidad (Ds). Fuente: Mora-Vahrson (1994)..	39
Tabla 2.17. Clasificación de la amenaza. Fuente: Mora-Vahrson (1994)	40
Tabla 2.18. Grado de amenaza de deslizamiento obtenido Método de Mora-Vahrson. Fuente: Mora-Vahrson (1994).....	41

Tabla 2.19. Detalle del cronograma de actividades del proyecto. Fuente: Autores ...	43
Tabla 3.1 Nivel de amenaza actual y su respectiva extensión de área en km ² y porcentaje.....	45
Tabla 3.2 Nivel de amenaza actual y su respectiva extensión de área en km ² y porcentaje.....	46
Tabla 3.3 Nivel de amenaza al 2020 de Loja con su respectiva extensión de área y porcentaje.....	48
Tabla 3.4 Nivel de amenaza al 2040 de Loja con su respectiva extensión de área y porcentaje.....	48
Tabla 3.5 Costos de personal	51
Tabla 3.6 Costos de material informático.....	52
Tabla 3.7 Subtotal de costos parciales	52
Tabla 3.8 Costo total del proyecto	52

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

Ecuador es un país susceptible a la amenaza de deslizamientos de ladera debido a la dinámica geológica entre su topografía montañosa (compuesta por la Cordillera de Los Andes y la Cordillera Costanera) y sus características climáticas tropicales de humedad y precipitación; misma que además suele incrementar por eventos sísmicos por la ubicación territorial dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, o por episodios de lluvias intensas.

En el país, los deslizamientos constituyen la amenaza natural de mayor impacto (Soto et al., 2017). Según la base de datos de desastres DesInventar, desde 1970 hasta mediados de noviembre de 2019, se han registrado 5282 deslizamientos a nivel nacional, por causas principales como precipitaciones, sismos y el Fenómeno de El Niño; dejando tan solo en el 2018, al menos 47 muertos y 292 evacuados.

Además del costo humano y hogares desplazados, los deslizamientos a menudo obstruyen vías, y destruyen edificaciones y cultivos, provocando cuantiosas pérdidas económicas a los sectores públicos y privados.

En Ecuador, el Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN), cliente final de este proyecto, tiene entre sus objetivos estratégicos el generar y difundir conocimiento científico que contribuya a la reducción del riesgo ante desastres naturales y al fortalecimiento de la resiliencia a nivel regional, nacional y local. Razones por las cuales el CIIFEN ha considerado el estudio de deslizamientos en Ecuador como una componente de un proyecto macro, siendo las provincias de interés Loja y Manabí, las cuales según la base de datos DesInventar presentan respectivamente 861 deslizamientos, con 7979 afectados y 101 hogares destruidos, y 200 deslizamientos, con 8114 afectados y 334 hogares destruidos, en el período 1970 a 2019.

De acuerdo con esta base, en Loja y Manabí, los cantones Loja y Flavio Alfaro respectivamente son los que registran mayores deslizamientos, 440 y 40 cada uno. De

estos deslizamientos, en Loja alrededor de 340 o ~77% han sido causados por precipitaciones intensas como se observa en la Figura 1.1, que muestra las causas de los deslizamientos en Loja; mientras que en Flavio Alfaro casi 30 o ~75% de éstos se deben a la misma causa según se observa en la Figura 1.2, que muestra las causas de los deslizamientos en Flavio Alfaro.

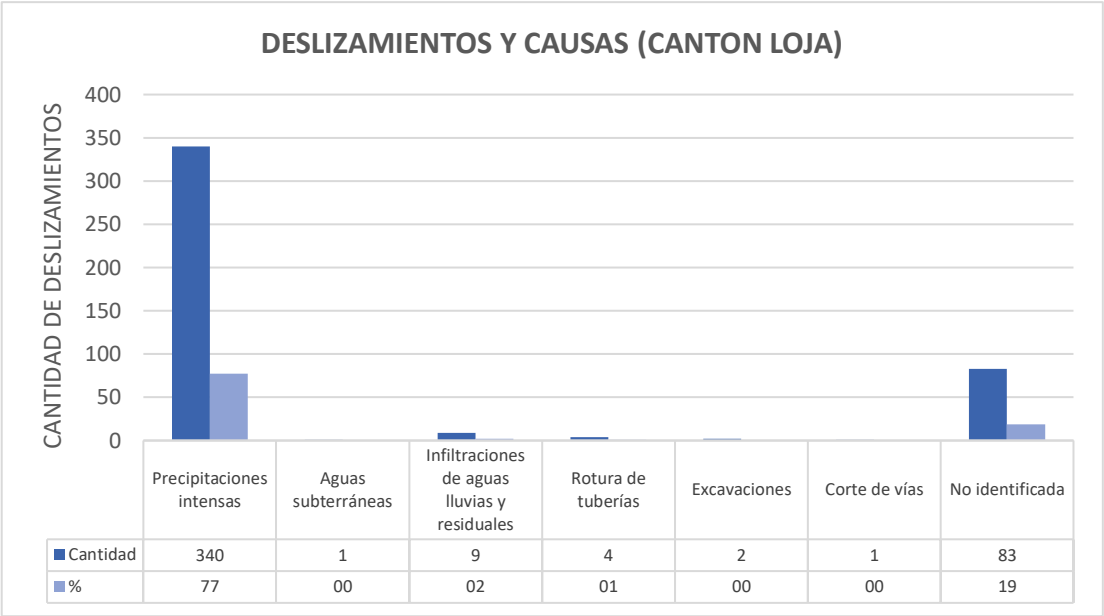


Figura 1.1. Histograma de deslizamientos registrados en el cantón Loja y sus causantes. Fuente: Basado en DesInventar (2019)

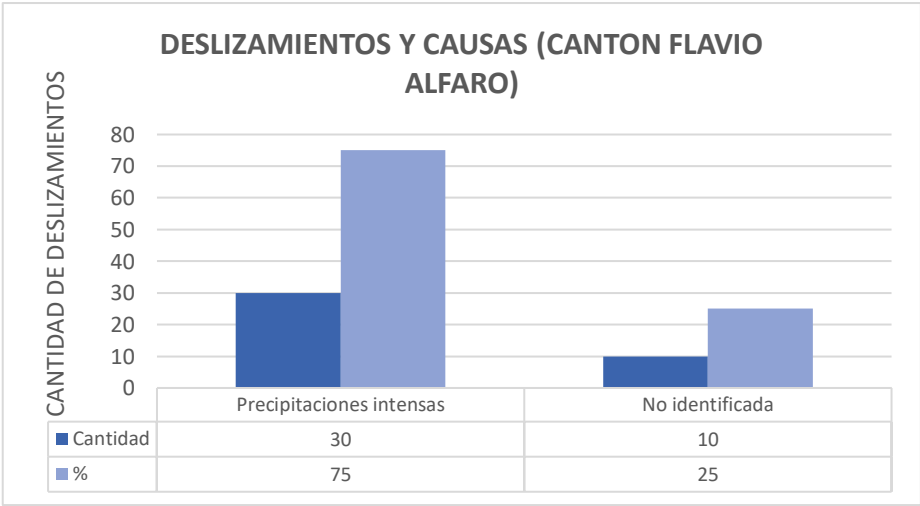


Figura 1.2 Histograma de deslizamientos registrados en el cantón Flavio Alfaro y sus causantes. Fuente: Basado en DesInventar (2019)

Por otro lado, el llamado cambio climático, constituye otro factor preocupante que tomar en cuenta, ya que se presenta como un elemento con miras a agravar los fenómenos naturales actuales, anticipándose períodos más extremos de sequía y precipitaciones intensas, que impactarán en las condiciones del suelo por consiguiente la susceptibilidad ante deslizamientos en el futuro. (Skansi, 2013)

Entonces, identificándose al factor hidroclimático de precipitaciones como el principal causante de los deslizamientos en estas zonas, se espera que a futuro la variación en la intensidad de las precipitaciones por efecto del cambio climático impacte de alguna forma la susceptibilidad a deslizamientos, constituyendo la problemática a tratar en este estudio.

1.2 Justificación del problema

La identificación de zonas amenazadas por deslizamientos se ha vuelto relevante para gobiernos que busquen prevenir desastres que puedan afectar a las poblaciones locales o que causen perjuicio económico. El uso de herramientas de sistemas de información geográfica para zonificar áreas susceptibles a deslizamientos ha permitido cubrir grandes extensiones de terreno, en contraste con estudios geotécnicos in situ, cuyo costo y tiempo de ejecución harían imposible alcanzar escalas al nivel de un cantón o provincia, escalas necesarias a considerar en la planificación territorial.

La importancia de este proyecto radica en la generación de información actualizada y futura, que pueda ser de utilidad para estudios de vulnerabilidad y riesgos, elaboración de planes de ordenamiento territorial o planes de contingencia y alerta temprana en cada municipio; otorgando un beneficio social directamente a los gobiernos provinciales de Loja y Flavio Alfaro como tomadores de decisiones e indirectamente a las comunidades y pueblos englobados en las áreas propensas.

Además, el desarrollo de este proyecto se apega a dos de los objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la ONU. El objetivo 11, de “Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles” (Naciones Unidas, 2018), que entre sus metas busca reducir la cantidad de muertes, afectados y pérdidas económicas a causa de desastres. Y el objetivo 13, de “Adoptar

medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos” (Naciones Unidas, 2018), ya que, los mapas de amenaza considerando los efectos futuros del cambio climático, ayudarán en el fortalecimiento de la capacidad de adaptación a los desastres naturales y riesgos relacionados con el clima, y además contribuirán a la incorporación de planes de educación, adaptación, reducción de efectos y alerta temprana en las zonas de estudio.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la amenaza de deslizamiento en cantones de Flavio Alfaro (Manabí) y Loja (Loja), mediante la integración de información geográfica, geológica e hidroclimática para la identificación de las zonas más propensas a dichos eventos.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Seleccionar la o las metodologías de zonificación de susceptibilidad a deslizamientos acorde a las condiciones de cada zona de estudio para la obtención de resultados más ajustados a la realidad.
2. Elaborar mapas de amenaza de deslizamiento de las zonas de estudio para el año 2020, para el análisis de los escenarios actuales.
3. Elaborar mapas de amenaza de deslizamiento de las zonas de estudio para el año 2040 considerando efectos debido al cambio climático, para el análisis de los escenarios futuros.

1.4 Ubicación

El estudio comprende dos zonas del Ecuador: la primera, ubicada en el cantón Flavio Alfaro al norte de la provincia de Manabí, y la segunda, ubicada en el cantón Loja en la provincia del mismo nombre. El cantón Flavio Alfaro tiene un área total de 1343 km² y una población de 25 004 habitantes (INEC, 2010), mientras que el cantón Loja en cuenta con 1928 km² de superficie y 214 855 habitantes (INEC, 2010). En la Figura 1.3 se observa la ubicación de las zonas de estudio respecto a la provincia que pertenecen y también respecto al país.

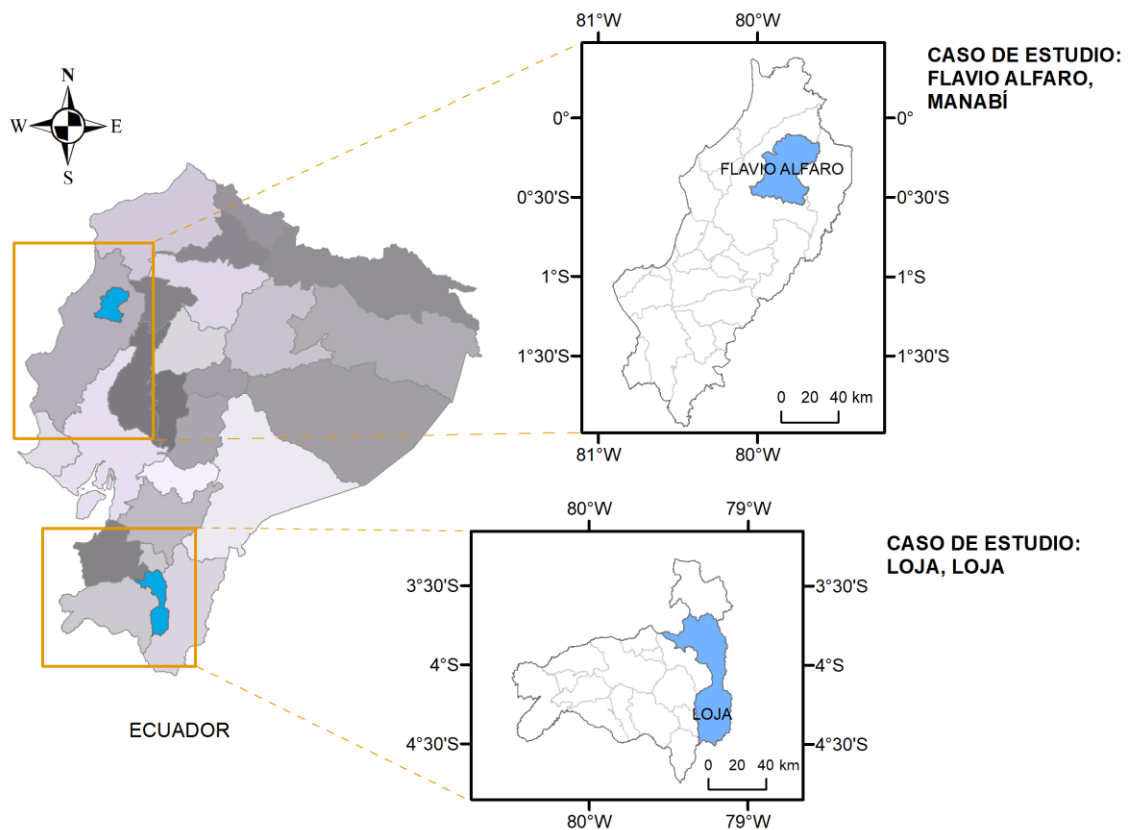


Figura 1.3 Ubicación de las zonas de estudio. Caso Flavio Alfaro, Manabí y Caso Loja, Loja. Fuente: Autores.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Definición de Terminología

Amenaza o Peligrosidad: Barbat (1998) la define como la probabilidad de que ocurra un evento, potencialmente dañino, determinado en función de la intensidad en un periodo y área dada. Pero, también puede definirse como “una sustancia, fenómeno, actividad humana o condición de peligro capaz de provocar daños a la salud, lesiones, muerte, así como perjuicios a la propiedad, pérdida de servicios, alteración del orden social y ambiental” (UNISDR, 2009).

Amenaza geológica: “procesos geológicos capaces de ocasionar muerte, daños a la salud, infraestructura, servicios y ambiente. Abarcan sismos, erupciones volcánicas, movimientos de masas” (UNISDR, 2009).

Vulnerabilidad: “Las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza” (UNISDR, 2009).

Riesgo: “La combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas” (UNISDR, 2009).

Resiliencia: “La capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas” (UNISDR, 2009).

Cambio climático: De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) se define como:

Un cambio en el estado del clima que se puede identificar (por ejemplo, mediante el uso de pruebas estadísticas) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede obedecer a procesos naturales internos o a cambios en los forzantes externos, o bien, a cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo (pág. 188).

1.5.2 Movimientos de ladera

Pueden definirse como acomodaciones del terreno para llegar al equilibrio frente a una variación de condiciones. De acuerdo con González de Vallejo et al. (2002), las áreas de mayor inestabilidad son “zonas montañosas y escarpadas, zonas de relieve con procesos erosivos y de meteorización intensos, laderas de valles fluviales, acantilados costeros, zonas con materiales blandos y sueltos, con macizos rocosos arcillosos, esquistosos y alterables, zonas sísmicas, zonas de precipitación elevada, etc.” Los movimientos de ladera a menudo se engloban bajo el término de deslizamientos.

1.5.2.1 Clasificación de los movimientos de ladera

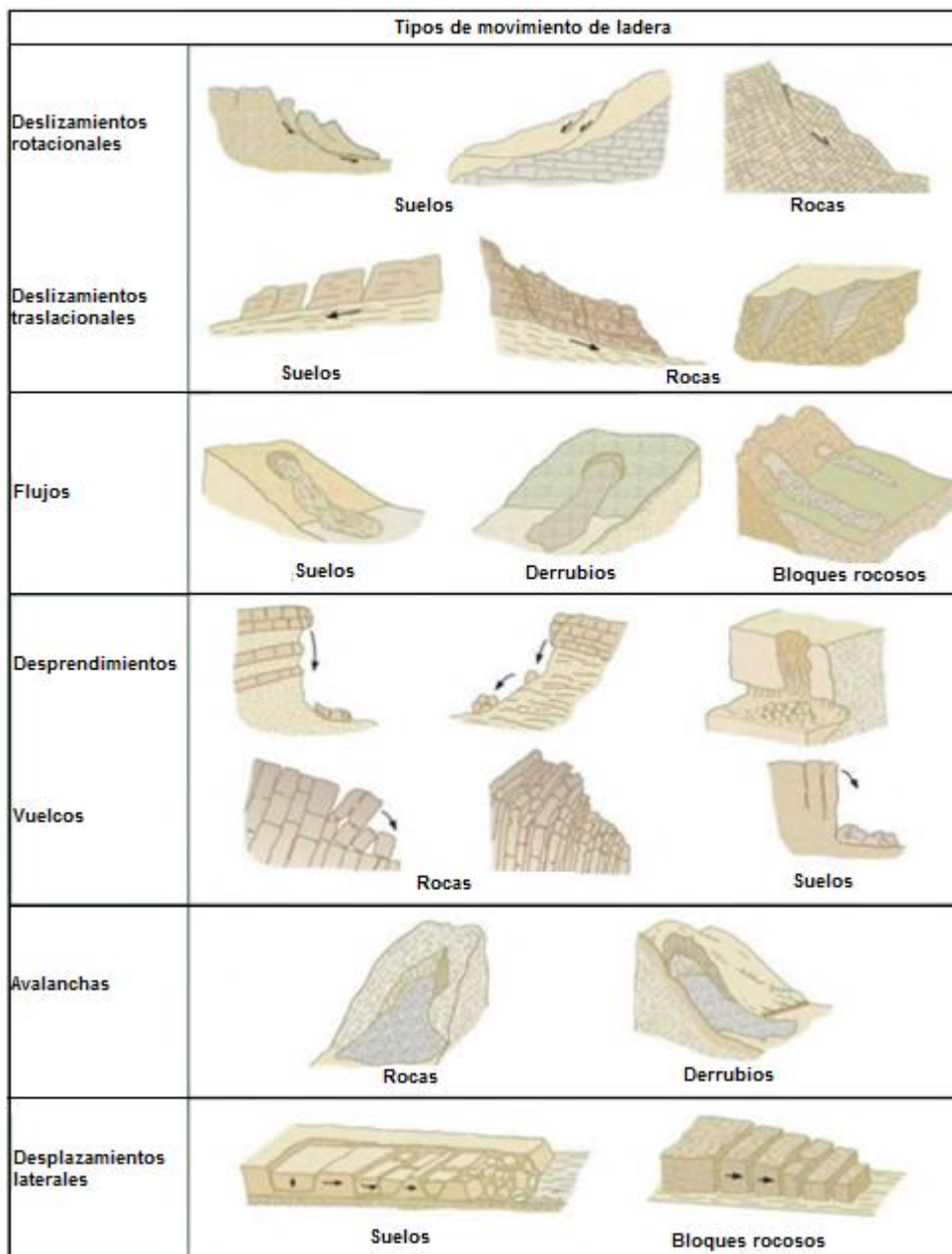


Figura 1.4. Clasificación general de los movimientos de ladera. Fuente: González de Vallejo et al. (2002).

Los movimientos de ladera suelen clasificarse según los materiales involucrados (suelos, derrubios y rocas), y a la forma y clase de rotura. Comúnmente, se distinguen seis clases: deslizamientos (rotacionales y traslacionales), flujos, desprendimientos y vuelcos, avalanchas y desplazamientos laterales (Figura 1.4) (González de Vallejo et al., 2002).

Sin embargo, sólo se definirán los movimientos de ladera considerados en el estudio, es decir, los deslizamientos.

Deslizamientos traslacionales: son aquellos donde la rotura se da a favor de superficies planas de debilidad preexistentes, como planos de estratificación, contactos litológicos, planos estructurales, etc. Suelen ser poco profundos, pero muy extensos y de gran alcance. Ocurren en suelos y rocas, siendo las masas deslizadas en general bloques rectangulares anteriormente independizados por discontinuidades. Normalmente no necesitan de una pendiente elevada y son más rápidos que los rotacionales (González de Vallejo et al., 2002).

Deslizamientos rotacionales: son aquellos donde la rotura se da a favor de superficies curvas o concoides, por lo cual, comenzada la debilidad la masa rota, pudiendo separarse en escalones. Ocurren con frecuencia en suelos cohesivos uniformes. Sus dimensiones, tanto en ancho como largo, varían entre decenas y centenas de metros, y pueden ser superficiales o profundos (con un límite establecido en alrededor de 10 m). Dependiendo del tipo de suelo y contenido de agua, la masa deslizada acumulada al pie de la ladera puede generar flujos (González de Vallejo et al., 2002).

1.5.2.2 Factores que controlan los movimientos de ladera

Son factores que modifican las fuerzas internas y externas que inciden en el terreno. Se dividen en factores **condicionantes o pasivos**, que son propios de la naturaleza, composición, forma y estructura del terreno; y en factores **desencadenantes o activos**, que son de tipo externo, siendo los generadores de las inestabilidades y responsables de la magnitud y velocidad de los movimientos. Su influencia en el comportamiento geomecánico de los suelos y rocas, puede contribuir en la reducción a la resistencia al corte o en el aumento de los refuerzos de corte, controlando así los movimientos de ladera (González de Vallejo et al., 2002). La tabla 1.1 exhibe un resumen de los factores condicionantes y desencadenantes comunes; y su incidencia en las laderas.

Tabla 1.1. Factores condicionantes y desencadenantes y su influencia en las condiciones de los materiales y de las laderas. Fuente: González de Vallejo et al. (2002)

	Factores	Influencias y efectos
Condicionantes	Relieve (pendientes, geometría)	Distribución del peso del terreno.
	Litología (composición, textura)	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico.
	Estructura geológica y estado tensional	Resistencia, deformabilidad. Comportamiento discontinuo y anisótropo. Zonas de debilidad.
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Comportamiento hidrogeológico. Generación de presiones intersticiales.
	Deforestación	Modificaciones en el balance hídrico. Erosión.
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.
	Desencadenantes	Precipitaciones y aportes de agua
Cambio en las condiciones hidrológicas		Saturación de suelos. Erosión.
Aplicación de cargas estáticas y dinámicas		Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera. Incremento de presiones intersticiales.
Cambios morfológicos y de geometría en las laderas		Variación de las fuerzas debidas al peso. Cambio en el estado tensional.
Erosión o socavación del pie		Cambios geométricos en la ladera. Cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera.
Acciones climáticas (procesos de deshielo, heladas, sequías)		Cambio en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y plazos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes.

1.5.3 Cambio climático y su impacto

El cambio climático es considerado como un fenómeno real e innegable, reflejado en un calentamiento global sostenido con un aumento de 0.8 °C en la temperatura media global desde 1880 (Figura 1.5). Causado primordialmente por la actividad antropogénica y su sostenida emisión de gases de efecto invernadero (GEI) desde la revolución industrial, período en el que el consumo de combustibles fósiles, como el carbón o el petróleo, se

disparó. Los GEI, como el CO₂ o el metano, atrapan la radiación solar reflejada por la superficie de la Tierra (forzamiento radiativo), en efecto incrementando la temperatura ambiental. El calor adicional ha reducido la extensión del hielo polar y alterado los sistemas climáticos terrestres. Entre los efectos esperados están el cambio de la intensidad de las precipitaciones, la acidificación de los océanos, o la desertificación de bosques. Esto plantea una amenaza a la seguridad alimentaria y expone a poblaciones ante eventos climáticos extremos. (IPCC, 2014)

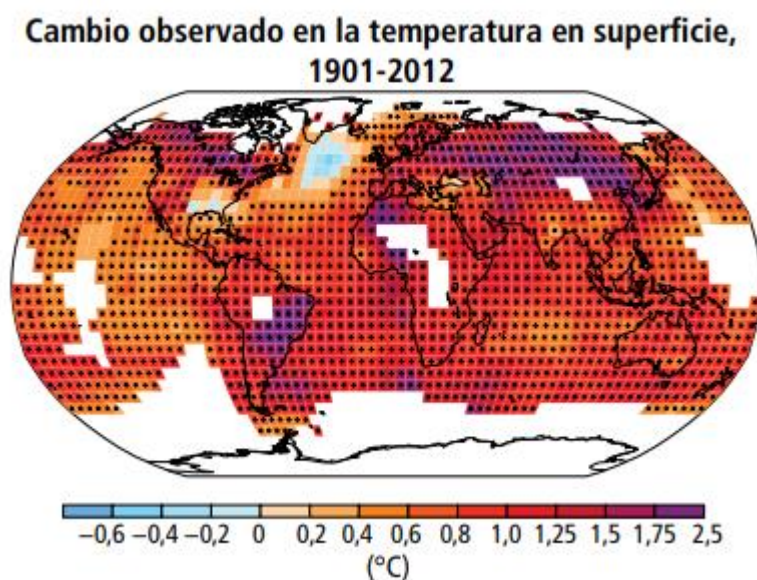


Figura 1.5 Representación mundial del cambio observado en la temperatura superficial desde 1901 a 2012. Fuente: (IPCC, 2014)

El IPCC hace uso de las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) desde la publicación del AR5 para proyectar la emisión y concentración de GEI hasta el año 2100. Existen cuatro trayectorias o escenarios, cada uno nombrado por el forzamiento radiativo asociado a su respectiva emisión de GEI pronosticada, teniendo así los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 5, RCP 8.5 (Figura 1.6). El escenario RCP 2.6 es considerado optimista al presumir que las emisiones de GEI bajan significativamente en los próximos años, mientras que el RCP 8.5 es el peor escenario de todos, donde los gobiernos no se comprometen lo suficiente y las emisiones de GEI aumentan considerablemente.

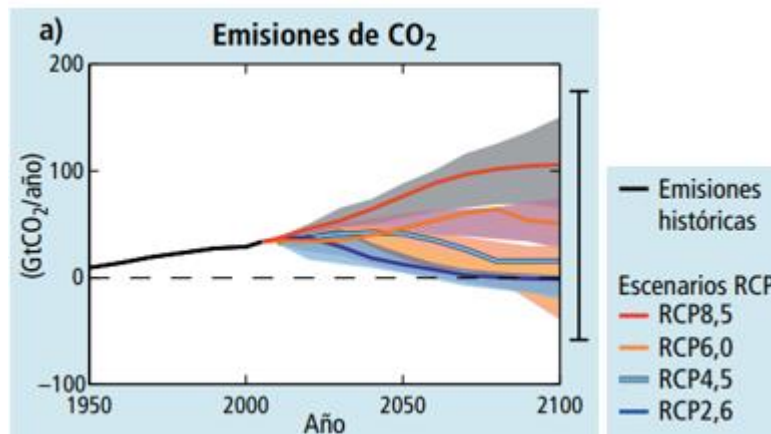


Figura 1.6 Gráfica del aumento anual de las emisiones de CO₂ desde 1950 con proyección al 2100. Fuente: (IPCC, 2014)

1.5.4 Estado del arte

Los sistemas de información geográfica (SIG) son una poderosa herramienta para trabajar con grandes volúmenes de información de carácter espacial y ha sido innegable su aporte a la caracterización de peligros, amenazas y/o riesgos naturales. La primera aplicación de SIG a deslizamientos que se conoce data de 1978 en California por Newman, aunque de una forma poco realista comparado con los estándares actuales (Suarez, 1998). Desde entonces se han explorado variados modelos o metodologías para la zonificación de deslizamientos que toman más factores en consideración en su análisis. Se puede distinguir tres principales enfoques en lo que respecta a las metodologías que se aplican:

- Métodos cualitativos o heurísticos: Estos métodos toman en consideración diferentes factores representados en mapas, donde a cada factor se le asigna una ponderación que luego mediante algebra de mapas y una expresión matemática definida para los factores se obtienen las zonas en peligro (Figura 1.7). Destaca el método Mora-Vahrson, que en Latinoamérica se ha usado en repetidas ocasiones: Cali, Colombia (Sierra & Figueroa, 2017); Cuenca del Rio Macho, Costa Rica (Quesada & Feoli-Boraschi, 2018). Básicamente usa los datos de humedad del suelo, litología, pendiente, precipitación y sismicidad para ponderar cada uno y generar un mapa de amenazas.

Existen estudios con otros enfoques heurísticos donde los factores a considerar varían o cambian las ponderaciones asociadas. Casos como el método

Ponderado-AHP que toma en consideración 10 subtipos de datos adicionales. (He, 2019).

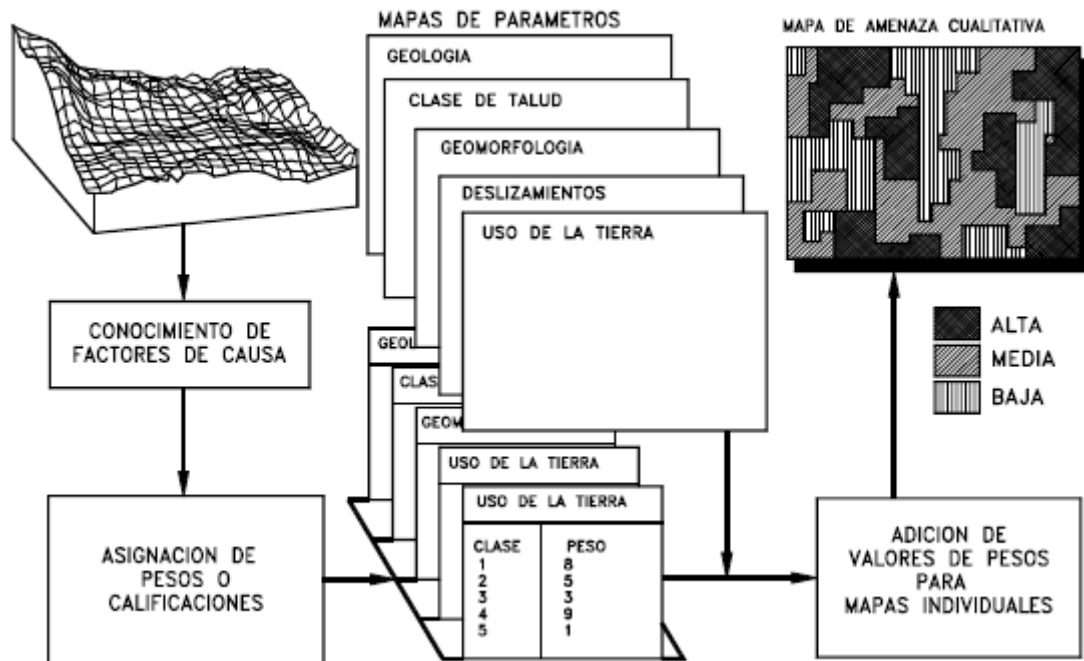


Figura 1.7 Representación esquemática de un método cualitativo usando SIG.

Fuente: Suarez (1998)

- Métodos estadísticos: Este enfoque busca correlacionar los deslizamientos ocurridos con los factores que los provocan y sus combinaciones plausibles. Destaca el uso del análisis bivariado multivariado en o más recientemente el modelado B-GeoSVC que busca emplear coeficientes de variación espacial complejos. (Yang, 2019). La Figura 1.8 representa gráficamente estos métodos.
- Métodos determinísticos: Se basan en el cálculo de la estabilidad de un talud y factores de seguridad, por lo que estos tipos de estudios requieren información muy detallada de la zona de análisis de índole geotécnico. (González de Vallejo et al., 2002). La figura 1.9 representa gráficamente estos métodos.

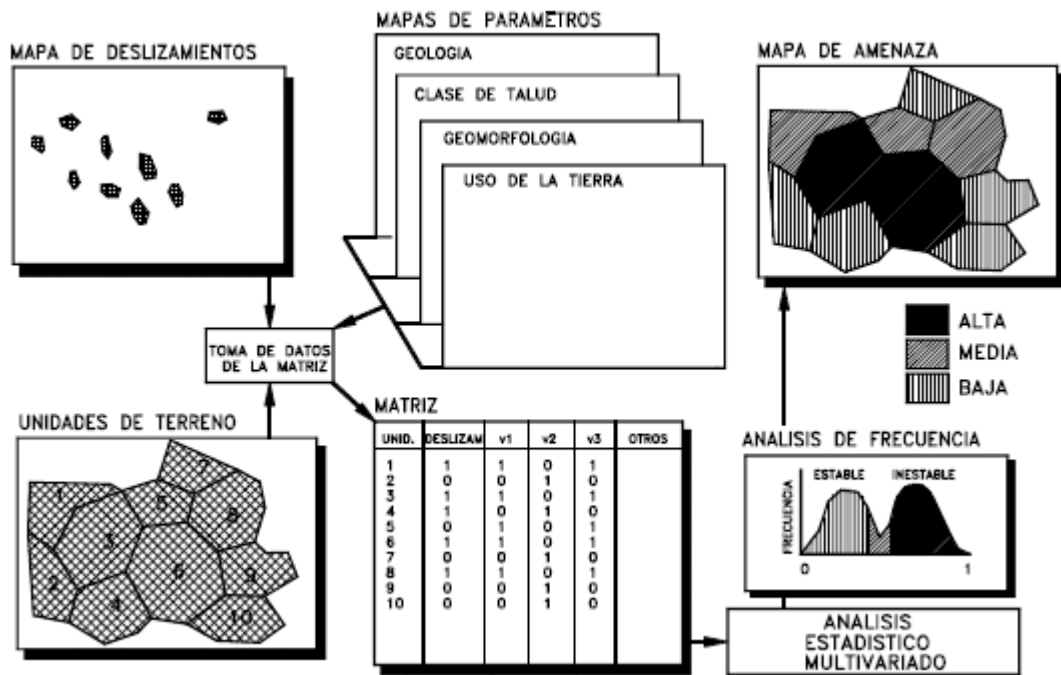


Figura 1.8 Representación esquemática de un método estadístico usando SIG.

Fuente: Suarez (1998)

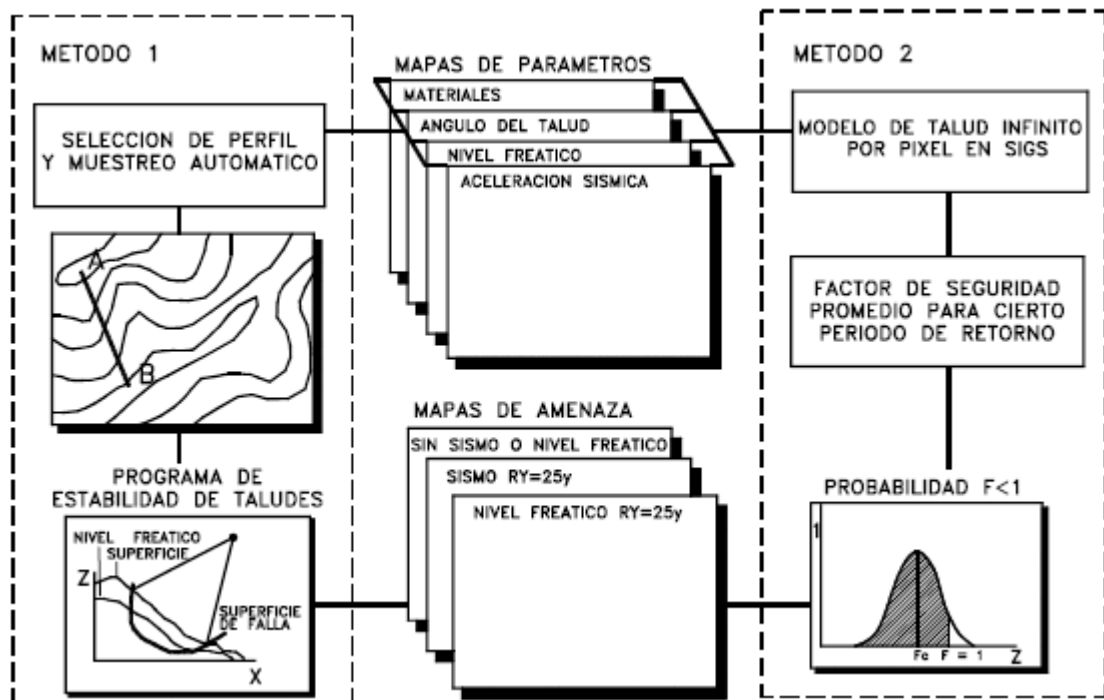


Figura 1.9 Representación esquemática de un método determinístico usando SIG.

Fuente: Suarez (1998)

En los últimos años, el *machine learning* ha hecho presencia en el análisis de deslizamientos, donde redes neuronales son entrenadas con datos históricos y condiciones del terreno produciendo mapas de amenazas comparables a uno hecho por un humano (Shahri, 2019), lo que plantea un costo-efectividad mínimo y una automatización de procesos a tiempo real.

1.6 Clima y Geología

1.6.1 Cantón Flavio Alfaro, Manabí

1.6.1.1 Clima

Las temperaturas que se pueden encontrar en el cantón son una máxima de 35°C, mínima de 15°C y una media de 25°C valores típicos de la costa ecuatoriana. En cuanto a la hidrología presenta una precipitación mensual promedio de 102 mm, una humedad del 85% y una evapotranspiración de 122 mm/año. Como cabría esperar, existen dos estaciones: invierno y verano. (PDOT Flavio Alfaro, 2015). La figura 1.10 muestra el mapa de isoyetas del cantón.

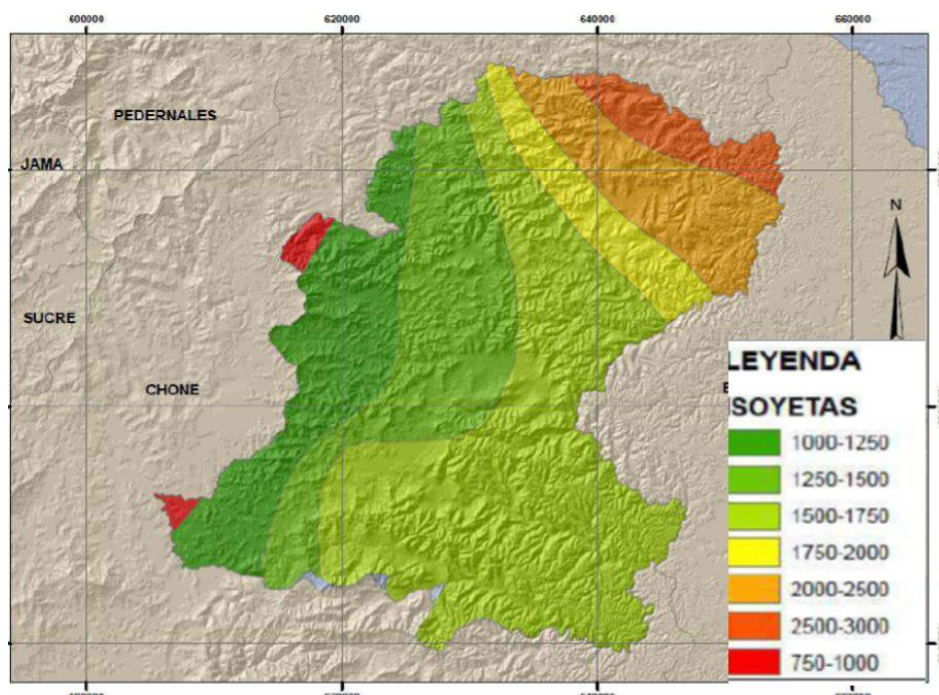


Figura 1.10 Mapa de isoyetas del cantón Flavio Alfaro. Fuente: PDOT Cantón Flavio Alfaro, (2015).

1.6.1.2 Geología local

El cantón se encuentra ubicado sobre dos formaciones geológicas de carácter sedimentario (Tabla 1.2), representadas en el mapa geológico del cantón en la Figura 1.11.

Tabla 1.2. Geología del cantón Flavio Alfaro

Formación Geológica	Símbolo	Descripción
Fm. Onzole	Moz	Lutitas y limolitas estructurales.
Fm. Borbón	MPL _{Bb}	Areniscas tobáceas.

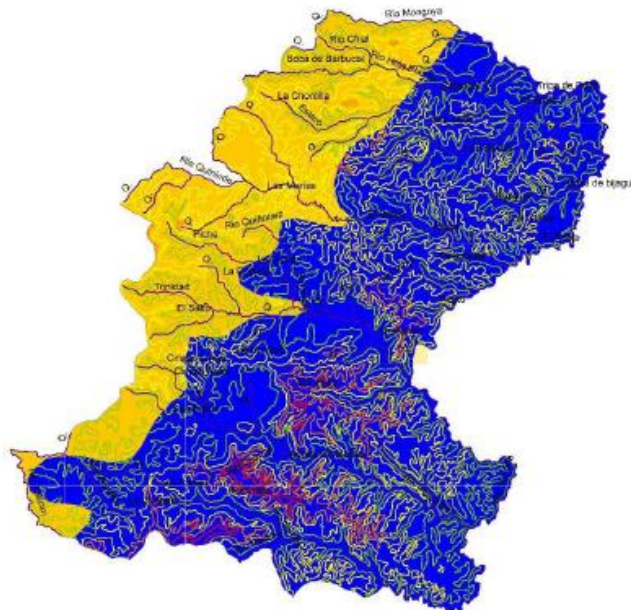


Figura 1.11 Mapa geológico del cantón Flavio Alfaro. Color Azul: Formación Borbón. Color Amarillo: Formación Onzole. Fuente: PDOT Cantón Flavio Alfaro, (2015).

1.6.1.3 Geomorfología

El cantón Flavio Alfaro presenta un relieve colinado, donde las colinas altas representan un 53% de la superficie del terreno. También presenta un considerable número de vertientes, llegando a representar un 40% del área. Ver Figura 1.12.

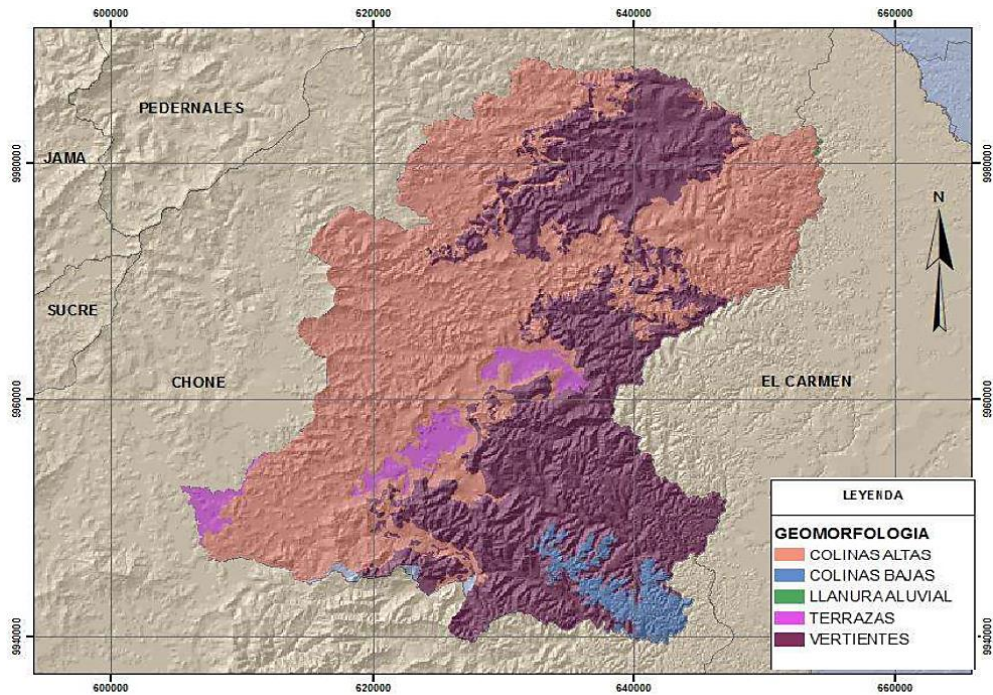


Figura 1.12. Mapa geomorfológico del cantón Flavio Alfaro. Fuente: PDOT Cantón Flavio Alfaro, (2015).

1.6.2 Cantón Loja, Loja

1.6.2.1 Clima

El cantón Loja se encuentra a 2100 m.s.n.m. de altitud, y posee un clima Ecuatorial Mesotérmico Semi-Húmedo. La temperatura media mensual oscila entre los 14 °C y 24 °C. En cuanto a precipitación, las lluvias intensas empiezan en septiembre (~50 mm/mes) y se extienden hasta marzo, donde alcanzan los picos más altos (~180 mm/mes), continuando en menor frecuencia durante el año (PDOT Municipio de Loja, 2014). Anualmente, los valores de precipitación varían entre 500 y 2000 mm (PDOT Municipio de Loja, 2014)., como se observa en la Figura 1.13.

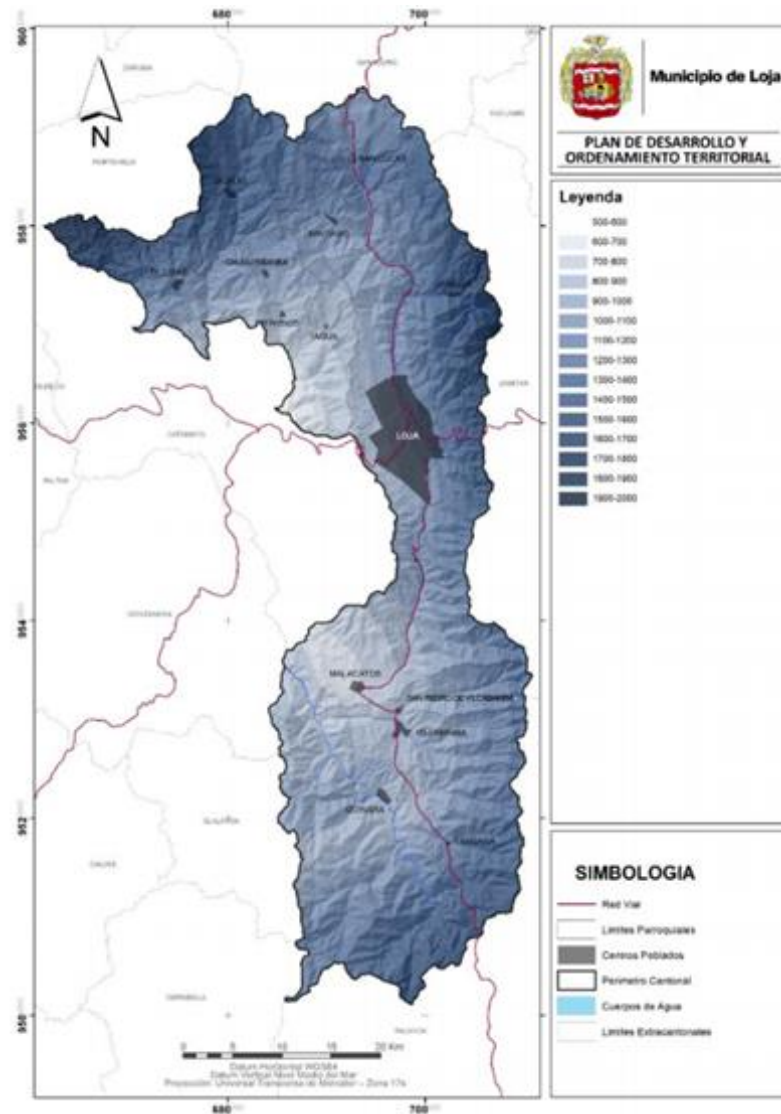


Figura 1.13. Mapa de isoyetas del cantón Loja. Fuente: PDOT Municipio de Loja (2014)

1.6.2.2 Geología

El cantón Loja presenta una geología conformada por rocas metamórficas y volcánicas con intrusiones graníticas, y por sedimentos del Terciario en las cuencas de Loja, Malacatos y Vilcabamba (PDOT Municipio de Loja, 2014)., detallados en la Tabla 1.3 y representados en la Figura 1.14 del mapa geológico del cantón.

Tabla 1.3. Geología del cantón Loja. Fuente: Modificado de PDOT Municipio de Loja (2014)

Formación Geológica y Depósitos	Símbolo	Descripción
Depósitos coluviales	Q ₂	Gravas o bloques
Depósitos coluvio-aluviales	Q ₃	Limos, arenas de grano fino a grueso.
Depósitos aluviales	Q ₁	Bloques, gravas y arenas de grano fino a medio.
Rocas intrusivas	g	Granitos, granodioritas, cuarzodioritas.
Serie Tahuín	K _T	Pizarras, esquistos sericíticos, filitas, cuarcitas e intercalación de rocas metavolcánicas.
Fm. Celica	K _C	Lavas andesíticas porfíricas verdes homogéneas masivas, localmente con capas tobáceas.
Fm. Quillollaco	MPI _Q	Filitas, cuarcitas, esquistos sericíticos, riolita en matriz arenosa.
Fm. Trigal	M _T	Arcillas y lutitas cafés con láminas delgadas de yeso.
Fm. Sacapalca	PC _S	Lavas con pórfidos andesíticos marrón a gris, con fenocristales de andesino-labradorita. Y piroclastos que comprenden tobas andesíticas y riolíticas de colores verdes, marrones, amarillos.
Unidad Chigüinda	PZ _Z	Rocas metamórficas que constituyen el basamento de la Cordillera Real. Presencia de filitas, esquistos cuarcíticos y sericíticos, y cuarcitas con grados metamórficos más altos hacia el Este del cantón, donde se encuentran esquistos de biotita-moscovita, gneis y gneises graníticos de grano grueso y granito metasomático.

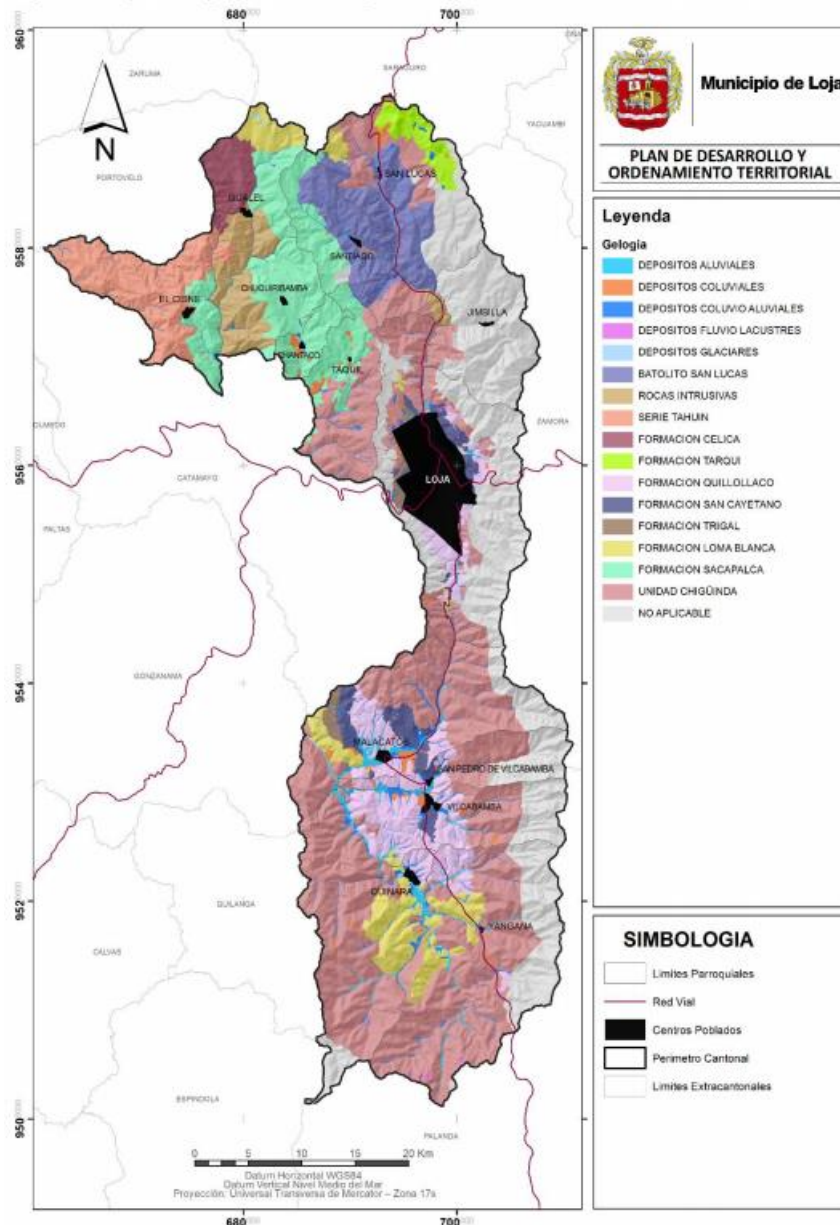


Figura 1.14. Mapa geológico del Cantón Loja. Fuente PDOT Municipio de Loja (2014)

1.6.2.3 Geomorfología

La geomorfología del cantón Loja corresponde a diferentes procesos genéticos, encontrándose diversas unidades geomorfológicas. De acuerdo con el PDOT del Cantón Loja (2014), las principales unidades geomorfológicas son: relieve montañoso, relieve colinado muy alto, alto y medio, que se detallan en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Unidades geomorfológicas del cantón Loja. Fuente: Basado en PDOT Municipio de Loja (2014)

Unidad Geomorfológica	Descripción
Relieve montañoso	Son relieves con pendientes entre los 25 y 100%, con desniveles relativos mayores que 300m, representan 44,39% de la superficie cantonal. Se encuentran hacia el centro y sur del cantón desarrollados sobre rocas metamórficas como filitas, esquistos y gneises de la Unidad Chigüinda, y hacia el norte, desarrollados en aglomerados de la Fm. Sacapalca y en andesitas, andesitas-basálticas y tobas andesíticas de la Fm. Celica, en intrusivos granodioríticos del Batolito de San Lucas y en rocas metamórficas de la Unidad Chigüinda. Presentan cimas agudas, con vertientes rectilíneas y cóncavas.
Relieve colinado muy alto	Son relieves con pendientes entre los 25 y 100%, con desniveles relativos entre los 200 y 300m, representando un 11,51% de la superficie cantonal. Se encuentran por todo el cantón, y en zonas puntuales al norte y centro sur, desarrollados en rocas de las formaciones Sacapalca, Celica, Tarqui, Quillollaco y en la Serie Tahuín. Presentan cimas agudas, con vertientes rectilíneas y cóncavas; y cimas redondeadas.
Relieve colinado alto	Son relieves con pendientes entre los 12 y 100%, con desniveles relativos entre los 100 y 200m, representando un 11,51% de la superficie cantonal. Se desarrollan en rocas de las formaciones Sacapalca, Celica, Tarqui, Trigal, San Cayetano, Loma Blanca, Quillollaco, intrusivos granodioríticos y en la Serie Tahuín. Presentan cimas redondeadas y agudas.
Relieve colinado medio	Son relieves con pendientes medias a escarpadas entre los 12 y 150%, con desniveles relativos entre los 5 y 200m, representando un 5,79% de la superficie cantonal. Se localizan principalmente hacia el centro-noroeste y suroeste, desarrollados en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias de la Unidad Chigüinda y formaciones Sacapalca, Tarqui, Celica, Loma Blanca, Trigal, San Cayetano y Quillollaco.

1.7 Antecedentes

1.7.1 Flavio Alfaro

El PDOT del cantón Flavio Alfaro (2015) identificó a los movimientos de masa como una de las amenazas naturales con más alta ocurrencia, así mismo realizó un análisis de susceptibilidad a movimientos de masa reflejado en el mapa de la Figura 1.15, Dicho mapa ubica prácticamente a la totalidad del cantón bajo un alto grado de susceptibilidad, y sin conocer la metodología que se usó, no es posible discutir el porqué de tal resultado.

Otro estudio de deslizamientos fue realizado en el cantón por el IEE y MAGAP dentro del proyecto “Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a nivel nacional, Escala 1:25000” (2015). En la Figura 1.16 se muestra el mapa de amenazas producido, donde se destaca el alto grado de amenaza para la zona oeste del cantón. El método Mora Vahrson se usó para este análisis, pero con algunas modificaciones a los factores que emplea.

1.7.1 Loja

De acuerdo con el PDOT Municipio de Loja (2014):

“En Loja existen abundantes deslizamientos, por diversas causas. En primer lugar, a la litología, ya que existen numerosos cuerpos arcillosos y limo-arcillosos intercalados con areniscas y conglomerados; seguido las precipitaciones y pendiente (> 56,61%) propiciando una degradación de suelos, e inestabilidad de taludes con prácticas agropecuarias” (pág.105).

Estudios anteriores han sido llevados a cabo por la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, elaborándose el mapa de amenaza de deslizamiento a nivel cantonal (Figura 1.17), donde se concluye que por las fuertes pendientes que presenta el cantón, el grado de susceptibilidad a deslizamientos altos es del 51% del territorio, abarcando las partes nor-occidentales y sur del cantón. (PDOT Municipio de Loja, 2014)

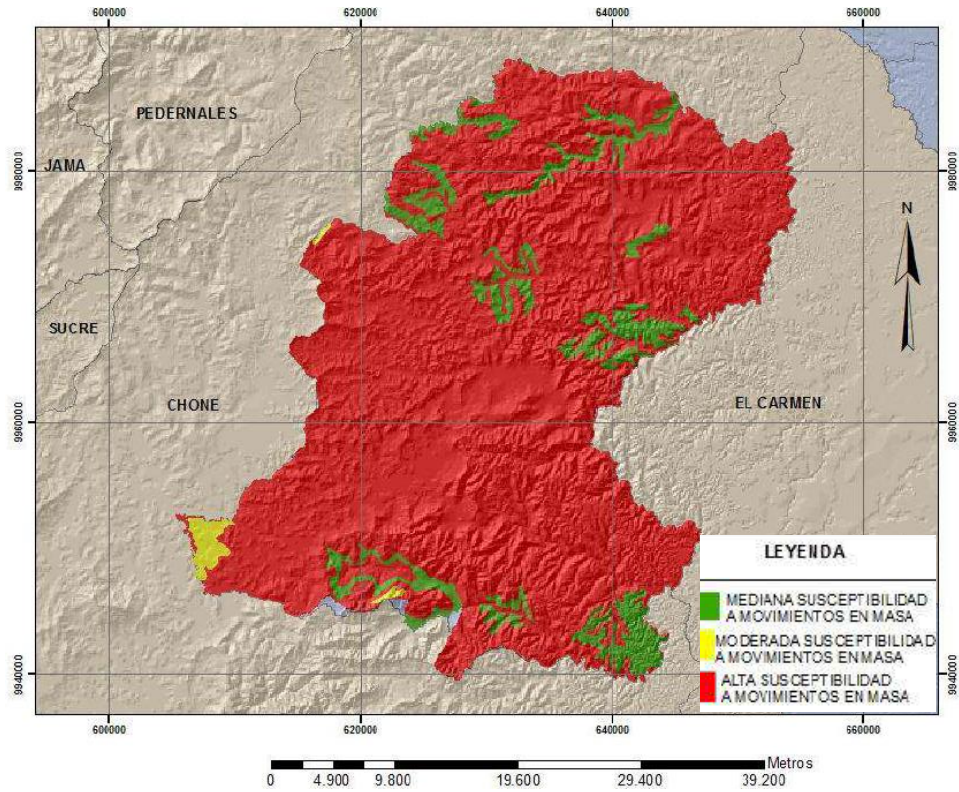


Figura 1.15 Mapa de movimientos de masa del cantón Flavio Alfaro. Fuente: Fuente: PDOT Cantón Flavio Alfaro, (2015).

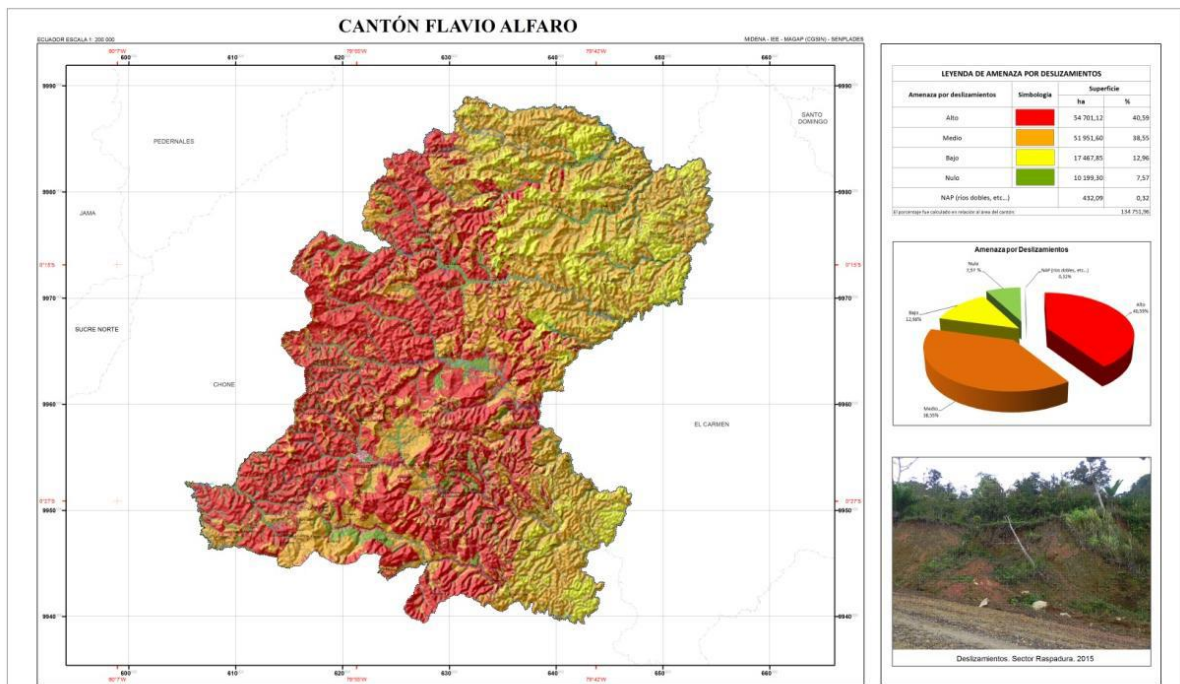


Figura 1.16 Mapa de movimientos de masa del cantón Flavio Alfaro. Fuente: Fuente: IEE y MAGAP, (2015).

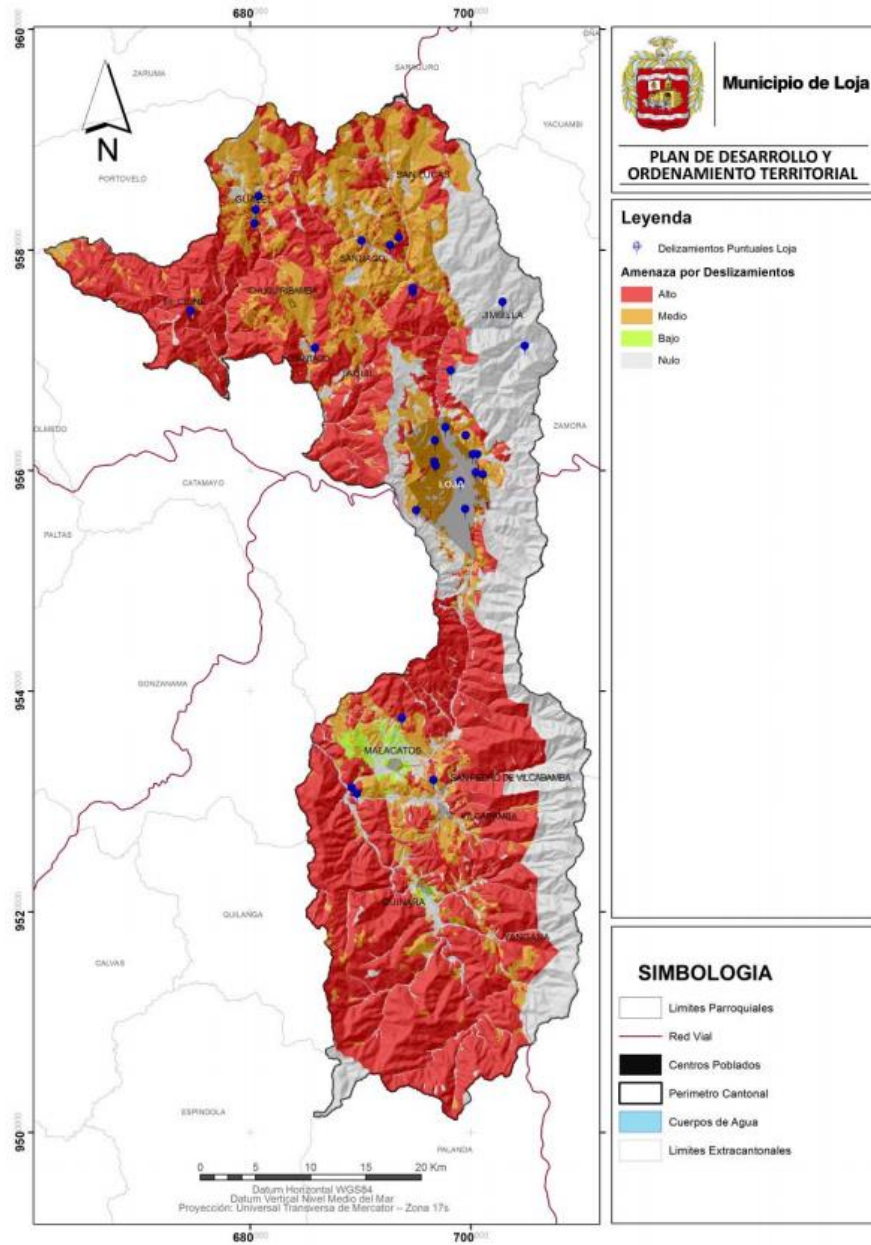


Figura 1.17. Mapa de deslizamientos del Cantón Loja. Fuente PDOT Municipio de Loja (2014)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Anteriormente, se presentó como problemática que, a futuro, el incremento de las precipitaciones por efecto del cambio climático impactará de alguna forma la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos en Flavio Alfaro y Loja. Por lo cual, se busca evaluar la amenaza de deslizamientos debido al factor hidroclimático de precipitaciones en los cantones mencionados, tanto a presente (2020) como a futuro (2040).

Como se mencionó en el capítulo uno, existen varios enfoques y métodos para zonificar amenazas de deslizamientos, los cuales se pueden clasificar en 3 grupos: métodos cualitativos, métodos estadísticos y métodos determinísticos (Vallejo, 2002). Escoger el método adecuado es de suma importancia, ya que de eso dependerá cumplir con los objetivos, el tiempo planeado y los recursos disponibles.

Durante la investigación, se compararon mediante Design Thinking las características de estos métodos, analizando sus ventajas y desventajas (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Comparación de los métodos. Fuente: Autores

Métodos	Características	Ventaja	Desventaja
Cualitativos	-Permite integrar los factores involucrados a deslizamientos mediante mapas temáticos.	X	
	-Permite involucrar la variable precipitaciones.	X	
	-Adecuado para analizar extensas áreas 1:25000 -1:50000	X	
Estadísticos	-Requiere de bases de datos históricas de deslizamientos con datos precisos de ubicación, extensión y factores.		X
	-Requiere datos geológicos-geotécnicos de la zona de estudio.		X
Determinísticos	-No permitiría integrar la variable precipitaciones.		X
	-Gran esfuerzo de recolección de datos.		X
	-Limitado a estudios de tipo local.		X

Con base en esto, se descartaron los métodos determinísticos y estadísticos. Los primeros, ya que no se dispone de información geotécnica suficiente de las áreas de estudio y porque son más apropiados para estudios locales, y no sobre zonas extensas de terreno, que en este estudio cantonal abarca escalas de 1:25 000. Y los segundos, ya que por lo general requieren de una extensa base de registros históricos de deslizamientos con su ubicación y extensión exacta que, en los casos de Flavio Alfaro y Loja no se encuentran disponibles. Además, ninguno de estos métodos permitiría analizar a futuro los deslizamientos relacionados con precipitaciones.

Así, los métodos cualitativos se seleccionaron como los adecuados para la ejecución del proyecto debido a que abarcan escalas cantonales y permiten integrar factores representados en mapas y además puede involucrarse la variable precipitaciones.

2.1 Propuestas

Entre los distintos métodos cualitativos existentes, se destacaron 2 alternativas: Método Mora-Vahrson y Método Multicriterio, detallados a continuación:

2.1.1 Método Mora-Vahrson

Permite el análisis de grandes áreas amenazadas por deslizamientos en áreas tropicales sísmicamente activas, mediante indicadores morfodinámicos (Mora & Vahrson, 1994), como litología, relieve, humedad del suelo, precipitación y sismicidad, definiendo índices de influencia o valoración para cada zona, que pueden elaborarse en un Sistema de Información Geográfico (GIS), obteniendo un mapa donde se clasifican las zonas potenciales a sufrir deslizamientos.

El método toma en cuenta 5 factores, **3 factores condicionantes** o **intrínsecos de susceptibilidad (S)** y **2 factores desencadenantes** o **de disparo (D)**, como se observa en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Factores condicionantes y desencadenantes Método MV. Fuente: Basada en Mora & Vahrson (1994) .

Factores condicionantes	Factores desencadenantes
Litología/Geología (S_i)	Precipitación (D_p)
Pendiente o relieve (S_p o S_r)	Sismicidad (D_s)
Humedad del suelo (S_h)	

Factores condicionantes

Litología (SI): este parámetro representa la influencia que tienen los tipos de materiales (rocas y suelos) en el comportamiento dinámico de las laderas o en la activación de los deslizamientos (Román A. Q. & Feoli-Boraschi, S., 2018).

Pendiente (Sp): la pendiente del terreno es un factor determinante en la estabilidad de las laderas, ya que el grado de inclinación está asociado a la influencia de la fuerza de gravedad, así, pendientes con mayores grados de inclinación tienen mayor probabilidad a deslizamientos, sin excluir que deslizamientos también se generan en pendientes suaves o de bajo grado de inclinación (Román A. Q. & Feoli-Boraschi, S., 2018).

Humedad del suelo (Sh): la humedad es considerada debido a que las lluvias intensas o el sistema hidrológico del talud puede perturbar su comportamiento, resultando en un factor desestabilizante, cuando el suelo es alterado por remoción de cobertura vegetal, irrigación o inundación parcial (Román A. Q. & Feoli-Boraschi, S., 2018).

Factores desencadenantes

Sismicidad (Ds): los deslizamientos de ladera pueden activarse por movimientos sísmicos ya que estos aumentan el esfuerzo cortante del suelo, produciéndose un efecto desestabilizante (Román A. Q. & Feoli-Boraschi, S., 2018).

Precipitaciones (Dp): el factor de precipitación está asociado con la cantidad de agua caída en un definido tiempo, cuya altura se ha medido evitando la escorrentía y evapotranspiración. Se analiza la influencia de la lluvia en el tiempo, para lo cual se realiza el cálculo del período o períodos de retorno de este elemento como desencadenante (Román A. Q. & Feoli-Boraschi, S., 2018).

Con los factores anteriores, el **nivel de amenaza relativa (H)** se calcula utilizando la ecuación (2.1), que a su vez se integra de las ecuaciones (2.2) y (2.3) de la Tabla 2.3:

Tabla 2.3. Fórmulas para el cálculo del nivel de amenaza por el Método de Mora-Vahrson.

Fuente: Basada en Mora & Vahrson (1994)

$H = S * D$	(2.1)	<p>Ecuación para el cálculo de la amenaza, donde:</p> <p>H: nivel de amenaza relativa a deslizamientos</p> <p>S: valor del producto de los factores de susceptibilidad</p> <p>D: valor de la suma de los factores detonantes; y</p>
$S = S_l * S_p * S_h$	(2.2)	<p>Ecuación para el cálculo de la susceptibilidad por factores condicionantes, donde:</p> <p>S_l: valor del parámetro de susceptibilidad litológica.</p> <p>S_p: valor del parámetro pendiente.</p> <p>S_h: valor del parámetro de humedad del terreno; y</p>
$D = D_p + D_s$	(2.3)	<p>Ecuación para el cálculo de la susceptibilidad por factores detonantes, donde:</p> <p>D_p: valor del parámetro desencadenante por precipitación.</p> <p>D_s: valor del parámetro desencadenante por sismicidad.</p>

Características del método Mora-Vahrson:

- 1) La metodología es relativamente sencilla y de fácil entendimiento, por ende, fácilmente replicable.
- 2) Los recursos empleados son claros.
- 3) Maneja factores significativos involucrados en la inestabilidad de taludes.

2.1.2 Método de Evaluación Multicriterio

Guarda ciertas semejanzas con el método Mora-Vahrson, ya que también hace uso de herramientas SIG para integrar los factores intrínsecos y desencadenantes, previamente valorados, de los deslizamientos. Sin embargo, este método trata de reducir la subjetividad característica de los métodos cualitativos, evaluando cuantitativamente los pesos asignados a cada factor. Hecho por el cual también se le conoce como un método semicuantitativo donde se clasifican las zonas potenciales a deslizamientos.

El método toma en cuenta 7 factores, 6 factores condicionantes o intrínsecos de susceptibilidad (S) y 1 factor desencadenante o de disparo (D), como se observa en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Factores condicionantes y desencadenantes Método multicriterio.

Factores condicionantes	Factores desencadenantes
Litología/Geología (S _i)	Precipitación (D _p)
Pendiente (S _p o S _r)	
Humedad (S _h)	
Mapa de drenajes	
Estructuras	
Uso de suelo	

Luego cada factor se clasifica en clases y cada clase es ponderada de acuerdo con cuanto contribuya a la inestabilidad del suelo. Entonces, a través de una matriz de jerarquización de Saaty se comparan los factores y se les asignan ponderaciones para poder así usar la ecuación (2.4) y obtener el mapa de zonificación de amenazas:

$$I = \sum_{j=1}^n W_j \times x_{ij} \quad (2.4)$$

Donde:

I = Índice de susceptibilidad

W_j = Peso del factor j

x_{ij} = Peso de la clase i del factor

Características del Método de Evaluación Multicriterio:

- 1) El método resulta algo complejo y no tan fácil de seguir.
- 2) Los recursos empleados son claros.
- 3) Maneja factores significativos involucrados en la inestabilidad de taludes.
- 4) Precisa de experticia para el establecimiento de criterios que permitan justificar la asignación de las ponderaciones a los distintos mapas.

2.2 Restricciones

Para el presente proyecto de *Evaluación de amenaza de deslizamientos* se consideraron varios factores que limitan o restringen de alguna forma su ejecución, los cuales se presentan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Factores limitantes del proyecto. Fuente: Autores

Factores limitantes	Detalle
Disponibilidad de tiempo	El tiempo disponible para la realización del proyecto es de alrededor de 4 meses, factor importante de considerar al seleccionar la metodología de trabajo, ya que ésta no debería ser demasiado extensa en ejecución a fin de culminarla acorde al cronograma establecido.
Extensión de las áreas de estudio	Las áreas de estudio comprenden grandes extensiones de terreno, al tratarse de estudios a nivel cantonal las escalas suelen estar entre 1:25000 – 1:50000. Debido a ello se descartó el trabajo de campo para toma de datos geológicos o topográficos, ya que sería una actividad que requeriría demasiado tiempo en ejecutar.
Recursos	-Falta de información geológica-geotécnica de las zonas de estudio. -Falta de inventarios detallados de deslizamientos registrados en las zonas de estudio.

2.3 Selección del método

Presentadas las dos posibles alternativas de solución a la problemática, ver Tabla 2.6, se seleccionó el método de Mora-Vahrson (MV) para la obtención de los mapas de amenaza de deslizamiento en los cantones de Loja (Loja) y Flavio Alfaro (Manabí) dentro de un SIG. Se eligió este método, ya que por un lado el método MV es un procedimiento considerablemente sencillo, al trabajar con 5 variables de directa relación con los deslizamientos, y que puede ser llevado a cabo en un periodo de tiempo adecuado respecto al plazo de entrega del proyecto, en comparación con el Método Multicriterio, el cual toma en cuenta más variables y consideraciones. Por otro lado, MV es un método más objetivo, en comparación con el Método Multicriterio, donde se asignan ponderaciones a los mapas, acción que de hacerse sin la experticia requerida y sin establecer los criterios adecuados podría terminar entrando en subjetividad, afectando en el resultado final que es el mapa de amenaza de deslizamiento de cada zona. Además, el Método de Mora-Vahrson es considerado un método óptimo para la

zonificación de zonas susceptibles a deslizamientos en países tropicales, confirmándose su efectividad en distintos países, principalmente de Latinoamérica (Román A. Q. & Feoli-Boraschi, S., 2018).

Tabla 2.6 Comparación Método MV y Evaluación Multicriterio

Criterios	Método	Método Evaluación
	Mora Vahrson	Multicriterio
Involucra factores relevantes en la inestabilidad de laderas	✓	✓
Método relativamente sencillo y replicable	✓	X
Realizable en tiempo disponible (3 meses)	✓	X
El método es objetivo	✓	X
Requiere alta experticia	X	✓

2.4 Recursos

Los recursos necesarios para realizar el presente análisis se listan en la Tabla 2.7. Las fuentes de los recursos son las mismas en ambos cantones excepto en el apartado geológico. ArcMap en su versión 10.7 fue el software usado para procesar la gran mayoría de información geográfica y para la generación de nuevos mapas. Python se usó para extraer y procesar los datos contenidos en los modelos de precipitación en formato netCDF.

Tabla 2.7. Información base utilizada en el proyecto. Fuente: Autores

Información base	Fuente
Mapa Geológico 1:25000	MAGAP (Flavio Alfaro) IGM (Loja)
Modelo de Precipitaciones diarias 1986-2015. Resolución 10 km.	MAE (TCN)
Modelo de Precipitaciones diarias proyectadas escenario RCP 8.5. 2011-2040. Resolución 10 km.	MAE (TCN)
Mapa de aceleración sísmica del Ecuador	Quinde y Reinoso, 2016
DEM resolución 12.5 m	JAXA (Satélite ALOS)

2.5 Detalle de la Metodología Aplicada: Mora-Vahrson

El proceso del método Mora-Vahrson incluyó:

- 1)** Selección de la información base para los cantones Loja y Flavio Alfaro, que se detalla en la Tabla 2.7.
- 2)** Elaboración de los mapas temáticos intrínsecos del terreno (mapa de pendientes, mapa litológico, mapa de humedad) y detonantes de la inestabilidad (mapa de precipitación y mapa de sismicidad).
- 3)** Conversión de los mapas de los factores condicionantes y desencadenantes de formato vectorial a ráster.
- 4)** Asignación de valores a las variables o factores condicionantes y desencadenantes mediante reclasificación, de acuerdo con tablas de calificación o valoración. Algunas de estas tablas utilizadas fueron las ya establecidas por el método de Mora Vahrson, mientras que otras fueron elaboradas para adaptaciones con el país (Ecuador), como en lo consiguiente se explica:

2.5.1 Amenaza actual: año 2020

Se elaboraron los mapas temáticos de los factores condicionantes del terreno (mapa de pendientes, mapa litológico, mapa de humedad) y detonantes de la inestabilidad (mapa de precipitación y mapa de sismicidad) utilizando la información base, algunos de estos mapas se convirtieron de formato vectorial a ráster. Posteriormente se combinaron para calcular la amenaza.

2.5.1.1 Mapas de Pendientes

Se crearon a partir del Modelo de Elevación Digital del Terreno (MDE) de una resolución de 12,5 metros. Para ello se utilizó la herramienta Slope del ArcToolBox: ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Surface > Slope del programa ArcMap 10.7. Esta herramienta realiza un cálculo de la tasa de cambio máxima en la elevación sobre la distancia entre la celda y sus vecinas. Para su empleo con la metodología, las unidades de medida de los datos de salida de la pendiente se obtuvieron en grado.

Se utilizó la Tabla 2.8. de clasificación del factor pendiente introducida de Van Zuidam (1986), la cual clasifica las pendientes en grados o porcentajes con valoraciones entre 0 y 6.

Tabla 2.8. Clasificación del factor pendiente (Sp). Fuente: Van Zuidam (1986)

Clases de pendiente		Condiciones del terreno	Factor Sp
Grados	Porcentaje		
0-2	0-2	Planicie, sin denudación aparente	0
2-4	2-7	Pendiente muy baja, peligro de erosión	1
4-8	7-15	Pendiente baja, peligro severo de erosión	2
8-16	15-30	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro severo de erosión	3
16-35	30-70	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro externo de erosión de suelos	4
35-55	70-140	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible	5
>55	>140	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caídas de rocas), cobertura vegetal limitada	6

En el cantón Loja (Ver Figura 15, Apéndice A), la máxima pendiente es de alrededor de 77. 5°, y la mínima de 0°. Las pendientes más pronunciadas se localizan principalmente hacia el sur, sureste y suroeste, y hacia el noreste y noroeste. Las planicies corresponden a zonas de cuenca, reconociéndose la gran cuenca de Loja hacia el centro y la de Vilcabamba-Malacatos al suroeste; así mismo a los ríos y sus áreas aledañas. El mapa del factor pendiente del cantón Loja (Ver Figura 16, Apéndice A), clasifica la zona en 6 clases, donde las clases mayoritarias son 4 y 5 (pendientes fuertes y muy fuertes respectivamente), y 1, 2 y 3 (pendientes muy bajas a moderadas).

La pendiente en el cantón Flavio Alfaro va desde los 0° hasta los 87° (Ver Figura 2, Apéndice A), donde los mayores grados de pendientes se ubican al este del cantón. 7 clases han resultado de la clasificación de los grados de pendiente (Ver Figura 3, Apéndice A), otorgando valores de hasta 5 y 6 para los valores del este del cantón.

2.5.1.2 Mapas de Litología

Los mapas en formato vectorial de Loja y Flavio Alfaro fueron convertidos a ráster de 12,5 m de resolución. Para el **factor litología**, se utilizó la Tabla 2.9. de clasificación del factor litología presente en la metodología Mora-Vahrson (1994), la cual clasifica las litologías con valoraciones entre 1 y 5, de acuerdo con el tipo de roca y su estado.

Tabla 2.9. Clasificación del factor litología (SI) valorando la susceptibilidad a inestabilidad de laderas. Fuente: Mora & Vahrson (1994)

Litología	Calificación	Factor SI
Aluvión grueso, permeable, compacto, nivel freático bajo. Calizas duras permeables. Rocas intrusivas, poco fisuradas, bajo nivel freático. Basalto, andesitas, ignimbritas. Características físico- mecánicas: materiales sanos, con poca o ninguna meteorización, resistencia al corte elevada, fisuras sanas, sin relleno.	Bajo	1
Rocas sedimentarias sin o con muy poca meteorización, poco fisuradas; rocas intrusivas, calizas duras. Características físico- mecánicas: resistencia al corte media a elevada.	Moderado	2
Rocas intrusivas, metamórficas, volcánicas, considerablemente meteorizadas, suelos regolíticos arenosos compactados, fracturamiento considerable, nivel freático fluctuante.	Medio	3
Rocas fuertemente meteorizadas, hidrotermalmente alteradas de cualquier tipo, fuertemente fracturadas y fisuradas, rellenos de arcilla; aluviones fluvio-lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, rocas.	Alto	4
Rocas extremadamente meteorizadas, con baja resistencia al corte, niveles freáticos someros; aluviales, coluviales y suelos residuales.	Muy alto	5

La litología del cantón Loja comprende rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas como se describió en el capítulo 1 (Tabla 1.3). En el mapa utilizado (Ver Figura 17, Apéndice A) se observa que la Serie Zamora de litología metamórfica (esquistos y filitas) es la mayoritaria, localizada principalmente al sur y partes del norte. Cabe recalcar que este mapa muestra zonas sin descripción litológica con leyenda No Aplicable, correspondientes al bosque hacia el este y a los poblados, principalmente. El mapa del factor litología del cantón Loja (Ver Figura 18, Apéndice A), clasifica la zona en 5 clases, donde la clase mayoritaria es la 3 correspondiente a susceptibilidad media, al ser litologías sedimentarias y tobáceas, seguida de la clase 1 de susceptibilidad moderada, y de la clase 5 de susceptibilidad muy alta, al ser aluviales y coluviales.

La litología del cantón Flavio Alfaro al ser básicamente sedimentaria presenta menor resistencia a los deslizamientos (Ver Figura 4, Apéndice A). Las formaciones principales son Onzole y la Borbón, que según la Tabla 2.9 ponderan un valor de 3 y 2, respectivamente. Onzole, que predomina en todo el lado oeste, recibió una valoración mayor debido a la presencia de limolita, más vulnerable que las areniscas de la Fm Borbón (valoración 2) que predomina el este del cantón. (Ver Figura 5, Apéndice A)

2.5.1.3 Mapas de Humedad

Para el **factor humedad del suelo** se realizó un cálculo simple del balance hídrico del lugar, usando los valores mensuales promedio de precipitación, obtenidos a partir del modelo de precipitaciones diarias de la TCN de 1986 a 2015 (Tabla.2.5), es decir un período de 30 años. Se decidió utilizar 30 años de datos para asegurar la fiabilidad de los valores promedio de precipitación. Estos valores se obtuvieron sumando los valores diarios de cada mes y promediando con meses iguales. Posteriormente, se interpolaron los valores mensuales promedio mediante el método *Kriging* en un ráster de 12.5 m de resolución mediante el software ArcMap 10.7. A cada valor promedio mensual se le asignó una ponderación de acuerdo con la Tabla 2.9, la cual basa su clasificación en una evapotranspiración de 125 mm/mes, la mínima teórica para retener humedad en el suelo (Vahrson, 1991). Luego se suman los 12 valores ponderados y el resultado es clasificado según la tabla 2.12 para obtener el peso final de humedad del suelo.

Tabla 2.10 Clasificación de los valores mensuales de precipitación. Fuente: Mora & Vahrson (1994)

Precipitación mensual promedio (mm/mes)	Valor asignado
<125	0
125-250	1
>250	2

Tabla 2.11. Clasificación del factor humedad del suelo (Sh). Fuente: Mora & Vahrson (1994)

Valor Acumulado de Índices de Precipitación	Calificación	Factor Sh
0-4	Muy bajo	1
5-9	Bajo	2
10-14	Medio	3
15-19	Alto	4
20-24	Muy alto	5

En el cantón Loja, la precipitación promedio presentó un valor mínimo de 0.34 mm/mes y uno máximo de 176 mm/mes, con los cuales, al realizar la valoración del índice acumulado de precipitación, el mapa del factor humedad (Ver Figura 19, Apéndice A) recibió una valoración final de 1 para todo el cantón.

La precipitación mensual, en cambio fue mayor en Flavio Alfaro, alcanzando valores mayores a 300 mm/mes por que recibió una valoración de 3 en la mayoría este y una valoración de 2 en el lado oeste. (Ver Figura 5, Apéndice A)

2.5.1.4 Mapas de Precipitación

Para el **factor precipitación**, se introdujo una modificación al método Mora Vahrson. Originalmente el factor precipitación clasifica valores de precipitación máxima en 24 horas con período de retorno de 100 años, entendiéndose por 24 horas a un día pluviométrico, el cual comienza desde las 07h00 de un día cualquiera hasta las 07h00 del día siguiente. Para obtener dichos valores máximos con $Tr = 100$ años, se utiliza la distribución estadística de Gumbell para calcular valores extremos, la cual requiere de al menos 10 registros de datos.

Cabe aclarar que el método MV recomienda adaptar las ponderaciones de los valores de precipitación de acuerdo a las circunstancias propias de cada país o región. Por lo que ya en estudios oficiales pasados que usaron el método MV (IEE y MAGAP, 2015) se tomó en cuenta el análisis de lluvias intensas realizado por el INAMHI (INAMHI, 1999), que estableció en 245 mm la máxima precipitación en 24 h para un $Tr=100$ años a nivel nacional. Usando dicho límite se propuso y se ha usado el siguiente cuadro de valoración para el factor precipitación en 24 h con $Tr=100$ años. (Ver Tabla 2.14).

Tabla 2.12 Cuadro de clasificación del factor precipitación 24h. Fuente: INAMHI, 1999

Precipitación máxima		
24h Tr 100 años (mm/día)	Calificación	Factor Dp
< 100	Muy bajo	1
100- 150	Bajo	2
150 - 200	Medio	3
200 - 250	Alto	4
> 250	Muy Alto	5

Tabla 2.13. Clasificación del factor precipitación adaptado (Dp). Fuente: Autores

Precipitación máxima diaria Tr 100 años (mm/día)	Calificación	Factor Dp
<50	Muy bajo	1
50-75	Bajo	2
75-100	Medio	3
100-125	Alto	4
>125	Muy Alto	5

La falta de información local suficiente respecto al histórico de precipitaciones máximas en 24 horas, sumado al hecho de que las proyecciones de precipitación de la TCN se encuentran en valores diarios (0h00 a 23h59), creó la necesidad de adaptar la metodología para trabajar con valores diarios de precipitación y ponderarlos correctamente. Siguiendo el ejemplo de la elaboración de la Tabla 2.14, se aplicó la distribución de Gumbell usando los registros de precipitación a nivel nacional (1986 a 2015) de la TCN para calcular los valores máximos diarios con Tr=100 años, visible en el mapa de la Figura 2.1. Se encontró que la máxima precipitación diaria con Tr=100 años en el país es de 121 mm, la cual sería análoga a los 245 mm de la máxima precipitación en 24 h con el mismo Tr determinados por el INAMHI a nivel nacional.

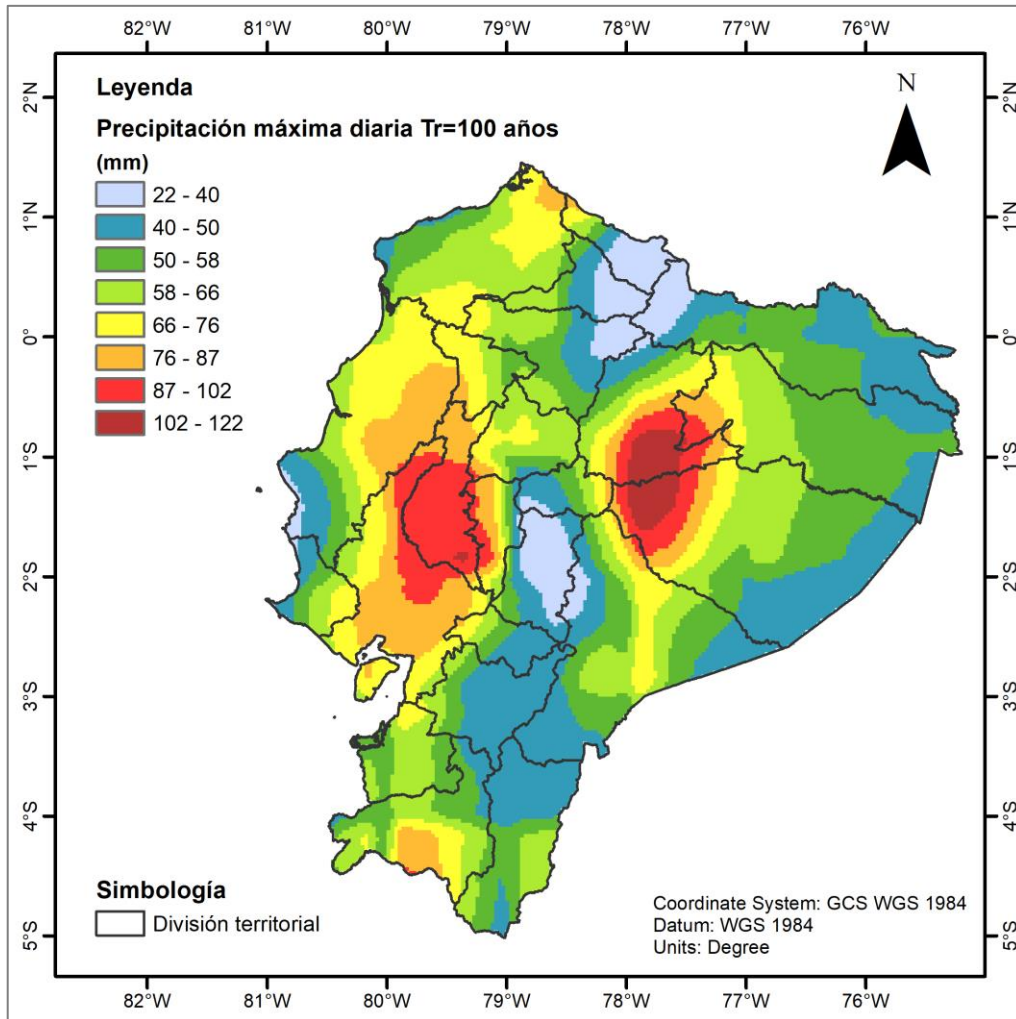


Figura 2.1 Mapa nacional de precipitaciones máximas diarias con período de retorno de 100 años. Fuente: Autores.

Notando la relación de prácticamente 2:1 entre ambos casos de precipitaciones, se estableció en 125 mm como valor superior del nuevo cuadro de clasificación (Tabla 2.15), en proporción a los 250 mm iniciales del cuadro de la Tabla 2.14, obteniendo el peso de 5 para todo valor mayor a 125 mm. Los intervalos pasaron de 50 mm a 25 mm siguiendo la misma proporción 2:1, estableciendo así los nuevos rangos de las demás clases. Como resultado de estas iteraciones, el límite inferior terminó en 50 mm, siendo el peso igual a 1 para todos los valores menores a él.

El nuevo cuadro de clasificación para el factor de precipitación máxima diaria engloba a los valores de precipitación locales de las zonas de estudio, por lo que no se consideró necesario elaborar cuadros de clasificación adicionales ajustados a cada cantón,

además tal acción hubiera imposibilitado comparar los niveles de amenaza de deslizamiento entre ambos cantones al trabajar con distintas ponderaciones.

Finalmente, los valores de precipitación máxima diaria con $Tr=100$ años de ambos cantones fueron ponderados de acuerdo con el nuevo cuadro de clasificación del factor precipitación.

De acuerdo con esto, el mapa de precipitación máxima diaria hacia el año 2020 con un período de retorno de 100 años del cantón Loja (Ver Figura 20, Apéndice A), muestra que la intensidad de precipitaciones aumenta de noreste a suroeste, con precipitaciones desde casi 47 mm/día al noreste hasta precipitaciones más intensas de alrededor de 65 mm/día hacia el suroeste. El mapa del factor precipitaciones al 2020 (Ver Figura 21, Apéndice A), recibió valoraciones de 1 hacia el noreste y de 2 en el resto del norte y sur.

La precipitación máxima diaria con un período de retorno de 100 años para el año 2020 aumenta en dirección Noroeste-Sureste del cantón Flavio Alfaro (Ver Figura 8, Apéndice A) siendo el valor máximo hallado de 78.79 mm y el mínimo de 70 mm. A diferencia de Loja, no existe demasiada variación entre el valor mínimo y máximo de precipitación, aunque si recibió 2 valoraciones para este factor, 2 para el sector noroeste y 3 para el sector sureste (Ver Figura 9, Apéndice A).

2.5.1.5 Mapas de Sismicidad

Para este factor se utilizó el mapa de aceleración sísmica pico con período de retorno de 100 años del artículo “Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la ciudad de Cuenca” (Quinde y Reinoso, 2016). Para ponderar el **factor de sismicidad**, se utilizó la Tabla 2.15 de clasificación del factor sismicidad presente en la metodología Mora-Vahrson (1994), que utiliza valores de intensidad Mercalli, aceleraciones pico (%g) o aceleración PGA.

Tabla 2.14. Clasificación del factor sismicidad (Ds). Fuente: Mora-Vahrson (1994)

Intensidades MM	Aceleraciones Pico (%g)	Aceleración PGA (m/s ²)	Calificación	Factor Ds
III	1-12	0.098-1.226	Leve	1
IV	13-20	1.227-2.011	Muy bajo	2
V	21-29	2.012-2.894	Bajo	3
VI	30-37	2.895-3.679	Moderado	4
VII	38-44	3.680-4.365	Medio	5
VIII	45-55	4.366-5.445	Considerable	6
IX	56-65	5.446-6.426	Importante	7
X	66-73	6.427-7.210	Fuerte	8
XI	74-85	7.211-8.388	Muy fuerte	9
XII	>85	>8.389	Extremadamente fuerte	10

Así, el mapa de aceleración sísmica nacional muestra al cantón Loja comprendido dentro de una franja de aceleración entre 0.10 y 0.20 g. Sin embargo, para este estudio se tomó un promedio de 0.15 %g (Ver Figura 24, Apéndice A). El factor sismicidad obtuvo una valoración de 2 para todo el territorio (Ver Figura 25, Apéndice A)

Flavio Alfaro se encuentra ubicado en dos zonas de aceleración sísmica como se puede ver en la Figura 12, Apéndice A, llegando a alcanzar 25% de la gravedad en la zona de mayor aceleración. El factor de sismicidad resultante divide a Flavio Alfaro en 2 zonas (Ver Figura 13, Apéndice A), la noroeste con un de 3 y el resto, de menor área un valor de 2,

2.5.1.6 Mapas de amenaza

Se aplicó la ecuación $H = S * D = (S_l * S_p * S_h) * (D_p + D_s)$ para determinar el nivel de amenaza, aplicando álgebra de mapas, con los mapas anteriormente reclasificados, como se representa en la Figura 2.1. Posteriormente los rasters obtenidos se reclasificaron de acuerdo a la Tabla 2.16 para obtener el mapa de potencial de amenaza de deslizamiento para cada cantón.

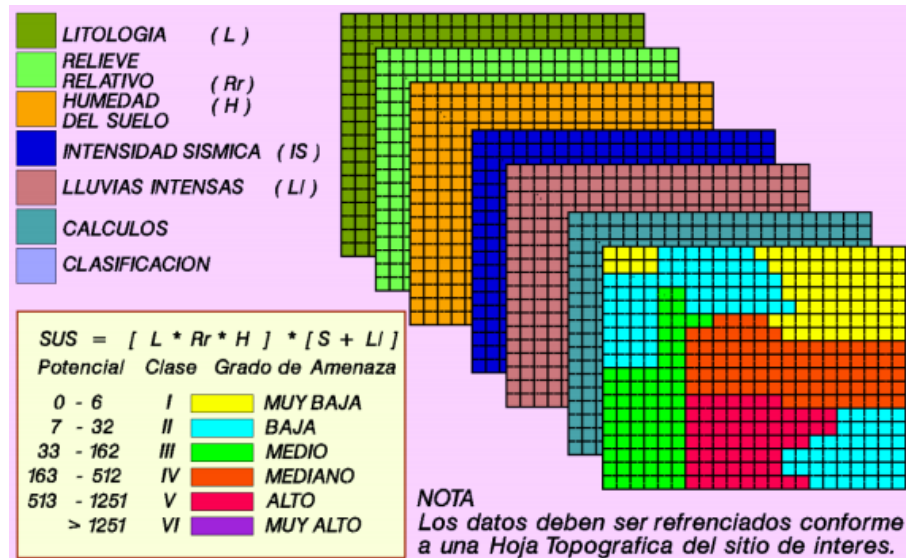


Figura 2.2. Representación del tratamiento SIG de los datos en el Método de Mora-Vahrson. INET (s.f.)

Tabla 2.15. Clasificación de la amenaza. Fuente: Mora-Vahrson (1994)

Valor de la Amenaza H	Clase	Clasificación de Potencial de Amenaza de Deslizamiento
<6	I	Muy bajo
7-32	II	Bajo
33-162	III	Moderado
163-512	IV	Medio
513-1250	V	Alto
>1250	VI	Muy alto

Los mapas obtenidos presentarán valores que pueden estar comprendidos entre 5 clases y grados de amenaza de deslizamiento: Muy baja, Baja, Moderada, Alta, Muy alta, como se detalla en la Tabla 2.17.

Tabla 2.16. Grado de amenaza de deslizamiento obtenido Método de Mora-Vahrson.

Fuente: Mora-Vahrson (1994)

Clase	Calificativo de susceptibilidad al deslizamiento	Característica
I	Muy baja	Sectores estables, no se requieren medidas correctivas. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc.
II	Baja	Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado.
III	Moderada	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos urbanos de baja densidad.
IV	Alta	Probabilidad de deslizamiento alta (< 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Para su utilización se deben realizar estudios estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.
V	Muy alta	Probabilidad de deslizamiento muy alta (> 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Prohibido su uso con fines urbanos, se recomienda usarlos como áreas de protección.

2.5.2 Amenaza futura: año 2040

Para evaluar la amenaza futura por deslizamientos, se estimó el cambio que experimentarían las precipitaciones diarias de acuerdo con el escenario climático RCP 8.5 establecido por la IPCC. El Ministerio del Ambiente del Ecuador publicó en 2017 la Tercera Comunicación Nacional del Ecuador sobre el Cambio Climático, un amplio informe combinando varios modelos predictivos junto a los escenarios de emisión de GEI recomendados por la IPCC para proyectar variables climáticas, como lluvia o temperatura, hasta el año 2070. Considerando los valores de precipitación diaria proyectada hasta el 2040, se volvió a calcular los dos factores de la metodología que dependen de las precipitaciones: Humedad del suelo y Precipitaciones máximas diarias con período de retorno de 100 años.

De acuerdo con esto, en Loja la precipitación promedio se proyectó con un valor mínimo de 0.29 y un máximo de 206.6, pero al realizar la valoración del índice acumulado de precipitación, el mapa del factor humedad (Ver Figura 19, Apéndice A) mantuvo una valoración final de 1 para todo el cantón. En cuanto a precipitaciones, el mapa de precipitación máxima diaria hacia el año 2040 con un período de retorno de 100 años del cantón Loja (Ver Figura 22, Apéndice A), mantiene la tendencia del año 2020, mostrando que la intensidad de precipitaciones aumenta de noreste a suroeste, con precipitaciones desde casi 68 mm/día al noreste hasta precipitaciones más intensas de alrededor de 80 mm/día hacia el suroeste. El mapa del factor precipitaciones al 2040 (Ver Figura 23, Apéndice A), recibió valoraciones de 2 hacia el noroeste y de 3 en el resto del norte y sur.

Con los nuevos datos de precipitación proyectada, el factor humedad del cantón Flavio Alfaro pasó a ser 3 en todo el terreno (Ver Figura 7, Apéndice A), Mientras que para el cálculo de las precipitaciones máximas diarias se produjo un aumento en el máximo de 78 a 85 mm/día, sobre todo aumentando su valor en el sector norte (Figura 10, Apéndice A). Se observó una disminución en el mínimo de precipitación pasando de 70 a 68 mm/diarios. Estos cambios, aunque a la primera impresión no tan grandes, causaron un cambio en la distribución de los factores de precipitación, resaltando el paso de la zona norte del cantón a una valoración 2 a 3 (Ver Figura 11, Apéndice A).

Una vez que se obtuvieron los nuevos factores de Humedad y Precipitación Máxima, se volvió a procesar junto a los 3 factores restantes para obtener el nuevo mapa de amenazas para el año 2040.

2.6 Cronograma

La planificación del desarrollo del proyecto siguió un cronograma que se puede observar en Tabla 2.14.

Tabla 2.17. Detalle del cronograma de actividades del proyecto. Fuente: Autores

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DEL PROYECTO																						
Actividades	Octubre					Noviembre				Diciembre				Enero					Febrero			
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
Redacción de propuesta			■																			
Presentación de la propuesta				■																		
Recopilación bibliográfica		■	■	■	■	■																
Marco teórico					■	■	■															
Definición de Metodología								■	■													
Procesamiento y análisis										■	■	■										
Resultados y mapas													■	■								
Análisis de resultados														■	■							
Conclusiones y Recomendaciones														■	■							
Resumen/Abstract														■								
Elaboración de Poster Científico								■									■	■				
Entrega de documento final																■						
Sustentación																				■		

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caso de Estudio Flavio Alfaro

3.1.1 Amenaza presente 2020

Luego de aplicar la metodología propuesta se obtuvieron los mapas de amenazas para el 2020 y el 2040. Actualmente la amenaza de deslizamientos del cantón Flavio Alfaro, se encuentra principalmente dentro de los niveles moderado (III) y alto (IV), como se puede apreciar en la Figura 3.1. Aunque existen zonas presentes de amenaza de muy baja (I) a baja (II), ambas no llegan a ocupar ni el 3% del cantón, como se comprueba en la Tabla 3.1 donde se muestra el área y porcentaje de área total por nivel de amenaza. De la Tabla 3.1 sobresale el hecho de que la mayoría del cantón Flavio Alfaro se encuentra bajo una amenaza de deslizamientos moderada (III), sin desmerecer que 10% del cantón, principalmente la zona noroeste, está bajo una alta amenaza de deslizamiento (IV), lo que representa unos nada despreciables 153 km² y que rodea el poblado más grande de Flavio Alfaro.

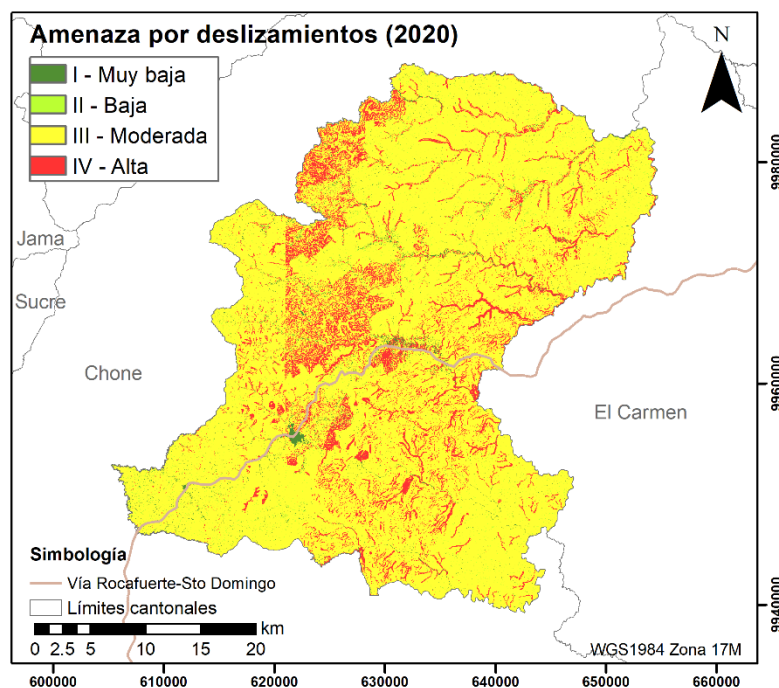


Figura 3.1 Mapa de amenaza actual de deslizamientos del Cantón Flavio Alfaro, Manabí.

Fuente: Autores

Tabla 3.1 Nivel de amenaza actual y su respectiva extensión de área en km² y porcentaje.

Nivel de amenaza	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Muy baja	21.18	1.6
Baja	10.83	0.8
Moderada	1161.52	86.3
Alta	153.02	11.4

3.1.2 Amenaza futura 2040

Luego de integrar los datos proyectados de precipitación hasta el año 2040 en la metodología propuesta, se obtuvo un nuevo mapa de amenaza de deslizamientos para el cantón de Flavio Alfaro, Manabí. (Figura 3.2)

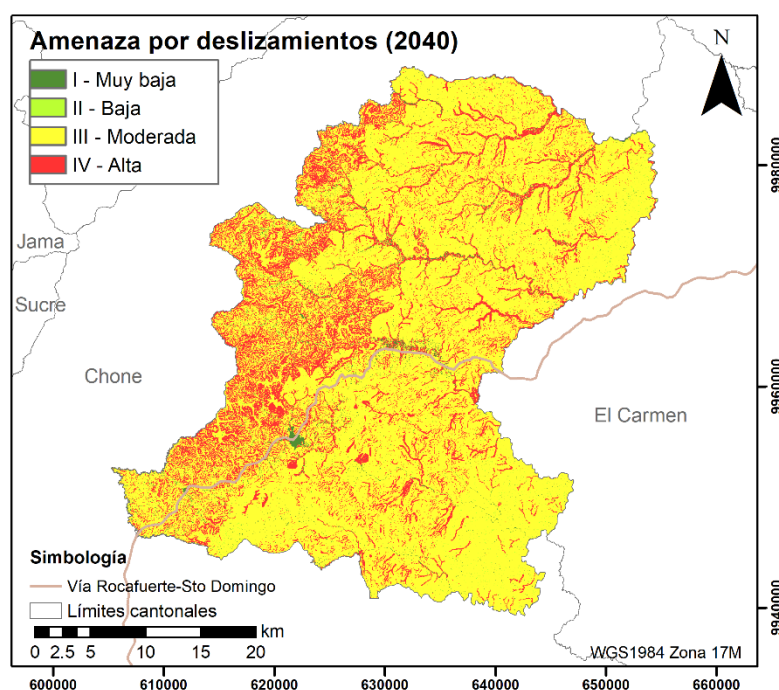


Figura 3.2 Mapa de amenaza futura de deslizamientos para el año 2040 del Cantón Flavio Alfaro, Manabí. Fuente: Autores

La amenaza de nivel moderado (III) pasó de cubrir un 86.3% de terreno (1 162 km²) en 2020 a cubrir un 79.6% de él (1 071 km²) en 2040. Ver Tabla 3.2. Esta disminución es en respuesta al aumento de la extensión del área bajo alta amenaza de deslizamiento (IV), la cual pasó de cubrir 153 km² en 2020 a cubrir 251 km² en 2040, es decir aumentó 1.6 veces en tamaño, cubriendo mayormente el oeste del cantón. En general, como se puede observar en la Figura 3.3, los cambios de porcentaje de área entre los niveles de amenaza están alrededor del 7 % (moderada y alta amenaza)

Tabla 3.2 Nivel de amenaza actual y su respectiva extensión de área en km² y porcentaje.

Nivel de amenaza	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Muy baja	21.1	1.6
Baja	2.63	0.2
Moderada	1071.67	79.6
Alta	251.15	18.7

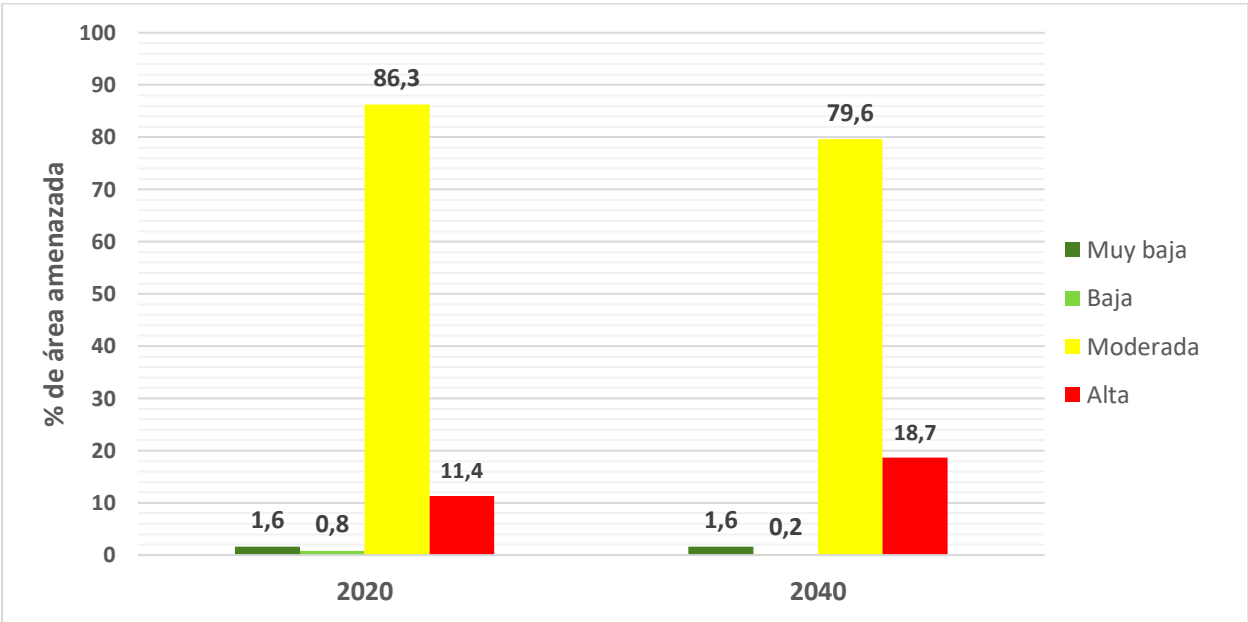


Figura 3.3 Histograma representando los porcentajes de área bajo distintos niveles de amenaza para los años 2020 y 2040.

3.2 Caso de Estudio Loja

3.2.1 Amenaza presente 2020

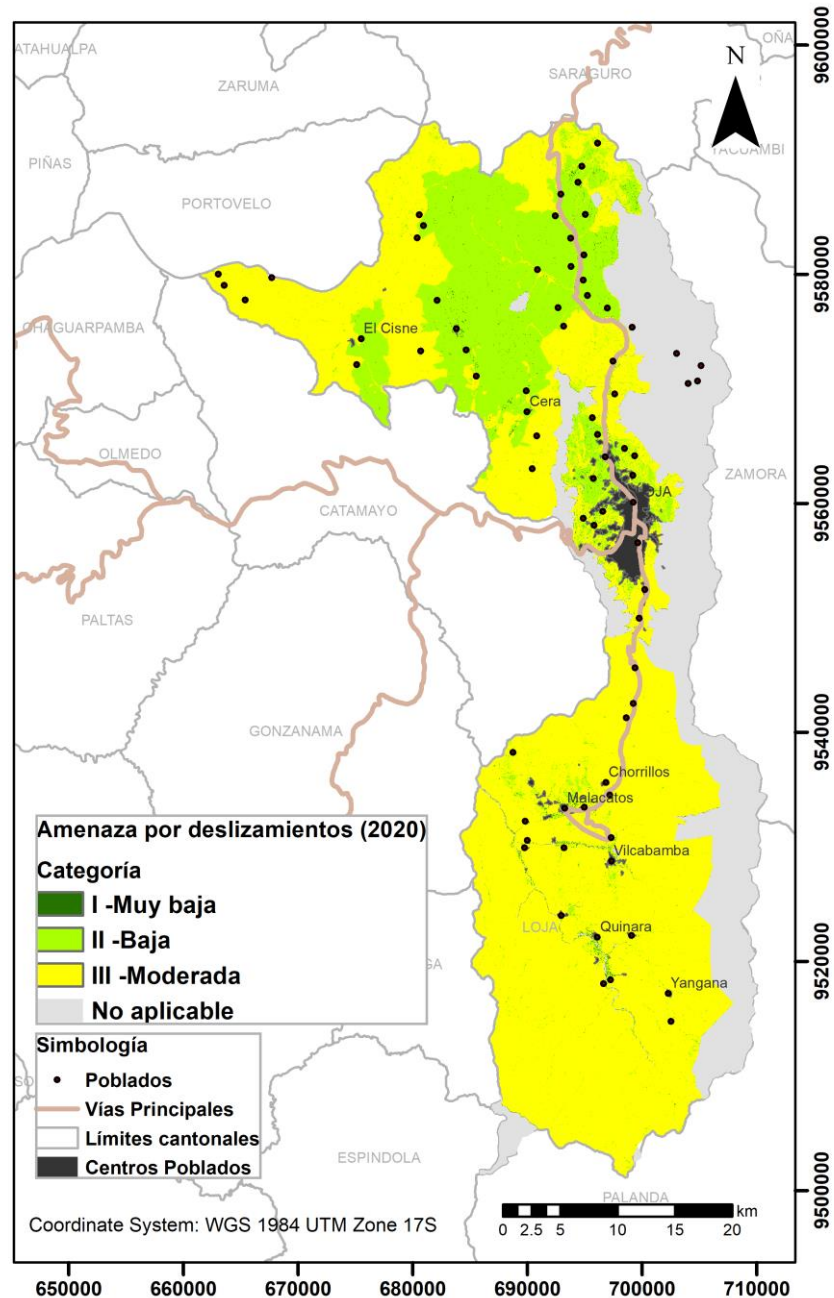


Figura 3.4 Mapa de amenaza de deslizamientos del Cantón Loja al año 2020. Fuente: Autores

Actualmente, la amenaza de deslizamientos del cantón Loja presenta tres potenciales clases: muy baja (I), baja (II) y moderada (III), como se aprecia en la Figura 3.4. Siendo las áreas en amenaza moderada las mayores, con localización principal al sur, centro y noroeste del cantón, representando casi un 75% del terreno, equivalente a 1097.65 km²,

como puede comprobarse en la Tabla 3.1 donde se muestra el área y porcentaje de área total por nivel de amenaza. A ésta le siguen las áreas en amenaza km² en amenaza baja, principalmente hacia el norte y centro (alrededor de la ciudad de Loja) ocupando un 24.7% o 361.64 km²; y por último las áreas muy baja, hacia el este, que comprenden casi un 0.4% o 6.53 km².

Tabla 3.3 Nivel de amenaza al 2020 de Loja con su respectiva extensión de área y porcentaje

Nivel de Amenaza	Área amenazada al 2020	
	km ²	%
Muy baja	6.53	0.45
Baja	361.64	24.7
Moderada	1097.65	74.9

3.2.2 Amenaza futura 2040

El mapa de amenaza del escenario 2040 del cantón Loja (Figura 3.5) exhibe los mismos niveles de amenaza que el escenario 2020, sin embargo, en diferentes proporciones de superficie. Así, las principales variaciones aparecen hacia el norte del cantón y alrededor de la ciudad de Loja, donde principalmente áreas en amenaza baja al 2020, muestran a futuro amenaza moderada que representaría un 77.2% de la superficie cantonal o 1131.87 km².

Tabla 3.4 Nivel de amenaza al 2040 de Loja con su respectiva extensión de área y porcentaje

Nivel de Amenaza	Área amenazada al 2040	
	km ²	%
Muy baja	6.13	0.42
Baja	327.82	22.4
Moderada	1131.87	77.2

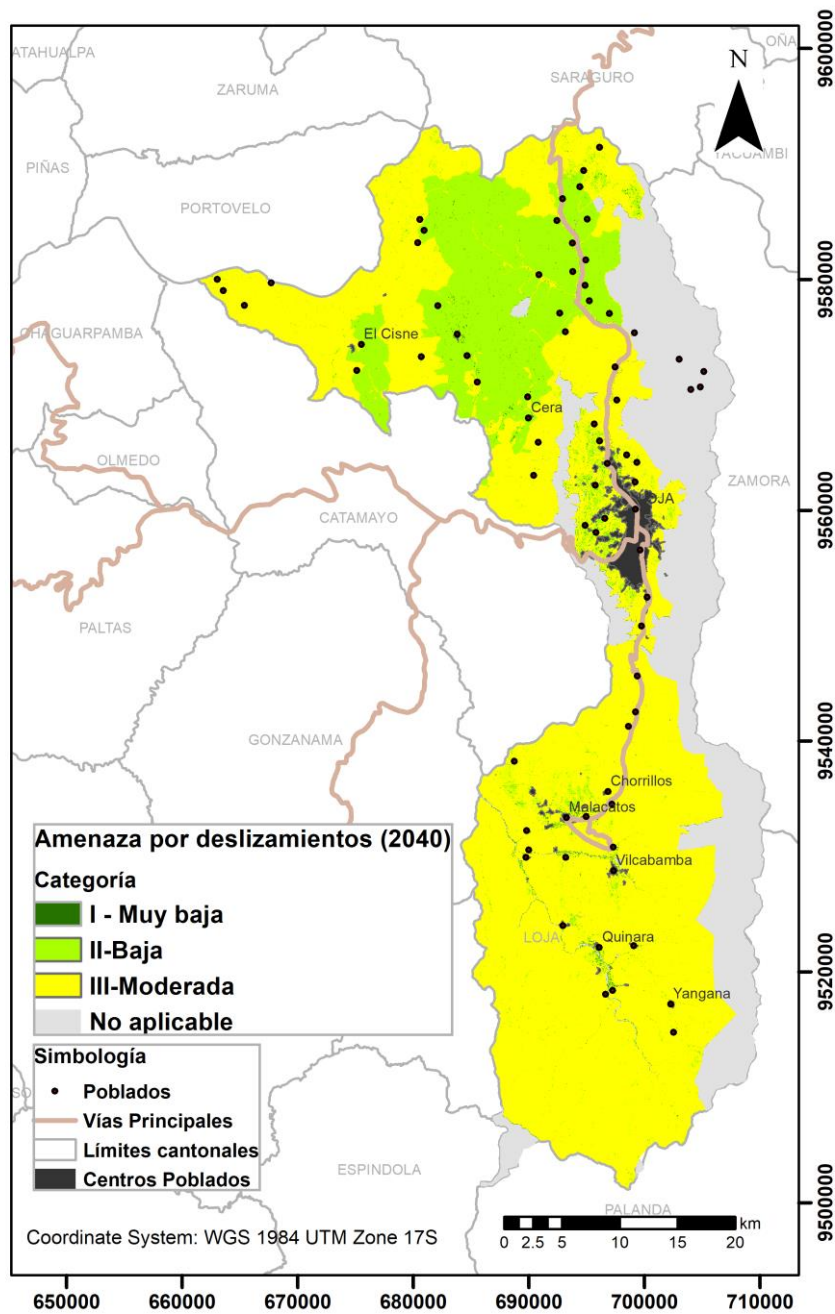


Figura 3.5 Mapa de amenaza de deslizamientos del Cantón Loja al año 2040. Fuente: Autores

En comparación de la amenaza presente y futuro (Figura 3.6) se observó que la amenaza de nivel moderado (III) pasó de cubrir un 75% de terreno (1 097.65 km²) en 2020 a cubrir un 77.2% de él (1 131.87 km²) en 2040. Este aumento es en respuesta a la disminución de la extensión de las áreas de muy baja (I) y baja (II) amenaza de deslizamiento, las cuales pasaron respectivamente de cubrir 6.53 km² y 361,64 km² en 2020 a cubrir 6.13 km² y 327.82 km² en 2040, es decir que presentaron una reducción del 0.03% y 2.3%

cada una, que resultó en el aumento de las áreas en amenaza moderada en 2.33%, equivalente a aproximadamente 34.22 km².

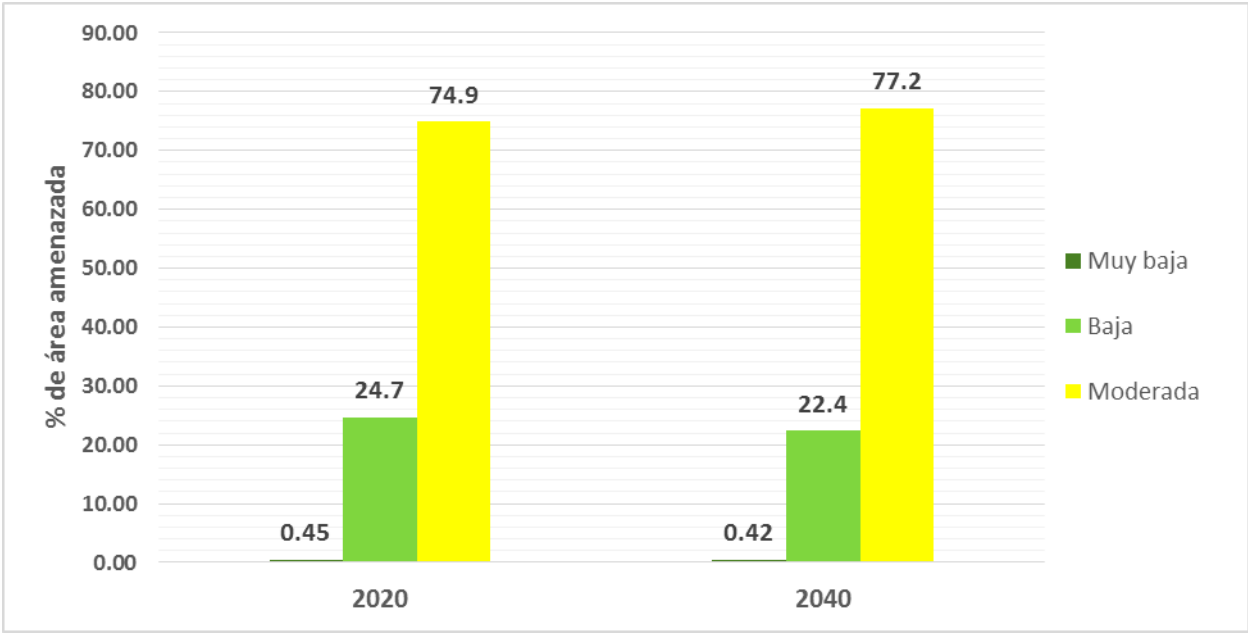


Figura 3.6 Histograma representando los porcentajes de área bajo distintos niveles de amenaza en Loja para los años 2020 y 2040.

3.3 Discusión

Al comparar ambas zonas de estudio, se aprecian diferencias en la extensión y el nivel de amenaza presentes. En el caso de cantón Loja el mayor grado de amenaza presente es la Moderada (III) tanto en actualmente como en 2040, mientras que en Flavio Alfaro se puede encontrar áreas bajo un grado de amenaza alto (IV) también en ambos escenarios temporales. El motivo de estas diferencias se debe tanto a los factores intrínsecos como los extrínsecos de cada zona. La litología de Flavio Alfaro, siendo un cantón de la costa ecuatoriana, es básicamente de carácter sedimentario, ofreciendo menos estabilidad y resistencia que las sólidas rocas ígneas o metamórficas que se pueden encontrar en el cantón Loja.

3.4 Análisis de costos

Los costos asociados a la ejecución del presente estudio son evaluados de forma similar a como se lo haría con un servicio de consultoría prestado a una empresa o gobierno local. Para estimar estos valores, se analizaron los costos para remunerar al personal involucrado y los costos asociados a los materiales usados, además del costo que supone usar las instalaciones de ESPOL.

El personal se compone de un ingeniero geológico junior, que ejecuta la mayoría del proyecto, y un ingeniero senior que supervisa el trabajo. El costo del personal depende de la remuneración por hora (o mensual) de cada y el tiempo invertido. Usando valores de remuneración referenciales (Ministerio de Trabajo, 2019) y el tiempo en horas de acuerdo con el cronograma de trabajo (Tabla 2.15) se tiene que el costo del personal es de \$ 1,849.05 (Tabla 3.3).

Tabla 3.5 Costos de personal

	Personal	Costo (\$/mes)	Costo (\$/h)	Tiempo (h)	Costo total (\$)
	Ingeniero/a superior sénior	1260.00	7.35	15	110.25
Ingeniero/a junior	540.00	3.15	552	1,738.80	
				Subtotal	1,849.05

Respecto al costo de los recursos materiales, destaca el apartado de material informático que consiste en equipos informáticos y licencias de software (Tabla 3.4). Un único ordenador se considera necesario para realizar el trabajo y debe tener la suficiente potencia para trabajar con ArcMap 10.7 por lo que su precio se ubica en el rango de la gama media-alta. Las licencias consisten en el paquete de ofimática de Microsoft y el paquete personal de ArcGIS de ESRI y su costo en el proyecto depende del tiempo que se utilizan, su amortización y precio. El costo total de materiales informáticos es de \$ 276.59. El resto de recursos materiales consiste en material fungible, tales como hojas, tóner, etc., asignándosele un valor prudente de \$ 120.00 (Tabla 3.5).

Tabla 3.6 Costos de material informático

	Equipos	Precio (\$)	Amortización (\$/h)	Utilización (h)	Coste (\$)
	Ordenador	1,000.00	0.17	290.00	48.33
				Subtotal	48.33
Licencias software		Precio (\$)	Amortización (\$/h)	Utilización (h)	Coste (\$)
	Microsoft Office 2019	170.00	0.03	450	12.75
ArcGIS		6,873.64	1.15	150	171.84
				Subtotal	184.59
				Subtotal material informático	276.59

El costo parcial del proyecto engloba todos los ítems anteriores más un pequeño valor no justificado para cubrir gastos varios que se presenten (Tabla 3.5) sumando al final un subtotal de \$ 2,316.00. A este gasto parcial se le debe sumar los gastos que se generan al usar la infraestructura de la institución donde se trabaja, en este caso la ESPOL, la cual establece un porcentaje fijo del 25% sobre los costos parciales del proyecto. La suma de los costos, parciales y generales, resultan en el costo total del proyecto: \$ 2,895.

Tabla 3.7 Subtotal de costos parciales

	Coste (\$)
Personal	1,849
Material informático	277
Material Fungible	120
Gastos varios	70
Subtotal	2,316

Tabla 3.8 Costo total del proyecto

	Coste (\$)
Costos parciales	2,316
Costos generales	579
Subtotal	2,895

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones Técnicas

En el presente estudio se determinó que el método Mora-Vahrson para la evaluación de la amenaza por deslizamientos en los cantones Flavio Alfaro y Loja, resultó ser adaptable para ambos cantones y permitió combinar los principales factores relacionados a los deslizamientos tales como pendiente, litología, humedad del suelo, intensidad sísmica e intensidad de precipitaciones, siendo esta última la variable principal que se pretendía involucrar en el estudio para tratar el factor hidroclimático; para obtener los resultados planteados en relativamente corto plazo.

Al ser Flavio Alfaro una zona ubicada geográficamente en una cuenca y contar con litología sedimentaria, pendientes agudas y mayor intensidad sísmica y de precipitación, los niveles de amenaza de deslizamiento resultaron ser mayores que los de Loja, donde al contrario se presentan mayoritariamente litologías metamórficas e ígneas, pendientes menos pronunciadas, menor humedad y menores grados de intensidad sísmica y de precipitaciones. Sin embargo, es cierto que Loja posee una mayor población que Flavio Alfaro y los efectos antropogénicos sobre el terreno (agricultura, vías, etc.) pudieron tener un peso significativo en el primero, que no fueron considerados en el presente análisis.

El cambio climático tiene un impacto en la susceptibilidad ante deslizamientos y es posible estimar el impacto que tendrá dicho cambio, específicamente un escenario de proyección de clima, en la susceptibilidad ante deslizamientos de un área determinada mediante el uso de una metodología de zonificación de amenaza de deslizamientos que considere el factor precipitación y sus derivadas (por ejemplo, humedad del suelo).

El método SIG Mora-Vahrson, modificado para trabajar con datos de precipitaciones máximas diarias históricas y proyectadas, probó ser efectivo para

zonificar amenazas de deslizamientos, tanto para el período actual como para el año 2040, y así mismo para ambas zonas de estudio. Una de sus ventajas es ser ajustable a usar diferentes proyecciones de clima y precipitación y así generar mapas de amenazas para distintos escenarios.

4.2 Conclusiones Generales

Esta evaluación de amenaza de deslizamiento presente y futura, tanto de Flavio Alfaro como de Loja, puede ser utilizada como partida para futuros estudios de amenaza a mayor detalle dentro de cada cantón o para la elaboración de estudios de riesgo, y así mismo, la información es potencialmente útil en la toma de decisiones, elaboración de planes de ordenamiento territorial y de proyectos de mitigación, beneficiando a las municipalidades involucradas y a sus habitantes. Sin embargo, su uso no debe sustituir estudios geotécnicos, principalmente en zonas de media a alta amenaza.

Los mapas de amenaza presente y futura tanto de Flavio Alfaro como de Loja son un primer acercamiento a estudios de deslizamiento considerando registros históricos y proyecciones a futuro de las precipitaciones en estos cantones. En ambos casos se comprobó que para el año 2040, dentro de la proyección menos optimista de cambio climático, el peligro de deslizamientos aumentó y se espera un resultado similar en la mayoría del territorio ecuatoriano si se realiza el mismo análisis.

El uso de sistemas de información geográfica es ideal para trabajos como el presente, ya que facilita el análisis de grandes extensiones de terreno y variables climáticas proyectadas, que generalmente, y en este caso, son de resolución kilométrica. Un análisis geomecánico in situ a tales proporciones no podría competir en tiempo de ejecución y costos, factores en los que el análisis SIG destacó.

Al realizar este proyecto también se evidenció la falta de datos (a nivel nacional) requeridos en el método utilizado, tales como registros históricos de valores de precipitación máxima en 24 horas y de intensidad sísmica (Mercalli o aceleración sísmica), lo que aumentó la dificultad en la consecución de los objetivos, al tener

que buscarse alternativas que se acercaran en lo posible a dichos datos, y además repercutiendo en los resultados de los mapas de amenaza obtenidos.

4.3 Recomendaciones

Para mejorar este estudio, se recomienda elaborar mapas de intensidad sísmica a escala local en lugar de usar información de estudios previos, que generalmente tienen una escala nacional, ya que así se reflejaría la zonación sísmica de cada sector con más precisión.

Elaborar un registro histórico de las precipitaciones máximas en 24 horas, que pueda utilizarse para la elaboración de los mapas de intensidad de precipitación máxima en 24 horas, tal como lo requiere el método original de Mora-Vahrson. En caso de realizar dicho análisis, se recomienda comparar los resultados con el presente estudio para determinar el grado de variación entre ambos productos.

Se recomienda analizar registros históricos confiables de deslizamientos o elaborar una base propia a base de eventos identificados en imágenes satelitales para dar un mayor sustento al método usado para zonificar amenazas actuales de deslizamientos.

Es recomendable realizar estudios geotécnicos en las zonas de media y alta amenaza, en caso de usar los resultados de este proyecto como referente para planificación urbana.

BIBLIOGRAFÍA

Abril A. (2011). Metodología de zonificación de áreas susceptibles a deslizamientos en Quimsacocha. Tesis de Grado. Universidad de Cuenca

Barbat, A. H. (1998). El riesgo sísmico en el diseño de edificios. Ed. Calidad Siderúrgica, Madrid.

DesInventar (s.f.) Sistema de inventario de efectos de desastres. Recuperado de: <https://online.desinventar.org/desinventar/#ECU-DISASTER>

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería geológica. Pearson.

He, H., et al. (2019). A Landslide Susceptibility Assessment Method Based on GIS Technology and an AHP-Weighted Information Content Method: A Case Study of Southern Anhui, China. ISPRS International Journal of Geo-Information.

IEE & MAGAP (2015) Análisis De Amenaza por Tipo de Movimiento en Masa. Proyecto Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional, Escala 1: 25 000.

INAMHI. (1999). Estudio de lluvias intensas. Elaborado por Ing. Luis Rodríguez Fiallos.

INEC (2010). Resultados del Censo 2010 de Población Urbana y Vivienda, Fascículo Provincial Manabí.

INEC (2010). Resultados del Censo 2010 de Población Urbana y Vivienda, Fascículo Provincial Loja.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. (s.f.). Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de Nicaragua-El Método Mora-Vahrson. Proyecto: Mitigación de Georriesgos en Centroamérica.

IPCC (2013): Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo

Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

IPCC (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.

MAE. (2017). Tercera Comunicación Nacional del Ecuador sobre Cambio Climático. Quito, Ecuador.

Mora S. & Vahrson G., (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 31(1), 49-58

Naciones Unidas (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.

PDOT Cantón de Manabí., (2015). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Recuperado de: <https://odsterritorioecuador.ec/wp-content/uploads/2019/04/PDOT-CANTON-FLAVIO-ALFARO-2014-2019-1.pdf>

PDOT Municipio de Loja., (2014). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Actualización 2014-2022. Recuperado de: <https://www.loja.gob.ec/files/image/LOTAIP/podt2014.pdf>

Quesada, A., & Feoli-Boraschi, S. (2018). A Comparison of the Mora-Vahrson Methodology and the Morphometric Method to Determine Areas Susceptible to Landslides in the Macho River Microbasin, Costa Rica. Revista Geografica de America Central, 17-45.

Quinde, P., & Reinoso, E. (2016). Estudio de Peligro Sísmico de Ecuador y Propuesta de Espectros de Diseño para la Ciudad de Cuenca. Revista de Ingeniería Sísmica No. 94 1-26.

Román, A. Q., & Feoli-Boraschi, S. (2018). Comparación de la metodología Mora-Vahrson y el método morfométrico para determinar áreas susceptibles a deslizamientos en la microcuenca del río Macho, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(61), 17-45. Doi: [dx.doi.org/10.15359/rgac.61-2.1](https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.1)

Shahri, A., et al. (2019). Landslide susceptibility hazard map in southwest Sweden using artificial neural network. *CATENA*.

Sierra, E., & Figueroa, D. (2017). Zoning of hazards by landslides starting from the model Mora and Vahrson. *ENTORNO GEOGRAFICO*, 114-141.

Skansi, M. d. (2013). Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 295-307.

Soto, J., Palenzuela, J. A., Galve, J. P., Luque, J. A., Azañón, J. M., Tamay, J., & Irigaray, C. (2017). Estimation of empirical rainfall thresholds for landslide triggering using partial duration series and their relation with climatic cycles. An application in southern Ecuador. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. DOI: [10.1007/s10064-017-1216-z](https://doi.org/10.1007/s10064-017-1216-z)

Suarez, J. (1998). *Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

UNISDR, (2009). *Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres*.

Yang, Y., et al. (2019). Local-scale landslide susceptibility mapping using the B-GeoSVC model. *Landslides*, 1301–1312

APÉNDICES

APÉNDICE A

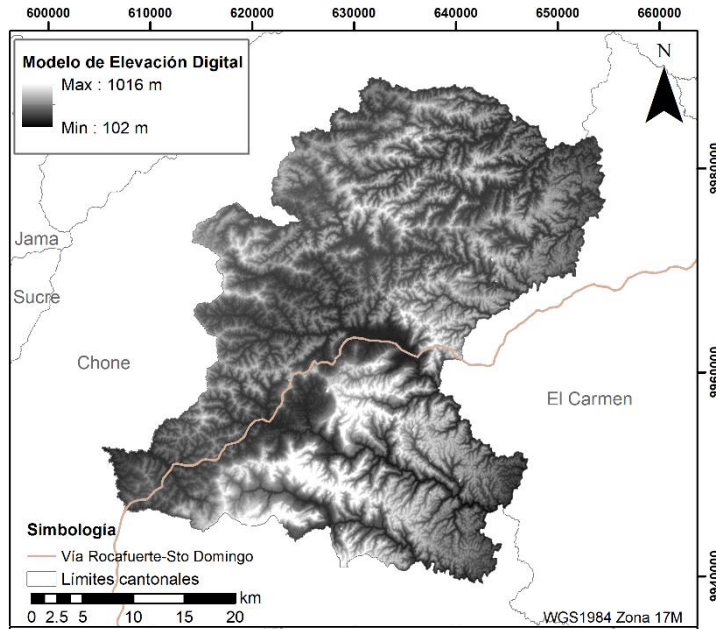


Figura 1 Mapa de elevación del terreno, cantón Flavio Alfaro. Fuente: Autores

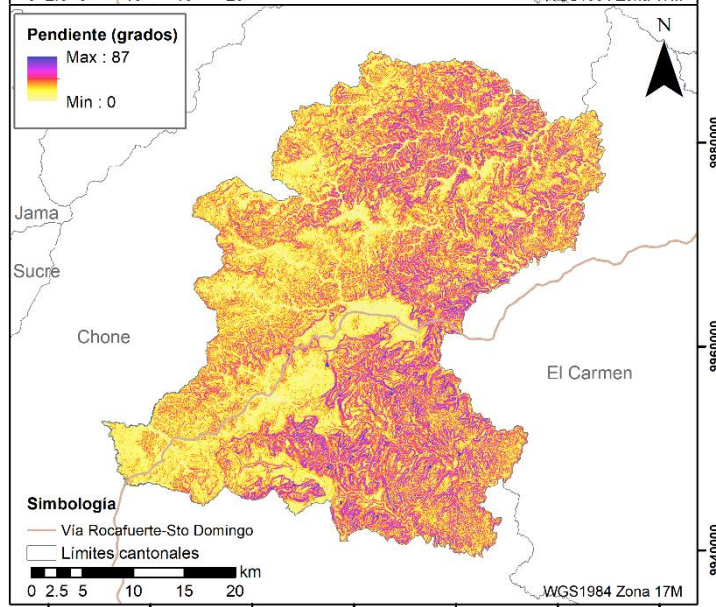


Figura 2 Mapa de pendientes, cantón Flavio Alfaro. Fuente: Autores

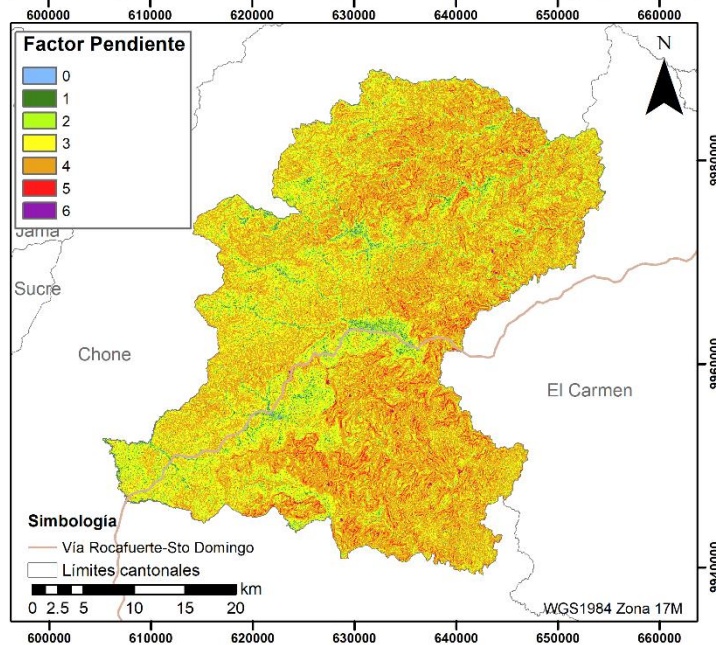


Figura 3 Mapa del factor pendiente, Flavio Alfaro. Fuente: Autores

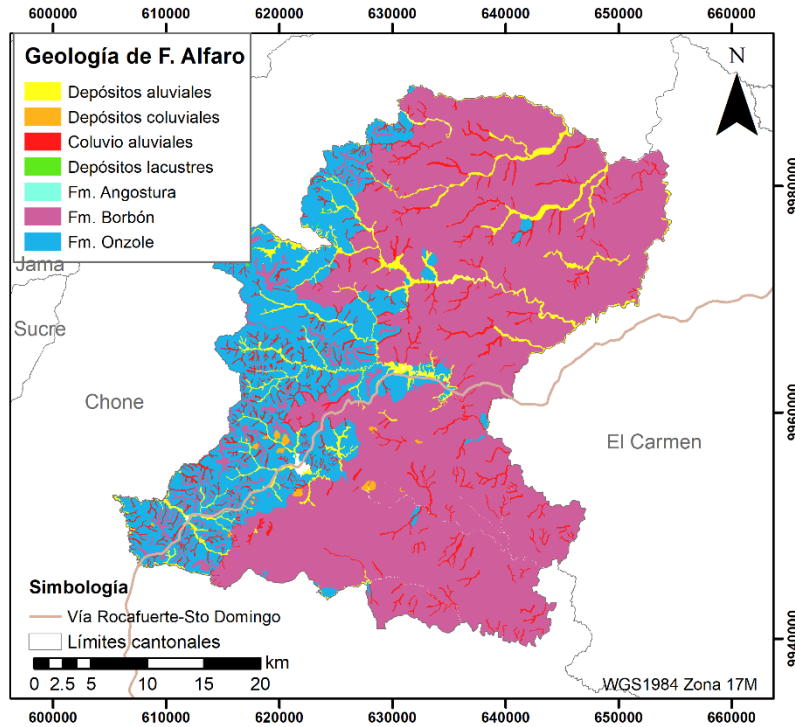


Figura 4 Mapa geológico, cantón Flavió Alfaro. Fuente: Modificado de MAGAP (2014)

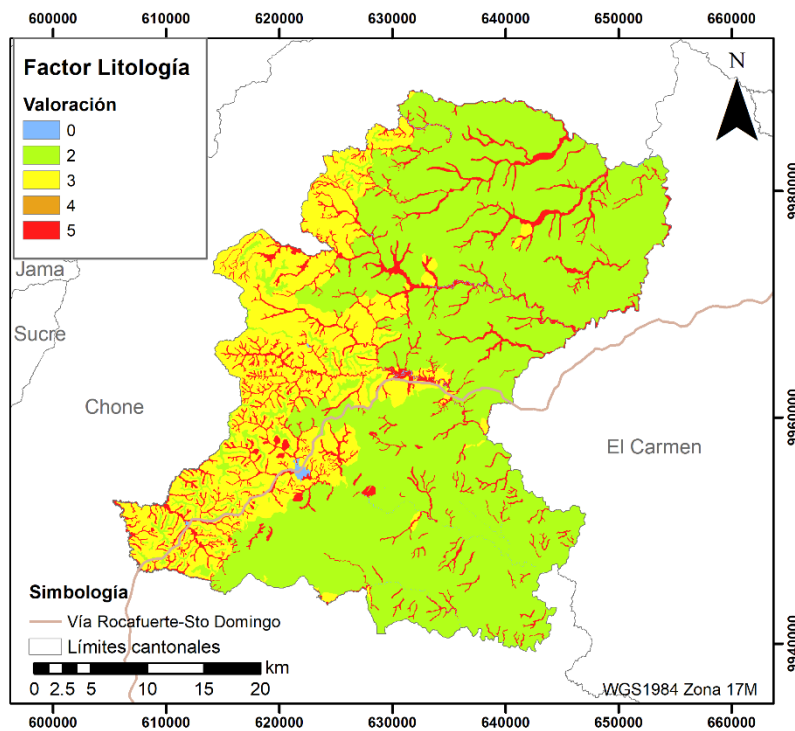


Figura 5 Mapa del factor litología (SI), cantón Flavió Alfaro. Fuente: Autores

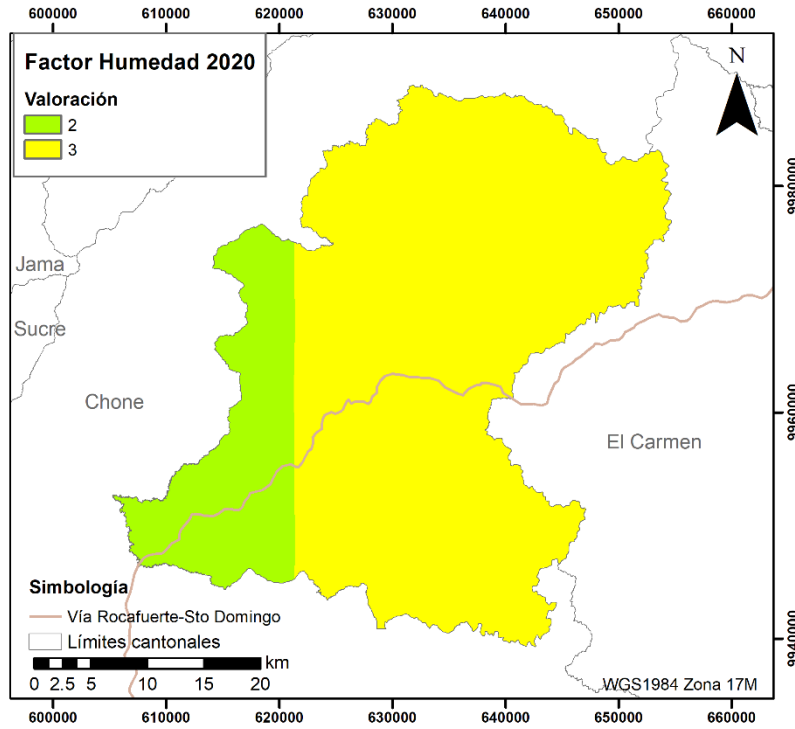


Figura 6 Mapa del factor humedad año 2020 (Sh), cantón Flavio Alfaro. Fuente: Autores

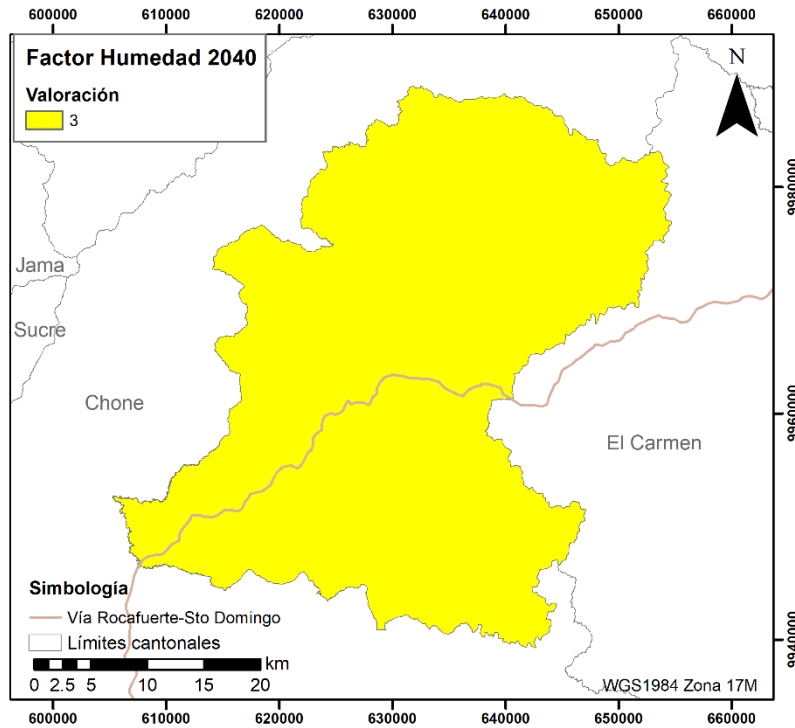


Figura 7 Mapa del factor humedad año 2040 (Sh), cantón Flavio Alfaro. Fuente: Autores

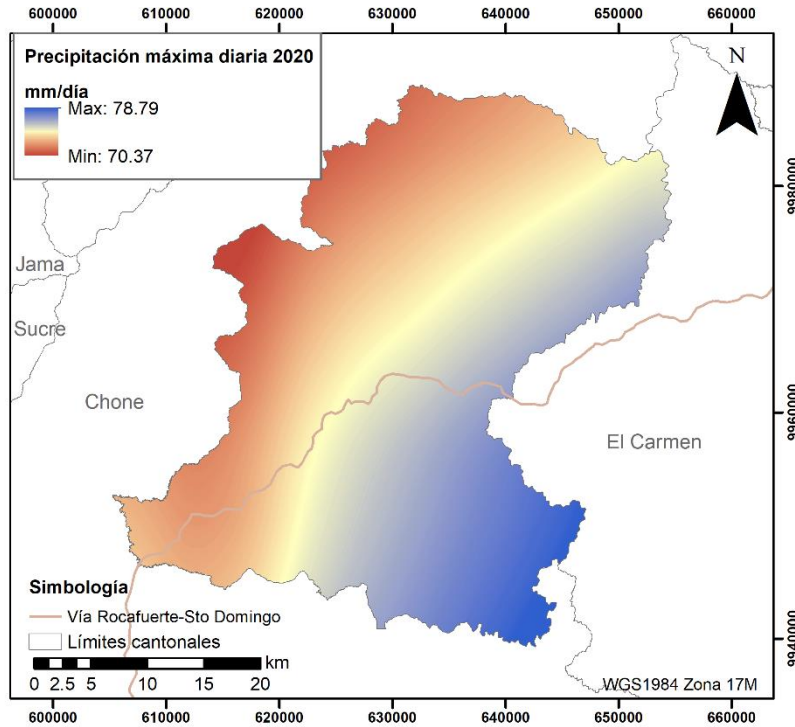


Figura 8 Mapa de precipitación máxima diaria con un período de retorno de 100 años para el año 2020, cantón Flavio Alfaro. Fuente: Autores

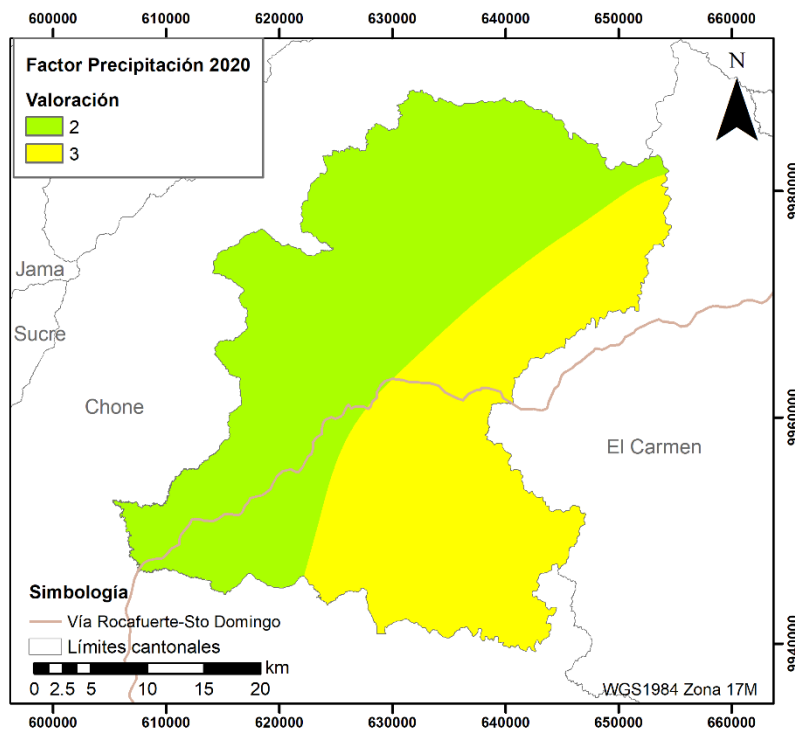


Figura 9 Mapa del factor precipitación para el año 2020, cantón Flavio Alfaro. Fuente: Autores

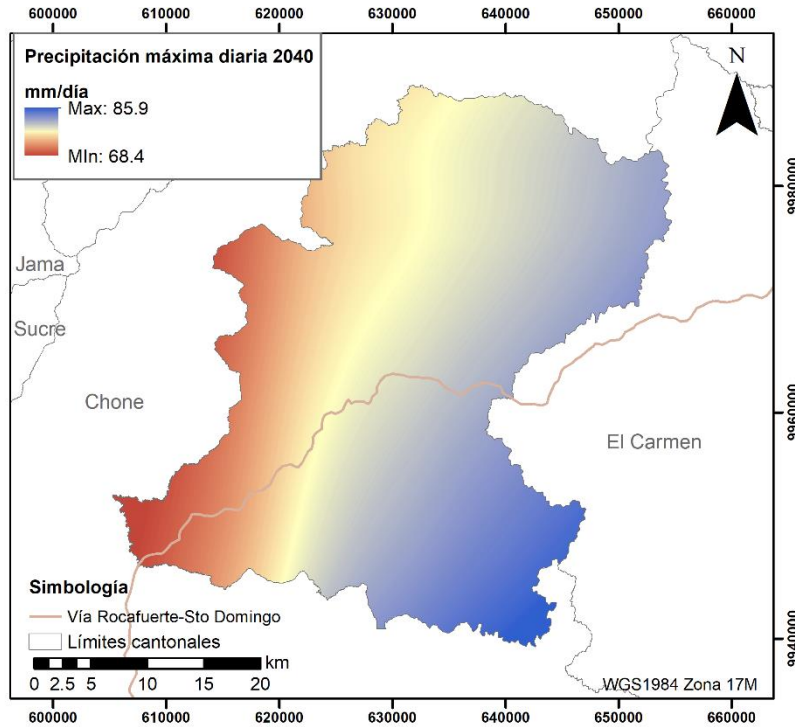


Figura 10 Mapa de precipitación máxima diaria con un período de retorno de 100 años para el año 2040, cantón Flavio Alfaro. Fuente: Autores

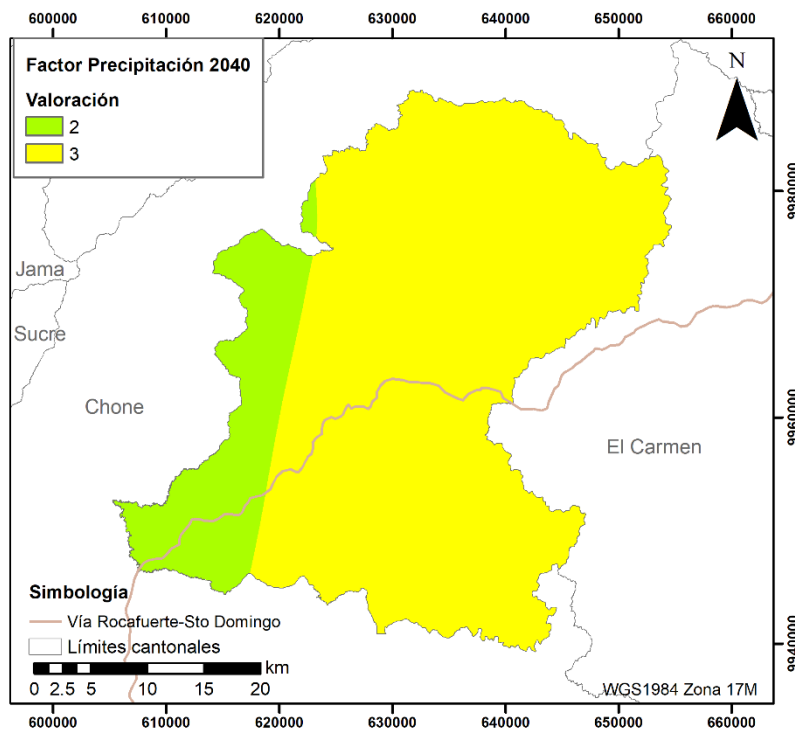


Figura 11 Mapa del factor precipitación para el año 2040, cantón Flavio Alfaro. Fuente: Autores

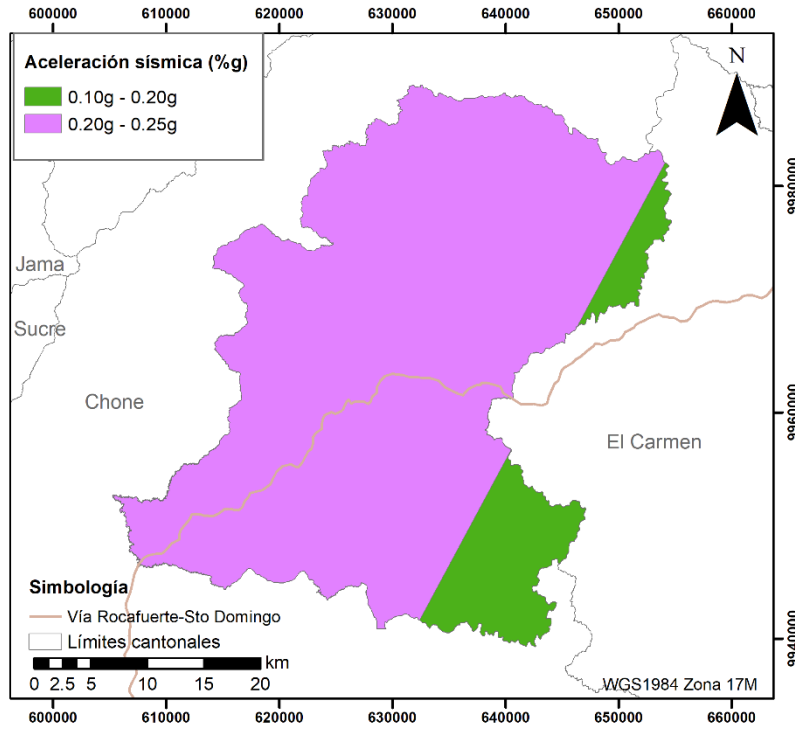


Figura 12 Mapa de aceleración sísmica cantón Flavio Alfaro. Fuente: Modificado de Quinde y Reinoso (2016)

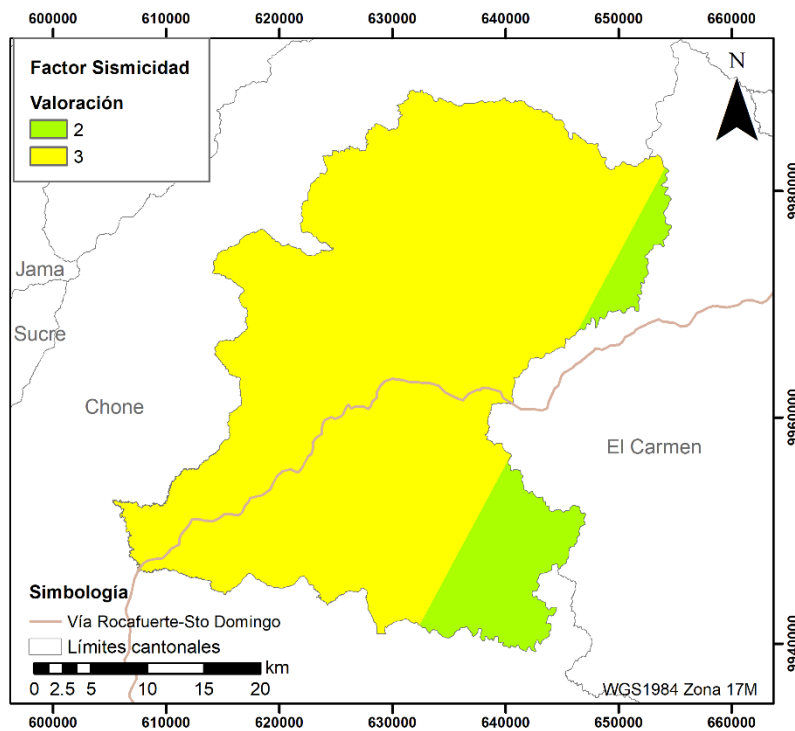


Figura 13 Mapa del factor de intensidad sísmica cantón Flavio Alfaro. Fuente: Autores

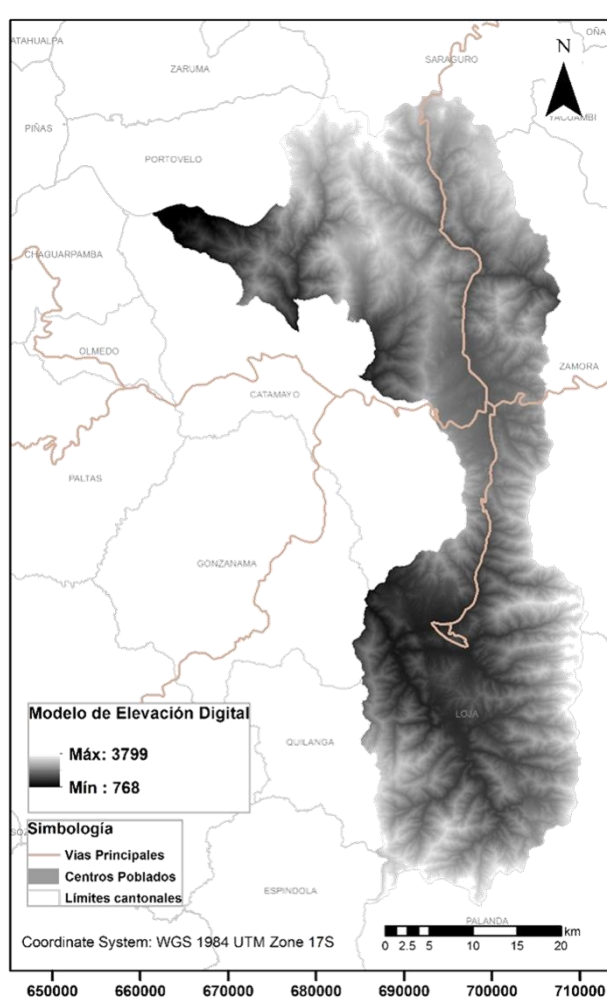


Figura 14 Mapa de elevación del terreno, cantón Loja. Fuente: Autores

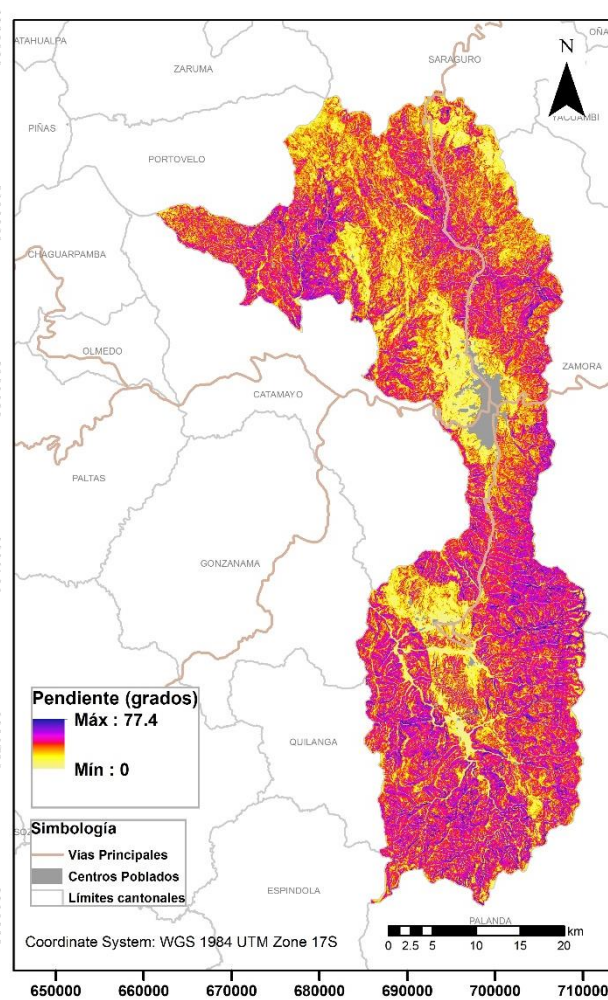


Figura 15 Mapa de pendientes, cantón Loja. Fuente: Autores

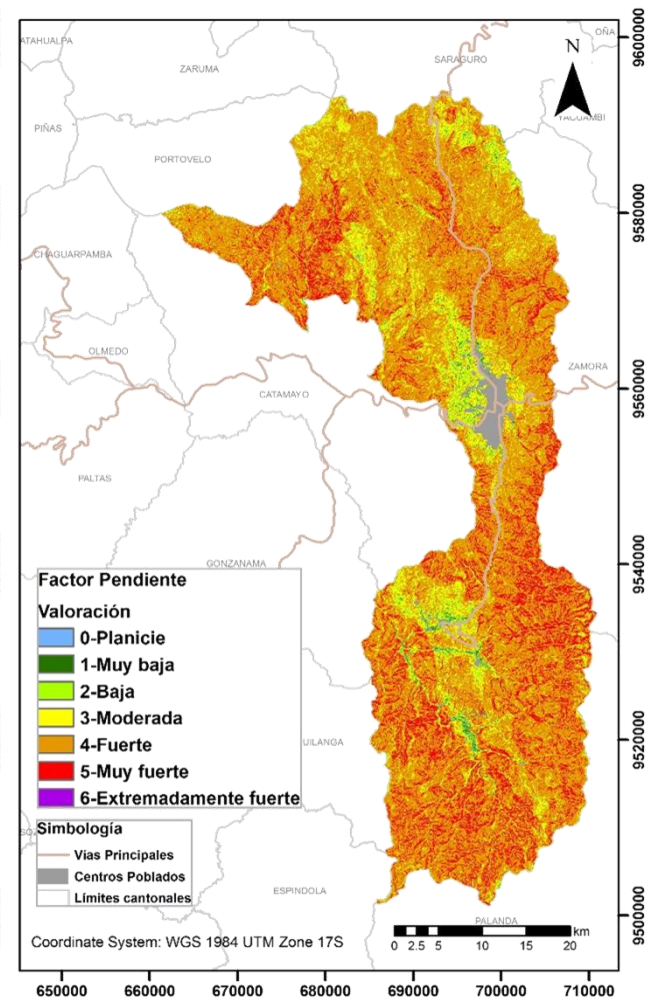


Figura 16 Mapa del factor pendiente, cantón Loja. Fuente: Autores

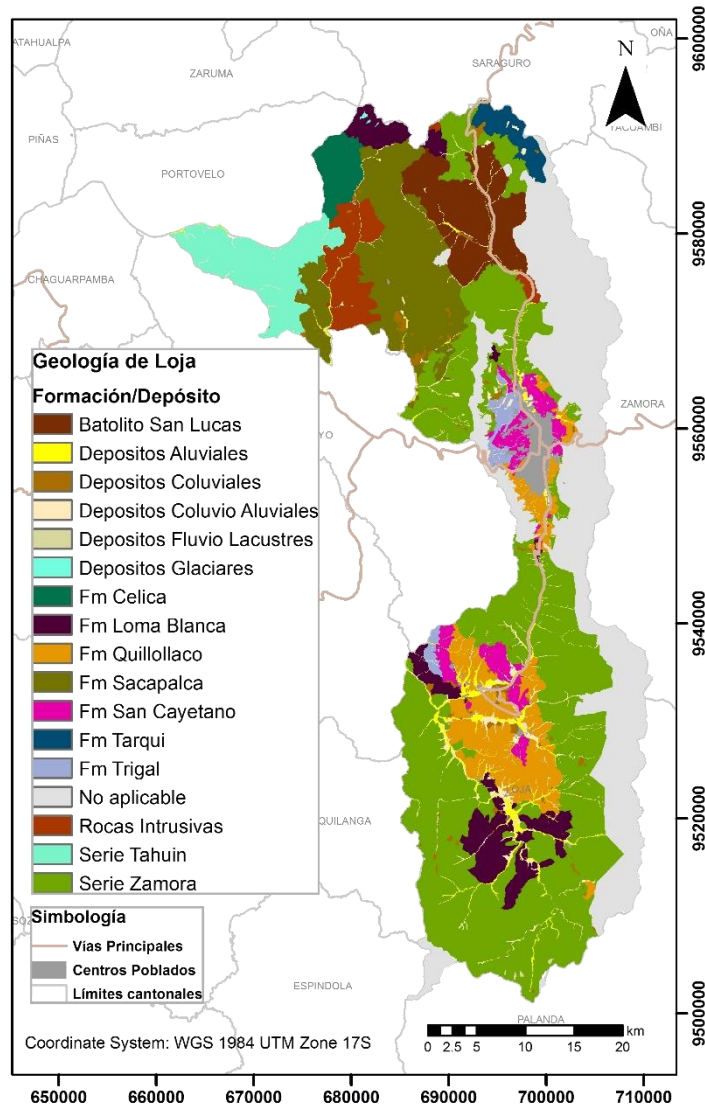


Figura 17 Mapa geológico, cantón Loja.
Fuente: Modificado de IGM (2014)

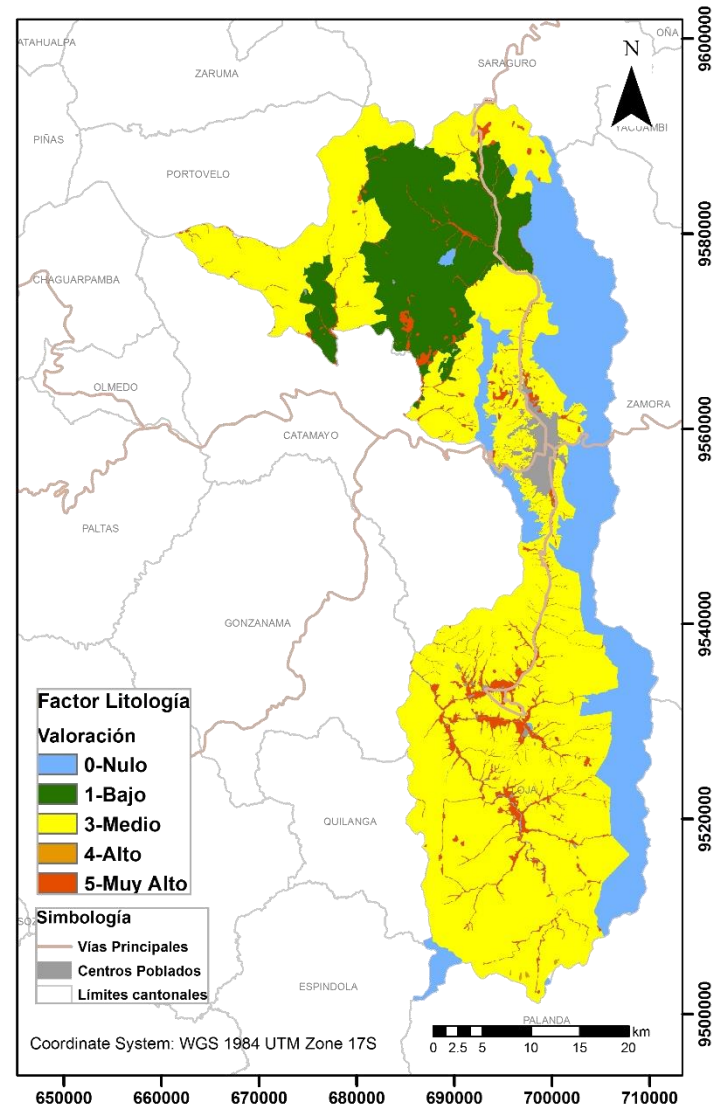


Figura 18 Mapa del factor litología (SI), cantón Loja. Fuente: Autores

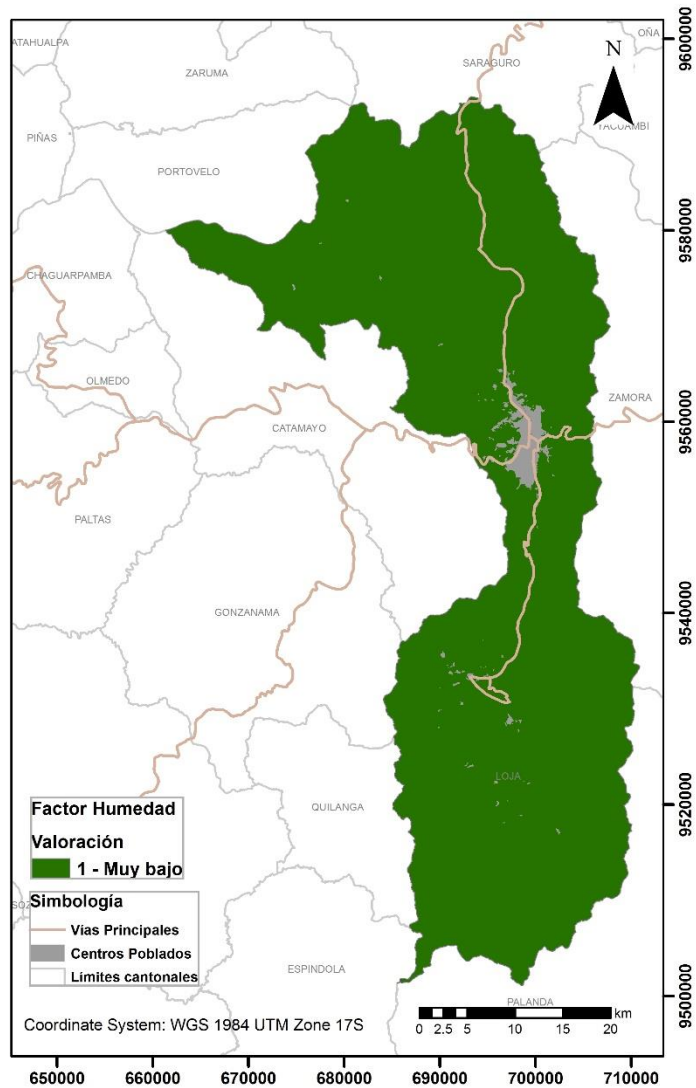


Figura 19 Mapa del factor humedad año 2020 (Sh), cantón Loja. Fuente: Autores

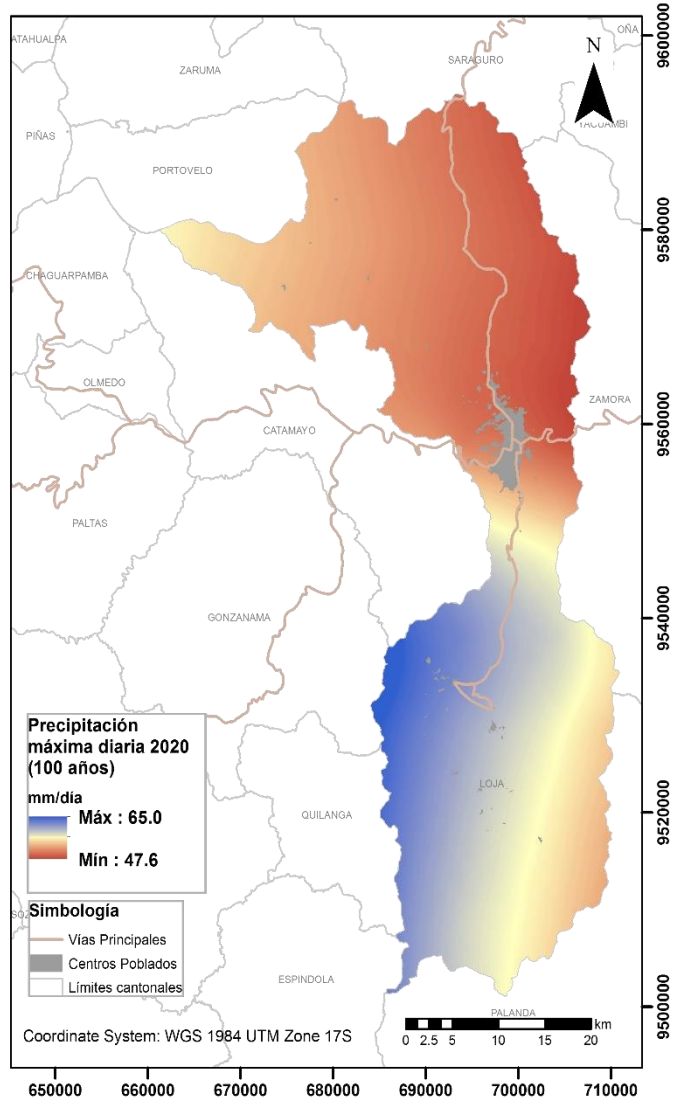


Figura 20 Mapa de precipitación máxima diaria 2020. Loja. Fuente: Autores

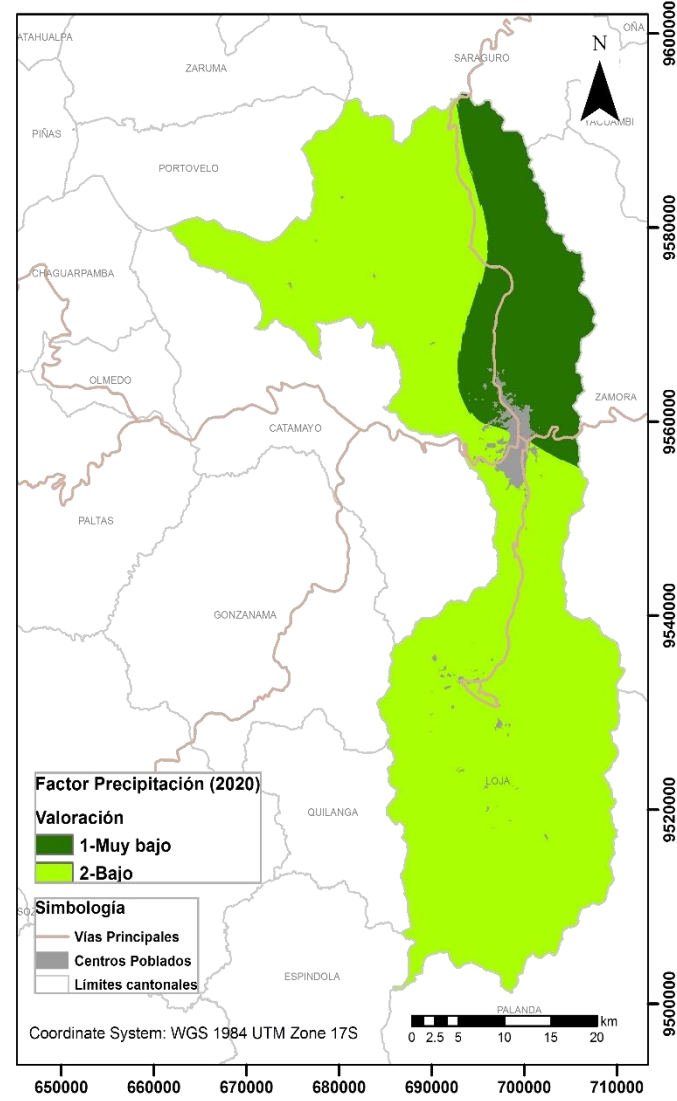


Figura 21 Mapa del factor precipitación 2020, Loja. Fuente: Autores

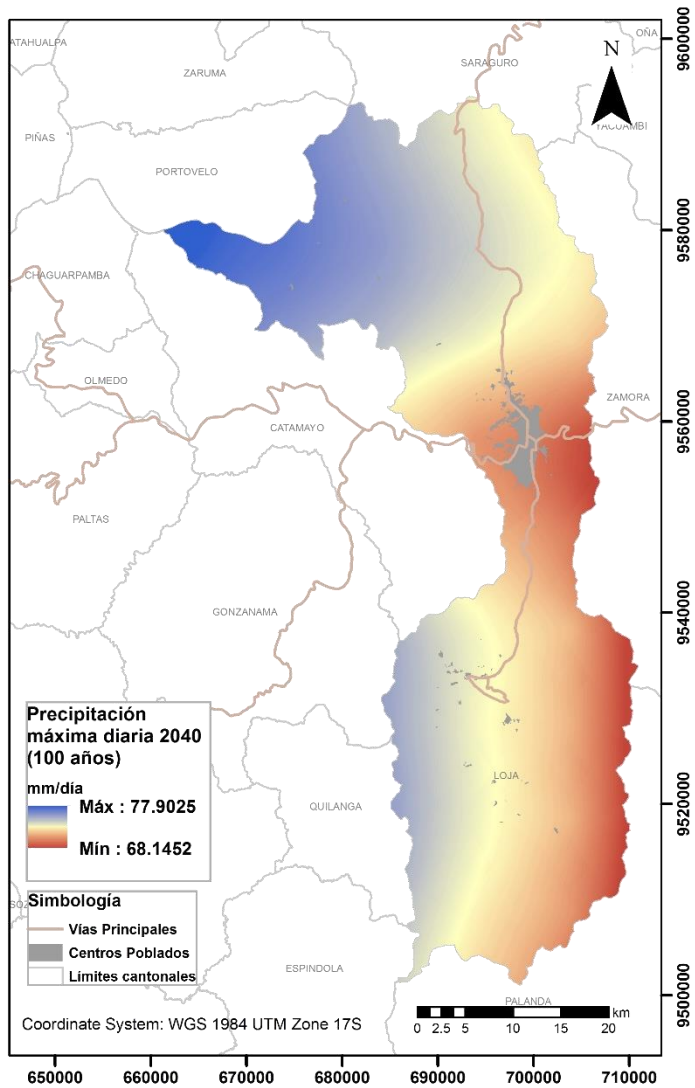


Figura 22 Mapa de precipitación máxima diaria 2040, Loja. Fuente: Autores

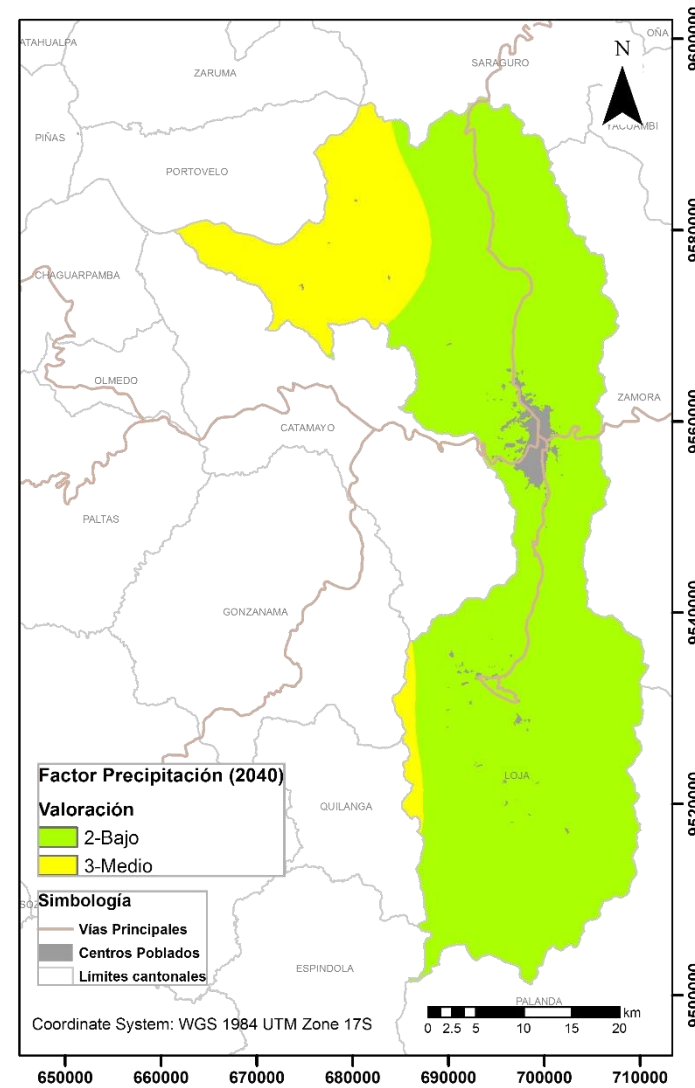


Figura 23 Mapa del factor precipitación 2040, Loja. Fuente: Autores

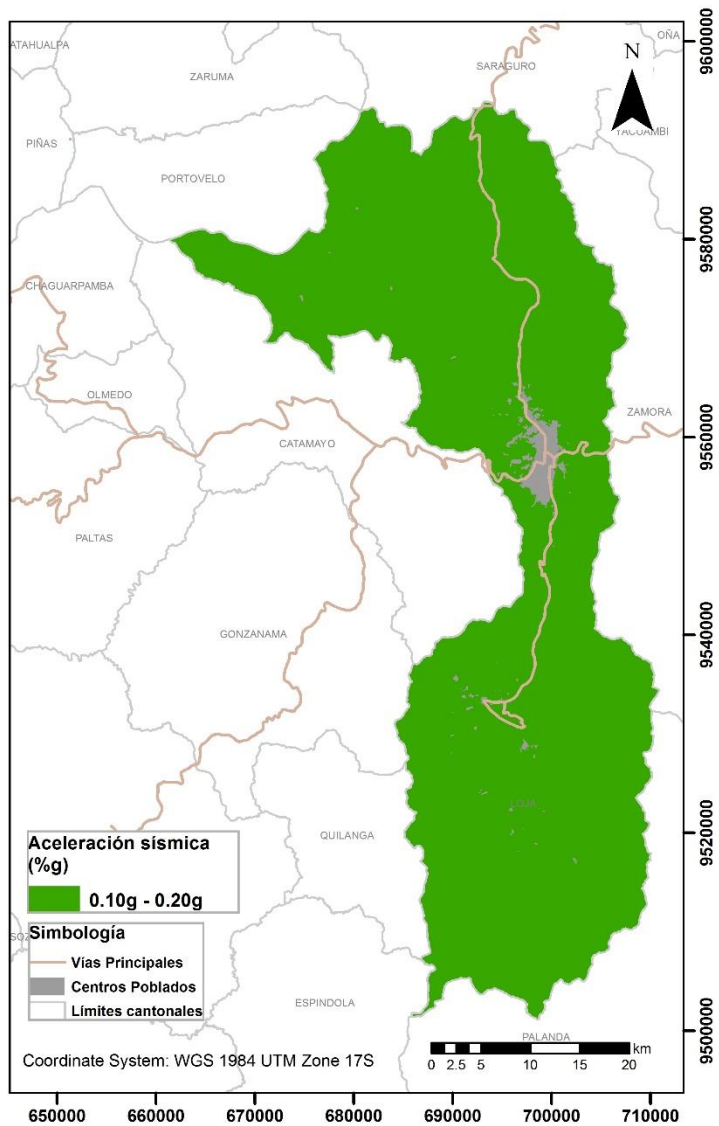


Figura 24 Mapa de aceleración sísmica, cantón Loja. Fuente: Autores

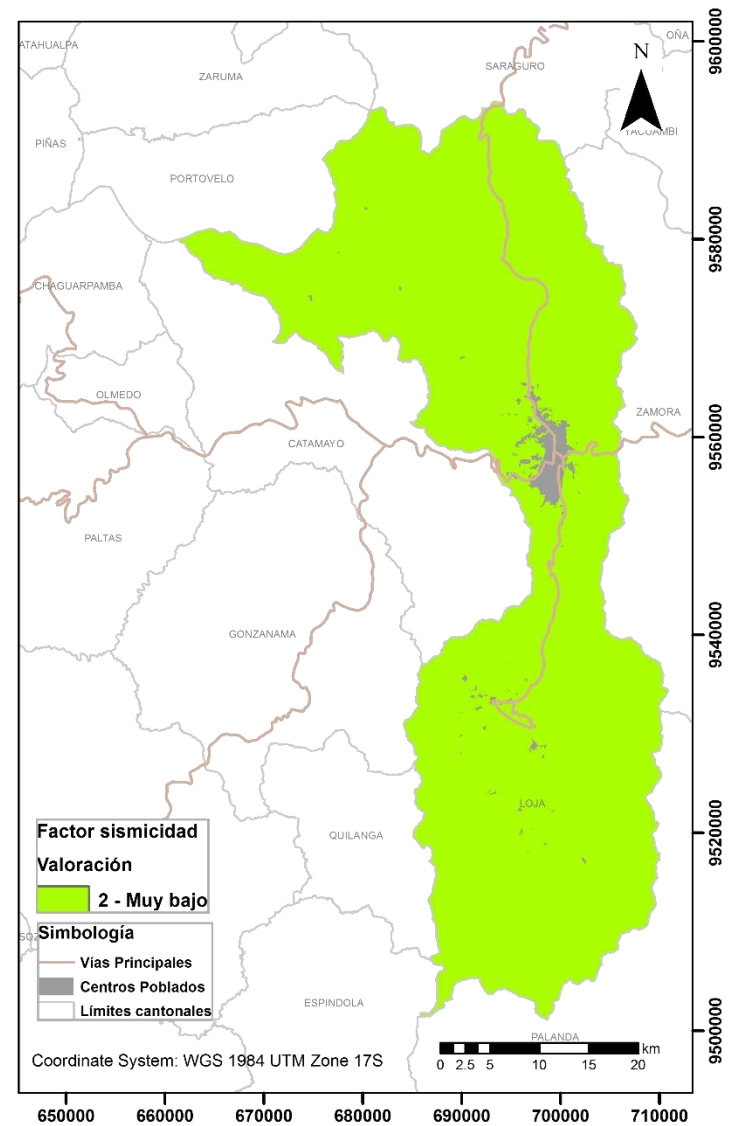


Figura 25 Mapa del factor intensidad sísmica, cantón Loja. Fuente: Autores