

APLICACIÓN DE UN MODELO ESTOCÁSTICO PARA EVALUACIÓN DE
AMENAZA DE DESLIZAMIENTO EN DOS SITIOS CRÍTICOS DE LA VÍA
VILLAVICENCIO - PIPIRAL (PR83+510 – PR86+500), INCLUYENDO LOS
DETONANTES DE SISMO Y LLUVIA

FRANCIS DARLEY MOSQUERA NOVOA
YENNY ASTRID MOSQUERA NOVOA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ
2019

APLICACIÓN DE UN MODELO ESTOCÁSTICO PARA EVALUACIÓN DE
AMENAZA DE DESLIZAMIENTO EN DOS SITIOS CRÍTICOS DE LA VÍA
VILLAVICENCIO - PIPIRAL (PR83+510 – PR86+500), INCLUYENDO LOS
DETONANTES DE SISMO Y LLUVIA

FRANCIS DARLEY MOSQUERA NOVOA
YENNY ASTRID MOSQUERA NOVOA

Trabajo de grado presentado para optar al título de Magister en Infraestructura Vial

Director
PhD. Jairo Edmundo Yepes Heredia

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ
2019

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Villavicencio, 02 de Octubre de 2019

DEDICATORIA

A **DIOS** por todas sus bendiciones recibidas, ya que este proyecto es para su gloria.

A nuestros padres **PRIMO MOSQUERA Y AURA MARIA NOVOA**, por sus oraciones y compañía.

A Mario, Silvia, Salome, hermanos y cuñados por su amor, respaldo y apoyo incondicional

AGRADECIMIENTOS

Al profesor y director de trabajo de grado el Ing **JAIRO EDMUNDO YEPES HEREDIA I.C., MSc., Ph.D, M.ASCE** por su gran aporte de conocimiento, direccionamiento y oportuna disponibilidad.

Al profesor **CARLOS EDUARDO RODRÍGUEZ PINEDA**, por los significativos aportes a este trabajo de grado.

Al técnico administrativo **FABIO MESTIZO CASTILLO** funcionario de la oficina del IDEAM por su valiosa colaboración en los registros de datos de pluviometría en Colombia.

Al Ingeniero **DIEGO ALEXANDER DUQUE** por su colaboración y aporte de conocimiento a este trabajo.

Al ingeniero **JAROLD DAVID TORRES LÓPEZ** especialista en SIG por su asesoramiento en la herramienta de zonificación – ArcGIS.

A la **UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS** y a todos los docentes de la Maestría en **INFRAESTRUCTURA VIAL** de quienes recibimos sus enseñanzas.

RESUMEN

Anteriormente se utilizó un método probabilístico para realizar la zonificación de amenaza en El Salvador (Rodríguez, Yepes 2009), y debido a la falta de información para describir con precisión la función de susceptibilidad, se utilizó el ángulo de la pendiente. Este estudio pretende cubrir esta limitación y utiliza las propiedades geomecánicas de los materiales encontrados en Pipiral-Colombia, para definir la susceptibilidad de esta área crítica.

El modelo probabilístico calcula, para una región específica, la probabilidad total de peligro de deslizamiento de tierra en un escenario donde pueden ocurrir lluvias y sismos, pero solo uno de estos dos eventos desencadenará efectivamente el deslizamiento.

Se actualizaron las bases de datos de "deslizamientos de tierra inducidos por sismos históricos y mundiales" y la base de datos de "deslizamientos de tierra inducidos por lluvias en Centroamérica y Colombia" para incluir eventos hasta 2019.

El análisis de amenaza sísmica de la región se utilizó para calcular la probabilidad de ocurrencia del sismo crítico y la base de datos de sismos mencionada, se utilizó para calcular la probabilidad de ocurrencia del deslizamiento de tierra debido a este sismo crítico.

Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (I-D-F) para el área específica se usaron para definir la probabilidad de ocurrencia de la lluvia crítica y la base de datos de lluvias, se utilizó para calcular la probabilidad de ocurrencia del deslizamiento de tierra debido a esta lluvia crítica.

La ecuación de probabilidad total se calcula para celdas de medidas de (2*2) mts, cuyos resultados de la zonificación de amenaza, se comparan con el análisis numérico, encontrando cierta coherencia, con los obtenidos en el modelo de equilibrio límite, lo cual valida la precisión de este trabajo.

Palabras clave: probabilidad, deslizamientos de tierra inducidos por la lluvia, deslizamientos de tierra inducidos por sismos, bases de datos, zonificación, modelación, susceptibilidad, y curvas de intensidad-duración-frecuencia.

ABSTRACT

A Probabilistic method was previously used to perform Probabilistic Hazard Zonation in El Salvador (Rodriguez, Yepes, 2013), and due to the lack of information to accurately describe the susceptibility function, the slope angle was used. This paper tried to cover this limitation and geomechanical properties of the materials found in Pipiral-Colombia, were used to define the susceptibility of this critical area.

The probabilistic model calculates, for a specific region, the total probability of landslide hazard in a scenario where both rainfall and earthquakes can occur, but only one of these two events will effectively trigger the landslide.

A database of “historic and worldwide Earthquake Induced Landslides” was updated to include events up to 2019, and a database of “Central-America and Colombia Rainfall Induced Landslides” was also updated to include events up to 2019.

The seismic hazard analysis of the region was used to calculate the probability of occurrence of the critical earthquake. The database was used to calculate the probability of occurrence of the landslide due to this critical earthquake.

The intensity-duration-frequency (I-D-F) curves for the specific area were used to define the probability of occurrence of the critical rainfall. The database was used to calculate the probability of occurrence of the landslide due to this critical rainfall.

The total probability equation was calculated for (2 * 2) meter cells, whose results of the hazard zonation are compared with numerical modeling, finding that they have coherence with those obtained in the limit equilibrium model, illustrated in this document, the accuracy of this current work is validated.

Keywords: probability, rainfall induced landslides, earthquake induced landslides, database, zonation, modeling, susceptibility, intensity-duration-frequency curves.

TABLA DE CONTENIDO

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
JUSTIFICACIÓN	23
OBJETIVOS	24
1 MARCO GEOGRÁFICO	25
1.1 ASPECTOS GENERALES DE LA ZONA PIPIRAL (ZONA PILOTO 1 Y 2) .	25
2 ESTADO DEL ARTE	33
2.1 HADJ-HAMOU & KAVAZANJIAN (1985). SEISMIC STABILITY OF GENTLE INFINITE SLOPES	33
2.2 HARR (1987). <i>RELIABILITY BASED DESIGN IN CIVIL ENGINEERING</i> ...	34
2.3 MORA & VAHRSON (1994). <i>MACROZONATION METHODOLOGY FOR LANDSLIDE HAZARD DETERMINATION</i>	34
2.4 CHRISTIAN, LADD & BAECHER (1994). <i>RELIABILITY APPLIED TO SLOPE STABILITY ANALYSIS</i>	35
2.5 BAECHER & CHRISTIAN (2003). <i>RELIABILITY AND STATISTICS</i>	35
2.6 RODRÍGUEZ, TORRES & LEON (2004). <i>LANDSLIDE HAZARD IN EL SALVADOR</i>	36
2.7 YEPES (2009). <i>IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ESTOCÁSTICO PARA EVALUAR AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS</i>	36
2.8 HIDALGO & VEGA (2014). <i>ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR SISMO Y LLUVIA</i>	37
2.9 ERING & SIVAKUMAR BABU (2016). <i>PROBABILISTIC BACK ANALYSIS OF RAINFALL INDUCED LANDSLIDE</i>	37
2.10 SEN CAI ET AL., (2017). <i>UNCERTAINTY OF RAINFALL-INDUCED LANDSLIDES CONSIDERING SPATIAL VARIABILITY OF PARAMETERS</i>	38
3 METODOLOGÍA	39
3.1 DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD CONJUGADA DE FALLA	41
3.2 CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD CONJUGADA DE FALLA	50
4 RESULTADOS	51
4.1 ACTUALIZACIÓN DE BASE DE DATOS	51
4.2 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	53
4.3 DEFINICIÓN DE CURVAS DE DENSIDAD DE DESLIZAMIENTOS.....	56

4.4	CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD TOTAL DE FALLA POR SISMOS, PARA UN MECANISMO EN PARTICULAR	59
4.5	CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE DESLIZAMIENTO POR LLUVIAS EN CADA ZONA PILOTO.....	73
4.6	PROBABILIDAD CONJUGADA DE FALLA DE LOS EVENTOS DETONANTES SISMO Y LLUVIA	77
4.7	ZONIFICACION DE LA PROBABILIDAD DE FALLA POR SISMOS Y LLUVIAS.....	79
5	MODELACIÓN A PARTIR DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS EN SLIDE-2018 Y RS2-2019 LICENCIADOS POR ROCSCIENCE.....	81
6	IMPACTO SOCIAL	87
7	IMPACTO AMBIENTAL.	88
8	CONCLUSIONES	89
9	PROBABILIDADES DE LA ZONA PILOTO 1	91
9.1	PROBABILIDAD DE FALLA POR LLUVIAS.....	91
9.2	PROBABILIDAD DE FALLA POR SISMOS	91
9.3	PROBABILIDAD CONJUGADA	91
10	PROBABILIDADES DE LA ZONA PILOTO 2	93
10.1	PROBABILIDAD DE FALLA POR LLUVIAS	93
10.2	PROBABILIDAD DE FALLA POR SISMOS	93
10.3	PROBABILIDAD CONJUGADA	93
11	MODELACIÓN EN SLIDE Y RS2 VS ZONIFICACIÓN EN ARCGIS	95
12	RECOMENDACIONES	96
13	BIBLIOGRAFÍA.....	97
14	ANEXOS.....	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes Sísmicos de las fuentes sismogénicas	43
Tabla 3. Deslizamientos inducidos por sismos 1767 A.C. – 1999 D.C	52
Tabla 4. Deslizamientos inducidos por sismos 2000 – 2007	52
Tabla 5. Base de datos de deslizamientos inducidos por sismos 2008 – 2019	53
Tabla 5. Parámetros sísmicos de las fuentes sismogénicas	60
Tabla 6. Relación de Magnitudes definidas para cada mecanismo de falla	61
Tabla 7. Tasa de Ocurrencia para cada mecanismo de falla	61
Tabla 8. Periodos de Retorno para cada mecanismo de falla	62
Tabla 9. Probabilidad calculada para cada mecanismo de falla	63
Tabla 10 Distancia promedio fuentes sismogénicas a Zona Piloto 1	64
Tabla 11. Distancia promedio Fuentes Sismogénicas a Zona Piloto 2	64
Tabla 12. Probabilidad de que el sismo crítico genere deslizamiento ZP1	65
Tabla 13. Probabilidad de que el sismo crítico genere deslizamiento ZP2	66
Tabla 14. Datos utilizados para realizar el mapa de pendientes en ArcGIS y cálculo de distancias epicentrales a cada fuente sismogénica - ZP1	67
Tabla 15. Cálculos realizados para obtener la probabilidad de ocurrencia del sismo crítico para cada periodo de retorno; pendiente en radianes y función de susceptibilidad, para cada celda en la ZP1	68
Tabla 16. Datos utilizados para realizar el mapa de pendientes en ArcGIS y cálculo de distancias epicentrales a cada fuente sismogénica – ZP2	69
Tabla 17. Cálculos realizados para obtener la probabilidad de ocurrencia del sismo crítico para cada periodo de retorno; pendiente en radianes y función de susceptibilidad, para cada celda en la – ZP2	70
Tabla 18. Probabilidad de falla por sismos para cada mecanismo de falla en función de los periodos de retorno definidos para la ZP1	71
Tabla 19. Probabilidad de falla por sismos para cada mecanismo de falla en función de los periodos de retorno definidos para la ZP2	72
Tabla 20. Cálculos para determinar la probabilidad de deslizamiento por lluvias en ZP1	74
Tabla 21. Cálculos para determinar la probabilidad de deslizamiento por lluvias en ZP2	74
Tabla 22. Probabilidad Conjugada detonantes sismo y lluvia en Zona Piloto 1	78
Tabla 23. Probabilidad Conjugada detonantes sismo y lluvia en Zona Piloto 2	79
Tabla 24. Secciones transversales zona piloto 1	82
Tabla 25. Secciones transversales zona piloto 2	82
Tabla 26. Parámetros Geotécnicos Zona Piloto 2	84

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante.....	20
Imagen 2. Localización Continental y Nacional de la zona de estudio	25
Imagen 3. Localización de las Zonas Piloto sobre el corredor vial Bogotá – Villavicencio.....	26
Imagen 4. Sistema de plegamientos zona de estudio	27
Imagen 5. Mapa de rangos de precipitación en Colombia	28
Imagen 6. Mapa de amenaza sísmica en Colombia.....	30
Imagen 7. Mecanismos de Falla	39
Imagen 8. Esquema general de la Metodología, Mosquera 2019	40
Imagen 9. Esquema de cálculo de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en una celda en la zona piloto, en función de distancias epicentrales y magnitudes de sismo para las fuentes sismogénicas que influyen sobre la zona	45
Imagen 10. Curva I-D-F - Estación Esmeralda Registros de valores máximos mensuales de precipitación (mm) en 24 horas.....	48
Imagen 11. Curva I-D-F - Estación Servitá. Registros de valores máximos mensuales de precipitación (mm) en 24 horas”	48
Imagen 12. Deslizamientos inducidos por sismos de 1999 a 2019. Máxima distancia epicentral (Km) vs. Ms (sin discriminación por mecanismos)	54
Imagen 13. Ilustración del concepto para la determinación de distancias epicentrales	55
Imagen 14. Deslizamientos inducidos por sismos. Máxima distancia epicentro a deslizamiento más lejano vs. Magnitud de sismo para Deslizamientos disgregados, coherentes y flujos.....	56
Imagen 15. Curvas del 0%, 15% y 60%, trazadas a partir de la base de datos de Rodríguez 2000.	57
Imagen 16. Curvas de densidad de deslizamientos para deslizamientos inducidos por sismos 1767 A.C. hasta 2019 D.C.	58
Imagen 17. Fuentes Corticales Tipo área definidas	59
Imagen 18. Fuentes tipo área para sismicidad distribuida	60
Imagen 19. Probabilidad que el sismo crítico genere deslizamientos	65
Imagen 20. Cruce de curvas “I-D-F” en función de los periodos de retorno, con densidad de deslizamientos – Estación Esmeralda	75
Imagen 21. Cruce de curvas “I-D-F” en función de los periodos de retorno, con densidad de deslizamientos– Estación Servitá	76
Imagen 22. Sondeos Zona Piloto 1 Tomada del estudio de consultoría Año 2013	83
Imagen 23. Sondeos Zona Piloto 2 Tomada del estudio de consultoría Año 2013	83
Imagen 24. Sondeos Zona Piloto 2 Tomada del estudio de consultoría Año 2013	84
Imagen 25. Análisis de estabilidad – ZP2-SLIDE 2018	85
Imagen 26. Determinación del factor de seguridad del talud – ZP2-SLIDE 2018..	86
Imagen 27. Determinación de la probabilidad de falla – ZP2-RS2 2019	86

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Probabilidad Conjugada de falla.....	41
Ecuación 2. Probabilidad total de falla por sismos para cada mecanismo	42
Ecuación 3. Probabilidad de Ocurrencia de sismos de Magnitud M.....	43
Ecuación 4. Tasa de ocurrencia de sismos de Magnitud “M” para cada mecanismo de falla.....	44
Ecuación 5. Probabilidad que ocurra el sismo crítico de magnitud “M” para cada mecanismo de falla.....	44
Ecuación 6. Función de susceptibilidad	46
Ecuación 7. Probabilidad total de falla por sismos a partir de los tres mecanismos de falla propuestos por Keefer 1984	46
Ecuación 8. Probabilidad total de falla debido a lluvias.....	47
Ecuación 9. Probabilidad de ocurrencia de la lluvia crítica.....	49

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Planta general con zonas piloto y fuentes sismogénicas.	102
Anexo B. Planta específica zona piloto 1	103
Anexo C. Planta específica zona piloto 2	104
Anexo D. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 -Mecanismo 1 Periodo de retorno 13 años.....	105
Anexo E. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 -Mecanismo 2 Periodo de retorno 20 años.....	106
Anexo F. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 -Mecanismo 3 Periodo de retorno 38 años.....	107
Anexo G. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 -Mecanismo 1 Periodo de retorno 13 años.....	108
Anexo H. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 -Mecanismo 2 Periodo de retorno 20 años.....	109
Anexo I. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 -Mecanismo 3 Periodo de retorno 38 años.....	110
Anexo J. Probabilidad Total de falla por Sismos en Zona Piloto 1	111
Anexo K. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 Periodo de retorno 2 años.....	112
Anexo L. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 Periodo de retorno 50 años.....	113
Anexo M. Probabilidad Total de falla por Sismos en Zona Piloto 2	114
Anexo N. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 Periodo de retorno 2 años.....	115
Anexo Ñ. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 Periodo de retorno 50 años.....	116
Anexo O. Probabilidad de falla por lluvias en Zona Piloto 1 Periodo de Retorno 2 años.....	117
Anexo P. Probabilidad de falla por lluvias en Zona Piloto 1 Periodo de Retorno 50 años.....	118
Anexo Q. Probabilidad de falla por lluvias en Zona Piloto 2 Periodo de Retorno 2 años.....	119
Anexo R. Probabilidad de falla por lluvias en Zona Piloto 2 Periodo de Retorno 50 años.....	120
Anexo S. Probabilidad Conjugada de falla en Zona Piloto 1 Periodo de Retorno 2 años.....	121
Anexo T. Probabilidad Conjugada de falla en Zona Piloto 1 Periodo de Retorno 50 años.....	122
Anexo U. Probabilidad Conjugada de falla en Zona Piloto 2 Periodo de Retorno 2 años.....	123
Anexo V. Probabilidad Conjugada de falla en Zona Piloto 2 Periodo de Retorno 50 años.....	124

Anexo W. Secciones críticas definidas zona piloto 1.....	125
Anexo X. Secciones críticas definidas zona piloto 2.....	126
Anexo Y. Modelación de pendientes en tres dimensiones.....	127

GLOSARIO

- ❖ **AMENAZA:** Fenómeno, sustancia, peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de modo accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales¹. La caracterización de la amenaza debe incluir su ubicación, clasificación, magnitud o intensidad, y se evalúa en función de probabilidad de ocurrencia espacial y temporal. La magnitud o intensidad de la amenaza se pueden expresar en términos de volumen, área, velocidad, intensidad o energía².

Probabilidad de ocurrencia de un evento capaz de producir daño en un tiempo dado. Un evento puede darse y no producir daño, y para que sea amenaza, debe producir daño³.

- ❖ **CUALITATIVA:** Define intensidad de amenaza como: alta, media, baja; y consecuencias como: severo, medio y bajo. Finalmente esto se mete en una “matriz de consecuencias⁴”.

¹ESTRATEGIA INTERNACIONAL PARA LA REDUCCIÓN DE DESASTRES DE LAS NACIONES UNIDAS (UNISDR). Terminología sobre la reducción del riesgo de desastres [en línea]. Ginebra, Suiza: Naciones Unidas, 2009. p. 5. Disponible en internet www.preventionweb.net

²SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2016. ISBN: 978-958-99528-5-6.

³ ANEAS DE CASTRO, Susana. Riesgos y peligros: una visión desde la geografía. En: Revista electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Universidad Nacional de San Juan. Marzo de 2000. no 60. Disponible en internet: <http://www.ub.edu/geocrit/sn-60.htm>. ISSN 1138-9788

⁴ SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, Op. cit., Disponible en ISBN: 978-958-99528-5-6.

- ❖ **CUANTITATIVOS:** Determinan la probabilidad de falla y de daño, y con esto tengo un estimativo del riesgo (perdidas económicas o humanas/año)⁵.
- ❖ **ELEMENTOS FINITOS:** El método, esencialmente, divide la masa de suelo en unidades discretas que se llaman elementos finitos, estos elementos se interconectan en sus nodos y en los bordes predefinidos⁶. Así, la formulación de desplazamientos presenta los resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos a los puntos nodales. La condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos fallan simultáneamente, Se asume una malla de elementos con sus respectivos nodos y las propiedades elastoplásticas de los materiales⁷.
- ❖ **EVENTO:** Es el peligro, el cual se da de muchas formas; y al definirlo, se debe decir de qué tipo es. Así, el evento me define el tipo de amenaza. Esto significa que al evaluar amenaza, debemos inclinarnos por un sistema de clasificación⁸.
- ❖ **FACTOR DE SEGURIDAD (F. S.):** El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Entonces, el factor de seguridad es la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla⁹.

⁵ Ibíd., Disponible en ISBN: 978-958-99528-5-6.

⁶ MESA LAVISTA, Milena. Métodos empírico - mecanista empleados para el cálculo del factor de seguridad para la estabilidad de taludes. Monografía [en línea]. México. Universidad Autónoma Nuevo León. Facultad de ingeniería civil, 2013. Disponible en internet: Repositorio Educativo Digital UANL

⁷ JIMÉNEZ TÉLLEZ, Gabriel Alejandro y VIÁFARA MORALES, Jorge Eliécer. Análisis 3D de drenes horizontales para la estabilización de taludes [en línea]. Trabajo de pregrado. Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería, 2011. p. 39. Disponible en internet: <https://cutt.ly/HwQMK5j>

⁸ UNISDR, Op. cit., p. 7-18.

⁹ SUAREZ DÍAZ, Jaime. Deslizamientos: Análisis geotécnico [en línea]. 1era Edición. Bucaramanga, 2008, Capítulo 4, Análisis de estabilidad. p. 130-132. Disponible en internet: www.erosion.com.co

- ❖ **FRECUENCIA (RECURRENCIA):** Medida de la posibilidad de ocurrencia de un evento en un tiempo dado, la frecuencia es directamente la probabilidad; pero en funciones continuas.
- ❖ **HIPOCENTRO:** Foco de un terremoto o un sismo, es el punto interior de la tierra donde se inicia un movimiento sísmico o terremoto¹⁰.
- ❖ **ESTOCÁSTICO:** Se conoce como algo que genera incertidumbre, denomina incertidumbre a la situación de desconocimiento que se tiene acerca de lo que sucederá en el futuro¹¹.
- ❖ **MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE:** Es un método de análisis de estabilidad de taludes que tiene en cuenta la topografía del talud, la estratigrafía, el ángulo de fricción, la cohesión, el peso unitario, niveles freáticos y cargas externas; Se obtiene un número de factor de seguridad. Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. Análisis en dos y tres dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua¹².
- ❖ **MITIGACIÓN DEL RIESGO:** Aplicación selectiva de medidas apropiadas y principios de manejo para reducir la posibilidad de la ocurrencia de un evento o de sus consecuencias desfavorables. Dichas medidas de intervención prospectiva o correctiva están dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se puedan presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada, cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza cuando sea posible y la vulnerabilidad existente¹³.

¹⁰ GOMIS MORENO, Almudena. Localización de terremotos a partir de formas de onda [en línea]. Trabajo de investigación. Madrid. Universidad Complutense de Madrid. Programa Oficial de Postgrado de Física, 2007. Disponible en internet: <https://cutt.ly/cwWhf2X>

¹¹ *Ibíd.*, Disponible en: <https://cutt.ly/cwWhf2X>

¹² MESA LAVISTA, Milena y TEJEDA PIUSSEAUT, Eduardo. Análisis de la estabilidad de taludes en terraplenes mediante los métodos de equilibrio límite y el método de elementos finitos. En: Revista Cubana de Ingeniería. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. Enero-abril de 2018. Vol. IX no. 1. ISSN 2223 - 1781

¹³ VARGAS GARCIA, Juan Sebastián y CORTÉS CORTÉS, Félix David. Planificación de la gestión del riesgo de desastres de acuerdo a la ley 1523 de 2012, en la zona urbana del municipio de Útica Cundinamarca [en línea]. Trabajo de pregrado. Bogotá. Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil, 2013. Disponible en: <https://cutt.ly/EwWkMxv>

- ❖ **MOVIMIENTO EN MASA:** Equivale a definiciones como procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa, deslizamientos o fallas de taludes y laderas. La terminología y clasificación de movimientos en masa para este documento es conforme a la Guía para la evaluación de amenazas por movimientos en masa propuesta por el Proyecto Multinacional Andino (PMA), adoptada por Colombia en el 2007, en la que movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad¹⁴.
- ❖ **PROBABILIDAD:** Es una medida de la certidumbre asociada a un suceso o evento futuro y suele expresarse como un número entre 0 y 1¹⁵.
- ❖ **PROBABILIDAD DE OCURRENCIA:** Medida numérica del grado de certeza de ocurrencia. Va desde 0 como improbable, hasta 1 como 100% probable. Tiene dos connotaciones¹⁶:
 - § **Estadística:** Frecuencia o fracción (número de respuestas positivas en un total).
 - § **Subjetiva:** Grado de certeza o confianza, término con el que trabajan los modelos cualitativos.

¹⁴ GARZÓN, Edison. Propuesta metodológica para la evaluación de la amenaza de corredores viales de montaña de la red vial nacional [en línea]. Universidad la Gran Colombia. Bogotá. En: Actas de Ingeniería. 2016. vol 2. p. 82-90. Disponible en: <https://cutt.ly/cwWTR3K>.

¹⁵ *Ibíd.*, Disponible en <https://cutt.ly/cwWTR3K>.

¹⁶ TRIOLA, Mario. Estadística. Décima Edición. Pearson Educación Addison Wesley. México. 2009. ISBN: 978-970-26-1287-2

- ❖ **PROBABILIDAD ANUAL DE OCURRENCIA:** Probabilidad estimada que un evento de una magnitud específica sea excedida en un año.
- ❖ **REOLOGIA:** Parte de la física que estudia la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad y el derrame de la materia¹⁷.
- ❖ **RIESGO:** Medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la vida, salud, propiedad o el ambiente. Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a eventos físicos peligrosos de origen natural, socio natural, o antrópico no intencional, en un periodo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad. Según la manera como se defina el elemento en riesgo, el riesgo puede medirse según la pérdida económica esperada, según el número de vidas perdidas o según la extensión del daño físico a la propiedad¹⁸.
- ❖ **SISMOS CORTICALES:** Ocurren dentro de la placa Continental en la corteza a profundidades inferiores a los 60km. Se deben principalmente a las deformaciones generadas por la convergencia entre la placa de Nazca y la placa Continental¹⁹.
- ❖ **SUBDUCCIÓN:** Proceso por el que una placa litósfera oceánica se hunde bajo otra placa, ya sea oceánica o continental²⁰.
- ❖ **SUPERFICIE DE FALLA:** El término superficie de falla se utiliza para referirse a una superficie asumida a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento o la rotura del talud; sin embargo, este deslizamiento o rotura no ocurre a lo largo

¹⁷ Ibíd., Disponible en <https://cutt.ly/cwWTR3K>.

¹⁸JIMÉNEZ TÉLLEZ, Gabriel Alejandro y VIÁFARA MORALES., Op. cit., Disponible en <https://cutt.ly/HwQMK5j>

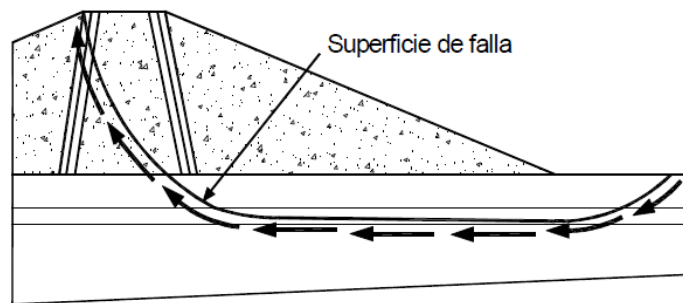
¹⁹ ANEAS DE CASTRO, Susana. Op. cit., Disponible en <http://www.ub.edu/geocrit/sn-60.htm>

²⁰ RODRÍGUEZ, Miroslav. Biología marina y oceanografía: Geomorfología y tectónica de placas [en línea]. Guatemala: Universidad Rafael Landívar. 2005, Capítulo 6, Tectónica de placas. p. 124. Disponible en : <https://cutt.ly/Dwlmx48>

de esas superficies si el talud es diseñado adecuadamente²¹. En los métodos de límite de equilibrio el factor de seguridad se asume que es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla; por lo tanto, este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie. Si la falla ocurre, los esfuerzos de cortante serían iguales en todos los puntos a todo lo largo de la superficie de falla²².

- ❖ **SUSCEPTIBILIDAD:** Mayor o menor posibilidad que un talud se deslice²³.
- ❖ **VULNERABILIDAD:** Grado de pérdida de elementos en riesgo en área de amenaza. Se expresa como probabilidad de daño: 0 (no daño) hasta 1 (pérdida total). En el área afectada, se deben identificar todos los elementos en riesgo; es decir, además de determinar la posibilidad o probabilidad del daño, se debe estimar hasta dónde puede llegar la afectación ²⁴. Imagen 1 ...

Imagen 1. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante



Fuente: U.S. CORPS OF ENGINEERS. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante [Imagen]. 2003. Disponible en internet: <https://cutt.ly/dwWSIRI>

²¹ MESA LAVISTA, Milena *et al.*, Op. cit., Disponible en ISSN 2223 - 1781

²² ESCOBAR POTES, Carlos Enrique y DUQUE ESCOBAR, Gonzalo. Geotecnia para el trópico andino: Análisis de estabilidad de taludes [en línea]. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2017. p.167-233. Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/53560/>

²³ UNISDR, Op. cit., Disponible en www.preventionweb.net

²⁴ ESCOBAR POTES, Carlos Enrique *et al.* Op cit. p. 126.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Muchos son los métodos para analizar amenaza de deslizamientos, en su mayoría se basa en modelos cualitativos, pocos son los modelos que se enfocan en el análisis cuantitativo; y entre estos, muy pocos son los que tienen en cuenta los efectos de los factores detonantes de sismo y lluvia simultáneamente dentro de la susceptibilidad de una zona determinada.

Ante la ausencia de modelos estrictamente cuantitativos, este proyecto de investigación pretende mediante un modelo estocástico, evaluar amenaza, como una etapa inicial y fundamental en la evaluación del riesgo, mediante la implementación de las variables: susceptibilidad, sismo y lluvia, las cuales determinan el comportamiento de un talud.

A partir de lo anterior, se pretende actualizar la base de datos desarrollada por los autores Rodríguez²⁵ y Yepes²⁶, la cual contiene los registros históricos de los eventos sísmicos a nivel mundial, y los registros de precipitación en Centro América hasta el año 2007, y establecer la probabilidad de ocurrencia de falla ante la acción de los detonantes, sismo y lluvia, analizando la incidencia de los parámetros geotécnicos de dos sitios críticos sobre la vía Villavicencio – Pipiral a la altura del Km 80, zona considerada altamente inestable, y que recientemente ha presentado múltiples deslizamientos inducidos por lluvias. Lo anterior nos lleva a evaluar el comportamiento geotécnico del talud, con el fin de brindar a las autoridades competentes, elementos de juicio que permitan tomar decisiones orientadas a la mitigación y reducción del impacto ambiental y socioeconómico, considerando que es una vía de importancia nacional y una región de alta influencia comercial y turística.

Para evaluar probabilísticamente la amenaza, se incluyen en el modelo las variables susceptibilidad, sismo y lluvia disponibles de la zona, para así lograr resolver el problema que impulsa este proyecto de investigación, que es: evaluar

²⁵ RODRÍGUEZ, Carlos. Models For Earthquake and Rain Induced Landslide. Trabajo de postgrado. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2003. Norwegian geotechnical Institute.

²⁶ YEPES HEREDIA, Jairo Edmundo. Implementación de un modelo estocástico para evaluar amenazas de deslizamientos [en línea]. Trabajo de maestría. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, 2009. Disponible en: <https://cutt.ly/QwlmARp>

cuantitativamente la amenaza; calibrar y validar el modelo, utilizando la base de datos existente hasta el año 2007 y actualizándola al año 2019.

JUSTIFICACIÓN

Este proyecto tiene tres connotaciones importantes que justifican su realización:

- a) La ausencia de estudios probabilísticos de amenaza que incluyan factores de sismo y lluvia simultáneamente ya que la mayoría son determinísticos;
- b) El sector de la vía antigua Villavicencio - Bogotá sector Pipiral a la altura del (PR83+510 y PR 86+500), se encuentra ubicado en una zona del continente Americano que presenta bastantes problemas de inestabilidad geológica.
- c) El modelo estocástico para la evaluación de amenaza de deslizamiento por sismo y lluvia no ha sido aún implementado en Colombia, situación que convierte a este proyecto en un aporte significativo, dada la importancia que merece el estudio de la inestabilidad de los suelos en esta región del país; el cual se realizará a partir de información geotécnica existente de los sitios objeto del estudio, considerando que en el modelo implementado en el Salvador por Yepes²⁷, solo se tuvo en cuenta la variable pendiente como parámetro de susceptibilidad por falta de información geotécnica de la zona de estudio, con la cual sí se cuenta para este proyecto, lo que permite validar el modelo y generar resultados que conlleven a una mejor interpretación.

La necesidad radica entonces, en la aplicación de un modelo numérico, que logre determinar de forma más estricta unos niveles de amenaza, para una zona que en realidad necesita este tipo de estudios, evitando así un sin número de desastres, que pueden ocurrir y se traducen en pérdidas tanto humanas como materiales.

²⁷ *Ibíd.*, Disponible en internet <https://cutt.ly/QwlmARp>

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- ❖ Realizar la evaluación de amenaza de deslizamiento por sismo y lluvia en dos sitios críticos de la vía Villavicencio – Pipiral a la altura del (PR83+510 – PR83+860) y (PR 86+500), aplicando el modelo estocástico (Rodríguez, 2003) y (Yepes, 2009).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Realizar una búsqueda de los registros históricos de los eventos ocurridos de sismo a nivel mundial y lluvia en Centro América hasta el año 2019, para actualizar la base de datos (Rodríguez, 2003) y (Yepes, 2007).
- ❖ Obtener información geotécnica de la zona, como parámetros de cohesión y resistencia a partir de información secundaria.
- ❖ Establecer la probabilidad de falla por sismos en función de (fuentes sismogénicas, curvas de densidad de falla, susceptibilidad).
- ❖ Establecer la probabilidad de falla por lluvias en función (curvas IDF, curvas de densidad de falla, susceptibilidad).
- ❖ Determinar la probabilidad conjugada de falla bajo la ocurrencia de los dos eventos simultáneos lluvia y sismo.

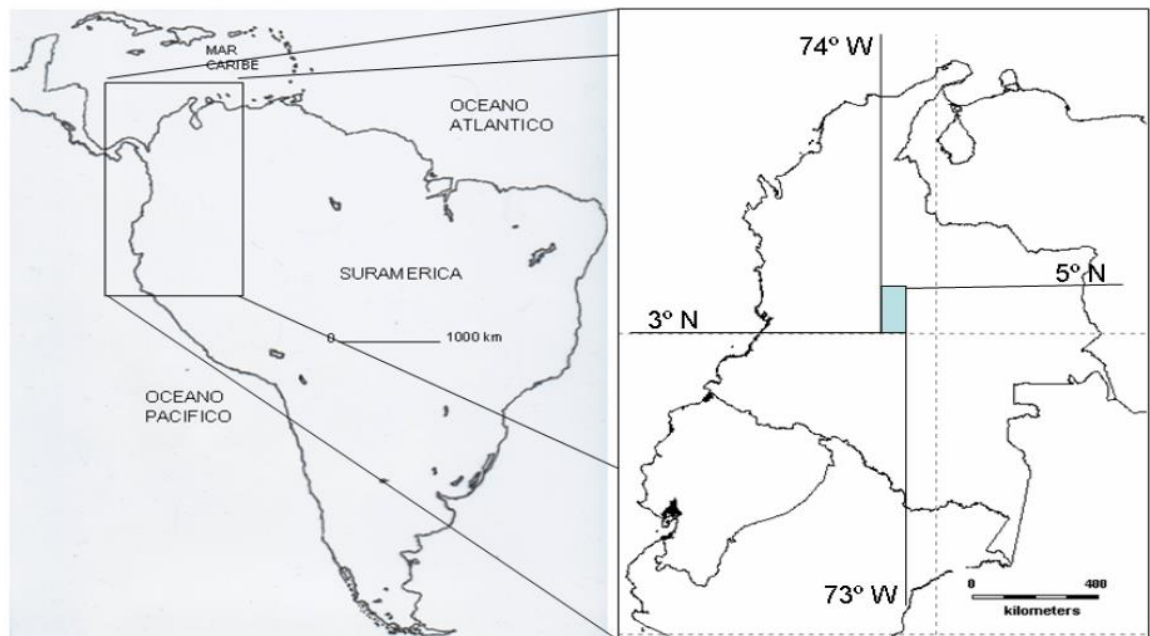
1 MARCO GEOGRÁFICO

Las dos zonas piloto escogidas para el presente proyecto de investigación, se encuentran localizadas en el corredor vial Villavicencio – Pipiral, a la altura del PR83+600 y el PR86+500 en el Departamento del Meta, áreas que por su naturaleza coluvial y sedimentaria, presentan alta actividad sísmica y elevados índices de precipitación, lo que ha ocasionado grandes deslizamientos en sus laderas.

1.1 ASPECTOS GENERALES DE LA ZONA PIPIRAL (ZONA PILOTO 1 Y 2)

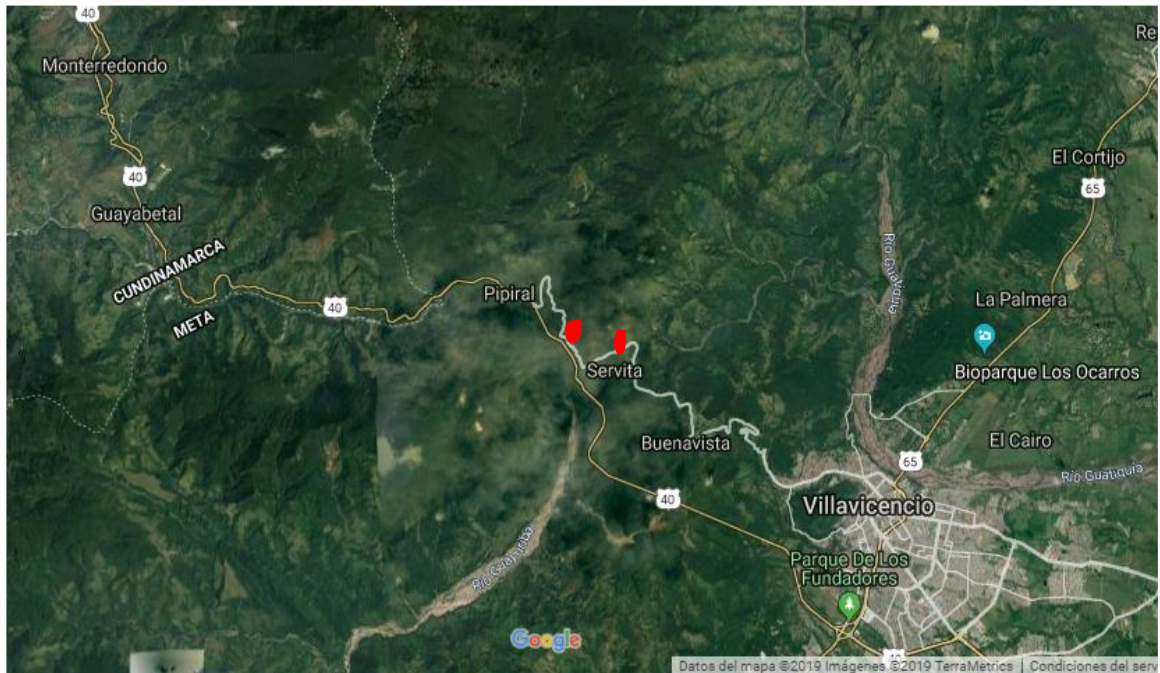
1.1.1 **Localización.** El área de interés está localizada al Noroccidente de la ciudad de Villavicencio a 20 minutos por la carretera antigua salida por el barrio Galán hacia el municipio de Guayabetal- Cundinamarca, entre las veredas Pipiral y Servitá. ...Ver Imagen 2 e Imagen 3 ...

Imagen 2. Localización Continental y Nacional de la zona de estudio



Fuente: CHICANGANA, German, *et al.* Caracterización sismotectónica regional preliminar de un sector del piedemonte llanero colombiano [Imagen]. Boletín de geología: 2007. Vol. 29. No 1. p. 62.

Imagen 3. Localización de las Zonas Piloto sobre el corredor vial Bogotá – Villavicencio



*Nota: Ver en la Imagen 3. Los dos sitios resaltados en rojo, en el trayecto entre Servitá y Pipiral, corresponden a las dos zonas piloto escogidas.

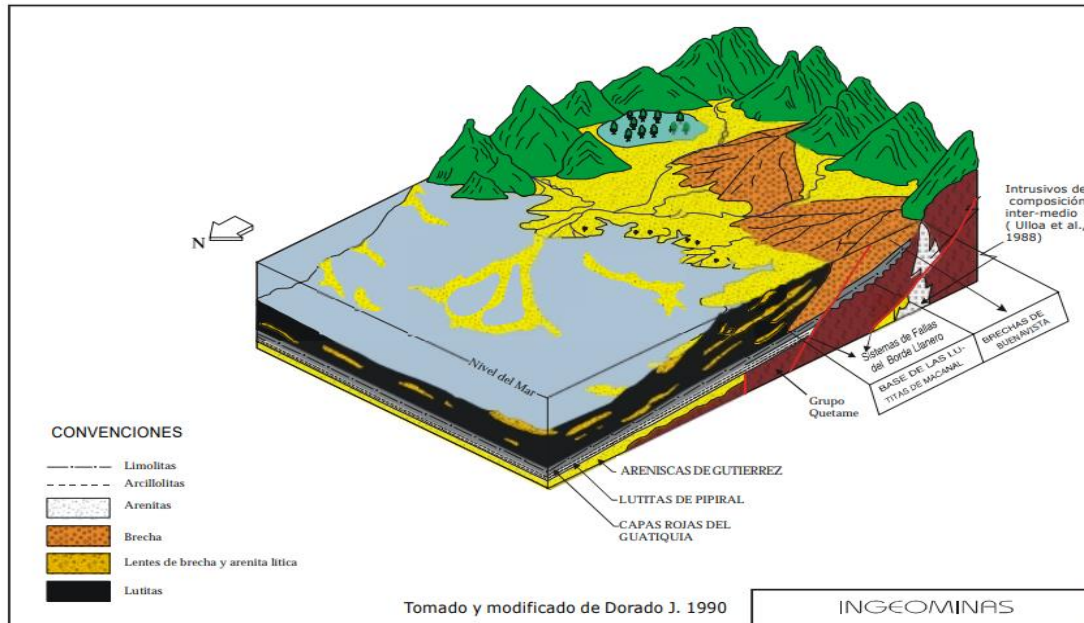
Fuente: Elaboración propia, a partir de Google Earth 2019.

1.1.2 Aspectos geográficos y geomorfológicos. La población cercana de los deslizamientos en estudio, obedece directamente al número de habitantes de los centros poblados de Servitá y Pipiral, donde según lo reportado por el DANE en el último censo realizado en Colombia oficialmente en el año 2005, reporta una población de 105 personas para la vereda Pipiral, y con una tasa poblacional de 2.27, proyecta una población de 144 personas, al año 2019. Sin embargo, es importante considerar un dato aproximado de usuarios de la vía para un análisis futuro de vulnerabilidad y riesgo, asociado al tránsito de personas que usan este corredor vial y al número de viviendas y predios que se encuentran cercanos a los deslizamientos.

Geológica y tectónicamente coincide con una región afectada por el sistema de fallas del borde llanero, con tendencia general NE-SW, constituida por pliegues sinclinales y anticlinales de dirección Norte-Sur a Norte- Noreste.

En mayor proporción, esta geografía presenta una topografía abrupta con alturas variables entre 450 y 3700 metros sobre el nivel del mar (msnm), lo que origina pendientes fuertes mayores de 45 grados, donde la mayoría de las quebradas corren por cañones profundos de laderas escarpadas. Ver Imagen 4 ...

Imagen 4. Sistema de plegamientos zona de estudio



Fuente: CHÁVEZ, Agnes y GONZÁLEZ, Franci. Esquema del ambiente de formación de las brechas de Buenavista [Imagen]. Universidad Católica de Colombia. 2018, p.20.

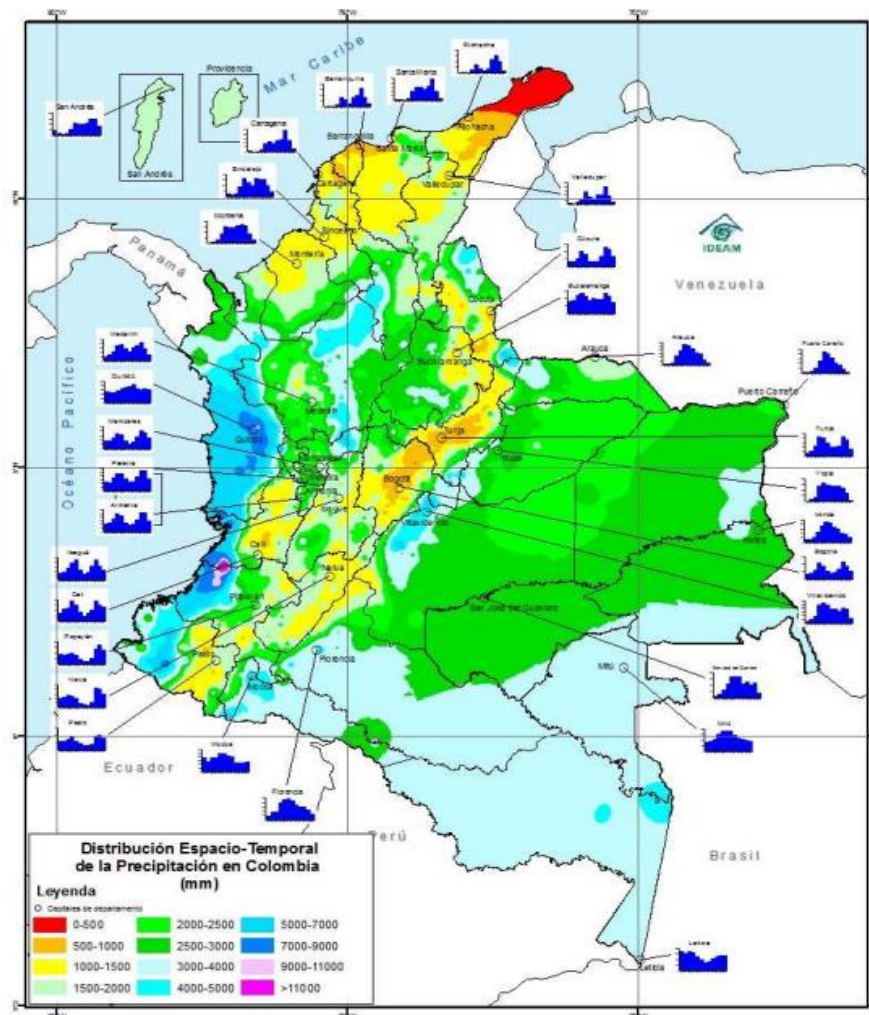
La cota más baja se ubica en la región plana que conforma el Piedemonte Llanero, mientras que las alturas máximas se localizan en la parte Centro Occidental y generan una extensa región de pisos térmicos de páramo y de tierras frías a cálidas.

El alto de Buenavista colindante con la zona de estudio, se encuentra al Noroeste de Villavicencio a 900 msnm, además existe otro rasgo morfológico, como es el cañón del Río Blanco con dirección Este-Oeste y el cañón del Río Negro que bordea en gran parte la carretera Bogotá- Villavicencio.

1.1.3 Régimen Climático. Dentro del bosque húmedo tropical que rodea esta región del país, se encuentran temperaturas promedio anuales que varían entre 24 y 30 grados, los meses más secos del año corresponden al primer

trimestre y último bimestre, los meses restantes son más húmedos y menos calientes, esta situación determina a la vez dos periodos de mayor evapotranspiración. Ver Imagen 5 El análisis de precipitación se realiza con la información suministrada por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, en Colombia), el INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, en Guatemala) y el SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, en el Salvador, con reportes mensuales durante el periodo comprendido entre enero de 2007 y junio del 2019.

Imagen 5. Mapa de rangos de precipitación en Colombia



Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM) [Imagen]. Il Congreso Nacional del Clima: Lluvia promedio anual, 2011. p.2. Disponible en <https://cutt.ly/1wImGvj>

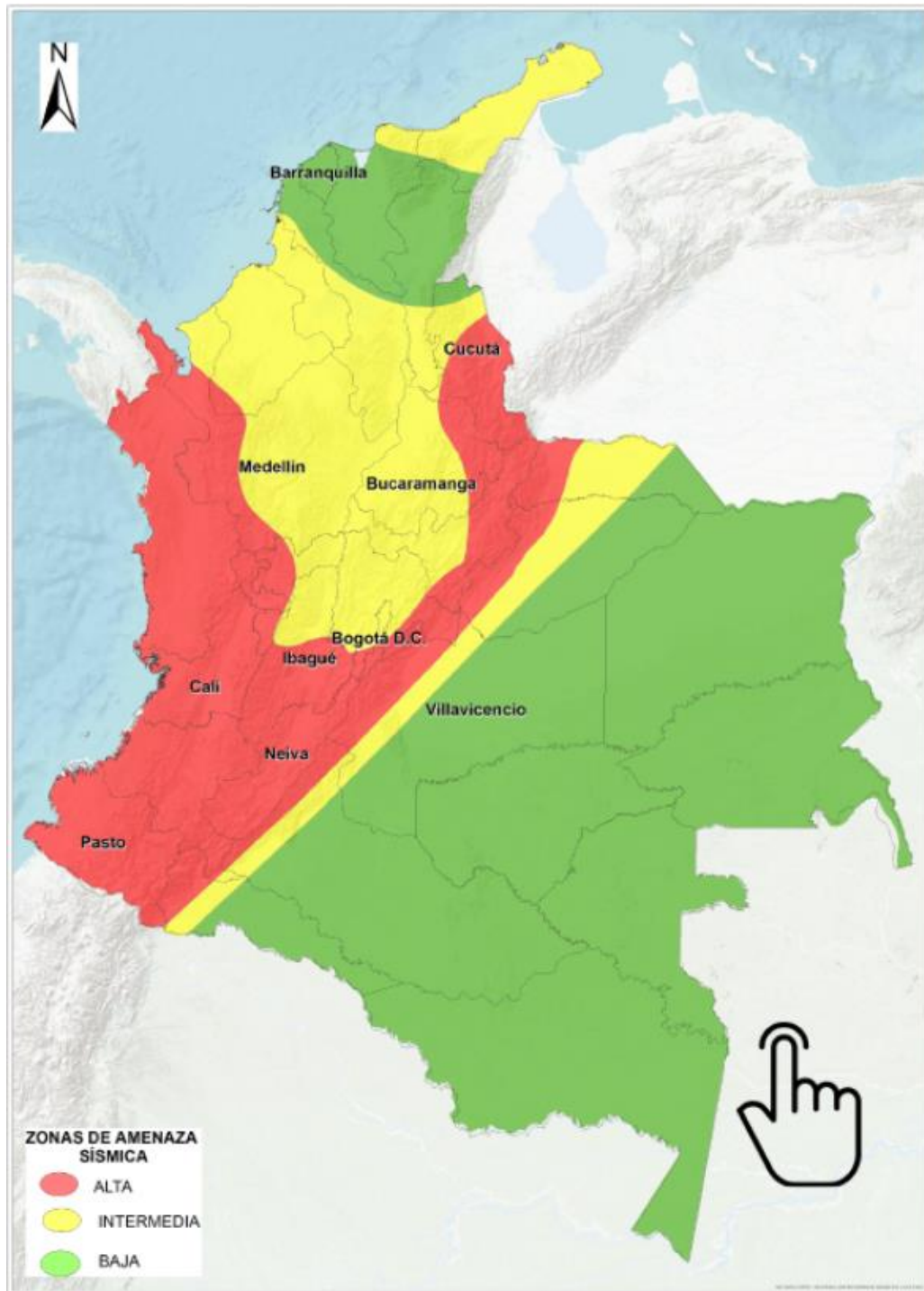
La precipitación en el área de estudio está siendo monitoreada por dos estaciones meteorológicas activas, denominadas Servitá y Acueducto, adscritas al sistema de estaciones del IDEAM.

1.1.4 **Hidrografía.** La principal red hidrográfica del Departamento del Meta la constituye, al Oriente, el río Guatiquía, al centro los ríos Negro, Acacias, Guamal y al Occidente, el Río Grande, toma el nombre del río Ariari. De los mencionados, los cuatro primeros desembocan en el río Meta y el último en el río Guaviare; todos ellos son afluentes del río Orinoco. Algunas quebradas drenan cuencas menores, entre las cuales vale la pena mencionar las siguientes: La Argentina, Susumuco, El Engaño, Las Blancas, El Clarín, Manzanares y Agua Linda.

1.1.5 **Elementos tectónicos.** El Piedemonte Llanero Colombiano está conformado geomorfológicamente por el sistema de fallas de la falla frontal de la cordillera Oriental, según Paris y Romero²⁸ es el límite entre el bloque Andino y la placa Suramericana, por lo que es una zona de alta movilidad tectónica debido al empuje de la placa de Nazca, que subduce bajo Suramérica...Ver Imagen 6... En el área de estudio, el sistema montañoso está rodeado del macizo de Quetame y Farallones de Medina, la región del Borde Llanero y la región de los llanos orientales; teniendo en cuenta la complejidad estructural que existe en esta zona de la cordillera oriental, se mencionarán a continuación elementos tectónicos o fuentes sismogénicas presentes que afectan el macizo de relevancia sísmica alta y de condiciones meteorológicas importantes. Para el caso del presente estudio, las fallas geológicas más cercanas a las zonas piloto 1 y 2, fueron tomadas de la plancha 265 del Geo-portal del Sistema Geológico Colombiano (SGC) y son las relacionadas a continuación: El Mirador, Bavaria, Servitá, La Reforma, Blanca, Pipiral y Buenavista:

²⁸ PARIS, Gabriel y ROMERO, Jaime. Boletín geológico: Fallas activas en Colombia [en línea]. Santafé de Bogotá: INGEOMINAS, 1994. p.6. Disponible en <https://cutt.ly/dwlmLHs.pdf> .ISSN - 0120 - 1425

Imagen 6. Mapa de amenaza sísmica en Colombia



Fuente: Servicio Geológico Colombiano (SGC) [Imagen]. Mapa de amenaza sísmica en Colombia. Bogotá: (AIS, 2010).

1.1.6.1 Falla de Servitá. La más oriental del sistema, es una falla que se extiende por 60 km, inversa, orientada N45°E, con buzamiento al NW, con un componente de rumbo dextral. Sin embargo, en los trabajos de De La Espriella y Cortés²⁹; Esquivel, *et al.*, y en la Plancha 266-Villavicencio de Ingeominas³⁰, la Falla de Servitá se presenta como una falla normal en un tramo de 25 km al NE de la Falla de La Reforma. Según el estudio de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS], INGEOMINAS y Uniandes³¹ muestra actividad reciente por 26 km, con colinas rectilíneas, zonas de cizalla, quiebres de pendiente, silletas, facetas triangulares, repliegues y numerosos deslizamientos; es una falla activa, con una tasa de actividad alta (0,1 a 1 cm/año)³². Esta Falla regional de dirección dominante noreste, ángulo relativamente alto, buzante al este, pone en contacto en su extremo norte, rocas devónicas-pensilvanianas con las unidades del cretácico inferior.

1.1.6.2 Falla Mirador. Es una falla inversa orientada N30° a 40° E con buzamiento de 30° a 70° NW, con un componente de rumbo dextral. Se extiende por 60 km. La zona de falla en la Quebrada Susumuco, Deslizamiento de El Mirador, tiene un ancho de 60 m³³. Según AIS *et al.*³⁴, donde es llamada Falla Guayuriba, tiene rumbo entre N30°E y N45°E, con plano de falla

²⁹ CORTÉS, Ricardo, DE LA ESPRIELLA, Ricardo. Apuntes sobre la Tectónica del Valle del Río Negro al Oriente de Cundinamarca [en línea]. En: Geología Colombiana, 1990 p. 133-142. Disponible en <https://cutt.ly/xwlmVwr>

³⁰ Instituto Nacional de Investigaciones Geológico (INGEOMINAS). Memoria Explicativa Geológica plancha 266 Villavicencio, Villavicencio: 1998.

³¹ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA (AIS) E INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (INGEOMINAS). Estudio general de amenaza sísmica de Colombia. Bogotá: Universidad de los Andes-Ingeominas, 1996.

³² ETA S.A. INGENIEROS CONSULTORES. Realización de los estudios y diseños de los sitios críticos entre el pr82+0410 y el pr93+0500, diseños de obras de drenaje y subdrenajes y estudios de rehabilitación de la estructura del pavimento corredor vial Pipiral Villavicencio estudios y diseños de los sitios críticos entre el pr 82+0410 y el pr 93+0500. 2013.

³³ RUEDA, Karolina; GARCÍA ESPINOSA, Hermes Andrés; TEHERAN, Kandy y TORRENEGRA BARRAZA, Wilfar David. Sistema de fallas Guaicaramo: La falla de Cumaral [en línea]. En: Servicio Geológico Colombiano, 1988. Disponible en: <https://cutt.ly/ZwlmNV0>

³⁴ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA (AIS) E INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (INGEOMINAS)., Op. cit.

buzando entre 30° y 45°NE, muestra actividad reciente en un tramo de 29 km con pequeños lomos de presión dispuestos en forma escalonada y cauces aparentemente truncados por la falla, abombamientos, quiebres de pendiente, sillars, drenajes alineados, cauces escalonados, drenajes desplazados y un escarpe de falla de 60 m sobre el Abanico de Restrepo³².

- 1.1.6.3 Falla La Blanca.** Falla de cabalgamiento, con orientación NNE, presenta vergencia hacia el oeste y transporte tectónico hacia el oriente, tiene un buzamiento de 70°, pone en contacto las rocas de la Formación Guatiquía con la Formación Areniscas de Gutiérrez.³² **Falla La Reforma.** Falla satélite de la Falla de Servitá, presenta una orientación NNE, con vergencia hacia el oriente y transporte tectónico hacia el oeste, tiene un buzamiento alto, pone en contacto las Formaciones Pipiral y Formación Guatiquía; sobre la vía se observa que la zona de Falla puede alcanzar los 380 m va desde el K74+840 hasta el K75+220, la roca se encuentra fracturada, factor que hace que se presenten sitios inestables en este sector.³² **Falla Pipiral.** Falla de cabalgamiento con orientación NS a NW, presenta vergencia hacia el oeste, y transporte tectónico hacia el oriente, tiene un buzamiento inferior a 60°; pone en contacto las rocas de la Formación Arenisca de Gutiérrez, con las Filitas y Cuarcitas de Guayabetal, en superficie se encuentra recubierta por depósitos de ladera.³² **Falla de Buenavista.** Falla con orientación NE, con vergencia hacia el oriente y transporte tectónico hacia el oriente, presenta un buzamiento intermedio, pone en contacto las Formaciones Brechas de Buenavista y Lutitas de Macanal.³²
- 1.1.6.7 Falla de Bavaria.** Es una falla de cabalgamiento, con dirección Noreste, con vergencia al Oeste, y transporte tectónico hacia el este, pone en contacto la Formación Lutitas de Macanal con la Formación Arenisca del Cáqueza, afectando las rocas del Cretáceo.³²

2 ESTADO DEL ARTE

Como ya se había mencionado, la aproximación al problema de evaluar la amenaza cuantitativamente, se ha abordado muy poco y mucho menos teniendo en cuenta los detonantes de lluvia y sismo. A continuación, se verán los estudios más relevantes que se han realizado, los cuales, algunos aplican a la geotecnia e Ingeniería Civil en general, y otros, se enfocan específicamente en la estabilidad de taludes.

2.1 HADJ-HAMOU & KAVAZANJIAN³⁵ (1985). SEISMIC STABILITY OF GENTLE INFINITE SLOPES

Este artículo contiene análisis determinísticos y probabilísticos de la estabilidad de pendientes suaves infinitas, sujetas a presiones de poro elevadas, inducidas por sismo o por fuerzas inerciales, que actúan sobre la masa cuando está sometida a una aceleración.

Desde el punto de vista determinístico, se desarrollan ecuaciones para calcular el factor de seguridad partiendo de una condición geotécnica como es el exceso de presión de poros y la aceleración sísmica.

Los autores consideran que el análisis probabilístico, tiene en cuenta la aceleración sísmica, el exceso de presión de poro y el ángulo de fricción efectivo, como variables aleatorias.

³⁵HADJ-HAMOU, T y KAVAZANJIAN, E. Stability of Gentle Infinite Slopes. En: Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985. Vol 111, no 6. p. 681-697.

2.2 HARR³⁶ (1987). *RELIABILITY BASED DESIGN IN CIVIL ENGINEERING*

El libro contiene métodos para determinar la confiabilidad de un sistema; técnicas de análisis de confiabilidad; e instrucciones para el análisis de la información de estudios probabilísticos.

Se basa en el análisis de la confiabilidad, a partir del teorema de Bayes como una herramienta del análisis estadístico y se estudian técnicas como: la simulación de MonteCarlo, las series de Taylor (primer orden-segundo momento), el método del estimativo puntual bivariado y generalizado, regresiones múltiples, esfuerzos principales y componentes principales.

2.3 MORA & VAHRSON³⁷ (1994). *MACROZONATION METHODOLOGY FOR LANDSLIDE HAZARD DETERMINATION*

Modelo elaborado en Costa Rica, publicado a través de este Boletín de la Asociación de Geología de Ingeniería, los autores plantearon un modelo para clasificar en forma ágil y económica los riesgos de deslizamientos en áreas tropicales sísmicamente activas, de manera que se tiene una guía para la toma de decisiones frente a la necesidad de realizar investigaciones geotécnicas más detalladas, conjugando 5 factores: pendiente, litología y humedad del suelo, lluvia y factores de intensidad sísmica. Convirtiéndose este modelo en una herramienta importante para la zonificación de áreas homogéneas permitiendo identificar las zonas con pendientes potencialmente inestables.

³⁶ HARR, Milton. Reliability Based Design in Civil Engineering. En: McGraw Hill, 1987. p. 290. ISBN: 978-0070266971

³⁷ MORA, S; VAHRSON, W. Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. En: Bulletin of the Association of Engineering Geology, 1994. Vol 31, no 1, p.49-58.

2.4 CHRISTIAN, LADD & BAECHER³⁸ (1994). *RELIABILITY APPLIED TO SLOPE STABILITY ANALYSIS*

El documento relata cómo de los datos de campo y de laboratorio puede derivarse las descripciones probabilísticas de los parámetros del suelo y aplicarse en el análisis de estabilidad. El enfoque de primer orden y de segundo momento, el cual persigue un análisis de la probabilidad de falla con un margen de seguridad en el cálculo de un asentamiento por consolidación, es decir, define qué tan probable es superar un asentamiento admisible para un cimiento, basado en un criterio ingenieril, aplicado al diseño de diques de contención y presas.

2.5 BAECHER & CHRISTIAN³⁹ (2003). *RELIABILITY AND STATISTICS*

En este documento los métodos probabilísticos toman un valor importante en las ciencias de investigación para el campo de la geología y la geotecnia tomando como referencia las propiedades de los suelos, identificando su distribución espacial en el subsuelo.

Estos ilustres demuestran que los conceptos de incertidumbre, probabilidad, confiabilidad, estadística y riesgo, relacionados con la geotecnia y la geología (variabilidad espacial de propiedades de suelos y rocas), conllevan un resultado esencial para comprender el comportamiento dado los fenómenos naturales que afectan el medio natural.

Este documento presenta temas como la variabilidad espacial y las propiedades de los materiales geológicos, relacionando métodos y modelos probabilísticos en la geotecnia, y se convierte en una herramienta básica para el análisis geotécnico.

³⁸ CHRISTIAN, John; LADD, Charles y BAECHER, Gregory. Reliability Applied to Slope Stability Analysis. En: Journal of Geotechnical Engineering, 1994. Vol 120, no 12, p.2180-2207.

³⁹ BAECHER, G y CHRISTIAN, J. Reliability and Statistics. En: Geotechnical Engineering, 2003.

2.6 RODRÍGUEZ, TORRES & LEON⁴⁰ (2004). *LANDSLIDE HAZARD IN EL SALVADOR*

Este estudio determina la amenaza de deslizamiento mediante un modelo estocástico desarrollado por Rodríguez en el 2001 aplicado a los eventos sísmicos destructivos en el Salvador hasta el año 2004, con origen en la placa tectónica y volcánica que afecta esta región.

Se utilizó como factor detonante: los sismos y como factor de susceptibilidad: las lluvias, la pendiente del talud y las características de las rocas; relacionándolos con su incidencia en los deslizamientos. Se implementó un Sistema de Información Geográfica (SIG) que llevó a la verificación de los niveles de amenaza propuestos y su representatividad en El Salvador, con base en la distribución de deslizamientos, que definen amenaza en términos de la interacción entre los detonantes y la susceptibilidad como aquellos propuestos por Mora & Vahrson y Rodríguez *et al.*

2.7 YEPES⁴¹ (2009). *IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ESTOCÁSTICO PARA EVALUAR AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS*

Este estudio utilizó la pendiente del terreno, como único factor de susceptibilidad, dadas las dificultades para obtener información de factores que cubrieran gran parte del área a zonificar, para evaluar la amenaza por deslizamiento en El Salvador a través de un modelo probabilístico (Rodríguez, 2003), el cual estudia la probabilidad de falla como la probabilidad de que se den ciertos valores de susceptibilidad y de los detonantes de sismo y lluvia.

Para este caso el modelo utiliza los tres mecanismos de falla: coherentes, flujos y disgregados; unos niveles de susceptibilidad, una función de probabilidad para sismo en función de su magnitud y distancia; y, una función de probabilidad para

⁴⁰ RODRÍGUEZ, C; TORRES, A y LEON, E. Landslide Hazard in El Salvador. En: Proceedings of ECI conference on Geohazards, 2004, p.1-10.

⁴¹ YEPES HEREDIA, Jairo Edmundo. Op, cit. Disponible en: <https://cutt.ly/QwImARp>

lluvias. Las funciones de probabilidad obtenidas se modelan con una base de datos a partir de un modelo estocástico.

La determinación de la amenaza por deslizamiento para El Salvador, se trabajó, con el modelo propuesto por Rodríguez, aplicándolo a una base de datos confiable con que se cuenta para la zona piloto escogida. A continuación se explican las bases teóricas que definen el modelo y técnicas estadísticas que se utilizaron para estimar la probabilidad de falla por deslizamiento debido a sismo y lluvias; y posteriormente, a la zonificación de la amenaza correspondiente.

Según la definición que se vio del parámetro “amenaza”, en este modelo, cada modo de falla es considerado como el efecto combinado de la susceptibilidad del talud y del mecanismo detonante (sismo, lluvia, intervención).

2.8 HIDALGO & VEGA ⁴² (2014). *ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR SISMO Y LLUVIA*

Se basa en el modelo pseudoestático de Newmark aplicado en el Valle de Aburrá Colombia, emplea un enfoque probabilístico basado en la técnica del primer orden y segundo momento, calculando la probabilidad de que ocurra un deslizamiento a partir de un sismo, teniendo en cuenta la incertidumbre de los parámetros geotécnicos y la saturación del suelo, utilizando una plataforma de SIG, para desarrollar un modelo a partir de factores topográficos, geológicos, geotécnicos e hidrológicos del sector.

2.9 ERING & SIVAKUMAR BABU⁴³ (2016). *PROBABILISTIC BACK ANALYSIS OF RAINFALL INDUCED LANDSLIDE*

Este artículo menciona el acontecimiento ocurrido en una región de la India en el año 2014, donde se produjo un deslizamiento de tierra de grandes magnitudes,

⁴² VEGA; Johnny; HIDALGO, César. Estimación de la amenaza por deslizamientos detonados por sismo y lluvia. En: Revista EIA, 2014. Vol 11, no 22, p. 103-117. DOI: 10.24050/REIA.V11I22.676

⁴³ ERING & SIVAKUMAR. Probabilistic back analysis of rainfall induced landslide- A case study of Malin landslide. India, 2016.

causado por fuertes aguaceros presentados durante 3 días consecutivos, que enterró un pueblo llamado Malin. Dichas causas fueron estudiadas por los autores de este artículo, mediante el análisis de filtración transitoria a partir del método probabilístico del teorema de Bayes y de diferencias finitas para suponer el comportamiento de la pendiente durante la infiltración de las lluvias, y, un análisis de flujo de fluido acoplado para capturar con precisión la interacción fluido/mecánica en suelos no saturados.

Los resultados muestran que la precipitación, la intensidad, la duración y la pendiente; fueron factores detonantes para producir el deslizamiento. Los resultados muestran que la disminución de la succión matricial de aproximadamente el 100%, adicional a las presiones de poro positivas, son las condiciones que han desencadenado el deslizamiento, disminuyendo la resistencia a la cizalladura en el suelo por debajo del valor umbral requerido para mantener el equilibrio en la pendiente.

2.10 SEN CAI ET AL.,⁴⁴ (2017). UNCERTAINTY OF RAINFALL-INDUCED LANDSLIDES CONSIDERING SPATIAL VARIABILITY OF PARAMETERS

En este documento se realiza un análisis de correlación para determinar los impactos de la conductividad hidráulica K_s , la cohesión c' y el ángulo de fricción del suelo ($\tan \phi'$) sobre la incertidumbre de la estabilidad de la pendiente en el tiempo y el espacio durante la precipitación.

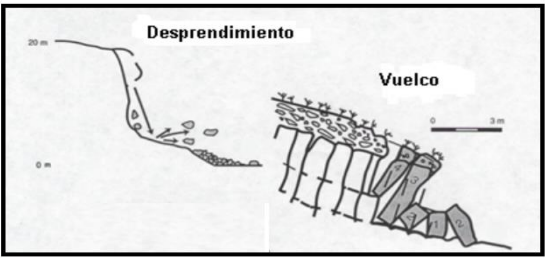
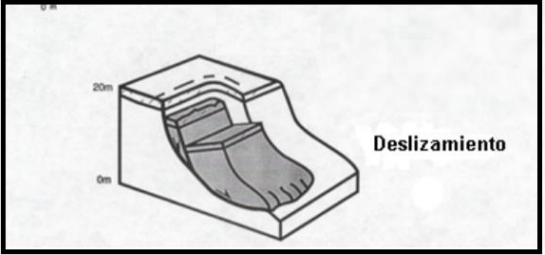
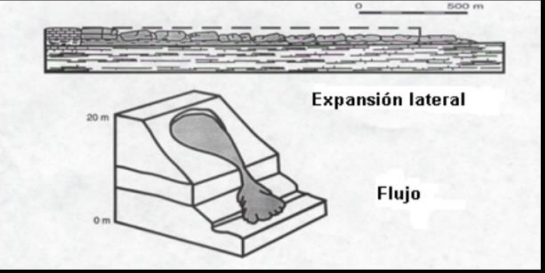
Encontrándose que los parámetros ϕ' y c' dependen de la tensión efectiva, incidiendo en la presión de poros en el suelo, siendo factores relevantes para el análisis de estabilidad de un terreno con pendientes variables.

⁴⁴ SEN CAI, Jing; JIM YEH, Tian; YAN, E; HONG HAO, Yong; YANG HUANG, Shao; CHAU WEN, Jet. Uncertainty of rainfall-induced landslides considering spatial variability of parameters, 2017.

3 METODOLOGÍA

La elaboración del presente estudio tiene como fundamento, los lineamientos de la estructura conceptual utilizada para desarrollar la zonificación de amenaza probabilística en El Salvador (Rodríguez, Yepes, 2009), desarrollada a partir del registro histórico de deslizamientos inducidos por lluvia en América Central (El Salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua), y de los deslizamientos inducidos por sismos en el mundo entero, hasta el año 2007, por los mismos autores, a partir de los tres (3) mecanismos de falla definidos por Keefer en 1984 ...Ver Imagen 7 ..., cuyas bases de datos son actualizadas mediante la inclusión de eventos históricos hasta el año 2019.

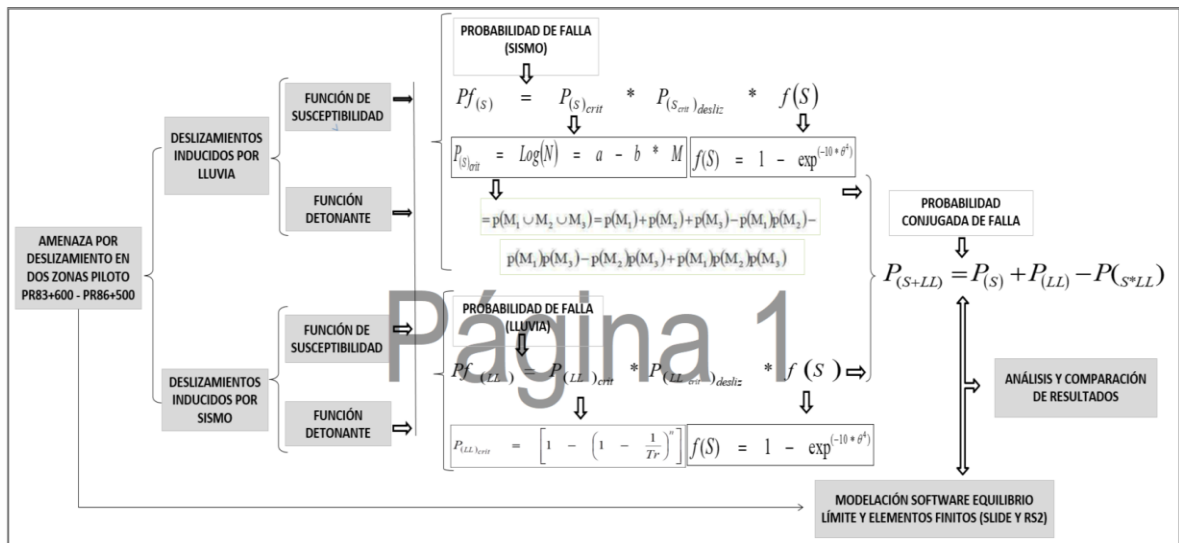
Imagen 7. Mecanismos de Falla

Mecanismos de falla			
M1	Deslizamientos disgregados (caída de rocas -suelo)	Sliding slides (fall of rocks)	
M2	Deslizamientos coherentes (rotacionales)	Coherent slides	
M3	Propagación lateral y flujos (avalanchas)	Lateral propagation and flows	

Fuente: KEEFER. Mecanismos de falla [tabla]. 1984. Adoptado por Mosquera, 2019.

Mediante la Imagen 8 se describe la metodología adoptada para determinar a partir de la implementación del modelo estocástico, la probabilidad de falla al deslizamiento, mediante el efecto combinado de la susceptibilidad del talud definida a partir de la pendiente del terreno y del mecanismo detonante (sismo y lluvia), influenciados por la probabilidad de que ocurra el evento crítico, de que ese evento crítico genere deslizamiento, para finalmente realizar la zonificación de amenaza de cada zona piloto, y la comparación de los resultados obtenidos con una modelación, teniendo en cuenta parámetros geomecánicos de las dos zonas de estudio (PR83+600 –PR86+500); lo que permite concluir la aplicabilidad del modelo estocástico planteado por Rodríguez, Yepes, 2009.

Imagen 8. Esquema general de la Metodología, Mosquera 2019



Fuente: Rodríguez, 2003; Yepes, 2009; Mosquera, 2019.

Atendiendo las recomendaciones sugeridas en la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano - SGC, para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, de acuerdo a la escala detallada de las zonas determinadas para el presente estudio, se adoptó la escala 1:2000 de cada zona piloto y la escala 1:25000 que permite visualizar los dos sitios críticos.

Para dar inicio al desarrollo del proyecto, se realizó la búsqueda bibliográfica de los estudios y documentos existentes que han sido desarrollados y que contribuyen en ampliar las bases para desarrollar un trabajo que cuenta con un debido soporte y apalancamiento teórico.

A partir de la revisión de estos documentos y de la información secundaria suministrada por entidades oficiales tales como: el INVIAS Territorial Meta, el SGC - Servicio Geológico Colombiano, el IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, en Colombia, el INSIVUMEH - Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, en Guatemala, el SNET - Servicio Nacional de Estudios Territoriales, en el Salvador, el ISC - International Seismological Centre en Inglaterra, el USGS - U.S. Geological Survey, el IRPI - Istituto Di Ricerca Per La Protezione Idrogeológica en Italia (Instituto de investigación para la protección hidrogeológica) y el IGP – Instituto Geofísico del Perú, entre otras; se surte el primer paso, que consiste en la depuración de la información recopilada, con base en la cual, se realiza la correspondiente actualización de las bases de datos mencionadas.

Con la topografía existente de cada una de las Zonas Piloto-ZP objeto del presente estudio, (ZP1 - PR83+510 y ZP2 - PR86+500), información suministrada por el INVIAS Territorial Meta, se genera el modelo de elevación digital – DEM, y se realiza la subdivisión en grillas con celdas de tamaño (2.0*2.0)m, con la utilización del ARCGIS(Software), asignando valores de peso (pendiente) a cada unidad de terreno, lo que permite realizar la zonificación, fijando el dato obtenido de la probabilidad total de falla para cada una de las celdas en las zonas de estudio, calculadas como se describe a continuación.

3.1 DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD CONJUGADA DE FALLA

La probabilidad total de falla se define mediante la siguiente formulación probabilística:

Ecuación 1. Probabilidad Conjugada de falla

$$PT(f) = P(S) + P(LL) - (P(S) * P(LL)) \quad \text{Donde:}$$

Los detonantes sismo (S) y lluvias (LL) son variables independientes y no mutuamente excluyentes, es decir, que la ocurrencia de una no depende de la otra.

$P(S)$ = Probabilidad total de falla por sismos

$P(LL)$ = Probabilidad total de falla por lluvias

$(P(S) * P(LL))$ = Probabilidad que uno de los dos eventos genere el deslizamiento

Fuente: Metodología Rodríguez, Yepes, 2009, adoptada por Mosquera 2019

3.1.1 Determinación de la probabilidad total de falla por sismos, para un mecanismo en particular. Basados en la información de la base de datos actualizada de deslizamientos inducidos por sismos al año 2019, en los parámetros sísmicos de las siete (7) fuentes sismogénicas localizadas en el área de cobertura de los dos sitios críticos y en la función de susceptibilidad definida a partir del ángulo de la pendiente en cada celda de las dos zonas piloto, se procede a determinar el cálculo de la probabilidad total de falla por sismos para cada uno de los tres mecanismos, a partir de la

Ecuación 2. Probabilidad total de falla por sismos para cada mecanismo:

Ecuación 2. Probabilidad total de falla por sismos para cada mecanismo

$$Pf_{(S)} = P_{(S)crit} * P_{(S_{crit})desliz} * f(S)$$

Donde:

$P_{(S)crit}$ = probabilidad de ocurrencia del sismo crítico en la celda dada.

$P_{(S_{crit})desliz}$ = probabilidad de que el sismo crítico genere deslizamiento, en la celda de estudio.

$f(S)$ = función de susceptibilidad a partir de la pendiente de cada celda.

Fuente: Metodología Rodríguez, 2003 - Yepes, 2009; adoptada por Mosquera 2019.

3.1.1.1 Probabilidad de ocurrencia del sismo crítico. Basados en el estudio de amenaza sísmica de Colombia - 2019, realizado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), se obtiene la información requerida para cada una de las fuentes sismogénicas localizadas cerca de las zonas piloto definidas para este proyecto, como son: Falla Servitá, Falla Bavaria, Falla Pipiral, Falla El Mirador, Falla La Reforma, Falla la Blanca y Falla Buenavista ⁴⁵, y se procede a calcular la probabilidad de ocurrencia del sismo crítico

⁴⁵ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Plancha 266 Villavicencio. Plano Geología Regional Sitios Críticos PR 82+410 a PR 93+500. En: Estudios y Diseños INVIAS, 2013.

siguiendo la función de recurrencia de la relación de Gutenberg - Richter⁴⁶ y la probabilidad anual de ocurrencia de un sismo de magnitud “M” en un periodo de tiempo “L”, basados en la distribución de frecuencias de Simeon Denis Poisson (1781-1840)...Ver Ecuación 3.

Para calcular la probabilidad de ocurrencia de un sismo crítico, se debe tener en cuenta que cada fuente sismogénica tiene: una magnitud de sismo mínimo (tomada de la base de datos), y una magnitud de sismo máxima esperada “M”, y que para este proyecto se consideraron intervalos de magnitud de sismo “Ms” de 0,5.

❖ Función de recurrencia:

Ecuación 3. Probabilidad de Ocurrencia de sismos de Magnitud M

$$P_{(S)crit} = \text{Log}(N) = a - b * M$$

Donde: a, b: son coeficiente sísmicos determinados en función de cada una de las fuentes sismogénicas, definidos en la Tabla 1

Fuente: GUTENBERG, B; RICHTER, C. Probabilidad de Ocurrencia de sismos de Magnitud M [ecuación]. Princeton University Press, 1954.

Tabla 1. Coeficientes Sísmicos de las fuentes sismogénicas

a	Ordenada en el origen, a partir de la cual se puede estimar la tasa anual de terremotos que superan una magnitud o intensidad de referencia.
b	Pendiente de la relación, representa la proporción entre el número de sismos grandes y pequeños en la zona.
M	Magnitud crítica o máxima magnitud que puede generarse en una fuente

Fuente: GUTENBERG, B; RICHTER, C. Coeficientes Sísmicos de las fuentes sismogénicas. Princeton University Press, 1954.

⁴⁶ GUTENBERG, B; RICHTER, C. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. Princeton University Press, 1954.

De esta manera, para cada fuente sismogénica, a partir de los coeficientes sísmicos “a y b” definidos: se tienen unos valores de tasas de ocurrencia “N” para cada intervalo de “M”, los cuales permiten calcular el periodo de retorno “Tr”. Ver Ecuación 4.

Ecuación 4. Tasa de ocurrencia de sismos de Magnitud “M” para cada mecanismo de falla

$$N = \frac{1}{Tr}$$

Fuente: BAECHEER, G y CHRISTIAN, J. Reliability and Statistics. En: Geotechnical Engineering, 2003.

Finalmente, la ecuación que determina la probabilidad anual de ocurrencia de un sismo de magnitud “M”, en un periodo de tiempo “L”, a partir de la distribución de frecuencias de Poisson, es:

Ecuación 5. Probabilidad que ocurra el sismo crítico de magnitud “M” para cada mecanismo de falla

$$P_{(s)crit} = 1 - e^{\left(\frac{-L}{Tr}\right)}$$

Fuente: TRIOLA, MARIO F. Probabilidad de Ocurrencia de sismos de Magnitud M [ecuación]. Estadística, Décima edición, Pearson Educación, México 2009.

Donde:

Tr = Periodo de retorno en años, adoptado caso de estudio 2 y 50 años.

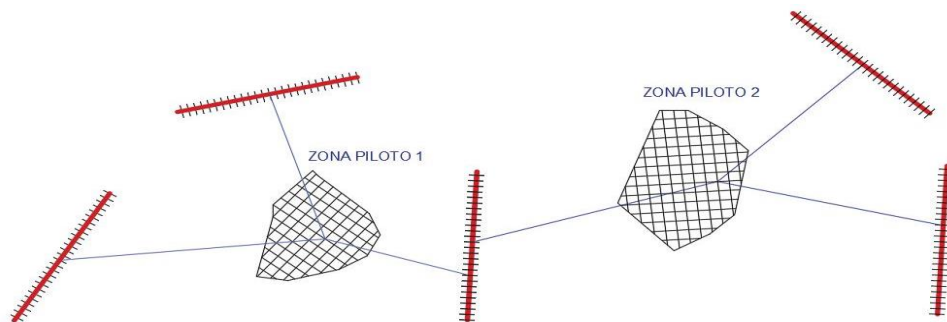
L= Periodo de diseño o vida útil de la predicción en años, 50 años.

3.1.1.2 Probabilidad que el sismo crítico genere deslizamientos. A partir de la base de datos histórica y mundial de deslizamientos inducidos por sismos, Rodríguez, Yepes, 2009, actualizada mediante datos oficiales registrados por las Agencias Científicas, USTA (Universidad Santo Tomás), ISC (International Seismological Centre, Inglaterra), USGS (U.S. Geological Survey), IRPI (Italia) Istituto Di Ricerca Per La Protezione Idrogeológica; y basados en las curvas de densidad de deslizamientos determinadas para el proyecto, se establece la probabilidad de que el sismo crítico genere deslizamiento, tomando como base las propuestas de Keefer para el

umbral de 0%, y la propuesta de Ishihara y Nakamura y Mora-Mora⁴⁷ para densidades de deslizamientos del 15% y 60%; a partir de las cuales se trazan curvas en % distribuidos de tal manera que se pueda describir mejor una probabilidad de ocurrencia, donde un sismo que ocurre a una distancia epicentral específica con una magnitud de sismo particular, tiene una probabilidad de ocurrencia de un único valor(%).

Apoyados en un sistema de información geográfico “SIG”, y tal como se plantea en el esquema relacionado en la Imagen 17, se establece la distancia al punto medio o centroide de cada una de las celdas de la grilla definida a las fuentes sismogénicas en las dos zonas piloto, de tal manera que la probabilidad de ocurrencia de un sismo, a una distancia epicentral que pueda generar deslizamientos, se define en función de distancias epicentrales y magnitudes de sismo de cada fuente sismogénica.

Imagen 9. Esquema de cálculo de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en una celda en la zona piloto, en función de distancias epicentrales y magnitudes de sismo para las fuentes sismogénicas que influyen sobre la zona



Fuente: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

3.1.1.3 Cálculo de la función de susceptibilidad. En cada celda de las dos zonas piloto, se determina el valor del ángulo de la pendiente “ θ ”, mediante el cual se realiza el cálculo correspondiente y se establece el valor de la susceptibilidad a cada celda de las dos zonas piloto en unidad de radianes.

⁴⁷ YEPES HEREDIA, Jairo Edmundo. Op, cit. Disponible en: <https://cutt.ly/QwImARp>

Ecuación 6. Función de susceptibilidad

$$f(S) = 1 - \exp^{(-10 * \theta^4)}$$

Fuente: Metodología Rodríguez, Yepes, 2009, adoptada por Mosquera 2019

La probabilidad total de falla por sismos para cada mecanismo de falla, se establece mediante el producto de los 3 valores obtenidos, es decir, la probabilidad de ocurrencia del sismo crítico, la función de susceptibilidad y la probabilidad que ese sismo crítico genere deslizamientos; para un mecanismo en particular, para cada celda en las dos zonas piloto.

Finalmente, la asociación de los tres mecanismos de falla, mediante el diagrama de conjuntos de Venn, determina una sola probabilidad total de falla por sismos mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

Ecuación 7. Probabilidad total de falla por sismos a partir de los tres mecanismos de falla propuestos por Keefer 1984

$$p(F) = p(M_1 \cup M_2 \cup M_3) = p(M_1) + p(M_2) + p(M_3) - p(M_1)p(M_2) - p(M_1)p(M_3) - p(M_2)p(M_3) + p(M_1)p(M_2)p(M_3)$$

Fuente: Diagrama de Venn. Probabilidad total de falla por sismos para los tres mecanismos de falla propuestos por Keefer 1984 [ecuación]. 1880. Adoptado por Mosquera, 2019.

Donde:

M1: deslizamientos disgregados

M2: deslizamientos coherentes

M3: propagación lateral y flujos

Se adopta esta ecuación para cada celda en las dos zonas de estudio PR 83+510 y PR 86+500, y se procede a realizar la correspondiente zonificación.

De esta manera se completa la primera parte de la La probabilidad total de falla se define mediante la siguiente formulación probabilística:

Ecuación 1. Probabilidad Conjugada de falla, que corresponde a la probabilidad total de falla por sismos para cada celda en los dos sitios de estudio, relacionada a continuación: $PT(f) = P(S) + P(LL) - (P(S) * P(LL))$.

3.1.2 Determinación de la probabilidad total de falla debido a lluvias.

Ecuación 8. Probabilidad total de falla debido a lluvias.

$$Pf_{(LL)} = P_{(LL)crit} * P_{(LLcrit)desliz} * f(S)$$

Fuente: Metodología Rodríguez, Yepes, 2009, adoptada por Mosquera 2019

$P_{(LL)crit}$: es la probabilidad que ocurra la lluvia crítica, en la celda dada

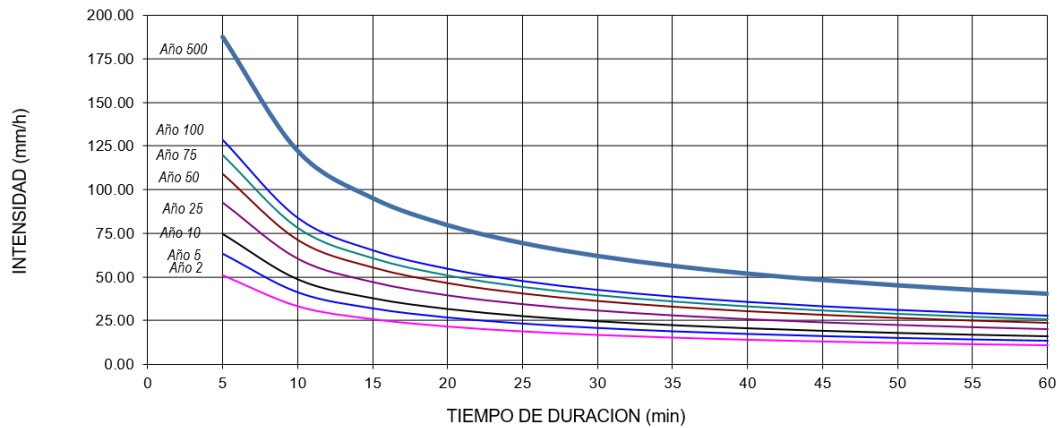
$P_{(LLcrit)desliz}$: es la probabilidad que, la lluvia crítico genere deslizamientos en la celda de estudio

$f(S)$: es el valor de susceptibilidad de la celda de estudio

3.1.2.1 Probabilidad que ocurra la lluvia crítica. Para establecer la probabilidad que ocurra la lluvia crítica, se toman como base las curvas IDF (Intensidad, Duración – Frecuencia) de cada estación pluviométrica, que para el caso del presente estudio corresponde a la estación la Esmeralda y la estación Servitá, cercanas a las zonas piloto.

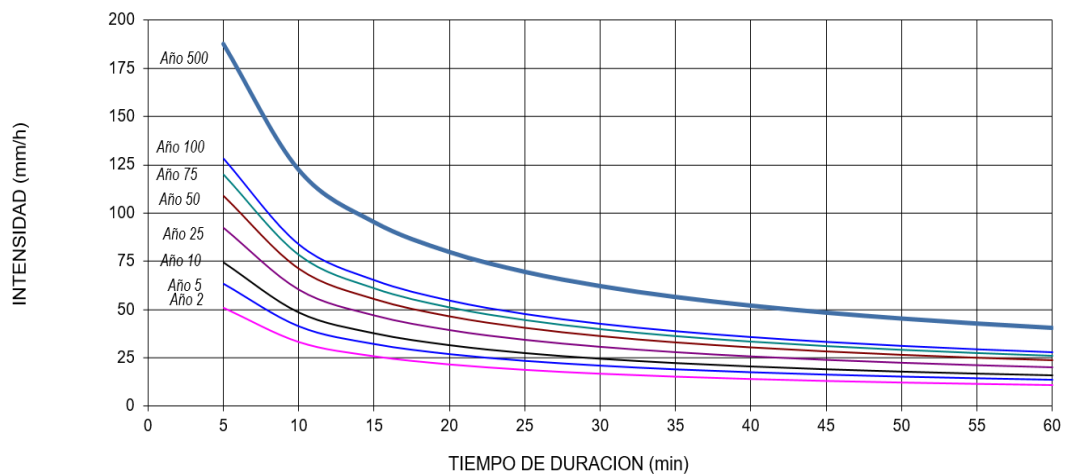
Estas curvas tienen información de un periodo de tiempo que otorga confiabilidad, correspondiente a 500 años. Tal como se relaciona en las imágenes relacionadas a continuación:

Imagen 10. Curva I-D-F - Estación Esmeralda Registros de valores máximos mensuales de precipitación (mm) en 24 horas



Fuente: IDEAM. Mapas de precipitación promedio en Colombia: Estación esmeralda. Registros de valores máximos mensuales [Imagen]. 2018. Disponible en <https://cutt.ly/JwIQroD>

Imagen 11. Curva I-D-F - Estación Servitá. Registros de valores máximos mensuales de precipitación (mm) en 24 horas”



Fuente: IDEAM. Mapas de precipitación promedio en Colombia: Estación esmeralda. Registros de valores máximos mensuales [Imagen]. 2018. Disponible en <https://cutt.ly/JwIQroD>

Se procede, a partir del periodo de retorno adoptado según criterio propio para 2 y 50 años, a realizar el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de la lluvia crítica mediante la formulación relacionada a continuación:

Ecuación 9. Probabilidad de ocurrencia de la lluvia crítica

$$P_{(LL)crit} = \left[1 - \left(1 - \frac{1}{Tr} \right)^n \right]$$

Fuente: JOHN T. CHRISTIAN AND GREGORY B. BAECHEER, Probabilidad de ocurrencia de la lluvia crítica [Ecuación]. 2003. Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering.

Donde “Tr” es el periodo de retorno o de ocurrencia de la lluvia crítica y “n” es el periodo de diseño o periodo de vida útil de la predicción. Para el caso de estudio se adoptó un periodo de diseño n= 50 años y periodos de retorno para las zonificaciones de 2 y 50 años, años. De la Ecuación 9. Probabilidad de ocurrencia de la lluvia crítica se tiene entonces un valor de probabilidad de ocurrencia de lluvias, para cada periodo de retorno dado.

3.1.2.2 Probabilidad que la lluvia crítica genere deslizamientos. A partir de la actualización de la base de datos (Rodríguez 2003, Yepes 2009 y Mosquera 2019), histórica de deslizamientos inducidos por lluvias en Colombia y Centro América (El Salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua) donde hay suelos volcánicos, se definieron densidades de deslizamientos, fundamentados en lo propuesto por el autor Brasileño “Kanji”, densidades entre 0% y 100%.

Entonces, la probabilidad que esa lluvia crítica genere deslizamientos, se determina a partir del cruce de las curvas “I-D-F” que generan umbrales, con las curvas de densidad de deslizamientos de acuerdo a los términos de Intensidad – Duración definidas con la base de datos.

Estas curvas entregan valores de periodo de retorno “Tr” para una lluvia con una intensidad y una duración específicas. Por lo tanto, de acuerdo al planteamiento de Rodríguez, Yepes, 2009, ésta es entonces, la herramienta que permite usar una lluvia que logró deslizamientos para calcular su periodo de retorno, por lo tanto la lluvia más crítica que generó deslizamientos, tiene un valor de periodo de retorno que permite calcular la probabilidad de ocurrencia de la lluvia crítica para cada estación.

3.1.2.3 Función de susceptibilidad. De la misma manera como se determina el valor de la función de susceptibilidad para sismos se realiza el cálculo para lluvias, y se adopta como parámetro el ángulo de la pendiente del terreno,

para cada una de las celdas de la grilla generada para el análisis en cada zona piloto; mediante la Ecuación 6. Función de susceptibilidad.

En consecuencia, y tal como se definió en la Ecuación 8. Probabilidad total de falla debido a lluvias. Para cada celda de terreno, será el producto de los tres cálculos anteriores, es decir, la probabilidad de ocurrencia de la lluvia crítica por la probabilidad que esa lluvia crítica genere deslizamiento, por la función de susceptibilidad.

De esta manera, se obtiene el complemento para definir la probabilidad conjugada de falla, dando alcance al desarrollo de La probabilidad total de falla se define mediante la siguiente formulación probabilística:

Ecuación 1. Probabilidad Conjugada de falla, anteriormente mencionada y citada a continuación:

$$PT(f) = P(S) + P(LL) - (P(S) * P(LL))$$

3.2 CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD CONJUGADA DE FALLA

Una vez desarrollados cada uno de los insumos para calcular la probabilidad conjugada de falla, se resuelve la Ecuación 1. Probabilidad Conjugada de falla:

$P_{(S+LL)} = P_{(S)} + P_{(LL)} - P_{(S*LL)}$; reemplazando los valores totales obtenidos como ya se mencionó, en los numerales 3.1.1 y 3.1.2 del presente documento, la cual parte de la premisa de la ocurrencia de los dos eventos que siendo independientes y no mutuamente excluyentes, uno solo es el detonante del deslizamiento.

4 RESULTADOS

4.1 ACTUALIZACIÓN DE BASE DE DATOS

Luego de contar con una base de datos de deslizamientos inducidos por sismos desde 1767A.C. hasta 2007 D.C, dando cumplimiento al primero de los objetivos específicos del presente estudio, se realiza la búsqueda de los registros históricos de los eventos ocurridos de deslizamientos inducidos por sismos a nivel mundial, para actualizar los registros hasta el año 2019.

Durante el segundo semestre del año 2018, se consolidó toda la información para la actualización de la base de datos, a partir de información suministrada por entidades que brindan un nivel de confianza y certeza, como son: USGS (U.S. Geological Survey), ISC (International Seismological Centre, Inglaterra), y el IGP – Instituto Geofísico del Perú, entre otras fuentes de menor confiabilidad, pero que no obstante, fueron corroboradas con una búsqueda exhaustiva de correlacionar la información suministrada por las fuentes oficiales ya mencionadas.

De ésta ardua labor, se logró determinar que muchos eran los eventos sísmicos registrados pero la tarea crítica estaba en establecer cuáles de estos habían generado deslizamientos, de lo que se logra establecer luego de un proceso de depuración de datos, que los eventos sísmicos y deslizamientos que detonaron el deslizamiento fueron 229 en todo el mundo, durante el periodo comprendido entre el año 1999 y el año 2019, basados en información de fuentes netamente técnicas.

Las siguientes tablas muestran las bases de datos desde 1767 A.C. hasta 2019.

Tabla 2. Deslizamientos inducidos por sismos 1767 A.C. – 1999 D.C

II	DATE	TIME	II/S	E/W	h	COUINTRY	CHARACT.	Ms	mb	Mw	MI	SOURCE	MECHAIL.	GEOLOGY
CHRONOLOGICAL EARTHQ. ORDER NUMBER	YEAR-MONTH-DAY (according to main earthq.GMT)	HH-MIN-SEC (according to main earthq.GMT)	H(+)/S(-)	E(+)/W(-)	FOCUS DEPTH (Km)	EPICENTER LOCATION	EARTHQ. CHARACTERISTICS	SURFACE WAVE MAGNITUDE	BODY WAVE MAGNITUDE	MOMENT MAGNITUDE	LOCAL MAGNITUDE	REFERENCE OF MOST RELIABLE DATA FOR SEISMIC PARAMETERS	SLOPE FAILURE MECHANISMS REPORTED FOR EACH EARTHQ.	MATERIAL LITHOLOGY, GEOLOGICAL STRUCTURES, WEATHERING DEGREE
1	1767BC					CHI						D	rf	
2	780BC		34,50	107,80		CHI		6,50				LVWJ	ls	
3	759BC-10-07		33,00	35,50		ISR				7,30		SED, JIS	ls	
4	646BC-07					CHI						D	rf	
5	586BC					CHI						D	rf	
6	550BC		37,00	22,50		GRE						JIS	ls	
7	464BC		36,90	22,50	n	GRE		7,20		7,00		JIS	oc, rf	
1260	1995-01-19	15:05:06	5,09	-72,94	37	COL		6,70	6,20	6,50	6,50	ISC, HRVD	s, rf, ef, sl(tras)	col, sed(san), met(q)
1261	1995-05-13	8:47:13	40,17	21,69	13,9	GRE	N	6,60	6,00	6,60		ISC, HRVD	ls, rf, lsp, liq	
1262	1995-06-15		38,26	22,15		GRE			6,10			Letal	gc, liq, sls, lsp	aa, gra(fine)), all(cl, :)
1263	1995-05-29	10:06:41	-42,96	171,63	9,5	N. ZEA		4,80	4,60	5,50		ISC, HRVD	rf, sl, ds	ay, san, slit)(fol, fra)
1264	1995-10-09	15:35:54	19,06	104,21	n	MEX	c, T, mult	7,40	6,50	8,00		ISC, HRVD	ls, rf, lsp, sf	res, co
1265	1997-02-04	10:37:51	37,74	57,29	35	IRN	mult	7,40	6,50	8,00		ISC, HRVD	ls, liq	all
1266	997-09-26/10-1	0:33:12	43,06	12,87	10	ITA	mult	5,60	5,50	5,70		ISC, HRVD	gc, ls, rf, sl, ef	sed(lim(fra), marl)
1267	1998-04-12	10:55:00		46,32	13,66	SLOV		5,80				GR&V	rf, rls	sed(lim, dol)
1268	1998-05-22	4:48:50	-17,86	-65,54	24	BOL	mult	6,60	5,90	6,60		ISC, HRVD	ls	
1269	1998-06-27	13:55:53	36,84	35,32	46,6	TRK	mult	6,10	5,50	6,30		ISC, HRVD	lsp, ls, liq, rf	all
1270	1998-06-04	[13:59]				ECU	mult	7,10	6,20			F&Y	ls	vol, res
1271	1999-01-25	18:19:00	4,41	-75,72	<15	COL	mult	5,60	5,90	6,20		ING	sl, gc, sf	vol, res, all
1272	1999-03-26		30,41	79,42	21	IND		6,80	6,80				ls(r), gc, rf, lsp	
1273	1999-06-15	20:42:06	18,41	-97,34	80	MEX	sub	6,50	6,30	6,90		NEIC	ls, rf, rs, gc, lsp	res, all
1274	1999-08-17	0:01:00	40,70	29,98		TRK		7,40					sls, lsp, liq, rf, rs	all, lac, fill
1275	1999-09-20	14:47:00	23,85	120,78		CHI	mult				7,30		ls, lsp, liq	
1276	1999-11-12	16:57:00	40,79	31,11		TRK		7,20					lsp, ls	all, vol(gra(wea))

Fuente: RODRÍGUEZ, CARLOS. Deslizamientos inducidos por sismos 1767 A.C. – 1999 D.C [Tabla]. 2003.

Tabla 3. Deslizamientos inducidos por sismos 2000 – 2007

SISMOS QUE INDUJERON DESLIZAMIENTOS Y SUS CARACTERÍSTICAS GENERALES							CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS DEL EVENTO QUE INDUJO DESLIZAMIENTOS							
NUMERO	FECHA	HORA- EVENTO	N/S	E/W	PROFUNDIDAD (h) - (Km)	PAIS O REGION DE EPICENTRO	MAGNITUDES SÍSMICAS							
							Ms	mb	Mw	MI	Me	Es	Mo	
1277	2000-02-07	19:34:57	-26,29	30,89	37,1	S.A. (SOUTH AFRICA)	3,1 (EDC, 1 sola estacion)	4,2						
1278	2000-05-17	3:25:49	24,22	121,06	0,9	TAI (TAWAN)	5,4	5,2	5,4 (HRV)					
1379	2007-07-16	01:13:22 a.m.	37,54	138,45	12 G - USGS	JAP (NEAR THE WEST COAST OF HONSHU JAPAN)	6,4 (GS) - USGS	6,5 (GS) - USGS	6,6 (GCMT), 6,5 (GS)		6,4 (GS)	9,3*10**13 Nm (GS)	6,3*10**18 Nm (GS), 1,0*10**19 Nm (GCMT), 2,3*10**19 Nm (PPT)	
1380	2007-07-21	10:44:13 p.m.	38,94	70,49	10 G - USGS	YAJ (TAJKISTAN)	5,0 (GS) - USGS	5,6 (GS) - USGS	5,2 (GCMT)				7,8*10**16 Nm (GCMT)	
1381	2007-07-22	11:02:15 p.m.	30,88	78,24	19 - USGS	IND (UTTARANCHAL, INDIA)	4,3 (GS) - USGS	5,1 (GS) - USGS						
1382	2007-08-15	11:40:58 p.m.	-13,39	-76,58	39 G - USGS	PER (NEAR THE COAST OF CENTRAL PERU)	7,9 (GS) - USGS	6,7 (GS) - USGS	8,0 (GCMT)		7,5 (GS)	4,2*10**15 Nm (GS)	1,1*10**21 Nm (GCMT), 1,4*10**21 Nm (PPT)	

Fuente: YEPES HEREDIA, Jairo Edmundo., Ibíd, Disponible en <https://cutt.ly/QwlmARp>

Tabla 4. Base de datos de deslizamientos inducidos por sismos 2008 – 2019

SISMOS QUE INDIJERON DESLIZAMIENTOS Y SUS CARACTERISTICAS GENERALES							CARACTERISTICAS DE LOS DESLIZAMIENTOS	CARACTERISTICAS SISMICAS DEL EVENTO QUE INDIJO DESLIZAMIENTOS		CARACTERISTICAS DE DESLIZAMIENTOS Y LA REGION		COORDENADAS DEL DESLIZAMIENTO		DETERMINACION DE DISTANCIA DEL EPICENTRO AL DESLIZAMIENTO(S) INDUCIDO(S) POR ESE EVENTO SISMICO		
REGISTROS			EPICENTRO					Mw	FUENTE DE LA INFORMACION MAS CONFIABLE DE PARAMETROS SISMICOS	PAIS O REGION DE DESLIZAMIENTO	MECANISMO DE FALLA SEGUN KEEFER(1984) 1: DESLIZAMIENTOS DISREGGADOS (CAIDA DE ROCAS -SUELO) - 2: DESLIZAMIENTOS COHERENTES (ROTACIONALES) - 3: PROPAGACION LATERAL Y FLUJOS (AVALANCHAS)	N(+) / S(-)	E(+) / W(-)	DISTANCIA DEL EPICENTRO AL DESLIZAMIENTO (Km)		
N°	FECHA	HORA-EVENTO	N(+) / S(-)	E(+) / W(-)	PROFUNDIDAD (h) - (Km)	PAIS O REGION DE EPICENTRO										
EARTHQUAKES THAT INDUCED LANDSLIDES AND GENERAL CHARACTERISTICS							SEISMIC CHARACTERISTICS OF THE EVENT THAT INDUCED LANDSLIDES		LANDSLIDES AND REGION CHARACTERISTICS		N(+) / S(-)		E(+) / W(-)		DISTANCE FROM THE EPICENTER TO THE SLIDING (Km)	
CHRONOLOGICAL EARTHQ. ORDER NUMBER	YEAR-MONTH-DAY (according to main earthq. GMT)	HH-MIN-SEC (according to main earthq. GMT)	N(+) / S(-)	E(+) / W(-)	FOCUSDEPTH (Km)	EPICENTER LOCATION	EARTHQ. CHARACTERISTICS	MOMENT MAGNITUDE	REFERENCE OF MOST RELIABLE DATA FOR SEISMIC PARAMETERS	COUNTRY OR SLIDING REGION	MECHANISMS REPORTED FOR EACH EARTHQ. 1: SLIDING SLIDES (FALL OF ROCKS) - 2: COHERENT SLIDES - 3: LATERAL PROPAGATION AND FLOWS	N(+) / S(-)	E(+) / W(-)	DISTANCE FROM THE EPICENTER TO THE SLIDING (Km)		
1383	2009-04-06	01: 32: 39 UTC	42.33	13.33	8,8	central Italy	De acuerdo con un informe provisional de daños, al menos 15 000 habitantes de los Abruzzos quedaron sin electricidad, las vías de comunicación con Roma (situada a 85 kilómetros), terminaron cortadas; se derrumbaron casas del centro histórico de Arscchia, epicentro del temblor y la cúpula de la iglesia de las Santas se hundió	6.3 USGS	USGS	L'Aquila / Abruzzo (Italia) a	2	42.35	13.39	6.83	6.83	
1451	13 de Enero 2018	2:31:37 p. m.	13.40	-84.79	5 kms	C 37 KM AL Sur de Siuna	Estos sismos se deben a un sistema de fallas geológicas de deslizamiento horizontal, ubicadas en la zona comprendida entre Quilaf, Waslala y Siuna. Por sus características, no se esperan mayores repercusiones por réplicas que puedan ocurrir, añáde el informe.	4.4 USGS	USGS	Quilaf	3	13.57	-86.03	139.29	139.29	

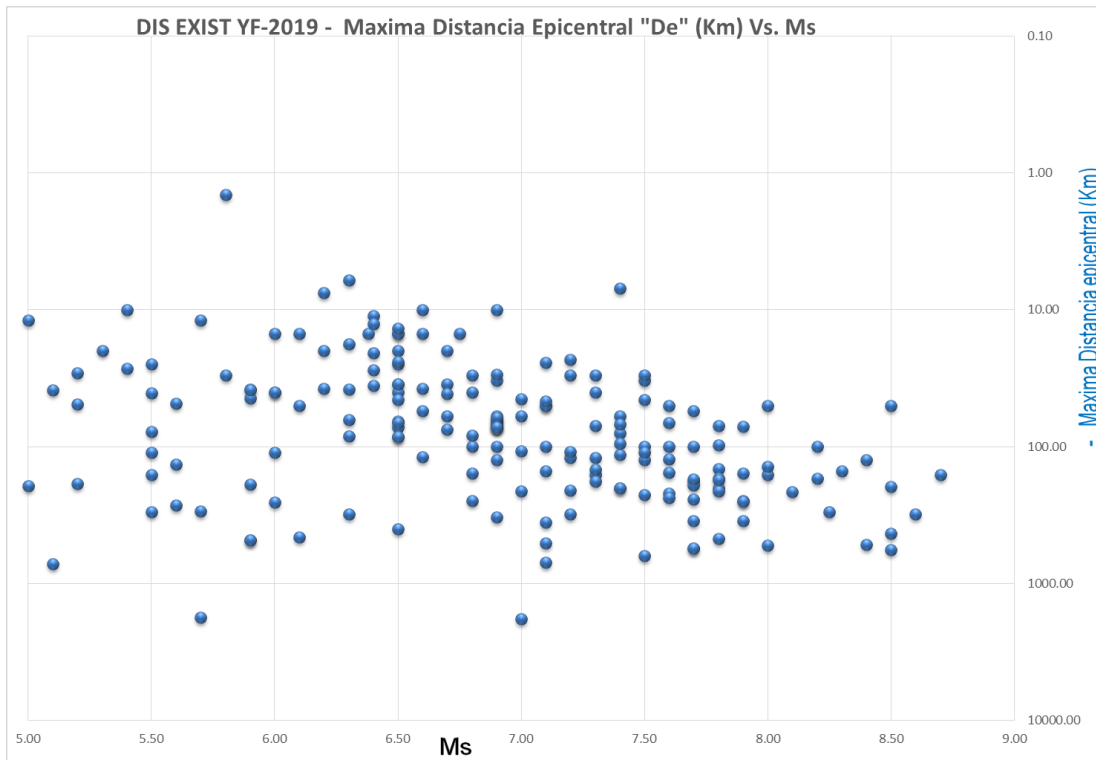
Fuente: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA Francis. Base de datos de deslizamientos inducidos por sismos 2008 – 2019

4.2 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Luego de contar con la base de datos de los eventos sísmicos depurada, se realiza la búsqueda rigurosa de la información correspondiente con el fin de obtener:

4.2.1 Parámetros sísmicos (Magnitud y Distancia Epicentral) y ubicación exacta del lugar donde ocurrió el deslizamiento. En resumen, se logró obtener 229 puntos para construir una gráfica de “Distancia del epicentro del sismo al deslizamiento Vs. Magnitud de sismo superficial”. Ver Imagen 12.

Imagen 12. Deslizamientos inducidos por sismos de 1999 a 2019. Máxima distancia epicentral (Km) vs. Ms (sin discriminación por mecanismos)



Fuente: RODRÍGUEZ, YEPES, 2009. Actualizada por MOSQUERA 2019.

El siguiente esquema de la Imagen 13, indica la manera como se determinaron las distancias del epicentro del sismo hasta el deslizamiento, de acuerdo a lo establecido por Keefer 1984.

Luego, el objetivo fue discriminar los eventos según: deslizamientos disgregados y caídas de rocas, coherentes, y propagación lateral y flujos.

Imagen 13. Ilustración del concepto para la determinación de distancias epicentrales



Fuente: KEEFER. . Ilustración del concepto para la determinación de distancias epicentrales [imagen]. 1984.

El proceso para la consecución de la información pese a la facilidad de acceso a la información, debido a la terminología empleada, fue exhaustivo, pero con el ánimo de garantizar una base de datos confiable y veraz, se incrementó la búsqueda y se determinaron : 68 deslizamientos disgregados, 21 deslizamientos coherentes, y 19 flujos y propagaciones laterales.

4.2.2 Reunión de información existente. Culminada la etapa de actualización de la base de datos histórica, se reunió toda la información registrada desde la base de “Deslizamientos inducidos por sismos de 1767 A.C. hasta 2019 D.C.”, teniendo como resultado: 472 deslizamientos que corresponden al mecanismo de falla 1 - deslizamientos disgregados, 141 mecanismo de falla 2 - deslizamientos coherentes, y 134 al mecanismo de falla 3 -flujos y propagaciones laterales, lo cual está respaldado por la base de datos histórica.

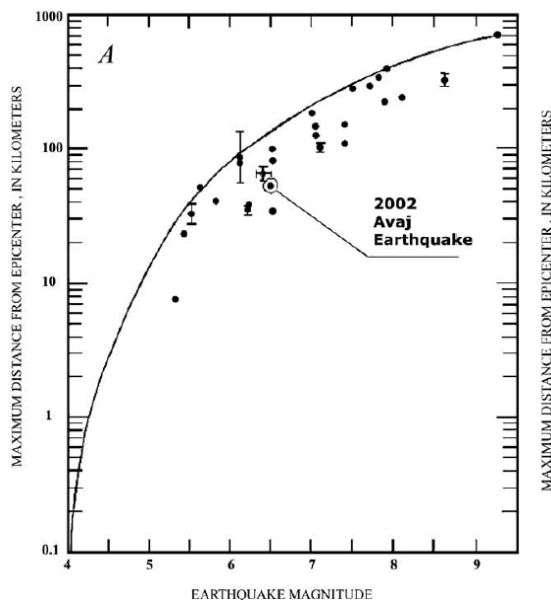
4.3 DEFINICIÓN DE CURVAS DE DENSIDAD DE DESLIZAMIENTOS

Para soportar el proyecto, se tomó como base, la información de las curvas de densidad de deslizamientos existentes, que trabajan distancia epicentral vs. Magnitud de sismo, las cuales han sido aprobadas y utilizadas por el medio y son las que se relacionan a continuación:

4.3.1 **Curvas de densidad de deslizamientos según Keefer en 1984.** Propuso a partir de 40 eventos sísmicos de todo el mundo, una curva de 0% de deslizamientos, que representa el límite entre la ocurrencia o no de un deslizamiento inducido por sismos. La

Imagen 14, relacionada a continuación, presenta la propuesta de Keefer en 1984.

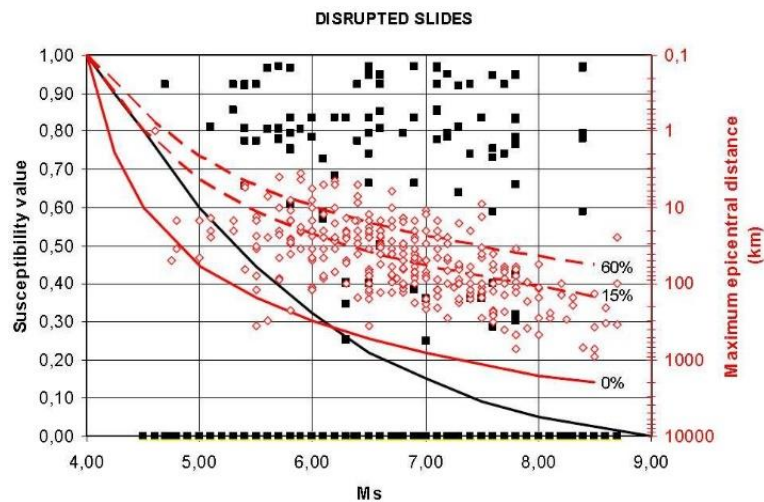
Imagen 14. Deslizamientos inducidos por sismos. Máxima distancia epicentro a deslizamiento más lejano vs. Magnitud de sismo para Deslizamientos disgregados, coherentes y flujos.



Fuente: KEEFER. Deslizamientos inducidos por sismos. Máxima distancia epicentro a deslizamiento más lejano vs. Magnitud de sismo para Deslizamientos disgregados, coherentes y flujos [imagen] 1984.

4.3.2 **Curvas de densidad de deslizamientos según Ishihara-Nakamura (Ecuador 1987) y Mora-Mora (Costa Rica 1992):** Definieron curvas del 15% y 60% para densidades de deslizamientos utilizando datos de los sismos ocurridos en Ecuador y Costa Rica, respectivamente.

4.3.3 **Rodríguez (Deslizamientos inducidos por sismos 1767 A.C. – 1999 D.C.):** Vinculó en una gráfica la curva de Keefer para el 0%, y las curvas de 15% y 60% de Ishihara – Nakamura y Mora – Mora, adaptada a una base de datos mundial, con registros históricos, construyendo gráficas para los tres mecanismos propuestos por Keefer en 1984... Ver Imagen 15, en la cual se indica el caso de deslizamientos disgregados... Imagen 15. Curvas del 0%, 15% y 60%, trazadas a partir de la base de datos de Rodríguez 2000.



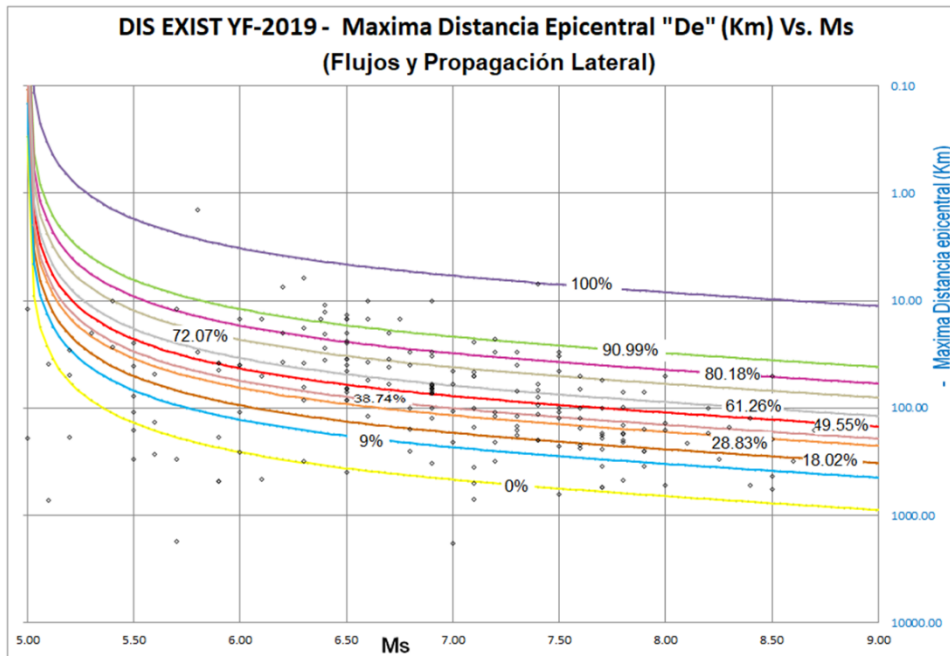
Fuente: RODRÍGUEZ, CARLOS. Curvas del 0%, 15% y 60%, trazadas a partir de la base de datos de Rodríguez 2000 [imagen]. 2003.

Dando continuidad a la metodología empleada por Rodríguez, Yepes, 2009, uno de los planteamientos de este proyecto, es definir curvas de densidad de deslizamientos más detalladas, y que permitan describir mejor el comportamiento de la nube de puntos que relacionan los eventos sísmicos, mediante la utilización de una base de datos confiable, para los tres mecanismos de falla propuestos por Keefer, 1984.

Por lo anterior, se determinaron curvas en intervalos definidos, que representan deslizamientos en la gráfica "De vs. M_s ", y se asociaron con la ecuación de tendencia, lo que permite realizar el correspondiente análisis probabilístico.

A continuación, en la Imagen 16, se presenta la gráfica de densidad de deslizamientos para la base de datos histórica actualizada a 2019, donde se presenta el caso específico del mecanismo 3, Flujos y propagación lateral.

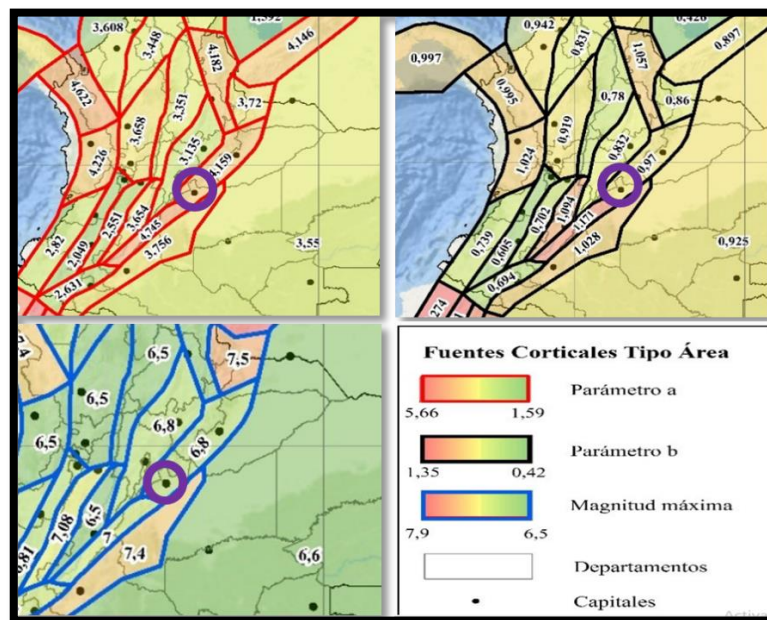
Imagen 16. Curvas de densidad de deslizamientos para deslizamientos inducidos por sismos 1767 A.C. hasta 2019 D.C.



Fuente: Curvas de Densidad de deslizamientos propuesta por Rodríguez, Yepes, 2009. Actualizada por Mosquera 2019.

4.4 CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD TOTAL DE FALLA POR SISMOS, PARA UN MECANISMO EN PARTICULAR

4.4.1 **Probabilidad que ocurra el sismo crítico.** Dando alcance a lo mencionado en la metodología del presente documento, se determinó la probabilidad de la siguiente manera: **Determinación de parámetros sísmicos.** Mediante el estudio de Amenaza Sísmica de Colombia realizado por el SGC - Servicio Geológico Colombiano, para el año 2019, se determinaron los coeficientes sísmicos a y b, de cada una de las siete fuentes sismogénicas que se encuentran cercanas a las zonas piloto de este proyecto, como son: falla Servitá, falla Bavaria, falla Pipiral, falla el Mirador, falla la Reforma, falla la Blanca y falla Buenavista. tal como se observa en la Imagen 17, se establecieron dos modelos diferentes para las fuentes corticales, dada la profundidad de los sismos en la región sur occidental del departamento del Meta, que es donde se encuentran ubicadas las dos zonas piloto del proyecto. Imagen 17. Fuentes Corticales Tipo área definidas

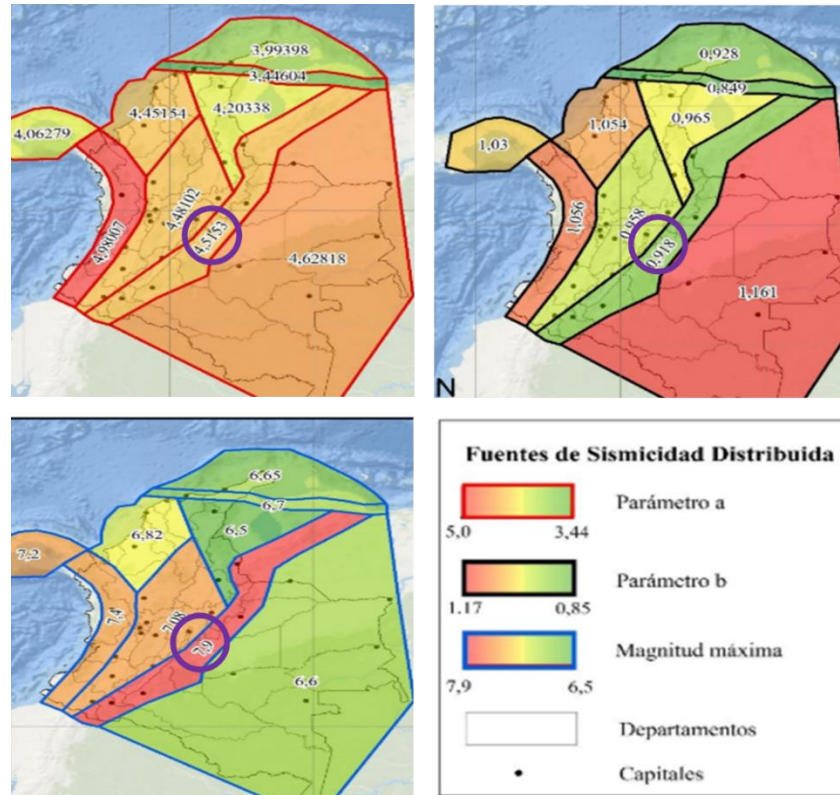


Fuente: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). Fuentes corticales tipo área definidas, 2019.

El primer modelo de fuentes corticales consiste en la mezcla entre un modelo de fuentes tipo falla y un modelo de sismicidad distribuida que permite capturar la sismicidad de fondo o de corteza difusa sin asumir la equiprobabilidad espacial y temporal de los posibles eventos sísmicos a generarse.

Un segundo modelo... Ver Imagen 18... fue construido a partir de áreas tipo fuente que permiten la inclusión de todos los eventos de origen cortical.

Imagen 18. Fuentes tipo área para sismicidad distribuida



Fuente: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). Fuentes corticales tipo área definidas, 2019.

Para M, se tienen valores cada 0,5 de magnitud entre el mínimo de las bases de datos del proyecto en función de los 3 mecanismos de falla propuestos por Keefer (deslizamientos disgregados, $M=4,0$; deslizamientos coherentes, $M=4,5$; flujos y propagación lateral, $M=5,0$); y el máximo esperado en cada fuente sismogénica... Ver Tabla 5...

Tabla 5. Parámetros sísmicos de las fuentes sismogénicas

MODELO	PARÁMETROS		
	a	b	M
POR SISTEMA DE FALLAS	4.515	0.918	7.900
POR AREA EQUIPROBABLE	4.159	0.970	6.800
MODELO b1	1.806	0.367	3.160
MODELO b2	2.495	0.582	4.080
MAGNITUD MAXIMA ESPERADA	4.302	0.949	7.240

Fuente: PORTAL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, Parámetros sísmicos fuentes sismogénicas [tabla]. Servicio Geológico Colombiano, 2019.

Tabla 6. Relación de Magnitudes definidas para cada mecanismo de falla

	MAGNITUD MÍNIMA BASE DE DATOS	MAGNITUD MÁXIMA ESPERADA SGC	MAGNITUD PROMEDIO
MECANISMO 1: DESLIZAMIENTOS DISGREGADOS (CAÍDA DE ROCAS - SUELO)	4	7.24	5.7
MECANISMO 2: DESLIZAMIENTOS COHERENTES (ROTACIONALES)	4.5	7.24	5.9
MECANISMO 3: PROPAGACIÓN LATERAL Y FLUJOS (AVALANCHAS)	5	7.24	6.2

Fuente: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

Con los parámetros sísmicos registrados en la Tabla 5, y el criterio de adopción de la magnitud promedio establecida en la Tabla 6. Relación de Magnitudes definidas para cada mecanismo de falla., calculada entre la magnitud mínima de los deslizamientos de la base de datos inducidos por sismos, y la magnitud esperada para cada fuente sismogénica calculada según el estudio del Servicio Geológico Colombiano; se procede a resolver la Ecuación 3. Probabilidad de Ocurrencia de sismos de Magnitud M , con el propósito de calcular la tasa de ocurrencia del evento sísmico, la cual a su vez, corresponde a la probabilidad de que dicho evento se materialice, por lo tanto reemplazando en la mencionada ecuación se tiene que:

$$P_{(s)crit} = \text{Log}(N) = 4.302 - 0.949 * M$$

Por lo anterior, el valor de “N” resultante para cada mecanismo se muestra en la Tabla 7. Tasa de Ocurrencia para cada mecanismo de falla, relacionada a continuación:

Tabla 7. Tasa de Ocurrencia para cada mecanismo de falla

	TASA DE OCURRENCIA (N)	COMPROBACIÓN
N M1	0.078	5.700
N M2	0.050	5.900
N M3	0.026	6.200

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, a partir del valor calculado de N, mediante la aplicación de la Ecuación 4. Tasa de ocurrencia de sismos de Magnitud “M” para cada mecanismo de falla, se calculó, el periodo de retorno (Tr) que corresponde al inverso de la tasa de ocurrencia (N), tal como se evidencia en la Tabla 8:

Tabla 8. Periodos de Retorno para cada mecanismo de falla

	PERIODO DE RETORNO (Tr)	PERIODO DE RETORNO (Tr)	PERIODO DE RETORNO (Tr)
Tr M1	13	2	50
Tr M2	20		
Tr M3	38		

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se procede a reemplazar en la Ecuación 5. Probabilidad que ocurra el sismo crítico de magnitud “M” para cada mecanismo de falla y se calcula la probabilidad en función de los periodos de retorno definidos para cada mecanismo de falla y para los periodos de retorno asumidos de 2 y 50 años... Ver Tabla 9. Probabilidad calculada para cada mecanismo de falla, tal como se mencionó en la metodología, de tal manera que se adopta un solo criterio para el cálculo de la probabilidad conjugada de falla en cada zona piloto.

Tabla 9. Probabilidad calculada para cada mecanismo de falla

	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL SISMO CRÍTICO	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL SISMO CRÍTICO Pr = 2 años	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL SISMO CRÍTICO Pr = 50 años
$P_{(S)} \text{ crit M1- Pr 13 años}$	0.980	1.00	0.63
$P_{(S)} \text{ crit M2- Pr 20 años}$	0.920		
$P_{(S)} \text{ crit M3 - Pr 38 años}$	0.730		

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2 Probabilidad que el sismo crítico genere deslizamientos. Tal como se mencionó en el capítulo 3. Metodología del presente documento, basados en ARCGIS (sistema de Información geográfico “SIG”) para cada zona piloto se construyó una grilla con elementos cuadrados de “2 m x 2 m”, utilizando como punto de referencia de datos el punto medio o centroide de cada celda.

Lo que permitió definir las distancias desde el punto mencionado en las celdas hasta cada una de las siete (7) fuentes sismogénicas, se adoptó un valor promedio de las distancias calculadas, las cuales para la zona piloto 1 corresponden a un total de 36953 datos registrados y para la zona piloto 2, a 17543 resultados obtenidos.

Con el valor mínimo de magnitud de sismo que generó deslizamientos de la base de datos que corresponde a 4.0 y el valor máximo esperado para cada fuente, determinado mediante la relación de Gutenberg - Richter...Ver Tabla 6. Relación de Magnitudes definidas para cada mecanismo de falla...

Con base en la información de magnitud de sismo crítica “M” y la distancia promedio asumida de las fuentes sismogénicas... ver Tabla 10 Distancia promedio fuentes sismogénicas a Zona Piloto 1y Tabla 11.

Tabla 10 Distancia promedio fuentes sismogénicas a Zona Piloto 1

FUENTES SISMOGÉNICAS	De (kms)	De (Adoptado)
FALLA BUENAVISTA	3.846	2.957
FALLA LA BLANCA	0.621	
FALLA LA REFORMA	2.116	
FALLA EL MIRADOR	5.720	
FALLA PIPIRAL	0.779	
FALLA SERVITÁ	1.467	
FALLA BAVARIA	6.152	

Fuente:: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

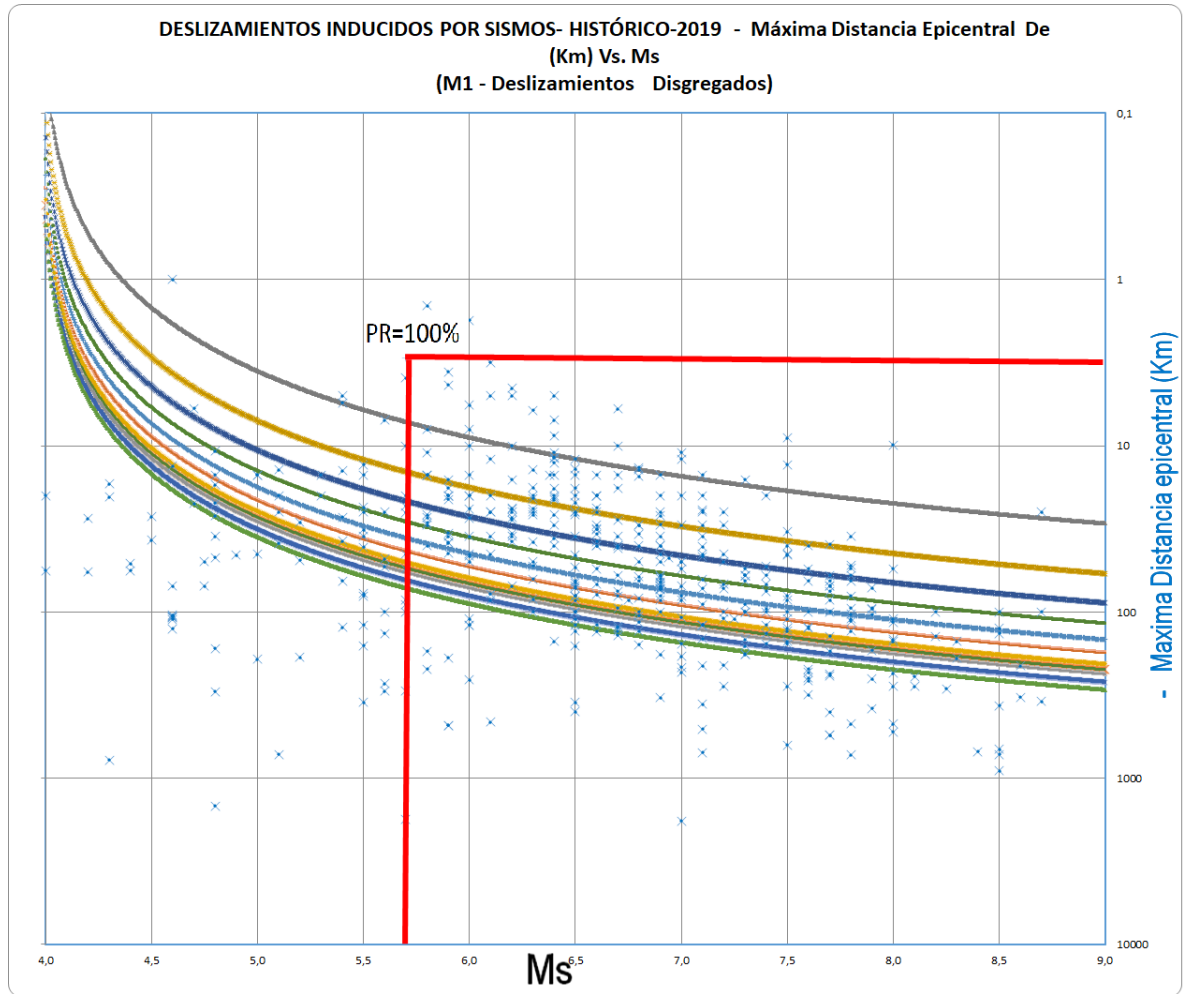
Tabla 11. Distancia promedio Fuentes Sismogénicas a Zona Piloto 2

FUENTES SISMOGÉNICAS	De (kms)	De (Adoptado)
FALLA BUENAVISTA	2.522	4.879
FALLA LA BLANCA	1.126	
FALLA LA REFORMA	0.597	
FALLA EL MIRADOR	4.307	
FALLA PIPIRAL	2.524	
FALLA SERVITÁ	0.496	
FALLA BAVARIA	4.879	

Fuente:: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

A continuación, en la Imagen 19 *Probabilidad que el sismo crítico genere deslizamientos* se muestra la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos dada la ocurrencia del sismo crítico, en función de distancias epicentrales y magnitudes de sismo para las fuentes sismogénicas que influyen sobre la zona, y las curvas de densidad de deslizamientos definidas para el proyecto, las cuales fueron definidas para cada mecanismo de falla, en cada zona piloto tal como se observa en la Tabla 12 y Tabla 13

Imagen 19 Probabilidad que el sismo crítico genere deslizamientos



Fuente: Curvas de densidad de deslizamientos propuesta por Rodríguez, Yepes, 2009. Actualizada por Mosquera 2019.

Tabla 12. Probabilidad de que el sismo crítico genere deslizamiento ZP1

	$P_{(S_{crit})desliz} ZP1$
$P_{(Sc)desliz ZP1- M1}$	1 = 100%
$P_{(Sc)desliz ZP1- M2}$	1 = 100%
$P_{(Sc)desliz ZP1- M3}$	1 = 100%

Fuente:: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

Similar procedimiento al anteriormente descrito se realizó para la zona piloto obteniendo como resultado la probabilidad descrita en la Tabla 13.

Tabla 13. Probabilidad de que el sismo crítico genere deslizamiento ZP2

	$P(s_{crit})_{desliz} \quad ZP \quad 2$
$P_{(Sc)}_{desliz \ M1}$	1 = 100%
$P_{(Sc)}_{desliz \ M2}$	1 = 100%
$P_{(Sc)}_{desliz \ M3}$	1 = 100%

Fuente: Elaboración propia

4.4.3 Función de susceptibilidad. Para el caso específico de estudio, se adoptó como criterio “el ángulo de la pendiente del talud”, la cual se definió seleccionando las tres secciones críticas generadas a partir de la topografía real del terreno para cada zona piloto, tal como se puede observar en los Anexos W, X del presente documento.

Con la información obtenida se asignaron valores de peso a cada celda, otorgando valores de pendiente, de tal manera que se facilitó la realización del mapa de pendientes...Ver Anexos B y C..., elaborado mediante la utilización de la herramienta de SIG – ArcGIS, tal como se relaciona en las Tablas 14 y 15.

Tabla 14. Datos utilizados para realizar el mapa de pendientes en ArcGIS y cálculo de distancias epicentrales a cada fuente sísmogénica - ZP1

CELDA	PENDIENTE %	DISTANCIA EN KMS						
		BUENAVISTA	LA_BLANCA	LA_REFORMA	MIRADOR	PIPIRAL	SERVITA	BAVARIA
1	22.010	3898.513	733.583	2243.513	5790.600	678.317	1431.455	6187.998
2	74.153	3896.800	731.793	2241.537	5788.831	680.197	1430.333	6186.443
3	65.817	3895.087	730.003	2239.562	5787.063	682.078	1429.210	6184.888
4	81.757	3893.374	728.212	2237.587	5785.295	683.958	1428.088	6183.333
5	88.221	3891.661	726.422	2235.612	5783.528	685.839	1426.965	6181.778
6	9.859	3889.948	724.632	2233.636	5781.760	687.719	1425.842	6180.223
7	81.122	3906.397	741.636	2251.727	5798.607	670.114	1437.601	6195.476
8	19.678	3904.684	739.846	2249.752	5796.839	671.995	1436.479	6193.921
9	75.563	3902.971	738.056	2247.777	5795.071	673.875	1435.356	6192.366
10	49.943	3901.258	736.265	2245.802	5793.302	675.755	1434.233	6190.811
11	0.000	3899.545	734.475	2243.826	5791.534	677.636	1433.111	6189.256
12	0.080	3897.832	732.684	2241.851	5789.766	679.516	1431.988	6187.701
13	69.014	3896.119	730.894	2239.876	5787.998	681.397	1430.865	6186.146
14	78.023	3894.406	729.104	2237.901	5786.231	683.277	1429.743	6184.591
15	80.012	3892.693	727.313	2235.926	5784.463	685.158	1428.620	6183.036
16	74.300	3890.981	725.506	2233.951	5782.696	687.038	1427.498	6181.481
17	81.925	3889.269	723.599	2231.977	5780.929	688.918	1426.375	6179.926
18	9.781	3887.557	721.692	2230.002	5779.162	690.799	1425.252	6178.371
36935	91.301	4001.122	698.413	2215.712	5859.564	664.332	1665.962	6315.263
36936	103.071	3999.511	696.417	2213.818	5857.820	666.206	1664.856	6313.697
36937	90.726	3997.901	694.421	2211.925	5856.076	668.080	1663.750	6312.132
36938	94.362	3996.290	692.425	2210.032	5854.332	669.954	1662.644	6310.567
36939	110.179	3994.680	690.429	2208.139	5852.588	671.828	1661.537	6309.003
36940	91.776	3993.071	688.433	2206.246	5850.845	673.702	1660.431	6307.438
36941	104.540	3991.461	686.437	2204.353	5849.101	675.577	1659.325	6305.874
36942	74.087	3989.852	684.442	2202.461	5847.358	677.451	1658.219	6304.310
36943	74.558	3988.244	682.446	2200.568	5845.615	679.325	1657.113	6302.747
36944	74.558	3986.636	680.450	2198.676	5843.872	681.199	1656.007	6301.183
36945	86.885	3999.087	694.548	2212.570	5857.055	667.382	1665.416	6313.378
36946	109.550	3997.477	692.552	2210.678	5855.312	669.256	1664.310	6311.813
36947	93.520	3995.867	690.556	2208.785	5853.568	671.130	1663.204	6310.249
36948	105.197	3994.258	688.560	2206.893	5851.825	673.004	1662.097	6308.685
36949	90.084	3992.649	686.564	2205.001	5850.082	674.878	1660.991	6307.121
36950	73.547	3991.041	684.568	2203.109	5848.339	676.752	1659.885	6305.558
36951	93.520	3998.664	692.679	2211.325	5856.292	668.557	1665.976	6313.059
36952	92.786	3997.055	690.683	2209.433	5854.548	670.431	1664.870	6311.495
36953	98.191	3995.447	688.687	2207.541	5852.805	672.305	1663.764	6309.932
VALORES PROMEDIO	1.346	3.846 Kms	0.621 Kms	2.116 Kms	5.720 Kms	0.779 Kms	1.467 Kms	6.152 Kms

Fuente:: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

Tabla 15. Cálculos realizados para obtener la probabilidad de ocurrencia del sismo crítico para cada periodo de retorno; pendiente en radianes y función de susceptibilidad, para cada celda en la ZP1

CELDA	PENDIENTE %	CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA PROBABILIDAD DE FALLA							f (s)
		$P_{(S)} \text{ crit M1 -}$ Pr=13 años	$P_{(S)} \text{ crit M2-}$ Pr=20 años	$P_{(S)} \text{ crit M3 -}$ Pr=38 años	$P_{(S)} \text{ crit Pr=2}$ años	$P_{(S)} \text{ crit Pr=50}$ años	$P_{(Sc \text{ desliz})}$ ZP1	Pendiente (rad)	
1	22.010	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.217	0.0218
2	74.153	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.638	0.8094
3	65.817	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.582	0.6828
4	81.757	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.685	0.8899
5	88.221	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.723	0.9348
6	9.859	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.098	0.0009
7	81.122	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.682	0.8844
8	19.678	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.194	0.0141
9	75.563	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.647	0.8268
10	49.943	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.463	0.3689
11	0.000	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.000	0.0000
12	0.080	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.001	0.0000
13	69.014	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.604	0.7359
14	78.023	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.663	0.8544
15	80.012	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.675	0.8743
16	74.300	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.639	0.8112
17	81.925	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.686	0.8913
18	9.781	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.098	0.0009
36933	74.558	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.641	0.8145
36934	74.558	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.641	0.8145
36935	91.301	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.740	0.9501
36936	103.071	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.801	0.9835
36937	90.726	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.737	0.9475
36938	94.362	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.756	0.9621
36939	110.179	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.834	0.9920
36940	91.776	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.743	0.9522
36941	104.540	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.808	0.9858
36942	74.087	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.638	0.8085
36943	74.558	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.641	0.8145
36944	74.558	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.641	0.8145
36945	86.885	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.715	0.9271
36946	109.550	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.831	0.9915
36947	93.520	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.752	0.9591
36948	105.197	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.811	0.9867
36949	90.084	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.733	0.9445
36950	73.547	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.634	0.8015
36951	93.520	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.752	0.9591
36952	92.786	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.748	0.9563
36953	98.191	0.980	0.920	0.730	1.000	0.632	1.000	0.776	0.9735

Fuente:: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

Los valores obtenidos mediante el procedimiento descrito en el numeral 4.4.1 Probabilidad que ocurra el sismo crítico y 4.4.3 función de susceptibilidad, se relacionan a continuación en la Tabla 16 y Tabla 17.

Tabla 16. Datos utilizados para realizar el mapa de pendientes en ArcGIS y cálculo de distancias epicentrales a cada fuente sísmogénica – ZP2

CELDA	PENDIENTE %	DISTANCIA EN KMS						
		BUENAVISTA	LA_BLANCA	LA_REFORMA	MIRADOR	PIPIRAL	SERVITA	BAVARIA
5	23.287	2267.975	1016.614	510.820	4098.436	2422.529	171.576	4609.055
6	69.861	2266.412	1018.521	508.832	4096.718	2424.403	170.543	4607.600
7	77.965	2264.850	1020.428	506.844	4095.001	2426.277	169.511	4606.145
8	57.993	2263.289	1022.335	504.856	4093.283	2428.151	168.478	4604.691
9	58.715	2261.728	1024.242	502.868	4091.566	2430.025	167.445	4603.238
10	58.222	2260.168	1026.149	500.880	4089.849	2431.899	166.412	4601.785
11	66.214	2258.609	1028.056	498.892	4088.133	2433.773	165.380	4600.332
12	65.233	2257.050	1029.964	496.905	4086.416	2435.647	164.347	4598.880
13	14.174	2255.492	1031.871	494.917	4084.700	2437.521	163.314	4597.428
14	51.953	2253.935	1033.778	492.930	4082.985	2439.395	162.281	4595.976
15	66.016	2252.378	1035.685	490.942	4081.269	2441.269	161.249	4594.525
16	64.010	2250.822	1037.592	488.955	4079.554	2443.143	160.216	4593.074
17	14.174	2249.267	1039.499	486.968	4077.839	2445.017	159.183	4591.624
18	19.259	2247.713	1041.406	484.981	4076.124	2446.891	158.150	4590.174
19	68.193	2246.159	1043.313	482.994	4074.410	2448.765	157.118	4588.725
20	61.569	2244.606	1045.220	481.007	4072.695	2450.639	156.085	4587.276
21	12.027	2243.054	1047.127	479.020	4070.982	2452.513	155.052	4585.827
22	19.259	2241.502	1049.034	477.034	4069.268	2454.387	154.019	4584.379
17523	100.000	2486.503	989.769	529.622	4257.098	2354.462	484.318	4846.647
17524	98.732	2485.074	991.757	527.747	4255.429	2356.378	483.383	4845.265
17525	67.560	2483.645	993.746	525.873	4253.759	2358.294	482.455	4843.883
17526	61.451	2482.217	995.734	523.998	4252.090	2360.210	481.533	4842.501
17527	61.451	2480.790	997.722	522.124	4250.421	2362.127	480.617	4841.118
17528	78.255	2479.364	999.711	520.249	4248.751	2364.043	479.709	4839.736
17529	60.033	2477.939	1001.699	518.375	4247.082	2365.960	478.807	4838.354
17530	60.033	2476.514	1003.688	516.500	4245.413	2367.877	477.911	4836.972
17531	93.966	2475.090	1005.677	514.626	4243.744	2369.794	477.022	4835.589
17532	97.701	2473.667	1007.665	512.751	4242.074	2371.711	476.140	4834.207
17533	86.234	2502.230	969.670	549.064	4274.892	2334.732	495.748	4861.916
17534	86.604	2500.794	971.658	547.189	4273.223	2336.647	494.754	4860.533
17535	100.207	2499.358	973.647	545.315	4271.554	2338.562	493.766	4859.151
17536	100.000	2497.923	975.635	543.440	4269.885	2340.478	492.784	4857.769
17537	100.000	2496.489	977.623	541.566	4268.215	2342.393	491.808	4856.386
17538	86.876	2495.056	979.612	539.691	4266.546	2344.309	490.838	4855.004
17539	61.451	2493.624	981.600	537.817	4264.877	2346.225	489.875	4853.622
17540	61.451	2492.192	983.589	535.942	4263.207	2348.140	488.918	4852.240
17541	78.255	2490.761	985.577	534.068	4261.538	2350.056	487.967	4850.857
17542	60.033	2489.331	987.566	532.193	4259.869	2351.973	487.023	4849.475
17543	60.033	2487.902	989.555	530.319	4258.200	2353.889	486.085	4848.093
VALORES PROMEDIO	3.111	2.522 Kms	1.126 Kms	0.597 Kms	4.307 Kms	2.524 Kms	0.496 Kms	4.879 Kms

Fuente:: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

Tabla 17. Cálculos realizados para obtener la probabilidad de ocurrencia del sismo crítico para cada periodo de retorno; pendiente en radianes y función de susceptibilidad, para cada celda en la – ZP2

CELDA	PENDIENTE %	CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA PROBABILIDAD DE FALLA							f (s)
		$P_{(s) \text{ crit M1-}}$	$P_{(s) \text{ crit M2-}}$	$P_{(s) \text{ crit M3-}}$	$P_{(s) \text{ crit}}$	$P_{(s) \text{ crit}}$	$P_{(Sc \text{ desliz})}$	Pendiente (rad)	
		Pr=13 años	Pr=20 años	Pr=38 años	Pr=2 años	Pr=50 años	ZP1		
5	23.287	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.229	0.0270
6	69.861	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.610	0.7491
7	77.965	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.662	0.8538
8	57.993	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.526	0.5336
9	58.715	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.531	0.5482
10	58.222	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.527	0.5383
11	66.214	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.585	0.6896
12	65.233	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.578	0.6725
13	14.174	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.141	0.0039
14	51.953	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.479	0.4097
15	66.016	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.583	0.6862
16	64.010	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.569	0.6504
17	14.174	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.141	0.0039
18	19.259	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.190	0.0130
19	68.193	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.598	0.7228
20	61.569	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.552	0.6045
21	12.027	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.120	0.0021
22	19.259	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.190	0.0130
17523	100.000	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.785	0.9777
17524	98.732	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.779	0.9748
17525	67.560	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.594	0.7124
17526	61.451	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.551	0.6022
17527	61.451	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.551	0.6022
17528	78.255	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.664	0.8569
17529	60.033	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.541	0.5745
17530	60.033	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.541	0.5745
17531	93.966	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.754	0.9607
17532	97.701	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.774	0.9723
17533	86.234	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.712	0.9230
17534	86.604	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.714	0.9254
17535	100.207	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.786	0.9782
17536	100.000	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.785	0.9777
17537	100.000	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.785	0.9777
17538	86.876	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.715	0.9270
17539	61.451	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.551	0.6022
17540	61.451	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.551	0.6022
17541	78.255	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.664	0.8569
17542	60.033	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.541	0.5745
17543	60.033	0.980	0.920	0.730	1.000	0.630	1.000	0.541	0.5745
VALORES PROMEDIO	3.111								

Fuente:: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

Una vez obtenidos los tres valores correspondientes a la probabilidad de ocurrencia del sismo crítico, la función de susceptibilidad y la probabilidad que ese sismo crítico genere deslizamientos; para un mecanismo en particular, para cada celda en las dos zonas piloto, se calcula el producto de los tres, lo que permite establecer la

probabilidad de falla por sismos para cada mecanismo de falla de acuerdo a los periodos de retorno definidos en la metodología... Ver Tabla 18 y Tabla 19. donde se relacionan los datos obtenidos del cálculo realizado para la obtención final de la probabilidad en cada zona piloto por cada mecanismo de falla.

Tabla 18. Probabilidad de falla por sismos para cada mecanismo de falla en función de los periodos de retorno definidos para la ZP1

CELDA	PENDIENTE %	DATOS PARA ZONIFICACIÓN					
		$Pf_{ZP1}(S)_{M1}$ <small>Pr=13 años</small>	$Pf_{ZP1}(S)_{M2}$ <small>Pr=20 años</small>	$Pf_{ZP1}(S)_{M3}$ <small>Pr=38 años</small>	$P(S)_{ZP1}$	$Pf_{ZP1}(S)_{Pr=2}$ <small>años</small>	$Pf_{ZP1}(S)_{Pr=50}$ <small>años</small>
1	22.010	0.021	0.020	0.016	0.056	0.022	0.014
2	74.153	0.793	0.744	0.591	0.978	0.809	0.512
3	65.817	0.669	0.628	0.498	0.938	0.683	0.432
4	81.757	0.872	0.818	0.650	0.992	0.890	0.563
5	88.221	0.916	0.860	0.683	0.996	0.935	0.591
6	9.859	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001
7	81.122	0.867	0.813	0.646	0.991	0.884	0.559
8	19.678	0.014	0.013	0.010	0.037	0.014	0.009
9	75.563	0.810	0.760	0.604	0.982	0.827	0.523
10	49.943	0.361	0.339	0.269	0.692	0.369	0.233
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	0.080	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	69.014	0.721	0.677	0.537	0.958	0.736	0.465
14	78.023	0.837	0.786	0.624	0.987	0.854	0.540
15	80.012	0.857	0.804	0.638	0.990	0.874	0.553
16	74.300	0.795	0.746	0.592	0.979	0.811	0.513
17	81.925	0.873	0.820	0.651	0.992	0.891	0.563
18	9.781	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001
36933	74.558	0.798	0.749	0.595	0.979	0.815	0.515
36934	74.558	0.798	0.749	0.595	0.979	0.815	0.515
36935	91.301	0.931	0.874	0.694	0.997	0.950	0.601
36936	103.071	0.964	0.905	0.718	0.999	0.984	0.622
36937	90.726	0.928	0.871	0.692	0.997	0.948	0.599
36938	94.362	0.943	0.885	0.702	0.998	0.962	0.608
36939	110.179	0.972	0.912	0.724	0.999	0.992	0.627
36940	91.776	0.933	0.876	0.695	0.997	0.952	0.602
36941	104.540	0.966	0.907	0.720	0.999	0.986	0.623
36942	74.087	0.792	0.744	0.590	0.978	0.809	0.511
36943	74.558	0.798	0.749	0.595	0.979	0.815	0.515
36944	74.558	0.798	0.749	0.595	0.979	0.815	0.515
36945	86.885	0.908	0.853	0.677	0.996	0.927	0.586
36946	109.550	0.972	0.912	0.724	0.999	0.991	0.627
36947	93.520	0.940	0.882	0.700	0.998	0.959	0.606
36948	105.197	0.967	0.908	0.720	0.999	0.987	0.624
36949	90.084	0.925	0.869	0.690	0.997	0.944	0.597
36950	73.547	0.785	0.737	0.585	0.977	0.802	0.507
36951	93.520	0.940	0.882	0.700	0.998	0.959	0.606
36952	92.786	0.937	0.880	0.698	0.998	0.956	0.604
36953	98.191	0.954	0.895	0.711	0.999	0.974	0.615
VALORES PROMEDIO	1.346						

Fuente:: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

Tabla 19. Probabilidad de falla por sismos para cada mecanismo de falla en función de los periodos de retorno definidos para la ZP2

CELDA	PENDIENTE %	DATOS PARA ZONIFICACIÓN					
		$Pf_{ZP1}(S)_{M1}$ <i>Pr=13 años</i>	$Pf_{ZP1}(S)_{M2}$ <i>Pr=20 años</i>	$Pf_{ZP1}(S)_{M3}$ <i>Pr=38 años</i>	$P(s)_{ZP1}$	$Pf_{ZP1}(S)$ <i>Pr=2 años</i>	$Pf_{ZP1}(S)$ <i>Pr=50 años</i>
5	23.287	0.026	0.025	0.020	0.069	0.027	0.017
6	69.861	0.734	0.689	0.547	0.963	0.749	0.472
7	77.965	0.837	0.786	0.623	0.987	0.854	0.538
8	57.993	0.523	0.491	0.390	0.852	0.534	0.336
9	58.715	0.537	0.504	0.400	0.862	0.548	0.345
10	58.222	0.527	0.495	0.393	0.855	0.538	0.339
11	66.214	0.676	0.634	0.503	0.941	0.690	0.434
12	65.233	0.659	0.619	0.491	0.934	0.672	0.424
13	14.174	0.004	0.004	0.003	0.010	0.004	0.002
14	51.953	0.401	0.377	0.299	0.739	0.410	0.258
15	66.016	0.673	0.631	0.501	0.940	0.686	0.432
16	64.010	0.637	0.598	0.475	0.924	0.650	0.410
17	14.174	0.004	0.004	0.003	0.010	0.004	0.002
18	19.259	0.013	0.012	0.010	0.034	0.013	0.008
19	68.193	0.708	0.665	0.528	0.954	0.723	0.455
20	61.569	0.592	0.556	0.441	0.899	0.604	0.381
21	12.027	0.002	0.002	0.001	0.005	0.002	0.001
22	19.259	0.013	0.012	0.010	0.034	0.013	0.008
17523	100.000	0.958	0.900	0.714	0.999	0.978	0.616
17524	98.732	0.955	0.897	0.712	0.999	0.975	0.614
17525	67.560	0.698	0.655	0.520	0.950	0.712	0.449
17526	61.451	0.590	0.554	0.440	0.898	0.602	0.379
17527	61.451	0.590	0.554	0.440	0.898	0.602	0.379
17528	78.255	0.840	0.788	0.626	0.987	0.857	0.540
17529	60.033	0.563	0.529	0.419	0.880	0.574	0.362
17530	60.033	0.563	0.529	0.419	0.880	0.574	0.362
17531	93.966	0.942	0.884	0.701	0.998	0.961	0.605
17532	97.701	0.953	0.894	0.710	0.999	0.972	0.613
17533	86.234	0.905	0.849	0.674	0.995	0.923	0.582
17534	86.604	0.907	0.851	0.676	0.996	0.925	0.583
17535	100.207	0.959	0.900	0.714	0.999	0.978	0.616
17536	100.000	0.958	0.900	0.714	0.999	0.978	0.616
17537	100.000	0.958	0.900	0.714	0.999	0.978	0.616
17538	86.876	0.908	0.853	0.677	0.996	0.927	0.584
17539	61.451	0.590	0.554	0.440	0.898	0.602	0.379
17540	61.451	0.590	0.554	0.440	0.898	0.602	0.379
17541	78.255	0.840	0.788	0.626	0.987	0.857	0.540
17542	60.033	0.563	0.529	0.419	0.880	0.574	0.362
17543	60.033	0.563	0.529	0.419	0.880	0.574	0.362
VALORES PROMEDIO	3.111						

Fuente:: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

En las columnas 3,4,5, 7 y 8 de las tablas 19 y 20 relacionadas, se relacionan los datos del cálculo de la probabilidad de falla para cada mecanismo según Keefer,

que resulta del producto de los tres resultados obtenidos tal como se describió en los numerales 4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3 del presente documento.

Seguendo los lineamientos de la metodología definida, se procede a realizar la asociación de los tres mecanismos de falla para obtener un único valor de probabilidad, se aplica la ecuación definida en función del diagrama de Venn reemplazando los valores en la Ecuación 7; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se establece lo relacionado en la columna 6 de las tablas 19 y 20.

4.5 CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE DESLIZAMIENTO POR LLUVIAS EN CADA ZONA PILOTO

4.5.1 Probabilidad que ocurra la lluvia crítica. Las curvas “I-D-F” digitalizadas con base en la información suministrada por el IDEAM, que para el caso del presente estudio corresponde a la estación la Esmeralda y la estación Servitá, cercanas a las zonas piloto, determinan umbrales. Se procede, a partir del periodo de retorno adoptado según criterio propio para 2 y 50 años, a realizar el cálculo de la Ecuación 9. Probabilidad de ocurrencia de la lluvia crítica, cuyos valores se reflejan en las columnas 3 y 4 de la Tabla 20 y de la Tabla 21, relacionadas a continuación, para cada zona piloto.

Tabla 20. Cálculos para determinar la probabilidad de deslizamiento por lluvias en ZP1

CELDA	PENDIENTE %	P _{(Llc) Pr2 años}	P _{(Llc) Pr50 años}	P _{(Llc desliz) Pr2 años}	P _{(Llc desliz) Pr50 años}	Pendiente (rad)	F(s)	Pf(LL) ZP1 Pr=2 años	Pf(LL) ZP1 Pr=50 años
1	22.010	1.000	0.640	0.500	0.740	0.217	0.0218	0.011	0.010
2	74.153	1.000	0.640	0.500	0.740	0.638	0.8094	0.405	0.383
3	65.817	1.000	0.640	0.500	0.740	0.582	0.6828	0.341	0.323
4	81.757	1.000	0.640	0.500	0.740	0.685	0.8899	0.445	0.421
5	88.221	1.000	0.640	0.500	0.740	0.723	0.9348	0.467	0.443
6	9.859	1.000	0.640	0.500	0.740	0.098	0.0009	0.000	0.000
7	81.122	1.000	0.640	0.500	0.740	0.682	0.8844	0.442	0.419
8	19.678	1.000	0.640	0.500	0.740	0.194	0.0141	0.007	0.007
9	75.563	1.000	0.640	0.500	0.740	0.647	0.8268	0.413	0.392
10	49.943	1.000	0.640	0.500	0.740	0.463	0.3689	0.184	0.175
11	0.000	1.000	0.640	0.500	0.740	0.000	0.0000	0.000	0.000
12	0.080	1.000	0.640	0.500	0.740	0.001	0.0000	0.000	0.000
13	69.014	1.000	0.640	0.500	0.740	0.604	0.7359	0.368	0.349
36946	109.550	1.000	0.640	0.500	0.740	0.831	0.9915	0.496	0.470
36947	93.520	1.000	0.640	0.500	0.740	0.752	0.9591	0.480	0.454
36948	105.197	1.000	0.640	0.500	0.740	0.811	0.9867	0.493	0.467
36949	90.084	1.000	0.640	0.500	0.740	0.733	0.9445	0.472	0.447
36950	73.547	1.000	0.640	0.500	0.740	0.634	0.8015	0.401	0.380
36951	93.520	1.000	0.640	0.500	0.740	0.752	0.9591	0.480	0.454
36952	92.786	1.000	0.640	0.500	0.740	0.748	0.9563	0.478	0.453
36953	98.191	1.000	0.640	0.500	0.740	0.776	0.9735	0.487	0.461
PROMEDIO	1.346								

Fuente:: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

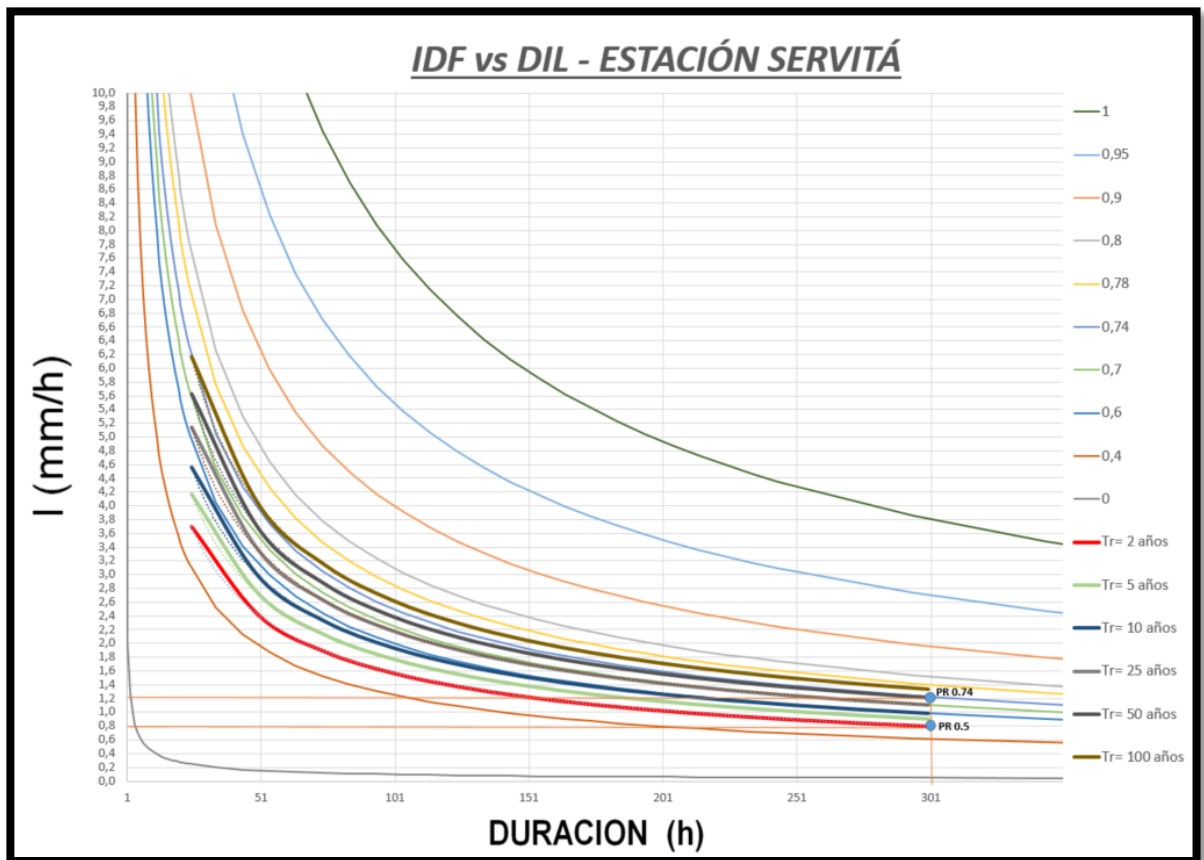
Tabla 21. Cálculos para determinar la probabilidad de deslizamiento por lluvias en ZP2

NUMERACION	PENDIENTE %	P _{(Llc) Pr2 años}	P _{(Llc) Pr50 años}	P _{(Llc desliz) Pr2 años}	P _{(Llc desliz) Pr50 años}	Pendiente (rad)	F(s)	Pf(LL) ZP2 Pr=2 años	Pf(LL) ZP2 Pr=50 años
5	23.287	0.073	0.069	1.000	1.000	0.229	0.0270	0.002	0.002
6	69.861	0.220	0.207	1.000	1.000	0.610	0.7491	0.165	0.155
7	77.965	0.246	0.231	1.000	1.000	0.662	0.8538	0.210	0.197
8	57.993	0.183	0.171	1.000	1.000	0.526	0.5336	0.097	0.092
9	58.715	0.185	0.174	1.000	1.000	0.531	0.5482	0.101	0.095
10	58.222	0.183	0.172	1.000	1.000	0.527	0.5383	0.099	0.093
11	66.214	0.209	0.196	1.000	1.000	0.585	0.6896	0.144	0.135
12	65.233	0.205	0.193	1.000	1.000	0.578	0.6725	0.138	0.130
13	14.174	0.045	0.042	1.000	1.000	0.141	0.0039	0.000	0.000
14	51.953	0.164	0.154	1.000	1.000	0.479	0.4097	0.067	0.063
15	66.016	0.208	0.195	1.000	1.000	0.583	0.6862	0.143	0.134
16	64.010	0.202	0.189	1.000	1.000	0.569	0.6504	0.131	0.123
17	14.174	0.045	0.042	1.000	1.000	0.141	0.0039	0.000	0.000
18	19.259	0.061	0.057	1.000	1.000	0.190	0.0130	0.001	0.001
19	68.193	0.215	0.202	1.000	1.000	0.598	0.7228	0.155	0.146
20	61.569	0.194	0.182	1.000	1.000	0.552	0.6045	0.117	0.110
17529	60.033	0.189	0.178	1.000	1.000	0.541	0.5745	0.109	0.102
17530	60.033	0.189	0.178	1.000	1.000	0.541	0.5745	0.109	0.102
17531	93.966	0.296	0.278	1.000	1.000	0.754	0.9607	0.284	0.267
17532	97.701	0.308	0.289	1.000	1.000	0.774	0.9723	0.299	0.281
17533	86.234	0.272	0.255	1.000	1.000	0.712	0.9230	0.251	0.235
17534	86.604	0.273	0.256	1.000	1.000	0.714	0.9254	0.252	0.237
17535	100.207	0.316	0.296	1.000	1.000	0.786	0.9782	0.309	0.290
17536	100.000	0.315	0.296	1.000	1.000	0.785	0.9777	0.308	0.289
17537	100.000	0.315	0.296	1.000	1.000	0.785	0.9777	0.308	0.289
17538	86.876	0.274	0.257	1.000	1.000	0.715	0.9270	0.254	0.238
17539	61.451	0.194	0.182	1.000	1.000	0.551	0.6022	0.117	0.109
17540	61.451	0.194	0.182	1.000	1.000	0.551	0.6022	0.117	0.109
17541	78.255	0.246	0.231	1.000	1.000	0.664	0.8569	0.211	0.198
17542	60.033	0.189	0.178	1.000	1.000	0.541	0.5745	0.109	0.102
17543	60.033	0.189	0.178	1.000	1.000	0.541	0.5745	0.109	0.102
PROMEDIO	3.111								

Fuente:: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

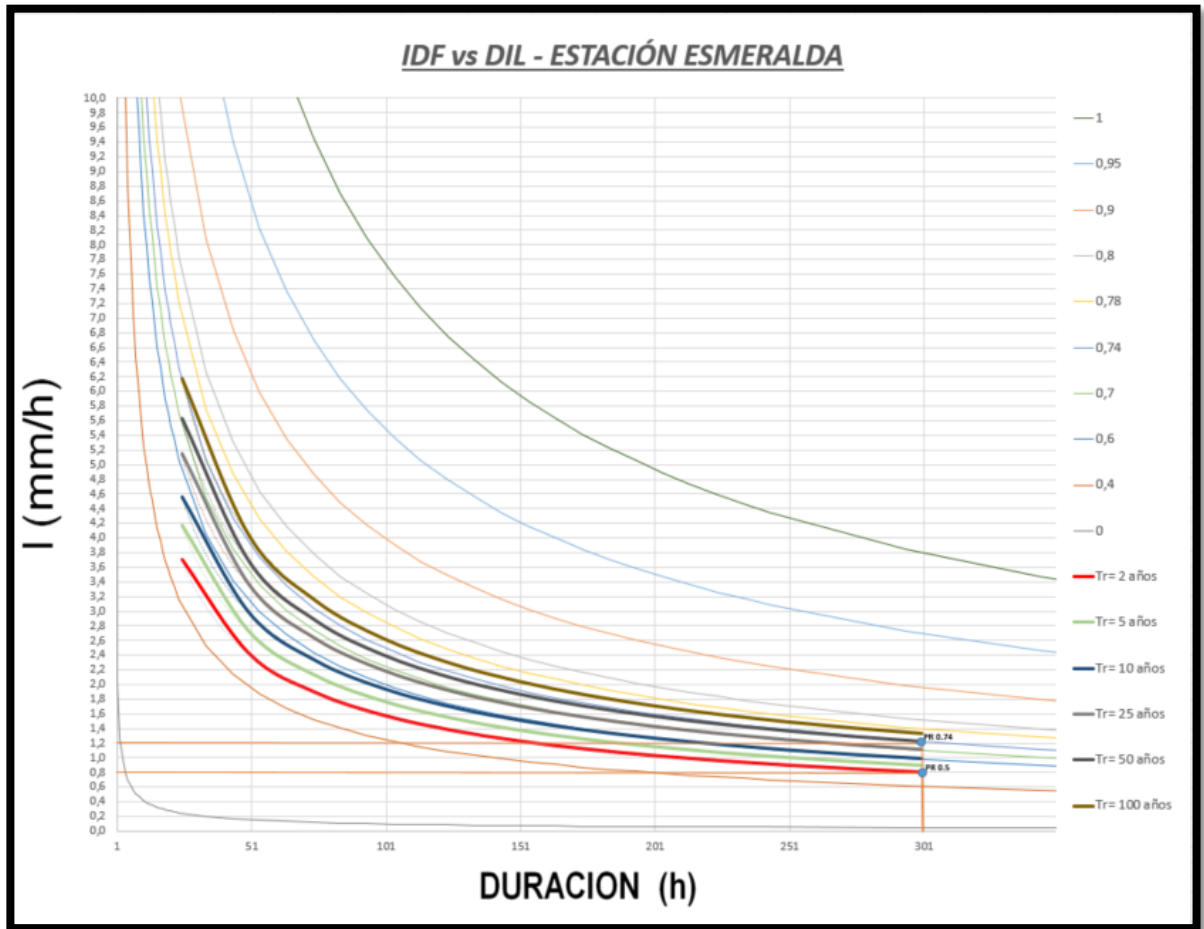
4.5.2 Probabilidad que la lluvia crítica genere deslizamientos. Para determinar la probabilidad de que la lluvia crítica genere deslizamientos se realiza el cruce de las densidades de deslizamientos definidas mediante la aplicación de la metodología del autor Kanji 2003, con la base de datos de los deslizamientos inducidos por lluvias actualizada 2019, y las curvas IDF suministradas por el IDEAM para las dos estaciones pluviométricas cercanas Servitá y la Esmeralda. tal como se indica a continuación, en las Imágenes 20 y 21.

Imagen 20. Cruce de curvas “I-D-F” en función de los periodos de retorno, con densidad de deslizamientos – Estación Servitá



Fuente:: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

Imagen 21. Cruce de curvas “I-D-F” en función de los periodos de retorno, con densidad de deslizamientos– Estación Esmeralda



Fuente: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

De acuerdo a lo anterior, se puede evidenciar en las dos tablas inmediatamente anteriores, que hay una curva “I-D-F” con un periodo de retorno que se cruza con una densidad de deslizamientos de la base de datos, cuyo valor es la probabilidad que esa lluvia crítica genere deslizamientos. Valores que se encuentran registrados en las columnas 5 y 6 de las tablas 20 y 21 del presente documento, para cada zona piloto.

4.5.3 Función de susceptibilidad. De la misma manera que se calculó para los sismos el valor de la función de susceptibilidad, se procede a realizar el cálculo para cada celda en las dos zonas piloto cuyos resultados se pueden evidenciar en las columnas 7 y 8 de la Tabla 20 y de la Tabla 21.

Dando alcance a lo establecido en la metodología para el cálculo de la probabilidad de falla por lluvias y reemplazando en la Ecuación 9. Probabilidad de ocurrencia de la lluvia crítica, los valores obtenidos en los numerales 4.5.1; 4.5.2 y 4.5.3 del presente capítulo, se relacionan en las columnas 7 y 8 de la Tabla 20 y de la Tabla 21, para cada zona de estudio

4.6 PROBABILIDAD CONJUGADA DE FALLA DE LOS EVENTOS DETONANTES SISMO Y LLUVIA

El cálculo de la probabilidad conjugada de falla, tal como se explicó en la metodología, se basa en la probabilidad de que ocurran los dos eventos (sismo y lluvia), pero solo uno sea el detonante del deslizamiento, mediante el teorema de conjuntos donde los dos eventos no son mutuamente excluyentes por lo tanto son independientes.

De acuerdo a lo anterior, reemplazando los valores obtenidos para la probabilidad total de falla por lluvia y sismos, en la Ecuación 1. Probabilidad Conjugada de falla, se obtienen los valores consignados en las columnas 4 y 7 de las Tablas 22 y 23 para los periodos de retorno de 2 y 50 años, en las dos zonas piloto, relacionadas a continuación,

Tabla 22. Probabilidad Conjugada detonantes sismo y lluvia en Zona Piloto 1

CELDA	<i>PfZP1 (LL)</i> <i>Pr=2 años</i>	<i>PfZP1(S)</i> <i>Pr=2 años</i>	<i>PT (f) ZP1</i> <i>Pr= 2 años</i>	<i>PfZP1 (LL)</i> <i>Pr50 años</i>	<i>PfZP1(S)</i> <i>Pr=50 años</i>	<i>PT (f) ZP1</i> <i>Pr= 50 años</i>
1	0.022	0.011	0.032	0.014	0.010	0.024
2	0.809	0.405	0.887	0.512	0.383	0.699
3	0.683	0.341	0.791	0.432	0.323	0.615
4	0.890	0.445	0.939	0.563	0.421	0.747
5	0.935	0.467	0.965	0.591	0.443	0.772
6	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001
7	0.884	0.442	0.936	0.559	0.419	0.744
8	0.014	0.007	0.021	0.009	0.007	0.016
9	0.827	0.413	0.898	0.523	0.392	0.710
10	0.369	0.184	0.485	0.233	0.175	0.367
36943	0.815	0.407	0.890	0.515	0.386	0.702
36944	0.815	0.407	0.890	0.515	0.386	0.702
36945	0.927	0.464	0.961	0.586	0.439	0.768
36946	0.991	0.496	0.996	0.627	0.470	0.802
36947	0.959	0.480	0.979	0.606	0.454	0.785
36948	0.987	0.493	0.993	0.624	0.467	0.800
36949	0.944	0.472	0.971	0.597	0.447	0.777
36950	0.802	0.401	0.881	0.507	0.380	0.694
36951	0.959	0.480	0.979	0.606	0.454	0.785
36952	0.956	0.478	0.977	0.604	0.453	0.784
36953	0.974	0.487	0.986	0.615	0.461	0.793

Fuente: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

Tabla 23. Probabilidad Conjugada detonantes sismo y lluvia en Zona Piloto 2

NUMERACION	<i>PfZP2(S)</i> <i>Pr=2 años</i>	<i>PfZP2 (LL)</i> <i>Pr=2 años</i>	<i>PT (f) ZP2</i> <i>Pr= 2 años</i>	<i>PfZP2(S)</i> <i>Pr=50 años</i>	<i>PfZP2 (LL)</i> <i>Pr50 años</i>	<i>PT (f) ZP2</i> <i>Pr= 50 años</i>
5	0.027	0.002	0.029	0.017	0.002	0.019
6	0.749	0.165	0.790	0.472	0.155	0.554
7	0.854	0.210	0.884	0.538	0.197	0.629
8	0.534	0.097	0.579	0.336	0.092	0.397
9	0.548	0.101	0.594	0.345	0.095	0.408
10	0.538	0.099	0.584	0.339	0.093	0.400
11	0.690	0.144	0.734	0.434	0.135	0.511
12	0.672	0.138	0.718	0.424	0.130	0.498
13	0.004	0.000	0.004	0.002	0.000	0.003
14	0.410	0.067	0.449	0.258	0.063	0.305
15	0.686	0.143	0.731	0.432	0.134	0.508
16	0.650	0.131	0.696	0.410	0.123	0.482
17533	0.923	0.251	0.942	0.582	0.235	0.680
17534	0.925	0.252	0.944	0.583	0.237	0.682
17535	0.978	0.309	0.985	0.616	0.290	0.727
17536	0.978	0.308	0.985	0.616	0.289	0.727
17537	0.978	0.308	0.985	0.616	0.289	0.727
17538	0.927	0.254	0.946	0.584	0.238	0.683
17539	0.602	0.117	0.649	0.379	0.109	0.447
17540	0.602	0.117	0.649	0.379	0.109	0.447
17541	0.857	0.211	0.887	0.540	0.198	0.631
17542	0.574	0.109	0.621	0.362	0.102	0.427
17543	0.574	0.109	0.621	0.362	0.102	0.427

Fuente: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

4.7 ZONIFICACION DE LA PROBABILIDAD DE FALLA POR SISMOS Y LLUVIAS

Para visualizar los cálculos probabilísticos realizados en el presente estudio, se realizó la correspondiente zonificación utilizando el programa "ArcGIS", el cual es un conjunto de productos de software en campo de SIG. producido y comercializado por ESRI bajo un nombre genérico, que permite agrupar varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

La determinación de distancias desde las celdas de susceptibilidad (Para cada Zona Piloto (ZP1 PR83+510 Ver y ZP2 PR86+500 Ver anexo C) a las celdas contribuyentes (fuentes sismogénicas) se realizó con el programa “ArcGIS”, lo cual se facilitó por la precisión en el cálculo de las distancias, tal como se evidencia en las tablas de cálculo relacionadas en el presente capítulo, las cuales son el soporte base de la información para las correspondientes zonificaciones.

4.7.1 Resultados de la zonificación de amenaza por sismos:

4.7.1.1 Probabilidad de falla debido a sismos para los 3 mecanismos: en función de los periodos de retorno correspondientes a 13, 20 y 38 años, tal como se puede observar en los anexos D, E, F; para la zona piloto 1 ,G, H I, para la zona piloto 2.

4.7.1.2 Probabilidad de falla debido a sismos en función de un solo mecanismo: para los periodos de retorno de 2 y 50 años, para cada zona piloto tal como se evidencia en los anexos J, K ,L; para la zona piloto 1 y M, N, Ñ. para la zona piloto 2.

4.7.2 Resultados de la zonificación de amenaza por lluvias:

4.7.2.1 Probabilidad de falla por lluvias: para periodos de retorno a 2 y 50 años, para cada zona piloto, tal como se evidencia en los Anexos O,P,Q,R., respectivamente.

4.7.3 Resultados de la zonificación de amenaza de falla conjugada: se puede evidenciar en los anexos S, T, U, V, donde se presentan los resultados de la probabilidad conjugada para un periodo de retorno de 2 años y 50 años, para cada una de las zonas piloto, respectivamente.

5 MODELACIÓN A PARTIR DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS EN SLIDE-2018 Y RS2-2019 LICENCIADOS POR ROCSCIENCE

La información suministrada por el INVIAS, cuenta con resultados de los sondeos realizados en la zona objeto del presente estudio, donde se registran resultados del ensayo SPT, a partir de los cuales se realiza la modelación de la zona piloto número 1 basados en el criterio de mayor probabilidad de falla al deslizamiento, como se verá más adelante, mediante los programas de análisis para la estabilidad de taludes SLIDE 2018 y RS2 – 2019 licenciados por Rocscience con fines específicos para el presente documento, mediante los cuales se logra correlacionar el comportamiento del talud, a partir de la influencia de los parámetros geotécnicos y la pendiente en el terreno, lo cual se describirá en el desarrollo del trabajo descrito en el cuerpo del presente documento.

Para llevar a cabo la modelación de las zonas piloto objeto del presente estudio, se realizó el perfil geotécnico correspondiente, a partir de la topografía de la zona, para lo cual se establecieron secciones transversales en cada zona piloto, a partir de las cuales se definieron las secciones críticas de cada talud...Ver Tabla 24 y 25..., y se adoptaron las tres de mayor criticidad, plasmadas en los anexos W, X, del presente documento.

Tabla 24. Secciones transversales zona piloto 1

SITIO CRÍTICO PR83+500-PR83+850			
ABSCISA	DISTANCIA VERTICAL	DISTANCIA HORIZONTAL	PENDIENTE
K83+500	52.91	198.97	26.59%
K83+550	44.43	117.13	37.93%
K83+600	88.69	227.40	39.00%
K83+650	118.90	333.58	35.64%
K83+700	135.48	340.00	39.85%
K83+750	154.14	340.00	45.34%
K83+800	181.67	389.52	46.64%
K83+850	184.09	412.55	44.62%

Fuente: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

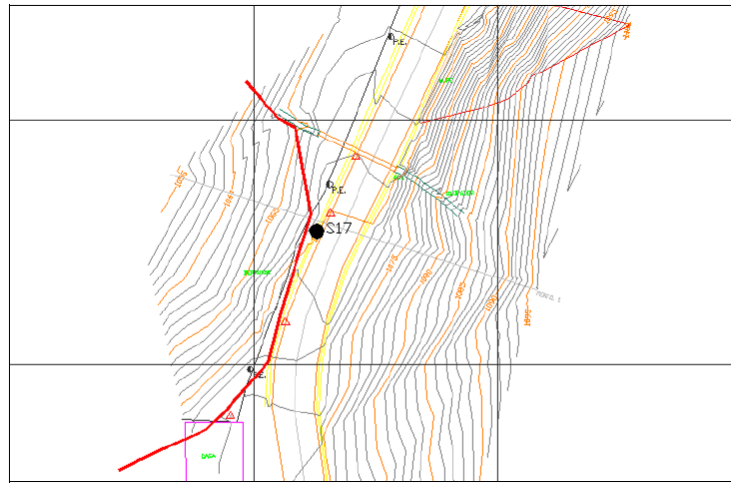
Tabla 25. Secciones transversales zona piloto 2

SITIO CRÍTICO PR86+500			
ABSCISA	DISTANCIA VERTICAL	DISTANCIA HORIZONTAL	PENDIENTE
K86+550	42.17	98.84	43%
K86+600	81.41	192.25	42%
K86+650	141.07	282.37	50%
K86+700	159.11	315.28	50%
K86+750	159.61	290.00	55%

Fuente: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

Con base en la información suministrada por el INVIAS TERRITORIAL META, de los estudios realizados en los sitios críticos a lo largo del trayecto Pipiral – Villavicencio, donde se encuentran ubicadas las dos zonas piloto objeto de este proyecto, se adoptan los parámetros geotécnicos mediante los sondeos realizados en cada una de las zonas localizados tal como se observa en la correlaciones realizadas a partir de los ensayos de SPT desarrollados dentro de la Consultoría mediante la cual se contrataron los estudios para determinar las zonas que requieren intervención.

Imagen 24. Sondeos Zona Piloto 2 Tomada del estudio de consultoría Año 2013



Fuente: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

Mediante los estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT, establecidos por las correlaciones definidas por el Profesor ALVARO J. GONZALEZ G. (1999), entre N y la resistencia efectiva de los suelos, a partir de la cual se determinan los valores para cada perfil geotécnico definido en función de los sondeos realizados por la Consultoría y suministrados por el INVIAS, para modelar la zona piloto 2 como criterio adoptado, considerando que la probabilidad total conjugada de falla para este sitio crítico tal como se evidencia en la zonificación presentada en el anexo U y V, corresponde al 100% y 83%, respectivamente siendo la mayor de las dos zonas piloto estudiadas.

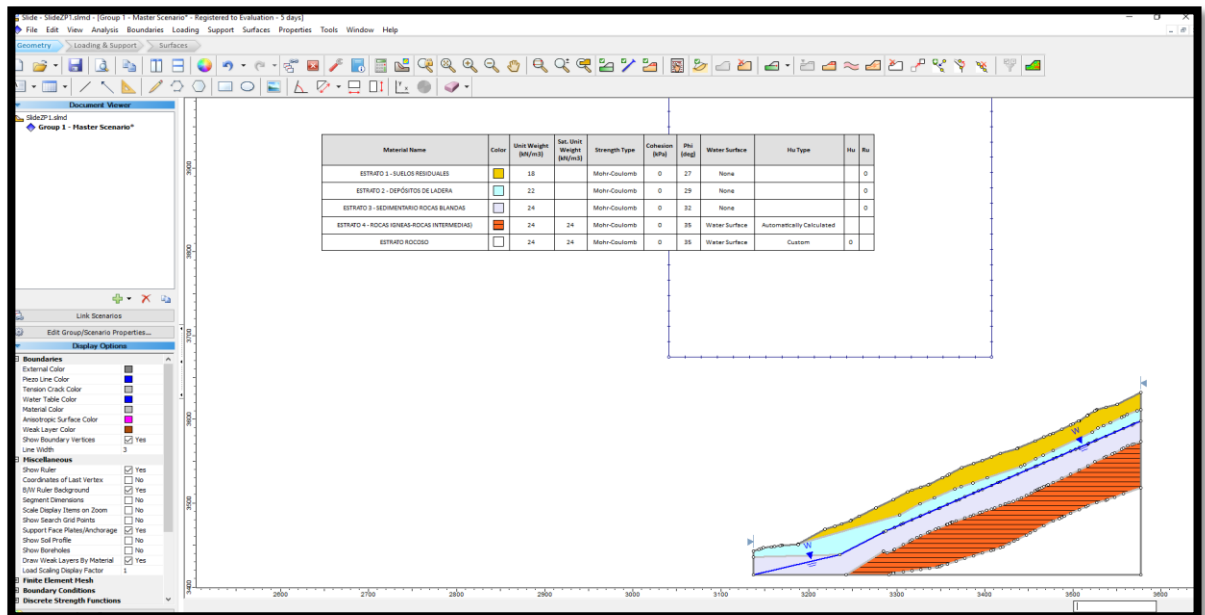
Tabla 26. Parámetros Geotécnicos Zona Piloto 2

PARÁMETROS GEOTÉCNICOS MATERIAL	PARÁMETROS DEFINIDOS ZP1					
	C' (KPa)	ϕ'	γ (KN/m ³)	E (Kg/cm ²)	u	G (Kg/cm ²)
ESTRATO 1 SUELOS RESIDUALES	0.00	27.00	18	41.25	0.20	17
ESTRATO 2 DEPÓSITOS DE LADERA	0.00	29.00	22	168.28	0.30	65
ESTRATO 3 (SEDIMENTARIAS - ROCAS BLANDAS)	0.00	32.00	24	200.00	0.30	77
ESTRATO 4 (ROCAS IGNEAS - ROCAS INTERMEDIAS)	0.00	35.00	24	200.00	0.30	77

Fuente: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

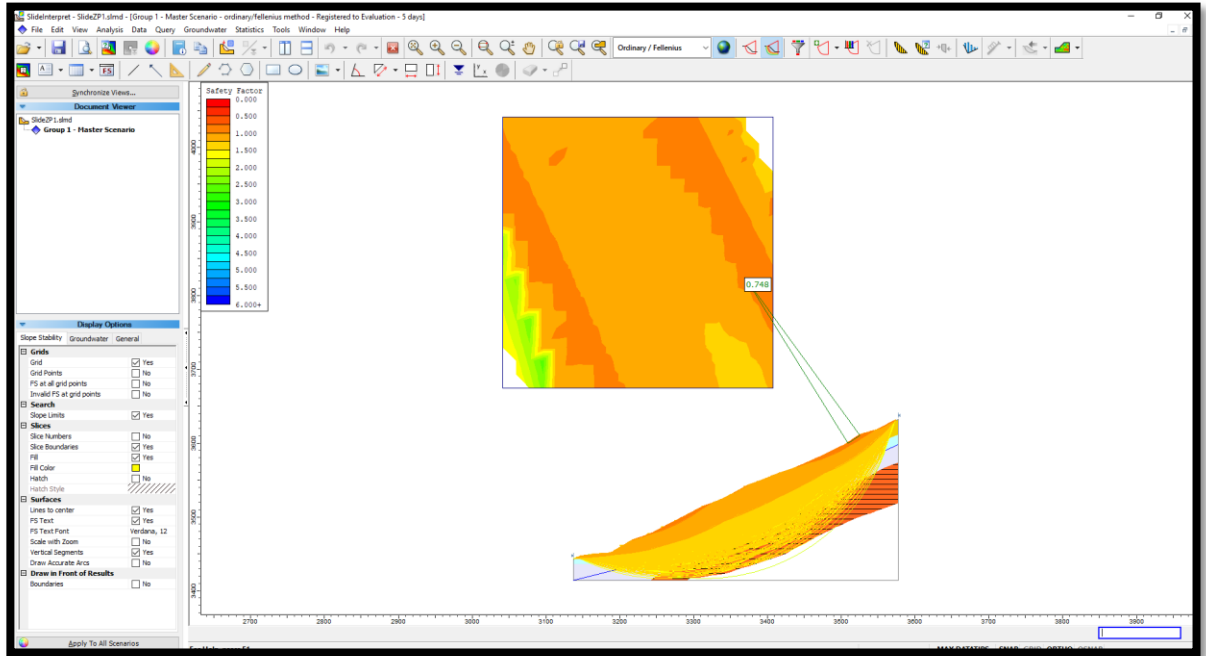
A partir de lo anterior y una vez obtenidos los valores consignados en la Tabla 26, se procede a realizar la modelación en el software SLIDE 2018, obteniendo para éste caso un factor de seguridad de 0.75 lo que coincide con el resultado obtenido por el análisis estocástico realizado, para las dos zonas en estudio a partir de la metodología como se puede evidenciar en los Anexos S, T, U, V, donde se obtienen resultados elevados de probabilidad de falla.

Imagen 25. Análisis de estabilidad – ZP2-SLIDE 2018



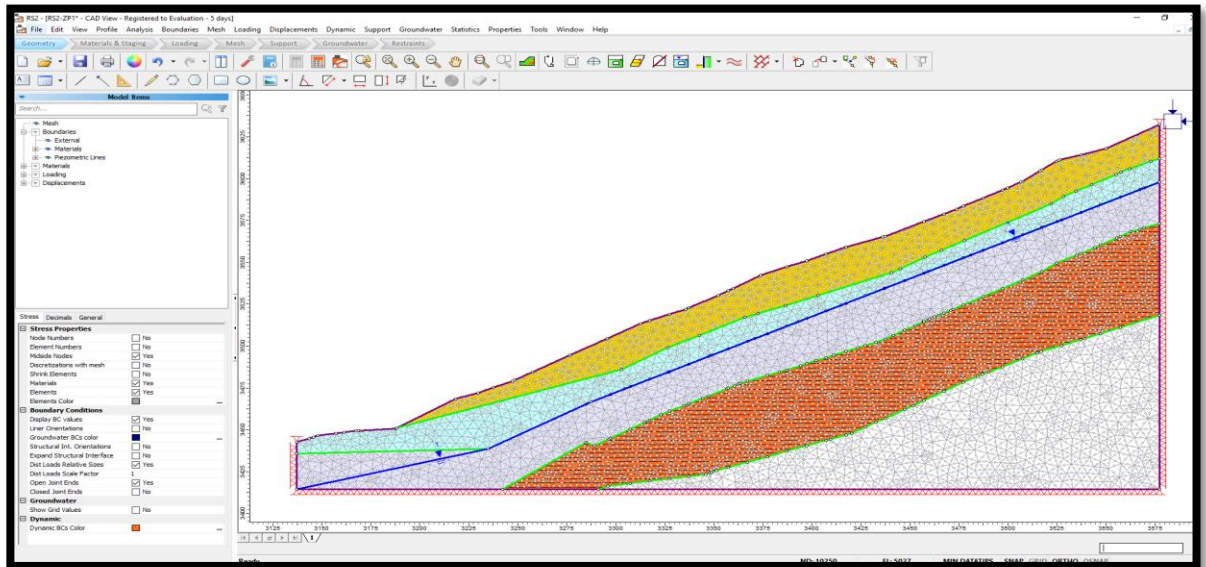
Fuente: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

Imagen 26. Determinación del factor de seguridad del talud – ZP2-SLIDE 2019



Fuente: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

Imagen 27. Determinación de la probabilidad de falla – ZP2-RS2 2019



Fuente: MOSQUERA, Yenny & MOSQUERA, Francis. 2019.

6 IMPACTO SOCIAL

El uso de herramientas tecnológicas a través de los programas (SLIDE Y RS2) y el control total de base de datos pluviométricos (curvas IDF y lluvia precedente) y tectónicos (peso unitario, ángulo de fricción, cohesión, topografía), información sobre plataformas digitales que reposan en los institutos del estado (IDEAM, SNET, NOAA, USGS, IRPI, IGAC) son el insumo más importante para inferir sobre los comportamientos de inestabilidad geológica y geotécnica de la ingeniería Colombiana y Mundial.

La teoría de la probabilidad conjugada cobra mucha importancia ya que todos los eventos ocurren con cierto grado de incertidumbre donde los detonantes de lluvia y sismo asociados a sus periodos de retorno pueden predecir un evento que genera amenaza y vulnerabilidad, siendo muy susceptibles a un desastre con medidas suficientes previas para reducir el riesgo.

Estos fenómenos climáticos y de sismogenia son valorados por cuanto inciden en la toma de decisiones para mitigar estos impactos naturales a través de proyectos de mitigación como son la prohibición de asentamientos poblacionales en ciertas áreas, rutas alternas de circulación y transporte, sistemas de drenaje superficial y subsuperficial (zanjas de coronación o drenes subterráneos), siembra y reforestación de las diferentes especies de plantas y árboles, sistemas de estabilidad de taludes, etc.

Con base en el análisis y evaluación de ocurrencia en la inestabilidad de los taludes, esta generación de reportes o informes deberán llegar a instancias del estado y/o agremiaciones ambientales con el fin de darlos a conocer y se implementen medidas de mitigación de riesgos y amenazas; con miras a implantar acciones correctivas y/o preventivas y se tome conciencia en conjunto con las comunidades adyacentes o vulnerables, de manera que sean incluidas en un plan de desarrollo o en un plan de acción de corto o mediano plazo donde se le incorporen recursos para su ejecución y desarrollo.

7 IMPACTO AMBIENTAL.

Dentro de los efectos negativos como consecuencia de la inestabilidad de los taludes ocasionados por fenómenos naturales como las precipitaciones altas o acumuladas que generan deslizamientos o de la misma manera los sismos, uno de los grandes fenómenos sería la destrucción de la capa vegetal y selvática (flora), la destrucción de las especies nativas (fauna), los cierres temporales de las vías, el daño de las estructuras (vías, acueductos, puentes), para los agricultores se afectarían sus tierras, la alteración del drenaje natural del terreno, cambios en las cuencas hidrográficas.

Una de las fortalezas que se deduzca de los aportes en el análisis de amenaza del deslizamiento por sismo o por lluvia para tenerlos en cuenta en los mapas de vulnerabilidad para zonas o áreas de alto riesgo por su baja o alta probabilidad de ocurrencia será la de zonificación ambiental para áreas protegidas.

La preservación de las reservas naturales como los bosques y selvas se convierten en una fuente salud y vida ya que son las encargadas de captar las moléculas de CO₂ atrapadas en la atmósfera y generar oxígeno a través de un fenómeno de compensación en el medio ambiente, de manera que la ocurrencia permanente de estos fenómenos naturales influye notoriamente en la estabilidad biológica de los seres vivos.

8 CONCLUSIONES

Se cumplió al 100% el objetivo general planteado para la realización del proyecto, mediante la realización de la evaluación de amenaza de deslizamiento por sismo y lluvia en dos sitios críticos de la vía Villavicencio – Pipiral a la altura del (PR83+510 – PR83+860) y (PR 86+500), aplicando el modelo estocástico (Rodríguez, 2003) y (Yepes, 2009).

Se alcanzó el objetivo específico propuesto de realizar la actualización de las bases de datos (Rodríguez, 2003) y (Yepes, 2009) de los deslizamientos inducidos por sismo a nivel mundial y lluvia en Colombia y Centro América hasta el año 2019, superando la fecha estimada inicialmente que correspondía al año 2017.

Tal como se menciona en el documento, se obtuvo información que permitió establecer el perfil geotécnico de la zona con parámetros de resistencia a partir de información secundaria suministrada por el INVIAS.

Se estableció la probabilidad de falla por sismos en función de (susceptibilidad, Ms, densidad de falla, fuentes sismogénicas), tal como se menciona en el capítulo 4. De los Resultados esperados, cuyo resultado indica valores en las zonas más críticas superiores al 96% de deslizamiento debido a la ocurrencia del sismo crítico para la zona piloto 1 Ver Anexo J y probabilidades en las zonas de mayor criticidad de más del 95% de falla para la zona piloto 2.

Se logró establecer la probabilidad de falla por lluvias en función (susceptibilidad, Ms, densidad de falla, lluvias críticas), de acuerdo a los dos periodos de retorno adoptados para 2 y 50 años, tal como se propuso en los objetivos específicos, cuyos valores para los sectores más críticos de la zona piloto 1 se encuentran entre 46% y 50% de probabilidad de ocurrencia de deslizamiento ante la ocurrencia de la lluvia crítica... Ver anexo O... y entre 34% y 60% para la zona piloto 2... Ver Anexo Q...

Además de los antecedentes mencionados, Rodríguez 2003, Yepes 2009, Mosquera 2019, han hecho un esfuerzo que se apoya en una base de datos histórica y a nivel mundial sin precedentes, cuyo principal objetivo es evitar sesgar al ingeniero a tres (3) niveles de amenaza, dándole la posibilidad que defina sus niveles para cada caso en particular. Esto es un problema que se presenta tanto en países desarrollados como en vía de desarrollo. Los esfuerzos deben continuar

porque las escuelas de ingeniería a nivel mundial nos han acostumbrado a hablar de factores de seguridad y de niveles de amenaza.

Los resultados obtenidos en el cálculo de la probabilidad de deslizamiento por los detonantes sismo y lluvia, permiten identificar para el presente caso de estudio tanto para la zona piloto 1, como para la zona piloto 2, que el detonante para que el talud se deslice ante la ocurrencia del evento crítico es el sismo, lo que valida la aplicación del modelo estocástico.y se convierte en la principal conclusión del presente documento.

9 PROBABILIDADES DE LA ZONA PILOTO 1

9.1 PROBABILIDAD DE FALLA POR LLUVIAS

Para la zona piloto1 la probabilidad de que ocurra un deslizamiento causado por la lluvia para un periodo de retorno de 2 años es del 50% en las zonas altas y bajas.

Para la zona Piloto 1 la probabilidad de que ocurra un deslizamiento ocasionado por lluvias para un periodo de retorno de 50 años es del 47% en las zonas altas y bajas.

9.2 PROBABILIDAD DE FALLA POR SISMOS

La Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 para el mecanismo 1 y un Periodo de retorno de 13 años es del 100%.

La Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 para el mecanismo 2 y un Periodo de retorno de 20 años es del 91%.

La Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 -Mecanismo 3 y un Periodo de retorno de 38 años es del 72%.

La Probabilidad Total de falla por Sismos en Zona Piloto 1 es del 100%.

La Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 Periodo de retorno 2 años es del 100% en zonas altas y bajas.

La Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 Periodo de retorno 50 años es de 63%

9.3 PROBABILIDAD CONJUGADA

Probabilidad Total de falla en Zona Piloto 1 para un periodo de Retorno 2 años es del 100%.

Probabilidad Total de falla en Zona Piloto 1 para un periodo de Retorno 50 años es del 80%.

10 PROBABILIDADES DE LA ZONA PILOTO 2

10.1 PROBABILIDAD DE FALLA POR LLUVIAS

La Probabilidad de falla por lluvias en Zona Piloto 2 para un periodo de Retorno 2 años es del 60%.

La Probabilidad de falla por lluvias en Zona Piloto 2 para un periodo de Retorno de 50 años es del 56%.

10.2 PROBABILIDAD DE FALLA POR SISMOS

La Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 para el mecanismo 1 y un Periodo de retorno de 13 años es del 98%.

La Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 para el mecanismo 2 y un Periodo de retorno de 20 años es del 92%.

La Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 -Mecanismo 3 y un Periodo de retorno de 38 años es del 73%.

La Probabilidad Total de falla por Sismos en Zona Piloto 2 es del 99%.

La Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 para un periodo de retorno de 2 años es de 100%.

La Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 para un Periodo de retorno de 50 años es de 63%.

10.3 PROBABILIDAD CONJUGADA

Probabilidad Total de falla en Zona Piloto 2 para un periodo de Retorno 2 años es del 100% en zonas altas y bajas.

Probabilidad Total de falla en Zona Piloto 2 para un periodo de Retorno 50 años es del 83%

11 MODELACIÓN EN SLIDE Y RS2 VS ZONIFICACIÓN EN ARCGIS

De acuerdo a los resultados obtenidos, de la modelación realizada para la Zona Piloto 1, como se observa en la Imagen 26 y 27, el factor de seguridad corresponde a 0.75 lo que coincide con el resultado obtenido por el análisis estocástico realizado a partir de la metodología propuesta por Rodríguez (2003) Yepes (2009) y Mosquera (2019). Estableciendo un comparativo con la Imagen 6. Donde se relaciona el mapa de amenaza sísmica de Colombia realizado por el Servicio Geológico Colombiano, se evidencia que los resultados presentan una correlación directa debido a que los sitios establecidos como zonas piloto para el presente estudio, se encuentran localizados en zona de amenaza alta.

Y finalmente, como cierre del presente estudio se logra determinar la probabilidad conjugada de falla bajo la ocurrencia de los dos eventos, independientes y mutuamente excluyentes, es decir, que la ocurrencia del uno no depende de la ocurrencia del otro, cuyos valores para la zona piloto 1 en cuyos sectores presentan mayor criticidad, corresponde a un 94% para un periodo de retorno de 2 años y de un 75% para el periodo de retorno de 50 años,

12 RECOMENDACIONES

Tomar muestras directas de la zona de estudio para realizar ensayos de laboratorio de suelos con el fin de conocer parámetros geotécnicos. (Composición mineralógica).

Utilizar métodos de probabilidad y estadística a través de programas computacionales para obtener resultados que involucren más variables.

Hacer comparaciones con otros métodos de estabilidad de taludes, utilizando parámetros de deformación.

Utilizar áreas más grandes para zonificación.

Realizar análisis de vulnerabilidad y riesgo.

Involucrar a todas las entidades nacionales e internacionales encargadas de la recolección y parametrización de las bases de datos tanto para los registros de sismos como para los registros de lluvias con el fin de obtener la información pronta y oportuna.

Organizar un grupo interdisciplinario en la investigación para que realizar análisis en todas las áreas que se puedan involucrar. (Ambiental-Geotecnista-Economista-especialista en modelación (ARCGIS)).

Sugerir a las entidades del estado que en materia de estaciones pluviométricas y sismográficas, instalen y mantengan los equipos de monitoreo en el mejor estado conectados a una tecnología satelital con el fin de monitorear las zonas de alta vulnerabilidad y riesgo.

13 BIBLIOGRAFÍA

Aneas, S. (2000). Riesgos y peligros: una visión desde la geografía. *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*. Retrieved from <http://www.ub.edu/geocrit/sn-60.htm>

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS]; Instituto Colombiano de Geología y Minería. (1996). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia*. Bogotá.

Baecher, G & Christian, J. (2003). Reliability and Statistics. *Geotechnical Engineering*.

Christian, John; Ladd, Charles; Baecher, G. (1994). Reliability Applied to Slope Stability Analysis. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(12), 2180–2207.

Cortés, Ricardo; De la Espriella, R. (1990). Apuntes sobre la Tectónica del Valle del Río Negro al Oriente de Cundinamarca. *Geología Colombiana*, (17), 133–142. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/31483/1/30661-111034-1-PB.pdf>

Ering & Sivakumar. (2016). *Probabilistic back analysis of rainfall induced landslide- A case study of Malin landslide*. India, June: A case study of Malin landslide.

Escobar, Carlos; Duque, G. (2017). *Análisis de estabilidad de taludes*. Retrieved from <https://cutt.ly/3wWPHxF>

Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas [UNISDR]. (2009). *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres* (pp. 5–42). pp. 5–42. Retrieved from www.preventionweb.net

Garzón, E. (2016). Propuesta metodológica para la evaluación de la amenaza de corredores viales de montaña de la red vial nacional. In *Actas de Ingeniería* (Vol. 2). Retrieved from <http://fundacioniai.org/actas>

Gomis, A. (2007). *Localización de terremotos a partir de formas de onda*. Retrieved from <https://cutt.ly/cwWhf2X>

Gutenberg, B; Richter, C. (1954). *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*.

Hadj-hamou, T; Kavazanjian, E. (1985). Stability of Gentle Infinite Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 111(6), 681–697.

Harr, M. (1987). Reliability Based Design in Civil Engineering. In *McGraw Hill*.

Instituto Nacional de Investigaciones Geológico [INGEOMINAS]. (1998). *Memoria Explicativa Geología plancha 266 Villavicencio*. Villavicencio, Meta: INGEOMINAS.

Instituto Nacional de Vías [INVIAS]. (2013). *Plancha 266 Villavicencio. Plano Geología Regional Sitios Críticos PR 82+410 a PR 93+500*. Villavicencio, Meta.

Jiménez, Gabriel; Viáfara, J. (2011). *Análisis 3D de drenes horizontales para la estabilización de taludes*. Retrieved from <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7305/tesis507.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mesa, Milena; Tejeda, E. (2018). Análisis de la estabilidad de taludes en terraplenes mediante los métodos de equilibrio límite y el método de elementos finitos. *Revista Cubana de Ingeniería*, IX(1), 49–56.

Mesa, M. (2013). *Métodos empírico - mecanista empleados para el cálculo del factor de seguridad para la estabilidad de taludes*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/303247199_METODOS_EMPIRICO_-_MECANISISTA_EMPLEADOS_PARA_EL_CALCULO_DEL_FACTOR_DE_SEGURIDAD_PARA_LA_ESTABILIDAD_DE_TALUDES

Mora, S; Vahrson, W. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geology*, 31(1), 49–58.

Paris, Gabriel; Romero, J. (1994). *Fallas activas en Colombia* (Vol. 34). Retrieved from <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/Seriadas/Documents/BoletinVolumen34No2-3.pdf>

Rodríguez, C; Torres, A; Leon, E. (2004). Landslide Hazard in El Salvador. *Proceedings of ECI Conference on Geohazards*, 1–10.

Rodríguez, C. (2003). *Models For Earthquake and Rain Induced Landslide*. Universidad Nacional De Colombia. Norwegian geotechnical Institute. Trabajo de postgrado. Bogotá.

Rodríguez, M. (2005). Tectónica de placas. In *Biología marina y oceanografía: Geomorfología y tectónica de placas* (p. 124). Retrieved from <https://cutt.ly/Dwlmx48>

Rueda, K; García, H; Teheran, K; Torrenegra, W. (1988). Sistema de fallas Guaicaramo. *Servicio Geológico Colombiano*. Retrieved from <https://cutt.ly/ZwlmNV0>

Sen Cai, Jing; Jim Yeh, Tian; Yan, E; Hong Hao, Yong; Yang Huang, Shao; Chau Wen, J. (2017). *Uncertainty of rainfall-induced landslides considering spatial variability of parameters*.

Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.

Suarez, J. (2008). Análisis de estabilidad. In *Deslizamientos: Análisis geotécnico* (1st ed., pp. 127–170). Retrieved from www.erosion.com.co

Vargas, Juan; Cortés, F. (2013). *Planificación de la gestión del riesgo de desastres de acuerdo a la ley 1523 de 2012, en la zona urbana del municipio de Útica Cundinamarca*. Retrieved from <https://cutt.ly/EwWkMxv>

Vega; Johnny; Hidalgo, C. (2014). Estimación de la amenaza por deslizamientos detonados por sismo y lluvia. *Revista EIA*, 11(22), 103–117. <https://doi.org/10.24050/REIA.V11I22.676>

Yepes, J. (2009). *Implementación de un modelo estocástico para evaluar amenazas de deslizamientos* (Universidad Nacional de Colombia. Trabajo de maestría). Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/8434/1/296483.2009.pdf>

14 ANEXOS

(Véase archivo N°2)

Anexo A. Planta general con zonas piloto y fuentes sismogénicas

Anexo B. Planta específica zona piloto 1

Anexo C. Planta específica zona piloto 2

Anexo D. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 -Mecanismo 1 Periodo de retorno 13 años

Anexo E. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 -Mecanismo 2 Periodo de retorno 20 años

Anexo F. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 -Mecanismo 3 Periodo de retorno 38 años

Anexo G. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 -Mecanismo 1 Periodo de retorno 13 años

Anexo H. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 -Mecanismo 2 Periodo de retorno 20 años

Anexo I. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 -Mecanismo 3 Periodo de retorno 38 años

Anexo J. Probabilidad Total de falla por Sismos en Zona Piloto 1

Anexo K. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 Periodo de retorno 2 años

Anexo L. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 1 Periodo de retorno 50 años

Anexo M. Probabilidad Total de falla por sismos en Zona Piloto 2

Anexo N. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 Periodo de retorno 2 años

Anexo Ñ. Probabilidad de falla por sismos en Zona Piloto 2 Periodo de retorno 50 años

Anexo O. Probabilidad de falla por lluvias en Zona Piloto 1 Periodo de Retorno 2 años

Anexo P. Probabilidad de falla por lluvias en Zona Piloto 1 Periodo de Retorno 50 años

Anexo Q. Probabilidad de falla por lluvias en Zona Piloto 2 Periodo de Retorno 2 años

Anexo R. Probabilidad de falla por lluvias en Zona Piloto 2 Periodo de Retorno 50 años

Anexo S. Probabilidad Conjugada de falla en Zona Piloto 1 Periodo de Retorno 2 años

Anexo T. Probabilidad Conjugada de falla en Zona Piloto 1 Periodo de Retorno 50 años

Anexo U. Probabilidad Conjugada de falla en Zona Piloto 2 Periodo de Retorno 2 años

Anexo V. Probabilidad Conjugada de falla en Zona Piloto 2 Periodo de Retorno 50 años

Anexo W. Secciones críticas definidas zona piloto 1

Anexo X. Secciones críticas definidas zona piloto 2

Anexo Y. Modelación de pendientes en tres dimensiones