



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de metodologías para la inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes

Carlos Alberto Jiménez Maduro

Universidad Nacional de Colombia
Área curricular de ingeniería civil y agrícola
Bogotá D.C, Colombia
2017

Análisis de metodologías para la inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes

Carlos Alberto Jiménez Maduro

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Geotecnia

Director:

Ingeniero Civil, Ph.D Guillermo Eduardo Ávila Álvarez

Línea de Investigación:

Análisis, confiabilidad y riesgo asociado al entorno

Universidad Nacional de Colombia

Área curricular de ingeniería civil y agrícola

Bogotá D.C, Colombia

2017

Resumen

La estrecha relación entre lluvias y deslizamientos especialmente en ambientes tropicales como Colombia, generan efectos devastadores en términos económicos y humanitarios. Adicionalmente, estos efectos son cada año más comunes debido a la expansión urbana sobre áreas montañosas con estabilidad precaria. En tal sentido, se justifica la ejecución de un análisis de metodologías que permita la inclusión de las variables hidrológicas y las implicaciones que estas tienen sobre la infiltración en taludes y por lo tanto sobre la estabilidad del sistema. A partir de una revisión bibliográfica detallada se definen y caracterizan las principales tendencias dentro de los estudios, posteriormente se evalúan las variaciones y afectaciones en la estabilidad del sistema con base en una modelación matemática a través de herramientas computacionales para un talud hipotético variando los valores de conductividad hidráulica para seis tipos de materiales, obtenida a partir del modelo de Van Genutchen (1980) y las características de las precipitaciones. Posteriormente, se comparan resultados de amenaza implementando diferentes metodologías y se discute la influencia real de las lluvias sobre los deslizamientos y las características que estas deben tener para afectar los taludes modelados.

Palabras clave: (Lluvia, deslizamientos, conductividad hidráulica, estabilidad de talud).

Contenido

	Pág.
Contenido	
1. Análisis y contextualización del problema	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Aspectos Hidrológicos	6
1.2.1 Evento Detonante.....	7
1.2.2 Acciones de la lluvia sobre la ladera.....	13
1.2.3 Reacciones de la ladera.....	19
1.3 Aspectos Geológicos	26
1.3.1 Tipo de Material.....	27
1.3.2 Geomorfología.....	31
1.3.3 Parámetros Geotécnicos	33
1.4 Proceso de análisis y otros aspectos a tener en consideración.....	35
1.4.1 Cobertura y uso del suelo.....	35
1.4.2 Nivel de detalle con el que se realiza el análisis (Escala de trabajo)	37
1.4.3 Condición de frontera	39
1.5 Análisis de resultados	39
2. Metodologías planteadas para la inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes	41
2.1 Métodos Heurísticos	41
2.2 Métodos Estadísticos.....	44
2.3 Métodos determinísticos	49
2.4 Métodos Combinados	53
2.5 Análisis y comparación de la forma de inclusión de los parámetros hidrológicos en las metodologías aplicadas en diferentes estudios.	56
2.5.1 Búsqueda y Recopilación de la información	56
2.5.2 Análisis de los parámetros hidrológicos y su forma de incorporación dentro de la estabilidad de taludes en los 35 estudios seleccionados.	56
2.5.3 Comparación de los diferentes estudios analizados y su forma de evaluación del efecto del agua en la estabilidad de taludes.	70
2.6 Análisis de resultados	81
3. Modelación numérica de la infiltración en taludes	86
3.1 Modelación de flujos en suelos parcialmente saturados.....	86
3.2 Esquema general de evaluación.	89
3.2.1 Modelos de los materiales y propiedades.....	90

3.2.2	Condiciones de borde	93
3.3	Resultados	95
3.3.1	Análisis de las afectaciones que ejercen las variables hidrológicas más utilizadas sobre la infiltración en taludes.	95
4.	Comparación de los resultados de amenaza obtenidos para una misma zona implementando diferentes metodologías.	113
4.1	Características principales del área a evaluar.	113
4.1.1	Morfometría.	114
4.1.2	Aspectos relevantes (antecedentes)	115
4.1.3	Cartografía base	116
4.1.4	Componente geológico.	117
4.1.5	Componente geotécnico	124
4.1.6	Propiedades hidráulicas.....	135
4.2	Guía metodológica SGC-UN (2015). (Método combinado).....	136
4.2.1	Análisis de estabilidad con la inclusión de parámetros hidrológicos.....	140
4.3	Modelación matemática de la infiltración. (Método Determinístico)	163
4.4	Estimación de la amenaza variando la relación de presión de poros. (Método Determinístico).....	165
4.5	Análisis de resultados	166
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	170
5.1	Conclusiones.....	170
5.2	Recomendaciones.....	176

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1- 1. Ciclo Hidrológico. Fuente propia.	8
Figura 1- 2. Ejemplos de Curvas IDF. Fuente propia.....	11
Figura 1- 3. Relación entre la precipitación media mensual en El Valle de Aburrá y los movimientos en masa del periodo 1989-2008. (Fuente: Aristizábal, et al. 2011).	12
Figura 1- 4 Variación en la infiltración por permeabilidad del suelo. Fuente propia.	15
Figura 1- 5. Infiltración, percolación y flujos de agua (Cahuana y Morales, 2009, Modificado)	18
Figura 1- 6. Presiones de poro sobre una superficie de falla potencial para diferentes condiciones de drenaje (Fuente: Lembo Fazio y Ribacchi 1990).	21
Figura 1- 7. Distribución típica de saturación y niveles freáticos en un talud (Modificado de: Lembo Fazio y Ribacchi 1990).	22
Figura 1- 8. Variación del factor de seguridad con respecto a la profundidad del frente húmedo. (Fuente: Cho, 2009).	25
Figura 1- 9. Resumen de tipos de deslizamientos asociados al tamaño de grano. (Fuente: Wang y. Sassa, 2003).....	35
Figura 2- 1 Comparación entre los puntajes obtenidos de los componentes hidrológicos y Geológico – Geotécnico dentro de un mismo estudio.	75
Figura 2- 2. Comparación de los artículos evaluados según el método aplicado.....	76
Figura 2- 3. Parámetros hidrológicos utilizados.....	77
Figura 2- 4. Análisis de la información de precipitaciones.	78
Figura 2- 5. Estimación de las lluvias diarias vs estimación de las lluvias antecedentes.	78
Figura 2- 6. Número de días antecedes evaluados para el análisis de la lluvia antecedente.	79
Figura 2- 7. Fuente de la información hidrológica distinta a los registro de precipitación.	80
Figura 2- 8. Número de estudios que evalúan diferentes características que influyen en los análisis de estabilidad con inclusión de parámetros hidrológicos.....	80
Figura 3- 1. Esquema general de análisis	89
Figura 3- 2 Función del contenido volumétrico de agua.	91
Figura 3- 3 Función de la conductividad hidráulica.....	91
Figura 3- 4. Gráficas de Profundidad del nivel freático vs tasa de infiltración para cada material y diferentes ángulos.	97

Figura 3- 5 Tasa de infiltración necesaria para saturar diferentes materiales con pendiente constante. 98

Figura 3- 6 Tiempo requerido para saturar diferentes materiales con pendiente constante. 99

Figura 3- 7 Ascenso del nivel freático en 12 días de lluvias constantes para diferentes materiales..... 100

Figura 3- 8 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad menor a $1e^{-7}$..102

Figura 3- 9 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad hidráulica de $7e^{-7}$ (deslizamientos superficiales)..... 103

Figura 3- 10 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad hidráulica de $7e^{-7}$ (deslizamientos profundos)..... 104

Figura 3- 11 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad hidráulica de $1e^{-6}$ (deslizamientos superficiales)..... 105

Figura 3- 12 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad hidráulica de $1e^{-6}$ (deslizamientos profundos)..... 106

Figura 3- 13 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad hidráulica de $1e^{-5}$ (deslizamientos superficiales)..... 107

Figura 3- 14 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad hidráulica de $1e^{-4}$ (deslizamientos superficiales)..... 108

Figura 3- 15 Análisis de estabilidad asociado a los ascensos del nivel freático deslizamientos profundos. (Material: Limo). 109

Figura 3- 16 Análisis de estabilidad asociado a los ascensos del nivel freático deslizamientos superficiales. (Material: Limo)..... 110

Figura 3- 17 Análisis de estabilidad asociado a los ascensos del nivel freático deslizamientos superficiales. (Material: Arena)..... 111

Figura 4 - 1 Localización específica de la zona objeto de estudio. (JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015) 114

Figura 4 - 2 Ubicación de las laderas en el área objeto de estudio. (JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015) 115

Figura 4 - 3 Mapa topográfico de la zona (JAM Ingeniera y Medio Ambiente S.A.S, 2015) 117

Figura 4 - 4 Localización del barrio Villa Julia en el mapa geológico escala 1:100.000 de INGEOMINAS (1998). Verde= Formación Quebradagrande; rosa pálido (Qto)= Depósitos de cenizas; azul pálido (Qfl)= Flujos. (Ingeominas 1998, Modificado JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015). 118

Figura 4 - 5 Mapa geológico a escala 2.000 de Villa Julia, Verde= Formación Quebradagrande; Amarillo= Depósitos Aluviales, Rosado= Lleno antrópico. (CORPOCALDAS 2001, modificado por. JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015). 120

Figura 4 - 6 Corte geológico típico de la zona de estudio. (JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015) 123

Figura 4 - 7 Exploración realizada junto con información secundaria. (JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015). 126

Figura 4 - 8 Zonificación Geotécnica (JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015).	131
Figura 4 - 9 . Modelo Geotécnico 1 (JAM Ingeniera y Medio Ambiente S.A.S, 2015)	132
Figura 4 - 10 Modelo Geotécnico 2 (JAM Ingeniera y Medio Ambiente S.A.S, 2015)	133
Figura 4 - 11 Ubicación en planta de los perfiles 1 y 2	134
Figura 4 - 12 Ensayo de permeabilidad in situ. (JAM Ingeniería y medio ambiente S.A.S, 2015)	135
Figura 4 - 13 Plataforma pública SIMMA, del servicio geológico colombiano	140
Figura 4 - 14 Polígonos de Thiessen para las estaciones ubicadas en el casco urbano de la ciudad de Manizales (JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015).....	141
Figura 4 - 15 Curvas IDF estación EMAS.....	145
Figura 4 - 16 Representación de los términos utilizados para calcular la profundidad del nivel freático asociada a un periodo de retorno de 20 años. (Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgos por movimientos en masa, 2015).....	149
Figura 4 - 17 Parámetros para el análisis de amenaza básica en unidades tipo suelo (Servicio Geológico Colombiano, 2015)	150
Figura 4 - 18 Curvas LDF obtenidas.	157
Figura 4 - 19 Periodos de retorno asociados a la Precipitación mínima.	159
Figura 4 - 20 Plataforma R Project, utilizada para la definición de $\phi(\beta)$	162
Figura 4 - 21 Análisis de estabilidad para las zonas de Villa Julia	164

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2- 1. Cuadro resumen de los métodos de análisis de inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes	55
Tabla 2- 2. Evaluación de los estudios, forma de incorporación y análisis de los parámetros hidrológicos.	58
Tabla 2- 3. Calificación a la evaluación de los parámetros de cada estudio analizado. ..	72
Tabla 3- 1 Características hidráulicas para cada material.	96
Tabla 3- 2 Valores de precipitación reales de la estación Emas	100
Tabla 3- 3 Aspectos a evaluar según la conductividad hidráulica y posición del nivel freático de un talud.	112
Tabla 4 - 1 Localización de los Sondeos y Profundidad.....	125
Tabla 4 - 2 Propiedades del material de relleno.....	127
Tabla 4 - 3 Propiedades del material Limo arenoso.....	127
Tabla 4 - 4 Propiedades del Suelo residual	128
Tabla 4 - 5 Propiedades de la roca meta sedimentaria meteorizada	129
Tabla 4 - 6 Parámetros del modelo geológico-geotécnico.	135
Tabla 4 - 7 Valores de los coeficientes a, b, c, d para el cálculo de las curvas intensidad – duración – frecuencia, IDF, para Colombia.....	143
Tabla 4 - 8 Precipitación Maxima diaria multianual.....	143
Tabla 4 - 9 Curvas IDF estación EMAS	144
Tabla 4 - 10 Precipitación infiltrada por año en mm.....	147
Tabla 4 - 11 Datos definidos para la modelación.....	151
Tabla 4 - 12 Resultados de la zona objeto de estudio.	151
Tabla 4 - 13 Primer y segundo momento ponderado	153
Tabla 4 - 14 Valores de los coeficientes k_1 a k_4	155
Tabla 4 - 15 Presentación de los Coeficientes.....	155
Tabla 4 - 16 Valores de P,E, N, para la estación EMAS	155
Tabla 4 - 17 Resultados de Mot obtenidos.	156
Tabla 4 - 18 Valores obtenidos para diferentes Z_w	158
Tabla 4 - 19 Resultados obtenidos para la estimación del parámetro hidrológico en deslizamientos superficiales.	159
Tabla 4 - 20 Datos obtenidos para la determinación de la probabilidad de falla.....	162

Tabla 4 - 21 Criterio para la clasificación de la amenaza en función de la probabilidad anual de falla.	163
Tabla 4 - 22 Clasificación de la amenaza (Escala Detallada)	163
Tabla 4 - 23 Clasificación de la amenaza con modelación matemática	165
Tabla 4 - 24 Clasificación de la amenaza variando el Ru	165

Introducción

La inclusión racional de parámetros hidrológicos en los análisis de estabilidad de taludes, es un problema con una complejidad marcada en la variabilidad que presentan las condiciones y características de los elementos que conforman la ladera o intervienen en su estado de equilibrio.

La carencia de un método realmente eficiente y aceptado, ha generado una gran cantidad de investigaciones que han configurado un volumen de información difícil de manejar. Además, no se cuenta con un registro claro de las diferentes metodologías y cómo estas han ayudado a satisfacer la incertidumbre.

En el presente estudio se identifican los parámetros hidrológicos más influyentes en la estabilidad de taludes, las simplificaciones que se realizan para poder ejecutar el análisis y las limitaciones de los mismos.

Inicialmente se realizó una contextualización del problema que demuestran los procesos físicos que producen la inestabilidad contribuyendo al estado del conocimiento.

Posteriormente, un total de 35 estudios fueron seleccionados en razón de los aportes que presentan para el análisis, la accesibilidad y disponibilidad de la información, la innovación con que tratan el problema y su publicación reciente para su respectiva calificación y evaluación. Los mismos fueron comparados y se buscan algunas condiciones que indiquen las tendencias generales de la investigación en cuanto a las variables hidrológicas empleadas, la forma de incorporación y el tipo de análisis de estabilidad que se realiza.

Con la información de los artículos, trabajos de grado, proyectos de tesis, entre otros, analizados para la calificación, se elaboró una base de datos individual con las ventajas, desventajas y un pequeño resumen de la metodología planteada, junto con sus referencias, para que en próximas investigaciones estas puedan ser tomadas en cuenta y de ser posible validadas o calibradas para el territorio nacional.

Por otra parte, se analizan las implicaciones reales que ocurren en un talud sometido a lluvias variando diferentes aspectos como la conductividad hidráulica y características de las lluvias escogidas en función de la importancia que estas ostentan en las principales tendencias evaluadas.

Finalmente se determinan los niveles de amenaza asociados a El Barrio Villa Julia, en la ciudad de Manizales, únicamente considerando el factor hidrológico (condición estática), implementado dos metodologías combinadas y dos determinísticas que varían en cómo evalúan el componente hidrológico.

1. Análisis y contextualización del problema

La relación entre lluvias y deslizamientos es un tema bastante amplio y complejo de manejar debido a que estos dependen de una gran cantidad de factores que además tienen una marcada variabilidad espacial y temporal. Sobre esto último recae la mayor incertidumbre o limitación de los métodos planteados hoy en día, y para conocer el estado del arte en el cual estamos, es primordial conocer con qué información se cuenta.

En este orden de ideas, a continuación se presenta un compendio de la información más relevante generada en los últimos años junto con los avances científicos en el entendimiento de los factores que intervienen en la estabilidad de taludes y las reacciones que dentro de este se generan, debido a la integración de la lluvia al sistema.

1.1 Antecedentes

Los procesos de remoción en masa son unos de los principales agentes que modifican y configuran la superficie de la tierra, estos pueden ser evidenciados alrededor de todo el planeta y con seguridad seguirán teniendo ocurrencia a través de los años. Los procesos son más comunes en algunas localidades con ciertas características geológicas, climáticas, sísmicas, entre otros, en las cuales existe la presencia de un mayor número de factores que contribuyen a la iniciación del movimiento y que se traduce en elevadas probabilidades de que este tenga lugar.

Con el crecimiento desmedido de la población a nivel mundial, la “batalla” por tierras habitables ha generado una exagerada presión urbanística hacia zonas con estabilidad precaria, aunado a esto la intervención antrópica, los conflictos con el uso de suelo y la ausencia de políticas claras y certeras de planificación territorial y ordenamiento urbano, (Arango, 2000), fortalecen de manera inevitable el poder destructivo de estos procesos que en los últimos años han tenido lamentablemente una cantidad considerable de

consecuencias que en muchos casos pudiesen haber sido evitadas con un mejor entendimiento de las causas de estos movimientos.

Los procesos de remoción en masa se han convertido en uno de los desastres naturales más comunes y que anualmente están incrementando el número de pérdidas humanas y pérdidas económicas asociada al deterioro o demolición total de infraestructura o grandes gastos públicos y privados para el mantenimiento o arreglo de estructuras afectadas, las consecuencias mencionadas han puesto el tema en una posición relevante en cuanto al análisis de la problemática a nivel mundial. Países como Estados Unidos, Italia, Japón entre otros, generan constantemente investigaciones avanzadas y con una aceptable precisión en la predicción y entendimiento de estos procesos, sin obtener todavía altos niveles de confiabilidad.

Sin lugar a duda, actualmente las mejores metodologías para el estudio de los deslizamientos están asociadas a regiones donde sus condiciones físicas, geológicas y climáticas, las convierten en laboratorios naturales para la ocurrencia de estos procesos.

Los procesos de remoción en masa, en general, están influenciados en menor o mayor grado por el efecto del agua, siendo este el factor más importante dentro de la estabilidad. No obstante, el talud es conveniente verlo como un sistema donde muchos componentes influyen en el equilibrio y aunque un factor va a ser el detonante del movimiento (por lo general agua o sismo), este únicamente va a tener lugar gracias a la combinación de factores contribuyentes al movimiento como la geología, geomorfología, cobertura y usos del suelo, entre otros, que necesariamente deben ser evaluados si queremos aproximarnos a la realidad.

Según Montero (2005), la red vial colombiana es afectada hasta en un 70% por estos procesos, siendo las zonas más vulnerables en muchas ocasiones las más alejadas de la atención de los medios lo cual repercute de manera considerable en la calidad de vida de los habitantes.

Tan solo en el departamento de Antioquia se contabilizaron 405 deslizamientos detonados presumiblemente por lluvias entre el periodo de 1929 a 1999 (Moreno, et al. 2006), con movimientos que alcanzaron un total acumulado de alrededor de 20.000 m³ de material removido.

En Colombia se hace especial énfasis en la necesidad de contar con una base de datos sistemática que permita hacer un inventario y valoración de las pérdidas económicas y humanas ocurridas. Para tal fin existen algunas bases de datos como Desinventar desarrollado por la red de estudios sociales en prevención de desastres de América latina o la plataforma SIMMA (sistema de información sobre movimientos en masa) del Servicio Geológico Colombiano. Estas bases de datos son importantes a pesar de que en algunos casos hace falta un mayor detalle sobre los mecanismos que generan los procesos.

Hasta el momento, Colombia cuenta con un registro de deslizamientos que se inicia en mayo de 1986, con el contrato de investigación celebrado entre el Ministerio de Obras Públicas y Transporte y la Universidad Nacional de Colombia, con el cual luego de tres años de labores logro inventariar 225 movimientos en 4000 km de red vial. Trabajos posteriores fueron realizados y se dio una fuerte iniciativa por el estudio e investigación de estos procesos para tratar de generar una mayor confiabilidad en los resultados, siendo tema de congresos, tesis y artículos. (Castellanos, 1996).

Aunque no son muchos los trabajos que analizan la relación lluvia y deslizamientos en Colombia, el tema se ha venido trabajando mediante el método heurístico, el cual ha servido como herramienta para solucionar temporalmente las problemáticas relacionadas a los procesos de remoción en masa en algunas localidades.

Debido a que no son muchos los trabajos que relacionen de manera racional y objetiva las precipitaciones como factor detonante en los procesos de remoción en masa, en Colombia y en muchas otras partes del mundo, el método heurístico conocido también como “criterio de experto” ha servido de herramienta para estimar los efectos de la lluvia en la estabilidad de taludes.

Westen (1995), propone un modelo de distribución de la amenaza ayudado con SIG para Manizales, donde apoyándose en un modelo hidrológico (2D), logra estimar las variaciones del nivel freático en áreas extensas influenciadas por precipitaciones. Otro trabajo importante es el de Castellanos (1996), donde realiza un análisis de la relación lluvia – deslizamientos y construye un inventario con una descripción geotécnica de algunos deslizamientos ocurridos en el país hasta ese momento para posteriormente escoger los más representativos y de los cuales contaba con la mejor información pluviométrica para someterlo a un procesamiento estadístico que arrojó resultados no concluyentes sobre la

lluvias críticas para 7 regiones del país; así mismo, un par de años más tarde, se presenta el trabajo de Terlien (1998), donde evalúa de forma estadística y determinística la susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos en una zona obteniendo las posibles variaciones del agua subterránea.

Mayorga (2003), enfoca una investigación hacia la determinación de umbrales de lluvias críticas a partir del estudio de la causa directa, integrándolo a un factor de susceptibilidad del medio físico para aplicarlo en sistemas de alerta temprana. Igualmente, Moreno, et al (2006), estudian la relación existen entre las precipitaciones y los deslizamientos para Antioquia, donde proponen además umbrales de lluvias antecedentes (para 3 y 15 días).

Aristizábal, et al, (2011) aplican una metodología en el Valle de Aburrá en busca de un sistema de alerta temprana, llevan a cabo el método de umbrales empíricos de lluvias (estadístico) con base en un inventario de deslizamientos de más de 408 eventos y el acceso a información de diferentes estaciones de lluvias con resolución temporal de cada 15 minutos, estimaron precipitaciones acumuladas (5,10,15,30,60,90 días) y a corto plazo (1,3,5,7,días).

Colombia tiene estaciones de medición de lluvias que proporcionan buena información, adicionalmente, fenómenos climáticos como el de La Niña que azotó el país en el 2011 con una gran intensidad, generó varios deslizamientos que sirven de base de datos. Toda esta información debe utilizarse para lograr aproximaciones más efectivas que produzcan resultados confiables, aplicando, mejorando, calibrando o creando nuevas metodologías de vanguardia.

1.2 Aspectos Hidrológicos

La ocurrencia de un deslizamiento en términos generales está influenciado en menor o mayor medida por las variaciones en las condiciones de estabilidad que produce el agua al ingresar al sistema. Es por esto que es tan importante tenerlo en cuenta en los métodos de análisis.

No obstante, es necesario aclarar que así como el agua actúa en casi todos los deslizamientos, este tampoco es el único factor que contribuye o desencadena los

movimientos por lo que debe combinarse con otros aspectos como la pendiente, las condiciones litológicas y las propiedades geomecánicas.

1.2.1 Evento Detonante

La lluvia se presenta como el principal evento detonante dentro de la estabilidad de taludes, esta puede afectar el sistema de manera inmediata con la ocurrencia de un evento torrencial o por medio de lluvias acumuladas que vayan aumentando el nivel del agua hasta llegar a una profundidad crítica o generadora de inestabilidad.

Sin embargo, existen variables y procesos que pueden afectar de manera diferente el talud por lo que se hace necesario en pro del entendimiento del problema explicarlos en los siguientes numerales.

- **Ciclo hidrológico.**

Uno de los conceptos básicos en Hidrología es el Ciclo Hidrológico, que supone un movimiento o transferencia de masas de agua, de forma continua, en diferentes estadios o etapas.

Enfocando la información al objeto del estudio, se puede decir que del agua que alcanza la superficie de la tierra, una porción será retenida en las irregularidades del terreno (almacenamiento superficial) o se unirá y escurrirá hacia los ríos (escorrentía superficial). Mientras que otra porción de la precipitación se infiltra en el terreno, en los poros y fisuras (Custodio y Llamas, 1983), denominada en este estudio como **precipitación efectiva**.

Vale la pena aclarar que del agua que se infiltra, una parte se evacuará del sistema debido a la evaporación y uso en las actividades biológicas de los seres vivos (transpiración), la mayoría de las metodologías estudiadas no estiman esta pérdida debido a su difícil determinación.

A continuación se presentan los conceptos más importantes dentro del estudio que tienen que ver con el evento detonante y sus variaciones:

Escorrentía: es la proporción de precipitación que fluye superficialmente sobre el suelo. Cuanto más pronunciadas, impermeables y desprovistas de vegetación son las laderas y más copiosas las precipitaciones, mayor es la parte de las mismas que se convierte en escorrentía. Una lluvia fuerte puede producir abundante escorrentía, pero una llovizna

ligera puede absorberse en forma casi total en el suelo antes de que produzca mucha escorrentía, porque el suelo a menos que esté muy seco, se satura en forma relativamente rápida y no puede absorber más agua.

Infiltración: es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. En una primera etapa satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie, y posteriormente superado cierto nivel de humedad, pasa a formar parte del agua subterránea, saturando los espacios vacíos. La Figura 1- 1, presenta un esquema general de la circulación del agua y el espacio donde tienen lugar los diferentes procesos anteriormente explicados.

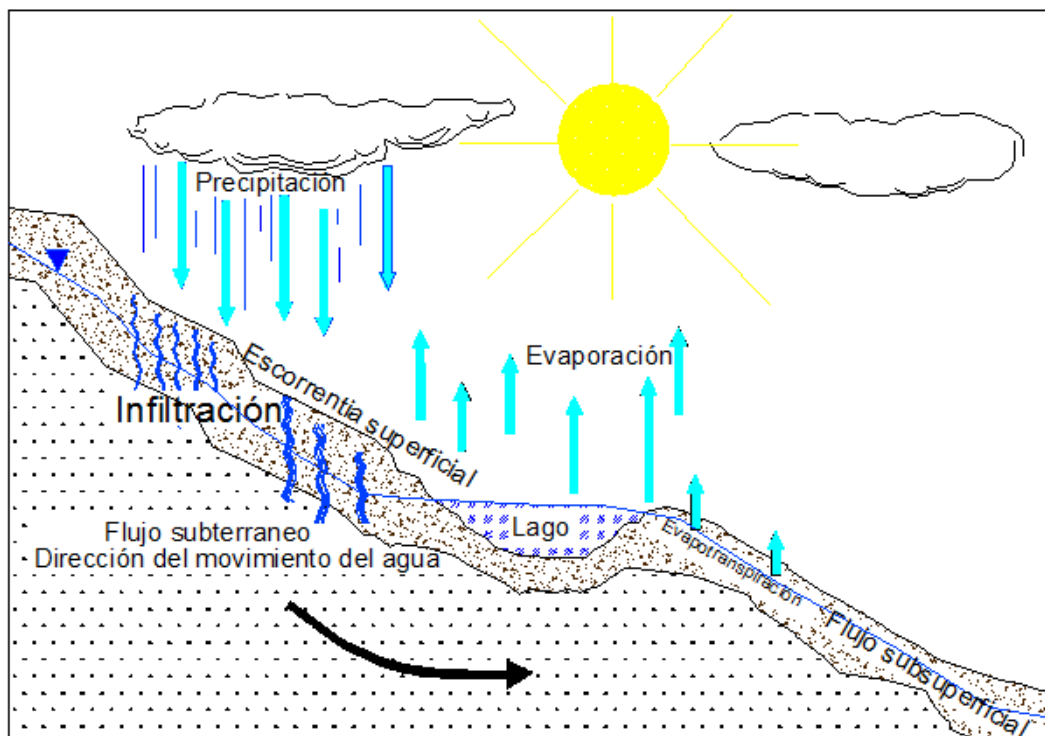


Figura 1- 1. Ciclo Hidrológico. Fuente propia.

Una tasa de infiltración alta puede producir problemas por el incremento de la presión de poros y con esto la disminución de los esfuerzos efectivos, que se traducen en mayores probabilidades de iniciar un deslizamiento. En el caso de que el talud llegue a saturarse, la facilidad o dificultad con que el talud se autodrena depende de las formaciones geológicas circundantes. La presencia de mantos permeables de evacuación de agua favorece superlativamente su estabilidad (Aparicio, 1989).

Es importante tener presente que no es solamente la presencia del agua lo que genera los cambios en la presión de poros sino también sus condiciones de flujo subsuperficial.

- **Precipitaciones**

Es el producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie de la Tierra. Ocurre cuando la atmósfera (que es una gran solución gaseosa) se satura con el vapor de agua, y el agua se condensa y cae de la solución (es decir, precipita). El aire se satura a través de dos procesos: por enfriamiento y añadiendo humedad.

A pesar de que dentro del término precipitación se engloba también el estado sólido (nieve), a fines del presente estudio será evaluada la que comúnmente produce la mayor influencia sobre los taludes que es en estado líquido.

- **Aguaceros Torrenciales**

Este término puede ser utilizado para identificar una caída especialmente copiosa de lluvia, abundante, intensa, de muchos mm en poco tiempo (gran intensidad), a veces produce anegaciones, inundaciones y desastres ecológicos. Este tipo de lluvias es común en las zonas de montaña y tienen una ocurrencia en un tiempo de una o pocas horas. En el factor precipitación se debe tener en cuenta la intensidad de la máxima lluvia o de las lluvias más fuertes en una hora, en un día, mes o año y en algunas ocasiones la cantidad de lluvia en períodos menores a una hora.

Debe diferenciarse el caso de zonas de precipitación alta (abundante oferta hídrica en todo el año), en las cuales el nivel freático es alto y constante y un corte del terreno puede producir la falla casi inmediata del talud; y el caso de lluvias esporádicas o épocas de lluvias torrenciales, en donde el suelo no saturado es saturado de repente, produciéndose la falla, además es ciertamente posible la aparición de niveles freáticos colgados los cuales son más comunes en terrenos de material impermeable y se caracterizan por ser independientes del nivel freático general, esto crean una condición altamente favorable para la iniciación de movimientos superficiales.

Se ha comprobado en muchos estudios que el movimiento de una ladera puede depender de la ocurrencia de las lluvias. Pero la falla de un talud puede ser atribuida a una época de lluvias muy larga o puede ser suficiente un solo aguacero, dependiendo de muchos otros

factores como los parámetros del material involucrado, la forma y longitud de la ladera, la cobertura y uso del suelo, las lluvias antecedentes, entre otros. Es por esto, que no pueden ser atribuidos los deslizamientos únicamente a la ocurrencia de lluvias sino que es necesario caracterizar adecuadamente estas precipitaciones para poder asociarlos como condición detonante o contribuyente de la inestabilidad.

- **Condiciones antecedentes de lluvia**

La ocurrencia de las lluvias durante varios días consecutivos (3, 15, 30, 45 o 60 días generalmente) ocasiona que los taludes no alcancen a drenar el agua infiltrada de una lluvia cuando ocurre la siguiente, produciendo un proceso de acumulación progresiva de agua subterránea y por ende un ascenso del nivel freático. Esto puede provocar deslizamientos debido a las altas concentraciones de agua. Es necesario, entender y trabajar las lluvias por sus características de diferentes maneras ya que, estos eventos generan procesos diferentes en el interior del sistema, en este caso aumentando progresivamente la presión de poros, elevando el nivel freático, generando disminución de la succión matricial, resistencia al corte y esfuerzos efectivos. La principal consideración de este tipo de lluvias es que para cuando ocurre el “próximo” evento de precipitación, las condiciones iniciales del sistema están alteradas y tentativamente más próximas a la cantidad de lluvia crítica para que ocurra el deslizamiento, es aquí donde yace su mayor relevancia dentro del análisis.

Esta información se puede obtener con datos diarios de lluvias que normalmente están disponibles en zonas con amenaza de deslizamientos.

- **Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)**

Se denominan Curvas IDF a aquellas que representan duraciones en abscisas y alturas de precipitación en las ordenadas, en la cual, cada curva representada corresponde a una frecuencia (o período de retorno), de tal forma que las gráficas de las curvas IDF representan la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiendo todos los de una misma curva, a un idéntico período de retorno (Chow, et al.1994).

La construcción de estas curvas, generalmente se tiene como el primer paso en la evaluación de la estabilidad de laderas en metodologías que incluyan el factor hidrológico, adicionalmente, representan la herramienta más utilizada para intentar predecir la

ocurrencia de los deslizamientos, con la implementación de los umbrales de lluvias y su asociación con sistemas de alerta temprana.

Para un mismo período de retorno, al aumentarse la duración de la lluvia disminuye su intensidad media (Ver Figura 1- 2), la formulación de esta dependencia es empírica y se determina caso por caso, con base en los datos observados directamente en el sitio de estudio o en otros sitios próximos con las características hidrometeorológicas similares. La frecuencia de las precipitaciones intensas puede caracterizarse mediante períodos de retorno, calculados como la inversa de la probabilidad de excedencia (Larsen y Simon, 1993).

Uno de los principales inconvenientes para determinar las curvas IDF es que no se dispongan de registros continuos de lluvias y por lo tanto se desconozca la duración de la tormenta.

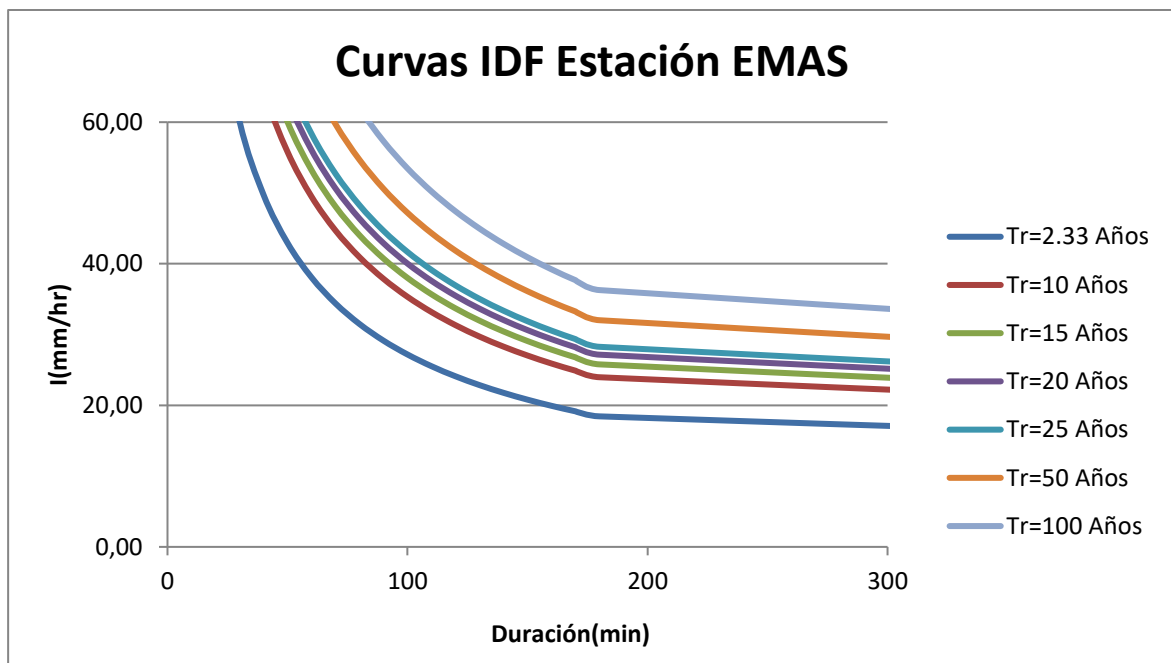


Figura 1- 2. Ejemplos de Curvas IDF. Fuente propia

- **Intensidad.** Se define como la cantidad de agua que cae por unidad de tiempo en un lugar determinado. En estudios realizados (Larsen y Simmon, 1993), se ha encontrado que la intensidad de lluvia (mm/h) que produce deslizamiento depende de la duración de la lluvia (horas).

- Duración. La duración del evento de lluvia o tormenta varía ampliamente, oscilando entre unos pocos minutos a varios días. El tiempo que se requiere para que una lluvia produzca un deslizamiento es mayor en una arcilla que en un material arenoso debido a las diferencias de infiltración. Este tiempo es inversamente proporcional a la permeabilidad para valores constantes de los demás parámetros (Pizarro, et al. 2003).

Aristizábal, et al (2011), indican sobre la relación lluvia deslizamiento en el Valle de Aburrá, que se pudo definir que las precipitaciones presentan una gran influencia directa para los deslizamientos de la zona, pudiéndose catalogar inclusive como un carácter bimodal el de los deslizamiento al igual que la lluvias con relación en los meses del año, así lo demuestra la Figura 1- 3.

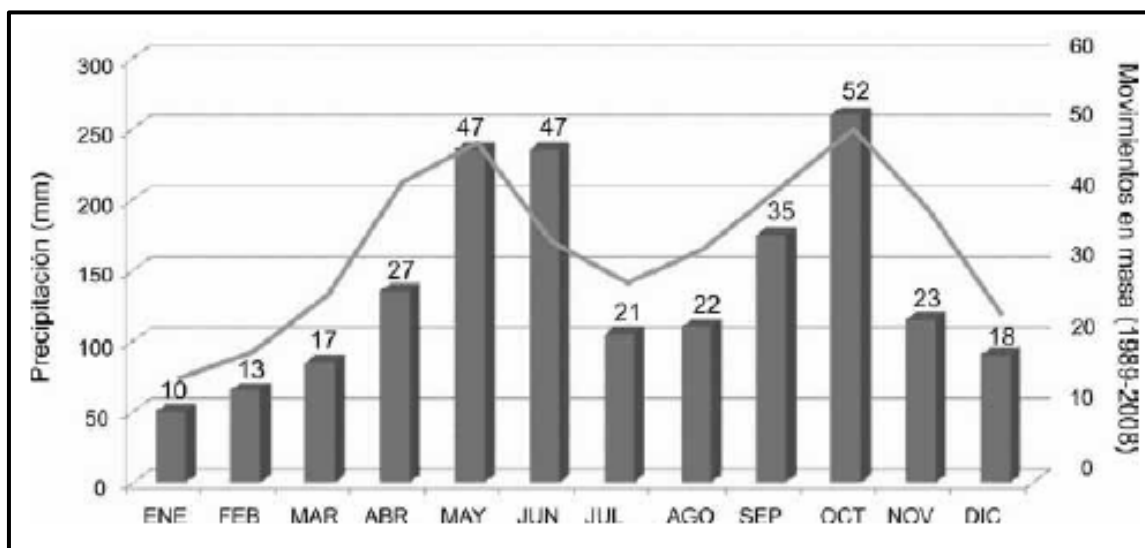


Figura 1- 3. Relación entre la precipitación media mensual en El Valle de Aburrá y los movimientos en masa del periodo 1989-2008. (Fuente: Aristizábal, et al. 2011).

No obstante, el comportamiento que se demuestra en la Figura 1- 3, donde los picos de deslizamientos se corresponden con los picos de precipitación, son poco comunes ya que en muchas ocasiones se presentan desfases entre las lluvias y los deslizamientos.

Esto es evidencia de la complejidad del problema e importancia de la evaluación de la influencia de la lluvia antecedente, otro tema bastante estudiado dentro de esta relación pero que depende en gran forma de la permeabilidad, tamaño de grano y características del material superficial que conforma el talud.

1.2.2 Acciones de la lluvia sobre la ladera

Debido a la influencia de un evento lluvioso sobre o en las cercanías del talud, se generan ciertas acciones que producen afectaciones en la condición de estabilidad de la ladera.

Es en estos procesos que se centra el estudio, tratando de conocer a ciencia cierta qué pasa y cómo se puede estimar las variaciones de las fuerzas resistivas al movimiento debido al ingreso de cierta cantidad de agua al talud.

Básicamente, el agua influye en el talud de dos formas diferentes:

- Cuando el agua incrementa gradualmente la presión de poros disminuyendo la resistencia se generan deslizamientos profundos, asociados en la mayoría de los casos con condiciones antecedentes de lluvia.
- Cuando se producen eventos de precipitación de gran intensidad, que provocan una reducción de la resistencia al corte debido a la disminución de la cohesión aparente, generando normalmente mecanismos de falla superficiales y subparalelos a la topografía del talud (Aristizábal, et al. 2011).

▪ **Infiltración y Permeabilidad**

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Muchos factores influyen en la tasa de infiltración, incluyendo la condición de la superficie del suelo y su cobertura vegetal, las propiedades del suelo, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica, y el contenido de agua presente en el suelo.

Los factores que influyen la tasa de infiltración pueden manejar amplios rangos de variabilidad espacial y temporal, aun dentro de áreas relativamente pequeñas por lo que se considera un proceso muy complejo que puede describirse solo de manera aproximada mediante ecuaciones matemáticas (Chow, et al. 1994).

La tasa de infiltración (f), se expresa en pulgadas por horas o centímetros por hora, es la tasa a la cual el agua entra al suelo en la superficie. Este punto es de relevante importancia dentro del estudio ya que define la lámina de agua capaz de entrar a desestabilizar el talud, y puede conducir a dos condiciones diferentes de frontera:

- Superficie del talud inundada. Es cuando la intensidad de la lluvia produce un encharcamiento de la superficie debido a que la cantidad de agua que precipita es

mayor a la que puede infiltrarse dentro del suelo. Por lo tanto, solamente parte de la lluvia se filtra y el resto se convierte en escorrentía, en este caso, la condición de frontera es que la presión hidrostática en la superficie del terreno es igual a 0 equivalente a saturación del 100% y la tasa de infiltración es igual a la tasa potencial del suelo, no depende de la lluvia.

- Infiltración controlada. Se produce cuando la intensidad de la lluvia es menor que la tasa de infiltración en el talud. En este caso, la infiltración es controlada por la intensidad de la lluvia debido a que se considera que toda el agua que precipite, ingresa al sistema y puede llegar a generar desestabilización.

No obstante, toda el agua que precipite por encima de la capacidad de infiltración del suelo, no generará consecuencias desfavorables sobre la estabilidad del talud (al menos en corto plazo) debido a que esta no ingresa al sistema sino que transita ladera abajo en forma de escorrentía superficial.

De igual forma, la complejidad en el tema de infiltración y cómo afecta este el nivel freático que es el que termina por detonar el movimiento se centra en la gran cantidad de factores que intervienen y determinan la cantidad de agua que penetra o se filtra en la tierra, entre estos los más importantes son:

La cantidad de agua que penetra o se filtra en el suelo queda determinada por varios factores:

1. Duración de la precipitación.
2. Intensidad de la precipitación. Cuanto más rápidamente cae la lluvia, menos agua penetra, pues se satura la superficie del terreno y no permite la infiltración rápida. Mientras más lenta la lluvia, habrá más infiltración y menos escorrentía.
3. Pendiente del terreno. La infiltración es mayor en terrenos más planos a los que corresponden velocidades de escurrimiento superficial menores.
 4. La permeabilidad de los suelos y las rocas. A mayor permeabilidad mayor tasa de infiltración.
 5. La estructura de suelos y rocas, especialmente en lo que se refiere a fracturación, estratigrafía y la secuencia de los estratos permeables y los

impermeables. El tipo de material o suelo del talud va a determinar la capacidad de infiltración.

6. Cantidad y tipo de vegetación. En general, genera beneficios en la estabilidad por la extracción de una fracción del agua que se infiltra por esto debe tenerse en cuenta para los análisis, igualmente la cantidad y tipo de vegetación permite tener amplios rangos de variabilidad del valor extraído (Suarez, 1998).

La permeabilidad se puede determinar con ensayos de laboratorio o ensayos de campo pero también existen relaciones empíricas que permiten asociar algunos valores de coeficiente de permeabilidad según el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS según sus siglas en inglés), de esta manera se tiene una aproximación de la permeabilidad conociendo el tamaño de grano del material, en la Figura 1- 4, se presenta esquemáticamente las diferencias asociadas a la cantidad de agua que se infiltra en el suelo para un mismo periodo de tiempo, variando el tamaño de la partícula.

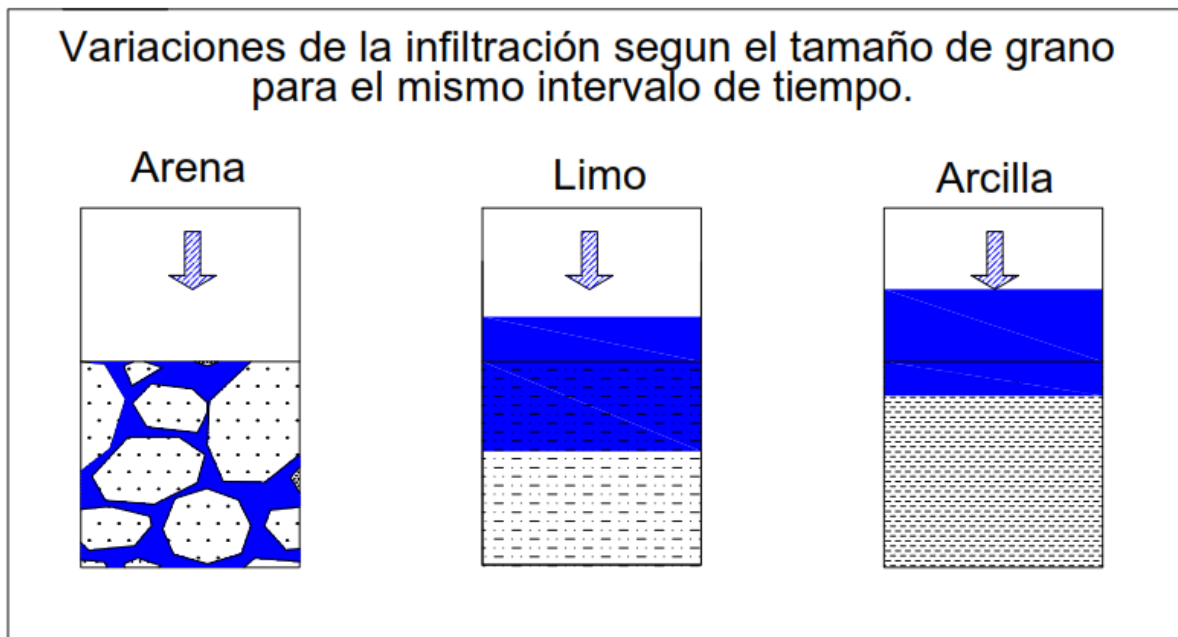


Figura 1- 4 Variación en la infiltración por permeabilidad del suelo. Fuente propia.

Los materiales gravosos y arenosos con bajo porcentaje de finos que tienen altos coeficientes de permeabilidad ($K \geq 10^{-4}$), estos según Pradel y Raad (1993) a pesar de permitir la infiltración de considerables volúmenes de agua, tienen la capacidad de drenarse por lo que la saturación de los materiales es poco probable. Según los análisis

realizados con modelo de ladera infinita, esta característica de permeabilidad tiende a mantener estable los taludes imposibilitando alcanzar una altura del nivel freático crítica.

Por lo anteriormente descrito se puede definir que la capacidad de infiltración juega un papel importante dentro de la estabilidad pero al momento del análisis debe ser necesariamente correlacionado con la permeabilidad de los materiales que conforman la ladera.

Con base en las metodologías analizadas y fuentes consultadas se pueden resaltar algunos aspectos importantes que serán descritos a continuación:

Al caer el agua sobre el terreno, parte de ella transita libremente por la superficie sin que se integre al sistema que se evalúa, y otra se infiltra, modificando ampliamente las características y propiedades del talud, lo que por lo general, repercute de forma negativa sobre la estabilidad de la ladera. Como se explicó anteriormente, la infiltración depende de una buena cantidad de aspectos (uso y cobertura del suelo, capacidad de infiltración, permeabilidad, topografía, intensidad de lluvia, etc.) que convierten el tema en algo complejo pues afecta la posición del nivel freático, genera un frente húmedo con cambios en la presión de poros y modifica el peso del material. Según Aristizábal, et al (2011), es fundamental para lograr predecir el movimiento conocer la profundidad crítica de saturación, tomando en consideración el flujo de agua que realmente se convierte en parte del sistema (agua que se infiltra). Aunado a esto último, es necesario conocer el contenido de agua inicial y la lluvia antecedente.

La mayoría de estudios que considera la infiltración, se basan en la aplicación del modelo de Green-Ampt, que describe el proceso de infiltración de agua en un suelo bajo condiciones de encharcamiento permanente y las siguientes hipótesis: (a) suelo encharcado con una lámina de agua somera desde el principio ($t \geq 0$); (b) suelo profundo y homogéneo, con un contenido inicial de humedad uniforme en profundidad; y (c) frente de avance de humedad plano (flujo en forma de "pistón"), es decir el agua se mueve saturando el suelo a la misma velocidad en toda la sección de análisis, definido por la succión en el frente de avance (Muñoz-Carpena y Gowdsh, 2005).

Muchas ampliaciones se le han realizado al modelo para poder obtener mejores resultados y consideraciones de la redistribución del agua dentro del suelo, tal es el caso de Cho,

2009. Haciendo el uso correcto de los parámetros de entrada y las condiciones de frontera, se puede llegar a determinar con mayor precisión la fluctuación del nivel freático utilizando el modelo de Green-Ampt, que en casos donde se utilizan métodos matemáticos rigurosos pero no se aproximan de la forma deseada a la realidad del problema.

Por otro lado, Jaehong, et al (2004), indican que las deficiencias potenciales de algunas ecuaciones teóricas, radican en la simplificación de la homogeneidad de los materiales y su aplicación a configuraciones en subsuelo demasiado específicas. Para obtener resultados acordes con la realidad es necesario considerar la profundidad del nivel freático, ya que este solo podrá ser afectado por la infiltración cuando su posición sea somera, sin embargo, el agua infiltrada siempre va a afectar la estabilidad, atribuyéndose en muchas ocasiones a la fluctuación del frente húmedo.

Por lo general los parámetros de entrada para los modelos en los cuales se toma en cuenta la infiltración, son derivados a partir de la curva de retención de agua o contenido de agua que se obtiene usando el papel de filtro. De esta manera se deja fuera del análisis todos esos "micro-procesos" que ocurren cuando el agua penetra el suelo pero todavía no llega a formar parte del nivel freático y terminan por evacuar una pequeña parte del agua infiltrada (Jaehong, et al. 2004).

- **Flujos**

Se pueden dividir en superficiales, subsuperficial y subterráneos:

Flujo superficial:

Es el primer mecanismo de flujo en las cuencas naturales y tiene la forma de una capa delgada de agua que escurre a lo largo de una superficie ancha. El flujo continúa en esta condición durante una corta distancia, hasta que las irregularidades del terreno concentran el flujo en pequeños canales tortuosos. Gradualmente, los flujos de estos pequeños canales se combinan hasta confluir en canales claramente definidos.

El ejemplo clásico de flujo superficial es el agua de lluvia que transita por las laderas inclinadas de una región y desemboca en arroyos, ríos, lagos o cuencas escasamente permeables y su mayoría conducen a procesos erosivos como las cárcavas o pérdidas de sedimentos someros y vegetación. Por tal motivo, su influencia principal en la estabilidad,

es como factor precursor y contribuyente al incremento en la susceptibilidad de la ocurrencia de deslizamientos.

Este es un caso muy común en vías y obras lineales donde la interrupción o concentración de flujos superficiales generan problemas de erosión inicialmente y luego grandes procesos de inestabilidad.

Flujo Subsuperficial:

Es la proporción del agua infiltrada producto de una precipitación que generalmente no llega a formar parte del nivel freático y se descarga en la parte media o baja de la ladera o directamente en los cauces fluviales y lagos próximos.

El flujo subsuperficial también conocido como interflujo, habitualmente tiene lugar en la denominada zona no saturada, es decir, aquella parte del subsuelo que se encuentra localizada entre la superficie del terreno y los sistemas de flujo subterráneo. Al encontrarse este medio en una condición de saturación parcial, el flujo o movimiento del agua en esta zona es muy lento.

Igualmente en esta zona es donde se concentra la mayor proporción de raíces y de donde la planta absorbe la mayor cantidad de agua evacuando una porción de esta, que para fines del análisis de estabilidad puede ser despreciada. (Ver Figura 1- 5).

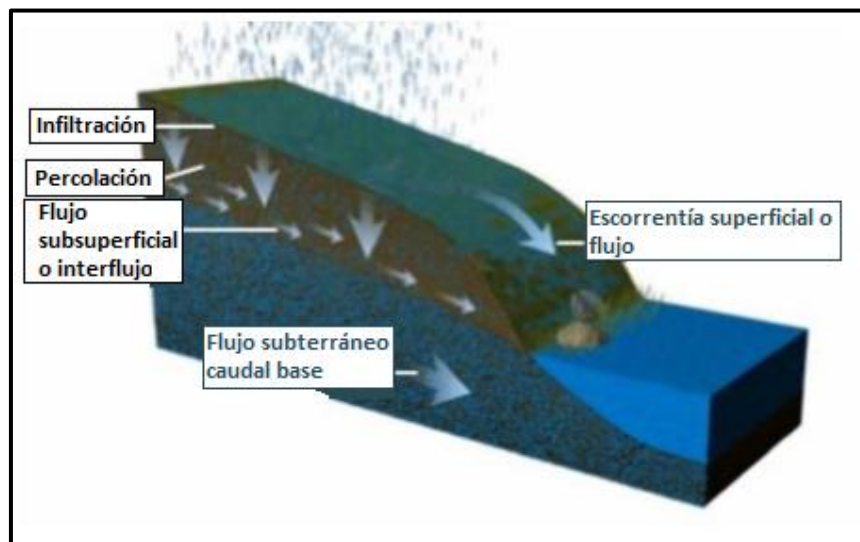


Figura 1- 5. Infiltración, percolación y flujos de agua (Cahuana y Morales, 2009, Modificado)

La importancia del flujo subsuperficial en la estabilidad de laderas recae mayormente en los casos donde es posible la creación de un nivel freático colgado, condición desfavorable a la estabilidad, además que al formar parte del subsuelo genera reducción de los esfuerzos efectivos y aumento del peso del material.

Flujo Subterráneo:

El flujo subterráneo de agua es un componente importante en la estabilidad de taludes, especialmente porque puede generar cambios significativos en la presión de poros. Los flujos descendientes tienden a mejorar la estabilidad puesto que reducen las presiones y aumentan los esfuerzos efectivos, mientras que los flujos ascendentes tienden a ser desfavorables a la estabilidad.

El conocimiento de las direcciones de flujos hace parte del análisis hidrogeológico y su evaluación es de primordial importancia especialmente en suelos granulares o en macizos rocosos ya que se generan empujes que pueden inducir inestabilidad.

En la evaluación de las presiones de agua son muy útiles las redes de flujo o los modelos numéricos de flujo, pues en este caso por estar en la zona saturada este tipo de modelación es relativamente simple ya que se basa en las ecuaciones de Laplace.

El flujo en la zona saturada se lleva a cabo en un medio eminentemente poroso. Es importante desde el punto de vista de ingeniería ya que es el responsable de la recarga de acuíferos subterráneos y en zonas de ladera de los afloramientos de agua, comúnmente llamados nacimientos. Este tipo de flujo está definido por la ley de Darcy.

1.2.3 Reacciones de la ladera

El agua que interactúa con el talud genera diferentes reacciones con se indica a continuación:

- **Variación en el contenido de agua y en la presión de poros del suelo superficial**

El contenido de agua superficial del suelo en la zona no saturada o de aireación, es una variable que juega un papel crucial en diversos procesos que se dan en la interfaz suelo-atmósfera. Determina la distribución de la precipitación en escorrentía superficial o

infiltración (Álvarez-Mozos, et al, 2005). En el ámbito de la hidrología, el estudio de la humedad del suelo y su dinámica ha sido identificado por numerosos investigadores como uno de los principales retos debido a su importancia en procesos clave del ciclo hidrológico y a su variabilidad en espacio y tiempo (Rodríguez-Iturbe, 2000). El uso y aplicación de modelos hidrológicos y el grado de fiabilidad de las predicciones que se realicen dependen en gran medida del conocimiento previo que se tenga del contenido de agua del suelo.

El contenido de agua superficial está controlado por:

1. Características topográficas de la pendiente de los taludes.
2. Tipo de suelo.
3. Características climáticas.
4. Vegetación.

Los cambios en el contenido de agua en la zona de aireación producen efectos importantes: el primero es la reducción de la succión, la cual implica reducción en los esfuerzos efectivos y en la resistencia del suelo, y el segundo el incremento en el peso unitario del suelo con lo cual se incrementan las fuerzas desestabilizadoras.

En términos generales, los factores ambientales y físicos que determinan el comportamiento de la infiltración dependen en buena parte de los 40 centímetros de suelo más superficial, además al evaluar el contenido de agua superficial se estima indirectamente las condiciones de lluvias antecedentes de los taludes, esto puede variar considerablemente la estabilidad de una ladera (Suarez, 1998).

En la zona saturada la infiltración produce cambios en la presión de poros, esta puede variar de acuerdo a las fluctuaciones del comportamiento de aguas subterráneas que dependen en gran medida del aporte hídrico de las precipitaciones. Los incrementos de presión pueden ocurrir rápidamente en el momento de una lluvia, dependiendo de la intensidad de la misma, de la tasa de infiltración del área tributaria, etc.

Debe tenerse en cuenta el efecto que las discontinuidades tienen en los niveles piezométricos, determinados por las líneas equipotenciales. Las discontinuidades generan diferencias de permeabilidad, las cuales controlan el sistema de presiones dentro del talud.

Para el análisis de presiones de poros sobre una superficie de falla se deben tener en cuenta sus condiciones de drenaje. Cuando existe drenaje, la presión de poros disminuye hacia la superficie del talud, pero cuando el drenaje es deficiente se puede presentar un aumento importante de la presión de poros en el pie del talud, esto genera diferentes presiones que pueden llegar a desencadenar el deslizamiento, los posibles diagramas son presentados en la Figura 1- 6

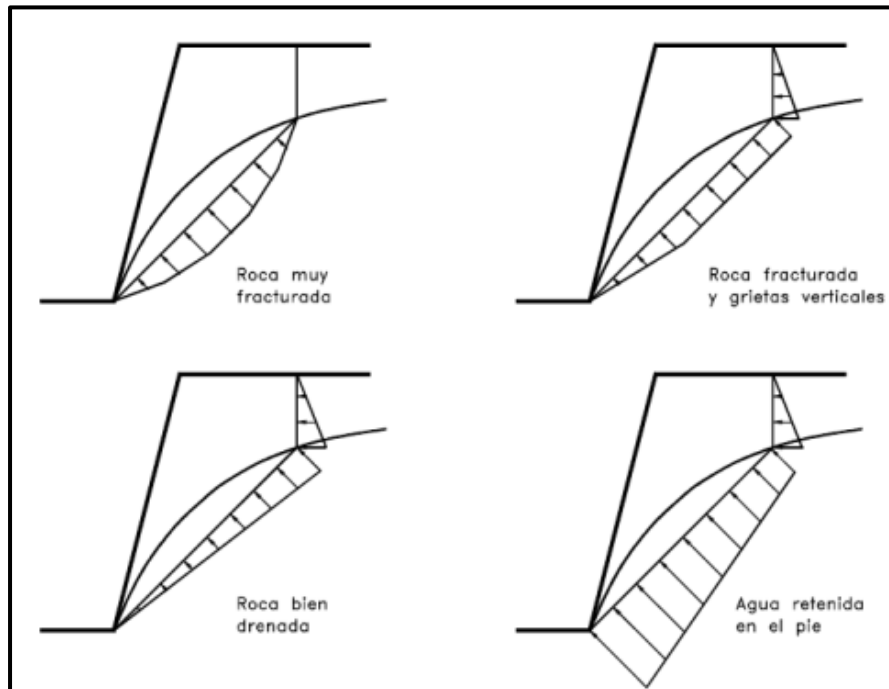


Figura 1- 6. Presiones de poro sobre una superficie de falla potencial para diferentes condiciones de drenaje (Fuente: Lembo Fazio y Ribacchi 1990).

- **Nivel Freático**

El nivel freático es el límite superior de la zona de saturación, representando un elemento muy significativo del sistema de aguas subterráneas. Las fluctuaciones que sobre este ocurran repercutirán de manera sobresaliente sobre la estabilidad del talud, estando estrechamente relacionado con la presión de poros (Tarbuck y Lutgens, 2005).

El nivel de agua determina los niveles de presiones sobre una superficie localizada por debajo de ese nivel o los valores de presión negativa o de succión para el suelo por encima. En taludes naturales, la superficie de nivel freático general sigue una orientación aproximadamente paralela a la superficie del terreno y esta sube por recarga debido a la infiltración. Con esta configuración es que se generan la mayoría de deslizamientos superficiales (ver Figura 1- 7).

El agua subsuperficial puede dividirse entre zonas de presión de poros positiva y negativa. Las presiones de poros positivas son superiores y las negativas son inferiores a la presión atmosférica. La línea divisoria es el nivel freático donde la presión es igual a la presión atmosférica, la cual se designa como presión cero, para este sistema de referencia.

Por debajo del nivel freático el suelo se encuentra saturado, lo cual equivale a que el agua llena todos los poros de los suelos y todas las cavidades de los materiales infrayacentes. El agua existente en la zona de saturación se designa por lo general, como agua freática. Cuando las circunstancias geológicas y topográficas son más complejas podrá haber más de una zona de saturación y, por consiguiente, más de un nivel freático en una localidad determinada (Suarez, 1998).

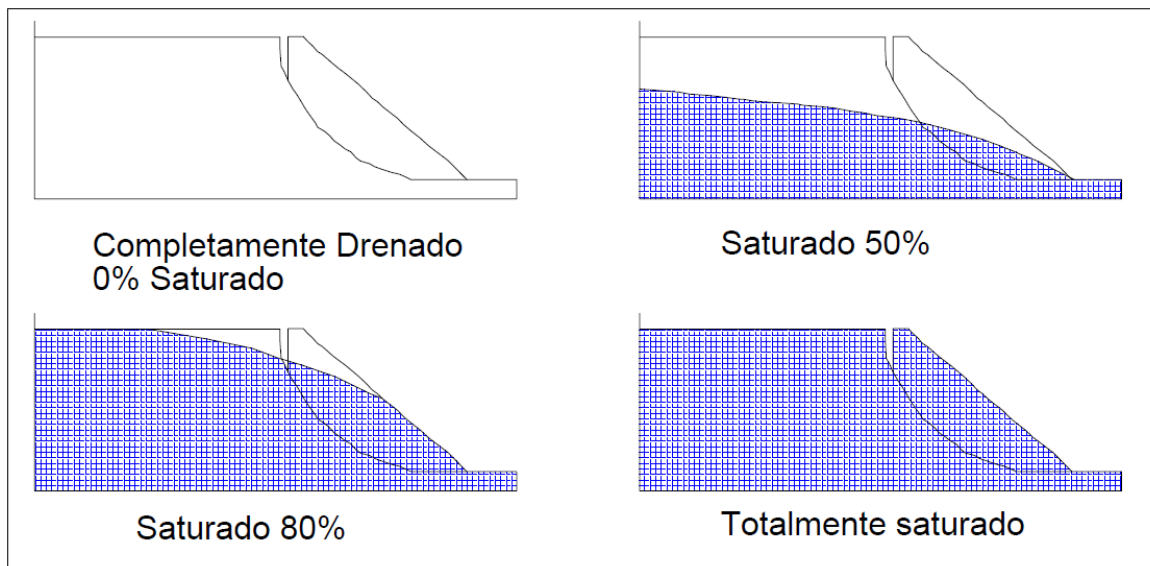


Figura 1- 7. Distribución típica de saturación y niveles freáticos en un talud (Modificado de: Lembo Fazio y Ribacchi 1990).

La elevación del nivel freático de un sitio determinado depende de varios factores, tales como las fluctuaciones de las precipitaciones y de los caudales y pérdidas de los cuerpos de agua próximos (Custodio y Llamas, 1983).

El nivel de agua puede tener como base el pie del talud o puede estar suspendido por un manto impermeable dentro del talud. En el primer caso las fallas a producirse serán preferentemente de pie (en la base del talud), mientras en el segundo caso las fallas tienden a ser a mitad del talud.

El nivel freático y en general la presencia de agua en los materiales en la proximidad de la superficie de falla, desempeñan un papel fundamental en la estabilidad y de hecho, hacen algo más complejo el mecanismo para la generación de las fallas. La configuración del nivel freático depende de la forma del relieve superficial, el cual reproduce generalmente, si bien con contornos menos abruptos y también depende de la permeabilidad del terreno y del abastecimiento de agua. Comúnmente, se aleja de la superficie del terreno bajo colinas y elevaciones y se acerca a ella en los valles y muy especialmente en los ríos y en los lagos.

Para análisis regionales de estabilidad es muy importante incorporar en las evaluaciones las condiciones morfométricas de la cuenca y en esto es fundamental el uso de sistemas de información geográfica (SIG).

El nivel de agua cambia con las lluvias y periodos secos en forma muy marcada en formaciones permeables y un poco menos fuerte en las impermeables y se tiene un máximo y mínimo cuya diferencia en algunos casos puede ser de varios metros. El nivel freático puede ascender bruscamente durante un evento lluvioso intenso y bajar nuevamente después de la lluvia. Estos incrementos pueden ser en muchos casos los detonantes de deslizamientos.

La presencia de un nivel de agua a una determinada altura dentro del talud produce fuerzas hidrostáticas desestabilizantes y su determinación es necesaria, previamente a los análisis de estabilidad. Una vez determinados los niveles de agua y calculadas las presiones de poros se pueden calcular los esfuerzos efectivos, que son los que se deben tener en cuenta en el análisis teórico de estabilidad.

Considerando que el nivel freático tiene incidencia directa en la estabilidad, su ubicación o la estimación de su posición es uno de los principales aspectos que se deben considerar en el análisis. Generalmente se asume el talud seco o el nivel freático a cierta profundidad sin que se pueda explicar de manera objetiva su relación con los parámetros de lluvia y de infiltración.

Mediante análisis de equilibrio límite es posible determinar en un talud dado cual es la profundidad del nivel freática que produce la falla, a esta profundidad se le conoce como profundidad crítica. De esa forma se hace necesario determinar la cantidad de agua de lluvia que se infiltra y que se transforma realmente en un aumento del nivel freático, para

lo cual se debe conocer además del patrón de lluvia (I-D), la permeabilidad del suelo y las condiciones de humedad antes del evento. Recientemente, Park, et al, (2013), destacan la importancia del nivel freático dentro del sistema, pero además recomiendan la estimación de las variables aleatorias que aparecen a medida que el agua subterránea transita por el medio, como variables dependientes de la intensidad de la lluvia y la conductividad hidráulica del suelo para resultados más reales, esto se logra acoplando un modelo hidrológico con un modelo geotécnico de estabilidad y dándole parámetros de entrada, con base en datos reales de precipitaciones y propiedades del suelo, obtenidas necesariamente en campo o con pruebas de laboratorio. De igual forma, sugiere que para que el nivel freático se vea realmente afectado por una precipitación, este debe tener características muy específicas en cuanto a la profundidad (superficial) y las propiedades hidráulicas del suelo (permeable), además de su espesor.

No obstante, si estas condiciones no se cumplen, no se descarta que el nivel freático se vea afectado, sin embargo, la influencia será dirigida por diferentes mecanismos, entre los cuales el más común es la posición dentro de la morfología de la cuenca, la cual puede producir cambios del nivel freático debido a los aportes laterales de flujos subterráneos de caracteres regionales o locales o zonas bajas de acumulación del líquido. Es aquí donde recae la importancia de introducir el análisis de la cuenca dentro de las metodologías actuales.

Vale la pena resaltar, que cuando el nivel freático se encuentra por debajo de materiales superficiales con baja permeabilidad, es posible que ante un evento lluvioso de gran intensidad, se genere lo que se denomina nivel freático colgado, el cual se forma por encima del nivel freático real, esto posiblemente pueda llegar a detonar deslizamientos superficiales sin verse afectado la posición original del nivel freático de la zona, por lo cual es muy importante tener una clara caracterización del subsuelo.

Cho (2009), demuestra que según el análisis de flujo que se implemente, una ladera puede resultar estable o inestable. La Figura 1- 8 compara el análisis asumiendo un flujo parcialmente saturado y un flujo paralelo a la ladera, donde el factor de seguridad a pesar de tener aproximadamente el mismo comportamiento, es considerablemente mayor para el primer caso.

El factor de seguridad mínimo para asumir estable el talud, representado en la gráfica por la línea roja, a ciertas profundidades puede quedar por encima del factor de seguridad real del talud para el análisis por flujo paralelo, esto significaría un colapso inminente, caso contrario al flujo parcialmente saturado, lo que demuestra su importancia dentro del análisis.

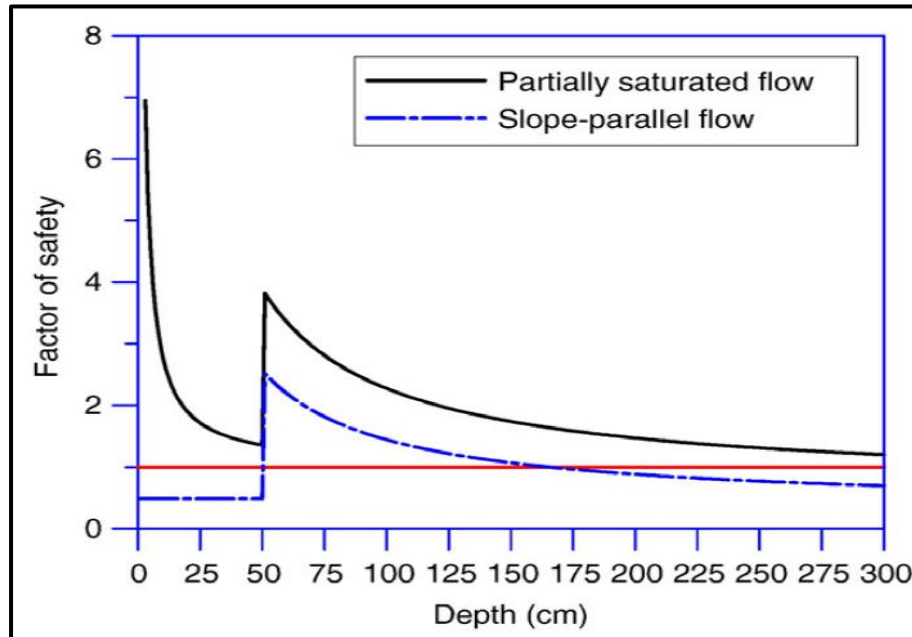


Figura 1- 8. Variación del factor de seguridad con respecto a la profundidad del frente húmedo. (Fuente: Cho, 2009).

▪ **Succión**

La succión, según Fredlund (1995), está compuesta de dos elementos básicos: la succión matricial y la succión osmótica. La suma de los dos componentes se llama succión total. La succión matricial se define como la diferencia entre la presión del aire y la presión de agua en los poros, y la succión osmótica depende de las características químicas del fluido en los poros, especialmente de la presencia de sales.

Muchos taludes deben gran parte de su estabilidad al efecto de la succión pues esta aumenta su resistencia de forma considerable, además reduce la permeabilidad y la deformabilidad, por lo tanto cuando ocurre infiltración, el avance del frente húmedo genera reducciones de la succión y esto produce reducción en los factores de seguridad.

Los procesos de infiltración y avance del frente húmedo cambian las condiciones de succión a medida que se va ingresando el agua, esto hace que se trate de un fenómeno

no lineal cuyo análisis riguroso requiere de modelos hidromecánicos acoplados como el Code-Bright (Olivella, et al. 1996), basado en el modelo mecánico de Barcelona (Alonso, et al. 1990). Para este tipo de análisis se requiere de parámetros de entrada la curva de retención de humedad y las características de variación de la permeabilidad con el grado de saturación, que son pruebas no rutinarias en mecánica de suelos convencional.

Además del modelo hidromecánico es necesario considerar la variable lluvia, que como ya se ha indicado se puede trabajar a partir de datos estadísticos y las variable morfométricas de la cuenca con lo cual el problema se hace más complejo.

A pesar de que a nivel nacional no se habla de modelación hidrológica en los métodos de análisis para estabilidad de taludes, algunas metodologías evaluadas la presentan, donde obtienen información relevante acerca del avance del frente húmedo y distribución y variación de las propiedades hidráulicas en el subsuelo.

1.3 Aspectos Geológicos

La geología apoyada principalmente en la geomorfología e hidrogeología desempeñan un papel supremamente importante dentro de los análisis de estabilidad de taludes.

La mayor complejidad en el análisis de este aspecto se centra en definir los efectos de los perfiles de suelos heterogéneos y la variabilidad espacial de los mismos, para la cual los métodos actuales han simplificado el problema considerando el medio como homogéneo, esto en muchas ocasiones se encuentra bastante lejos de la realidad (Cho, 2014). Esta simplificación, tiene efectos negativos mucho más severos en zonas tropicales como Colombia, donde la variabilidad espacial es importante en pequeñas áreas y esto limita la eficacia de los resultados obtenidos.

El marco geológico por lo tanto resulta indispensable para plantear un modelo geotécnico de talla razonable, el cual puede por ejemplo identificar un posible mecanismo de falla traslacional que considere de manera simplificada la ladera compuesta por dos capas.

Por otro lado una geología que muestre un material con poca variabilidad puede dar indicios de una probable falla profunda de tipo rotacional; en cualquier caso la información geomorfológica e hidrogeológica de áreas próximas proporciona datos muy valiosos para plantar el modelo de falla probable más adecuado en cada caso.

1.3.1 Tipo de Material

De forma general el material puede ser clasificado en suelo o roca, no obstante, estos a su vez se subdividen en otras categorías que pueden llegar a contribuir a un mejor entendimiento del proceso.

El tipo de material se puede dividir entonces de la siguiente manera:

Rocas: es todo material que haya sufrido procesos de compactación y cementación tan intensos que haya dado lugar a procesos de diagénesis. Las rocas en estado fresco o no alterado en su mayoría presentan una estabilidad y resistencia bastante competente que es difícil de encontrar en otros materiales (González de Vallejo, 2002). Por otra parte, también se hace poco probable encontrar, más aun en zonas tropicales, rocas inalteradas en superficie, lo cual aunado con la tectónica activa, suman dos factores importantes para que estos elementos presenten inestabilidad.

Para el tema objeto de estudio, la roca va a tomar importancia para dos situaciones que difieren considerablemente una de la otra y para lo cual se debe estimar su buena valoración en los métodos de análisis:

- Cuando cualquier tipo de roca con baja o nula permeabilidad se encuentra infrayacente a otro tipo de material que permita infiltración y sea de una resistencia baja, sobre esta superficie de contacto, generalmente paralela o subparalela a la topografía se va a acumular agua y por ende se generara una reducción de los esfuerzos efectivos y permitirá al material superior deslizarse, de esta manera el mecanismo de falla asociado será del tipo traslacional.
- Al tener una roca en estado crítico de alteración, con un diaclasamiento o fallamiento importante o las denominadas rocas lodosas, estas consiguen llegar a comportarse como un suelo, en otras palabras, al momento de generarse un evento de lluvia detonante, pueden asociarse a un mecanismo de falla del tipo rotacional o cuando el material se satura desencadenar un movimiento del tipo avalancha de rocas (González De Vallejo, 2002).

A continuación se da una breve descripción de los tres diferentes tipos de rocas que existen según su génesis, asociando las características que presentan cada una de estas.

Así al conocer el material y las condiciones de su formación se puede relacionar o estimar una primera aproximación del comportamiento esperado en cuanto a la estabilidad de taludes.

Las rocas ígneas son las que se producen esencialmente por el enfriamiento paulatino del magma, lo cual produce la solidificación del mismo. Como características generales se pueden describir una alta resistencia, baja porosidad, baja permeabilidad primaria y en la mayoría de los casos dependiendo de su alteración una buena estabilidad. Es común asociar estas rocas con las condiciones de formaciones más intensas (altas presiones y temperaturas), sin embargo esto no siempre es así, lo cual proporciona diferentes comportamientos mecánicos, dependiendo de las condiciones energéticas de su génesis. Para conocer la facilidad o dificultad con que una roca ígnea se meteoriza, es necesario conocer superficialmente la mineralogía que la rigiere, con esto se definen las condiciones energéticas que la crearon y debido a que la alteración se produce por la diferencia de condiciones entre la génesis y las actuales, es posible asociar un material con altas condiciones energéticas de génesis con fácil meteorización.

El proceso de cristalización de los magmas se lleva a cabo siguiendo un orden específico y demuestra que está determinado por dos factores principales:

- La termodinámica del proceso de cristalización
- La composición del magma que cristaliza.

Es este proceso, denominado la serie de reacción de Bowen, el que explica por qué se puede originar rocas ígneas con considerablemente diferentes niveles energéticos, así pues, a medida que una cámara magmática migra y disminuye su profundidad, la temperatura disminuye y los minerales más densos y pesados (Minerales ferro-magnesianos) cristalizan inicialmente, con esto el magma restante, se enriquece o se concentra en minerales félsico, (livianos) por lo que el magma adquiere un comportamiento menos viscoso y acelera su ascenso hacia la superficie, esto ocurre en todo el trayecto desde el origen del magma hasta su completa cristalización (Tarbuck y Lutgens, 2005). Es así como existen rocas ígneas que cristalizan a presiones y temperaturas extremadamente altas, y otras a presiones y temperaturas comparativamente bajas, aportando diferentes características y resistencias a la meteorización.

Rocas Metamórficas son las que tienen lugar debido a la acción de procesos geológicos endógenos, sobre un material litológico preexistente (ígneo, sedimentario o metamórfico). En su génesis son fundamentales:

- El tipo e intensidad de presión que soportan los materiales petrológicos esto debido a que condicionan principalmente la génesis de la textura de la roca y la formación de algunos minerales depende igualmente de las condiciones energéticas que se alcancen.
- Por otro lado tenemos la temperatura, factor que condiciona en mayor grado la transformación de unos minerales en otros y en menor medida algunas texturas.
- Por último tenemos la composición de la roca original o que sufre el metamorfismo que será en una buena parte la encargada de transferir las propiedades al nuevo material que se esté formando.

Igualmente en este tipo de rocas, los niveles de energías de formación van a influir de manera esencial en la facilidad o no que presentarán estos materiales a ser meteorizados, primer paso para producir la inestabilidad. No obstante, el tipo de roca que esté sometida a estos esfuerzos aportará también una parte de las características heredadas, más aun al tener en cuenta que el metamorfismo se produce siempre en estado sólido, por lo que algunas estructuras y fabricas son heredadas o medianamente alteradas pero a razón de su comportamiento presentaran características similares. Es importante resaltar que al entrar en la fundición de la roca ya se pasa a la formación de material ígneo, por esto, es lógico pensar que los niveles de energía a los que estarán sometidas estas rocas, serán menores que los de las rocas ígneas para así poder alterar ciertas características sin llegar a fundir, ya por esta simple razón podemos esperar una mayor resistencia a ser alteradas con la interacción del medio que le rodea, que se traduce en una mayor estabilidad que las rocas ígneas.

Desde otro punto de vista, dependiendo del metamorfismo que las afecte, las rocas metamórficas pueden llegar a desarrollar foliación, que es la orientación preferencial de los minerales, esto produce planos de debilidad que pueden ayudar a la inestabilidad o la infiltración del agua. De igual forma, está asociado a zonas con tectónica de placas activas por lo que el material tiene mayores probabilidades de encontrarse en un estado que favorezca la iniciación del movimiento.

Por todo lo dicho, es necesario conocer en este tipo de roca si existe o no foliación ya que es una condición que contribuye de forma considerable a la inestabilidad puesto que genera la anisotropía del comportamiento en la roca y permite que estos planos sirvan para que el agua se infiltre y aceleran el proceso de alteración por la meteorización.

Rocas sedimentarias: son las que provienen de la consolidación diagénesis (compactación, cementación, recristalización, entre otros) de los sedimentos. Presentan la mayor gama de comportamientos posibles, donde en ocasiones es prudente tratarla como un suelo y en otras tratarla como rocas duras.

Los materiales acumulados pueden ser generados principalmente por los procesos de meteorización y erosión de macizos rocosos preexistentes, aunque también es posible que se generen por la precipitación de sales y carbonatos por sobresaturación de aguas superficiales o por la acumulación de los restos orgánicos e inorgánicos.

A pesar de ser las que se meteorizan con mayor dificultad, son también las que se encuentran con mayor frecuencia en superficie. Esto produce una interacción más intensa con la atmosfera que termina alterándolas de manera considerable. Aunado a esto la estratificación que se define como cambios físico y químicos en las condiciones de sedimentación, generan planos de debilidad importantes que en muchas ocasiones están relacionados con los problemas de inestabilidad.

Generalmente son rocas que presentan porosidad y permeabilidad que varían en función del grado de meteorización y debe ser identificado el tamaño de granos, de poros y su distribución para así predecir los posibles comportamientos del material frente a un evento lluvioso que pueda detonar un proceso de remoción en masa.

Suelos: es el material no consolidado, pueden llegar a tener en cuanto a las propiedades que les confiere la génesis ciertas similitudes con las rocas sedimentarias, ya que forman parte del mismo proceso, sin embargo, los suelos carecen de diagénesis, por lo que se asocian con la acumulación y compactación de los sedimentos.

A pesar de encontrar suelos duros con resistencia importante y una fuerte estabilidad, el común es que los procesos de remoción en masa, aún más los detonados por lluvias, estén

relacionados necesariamente a los primeros metros de material donde la composición en su mayoría es suelo.

La mayoría de los suelos presentan porosidad y permeabilidad mayores que las rocas y en general permiten con facilidad que el agua entre a formar parte del sistema por lo que tienden a saturarse y a reducirse sus condiciones de resistencia con la presencia del agua. Aunque puede parecer simple, es necesario conocer el espesor de suelo ya que muchos casos es una de las fuentes de mayor incertidumbre, en particular sí, no se hace una exhaustiva investigación del subsuelo.

Para estudios regionales una primera aproximación de los espesores del suelo puede hacerse con base en la pendiente del terreno (Kuriakose, et al. 2009). Para el caso colombiano Sepúlveda y Patiño proponen en la zona de Útica la siguiente expresión:

$$dw = 14 \exp^{(-0.0693\alpha)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

dw: Espesor del suelo en metros

α = grado de la pendiente

Se deben dirigir esfuerzos a encontrar mejores datos de la variabilidad de las características en profundidad ya que en muchas ocasiones es este material superficial el que causa los mayores daños (Van Westen y Terlien, 1995).

1.3.2 Geomorfología

La geomorfología en sí, es una rama de la geografía física que se encarga de estudiar las formas de la superficie terrestre haciendo uso de sus tres componentes principales, la morfogénesis, la morfometría y la morfo dinámica.

Para estabilidad de taludes, la geomorfología toma especial importancia ya que es uno de los factores que controla las características del tránsito de los flujos tanto superficiales como subterráneos, ayudando a definir las áreas de recarga, donde las fluctuaciones del nivel freático pueden llegar a ser más severas.

Van Westen, et al, (1995), explican que para obtener resultados próximos a la realidad, la modelación del flujo subterráneo debería realizarse en 3D y para esto es absolutamente necesario tomar en consideración la geomorfología, obteniendo datos importantes de longitud y forma de la ladera.

De esta manera encontramos que aunque son pocos, la mayoría de los estudios que se han realizado donde analizan la influencia de la geomorfología en la estabilidad de ladera con el agua como factor detonante del movimiento, clasifican la morfología de dos maneras:

- Divergente, es cuando nos encontramos en una zona de la cuenca donde el agua no se acumula, esta transita hasta puntos de menor energía, de forma superficial, subsuperficial y subterránea. Existe todavía una importante incertidumbre alrededor de la afectación del nivel freático que se puede producir en este tipo de geoformas, generalmente esta se ve influenciada únicamente cuando el nivel freático se encuentra superficial y en un material permeable (Jaehong, et al. 2004).
- Convergente, son los escenarios realmente críticos en la estabilidad. En estos, el agua de las zonas adyacentes está encaminada a conseguir su punto de equilibrio en la zona de interés o vulnerable al deslizamiento, de esta forma se producen fuertes alteraciones en el nivel freático debido a los aportes laterales subterráneos. La infiltración y tránsito del agua dentro del suelo no depende solo de la intensidad y duración de la lluvia, por esto, Cho (2014), indica que se debe evaluar el papel de la infiltración y la respuesta en la presión de poros que produce. De igual manera los análisis geotécnicos deben tomar en cuenta los aportes de esfuerzos laterales en laderas convergentes (Aristizábal, et al. 2011).

Actualmente una de las mayores limitaciones que presenta el estudio de las afectaciones de la geomorfología en la estabilidad de laderas es que se toman las zonas como homogéneas o no se estiman los aportes laterales por lo que se le asigna la misma susceptibilidad a la ocurrencia de un deslizamiento tanto para zonas convergente como divergentes.

Estos aspectos geomorfológicos sin embargo, si se toman en cuenta en análisis estadísticos univariados o multivariados donde la morfometría de las subcuenca se considera dentro de las variables que pueden incidir en la estabilidad de laderas.

1.3.3 Parámetros Geotécnicos

Dentro de los principales factores para realizar adecuados análisis de estabilidad están los parámetros de entrada y las condiciones de frontera, generalmente obtenidos mediante la exploración geotécnica y de los cuales va a resultar la confiabilidad del método. Las propiedades geotécnicas deben ser determinadas pero además se requiere conocer la variabilidad espacial y probables fluctuaciones del comportamiento a corto y largo plazo dependiendo de los impulsos externos que reciba.

Muchos de los métodos actuales se apoyan en zonificaciones geotécnicas previas a la modelación, con la cual dividen el área en zonas con comportamientos mecánicos similares, esto representa una simplificación que aunque tiene bases consistentes, presenta una fuerte limitación para las metodologías debido a que el comportamiento es un promedio, pero a la hora de evaluar estabilidad según Tsaparas, et al, (2001), pequeñas variaciones pueden desencadenar un deslizamiento, esto explica que dentro de una misma zona geotécnica para un mismo evento de precipitación se generen movimientos en algunas partes mientras que en otras se mantiene la estabilidad.

La caracterización de los materiales en la mayoría de los casos, requiere de una etapa indispensable de investigación del subsuelo bien sea con exploración directa o indirecta, que tiene como objetivo además de la determinación de los parámetros del suelo, identificar la variabilidad espacial en superficie y en profundidad. Posteriormente a la etapa de campo, las muestras son sometidas a ensayos de laboratorio, selectivos que mejor información arrojen dependiendo del tipo de muestra obtenida, entre los resultados más comunes por lo general se trabaja con:

- Contenido de agua natural
- Peso unitario
- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción).

Para evaluar la influencia de la lluvia sobre la estabilidad de taludes, se hace completamente necesario además conocer algunas propiedades físicas del material en estudio como lo es la permeabilidad. De esta va a depender en gran parte la susceptibilidad del talud a perder su condición de estabilidad ante un evento de precipitación.

En la mayoría de los casos cuando se aplican modelos físicos, la precisión o confiabilidad va a depender en gran parte de los parámetros de entrada, estos valores comúnmente son las propiedades del suelo por lo que se hace necesario invertir buena parte de los recursos en su investigación.

De igual manera las condiciones de frontera pueden ser una fuente de incertidumbre considerable dentro de los modelos físicos, por lo que se requiere conocer la disposición geométrica de los materiales en profundidad para esto debe recurrirse a los modelos geológicos y geomorfológicos, tal efecto puede llegar a definir el mecanismo de falla, ya que actualmente se asocian fallas profundas con bordes con baja permeabilidad, mientras que los deslizamientos superficiales en la mayoría de los casos son producto de materiales permeables, estos efectos se acentúan en laderas con baja pendiente (Abid, et al. 2014).

Con base en el estudio llevado a cabo por Wang y Sassa (2003), se pudo determinar con ensayos de laboratorio con condiciones controladas que en suelos predominantemente granulares el tamaño de grano influye considerablemente en el tipo de deslizamiento pudiendo llegar a asociar el mecanismo de falla según la granulometría. Los resultados obtenidos fueron presentados a manera de resumen (ver Figura 1- 9), donde a pesar de ser materiales muy idealizados sirven de punto de comparación para conocer la influencia del tamaño de grano dentro de la relación lluvia deslizamiento.

La Figura 1- 9 muestra los resultados no concluyentes de un modelo realizado en laboratorio para el cual determinan las relaciones de deslizamientos sobre arenas silíceas de diferentes tamaños de grano, mezcladas en diferentes porcentajes con material de loess. En tal sentido, se obtienen cinco muestras para ensayos con diferentes propiedades. Las denominadas S7 y S8, están compuestas únicamente de arena de diferentes tamaños siendo la S7 la de mayor diámetro, mientras que las muestras M10, M20 y M30, son combinación de loess con diferentes porcentajes de arena. (10 %, 20 % y 30% respectivamente, la arena utilizada para la mezcla fue la S8).

Sample	Failure mode	Wetting	Precursory slides	Major failure	Successive motion
S7	Type A $i_d \leq 0.01$ Retrogressive sliding	Initial surface Wetting front Visible normal displacement	"Ball" Slow retrogressive toe sliding	Sudden multiple sliding	Place of "Ball" before sprinkling Very shallow flowslide
S7	Type B $0.01 < i_d \leq 0.49$ Retrogressive sliding	Initial surface Wetting front No visible normal displacement	Slow retrogressive toe sliding	Slow retrogressive sliding	Very shallow flowslide
S8 M10 M20 M30	Type C $-0.14 \leq i_d \leq 0.30$ Flowsliding	Initial surface Wetting front With ($i_d < 0$)/without ($i_d \geq 0$) visible normal displacement	Potential shear zone Shear displacement Slow retrogressive toe sliding with visible deformation as a whole	Flowsliding with relative motion between soil layers	Capacity of linear displacement transducer: 1 m 1 m Slow sliding
S8	Type D $0.30 < i_d \leq 0.46$ Flowsliding	Initial surface Wetting front Without visible normal displacement	Potential shear zone Shear displacement Slow retrogressive toe sliding without visible deformation as a whole	Retrogressive sliding followed by movements with relative motion between soil layers	Capacity of linear displacement transducer: 1 m 1 m Slow sliding

Figura 1- 9. Resumen de tipos de deslizamientos asociados al tamaño de grano. (Fuente: Wang y. Sassa, 2003).

Otro parámetro que usualmente no se mide pero que como ya se ha indicado es de gran importancia es la conductividad hidráulica, que puede hacerse mediante sencillos ensayos de infiltración superficial en campo. Igualmente importante es conocer las curvas de retención especialmente cuando se trata de suelos parcialmente saturados.

1.4 Proceso de análisis y otros aspectos a tener en consideración

Dentro de los métodos de análisis existen algunos aspectos que deben ser tratados debido a su importancia y frecuente utilización, pues influyen en la estabilidad de las laderas:

1.4.1 Cobertura y uso del suelo

Aristizábal, et al, (2010), indican que la vegetación aumenta el grado de cohesión y el pico adicional de resistencia al cortante que genera las raíces se incrementa notablemente con el aumento del contenido de agua, lo cual es apoyado por otros estudios (Ojeda, 1998; Cruz y Muñoz, 2002) que concluyen que la vegetación aporta propiedades mecánicas que favorecen la estabilidad del suelo.

Sin embargo, Espitia (2009), concluye que la vegetación tiene importancia destacable solo en lo que se refiere a la protección contra la erosión superficial, mientras que para procesos de remoción en masa esta brinda mayores beneficios únicamente en lo que se refiere a lo estético, los aspectos ambientales o procesos muy superficiales en su mayoría.

Adicionalmente, la deforestación perjudica la habilidad de las raíces de los árboles para anclar la masa del suelo de los taludes del lecho rocoso, según Sabogal (2006) estos pueden perder completamente su efecto al cabo de 7 años o menos dependiendo de la profundidad y tipo de la raíz involucrada.

De esta forma, se define que la vegetación actúa de dos formas diferentes en la estabilidad de taludes, ejerciendo efectos tanto dañinos como beneficiosos:

En el componente hídrico, la intercepción de la lluvia por parte de las raíces y hojas genera absorción y evapotranspiración que reduce el agua disponible para la infiltración y extrae agua del suelo, disminuyendo la humedad y por ende la presión de poros. Aunque por otro lado, incrementa la rugosidad por las raíces y tallos, reduce la velocidad del flujo y aumenta la capacidad de infiltración, además existen casos donde la reducción de la humedad puede llegar a provocar grietas por desecación y aumenta de forma significativa la infiltración ejerciendo efectos negativos para la estabilidad.

En el componente mecánico, aporta mejoras a las características mecánicas del suelo mediante el reforzamiento radicular, que puede llegar a hacer un efecto de anclaje muy provechoso. Asimismo, cuando se presentan arboles de gran envergadura estos pueden aportar efectos perjudiciales a la estabilidad del sistema con la transmisión de cargas dinámicas por efecto del viento o el sobrepeso. Sin embargo, esto presenta todavía mucha incertidumbre ya que existe un desconocimiento real de la resistencia de las raíces, la cual puede variar entre rangos muy amplios complicando la selección de los parámetros de entrada a la hora de modelar y su alcance en profundidad.

Las posibles propiedades mecánicas que aporta la vegetación dependerán en gran magnitud del tipo de raíz, y únicamente está tendrá influencia dentro de los primeros metros o capas superficiales, esto último hace pensar que por ende tendrán injerencia positiva de forma sobresaliente mayoritariamente en deslizamientos superficiales, por lo

cual se hace necesario clasificar el tipo de vegetación que se presenta en la superficie del terreno ya que tienen diferentes ventajas (ver Tabla 1- 1).

Tabla 1- 1. Ventajas y desventajas para diferentes tipo de vegetación.

TIPO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Pasto	Versátiles, variedad para escoger con diferentes tolerancia, fácil de establecer y ofrece buena densidad de cobertura.	Raíces poco profundas y especies que requieren de mantenimiento permanente.
Hierba	Raíz relativamente profunda, rápida integración con el suelo.	Baja adaptabilidad.
Arbustos	Diversidad, existen especies que se reproducen por estacas, raíz profunda, buena cobertura y bajo mantenimiento.	Baja adaptabilidad.
Arboles	Amplia diversidad, raíces profundas y de mayores resistencias, bajo mantenimiento.	Baja adaptabilidad y altos costos.

Fuente: Copping y Richards, 1990. Modificado.

Por otro lado, la experiencia generalmente en taludes viales, indica que la estabilidad de una ladera sin cobertura vegetal declina progresivamente notándose sus efectos a corto y largo plazo. Los efectos inmediatos sobre el suelo son el incremento de la erosión y escorrentía superficial y disminución de la transpiración, lo cual repercute negativamente reduciendo la resistencia y succión del suelo y eliminando el refuerzo radicular en la capa superficial.

Mientras que para largo plazo se tiene que lo efectos pueden apreciarse en una disminución del refuerzo radicular en las capas más profundas del suelo y un incremento de la meteorización de la superficie del talud.

Hasta el momento, la mayoría de los diseños de soluciones o beneficios que contengan vegetación se maneja de forma empírica utilizando como elementos más “rigurosos” tablas que indican la separación a la cual se debe implantar el elemento a utilizar.

1.4.2 Nivel de detalle con el que se realiza el análisis (Escala de trabajo)

Debido a que en muchos casos la ingeniería debe analizar extensas áreas con diferentes características, se ha planteado la utilización de escalas o niveles de detalles para determinados estudios y así poder graficar en un plano la mayoría de las características

evaluadas. De esta manera, el área puede ser simplificada y generalizada según el nivel de detalle que se exija.

En otras palabras, la escala condiciona el alcance y precisión de la metodología que se utilice para un análisis de estabilidad debido a que de esta depende los procesos y características que pueden llegar a ser evaluados. Adicionalmente, la variabilidad de los parámetros que afectan la condición de estabilidad en un talud, en muchos casos requiere de una observación detallada (casi microscópica) para entender lo que realmente ocurre, sin embargo, las exigencias técnicas y económicas que esto demanda son muy elevadas y por lo general quedan aisladas de un análisis real.

Las metodologías estudiadas, entre estas la realizada por Villarraga, et al. (2014), resaltan la importancia de la escala para asumir la precisión esperada, destacando que para resultados realmente precisos la escala de estudio debe ser detallada (1:2000 o de mayor detalle).

Escalas superiores no son desechadas del todo, ya que si bien es difícil que presenten altas efectividades en la predicción o susceptibilidad a deslizamientos de una zona, estas si tienen grandes ventajas al ser enfocadas en algunos casos como:

- Cuando se requiera aportar información de manera general.
- Cuando se presente algún caso de emergencia y se requiera la información de manera inmediata.
- Cuando existan dudas de la amenaza real, ya que estos estudios se pueden realizar de manera preliminar y tomar decisiones de si es necesario invertir una mayor cantidad de recursos para definir con mayor efectividad los eventos de precipitación que puedan detonar un proceso de remoción en masa o los beneficios no justifican la inversión debido a la baja probabilidad a un evento.

Igualmente, Aristizábal, et al (2011) definen que la escala obligatoriamente debe determinar las variables con la que va trabajar la metodología a utilizar. Los parámetros de entrada deben ser definidos según el nivel de detalle y los recursos con los que se cuente. Para escalas detalladas, la realización de ensayos de laboratorio para conocer el contenido de humedad, la succión y la curva de retención son necesarios.

1.4.3 Condición de frontera

Significa una de las mayores dificultades dentro de los análisis, la simplificación obvia que ha tomado la comunidad científica hasta ahora, es la existencia de un límite impermeable a cierta profundidad susceptible a la influencia del agua. Sobre este límite, sitúan un material permeable donde estudian las variaciones de sus características y la respuesta hidráulica que provoca el deslizamiento.

La importancia de los efectos de las condiciones de frontera, representa una herramienta trascendente dentro de la estabilidad de taludes ya que esta puede definir si se inicia o no un movimiento, dependiendo del tiempo de falla y la profundidad, siendo posiblemente reproducible en laboratorio según ensayos drenados, parcialmente drenados o impermeables (Abid, et al. 2014).

Algunas de las consecuencias más sobresalientes de las condiciones de frontera dentro de la estabilidad de laderas son:

- Para bordes permeables las fallas son siempre superficiales, esto debido a las condiciones drenantes o parcialmente drenantes que se le otorga.
- Para evaluar fallas profundas se asocian bordes menos permeables y la lluvia antecedente acumulada comienza a ejercer mayores influencias.

El efecto de las condiciones de borde es mucho más influyente en laderas suaves, donde la falla se produce a mayor profundidad, todas estas afirmaciones son asumidas por medio del trabajo realizado por Abid, et al (2014).

1.5 Análisis de resultados

Se pudo realizar un estado del arte actualizado para lograr entender la problemática detrás del análisis de la estabilidad de taludes con la inclusión de parámetros hidrológicos como parte fundamental de la investigación, resumiendo las hipótesis planteadas hasta ahora para simplificar las incógnitas y poder aplicar argumentos matemáticos para evaluar las diferentes variables hidrológicas. Son muchos los procesos que tienen lugar en una ladera al momento de ser influenciados por un evento de precipitación, y son los cambios en las condiciones de estabilidad mayormente en la presión de poros y nivel freático que pueden llegar a detonar el movimiento.

Las curvas IDF, se presentan como una herramienta esencial para acoplar un buen análisis hidrológico a la estabilidad, no obstante, estas son curvas sintéticas que resultan en configuraciones de lluvias más o menos representativas de la zona y para su construcción se requiere de la información preferiblemente pluviográfica con al menos 15 años de registros.

Los efectos de la lluvia sobre el talud van a depender de manera considerable del material que lo conforme, es por esto, que necesariamente se debe estimar y evaluar las características del mismo. La geología, capacidad de infiltración del suelo y cobertura vegetal son los factores que mayor incidencia tienen en la susceptibilidad de que un talud presente procesos de inestabilidad o no.

La geomorfología, tiene influencia en cuanto a que en la mayoría de los casos domina la condición de los flujos sub superficiales y subterráneos pudiendo llegar a aportar lateralmente agua al interior un talud.

Se evidencia que las mayores limitaciones dentro del tema se encuentran en las condiciones de frontera las cuales son muy difíciles de modelar y es necesario hacer importantes simplificaciones.

2. Metodologías planteadas para la inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes

Básicamente pueden encontrarse en la literatura cuatro formas diferentes de tratar de solucionar un problema relacionado a la estabilidad de taludes donde se consideren los aspectos hidrológicos. En general estos son usados dependiendo de los insumos con que se cuente y la experiencia del ingeniero encargado de la investigación.

2.1 Métodos Heurísticos

El método heurístico se basa en el entendimiento general del problema sin análisis numéricos, utilizando las reglas empíricas para llegar a una solución. Este método, también conocido como “IDEAL” y formulado por Bransford y Stein (1984), incluye cinco pasos fundamentales:

- 1) Identificar el problema;
- 2) Definir y presentar el problema;
- 3) Explorar las estrategias viables;
- 4) Avanzar en las estrategias; y
- 5) Lograr la solución y volver para evaluar los efectos de las actividades.

Sin embargo, es importante notar que estas son flexibles y no una simple lista de pasos como a menudo se plantea en muchos de esos textos. Esta “flexibilidad” permite variables de casi cualquier índole en el método otorgándole poca reproducibilidad. Cuando estas etapas se siguen como un modelo lineal, resulta contraproducente para cualquier actividad encaminada a resolver problemas. Es necesario hacer énfasis en la naturaleza dinámica y cíclica de la solución de problemas.

En el intento de trazar un plan, el ingeniero puede concluir que necesita entender mejor el problema y debe regresar a una etapa anterior; o cuando ha trazado un plan y trata de ejecutarlo, no encuentran cómo hacerlo entonces, la actividad siguiente puede ser intentar con un nuevo plan o regresar y desarrollar una nueva comprensión del problema.

Es así como actualmente este método se entiende como una estrategia, criterio o truco usado para hacer más sencilla la solución de problemas difíciles. El conocimiento heurístico es un tipo especial de conocimiento usado por los humanos para resolver problemas complejos. Frecuentemente pueden encontrarse casos particulares del problema en los que la heurística obtendrá resultados muy malos o que tarde demasiado en encontrar una solución. Al principio esta forma de resolver problemas no fue bien vista en los círculos académicos, debido fundamentalmente a su escaso rigor matemático. Sin embargo, gracias a su interés práctico para solucionar problemas reales, se fueron abriendo poco a poco las puertas de los métodos heurísticos, sobre todo a partir de los años 60. Actualmente las versiones matemáticas de métodos heurísticos están creciendo en su rango de aplicaciones, así como en su variedad de enfoques. Nuevas técnicas heurísticas son utilizadas a diario por científicos de computación, investigadores operativos y profesionales, para resolver problemas que antes eran demasiado complejos o grandes para las anteriores generaciones de este tipo de algoritmos.

Como disciplina científica, la heurística es aplicable a cualquier ciencia e incluye la elaboración de medios auxiliares, principios, reglas, estrategias y programas que faciliten la búsqueda de vías de solución a problemas; o sea, para resolver tareas de cualquier tipo para las que no se cuente con un procedimiento algorítmico de solución.

Los Procedimientos Heurísticos son formas de trabajo y de pensamiento que apoyan la realización consciente de actividades mentales exigentes. Los Procedimientos Heurísticos como Método científico pueden dividirse en principios, reglas y estrategias.

Principios Heurísticos: constituyen sugerencias para encontrar (directamente) la idea de solución; posibilita determinar, por tanto, a la vez, los medios y la vía de solución. Dentro de estos principios se destacan la analogía y la reducción.

Reglas Heurísticas: actúan como impulsos generales dentro del proceso de búsqueda y ayudan a encontrar, especialmente, los medios para resolver los problemas. Las reglas

heurísticas que más se emplean son: separar lo dado de lo buscado, representar magnitudes dadas y buscadas con variables, determinar si se tienen fórmulas adecuadas, utilizar números (estructuras más simples) en lugar de datos, reformular el problema.

Estrategias Heurísticas: se comportan como recursos organizativos del proceso de resolución, que contribuyen especialmente a determinar la vía de solución del problema abordado. Existen dos estrategias: El trabajo hacia adelante: se parte de lo dado para realizar las reflexiones que han de conducir a la solución del problema. El trabajo hacia atrás: se examina primeramente lo que se busca y, apoyándose de los conocimientos que se tienen, se analizan posibles resultados intermedios de lo que se puede deducir lo buscado, hasta llegar a los datos. Se denomina heurística a la capacidad de un sistema para realizar de forma inmediata innovaciones positivas para sus fines. La capacidad heurística es un rasgo característico de los humanos, desde cuyo punto de vista puede describirse como el arte y la ciencia del descubrimiento y de la invención o de resolver problemas mediante la creatividad y el pensamiento lateral o pensamiento divergente.

En razón de lo anteriormente explicado, es un método que se utiliza para solucionar cualquier tipo de problemas implementando básicamente el raciocinio y la experiencia. Específicamente dentro de los análisis de estabilidad con la inclusión de la influencia de los parámetros hidrológicos, el método ha sido utilizado para resolver a corto y mediano plazo algunos problemas con zonas susceptibles a deslizamientos o taludes puntuales con problemas de inestabilidad, basados fundamentalmente en el criterio de experto y constituye una herramienta fundamental para la toma de decisiones en caso de emergencia ante necesidades, por ejemplo, de evacuación debido a posibles generaciones de deslizamientos detonados por lluvias.

Generalmente, se asumen diferentes grados de saturación del suelo, basados únicamente en la experiencia del ingeniero o evidencias que puedan ser relacionadas con ascenso en el nivel freático o flujos subterráneos que puedan llegar a causar inestabilidad. Posterior al entendimiento del problema o los resultados obtenidos en los análisis de estabilidad con los diferentes grados de saturación diseñan obras o medidas de mitigación del riesgo que pueden llegar a funcionar de buena forma pero siempre tienen una considerable incertidumbre asociada.

2.2 Métodos Estadísticos

Con base en lo expuesto en el capítulo 1, se puede afirmar que una característica importante cuando se estudia la estabilidad en laderas es la variabilidad. Por esto, la estadística representa una valiosa herramienta ya que permite interpretar esos datos, los cuales teóricamente pueden llegar a dar una aproximación real que permita la predicción de posibles nuevos eventos.

El método estadístico, es actualmente el más utilizado a nivel mundial, esto se debe en gran medida a la aplicación de los umbrales de lluvias que hasta ahora han resultado considerablemente efectivos, económicos y sencillos de aplicar, lo cual representa igualmente las mayores ventajas del método.

Según Guzzetti, et al, (2008), Los umbrales estadísticos de lluvias pueden ser definidos en tres grandes categorías así:

- Umbrales que combinan medidas de precipitación obtenidas para eventos específicos.
- Umbrales que incluyen las condiciones antecedentes.
- Umbrales que incluyen umbrales hidrológicos.

En general, están divididos según los datos que considera, no obstante, fundamentalmente para aplicar el método es indispensable contar con información de las series de lluvias continuas de al menos 15 años, lo cual limita en gran forma su aplicabilidad ya que en muchas ocasiones es información que no está disponible.

Aunado a esto, también requieren de un catálogo de deslizamientos presumiblemente detonados por lluvias, de esta manera se llevan a cabo correlaciones entre la intensidad, duración y frecuencia (curvas IDF), y los eventos ocurridos, por esto en muchas ocasiones la herramienta de umbrales de lluvia es también denominada como umbrales empíricos.

Aristizábal, et al (2011), definen unos umbrales no concluyentes para la predicción de las condiciones de lluvias que pueden detonar deslizamientos en la zona del Valle de Aburrá. En este caso se construyen unos umbrales máximos y mínimos, los máximos marcan el límite físico por debajo del cual se ha presentado la mayor parte de deslizamientos, mientras que los umbrales mínimos, representan el límite sobre el cual la probabilidad de

deslizamientos aumenta drásticamente, todo dependiente de la cantidad de agua precipitada. En el caso puntual de alertas tempranas para prevenir desastres, es este último límite el que toma un valor importante, puesto que se considera como una condición detonante de deslizamientos para un sector específico.

Como ya se ha indicado no es la lluvia la causa directa y única de inestabilidad en las laderas y es aquí donde recae la mayor incertidumbre del método, ya que asociamos características de precipitación para asignar una susceptibilidad al deslizamiento y dejamos por fuera de análisis muchos aspectos como la geomorfología, propiedades geotécnicas de los materiales y su variabilidad, variación de la presión de poros, entre otros, que juegan un papel supremamente importante dentro de la estabilidad y que no reaccionan de igual manera frente a un evento lluvioso. Los aspectos mayormente considerados de lluvias en los métodos estadísticos son: intensidad de la lluvia, relación duración-intensidad, duración sobre un nivel de intensidad predefinido, lluvia acumulada en un cierto periodo, relación entre lluvia antecedente y lluvia diaria, relación entre lluvia del evento y la lluvia anual promedio, La relación entre la lluvia diaria y lluvia de exceso antecedente (Aristizábal, et al, 2010). Se observa entonces que no hay un solo procedimiento de análisis sino que es necesario efectuar diferentes aproximaciones con el fin de encontrar los datos que mejor se ajusten para cada caso.

Como bases indispensables para la aplicación del método, necesitamos entonces:

- Una serie de datos de estaciones meteorológicas con información de lluvia preferiblemente de forma pluviográfica y de al menos 15 años de registros.
- Un catálogo amplio de deslizamientos, que podamos asociar con alguna intensidad y duración de un evento de precipitación. Este tal vez es el aspecto más difícil de obtener porque la mayoría de los datos no son muy precisos en cuanto a fecha de ocurrencia o no está el registro continuo de lluvia.

La efectividad del método va ser directamente proporcional al tamaño de la base de datos con la que se cuente, por esto es solo recomendable para casos en los que se disponga de un buen volumen de información y que la misma sea apropiada.

A pesar de ser un método bastante alejado del método heurístico, el empirismo vuelve a ejercer un buen porcentaje de las decisiones y resultados, ya que con mucha frecuencia, realizadas las curvas IDF, se procede a buscar relaciones entre estas y el catálogo de

deslizamientos o mapas de ciertas características que son determinadas con base en el análisis de experto, es decir de forma heurística.

En el contexto del estudio de la frecuencia, para obtener buenas aproximaciones es necesario tomar en cuenta los eventos extremos hidrológicos. La incidencia de los fenómenos macro climáticos del Niño y la Niña en Colombia alteran considerablemente las probabilidades por lo que los métodos actuales deberían considerarlos de manera explícita, tal y como lo evalúan Moreno, et al (2006).

Varios autores, entre estos Castellanos (1996), coinciden en que la distribución de probabilidades de Gumbel presenta un buen acople para evaluar la estabilidad de laderas, en razón de que se encamina a dar solución en problemas de valores extremos. Sin embargo, es recomendable utilizar la herramienta estadística en todos sus campos y comenzar por un análisis de datos dudosos, para detectar los puntos de información que se alejen significativamente de la tendencia y puedan afectar de manera considerable la magnitud de los parámetros estadísticos de la serie (Chow, et al. 1994).

También existen otros métodos de análisis de frecuencia entre los cuales los más utilizados son la distribución de probabilidad log-Pearson tipo III y la distribución Log Normal, pero ante las cuales el método de Gumbel presenta mayores ventajas y es recomendado también en este estudio para obtener con mayor exactitud los resultados esperados.

Los aguaceros o tormentas detonantes de procesos de remoción en masa se clasifican como valores extremos dentro de los registros de precipitación. Es principalmente esta la razón que hace que Gumbel se ajuste de mejor forma porque fue desarrollado para el procesamiento de este tipo de datos.

Tiene como característica principal, al igual que las lluvias diarias, que es una distribución asimétrica, con coeficiente constante y positivo, es decir que el histograma de frecuencia es sesgado hacia la derecha donde la moda es menor que el promedio.

La probabilidad de excedencia $p(x > x_i)$, es la probabilidad de que un evento de determinada magnitud sea igualado o excedido por lo menos una vez en cualquier año, expresión que se define según la ecuación 2.

$$p(x > x_i) = 1 - e^{-e^{-Y_i}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

e: es la base de los logaritmos neperianos

Y_i : es la variable reducida de la distribución de Gumbel. Esta variable se calcula matemáticamente para los diferentes niveles de excedencia que se requieren.

El periodo de retorno es el tiempo promedio, calculado por métodos estadísticos, al cabo del cual un evento X_i de determinada magnitud puede ser igualado o excedido.

El tiempo de retorno es el inverso de la probabilidad de excedencia, como lo muestra la ecuación 3.

$$Tr = \frac{1}{p(x > x_i)} \quad \text{Ecuación 3}$$

La distribución de Gumbel permite encontrar la probabilidad de excedencia o el periodo de retorno para cualquier valor a partir de los datos de la serie historia, calculando para cada valor de la serie histórica la probabilidad de excedencia utilizando la ecuación 4.

$$Tr = \frac{N+1}{m} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde,

Tr: es el periodo de retorno, en años.

N: es el número de valores de la serie histórica o sea, el número de años de registros para la serie anual.

m: es el puesto que ocupa el valor para el cual se calcula el periodo de retorno.

En general, para determinar el periodo de retorno el primer factor que se considera es la amenaza. Se define como amenaza (H) la probabilidad de que un evento sea igualado o excedido por lo menos una vez durante un periodo seleccionado; este periodo equivale a la vida útil de un proyecto o la permanencia estable de un talud.

Una expresión matemática de la amenaza (H) se presenta en la ecuación 5

$$H = 1 - e^{-Tr/N} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde T_r es el periodo de retorno del evento del diseño, H es la amenaza y N es el periodo escogido en años (Castellanos, 1996).

Guzzetti et al (2008), publican un artículo bastante ambicioso en el cual llevaba trabajando varios años donde proyectan un umbral intensidad-duración a nivel mundial, aplicado en Italia y el cual a pesar de presentar un avance importante, no tiene procesos de validación, sin embargo, este puede ser usado preliminarmente en regiones donde las mediciones necesarias no estén disponibles o donde no se hayan determinado umbrales.

Por otra parte, al considerar únicamente la relación entre la ocurrencia y el factor detonante (lluvia), no se estima el mecanismo de falla asociado, lo cual influencia las probabilidades de manera importante, y obliga al método a ser práctico solo para condiciones en las cuales no se presenten mecanismos de falla profunda, condiciones complejas asociadas con flujos subterráneos o deslizamientos detonados por lluvias leves pero prolongadas. (Park, et al. 2013). Esta condición, genera una limitante importante en la aplicabilidad del método, más cuando estudios como el realizado por Alzate, et al (2012), concluyen que la lluvia antecedente, se asocia con un notable control o desencadenamiento de deslizamientos, evidenciado en su trabajo al observar que los meses de mayor lluvia en Colombia, no se corresponden con los meses de mayor número de deslizamientos ocurridos.

Asimismo, cuando se está evaluando la susceptibilidad a deslizamientos en zonas de grandes extensiones, las medidas de precipitación que toman las estaciones meteorológicas, se consideran puntuales, por lo que en zonas tropicales, como es el caso de Colombia, las condiciones de precipitación pueden variar espacialmente de manera considerable, por lo que se requiere algún tipo de corrección para las estaciones que no se ubican exactamente en la zona del deslizamiento asociado, y las cuales pueden llegar a generar errores no deseados de las condiciones de lluvias detonantes. (Moreno, et al. 2006).

Finalmente los métodos estadísticos, han logrado reducir la subjetividad con la que se evaluaba las relaciones entre las lluvias y los deslizamientos, sin embargo, existen aún muchas metodologías planteadas que no son ni objetivas ni reproducibles y como resultado se dan umbrales que son imposibles de evaluar cuantitativamente o comparar (Peruccacci, et al. 2014).

El IDEAM cuenta con una metodología con un procesamiento de la información estadístico en su mayoría, con el cual se puede evaluar la susceptibilidad a deslizamientos en extensas áreas. Inicialmente, evalúa ocho características de la zona, entre las cuales se encuentra la geología, pendientes, morfodinámica, cobertura vegetal, entre otros y les asigna la susceptibilidad de manera heurística semicuantitativa. Posteriormente, elabora un mapa de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa mediante un análisis estadístico multivariado y construye los umbrales críticos detonantes aplicando relaciones estadísticas entre los eventos históricos (deslizamientos) y las lluvias ocurridas hasta 180 días antes para el efecto de la lluvia antecedente y poder eventualmente predecir la ocurrencia de un deslizamiento.

Según los análisis estadísticos de la lluvia antecedente a los deslizamientos tipo evaluados y las estaciones hidrometeorológicas representativas y de influencia propusieron para Colombia el modelo de lluvia crítica para deslizamientos que sigue la ecuación 6:

$$Y = 25.265 \ln(x) - 95.569 \quad R^2 = 0.4369 \quad \text{Ecuación 6}$$

A pesar de que la falta de información bien sea de la precipitación o del catálogo de deslizamientos, es el principal inconveniente en el método, ya se han adelantado trabajos que representan una vía para calibrar o validar umbrales teniendo en cuenta la incertidumbre por falta de información (Peruccacci, et al. 2014), por otro lado, es necesario reafirmar que la mayoría de los umbrales de lluvias, no son más que una simplificación del problema, por lo que muchos factores importantes están siendo obviados y en un número considerable de investigaciones se trabaja analizando los días en los que ocurren deslizamientos, dejando por fuera las condiciones en las que no ocurren, por lo que los resultados obtenidos estarán sesgados desde el punto de vista de los movimientos en masa y no permite conocer en realidad la importancia y efectividad de los umbrales, pues no estima el número de casos fallidos, en los cuales se supera el umbral pero no se inician movimientos. (Aristizábal, et al, 2011).

2.3 Métodos determinísticos

Un modelo determinista es básicamente un modelo con bases o fundamentaciones matemáticas que teóricamente no contempla la existencia del azar ni la incertidumbre,

gracias en gran parte al manejo de las condiciones externas según la configuración de ambientes controlados “ajustados a la realidad”.

Específicamente en la relación lluvias-deslizamientos, los métodos determinísticos tienen sus cimientos en los modelos de estabilidad, que actualmente han percibido un gran incentivo gracias al desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG), optimizando los tiempos de resolución de las incógnitas. (Aristizábal, et al, 2011).

El análisis determinístico consiste entonces en investigar cuán estable es un talud, generalmente mediante un factor de seguridad, el cual relaciona que las fuerzas cortantes sobre una ladera no superen la resistencia al corte.

A diferencia de los métodos estadísticos, los determinísticos logran buenas aproximaciones en cuanto al lugar de ocurrencia mas no así el tiempo.

El análisis se realiza tratando de predecir cuándo se desencadena el movimiento en función de la evaluación de algunos aspectos que pueden ser divididos en dos componentes diferentes:

- Componente hidrológico: donde se estima la variación de la presión de poros, la variabilidad de la permeabilidad, la saturación, la altura del nivel freático, entre otros.
- Componente geotécnico: en el cual se evalúa la estabilidad de la ladera como tal, introduciendo parámetros de entrada obtenidos bien sea en campo, en modelación o haciendo uso del componente hidrológico.

Entre los métodos determinísticos de análisis de estabilidad de laderas, utilizados con mayor frecuencia tenemos:

Morgenstern y Price.

Bishop (simplificado o modificado).

Equilibrio Límite.

Tablas o números de estabilidad.

Jambú.

Bloque deslizante.

Spencer.

Talud Infinito.

Fellenius.

Estos métodos de análisis se basan en equilibrio de fuerzas, de momentos o de ambos y difieren en las simplificaciones que en un caso u otro se adopten. En todos los casos el agua se considera bien sea como un nivel freático o como un valor de presión de poros.

Van Westen y Terlien (1996), señalan que los modelos determinísticos no toman en cuenta la distribución espacial de los parámetros de entrada lo cual es una fuente de incertidumbre que perjudica la efectividad y necesariamente requieren ser trabajados por SIG para mejorar esta simplificación.

La mayor fuente de incertidumbre y debilidad de los métodos determinísticos se encuentra en la dificultad de estimar la inherente variabilidad espacial de los parámetros de entradas entre estos las características mecánicas del suelo (cohesión y ángulo de fricción), los cuales son necesarios para el análisis de estabilidad.

Aunado a esto, el análisis hidrológico lleva consigo otras tantas simplificaciones, como la de suponer un flujo continuo y paralelo a la superficie de la ladera, que si bien si mejora la realidad de los resultados, también lo limita mucho a pocas configuraciones de materiales en un talud.

En caso de poder obtener una gran cantidad de datos, Cho (2009), recomienda considerar un flujo transitorio. Además, los estudios que ejecuten el análisis asociando las variables entre sí, logran mejores resultados comparativamente con un análisis que las evalué como si todas estas fuesen independientes, ya que en naturaleza a medida que por ejemplo el nivel freático asciende, provoca variaciones en los parámetros de entrada seleccionados.

Los métodos determinísticos, muestran un desempeño importante según los parámetros de entrada. Cho (2009), presenta una metodología determinística basada en un modelo de equilibrio límite y un modelo hidrológico (con base en las ecuaciones de Moore y Green-Ampt), que llega a arrojar resultados bastante aceptables comparado incluso con los modelos basados en los métodos más rigurosos de elementos finitos. Sin embargo, para realizar la modelación, las condiciones de frontera seleccionadas fueron muy específicas, esto limita la metodología planteada a un pequeño rango de configuraciones de

deslizamientos. Así mismo, cuando se evalúa la afectación de un proceso como la infiltración, los métodos determinísticos toman un valor preponderante debido a que es en muchas ocasiones la única forma de conocer a ciencia cierta las consecuencias que esta produce sobre la ladera.

Por otra parte, esto no es sencillo por lo que se asumen muchas simplificaciones que nos alejan de la realidad y deben ser acompañados necesariamente por datos obtenidos del laboratorio como ensayos de medición de succión, los cuales en muchos estudios no se analizan.

Teniendo en cuenta que los métodos determinísticos siguen necesariamente una metodología detallada, la cual queda establecida y sus bases fundamentadas en un tratamiento matemático, esto le otorga un carácter objetivo y reproducible importante que es bastante difícil de conseguir con los métodos estadísticos, así mismo permite evaluar cuantitativamente y comparar los análisis propuestos (Peruccacci, et al. 2014).

Vale la pena resaltar que, cuando el modelamiento intenta predecir el comportamiento del agua subterránea, para obtener valores reales se debe considerar al menos además de la intensidad y duración de la lluvia, las propiedades hidráulicas del suelo, la conductividad hidráulica saturada, la función de la conductividad hidráulica y la capacidad de retención del agua (Cho, 2014).

De cualquier manera, las metodologías planteadas basadas en modelación numérica, necesitan de un gran conocimiento de las condiciones de frontera y el cómo representarlas dentro del análisis, lo cual representa una limitante dentro de este tipo de investigación, ya que mayoritariamente se propone la simplificación de las condiciones de frontera, planteando análisis enfocados solo a algunas muy particulares, lo cual no aplica de ninguna manera para otras condiciones que deben ser excluidas o trabajadas con otros tipos de metodologías. Particularmente el estudio bajo el principio de ladera infinita, presenta la mayor limitación ya que por lo general se asume un deslizamiento superficial en el cual existen dos capas, una de estas impermeable subyaciendo a un suelo el cual es en todos los casos el que se desliza (Aleotti, 2004).

En el caso de la aplicación con modelamiento de elementos finitos, se hace completamente necesario incluir las condiciones de fronteras como elementos especiales para este tema

en particular, donde logre simularse la interacción suelo-atmosfera, como en el estudio de Villarraga, et al (2014).

Otra limitación del método determinístico como tal es que requiere de una buena inversión de recursos para encontrar los parámetros de entrada, estos van a determinarse gracias a la etapa de la exploración de campo y los ensayos de laboratorio, los cuales deben ser selectivos ya que como se dijo anteriormente la efectividad del método va a depender de manera importante de la exactitud de los parámetros que se definan.

El monitoreo y definición de las propiedades del material que conforma una ladera, a pesar de consumir muchos recursos, aporta un volumen considerable de información a los modelos físicos como el de ladera infinita o elementos finitos por lo que se justifica su realización (Bordoni, et al. 2015).

2.4 Métodos Combinados

Los métodos aquí denominados como combinados, nacen de la necesidad de conocer no solo que condiciones detonan el movimiento, sino también el lugar que presenta la mayor susceptibilidad al mismo.

Mientras que los métodos estadísticos arrojan información de las configuraciones de lluvia que tienen mayores probabilidades de desencadenar un deslizamiento (umbrales de lluvia), los métodos físicos aportan información del lugar donde estos pueden llegar a presentarse. (Terlien, 1998). No obstante, los mapas de amenaza y vulnerabilidad, requieren ambas fuentes de información para considerarse de alta calidad, completos y puedan ser tomados en cuenta para planes de gestión y mitigación del riesgo. Por lo anteriormente explicado, y en vista de la complementación que genera trabajar combinando los métodos estadísticos y determinísticos, se encuentran muchas metodologías que aplican un componente mediante los datos estadísticos de lluvia y luego esos valores obtenidos, son utilizados como fuente principal de información para desarrollar un modelamiento con bases matemáticas y físicas que forma parte del entendimiento determinístico.

Básicamente, el análisis y procedimiento sistemático de estos métodos no va más allá de los tratados en los numerales 2.1, 2.2 y 2.3, ya que es una combinación de los mismos.

Generalmente, el procesamiento de la información se hace de manera separada, iniciando con la aplicación del método estadístico para que de los valores resultantes (configuraciones de lluvias), se puedan obtener algunos parámetros de entrada para el medio determinístico, valores claves para estimar las posibles variaciones reales del nivel freático y demás aspectos hidrológicos.

A pesar de que muchos estudios consideran los efectos del agua subterránea de forma aleatoria para el procesamiento determinístico, estos valores son dependientes de la intensidad y duración de la lluvia, la conductividad hidráulica del suelo, el uso del suelo, entre otros factores, por lo que si se considera dentro del análisis esta dependencia los resultados obtenidos serán más precisos.

Asimismo, la aplicación de un modelo hidrológico es recomendable siempre y cuando sus parámetros de entradas sean valores reales basados en datos estadísticos (registros históricos de lluvia), de esta forma se define con mayor exactitud las posibles afectaciones a la que pueda a ser sometido un talud (Segoni, et al, 2013).

Por otro lado, los métodos estadísticos por sí solos, son eficaces principalmente para condiciones de laderas muy específicas y simples, y en general se aplica para deslizamientos superficiales pero al acoplarlo con el modelo determinístico, se logra ampliar el rango de acción que permite hacer aproximaciones más reales a las cuales es sometido un talud.

Todas estas ventajas producen que al combinar ambos métodos, se logren obtener muy buenos resultados, comparativamente con estudios donde solo se utiliza uno de los dos métodos. No obstante, irremediablemente se trabaja con las desventajas intrínsecas que conlleva aplicar ambos métodos, los cuales generalmente recaen con mayor contundencia en cuanto a la parametrización de los modelos, las considerables inversiones técnicas y económicas para la etapa de exploración de campo insustituible en el método determinístico, las simplificaciones y en muchos casos la falta de información pluviométrica, entre otros, lo cual es particularmente crítico cuando se trabajan grandes áreas a las que se les debe realizar análisis de amenaza por deslizamientos.

Con base en la información recopilada, se realizó un cuadro resumen (ver Tabla 2- 1) que facilita el entendimiento de las metodologías.

Tabla 2- 1. Cuadro resumen de los métodos de análisis de inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	OBSERVACIONES
Heurísticos	Es un método que se basa en el entendimiento general del problema de una forma empírica para lo cual aplica la implementación de reglas que ayuden a llegar a una solución. No obstante, estas son flexibles y no una simple lista de pasos obligatorios por lo que esta "flexibilidad" permite variables de casi cualquier índole en el método otorgándole de poca a nula reproducibilidad	Representa la herramienta más difundida a nivel mundial, en parte debido a que el empirismo es una manera muy práctica de llegar a la solución de un problema y su conocimiento general, que varios autores plantean va dentro del mismo ser humano. Dependiendo del entendimiento que en muchas ocasiones se amarra a la experiencia del usuario puede arrojar buenos resultados.	No define una metodología sistemática inflexible, lo cual favorece a la mala praxis y comúnmente los esfuerzos requeridos para la investigación se van estérilmente en modelos que nada tiene que ver con la realidad, o plantean soluciones momentáneas que repercuten negativamente en la credibilidad del método. Debido a fundamentalmente el escaso rigor matemático no es una metodología bien vista por la comunidad científica, además de que presenta uno de los mayores retos para establecer una metodología estándar, por su poca severidad en el procedimiento, además, su buen desempeño está ligado en gran parte a la experiencia del operador y la visión del individuo lo cual lo convierte en un método con baja reproducibilidad.	Actualmente la comunidad internacional está tratando de evitar esta metodología por todas las desventajas que presenta y más que nada por la carencia en cuanto a reproducibilidad que atenta contra la estandarización de un método.
Estadísticos	La variabilidad asociada a cualquier parámetro que intervenga en la estabilidad de ladera, otorga un valor importante al método estadístico ya que proporciona una herramienta que permite interpretar esos datos, aportando datos que teóricamente deben ser de alta calidad. Son muchas las aproximaciones que existen en el método, no obstante, la distribución de Gumbel genera mayores ventajas. Igualmente, los umbrales de lluvia (parte fundamental del método), son cada día más utilizado por la sencillez y efectividad de los resultados.	Sin lugar a duda las mayores ventajas del método se presentan en los resultados los cuales son bastante llamativos debido a su efectividad, economía y sencillez al utilizarlos. Por otro lado, estos métodos han logrado reducir la subjetividad que antes caracterizaba el estudio de estas relaciones, y de esta manera se presentan nuevas posibilidades en la búsqueda de la estandarización del estudio. Fácilmente pueden ser complementados con sistemas de amenaza temprana que no solo aporten soluciones sino también prevengan con buenos planes de gestión del riesgo, perdidas de todo tipo.	Requieren de un importante volumen de información pluviométrica o pluviográficas con al menos 15 años de registro, de la cual va a depender la exactitud de los resultados y se presenta como la mayor limitante ya que no siempre se cuenta con esta. Su aplicación radica en la simplificación del problema asociando la estabilidad únicamente a la lluvia lo cual no es cierto y genera fuentes de incertidumbre considerables, en países tropicales como Colombia la variabilidad espacial de las lluvias es grande por lo que requiere algún tipo de corrección o la ubicación de estaciones muy cerca del deslizamiento.	Actualmente es el método aplicado con mayor frecuencia, con un fuerte aporte de umbrales de lluvias. En caso de tener grande volúmenes de información es el método que se recomienda aplicar.
Determinismos	Es representado por un modelo con bases matemáticas que teóricamente reduce la incertidumbre prácticamente a cero. Este método se fundamenta en los modelos de estabilidad, los cuales actualmente son trabajados con SIG optimizando los tiempos de resolución y disminuyendo la complejidad y generalmente se trabajan con el factor de seguridad el cual indica que para que la ladera sea estable las fuerzas cortantes no deben superar la resistencia al corte.	Poseen un carácter objetivo, reproducible importante que no se encuentra en ningún otro método, lo que permite evaluar cuantitativamente y comparar con otros análisis propuestos. Dependiendo de la confiabilidad de los parámetros de entrada, se obtienen resultados bastante aceptables y que al estar basados en fundamentos matemáticos deberían ser irrefutables.	La mayor limitación del método es la incertidumbre y debilidad asociada a la inherente variabilidad espacial de los parámetros de entradas, además de la definición de los mismos, para resolver en parte esta falencia se realizan muchas simplificaciones que alejan de la realidad el planteamiento. Requieren de un gran conocimiento y entendimiento de las condiciones de frontera para representarlas dentro del análisis, por lo que se opta por definirla dentro de un pequeño rango o características muy especiales que lo convierten en poco aplicable. Adicionalmente, la definición y búsqueda de los parámetros de entrada se realiza con etapas de campo y laboratorio que consumen muchos recursos, no obstante, el material que aporta y los beneficios que genera los justifica.	Actualmente son asociados casi de manera imprescindible con SIG, que han reducido la complejidad de la aplicación y permiten evaluar de alguna forma la variabilidad de las propiedades espacialmente. A diferencia de los métodos estadísticos, que indican cuando puede ocurrir el deslizamiento, este método aporta información de donde va a ocurrir el deslizamiento.
Combinados	No son más que como su nombre lo indica la implementación de todos los métodos anteriores, en un solo estudio, estos nacen de la necesidad de conocer no solo que condiciones detonan el movimiento, sino también el lugar que presenta la mayor susceptibilidad al mismo, información requerida para los mapas de vulnerabilidad, riesgo y amenaza y la planeación de la gestión del riesgo. Generalmente se utiliza el método estadístico para conseguir parámetros de entradas relacionados con el componente hidrológico, para la etapa de evaluación de la estabilidad mediante fundamentos matemáticos.	Realizan una excelente complementación, para obtener resultados bastantes confiables, pueden ser usados como sistemas de amenaza temprana y de planeación de gestión del riesgo, aportando información del lugar y el momento. En proyección a futuro son los que representan las mayores ramas donde avanzar y posiblemente genere mejores resultados que cualquier otro método, ya que evalúa con información real una gran cantidad de parámetros que teóricamente debe generar excelentes resultados.	A pesar de combinar las ventajas de todos los métodos, este también arrastra las desventajas, entre las cuales las de mayor dificultad para resolución pueden llegar a ser, la necesidad de un volumen grande de información, el conocimiento y entendimiento de las condiciones de frontera y la correcta escogencia de los parámetros de entradas para los modelos de estabilidad planteados. Igualmente se debe considerar la variabilidad espacial de todas las propiedades por la heterogeneidad de los materiales en naturaleza.	La más reciente guía metodológica para la evaluación de la amenaza en Colombia aplica este método, por lo que apunta a ser tendencia en los próximos años. Requiere de un buen consumo de recursos técnicos y económicos que se deben considerar.

2.5 Análisis y comparación de la forma de inclusión de los parámetros hidrológicos en las metodologías aplicadas en diferentes estudios.

A continuación se presenta el procedimiento seguido para analizar y comparar la forma de inclusión de los parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes.

2.5.1 Búsqueda y Recopilación de la información

Se realizó una búsqueda detallada de información tanto en bases de datos como en análisis de trabajos aplicados y tesis relacionadas con la temática.

Son múltiples los estudios que de manera directa o indirecta contemplan los efectos de la lluvia en la estabilidad de taludes y con el fin de tener un panorama de cómo se ha tratado esta temática se seleccionaron 35 documentos en función de:

- Aportes importantes para el análisis del problema, en el ámbito nacional e internacional.
- Accesibilidad y disponibilidad de la información.
- Innovación y publicación reciente.

2.5.2 Análisis de los parámetros hidrológicos y su forma de incorporación dentro de la estabilidad de taludes en los 35 estudios seleccionados.

Con base en lo explicado en el capítulo 1, se puede definir que son muchos los factores y procesos que afectan la hidrología de una ladera, no obstante, los métodos de análisis actuales se han visto en la necesidad de evaluar los más influyentes reduciendo así el número de incógnitas.

En este orden de ideas, se planteó la construcción de una tabla que permitiera conocer la manera en que cada estudio evalúa los parámetros hidrológicos y su forma de inclusión en el análisis de estabilidad.

La Tabla 2- 2, es el resultado, donde se muestran:

-
- Identificación del estudio, título, autores y año de publicación.
 - Metodologías empleadas. Heurísticas, estadísticas, determinísticas o combinadas.
 - Las variables hidrológicas empleadas.
 - La forma de incorporación de estas en el modelo o análisis hidrológico, lo cual sirve para la determinación en la mayoría de los casos de la cantidad de agua infiltrada, misma que se relaciona con el incremento del nivel freático.
 - Tipo de análisis en lo que se refiere a la estabilidad del sistema, explicando cómo asocian el análisis hidrológico a la estabilidad o susceptibilidad de una zona específica.
 - Y por último las ventajas y limitaciones que presenta cada estudio

Tabla 2- 2. Evaluación de los estudios, forma de incorporación y análisis de los parámetros hidrológicos.

# de estudio	Título / Autor / Año	Método	Variables hidrológicas empleadas	Forma de incorporación	Tipo de análisis	Ventajas	Limitaciones
1	Hydrological factors affecting rainfall-induced shallow landslides: from the field monitoring to a simplified slope stability analysis. / Bordoni, Et al. / 2015	Determinístico	Presión de poros Contenido de agua	Las variables se incorporan como valores directamente medidos en campo con la instrumentación y monitoreo del talud, esto permite representar el comportamiento mecánico del suelo no saturado. También estiman la succión en los cálculos tomando en consideración la curva característica de retención de agua y la influencia de la histéresis hidrológica del material sobre la succión y de manera indirecta sobre el factor de seguridad.	Someten el estudio a una comparación de resultados usando dos modelos simplificados de procesamiento por equilibrio límite. El modelo de Lu y Godt, es una ecuación que estima la estabilidad de laderas en condiciones parcialmente saturadas, observando el comportamiento del factor de seguridad con relación en los cambios de las propiedades hidrológicas a medida que se infiltra el agua de lluvia. Mientras que el modelo de SLIP que es equivalente al de ladera infinita asumiendo dos capas que son paralelas a la superficie del talud, es aplicable para deslizamientos superficiales.	Trabaja con datos reales productos del monitoreo continuo de la ladera esto genera un gran volumen de información y de altísima calidad. Permite considerar la influencia de la histéresis hidrológica, un concepto que según el estudio tiene importancia dentro de la estabilidad.	El modelo puede trabajar con contenido de agua o presión de poros como variables hidrológicas, no obstante, presenta dispersiones considerables según la variable que se introduzca en la ecuación. Trabaja con la cantidad de agua real que se infiltra en el subsuelo, sin embargo, no conoce la intensidad de lluvia que lo genera por lo que limita su uso para sistema de amenaza temprana. Su aplicabilidad es puntual, además que no se conoce si la efectividad en la predicción del comportamiento de las variables es el mismo para mecanismo de falla profundos.
2	Predictive analysis of landslides susceptibility under climate change conditions. a study on the Chingshui river watershed of Taiwan. / Keh-Jian y Chic-Ming. / 2015	Estadístico	Información pluviométrica o pluviográfica de la zona en los últimos años. (Datos pluviométricos de hasta 12 estaciones).	Los datos son procesados primero con varios métodos de análisis de frecuencia (distribución normal, Gumbel, Pearson III, Pearson III logarítmico, entre otros), y la que resulte en el menor error estándar, se define como la frecuencia de lluvia para la zona, variando espacialmente. Posteriormente, estiman los cambios en estas debido al calentamiento global aplicando un modelo matemático para tres periodos diferentes actual, mediano plazo y largo plazo.	Una regresión logística se emplea para conocer la susceptibilidad a deslizamientos de la zona, con variable binaria. (Deslizamientos o estable). Toma en cuenta la lluvia antecedente en periodos horarios de 24, 48 72 horas	La mayor ventaja recae en que "estiman" las afectaciones o consecuencias del calentamiento global sobre las intensidades-frecuencias de lluvias, también consideran de algunas características de la ladera lo cual reduce la incertidumbre.	El modelo está diseñado específicamente para taludes de carreteras por lo que no se sabe su alcance en áreas extensas. La capacidad de predicción del método es considerablemente influenciado por el peso de los factores contribuyentes, sus límites dentro de la ecuación y las distribuciones de lluvias, por esto los resultados pueden presentar dispersión.

# de estudio	Título / Autor / Año	Método	Variables hidrológicas empleadas	Forma de incorporación	Tipo de análisis	Ventajas	Limitaciones
3	Calibration and validation of rainfall thresholds for shallow landslide forecasting in Sicily, southern Italy. / Gariano, et al. / 2014.	Estadístico	Información pluviométrica o pluviográfica de la zona en los últimos años.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	El método consiste en realizar correlaciones estadísticas que son asociadas con el catálogo de deslizamientos, en este sentido, definidos los umbrales de lluvia para la zona, se procede a la validación de los mismos comparando el número de fallas y acertadas que el umbral pronostica. Para la estimación de las temporadas climáticas, se subdivide en catálogo de deslizamientos según el periodo de temporada que se analice mientras que de forma parecida se trabaja con el rol que desempeña la litología en la estabilidad dividiendo el catálogo de deslizamientos dependiendo del dominio litológico en el cual este se encuentre.	Trabaja con valores reales de lluvia, a pesar de no conocer a ciencia cierta la cantidad de agua que realmente llega a formar parte del sistema. Permite abarcar grandes áreas siempre y cuando la información necesaria esté disponible, la validación realizada genera una confiabilidad importante, además hace un intento por incluir las afectaciones que puede producir la litología o las temporadas climáticas.	Requiere de una base de datos realmente grande, incluso para el caso real, concluyen que el catálogo de deslizamiento (más de 700) no fue suficiente para obtener resultados confiables. Realizan generalizaciones bastante amplias que le permiten abarcar grandes zonas pero desestiman algunas variaciones de los materiales que puede marcar la diferencia entre la iniciación o no de un movimiento en masa.
4	Probabilistic stability analysis of rainfall-induced landslides considering spatial variability of permeability. / Cho / 2014.	Combinado	"Curva característica del suelo" Valores promedio de precipitación de la cuenca objeto de estudio (Bibliográfica).	Incorporan los datos de la curva característica a través de un análisis de infiltración que sustituyen en la ecuación del análisis de estabilidad. De esta manera estiman el efecto de la succión en el suelo.	Se basa en el equilibrio límite de una ladera infinita pero le agregan términos y análisis adicionales para desarrollar una aproximación probabilística que toma en cuenta las incertidumbres y la variación espacial de la conductividad hidráulica.	Considera explícitamente las afectaciones debida a la infiltración de agua en el suelo (succión), estimando además la innegable heterogeneidad de los materiales espacialmente.	Los datos que utiliza de precipitaciones son bastante generales y manejan una incertidumbre asociada, no utiliza como tal variables hidrológicas, esta se estiman evaluando las afectaciones en los materiales al producirse un evento de lluvia. La geometría del problema es bastante específica lo cual limita su uso y no considera la lluvia antecedente.
5	Boundary effects of rainfall – induced landslides. / Abid, et al. / 2014.	Determinístico	Intensidad de lluvia Curva característica del suelo	Estiman la presión de poros y contenido de agua con un análisis inicial de infiltración (1D), que posteriormente es utilizado para realizar la evaluación de la estabilidad, asociando un tiempo y una profundidad de falla.	Equilibrio límite mediante un modelo modificado de ladera infinita, donde asocian la presión de poros y la profundidad de falla.	Permite evaluar diferentes tipos de condiciones de frontera para condiciones geológicas específicas, tomando en cuenta las propiedades hidráulicas del material y el tiempo asociado a las intensidades de lluvias para alcanzar los valores críticos de equilibrio.	Las limitaciones más grandes del estudio se presentan en como consideran las variables hidrológicas, ya que estas no se establecen según una base de datos solo son asignadas, además no estiman las condiciones iniciales de humedad en el suelo que en muchos casos pueden llegar a ser determinantes.

# de estudio	Título / Autor / Año	Método	VARIABLES hidrológicas empleadas	Forma de incorporación	Tipo de análisis	Ventajas	Limitaciones
6	Multi-stage statistical landslides hazard analysis: rain - induced landslides. / Chyi-Tyi/ 2014.	Estadístico	Registro de precipitaciones para la zona, con datos para cada hora (pluviográficos).	Trabajan el componente hidrológico mediante un análisis de lluvia poco común el cual dividen en etapas donde primeramente asocian una probabilidad de falla a la intensidad de lluvia o lluvia total y luego lo ajustan con un análisis probabilístico usando la susceptibilidad, intensidad de lluvia o lluvia total como variables independientes.	El análisis planteado es por etapas donde inician con la aplicación de un modelo de susceptibilidad usando un catálogo de deslizamiento y factores que lo generaron, posteriormente se construye el estudio probabilístico para encontrar la probabilidad de falla asociada a la lluvia y por último se analiza la frecuencia de las precipitaciones para diferentes periodos de retorno.	Debido al análisis realizado los resultados obtenidos aportan información acerca de donde y cuando se pueden presentar deslizamientos, algo poco común en los métodos estadísticos. Además, estima la influencia de las características del talud y material que lo compone de manera probabilística.	El método requiere de calibración para cualquier otro lugar donde se aplique, debido las variables utilizadas en la regresión logística las cuales dependen de los factores contribuyentes o desencadenantes del movimiento. Además, para ser utilizado en sistemas de alerta temprana requiere aportar información acerca de la magnitud del evento, algo que no toca la metodología planteada.
7	Topographic and pedological thresholds for the prediction of shallow landslides in central Italy/ Peruccacci, et al. / 2014.	Estadístico	Información pluviométrica o pluviográfica de la zona en los últimos años.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	Mediante un análisis de las lluvias que son asociadas a la iniciación de los movimientos, se definen los umbrales, no obstante, para conocer la influencia de los dominios topográficos, subdividen el área según las características topográficas y ubican los deslizamientos buscando la relación que permita generar conclusiones, de igual forma se realiza con la pedología, subdividiendo el área en los diferentes tipos de suelos presentes y buscando las relaciones con las lluvias que desencadenaron deslizamientos sobre estos dominios. Toma en cuenta la lluvia antecedente indirectamente con la cantidad de agua acumulada en diferentes periodos de tiempo de hasta 180 días.	Permite abarcar grandes áreas siempre y cuando la información necesaria esté disponible, puede llegar a ser usado para sistemas de alerta temprana. Aunado a esto intentan asociar la influencia de parámetros importantes dentro de la estabilidad como los factores topográficos y pedológicos aunque de manera muy superficial.	Requiere de insumos que pocas veces pueden ser encontrados, incluso para el caso real, concluyen que el catálogo de deslizamiento no fue suficiente para obtener resultados confiables. Realizan generalizaciones bastante amplias que le permiten abarcar grandes zonas pero desestiman algunas variaciones de los materiales que puede marcar la diferencia entre la iniciación o no de un movimiento en masa.
8	Modelling landslides induced by rainfall: a coupled approach. / Villarraga, et al. / 2014.	Determinístico	Presión de poros Contenido de agua "Curva característica del suelo"	Las variables se incorporan como valores directamente medidos en campo con la instrumentación y monitoreo del talud y/o en laboratorio, esto permite representar el comportamiento mecánico del suelo no saturado mediante el análisis numérico llevado a cabo, estimando la variación del contenido de agua en el tiempo.	Realizan un procesamiento de la información mediante elementos finitos, incluyendo condiciones especiales de frontera para simular la interacción suelo-atmósfera.	Modelan con la presión de poros y la succión, punto importante dentro de la estabilidad de taludes y principales agentes detonadores, además estiman detalladamente la evolución de los mismos, con un modelo de bastante rigurosidad matemática. Igualmente, maneja condiciones de fronteras especiales para simular esa interacción entre el suelo y la atmósfera aunque la incertidumbre asociada puede ser notoria.	Es aplicable únicamente a zonas con depósitos superficiales, la complejidad de la modelación puede incrementarse al encontrar materiales heterogéneos inclusive impidiendo su realización. Se requieren ensayos de laboratorio específicos y no tan comunes.

# de estudio	Título / Autor / Año	Método	Variables hidrológicas empleadas	Forma de incorporación	Tipo de análisis	Ventajas	Limitaciones
9	Probabilistic slope stability analysis considering the variability of hydraulic conductivity under rainfall infiltration-redistribution conditions. / Hong-Quiang, et al. / 2014.	Combinado	Presión de poros Contenido de agua "Curva característica del suelo"	Las variables se incorporan como valores directamente medidos en laboratorio, además estiman la probabilidad de falla con respecto al tiempo que es sometido un talud a la infiltración de la lluvia.	Básicamente el estudio utiliza un modelo de ladera infinita con función del estado límite, no obstante, realizan ampliaciones y análisis probabilísticos importantes como la simulación de Montecarlo para estimar la variabilidad de la conductividad hidráulica.	Consideran la variación de la conductividad hidráulica y la succión en el tiempo, aun después de la precipitación, lo cual resuelve en cierta medida la incógnita de los desfase entre lluvia y deslizamientos.	Considera suelos homogéneos y superficiales limitando en gran forma su aplicabilidad, además requiere de datos de entradas bastante específicos que deben ser correlaciones y sometidos a análisis previos a su implementación dentro de la modelación lo cual puede arrastrar una incertidumbre asociada.
10	Assessment of rainfall - induced shallow landslide susceptibility using a GIS - based probabilistic approach. / Park, et al. / 2013.	Combinado	Curva característica del suelo, intensidad de la precipitación. No es claro de donde provienen los datos de entrada para el modelo, se asume que de ensayos de laboratorio e información secundaria.	Se realiza un modelo hidrogeológico de la zona que permite mediante un análisis de flujo estático conocer las variaciones del nivel freático y la presión de poros luego de un evento de precipitación. Este modelo se acopla al análisis de estabilidad.	Realizan el análisis geotécnico con equilibrio límite (ladera infinita), acoplándole los incrementos de la presión de poros debido a la lluvia. Además y la parte fundamental de este artículo se presenta en que estudia la probabilidad de falla de una ladera, variando los parámetros mecánicos del suelo (C y ϕ) de manera aleatoria con la implementación de la simulación de Montecarlo, de esta manera recrea la incertidumbre y variabilidad de los parámetros espacialmente.	Analiza el efecto del agua subterránea dependiendo de la conductividad hidráulica e intensidad de la lluvia por lo que obtiene resultados estimados con mayor exactitud. Estima la influencia de las propiedades de los materiales y su variabilidad espacial, la implementación de la herramienta SIG permite evaluar grandes extensiones de terreno, buena capacidad de predicción.	Es aplicable solo a pocas configuraciones de materiales en las laderas, las simplificaciones que toma para construir el modelo hidrogeológico son poco precisas y alejadas de la realidad lo cual trae consigo una incertidumbre. No queda claro cómo se asocian ni de donde se generan los parámetros de entrada en el modelo hidrogeológico.
11	Landslides triggered by rainfall: a semi-automated procedure to define consistent intensity-duration thresholds. / Segoni, et al. / 2013.	Estadístico	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	Presenta un análisis automatizado y estandarizado a través de un software, este analiza los registros pluviométricos identificando la lluvia crítica y sus características, selecciona el registro más representativo de un deslizamiento, grafica los valores I-D y define los umbrales usando un conjunto de procedimientos estadísticos convencionales. Finalmente realiza un procesamiento para aumentar la confiabilidad y aplica un criterio objetivo para seleccionar el umbral más efectivo.	Es método estandarizado, rápido y fácilmente reproducible, permite tomar decisiones en poco tiempo., es aplicable a cualquier espacio donde se posea la información de la lluvia y el retroanálisis permite escoger el umbral caracterizado por el menor número de falsas alarmas aportando un buen grado de confiabilidad.	No toma en cuenta la variabilidad ni ninguna propiedad o característica del suelo donde se infiltra la lluvia, la alta predicción que arroja el método fue con una base de datos de un gran volumen de información que pocas veces puede ser obtenida, es predecible pensar que con una base de datos menor quizás no se alcance los porcentajes de predicción del estudio.

# de estudio	Título / Autor / Año	Método	Variables hidrológicas empleadas	Forma de incorporación	Tipo de análisis	Ventajas	Limitaciones
12	Relación entre comportamiento de algunas variables climatológicas y la susceptibilidad de ocurrencia de eventos catastróficos (deslizamientos), en el perímetro urbano del municipio de Pereira, periodo 1964-2004. / Alzate, et al. / 2012.	Estadístico	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	Buscan la relación de los deslizamientos y las variables climatológicas (agregan al análisis convencional temperatura, humedad relativa y brillo solar) de esta forma asocian las lluvias diarias y antecedentes con la estabilidad y proponen un umbral de lluvia. Toma en cuenta la lluvia antecedente para periodos de 15, 30, 45 y 60 días.	Toman indirectamente la influencia de la variación del nivel freático, considerando el balance hídrico a partir del brillo solar, precipitación y temperatura. Estiman la importación de la lluvia antecedente y la llevan al análisis.	Simplifica el problema a solo la precipitación, no considera aspectos geológicos - geomorfológicos, cobertura del suelo y la variabilidad espacial de los parámetros. Los datos suministrados fueron dados únicamente por dos estaciones, por lo que los umbrales son puntuales pudiendo existir diferencias considerables en las configuraciones de lluvias acaecidas entre estas.
13	Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el valle de Aburrá, Colombia. / Aristizábal, et al. / 2011.	Estadístico	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	Buscan la relación entre los deslizamientos y las configuraciones de lluvia críticas de manera empírica para generar los umbrales, tomando en cuenta dos tipos de análisis el primero con lluvia acumulada y otro a corto plazo. Toma en cuenta la lluvia antecedente para periodos de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días.	Es un estudio que toma en cuenta el área de influencia y la variabilidad espacial de los datos de lluvia. En la metodología se cercioran de trabajar con los datos más reales posibles por lo que desechan datos con dudosa confiabilidad.	Simplifica el problema a solo la precipitación, no considera aspectos geológicos - geomorfológicos, cobertura del suelo y la variabilidad espacial de los parámetros. La base de datos se puede reducir de manera considerable debido a la confiabilidad de la información, la subjetividad de los umbrales empíricos los hace poco reproducibles.
14	Effects of soil spatial variability on rainfall-induced landslides. / Santoso, et al. / 2011.	Combinado	Curva característica del suelo Conductividad hidráulica.	Estiman los cambios en la presión de poros realizando un análisis de infiltración probabilístico donde varía la conductividad hidráulica saturada de manera aleatoria.	Se aplica la ecuación de equilibrio limite (ladera infinita), para la cual se utilizan los datos obtenidos de la modelación de infiltración realizada anteriormente y se asocia una probabilidad de falla.	Estima de manera explícita la variación de la conductividad hidráulica del suelo obteniendo resultados que se ajustan con la realidad, a pesar de teóricamente ser dos materiales, esta consideración permite disminuir la incertidumbre asociada a la heterogeneidad de las propiedades de los materiales en subsuelo.	Al no asociar intensidades-duraciones de lluvias reales, se define la consecuencia e importancia de la variabilidad espacial y hasta la probabilidad de falla, mas no que precipitaciones pueden generarla.

# de estudio	Título / Autor / Año	Método	Variables hidrológicas empleadas	Forma de incorporación	Tipo de análisis	Ventajas	Limitaciones
15	Calculo de umbrales para la ciudad de Tegucigalpa. / Canales. / 2011.	Estadístico	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	Buscan la relación entre los deslizamientos y las configuraciones de lluvia críticas de manera empírica para generar los umbrales, tomando en cuenta las lluvias acumuladas. Toma en cuenta la lluvia antecedente para periodos de 3, 10, 15, 20, 25 y 30 días.	El estudio abarca extensas áreas, es de fácil realización y considera la variabilidad espacial de las configuraciones de lluvias a la hora de definir los umbrales para ciertas zonas.	Depende de manera considerable de las correlaciones realizadas por el evaluador, esto lo hace poco reproducible, además los resultados pueden presentar dispersiones importantes. Requiere de un volumen de información que pocas veces se puede conseguir esto repercute en la confiabilidad de los resultados
16	Modeling shallow landsliding susceptibility by incorporating heavy rainfall statistical properties. / Tarolli, et al. / 2011.	Combinado	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio. Curva característica del suelo	Para estudiar la estabilidad de la ladera, realizan un modelo hidrológico "cuasi-dinámico" para predecir la distribución espacial de la humedad en el suelo en respuesta a un evento de precipitación con ciertas características de duración.	Realizan el análisis geotécnico con equilibrio limite (ladera infinita), acoplándole la hidrología e incluso términos donde agregan la cohesión que aporta la vegetación y su sobrecarga. Toman términos como la transiuidad del suelo producto de la conductividad hidráulica y el espesor del suelo y lo introducen en el análisis como un término en la ecuación.	Considera de forma robusta y detallada la inclusión de las propiedades estadísticas de la lluvia, la variabilidad de la humedad en el suelo y su afectación debido a diferentes duraciones de precipitación. Incluyen en el análisis la influencia de la topografía y la vegetación. Es especialmente efectivo para deslizamientos superficiales detonados por lluvias fuertes y de corta duración.	Nuevamente dependen de un inventario detallado de deslizamientos, clasificados en este caso como superficiales y de ser posible mecanismo de falla y material. Es aplicable solo a condiciones muy específicas en cuanto a configuración geométrica de los estratos, mecanismo de falla y propiedades de la precipitación. Requiere de un importante volumen de información no solo de las precipitaciones sino también del terreno que se analiza.
17	Lithological and seasonal control on rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy. / Peruccacci, et al. / 2011.	Estadístico	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	El método consiste en realizar correlaciones estadísticas de las configuraciones de lluvias que son asociadas con el catálogo de deslizamientos. Inicialmente definen los umbrales de lluvia para la zona utilizando las características de duración – lluvia acumulada para cada evento, luego y representando el mayor avance del método presentan un análisis para estimar la sensibilidad de los umbrales debida a las incertidumbres asociadas principalmente a la carencia de información. Definen tres tipos diferentes de umbrales según la litología, temporada climática y uno que combina los dos anteriores, esto lo realizan comparándolo con mapas donde se encuentren las características evaluadas. Toma en cuenta la lluvia antecedente para periodos mayores a 3 días.	Permite abarcar grandes áreas siempre y cuando la información necesaria esté disponible, aunado a esto el análisis para estimar la incertidumbre permite trabajar aumentando la confiabilidad con bases de datos más pequeñas a las óptimas. Estima aunque de manera empírica el factor litológico y de temporadas climáticas. .	Realizan generalizaciones bastante amplias que le permiten abarcar grandes zonas pero desestiman algunas variaciones de los materiales que puede marcar la diferencia entre la iniciación o no de un movimiento en masa, igualmente requieren de información precisa acerca del catálogo de deslizamientos y las precipitaciones asociadas.

# de estudio	Título / Autor / Año	Método	Variables hidrológicas empleadas	Forma de incorporación	Tipo de análisis	Ventajas	Limitaciones
18	Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy. / Brunetti, et al. / 2010.	Estadístico	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	El estudio consiste en la relación entre las configuraciones de lluvias y los deslizamientos generados. Realizan el análisis con dos métodos diferentes, la inferencia Bayesiana y el Método de Frecuencia, donde los resultados se presentan en forma de umbrales de lluvias. Inferencia Bayesiana es recomendable para pequeñas bases de datos contrario al método de frecuencia. Toma en cuenta la lluvia antecedente para periodos de tiempo muy variados, los más comunes 20, 25 y hasta 60 días.	Permite abarcar grandes áreas siempre y cuando la información necesaria esté disponible. Dependiendo del tamaño de la base de datos que se disponga presentan diferentes formas de abordar el problema. Puede ser asociado a sistemas de alerta temprana y gestión del riesgo.	Manejan la simplificación más básica del problema que es asociarlo únicamente a un evento lluvioso, esto genera una gran fuente de incertidumbre. Igualmente requiere de mucha información que en la mayoría de los casos es difícil de encontrar disponible.
19	Infiltracion analysis to evaluate the superficial stability of two-layered slopes considering rainfall characteristics. / Cho. / 2009.	Determinístico	Curva característica del suelo Conductividad hidráulica.	Incorporan un modelo hidrológico al análisis de estabilidad donde utilizan datos del material para conocer la influencia de la lluvia en éste. Se basan en modificaciones al modelo de Moore para obtener los resultados.	El análisis de estabilidad lo realizan con equilibrio limite (ladera infinita), agregando términos a la ecuación proveniente de la modelación hidrológica y que permiten conocer la influencia de una lluvia sobre la estabilidad.	El modelo propuesto permite conocer la influencia de la infiltración sobre la estabilidad de taludes considerando las propiedades del material y como varían éstas en la interacción con la lluvia. Es un método con un fuerte componente matemático que lo hace reproducible para cualquier otra región con estas características.	Las simplificaciones que asumen generan gran incertidumbre y desestiman hecho como la variabilidad de las propiedades espaciales, además el método de análisis para la estabilidad, limita el método a su aplicación solo para laderas con dos materiales de diferentes conductividades hidráulicas.
20	Field monitoring of rainfall infiltrations in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslide. / Tu, et al. / 2009.	Determinístico - Modelación física	Instrumentación de un talud real (pluviómetro, tensiómetros, piezómetros, sensores del nivel de agua, entre otros).	Los datos obtenidos con la instrumentación son comparados con una modelación hidrológica realizada mediante el concepto de flujo por gravedad (Gravity-Predominant Flow).	No realizan como tal un análisis de estabilidad, el objetivo del estudio es recrear con un modelo lo que se observó en el tiempo de monitoreo.	La modelación de la infiltración, su velocidad y alcance en profundidad fue recreada aceptablemente.	No estudia la afectación en la estabilidad del proceso de infiltración modelado por lo que debe ser acoplado un método de análisis de estabilidad que trabaje con los datos aquí proporcionados.

# de estudio	Título / Autor / Año	Método	Variables hidrológicas empleadas	Forma de incorporación	Tipo de análisis	Ventajas	Limitaciones
21	La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. / Moreno, et al. / 2006.	Estadístico	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	El análisis consiste en identificar relaciones generalizadas de lluvia acumulada y la ocurrencia de deslizamientos, además de intentar definir las afectaciones de las lluvias vistas en diferentes escalas y modificadas por los fenómenos climáticos. Toma en cuenta la lluvia antecedente para periodos de 3, 5, 10 y 15 días.	Abarca grandes extensiones de terreno, analiza la influencia de los fenómenos climáticos en la ocurrencias de procesos de remoción en masa y estima el control sobre los deslizamientos de la lluvia antecedente y diaria.	Manejan la simplificación más básica del problema que es asociarlo únicamente a un evento lluvioso, esto genera una gran fuente de incertidumbre. Igualmente requiere de mucha información que en la mayoría de los casos es difícil de encontrar disponible.
22	A warning system for rainfall – induced shallow failures. / Aleotti. / 2004.	Estadístico	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	El estudio consiste en la relación entre las configuraciones de lluvias y los deslizamientos generados, estimando la influencia de las lluvias diarias y antecedentes. Toma en cuenta la lluvia antecedente para periodos de 7, 10 y 15 días.	Las ventajas que presenta tienen que ver con que abarcan grandes áreas, toma en cuenta la lluvia antecedente y gracias a la calidad de estaciones climatológicas que tienen, estas le permiten conocer con exactitud la hora de inicio del evento desencadenante, aportando mayor confiabilidad a los resultados.	Simplifica de una forma exagerada la relación lluvias deslizamiento dejando fuera de análisis muchos factores que influyen de manera relevante en la estabilidad del sistema. Además para poder aplicar esta metodología es necesario conocer: el evento lluvioso asociado a un deslizamiento, la fecha y duración de la precipitación, definir el área involucrada, tener estaciones pluviométricas a una distancia próxima, entre otros datos de difícil acceso.
23	Relación lluvias – aguas subterráneas – deslizamientos en Fredonia, Antioquia, Colombia. / Berrio, et al. / 2004.	Heurístico	Valores del comportamiento de los caudales recolectados en las galerías de drenaje. Umbrales de lluvias (fuente de información secundaria)	Estudian el comportamiento de las galerías de drenaje luego de precipitaciones, buscan la relación con su tránsito en el subsuelo y lo asocian con tiempos de retardo para que el agua vuelva a su condición normal. Analizan los umbrales propuestos antes y después de la creación de las galerías observando los falsos negativos que arrojaran.	El estudio presenta el mayor componente como un método heurístico, donde se asocian los resultados a la experiencia y comprensión del evaluador a partir de información predominantemente geológica de la zona.	Es rápido y eficaz para la mitigación del riesgo, intentan asociar la influencia de parámetros importantes dentro de la estabilidad como los factores geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos. Abarca una extensa área de estudio.	Los resultados del estudio están fuertemente limitados o asociados a la experiencia del evaluador, además su baja rigurosidad matemática lo convierte en un procedimiento poco reproducible.

# de estudio	Título / Autor / Año	Método	Variables hidrológicas empleadas	Forma de incorporación	Tipo de análisis	Ventajas	Limitaciones
24	Influence of rainfall – induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. / Jaehong, et al. / 2004.	Determinístico	Curva característica del suelo	Se realiza un análisis hidrológico de la zona mediante el método de Pradel y Raad y posteriormente implementan para los mismos datos elementos finitos con flujo transitorio. Los parámetros de entradas son obtenidos de la curva característica del suelo y se acoplan a el análisis de estabilidad.	Se basa en el equilibrio límite, aplicando el modelo de ladera infinita pero le agregan términos y análisis adicionales que toma en cuenta la influencia de la infiltración en suelos meteorizados.	Realmente es una comparación de metodologías, por lo que su mayor ventaja está en que demuestra que modelos ampliamente aceptados como el de Pradel y Raad, puede subestimar valores al ser sometidos a suelos con características particulares. Igualmente realiza un procesamiento del modelo hidrológico con elementos finitos que arroja resultados acertados.	La aplicabilidad del método es bastante reducida ya que trata específicamente suelos residuales y es más efectivo incluso para los del estudio ubicados en la península de Corea como características muy particular por la homogeneidad. No toma en cuenta procesos internos que inician al comenzar la percolación del agua y que terminan evacuando parte del agua infiltrada, por lo que se genera una fuente de incertidumbre.
25	Estimación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en las microcuencas de los corregimientos de Villa Restrepo y juntas de la cuenca Combeima Ibagué – Tolima. / Graciano / 2015.	Estadístico	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	El estudio consiste en la relación entre las configuraciones de lluvias y los deslizamientos generados, intentan estimar las afectaciones igualmente por las variables topográficas del terreno. Toma en cuenta la lluvia antecedente para periodos de 3, 7, 15, 30, 60 y 90 días.	Es un estudio que puede ser aplicado a grandes áreas, además toma en cuenta la lluvia antecedente e intenta correlacionarlos con algunos aspectos topográficos.	Manejan la simplificación más básica del problema que es asociarlo únicamente a un evento lluvioso, esto genera una gran fuente de incertidumbre a pesar de que el autor intenta asociar algunos aspectos topográficos.
26	Desarrollo de una metodología para la determinación de lluvias detonantes de deslizamientos. Estudio de caso. / Mayorga / 2003.	Estadístico	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	El estudio consiste en la relación entre las configuraciones de lluvias y los deslizamientos generados, estimando la influencia de las lluvias diarias y antecedentes. Toma en cuenta la lluvia antecedente para periodos de 47, 74, 97, 137 y 181 días.	Desarrollan una forma de realizar los cálculos de los umbrales programando algunos pasos y optimizando el tiempo de realización, además es más estandarizado el procedimiento. Además toma en cuenta la lluvia antecedente.	Simplifica de una forma exagerada la relación lluvias deslizamiento dejando fuera de análisis muchos factores que influyen de manera relevante en la estabilidad del sistema. Se requiere de un buen volumen de información para obtener datos confiables.

# de estudio	Título / Autor / Año	Método	Variables hidrológicas empleadas	Forma de incorporación	Tipo de análisis	Ventajas	Limitaciones
27	Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamiento en tiempo real. / Sánchez, et al. / 2003.	Combinado	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio. Densidad del drenaje (cualitativamente) Dinámica del agua (cualitativamente)	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	El estudio consiste en establecer relaciones estadísticas de la lluvia con el deslizamiento, cuantificando los componentes de intensidad, duración y frecuencia con el fin de sintetizar un modelo de comportamiento de la zona por estudiar previamente caracterizada de forma heurística en cuanto a su geología y otros aspectos. Toma en cuenta la lluvia antecedente para periodos de tiempo comprendidos dentro de los 180 días.	Toma en consideración aunque de diferentes maneras y muy cualitativas alguna de ellas, aspectos relevantes como litología, densidad de fracturamiento, inclinación de la pendiente, morfodinámica, sistema morfogénico, suelos y la relación con la dinámica del agua, tipo de arcilla, entre muchos otros. Abarca extensas áreas de estudios y es de fácil aplicación.	Tratan de amarrar los deslizamiento a algo más que la lluvia, no obstante, la evaluación de esos otros factores presenta todavía bastante incertidumbre debido a su calificación cualitativa dependiente del criterio del ingeniero, lo que dificulta su repetitividad. La escala llega a ser bastante amplia creando incertidumbre sobre su precisión.
28	Controlling parameters for rainfall- induce landslide. / Tsaparas, et al. / 2001.	Determinístico	Intensidad de lluvia Lluvia antecedente Coeficiente de permeabilidad saturado	Es un estudio dirigido a conocer las afectaciones en las laderas que produce la lluvia, por lo tanto, varían los parámetros de entradas de manera empírica para conocer los cambios que provoca. En principio realizan una modelación hidrológica estimando el proceso de infiltración producto de diferentes eventos lluviosos por medio de un software que implementa elementos finitos, los parámetros de entradas son los patrones de lluvias (distribución del mayor evento de lluvia y de la lluvia antecedente), parámetros del suelo (coeficiente de permeabilidad) y condiciones iniciales (presión de poro inicial y altura del nivel freático inicial). Los datos aquí obtenidos son utilizados en el análisis de estabilidad posterior.	Realizan un análisis para un mecanismo de falla circular mediante la aplicación de Bishop simplificado que satisface el equilibrio de momentos. Los parámetros de entrada corresponden con los datos obtenidos a partir de la modelación hidrológica, siendo la presión de poros lo que disminuye el factor de seguridad obtenido.	La modelación hidrológica para diferentes escenarios de lluvias (diarias y antecedentes) junto con diferentes coeficientes de permeabilidad, permite conocer de buena forma la respuesta hidráulica en el sistema ante un evento de precipitación. Igualmente, la introducción de esa respuesta en el análisis de estabilidad, arroja en teoría datos precisos y estima el verdadero factor desestabilizante dentro de las laderas, la presión de poros.	Dentro del análisis hidrológico, no se toma en cuenta las pérdidas de humedad producto de los procesos que tienen lugar en subsuelo como la evapotranspiración. Es aplicable solo en suelos homogéneos, su aplicación fue para suelos residuales por lo que seguramente requerirá de algunas validaciones y calibraciones para cualquier otro material que no tenga estas características o que las simplificaciones aquí realizadas sean muy alejadas de la realidad.
29	Relaciones lluvias - deslizamientos y zonificación geotécnica en la comuna dos de la ciudad de Manizales. / Arango. / 2000.	Combinado	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	Realizan un análisis combinado donde comienza con una evaluación heurística de factores importantes como la geología, geomorfología, variabilidad del material, entre otros. Posteriormente definen los umbrales y para caracterizar puntualmente las zonas más vulnerables aplican equilibrio límite sobre algunos taludes sin llegar a acoplar la información hidrológica en los mismos. Toma en cuenta la lluvia antecedente para periodos de 1, 3, 10, 15, 20, 25 y 30 días.	El estudio toma en consideración varios parámetros importantes de estabilidad de ladera, la presión de poros, aspectos geotécnicos, aspectos hidrológicos e hidrogeológicos, registro de precipitaciones, variación del nivel freático, entre otros son algunos de ellos que deben ser incluidos para resultados confiables.	La consideración de los diferentes parámetros fue realizada de manera independiente, si se intenta relacionar las propiedades como seguramente lo están en la naturaleza, se alcanzan mayores niveles de exactitud en los datos obtenidos, adicionalmente la definición de afectaciones de algunos elementos con método heurístico, disminuye considerablemente su repetitividad.

# de estudio	Título / Autor / Año	Método	Variables hidrológicas empleadas	Forma de incorporación	Tipo de análisis	Ventajas	Limitaciones
30	Relaciones de precipitación crítica - duración de lluvias que disparan movimientos de masa en Santafé de Bogotá - Colombia. / Gonzales, et al. / 1999.	Estadístico	Registro histórico de precipitación y condiciones climatológicas para la zona objeto de estudio. (Estaciones climatológicas, pluviométricas y pluviográficas)	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	Obtienen las duraciones de lluvias críticas para la iniciación de movimientos con base en diferentes correlaciones estadísticas, partiendo de los registros históricos diarios construyendo una curva de masa de lluvias en forma retrospectiva para conocer las duraciones críticas de cada deslizamiento, posteriormente se calculan las precipitaciones acumuladas y los valores extremos para estas. De esta manera obtienen los datos que relacionan en busca de la zonificación. Toma en cuenta la lluvia antecedente para periodos de 8, 20, 36, y 68 días.	La mayor ventaja que presenta se da en que con base en los datos hidrológicos aportan resultados que indican las configuraciones de lluvias que generan deslizamientos y el lugar donde estos ocurren, dividiendo los umbrales según las estaciones pluviométricas o pluviográficas evaluadas.	No toma en cuenta cómo interactúan las condiciones de lluvias con el subsuelo, esto genera incertidumbre que no permite considerar los umbrales aportados como confiables y resultan en datos no concluyentes.
31	The determination of statistical and deterministic hydrological landslide - triggering thresholds. / Terlien. / 1998.	Combinado	Registro histórico de precipitación y condiciones climatológicas para la zona objeto de estudio. (Estaciones climatológicas, pluviométricas y pluviográficas). Registro reales de los niveles piezométricos en áreas de interés.	Requieren de un catálogo de deslizamientos detonados por lluvias que junto con el registro de precipitaciones permite establecer correlaciones entre la intensidad y duración crítica para desencadenar deslizamientos. La parte determinística del componente hidrológico lo lleva a cabo con la implementación de un software 1D (HYSWASOR), para simular las fluctuaciones de la presión de poros debida a la lluvia evaluando el contenido de agua del suelo, cantidad e intensidad de la precipitación.	El análisis de la parte estadística se puede decir que se lleva a cabo heurísticamente consiguiendo directamente las relaciones de lluvias que generan o generaron deslizamientos ubicados en el mapa de procesos evaluando para eso las lluvias antecedentes así como las lluvias diarias. El umbral determinístico lo realiza acoplado un modelo hidrológico transitorio cuasi tridimensional, que trabaja con parámetros de lluvias reales y otras características climáticas como el brillo solar, viento y presión de vapor, a un modelo de ladera infinita donde introducen las fluctuaciones determinadas en el nivel freático para obtener así datos de lluvias reales que pueden conducir a una falla. Toma en cuenta la lluvia antecedente para periodos de 25 días.	Representa un tipo de análisis donde se incluyen datos reales tomados de campo, datos reales de lluvias y un procesamiento con rigurosidad matemática que permite calibrar y verificar los resultados. Además, evalúa de manera diferente el problema según el mecanismo de falla asociado a la zona y estima la pérdida de humedad del suelo por la ocurrencia de los procesos internos propios que terminan evacuando parte del agua que se infiltra.	Es aplicable solo a un tipo de suelo y dos mecanismos de falla que deben ser determinados con efectividad antes de realizar la corrida, por otro lado, no se estiman la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y condiciones hidrológicas. Es posible que se presenten eventos extremos que no son considerados debido a influencia del calentamiento global acentuado en los últimos años y que otros estudios si analizan.
32	Lluvias críticas en la evaluación de amenaza de eventos de remoción en masa. / Castellanos. / 1996.	Estadístico	Registro histórico de precipitación y condiciones climatológicas para la zona objeto de estudio. (Estaciones pluviométricas)	Requieren de un inventario de deslizamientos detonados por lluvias, estos eventos son correlacionados con la duración y acumulación de la precipitación asociada y generan los umbrales empíricos.	Realizan un análisis de frecuencia y probabilidad de ocurrencia de eventos de lluvias (implementan la distribución de Gumbel), que puedan generar deslizamientos asociándolos al inventario de procesos, con base en esto se sacan correlaciones y conclusiones de las configuraciones de lluvias que conllevan a un riesgo inminente por iniciación de deslizamientos. Toma en consideración la lluvia antecedente.	El análisis presenta una evaluación de las lluvias antecedentes así como de las diarias, y al trabajar con valores reales de lluvias medidos en las estaciones pluviométricas pueden ser fácilmente aplicados para sistemas de amenaza temprana. Aplican la distribución de Gumbel ampliamente extendida en el método estadístico por que se ajusta al problema de valores extremos.	Es una de las simplificaciones más básicas en el tema de asociar un evento lluvioso a la falla de un talud, esto deja por fuera de análisis las características de los materiales y como varían al interactuar con la infiltración, hecho que puede justificar los resultados no concluyentes obtenidos a pesar de ser una buena aproximación. No toman en cuenta la variabilidad de las configuraciones de lluvias espacialmente, algo que en países tropicales puede influir de manera considerable. Los registros pluviométricos dan acercamientos importantes, no obstante lo ideal es trabajar con registro pluviográficos que permitan evaluar las características de las lluvias de manera horaria.

# de estudio	Título / Autor / Año	Método	Variables hidrológicas empleadas	Forma de incorporación	Tipo de análisis	Ventajas	Limitaciones
33	An approach towards deterministic landslide hazard analysis in G.I.S a case study from Manizales. Colombia. / Van Westen y Terlien. / 1995.	Combinado	Conductividad hidráulica saturada de las distintas capas del subsuelo.	Se inicia el procesamiento de la información con una modelación hidrológica donde calculan las fluctuaciones de los niveles piezométricos según la conductividad hidráulica saturada medida directamente en campo. Al calcular los niveles piezométricos máximos para un periodo de retorno determinado (20 años en este caso), asocian y construyen las curvas magnitud – frecuencia de lluvias.	A partir de un mapa base que describe la variabilidad espacial de los materiales en la zona en 3D, se identifican los espesores del suelo, posteriormente se realiza un análisis de la estabilidad del sistema estimando el mecanismo de falla, aplicando la ecuación de ladera infinita e introduciendo los niveles piezométricos obtenidos con la modelación, y finalmente calculan los promedios de los factores de seguridad para 6 escenarios distintos y sus respectivas probabilidades de falla.	Analizan el factor hidrológico estimando la variación de los niveles piezométricos, el proceso que realmente conduce a la falla, además estiman los espesores de suelo y el mecanismo de falla asociado, evaluando los cambios en la conductividad hidráulica. Asocian el factor de seguridad a una probabilidad de ocurrencia y consideran las propiedades geológicas, geotécnica y su variabilidad en el terreno.	No trabajan con datos de lluvias reales, a pesar de identificar las configuraciones que lo detonan con base en la cantidad de agua necesaria para alcanzar ciertos niveles piezométricos. No estiman las variabilidad de la lluvia espacialmente y es aplicable solo a suelos homogéneos, algo poco común en la naturaleza. La escala de trabajo es bastante grande por lo que se pierden posibles cambios que seguramente son los que afectan la efectividad del método arrojando resultados equivocados en la predicción de deslizamientos.
34	Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes. / Pradel y Raad. / 1993.	Combinado	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio.	Partiendo de una formulación realizada con base en el modelo de Green – Ampt que a su vez se rige por la Ley de Darcy, obtienen una ecuación que relaciona el tiempo mínimo y la intensidad mínima necesaria para que el suelo se sature a una profundidad específica. Así, haciendo variar las características y asociándolas con las curvas IDF, consiguen los periodos de retornos y las respectivas variaciones del nivel freático asociada, este dato forma parte del análisis de estabilidad.	Realizan un análisis de estabilidad mediante la ecuación planteada por Skempton y DeLory para ladera infinita, es aquí donde introducen los valores de columnas de agua infiltrada obtenidas con el análisis hidrológico. La ecuación a pesar de ser para aplicación en materiales arcillosos, también es aplicada para materiales granulares despreciando la cohesión. El objetivo del artículo es estimar las afectaciones de la estabilidad debido a la permeabilidad del suelo, por lo que realiza otras correlaciones y análisis que se salen del alcance del estudio, no obstante, todos tienen su base en el factor de seguridad calculado con la ecuación antes mencionada.	Permite la estimación cuantitativa de la variación del nivel freático para un periodo de retorno específico sin la necesidad de conocer una gran cantidad de características del suelo. Asocia las configuraciones de lluvias que pueden llegar a desestabilizar el sistema, según la columna de agua que se infiltra. Adicionalmente, define una permeabilidad máxima por encima de la cual la inestabilidad por infiltración del agua es improbable, y puede ser estimada según la clasificación para suelos USCS.	El estudio es aplicable de manera ideal solo para suelos arcillosos, por lo que se puede presentar incertidumbre y errores que bajen la efectividad del método. Igualmente, el mecanismo de falla asociado en todo caso debe ser superficial y el flujo paralelo a la superficie de la ladera. Además no estima las variaciones en el coeficiente de permeabilidad del suelo en el área objeto de estudio.
35	Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgos por movimientos en masa / Convenio especial de cooperación Universidad Nacional de Colombia – Servicio Geológico Colombiano / 2015.	Combinado	Registro histórico de precipitación para la zona objeto de estudio.	Es un caso especial debido a que se presenta como la guía para la evaluación de la amenaza para toda Colombia, por lo que contempla varios escenarios y escalas de trabajo, de los cuales depende la forma de incorporación. Para la escala básica, a través de la construcción de las curvas IDF, buscan calcular la profundidad de la tabla de agua que genere inestabilidad en el talud, de esta forma, calculan el agua infiltrada según el método del servicio de conservación de suelo de los E.E.U.U, para una intensidad de lluvia correspondiente a un periodo de retorno de 20 años (determinado por la experiencia en deslizamientos en Colombia). Para la escala detallada, dividen el análisis en deslizamientos superficiales, los cuales se rigen por la metodología propuesta por Pradel y Raad (1993) explicada anteriormente, y en deslizamientos profundos repiten el procedimiento del número de curva del SCS, que tiene como objetivo determinar la precipitación infiltrable acumulada, utilizando nuevamente como herramienta fundamental las curvas IDF.	El análisis lo realizan igualmente para escala básica y detallada, en la primera utilizan el método de equilibrio límite (ladera infinita) introduciendo los valores de infiltración resultantes del análisis hidrológico, los factores de seguridad obtenidos definen la amenaza siendo alta la que se encuentre por debajo de 1.1. Mientras que para la escala detallada, utilizan el factor de seguridad obtenido mediante equilibrio límite (ladera infinita para deslizamientos superficiales o Bishop simplificado o Morgenstern Price para mecanismo de falla rotacionales) como una función del comportamiento a la cual le aplican probabilidad, para conocer cuál es el riesgo real de que este factor caiga por debajo de 1.	Las mayores ventajas se presentan para la aplicación de la escala detallada donde se hace un análisis hidrológico importante. Trabajan con datos reales de lluvias generados a partir de las curvas IDF, esto permite asociar los resultados a periodos de retorno y su posible aplicación en sistema de amenaza temprana. Evalúa la inestabilidad según la variación del nivel freático para un periodo de tiempo específico, aspecto que es el realmente puede llegar a detonar el deslizamiento. La categorización de la amenaza la determina según la probabilidad de falla generando mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.	A pesar de que la guía subdivide el tipo de análisis según el mecanismo de falla, en el caso puntual de los deslizamientos superficiales, es necesario aclarar que este es aplicable con mayor efectividad únicamente para suelos finos, mientras que se ha demostrado que otros procesos de análisis resultan más precisos para suelos con materiales granulares. Adicionalmente, se suponen capas de materiales homogéneos lo que resulta bastante difícil de encontrar en la naturaleza, por lo tanto no considera la variabilidad de las propiedades.

2.5.3 Comparación de los diferentes estudios analizados y su forma de evaluación del efecto del agua en la estabilidad de taludes.

A continuación se presenta la calificación de las metodologías analizadas, la cual fue llevada a cabo según los parámetros más influyentes que intervienen en la modelación, evaluando si son o no tenidos en cuenta y la forma de análisis para obtener un mínimo de 0 y un máximo de 3 puntos en cada sección.

En razón de conocer la estabilidad de un talud, se hizo necesario evaluar otros componentes adicionales al hidrológico, ya que indudablemente, para determinar la estabilidad del sistema se hace necesario conocer algunas propiedades del material y la zona en general. Por lo tanto, los aspectos más relevantes determinados con base en todo el análisis de la información recopilada se dividieron en:

Aspectos hidrológicos: analizados básicamente con el método estadístico y los cuales se basan en la determinación de las curvas IDF o LDF según el caso. Estas pueden tener en cuenta, el análisis de las lluvias diarias (horarias) y las acumuladas antecedentes (3, 5, 15, 30 y 45 días), las cuales son influyentes en todos los casos, no obstante, son más determinantes en algunas condiciones especiales como cuando se analiza un talud con material poco permeable.

Adicionalmente, se evalúa también la inclusión del análisis del proceso de infiltración, cambios en la succión y la variación del nivel freático, aspectos relevantes en la condición de estabilidad de las laderas. En general estos son evaluados de forma determinística o mediante la aplicación de ensayos de laboratorio, determinando propiedades del suelo como la curva de retención o capacidad de infiltración. Diferentes autores recomiendan que estos análisis sean asociados a las series históricas de datos de estaciones pluviométricas de la zona objeto de estudio, mediante la construcción de las curvas IDF para lograr una mejor aproximación a la realidad.

Aspectos Geológicos - Geotécnicos: como tendencia general en los estudios analizados se presenta que las metodologías que ostentan un muy buen análisis del componente hidrológico, tienen falencias en este otro componente, el cual es igual de importante que el primero y aporta una variabilidad considerable en la influencia del agua en la estabilidad

de taludes. El tipo de material, sus propiedades y la variabilidad espacial de estas, se presentan como el mayor reto en el entendimiento del problema, sobre todo por la heterogeneidad de los materiales. Así mismo, la geomorfología, tiene una gran importancia debido a que permite que las aguas subterráneas se encaucen hacia ciertos sectores o se desvíen según las formas del terreno. Por último, el uso del suelo también repercute de manera preponderante sobre la estabilidad, pues con mucha frecuencia ciertos procesos de uso como la tala de bosques generan infiltraciones adicionales y reducen la capacidad del suelo de resistir esfuerzos cortantes ante la falta de elementos radiculares que ayuden a la estabilidad.

Aspectos adicionales: existen unos aspectos extras los cuales requieren ser evaluados ya que no solo inciden en la incertidumbre del método sino también en su posible aplicabilidad. Entre estos se evalúa el factor antrópico, que repercute negativamente de muchas formas como por ejemplo la implantación de vías o construcciones que pueden generar concentraciones importantes de flujo o por el contrario interrumpir ciertas trayectorias preferenciales lo que hace significativo su efecto en las condiciones de infiltración y de evapotranspiración.

La escala de trabajo (puesto que de esta depende el nivel de detalle que se desea y los parámetros que se evalúan), las condiciones de frontera, lo cual representa una enorme limitación en la mayoría de los trabajos debido a que no se evalúan o sencillamente se definen de manera muy específica condicionando la aplicabilidad. Por último la viabilidad técnica y económica, puesto que en conclusión lo que se desea es un método reproducible el cual debe estar en capacidad para que sea atractivo para la comunidad en general.

En la Tabla 2- 3, se presenta la matriz construida con las puntuaciones según la metodología analizada.

Es necesario aclarar que esta calificación fue realizada para tener algún valor de referencia, evaluando la forma y estudio de los diferentes factores que intervienen en la condición de estabilidad de una ladera, y de ninguna forma se asocia a la efectividad de los mismos, en otras palabras, con esta calificación se puede decir si un método evalúa más procesos y de mejor forma que otros.

Tabla 2- 3. Calificación a la evaluación de los parámetros de cada estudio analizado.

ESTUDIOS	# de estudio	Metodología	Componente Hidrológico					total	Componente Geológico - Geotécnico					total	Adicionales				TOTAL
			Lluvias Diarias	Lluvias Antecedentes	Nivel Freático	Succión	Infiltración		Material	Geomorfología	Variedad espacial	Propiedades	Uso del Suelo		Factor antrópico	Escala	Condiciones de frontera	Economía	
HYDROLOGICAL FACTORS AFFECTING RAINFALL-INDUCES SHALLOW LANDSLIDES: FROM THE FIELD MONITORING TO A SIMPLIFIED SLOPE STABILITY ANALYSIS.	1	Determinístico	3	3	2	1	2	##	0	0	2	1	0	3	0	2	0	1	17
PREDICTIVE ANALYSIS OF LANDSLIDES SUSCEPTIBILITY UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS. A STUDY ON THE CHINGSHUI RIVER WATERSHED OF TAIWAN.	2	Estadístico	3	3	1	1	1	9	0	0	0	0	0	0	2	1	2	3	17
CALIBRATION AND VALIDATION OF RAINFALL THRESHOLDS FOR SHALLOW LANDSLIDE FORECASTING IN SICILY, SOUTHERN ITALY	3	Estadístico	3	3	1	1	1	9	2	0	1	0	2	5	1	1	1	2	19
PROBABILISTIC STABILITY ANALYSIS OF RAINFALL-INDUCED LANDSLIDES CONSIDERING SPATIAL VARIABILITY OF PERMEABILITY.	4	Combinado	1	1	3	2	3	##	2	1	3	1	1	8	0	0	1	2	21
BOUNDARY EFFECTS OF RAINFALL – INDUCED LANDSLIDES	5	Determinístico	0	0	2	2	2	6	1	0	2	1	1	5	0	1	3	2	17
MULTI-STAGE STATISTICAL LANDSLIDES HAZARD ANALYSIS: RAIN - INDUCED LANDSLIDES	6	Estadístico	2	2	1	1	2	8	3	2	1	2	1	9	0	1	0	2	20
TOPOGRAPHIC AND PEDOLOGICAL THERSHOLDS FOR THE PREDICTION OF SHALLOW LANDSLIDES IN CENTRAL ITALY	7	Estadístico	3	3	1	1	1	9	2	1	2	1	3	9	2	1	0	2	23
MODELLING LANDSLIDES INDUCED BY RAINFALL: A COUPLED APPROACH.	8	Determinístico	2	2	2	2	2	##	2	1	1	2	1	7	1	0	2	2	22
PROBABILISTIC SLOPE STABILITY ANALYSIS CONSIDERING THE VARIABILITY OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY UNDER RAINFALL INFILTRATION-REDISTRIBUTION CONDITIONS.	9	Combinado	1	1	2	2	2	8	2	1	3	2	1	9	1	1	2	2	23
ASSESSMENT OF RAINFALL - INDUCED SHALLOW LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY USING A GIS - BASED PROBABILISTIC APPROACH.	10	Combinado	1	1	2	2	1	7	3	1	3	1	2	10	1	0	2	1	21
LANDSLIDES TRIGGERED BY RAINFALL: A SEMI-AUTOMATED PROCEDURE TO DEFINE CONSISTENT INTENSITY-DURATION THRESHOLDS.	11	Estadístico	3	3	0	1	1	8	1	1	1	1	1	5	1	2	1	3	20
RELACION ENTRE COMPORTAMIENTO DE ALGUNAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS Y LA SUSCEPTIBILIDAD DE OCURRENCIA DE EVENTOS CATASTRÓFICOS (DESLIZAMIENTOS), EN EL PERIMETRO URBANO DEL MUNICIPIO DE PEREIRA, PERIODO 1964-2004.	12	Estadístico	3	3	1	1	1	9	0	0	0	1	1	2	1	0	0	3	15
ANÁLISIS DE UMBRALES EMPÍRICOS DE LLUVIA PARA EL PRONÓSTICO DE MOVIMIENTOS EN MASA EN EL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA.	13	Estadístico	3	3	1	1	1	9	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	14
EFFECTS OF SOIL SPATIAL VARIABILITY ON RAINFALL-INDUCED LANDSLIDES.	14	Combinado	2	2	2	2	3	##	1	1	3	1	1	7	1	1	2	2	24

Tabla 2-3. Calificación a la evaluación de los parámetros de cada estudio analizado (continuación).

ESTUDIOS	# de estudio	Metodología	Componente Hidrológico						Componente Geológico - Geotécnico						Adicionales				TOTAL	
			Lluvias Diarias	Lluvias Antecedentes	Nivel Freático	Succión	Infiltración	total	Materiales	Geomorfología	Variedad espacial	Propiedades	Uso del Suelo	total	Factor antrópico	Escala	Condiciones de frontera	Economía		Viabilidad Técnica y
CALCULO DE UMBRALES PARA LA CIUDAD DE TEGUCIGALPA	15	Estadístico	3	3	1	1	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	12
MODELING SHALLOW LANDSLIDING SUSCEPTIBILITY BY INCORPORATING HEAVY RAINFALL STATISTICAL PROPERTIES.	16	Combinado	3	3	2	1	2	##	2	1	2	2	1	8	1	1	2	1	24	
LITHOLOGICAL AND SEASONAL CONTROL ON RAINFALL THRESHOLDS FOR THE POSSIBLE INITIATION OF LANDSLIDES IN CENTRAL ITALY	17	Estadístico	3	3	1	0	1	8	2	0	3	1	1	7	1	1	0	2	19	
RAINFALL THERSHOLDS FOR THE POSSIBLE OCURRENCE OF LANDSLIDES IN ITALY	18	Estadístico	3	3	1	0	1	8	1	0	0	0	1	2	1	0	0	2	13	
INFILTRACION ANALYSIS TO EVALUATE THE SUPERFICIAL STABILITY OF TWO-LAYERED SLOPES CONSIDERING RAINFALL CHARACTERISTICS	19	Determinístico	1	1	2	2	3	9	2	1	1	2	1	7	1	1	2	2	22	
FIELD MONITORING OF RAINFALL INFILTRATIONS IN A LOESS SLOPE AND ANALYSIS OF FAILURE MECHANISM OF RAINFALL-INDUCED LANDSLIDE.	20	Determinístico - Modelación física	3	3	3	3	3	##	2	1	1	1	1	6	1	1	0	0	23	
LA LLUVIA Y LOS DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN ANTIOQUIA: ANALISIS DE SU OCURRENCIA EN LAS ESCALAS INTERANUAL, INTRAANUAL Y DIARIA	21	Estadístico	3	2	1	1	1	8	1	0	0	1	1	3	1	1	0	3	16	
A WARNING SYSTEM FOR RAINFALL – INDUCED SHALLOW FAILURES	22	Estadístico	3	3	1	1	1	9	1	1	0	1	0	3	1	0	1	2	16	
RELACION LLUVIAS – AGUAS SUBTERRANEAS – DESLIZAMIENTOS EN FREDONIA, ANTIOQUIA, COLOMBIA.	23	Heurístico	3	2	3	0	1	9	1	0	1	1	1	4	1	0	0	2	16	
INFLUENCE OF RAINFALL – INDUCED WETTING ON THE STABILITY OF SLOPES IN WEATHERED SOILS.	24	Determinístico	3	2	2	2	2	##	2	1	0	1	1	5	0	1	2	2	21	
ESTIMACIÓN DE UMBRALES DE LLUVIA DETONANTE DE DESLIZAMIENTOS EN LAS MICROCUENCAS DE LOS CORREGIMIENTOS DE VILLA RESTREPO Y JUNTAS DE LA CUENCA COMBEIMA IBAGUÉ – TOLIMA	25	Estadístico	3	3	1	0	2	9	1	0	0	0	0	1	1	0	0	3	14	
DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LLUVIAS DETONANTES DE DESLIZAMIENTOS. ESTUDIO DE CASO	26	Estadístico	2	3	1	1	1	8	0	0	2	0	0	2	0	0	0	3	13	
MODELO PARA EL PRONOSTICO DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN TIEMPO REAL.	27	Combinado	3	3	1	0	0	7	1	1	1	1	1	5	1	0	0	3	16	
CONTROLLING PARAMETERS FOR RAINFALL- INDUCE LANDSLIDE	28	Determinístico	1	1	2	2	2	8	2	2	1	2	2	9	1	1	1	2	22	
RELACIONES LLUVIAS - DESLIZAMIENTOS Y ZONIFICACION GEOTECNICA EN LA COMUNA DOS DE LA CIUDAD DE MANIZALES	29	Combinado	3	3	1	1	1	9	1	1	1	1	1	5	1	0	0	1	16	

Tabla 2-3. Calificación a la evaluación de los parámetros de cada estudio analizado (continuación).

ESTUDIOS	# de estudio	Metodología	Componente Hidrológico					total	Componente Geológico - Geotécnico					total	Adicionales				TOTAL
			Lluvias Densas	Lluvias Antecedentes	Nivel Freatico	Succión	Infiltración		Material	Geomorfología	Variedad espacial	Propiedades	Uso del Suelo		Factor antrópico	Escala	Condiciones de frontera	Economía	
RELACIONES DE PRECIPITACIÓN CRÍTICA - DURACIÓN DE LLUVIAS QUE DISPARAN MOVIMIENTOS DE MASA EN SANTAFÉ DE BOGOTÁ - COLOMBIA.	30	Estadístico	3	3	1	1	1	9	1	0	1	0	0	2	0	0	0	2	13
THE DETERMINATION OF STATISTICAL AND DETERMINISTIC HYDROLOGICAL LANDSLIDE - TRIGGERING THRESHOLDS	31	Combinado	2	2	1	1	0	6	2	1	1	1	0	5	1	1	0	2	15
LLUVIAS CRÍTICAS EN LA EVALUACIÓN DE AMENAZA DE EVENTOS DE REMOCIÓN EN MASA	32	Estadístico	3	3	1	1	1	9	2	0	1	0	0	3	0	0	0	2	14
AN APPROACH TOWARDS DETERMINISTIC LANDSLIDE HAZARD ANALYSIS IN G.I.S A CASE STUDY FROM MANIZALES. COLOMBIA	33	Combinado	3	3	1	1	1	9	1	1	1	1	1	5	1	1	0	2	18
EFFECT OF PERMEABILITY ON SURFICIAL STABILITY OF HOMOGENEOUS SLOPES.	34	Combinado	2	1	1	2	3	9	2	1	0	2	1	6	1	0	2	3	21
GUÍA METODOLÓGICA PARA ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGOS POR MOVIMIENTOS EN MASA	35	Combinado	2	1	1	2	3	9	3	2	0	2	2	9	2	2	2	3	27

Con base en la Tabla 2- 3, se realizó una gráfica comparativa (Figura 2- 1) entre los puntajes del componente hidráulico y del componente Geológico – Geotécnico, donde se observa que son pocos los estudios que realmente hacen una buena evaluación de ambos aspectos.

Esto en buena medida se debe a la necesidad de un equipo multidisciplinario para la aplicación de la metodología. Además, cualquiera de los dos componentes requiere de una buena inversión de trabajo para su correcto análisis por lo que comúnmente tratan de enfocarse en uno solo con el cual puedan obtener resultados próximos a la realidad.

En la Figura 2- 1, pueden observarse los valores totales de cada componente (Hidrológico y Geológico – Geotécnico) en el eje vertical, mientras que para la identificación del estudio analizado se presenta el número asignado en la Tabla 2- 3 en el eje horizontal.

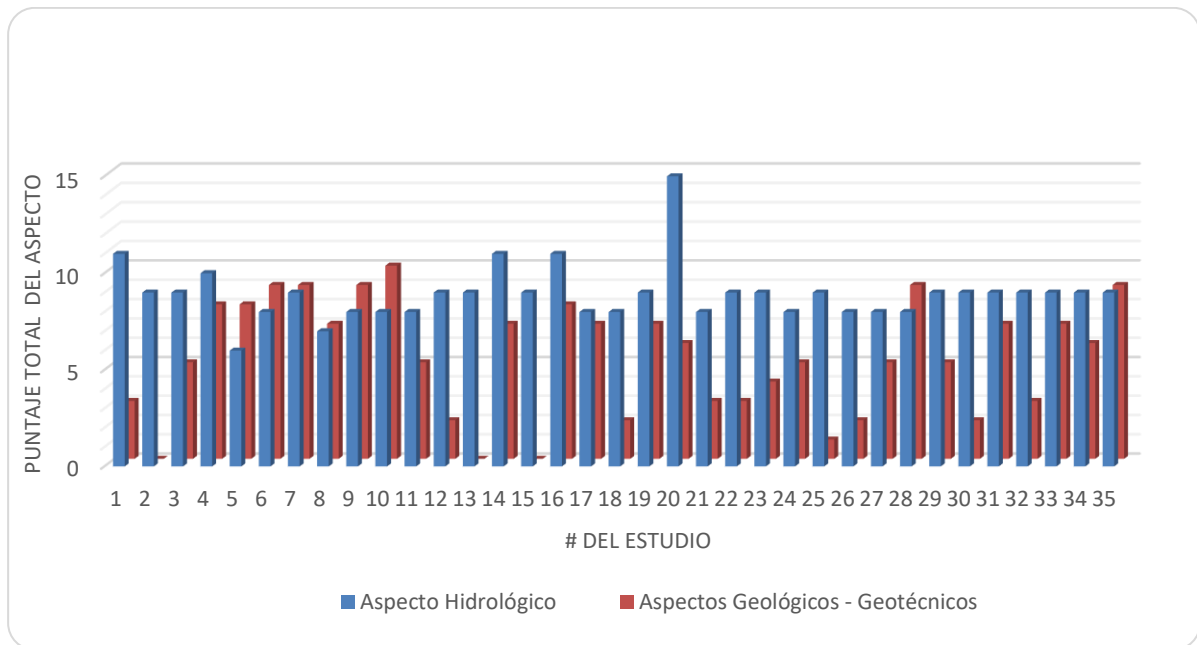


Figura 2- 1 Comparación entre los puntajes obtenidos de los componentes hidrológicos y Geológico – Geotécnico dentro de un mismo estudio.

Adicionalmente, en la Figura 2- 1, puede observarse que el aspecto hidrológico es el que con mayor frecuencia se evalúa en la relación lluvias deslizamiento, teniendo la existencia de metodologías que están enfocadas únicamente a las variaciones climáticas y dejan por fuera de todo análisis aspectos diferentes a este, tal es el caso de los estudios número 2, 13 y 15, no obstante, los estudios 12, 18, 22, 25, 26 y 30, presentan igualmente una precaria evaluación de los aspectos geológicos – geotécnicos, simplificando de una manera importante el problema al relacionarlo únicamente con la ocurrencia de precipitaciones. El estudio 12 específicamente, realiza un detallado análisis hidrológico incorporando variables inusuales en los estudios evaluados como lo son el brillo solar, la humedad relativa y la temperatura, que si bien influyen en la cantidad de agua que se infiltra, la mayoría de los autores no lo analiza explícitamente puesto que se considera despreciable su efecto para la estabilidad de taludes.

Por el contrario, cuando el análisis del componente geológico – geotécnico sea realmente detallado, este siempre viene acompañado de la evaluación de las condiciones hidrológicas de la zona, bien sea acoplando las configuraciones de lluvias diarias y antecedentes, o estimando la succión e infiltración dependiendo de las características del material que conforme la ladera.

Por último, con base en la Tabla 2- 3, se encuentra que las mejores calificaciones las obtienen con 23 a 27 puntos los estudios identificados con los números 7, 9, 14, 16 y 35, los cuales están conformado en mayor proporción por los métodos combinados (9, 14, 16,35) estos evalúan ambos componentes de manera importante, tratando de determinar las posibles características de lluvia asociada a la zona para un periodo de retorno específico, para luego introducirlas como parámetros de entradas (generalmente como presión de poros) en el análisis de estabilidad geotécnico.

Por otro lado, el estudio número 7 implementa el método estadístico, sin embargo, este acopla a la determinación de un umbral empírico de lluvia ciertas características topográficas y del suelo de cada región, estimando otros aspectos adicionales al hidrológico.

El método estadístico es el más utilizado a nivel mundial según varios autores (Guzzetti, Aristizábal, Peruccacci, Brunetti) y dentro de los 35 estudios analizados 16 fueron realizados mediante esta metodología, siendo igualmente la más utilizada (Ver Figura 2-2). Adicionalmente, dentro de los métodos combinados que se aplicaron en 11 estudios, algunos de estos poseen un fuerte componente estadístico principalmente en el análisis hidrológico.

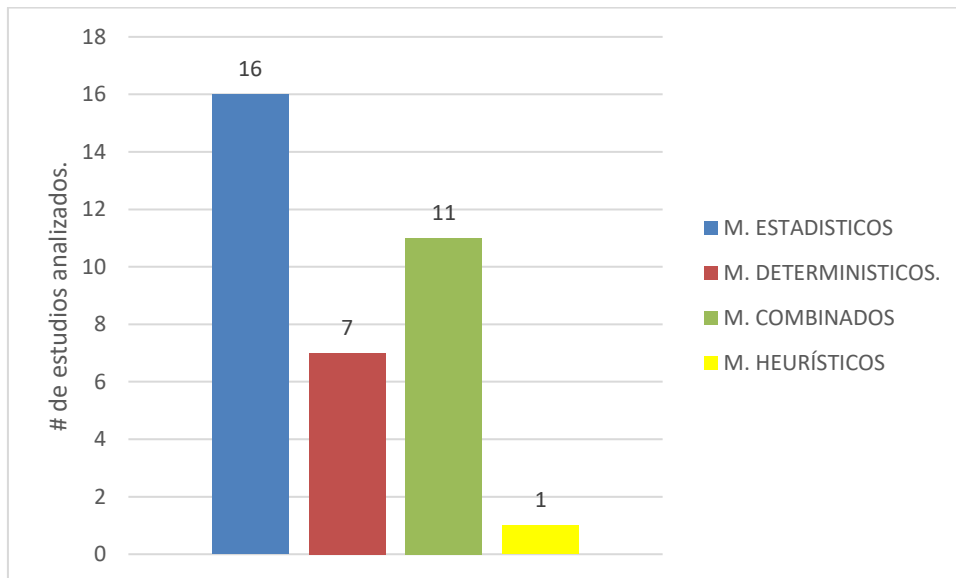


Figura 2- 2. Comparación de los artículos evaluados según el método aplicado.

Todos los estudios analizados tienen en común que no varían mucho los parámetros hidrológicos evaluados para estimar la variación del nivel freático que pueda llegar a afectar la estabilidad de laderas.

Se hace notoria la importancia y aplicación de dos insumos en especial: las configuraciones de las lluvias y la capacidad de infiltración del suelo. Estas características son dentro de los artículos evaluados, los que presentan una mayor utilización para desarrollar las metodologías (Ver Figura 2- 3).

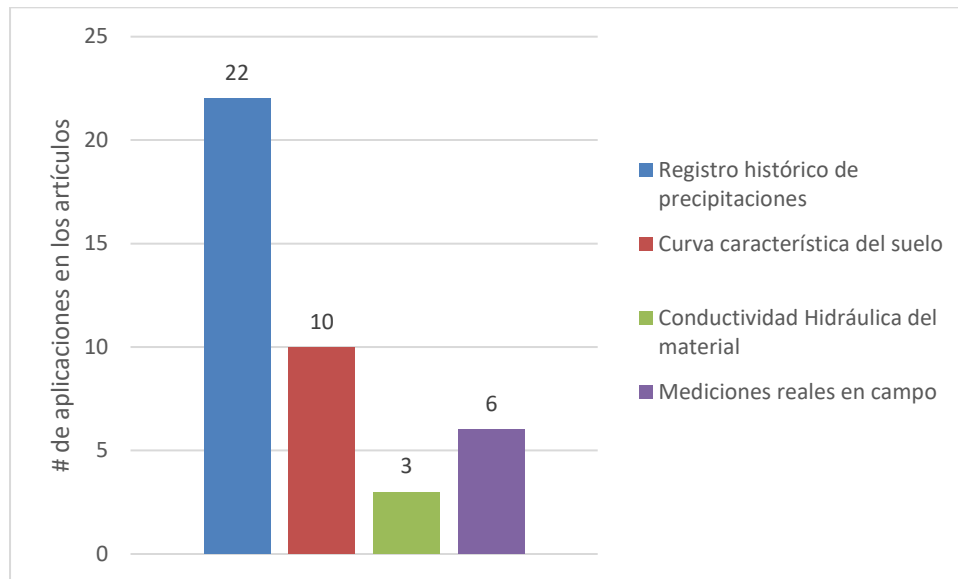


Figura 2- 3. Parámetros hidrológicos utilizados

Finalmente, los registros de lluvia se presentan como una información indispensable para trabajar con datos representativos de las posibles configuraciones de lluvias para ciertas zonas en específico, y así evitar errores sobrestimando o subestimando la oferta hídrica a la cual pueda estar sometida una región. Sin embargo, los análisis de lluvia pueden variar de un artículo a otro, siendo hasta el momento los registros con información pluviográfica los más utilizados sin existir grandes diferencias con los otros registros (Ver Figura 2- 4).

Esto se debe a que generalmente se hace difícil contar con un registro horario que cumpla los requerimientos de antigüedad para ser utilizados en los análisis, de esta forma se recurre a trabajar con la información pluviométrica.

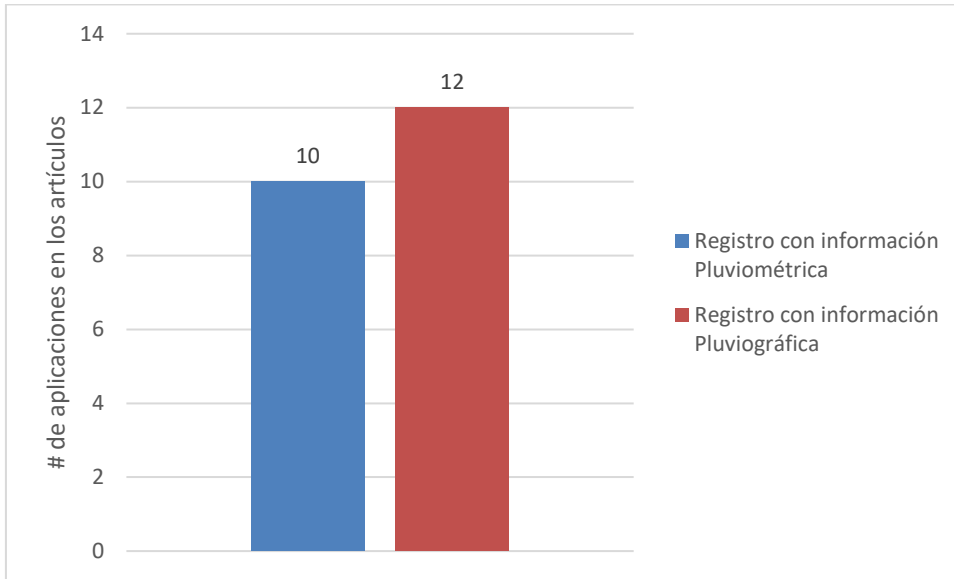


Figura 2- 4. Análisis de la información de precipitaciones.

Las lluvias antecedentes bajo ciertas condiciones especiales de geología y geomorfología principalmente, pueden resultar importantes en la predicción de deslizamientos. Su estudio se presentó con cierta normalidad dentro de los artículos seleccionados, 16 de estos estimaron esta condición explícitamente dentro de los análisis, todos apoyados en los registros de precipitación (ver Figura 2- 5).

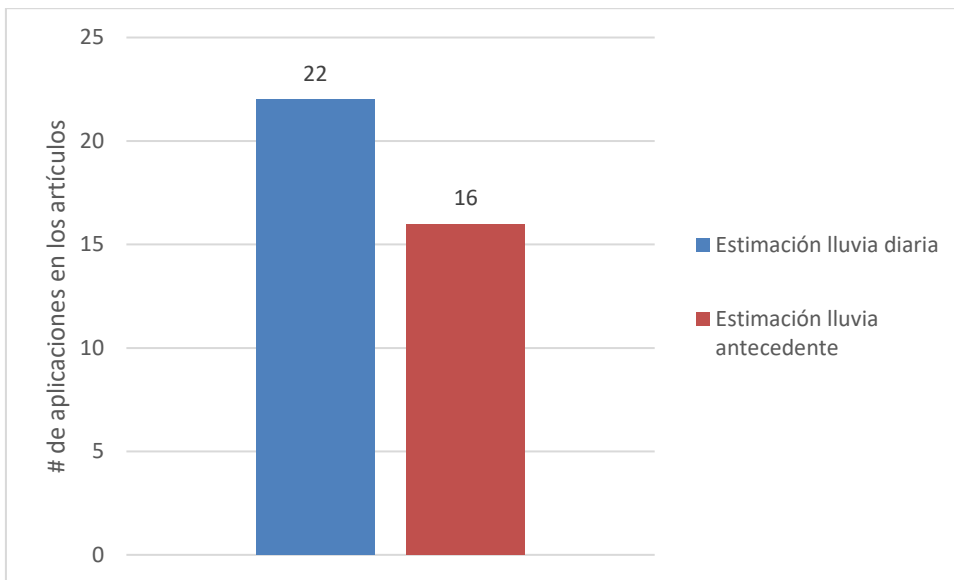


Figura 2- 5. Estimación de las lluvias diarias vs estimación de las lluvias antecedentes.

Los días anteriores considerados para el análisis de lluvia antecedente difieren en gran proporción de un estudio a otro, la incertidumbre acerca de cuántos días deben ser evaluados o se presentan como los más determinantes dentro de la estabilidad de la ladera son aun considerables y se puede inferir que dependen de las características de la zona objeto de estudio. No obstante, dentro de los 16 artículos que consideraron este análisis, se mostró una tendencia a la estimación de los 30 últimos días antes del evento pudiéndose extender hasta 180 días (ver Figura 2- 6).

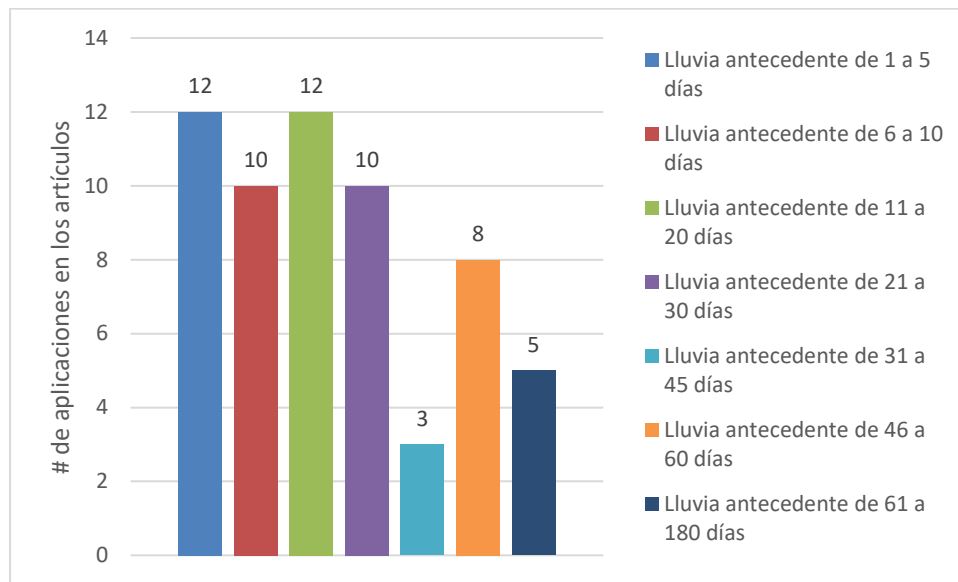


Figura 2- 6. Número de días antecesdes evaluados para el análisis de la lluvia antecedente.

Cuando se requiere de información hidrológica adicional a los registros de lluvia, como por ejemplo la curva característica del suelo, la capacidad de infiltración, las presiones de poros, el contenido de humedad, entre otras. Dicha información puede ser obtenida con mediciones directas en campo sobre el talud o área de estudio, o sobre muestras ensayadas en el laboratorio.

Dentro de los estudios que utilizaron esta información, 12 la obtuvieron de ensayos de laboratorio y solo 3 con mediciones reales llevadas a cabo en campo. Esto es predecible cuando la instrumentación y verificación de los datos obtenidos en campo, es una actividad que requiere la inversión de importantes cantidades de insumos (ver Figura 2- 7).

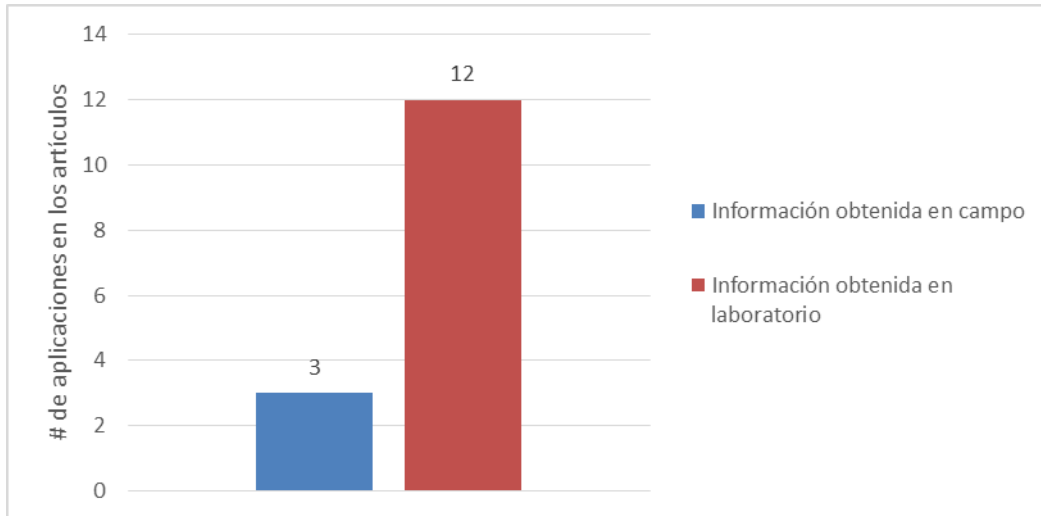


Figura 2- 7. Fuente de la información hidrológica distinta a los registro de precipitación.

Otros parámetros como la cobertura, geomorfología, variabilidad espacial, entre otros, son estimados en la mayoría de los estudios pero no siempre son asociados a la influencia que estos parámetros pueden tener sobre la cantidad de agua infiltrada en un talud. Los usos del suelo y cobertura, son los parámetros con mayor frecuencia estimados, bien sea dentro de los análisis hidrológicos o solo dentro de los análisis de estabilidad (ver Figura 2- 8).

Los modelos de infiltración más comúnmente utilizados como el de Green-Ampt, requieren de modificaciones para estimar algunos de estos parámetros puesto que en su versión original la mayoría simula superficies homogéneas, horizontales.

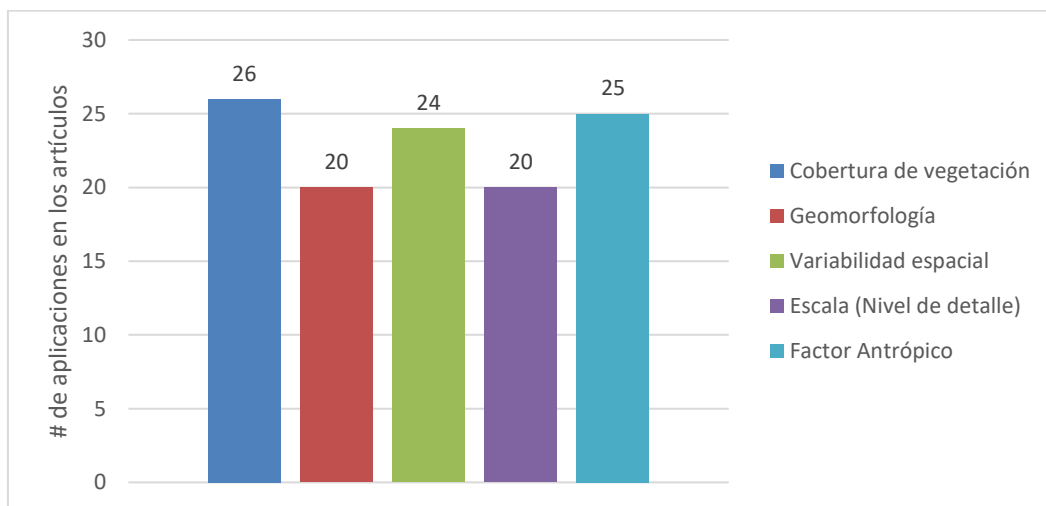


Figura 2- 8. Número de estudios que evalúan diferentes características que influyen en los análisis de estabilidad con inclusión de parámetros hidrológicos.

2.6 Análisis de resultados

En cuanto a las metodologías de análisis con la inclusión de parámetros hidrológicos tenemos que estas básicamente se dividen en cuatro tipos:

Los métodos heurísticos a pesar de no ser los ideales para plantear una metodología efectiva, se hace necesario incluirlo debido a su amplia distribución y aplicación tanto en Colombia como en el mundo. El empirismo es una manera muy práctica de llegar a la solución de un problema, no obstante, carece de rigurosidad matemática lo que le confiere una baja a nula posibilidad de repetitividad.

Por otra parte, al no tener realmente una metodología sistemática, también se ha prestado para la mala praxis y en muchos casos los esfuerzos requeridos para la investigación se van estérilmente en modelos que nada tienen que ver con la realidad y dificultan el entendimiento en sí de los procesos que intervienen y modifican la estabilidad de una ladera al ocurrir el evento lluvioso.

Los métodos heurísticos tienen una relevancia importante, ya que su extensión a nivel mundial y su conocimiento general favorece mucho a su aplicación, aunado a esto, hasta dentro de las metodologías con argumentos matemáticos más rigurosos, encontramos algo del método heurístico para el procesamiento de la información. En la estabilidad de taludes afectados por el factor hídrico, el método heurístico, ha funcionado en algunos casos para estabilizar las laderas ya afectadas, de igual forma la capacidad de predicción de dónde y sobre todo cuándo el movimiento ocurre presentan significativas falencias que repercuten en la credibilidad y confianza del método.

Los métodos estadísticos: según la opinión general de diferentes autores (Gariano, et al. 2014, Peruccacci, et al. 2014, Segoni, et al. 2013, Peruccacci, et al. 2011, Canales, 2011, Brunetti, et al. 2010. Aleotti, 2004), los umbrales empíricos de lluvias representan entre sus limitaciones los métodos más efectivos hasta el momento y son fácilmente aplicables por lo que su utilización es cada día más frecuente.

Los métodos estadísticos generalmente presentan como insumos mínimos necesarios para su aplicación:

- Serie histórica de precipitaciones (pluviométrica o preferiblemente pluviográfica), con al menos 15 años de registros.

-
- Un mapa o inventario de procesos de remoción en masa atribuible a condiciones extremas de precipitaciones, en caso de no contar con el mapa se requiere al menos el conocimiento de un deslizamiento que pueda ayudar a encontrar características de lluvia que puedan asociarse a procesos de inestabilidad.

Estos métodos parten de la hipótesis de que es el agua la causa de la ocurrencia de los deslizamientos, simplificando el problema a determinar las posibles características de las precipitaciones que generen procesos de inestabilidad. Para lograrlo, se debe contar con series históricas de precipitación que son sometidas a análisis diarios y/o lluvias antecedentes, por lo general para diferentes periodos de tiempo los más comunes 3, 5, 15, 30 y 45 días.

Es evidente que el empirismo tiene un papel importante dentro del método, no obstante, estas correlaciones han tenido aceptables resultados en cuanto a efectividad de pronósticos de iniciación de deslizamientos.

Por otro lado, aspectos hidrológicos tan importantes como el efecto del nivel freático, los cambios en la succión o la infiltración no son tomados en cuenta, al menos de forma directa y esto produce importantes fuentes de incertidumbre que no pueden ser obviadas.

En términos generales, toda la caracterización hidrológica se adopta a partir de información secundaria que cuanto más amplia sea esta base de datos, más confiable serán los resultados obtenidos.

El método en general no estima el suelo ni los procesos que sobre estos se inician al producirse una precipitación, los resultados están sesgados únicamente a la lluvia diaria o acumulada y la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo.

El resultado final de la metodología permite identificar extensas áreas con mayor susceptibilidad a deslizamientos que otras, ya que arroja valores de lluvias sobre los cuales se incrementa la amenaza a ocurrencia de los movimientos, de esta manera son buenas herramientas para los planes de gestión de riesgo y los sistemas de alerta temprana.

Los métodos determinísticos requieren igualmente de al menos información de la exploración de campo, con el fin de obtener propiedades de los materiales del subsuelo, para así poder modelarlos.

Las características hidrológicas que considera, vienen generalmente dadas por las propiedades del suelo y en particular su capacidad de infiltración. No obstante, al no realizar el análisis de precipitaciones representativas para la zona, se puede caer en errores significativos ya que en muchas ocasiones se trabaja con datos de precipitación muy alejados de la realidad, intensidades y duraciones que no se pueden generar, aquí radica la importancia de la inclusión del análisis de lluvias dentro de la metodología.

En el caso de los demás aspectos hidrológicos, generalmente se evalúan en conjunto debido a que todos son dependientes entre sí, aunque, todos estos difieren en un gran número de veces en el método con el cual estiman la influencia del agua subsuperficial y subterránea.

El nivel freático se puede llegar a determinar con ensayos de campo que permitan conocer su ubicación, misma que en todo caso será puntual espacial y temporalmente. Pero es la variación de este lo que realmente importa siendo dependiente de las fluctuaciones de las precipitaciones, caudales y fugas de los cuerpos de agua, para lo que necesariamente se debe contar con análisis o modelamiento hidrológico que en muchas ocasiones requiere de la evaluación de las precipitaciones, alcances que en general no se realizan.

En su defecto, se tiende a asumir valores conservadores de variaciones del nivel freático, bien sea por la altura del mismo asumidos de manera mayormente empírica o modelando para diferentes relaciones de presión de poros (R_u), donde en muchos casos termina arrojando valores catastróficos que muy probablemente no puedan alcanzarse con las configuraciones de precipitación típicas de la región.

Pequeñas mejoras a la metodología sugieren que se debe acoplar un modelo hidrológico al modelo geotécnico de estabilidad y asignarles parámetros de entradas reales producto de las precipitaciones, etapas de campo o pruebas de laboratorio.

Entre los modelos de infiltración más utilizados actualmente se tiene Green-Ampt (generalmente modificado), que destaca por su simpleza y buenos resultados consistentes en muchos casos con las ecuaciones de Richards. El modelo considera un suelo completamente saturado desde la superficie hasta el frente húmedo, mientras que por debajo del frente húmedo presenta un grado de saturación igual al inicial. La limitación con esta hipótesis es que en suelos la falla se puede producir mucho antes de que este se

sature por completo, en este sentido las propiedades que toma no son las más aproximadas y puede estarse por el lado inseguro.

La succión se presenta únicamente en suelos parcialmente saturados, donde la complejidad aumenta de forma importante arrojando ecuaciones que hasta el momento son difícilmente resueltas y se debe acudir a modelos hidromecánicos acoplados generalmente mediante elementos finitos y a su medición con ensayos de laboratorio (curva característica de retención de agua o medición de la succión matricial) que pocas veces son estimados dentro de los costos y tiempos de los proyectos, por lo que se desestima la mayoría de las veces, aun conociendo que la mayoría de los deslizamientos superficiales pueden estar influenciados en gran parte por este factor.

A lo largo del trabajo realizado se pudo observar que el problema más común que se tiene dentro de la estabilidad de taludes principalmente en procesos detonados por lluvias, es que se analizan los factores individualmente como si actuaran de manera alterna cuando la realidad es que el talud funciona como un sistema donde convergen todos los elementos analizados y su interacción es la que puede o no generar procesos de inestabilidad, por lo que para obtener resultados reales se debe necesariamente analizar todo o la mayoría de los aspectos que puedan intervenir.

Los métodos determinísticos, para estimar la afectación del agua en un talud, aplican análisis de estabilidad por métodos de equilibrio límite o elementos finitos, con inclusión de propiedades hidrológicas y condiciones de fronteras que se asemejen a la realidad del problema.

Como características generales se tiene que los análisis más usados suponen una pendiente constante y de longitud infinita, donde la superficie de falla se genera de manera paralela a la topografía y el espesor de la masa desplazada es mucho menor que la longitud, sin embargo, este modelo es muy simplista por lo que se han asociado superficies de falla más reales que arrojan resultados potencialmente mejores, esto forma parte de una de los aspectos más relevantes dentro de los análisis definiendo en gran medida la efectividad del método.

Otro aspecto que es fácilmente generalizado es que las propiedades del suelo se determinan con base en ensayos de campo y laboratorio, toma de muestras, entre otras

actividades que permiten asignar propiedades geotécnicas a los materiales en profundidad.

La geomorfología, se evalúa de forma convencional mediante la interpretación de imágenes remotas, sin embargo, existen modelos 3D capaces de considerar algunos datos importantes de tipo morfométrico como la longitud, forma de la ladera, lo cual tiene gran influencia para análisis de flujos en laderas cóncavas, donde se tiende a acumular el agua transportada.

Los métodos combinados por su parte, usan las herramientas que aportan todas las metodologías antes mencionadas para dar solución espacial y temporal a la ocurrencia de deslizamientos. Además, pueden ser usados también en sistemas de alerta temprana.

Requieren de una modelación hidrológica previa al análisis de estabilidad, los resultados así obtenidos, van enfocados a la determinación de la variación del nivel freático o la definición de una columna de agua mínima a la cual se detona el movimiento para un periodo de retorno específico.

3. Modelación numérica de la infiltración en taludes.

Una modelación numérica es aquella que puede simular matemáticamente un proceso físico real, en este caso, el flujo de agua a través de un medio poroso. En el presente documento, se implementa el módulo Seep/W del software Geoslope que aplica elementos finitos, utilizado especialmente para el análisis de filtraciones de aguas subterráneas. Su formulación integral le permite considerar los análisis que van desde problemas simples a complejos, con suelos saturados y no saturados, como así también lleva a cabo la solución de problemas dependientes del tiempo.

La implementación de estos softwares es relativamente reciente, y forman parte de unas herramientas potentes que ayudan a solucionar ecuaciones complejas en muy cortos periodos de tiempo. En el presente documento, estas sirven para evaluar las afectaciones que sobre los procesos de infiltración tienen las variables hidrológicas más utilizadas en los métodos de análisis.

3.1 Modelación de flujos en suelos parcialmente saturados.

Existen dos tipos de análisis de infiltración fundamentales utilizando elementos finitos, estado estacionario (permanente) o estado transitorio.

Cuando el flujo comienza, la presión intersticial en el suelo pasa de valores iniciales a valores finales que deben ser compatibles con las nuevas condiciones hidráulicas del borde y, además con los cambios de volumen que se producen en la masa de suelo. Durante este periodo el flujo varía en función del tiempo y deja de ser permanente lo cual aumenta la complejidad y se le denomina flujo transitorio.

Sin embargo, cuando la presión intersticial en toda la masa de suelo se equilibra con las nuevas condiciones de borde, el flujo se vuelve independiente del tiempo y en ese caso se tiene un flujo permanente o estacionario.

La velocidad a la cual la presión intersticial se ajusta a los nuevos valores de equilibrio, durante un flujo transitorio depende del tipo de suelo.

El programa esta formulado sobre las bases de que el flujo de agua a través de un suelo saturado o no saturado, sigue la ley de Darcy, la cual establece que:

$$q = ki \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

q= descarga especifica

k= conductividad hidráulica

i= gradiente de la cabeza total hidráulica

La diferencia cuando se aplica para suelos no saturados recae en que la conductividad hidráulica no es una constante sino que varía dependiendo del contenido de agua e indirectamente con los cambios en la presión de poros.

Por otra parte, la ecuación de diferencias parciales que gobierna la infiltración bidimensional puede ser expresada como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

H= cabeza total

K_x= conductividad hidráulica en la dirección X

K_y= conductividad hidráulica en la dirección Y

Q= flujo de borde aplicado

Θ= contenido volumétrico de agua

t= tiempo

La ecuación 8, establece que la diferencia entre el flujo que entra y que sale de la unidad de suelo en un punto de tiempo es igual al cambio en el almacenamiento del sistema.

Para el estado estacionario, el flujo que entra es igual al que sale para cualquier periodo de tiempo, por lo que el término derecho de la ecuación se puede igualar a cero, reduciendo la misma.

Al llevar a cabo algunas suposiciones se puede encontrar a partir de la ecuación 9, la ecuación diferencial usada en Seep/W para la formulación de elementos finitos que viene dado por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{Ecuación 9}$$

Ahora bien, aplicando el método Galerkin de residuos ponderados a lo obtenido anteriormente, se encuentra la ecuación que rige la infiltración bidimensional en elementos finitos expresada y abreviada como:

$$[K]\{H\} + [M]\{H\}, t = \{Q\} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$[K]$ = la matriz característica del elemento

$[M]$ = la matriz de masa del elemento

$\{Q\}$ = el vector del flujo aplicado del elemento

Esta ecuación al estar en función del tiempo es la utilizada para los análisis en estado transitorio, no obstante, para evaluar considerando estado estacionario, la cabeza no es función del tiempo por lo que el término “ $\{H\}, t$ ” se reduce.

Por último, la solución de elementos finitos para análisis transitorios tiene cambios en la cabeza total que son función del tiempo. Para obtener los resultados hacen una aproximación por diferencias finitas reescribiendo la ecuación de elementos finitos en términos de diferencias lo cual da como resultado la ecuación 11:

$$H_1 = \frac{\Delta t \{Q_1\} + [M]\{H_0\}}{\Delta t [K] + [M]} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

Δt =incremento del tiempo

H_1 = la cabeza al final del incremento

H_0 = la cabeza al inicio del incremento

Q_1 =el flujo nodal al final del incremento

K =el elemento de la matriz de la conductividad hidráulica

M =el elemento de la matriz del almacenamiento del agua

Para resolver estas ecuaciones es necesario conocer la curva de retención característica del suelo. SEEP/W permite definir estas curvas manualmente o bien mediante los modelos de Arya y Paris (1981), Kovacs modificado, Fredlund y Xing (1994) y Van Genuchten

(1980). A su vez, es también necesario conocer la relación funcional entre conductividad hidráulica y succión, la cual puede ser estimada en SEEP/W, utilizando los modelos de Fredlund et al (1994), Green y Corey (1971) y Van Genuchten (1980).

3.2 Esquema general de evaluación.

Todas las modelaciones numéricas son aproximaciones a los procesos físicos que rigen en la naturaleza. Sin embargo, para poder obtener resultados aceptables, es necesario realizar simplificaciones a las características reales del problema.

Por tal sentido, la configuración del talud para evaluar las afectaciones que ejercen las variables hidrológicas sobre la infiltración es presentada en la Figura 3- 1, donde se puede observar una ladera compuesta de dos materiales. El elemento más superficial tiene un espesor variable según el tipo de deslizamiento que se esté evaluando (superficiales o profundos) y se encuentra apoyado en todos los casos sobre un material impermeable ($K=1e^{-13}$ m/s).

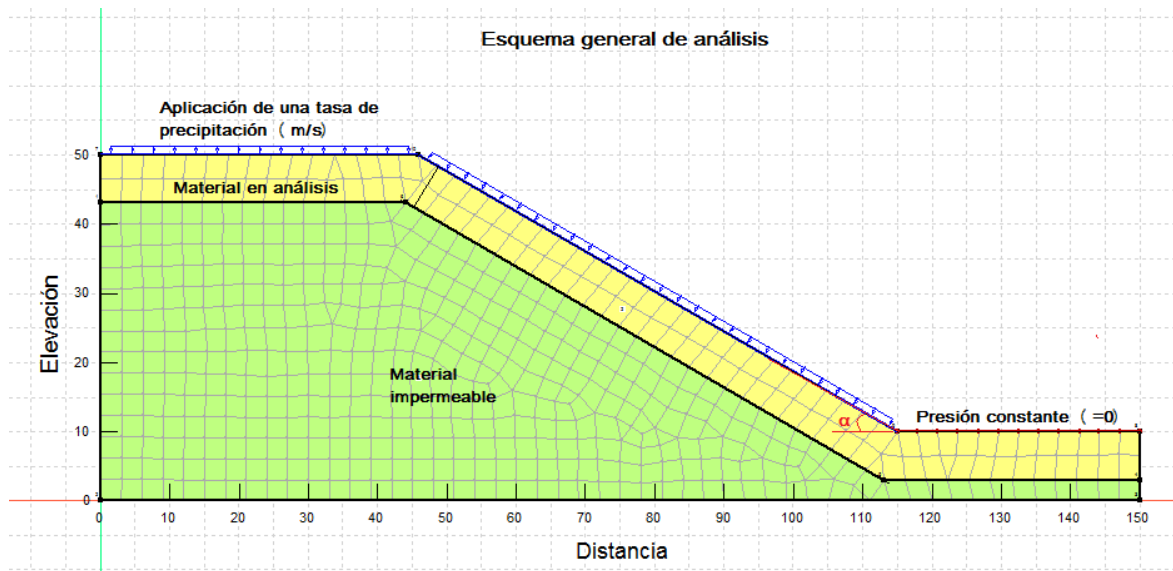


Figura 3- 1. Esquema general de análisis

Las condiciones de fronteras asignadas son las siguientes:

En la parte superior y pendiente del talud, se dispone de un flujo de infiltración constante que puede ser correlacionado con una intensidad de lluvia, con su respectivo análisis de infiltración.

En la parte baja se encuentra una condición de borde de $P=0$. Todas estas condiciones son explicadas en detalle más adelante en este capítulo.

3.2.1 Modelos de los materiales y propiedades

A pesar de que el software cuenta con 4 modelos diferentes de materiales, para realizar el análisis solo se utilizó el **modelo saturado / no saturado**, el cual como su nombre lo indica, hace referencia a materiales que a lo largo del ejercicio pueden presentar ambas condiciones.

Para realizar su correcta aplicación es necesario conocer tanto la función de la conductividad hidráulica como la función de contenido de agua, esta última especialmente importante cuando se trabaja con flujos en estado transitorio.

Entre las propiedades más importantes utilizadas para el análisis están:

Función del contenido volumétrico de agua: los espacios vacíos o poros del suelo pueden estar llenos de agua, de aire o de ambos dependiendo el estado en el que se encuentre. Estimar el contenido volumétrico de agua en suelo saturados es simple debido a que se considera igual a la porosidad del suelo, sin embargo, para suelos no saturados el volumen de agua almacenada dentro de los poros varía dependiendo de la succión matricial, definida como la diferencia entre el aire y la presión de agua.

No hay valores fijos de contenido de agua ni en tiempo ni en espacio por lo que es necesario implementar una función que describa como cambia el contenido de agua con diferentes presiones. Para esto se utiliza la función del contenido volumétrico de agua, la cual describe la capacidad del suelo de almacenar agua según los cambios en la presión matricial (Ver Figura 3- 2).

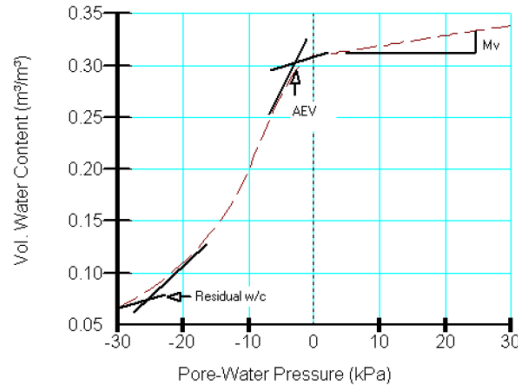


Figura 3- 2 Función del contenido volumétrico de agua.

Existen igualmente tres características importantes de la curva para conocer:

El valor de entrada de aire (AEV): corresponde al valor de la presión de poros negativa cuando los poros más grandes comienzan a drenarse libremente.

La pendiente de la función para los rangos de las presiones negativas y positivas (Mv)

El contenido de agua residual (Θ_r): representa el contenido volumétrico de agua del suelo donde un aumento adicional en la presión de poros negativa no produce cambios significativos en el contenido de agua.

Función de la conductividad hidráulica: refleja la capacidad de un suelo de transportar agua bajo condiciones saturadas o no saturadas. Esta capacidad aumenta con el grado de saturación de la muestra como se puede observar en la Figura 3- 3.

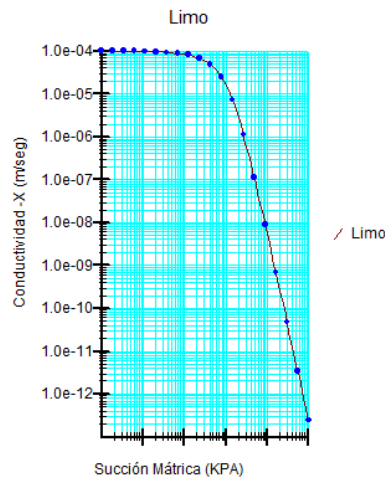


Figura 3- 3 Función de la conductividad hidráulica.

Actualmente la obtención de este tipo de información consume mucho tiempo y recursos, por lo que se han desarrollado numerosos métodos o aproximaciones para predecirla que utilizan la curva de distribución de tamaño de grano o la función del contenido volumétrico de agua y la conductividad hidráulica saturada, en el caso de análisis y para obtener esta curva se utilizó el método planteado por Van Genuchten.

La ecuación 12, es la propuesta para describir la conductividad hidráulica de un suelo en función de la succión matricial.

$$K_w = K_s \frac{[1 - (a\Psi^{(n-1)})(1 + (a\Psi^n)^{-m})]^2}{((1 + a\Psi^n)^{\frac{m}{2}})} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

K_s = conductiva hidráulica saturada

a , n , m = parámetros de ajuste de la curva

$n = 1/(1-m)$

Ψ =rango de succión requerido

Por lo tanto la función de la conductividad del suelo puede ser estimada desde que se conozca K_s , a , m . V

Van Genuchten demuestra que a , m , pueden ser estimados gráficamente basados en la función del contenido volumétrico de agua de la siguiente forma:

La pendiente de la función, puede ser calculado como:

$$Sp = \frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \left| \frac{d\theta_p}{d(\log \Psi_p)} \right| \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

Θ = contenido volumétrico de agua (saturado y residual según el subíndice).

Θ_p =el contenido volumétrico de agua en el punto medio de la función.

Ψ_p = la succión matricial en el mismo punto.

Por lo que Van Genuchten propone las siguientes ecuaciones una vez calculado S_p .

$$m = 1 - \exp(-0,8Sp) \quad \text{para } Sp \text{ entre } 0 \text{ y } 1 \quad \text{Ecuación 14}$$

$$m = 1 - \frac{0,5755}{Sp} + \frac{0,1}{Sp^2} + \frac{0,025}{Sp^3} \quad \text{para } Sp > 1 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$a = \frac{1}{\psi} \left(2^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{(1-m)} \quad \text{Ecuación 16}$$

Adicionalmente, se definieron valores de conductividad hidráulica saturada y contenido residual para cada uno de los materiales en análisis con base únicamente en información secundaria y valores típicos teóricos.

3.2.2 Condiciones de borde

Son junto con las propiedades del material una de las características más importantes dentro de la modelación en suelos parcialmente saturados. Los flujos de infiltración se producen debido a las diferencias de la cabeza hidráulica total entre dos puntos, es necesario conocer y definir de manera correcta las condiciones de borde ya que estas establecen parte de las diferencias que permiten la iniciación de los flujos interviniendo de manera notoria en los resultados.

Dentro del análisis realizado las condiciones utilizadas fueron las siguientes:

Condición de presión constante: existen casos donde la cabeza de presión es constante en una superficie y lo que varía es la cabeza total en los nodos. En el ejercicio realizado se supone que toda el agua que transita producto de la infiltración se acumula en la parte baja del talud o pie del talud, una condición muy común en naturaleza donde se puede observar con frecuencia zonas de encharcamiento o humedales. Con este tipo de borde, el programa hace la cabeza de presión igual a cero (presión atmosférica) y encuentra la coordenada "y" de cada nodo la cual está relacionada con la altura y lo selecciona como cabeza total.

Caras o bordes de infiltración: con esta condición se logra especificar una tasa de infiltración a través del borde de un elemento, que puede ser correlacionada con procesos naturales como la lluvia. Cuando se va a solucionar incógnitas de las ecuaciones de elementos finitos, es necesario especificar o calcular el flujo en los nodos. En

consecuencia, cuando se especifica una unidad de tasa de infiltración a través del borde de un elemento, es necesario integrar a lo largo del borde del elemento y convertir la unidad de tasa de flujo (q) en flujos o caudales nodales (Q). Sin embargo, el software hace esta integración automáticamente.

Dentro de la malla de elementos finitos solo se pueden definir la cabeza (H) o el flujo (q caudal unitario o Q caudal nodal) como condiciones de frontera. No obstante, existen situaciones en las que ninguna de las dos es conocida.

Esto ocurre con las caras de infiltración donde el problema recae en que pocas veces es conocida la dimensión de esta, por lo tanto se determina como parte de la solución a través de procesos iterativos. Al final de cada iteración, la condición a lo largo de la cara especificada con esta característica es revisada para ver si cumple con los criterios correctos.

Para estas ocasiones, la condición de borde a lo largo de toda la superficie de infiltración potencial es ajustada a $Q=0$ (flujo), lo cual indica que ningún flujo adicional va a ser añadido o removido de estos nodos, y con la especificación que la condición será revisada y ajustada según sea necesario. Al final de la primera iteración después de que las cabezas son calculadas para todos los nodos a lo largo de la cara de infiltración potencial, se comprueba si algún nodo tiene una presión positiva (H mayor a la elevación). Los nodos con presiones mayores a cero (0) no son permitidos ya que la presión positiva sobre la superficie indica encharcamiento, lo cual no ocurre a lo largo de una pendiente. Sin embargo, esto indica que la condición de borde especificada de $Q=0$ no es correcta. Físicamente, esto significa que el agua quiere salir del sistema, pero la condición fijada con respecto al caudal no lo permite. Por lo tanto, para dejar que el agua salga el software convierte la condición de borde especificada a una tipo cabeza con H igual a la coordenada "y" (presión de agua cero) para cada nodo con un cálculo de presión positivo y una nueva solución se calcula.

Luego de ese paso, el agua puede dejar o ingresar al sistema en los nodos que se convirtieron de un tipo Q a un tipo H , por lo que el software comprueba si el Q calculado es negativo (sale del sistema) o positivo (entra al sistema). Calcular el flujo que sale del sistema es aceptable a diferencia del cálculo del flujo que ingresa.

En los nodos a lo largo de la superficie de infiltración potencial con flujos positivos, el programa convierte la condición tipo H, nuevamente a la condición original o especificada tipo Q y repite el análisis. Este proceso se repite hasta que todos los nodos sobre la superficie de infiltración potencial que tengan un cálculo tanto de la presión de agua cero ($H=y$) como de Q igual cero. Es necesario aclarar que se puede especificar un caudal diferente a cero que podría generar el efecto de infiltración de la lluvia sobre un talud, no obstante dentro de la modelación se prefirió dejar en cero debido a que no se conoce a ciencia cierta la cantidad de agua que entraría bajo una misma precipitación cuando se varía el ángulo de la pendiente. De esta manera igualmente se obtienen resultados aceptables para el fin de la investigación que es conocer las afectaciones de los parámetros hidrológicos más implementados en los análisis.

3.3 Resultados

Los resultados obtenidos se dividieron en dos partes debido a las diferencias en las condiciones bajo las cuales se modeló el proceso. Estas diferencias se producen debido al objetivo final de la modelación realizada.

3.3.1 Análisis de las afectaciones que ejercen las variables hidrológicas más utilizadas sobre la infiltración en taludes.

A partir de los resultados obtenidos en el capítulo 2, se puede establecer que las variables hidrológicas más utilizadas sobre la infiltración en taludes son la capacidad de infiltración del suelo que está relacionada directamente con la conductividad hidráulica, y las características de la lluvia.

En tal sentido se realiza la modelación numérica con un método matemático riguroso como lo es los elementos finitos, para intentar conocer las variaciones que pueden producirse en el sistema aplicando diferentes tasas de infiltración correlacionable a eventos lluviosos aplicados en taludes con diferentes materiales y diferentes pendientes.

Análisis en estado estacionario o flujo permanente: se realizó un análisis para conocer la tasa de agua infiltrada constante requerida para saturar un talud y cómo esta varía dependiendo de la pendiente y la conductividad hidráulica o tipo de material. Si la tasa de

infiltración es menor que la mínima requerida el flujo se equilibra sin que se sature la totalidad del talud.

Se modelaron 6 tipos diferentes de materiales (arcilla, limo-arcilloso, limo, arena-limosa, arena y grava) y se hizo variar la pendiente de 10° a 60° alcanzando 6 modelos para cada material.

Es necesario aclarar, que este análisis es independiente del tiempo por lo que no entra en evaluación dentro de la modelación arrojando información únicamente de la tasa de infiltración constante necesaria para elevar la posición de la tabla de agua. Las propiedades definidas para cada tipo de material, fueron seleccionadas a partir de información bibliográfica, mismos que pueden ser observados en la Tabla 3- 1.

Tabla 3- 1 Características hidráulicas para cada material.

	WCsat	Ksat (m/s)	Θr
Arcilla	0,55	1,00E-09	0,1
Arcilla-limosa	0,4	1,00E-08	0,08
Limo	0,35	7,00E-07	0,05
Arena-limosa	0,35	1,00E-06	0,01
Arena	0,3	1,00E-05	0,001
Grava	0,25	1,00E-04	0,0001

A partir de las modelaciones realizadas se pudo obtener la información necesaria para construir las gráficas que relacionan la tasa de infiltración constante necesaria para saturar los diferentes tipos de materiales seleccionados y cómo esta varía con la pendiente. (Ver Figura 3- 4).

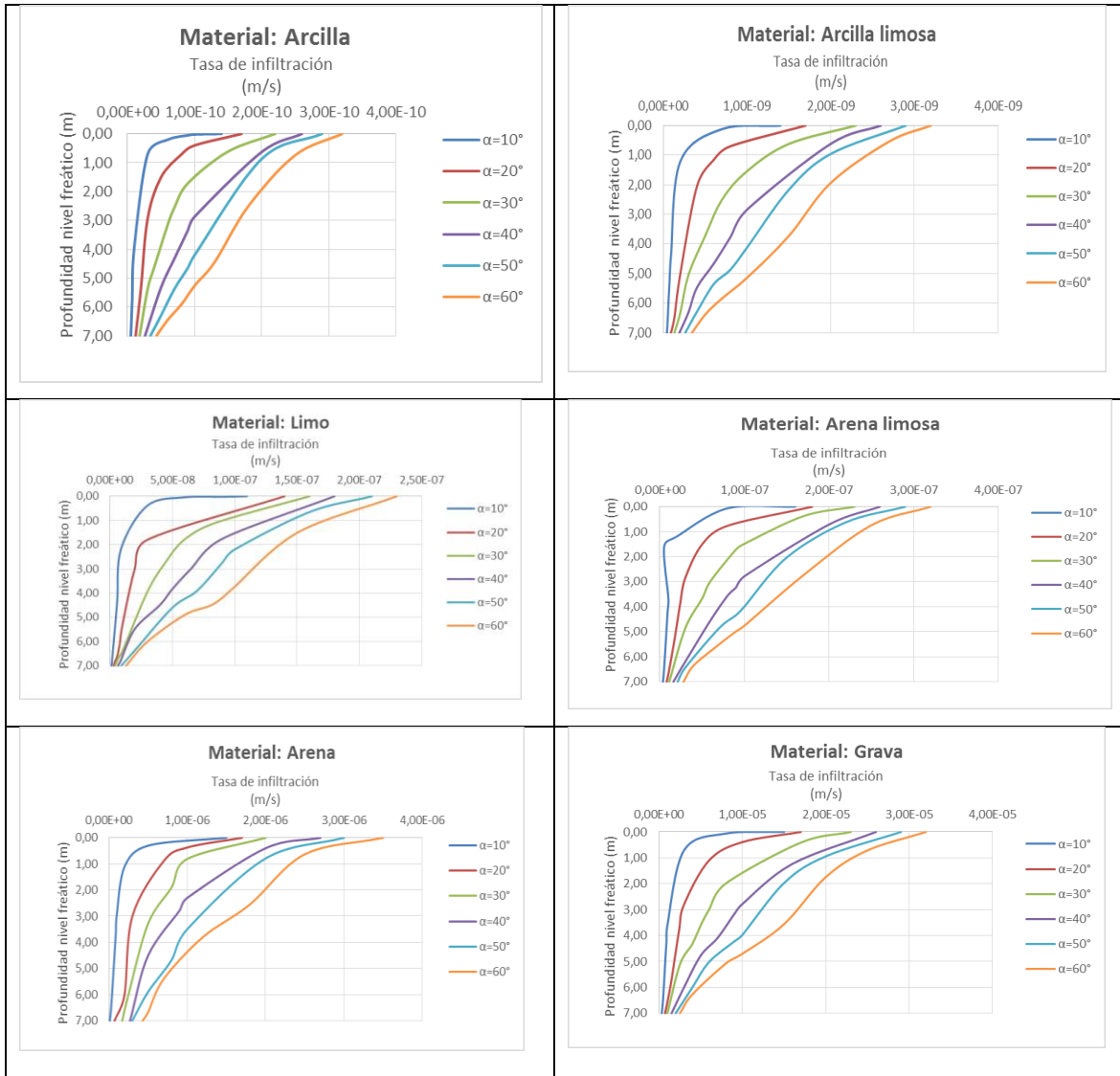


Figura 3- 4. Gráficas de Profundidad del nivel freático vs tasa de infiltración para cada material y diferentes ángulos.

En términos generales, como se puede observar en la Figura 3- 4, a medida que aumenta la pendiente del terreno se requiere de una mayor tasa de infiltración para saturar el talud.

Igualmente se presenta un aumento en la tasa de infiltración con el aumento de la conductividad hidráulica, en otras palabras, es necesario una mayor tasa de infiltración para saturar unas gravas que para saturar unas arcillas con el mismo grado de inclinación del talud (ver Figura 3- 5), esto se debe a que las gravas por su alta conductividad hidráulica permite el drenaje del talud en la parte baja de manera más fácil que cuando se trata de un talud compuesto de arcillas.

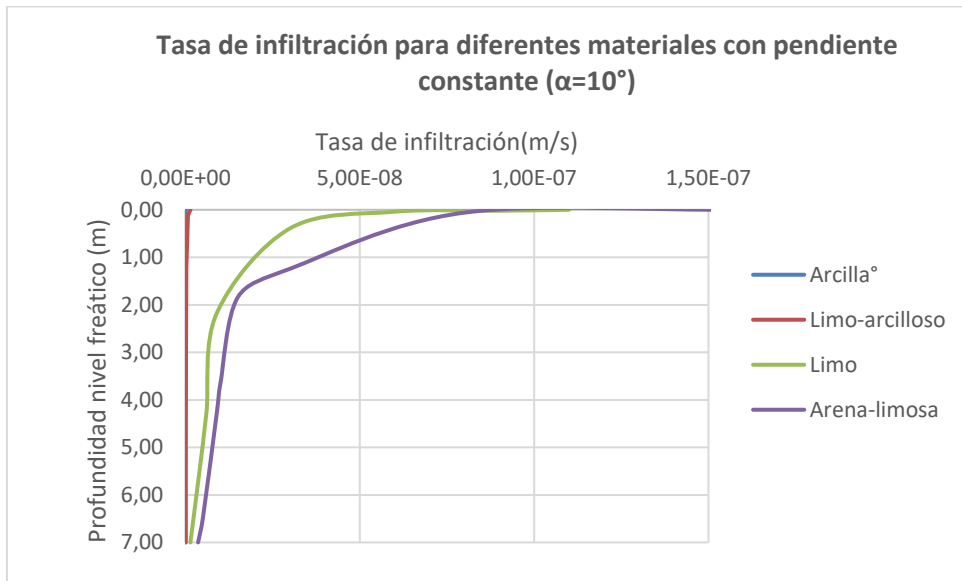


Figura 3- 5 Tasa de infiltración necesaria para saturar diferentes materiales con pendiente constante.

Análisis en estado transitorio: con los resultados de la modelación anterior se puede inferir que materiales con baja conductividad como la arcilla ($1e^{-9}$ m/s) o la arcilla limosa ($1e^{-8}$ m/s), se saturan ante casi cualquier evento de lluvia que sobrepase los 10 mm/h aproximadamente, sin importar la pendiente.

En la naturaleza, precipitaciones con estas características son bastante comunes (dependiendo del lugar), mas no así la saturación de este tipo de materiales por lo que la intervención del factor tiempo es algo fundamental para sacar conclusiones acerca del comportamiento o variaciones de la infiltración en los taludes.

Es por esto que se hace necesaria la implementación de un análisis transitorio que aporte información del tiempo y permita conocer realmente las probabilidades de que este tipo de material o cualquier otro se sature ante un evento de lluvia o conocer el comportamiento de la variación del nivel freático a partir del mismo evento.

En este orden de ideas, se realiza una nueva modelación con los mismos taludes y variaciones que se explicaron anteriormente y dejando fijas las propiedades de cada material (ver Tabla 3- 1) con lo cual se obtiene lo siguiente:

Como se puede observar en la Figura 3- 6, para una pendiente constante, a mayor conductividad hidráulica (variación del tipo de material), se requiere de menor tiempo para alcanzar la saturación, es decir, para materiales como la grava, una tasa de infiltración grande produce un aumento rápido de la posición de la tabla de agua (comparativamente con los otros materiales). Sin embargo, para materiales como las arcillas, a pesar de que la tasa de infiltración es muy baja para lograr la saturación, la cantidad de tiempo requerido para que se produzca un ascenso considerable en el nivel freático es muy amplia, esto puede ser relacionado con su posible afectación únicamente por lluvias antecedentes, no obstante, en este caso en específico, las conductividades seleccionadas pueden ser catalogadas como impermeables, por lo que arrojan tiempos de saturación extremadamente grandes que permiten inferir que tanto las arcillas como las arcillas limosas o principalmente materiales que contengan conductividades hidráulicas por debajo de $1e^{-8}$ m/s, no son afectados por las lluvias.

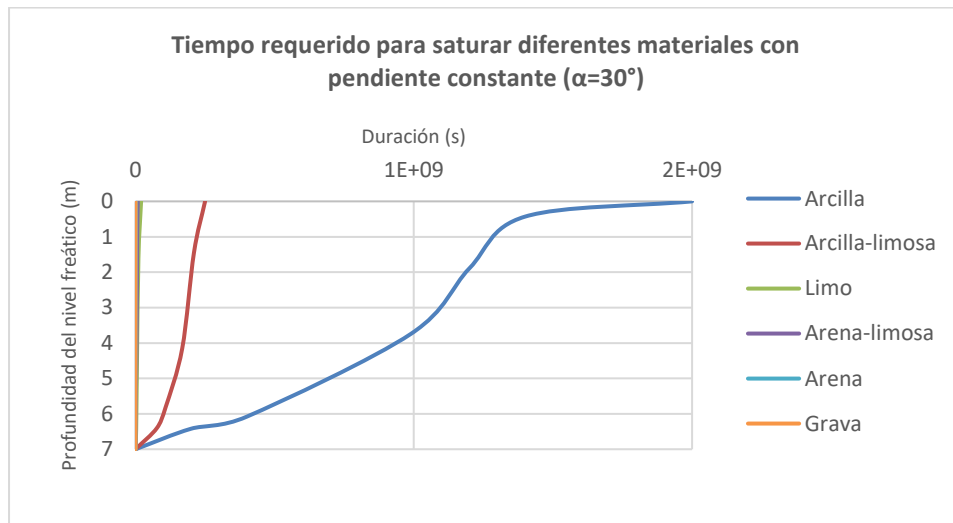


Figura 3- 6 Tiempo requerido para saturar diferentes materiales con pendiente constante.

La Figura 3- 7, posee la misma información de la Figura 3- 6, no obstante, en el eje de las “x” el periodo de tiempo se redujo a solo 12 días aproximadamente, para observar de mejor forma las diferencias en el ascenso según el material con respecto al tiempo. Se puede identificar como materiales como las arcillas mantienen prácticamente inalterada la posición de la tabla de agua, presentando solo reducción de las presiones negativas en los primeros metros, mientras que materiales más permeables como las gravas ya se encuentran completamente saturadas.

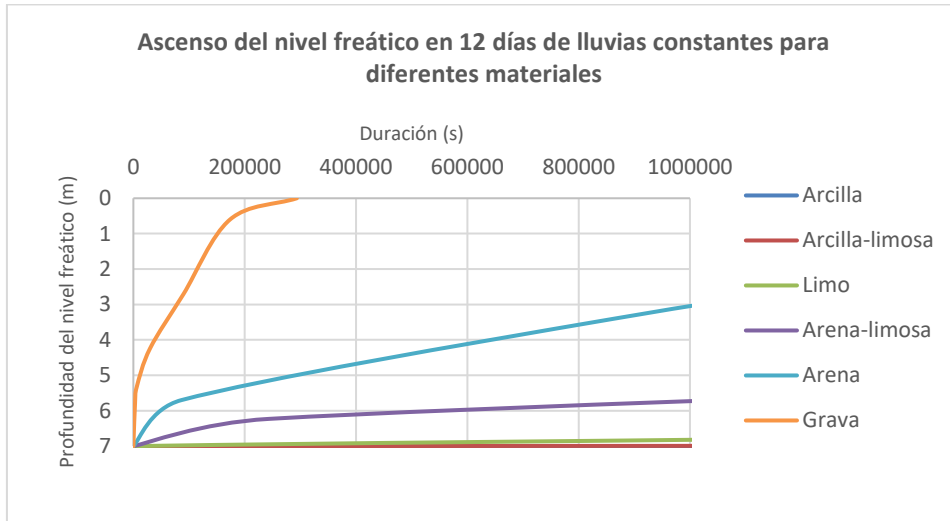


Figura 3- 7 Ascenso del nivel freático en 12 días de lluvias constantes para diferentes materiales.

Simulación con datos de precipitación diaria reales de la estación Emas

Hasta este punto, se ha obligado a saturar el material, introduciendo una tasa de infiltración constante capaz de generar un ascenso en la tabla de agua hasta la superficie.

Por otra parte, ahora se desea introducir valores más comunes de lluvia y analizar qué pasa durante 30 días de análisis con la posición de nivel freático, suponiendo distintos tipos de materiales y una pendiente de 30°. Se utilizaron los valores de precipitación diarios de la estación Emas entre los días 10/10/1997 y 08/11/1997 (ver Tabla 3- 2), los cuales resultaron en una lluvia acumulada de 448,5 mm.

Tabla 3- 2 Valores de precipitación reales de la estación Emas

Día	Precipitación	Tasa de precipitación (m/s)
10/10/1997	12,3	1,42E-07
11/10/1997	72,1	8,34E-07
12/10/1997	26,2	3,03E-07
13/10/1997	13,9	1,61E-07

14/10/1997	0,0	0
15/10/1997	2,0	2,31E-08
16/10/1997	33,3	3,85E-07
17/10/1997	22,0	2,55E-07
18/10/1997	13,9	1,61E-07
19/10/1997	0,9	1,04E-08
20/10/1997	0,8	9,26E-09
21/10/1997	79,4	9,19E-07
22/10/1997	52,3	6,05E-07
23/10/1997	0,3	3,47E-09
24/10/1997	0,0	0
25/10/1997	1,3	1,50E-08
26/10/1997	0,0	0
27/10/1997	14,7	1,70E-07
28/10/1997	1,6	1,85E-08
29/10/1997	0,0	0
30/10/1997	2,6	3,01E-08
31/10/1997	14,8	1,71E-07
1/11/1997	0,3	3,47E-09
2/11/1997	0,0	0
3/11/1997	2,1	2,43E-08
4/11/1997	1,3	1,50E-08
5/11/1997	17,4	2,01E-07
6/11/1997	4,1	4,75E-08
7/11/1997	1,4	1,62E-08
8/11/1997	57,5	6,66E-07

Evolución de la infiltración en materiales arcillosos o arcillo limosos, conductividad hidráulica menor a $1e^{-7}$ m/s: la baja conductividad asignada a estos tipos de materiales, permite identificarlos como impermeables (Freeze y Cherry, 1979). Debido a esa condición, la mayor parte de la precipitación no entra al sistema por lo cual la tabla de agua se

presenta estática a lo largo del periodo de análisis. Asimismo, la cantidad de agua infiltrada depende de la capacidad de infiltración del suelo y no de la intensidad de la lluvia en la mayoría de los casos. En este orden de ideas, este tipo de materiales no pueden ser afectados por las lluvias, únicamente presentan reducción en las presiones de poros en la zona más somera del espesor del suelo (ver Figura 3- 8).

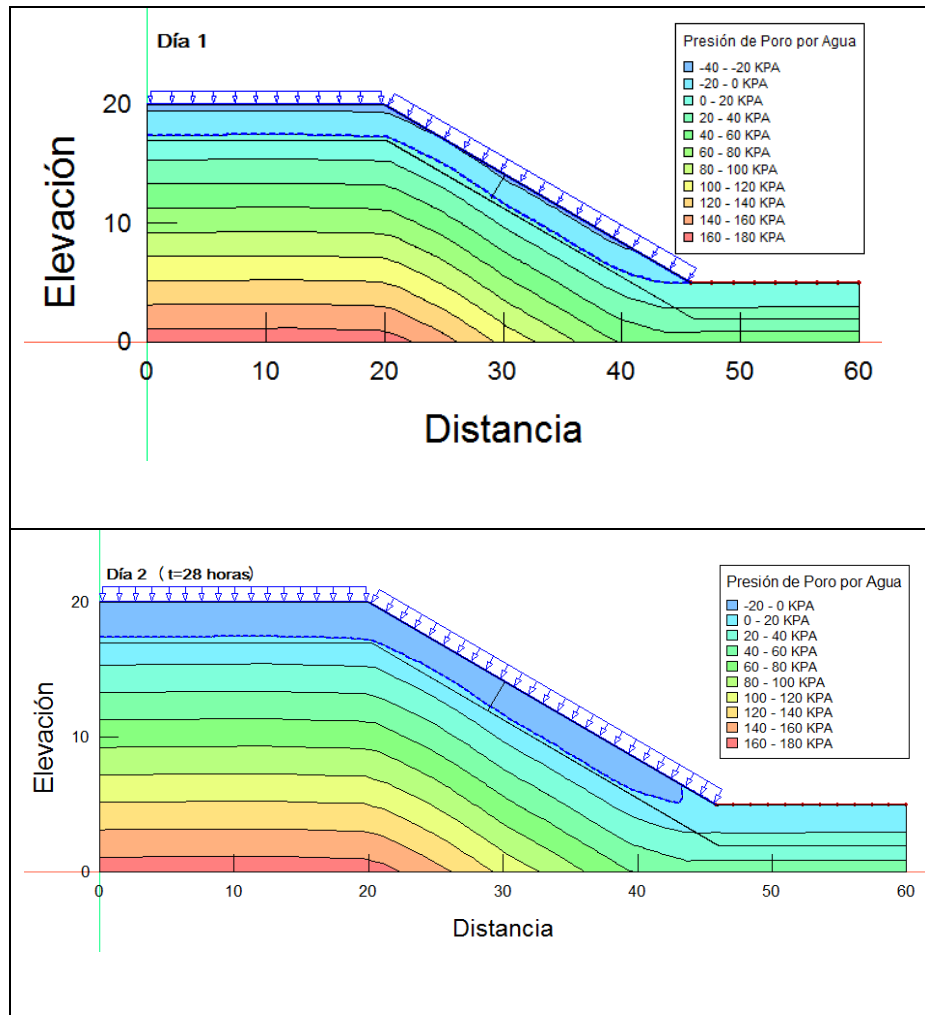


Figura 3- 8 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad menor a $1e^{-7}$

Evolución de la infiltración en materiales limosos, conductividad hidráulica $7e^{-7}$ m/s: la mayor conductividad permite un incremento en la sensibilidad del comportamiento de la tabla de agua, todo esto producto de la tasa de infiltración.

La modelación parte de suponer un talud con ciertas condiciones de humedad y el nivel freático a 1,97 m de la superficie, en tal sentido, después de las primeras 24 horas con

precipitación, se muestra una reducción de las presiones de poros negativas. Posteriormente se inicia el aumento paulatino del nivel freático, alcanzando 0,64 metros al noveno día. La llegada de días con menor precipitación y el aumento de la conductividad hidráulica debido al humedecimiento inicial, hace que el nivel freático disminuya lentamente los días 10 y 11, sin tener grandes cambios en su posición. Luego, vuelven dos días con fuertes precipitaciones que llevan al talud a prácticamente su completa saturación. Finalmente el nivel alcanzado pierde aproximadamente 20 cm en dos días al cesar la lluvia, donde su proximidad a la superficie genera una mayor velocidad de disipación de la presión de poros.

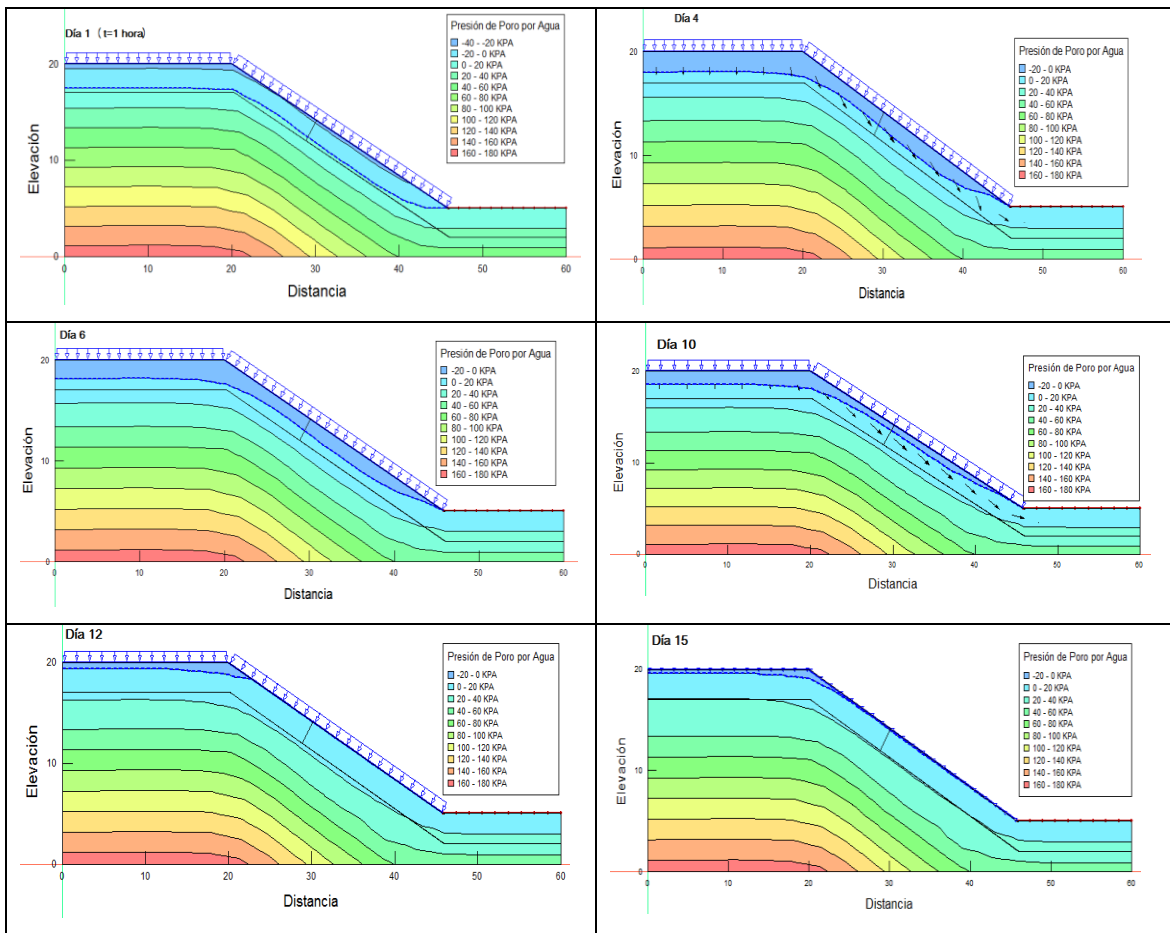


Figura 3- 9 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad hidráulica de $7e^{-7}$ (deslizamientos superficiales)

Por otra parte, se modeló igualmente un talud con las mismas características hidráulicas pero con un considerable aumento en el espesor del estrato superficial (7 m) y posición

inicial del nivel freático (6,63 m). De esta manera se intentó analizar las afectaciones de las lluvias en deslizamientos profundos.

En la Figura 3- 10, se muestran los resultados de la modelación, donde es posible observar que para los primeros 12 días, la posición de la tabla de agua se mantiene prácticamente inalterada aumentando tan solo 10 cm aproximadamente. No obstante, se ingresaron 15 días más de precipitaciones para alcanzar un análisis de 30 días, con lo cual se observa que al humedecerse la parte más somera del estrato, los días posteriores a esto, comienzan a generar un aumento visible en la tabla de agua que al final del análisis se encuentra a 5,90 m, presentando un avance de más de 60 cm.

La existencia de análisis de lluvias antecedentes de hasta 180 días, queda justificada con esta modelación puesto que pone en evidencia la influencia de la lluvia antecedente en este tipo de deslizamientos, donde tan solo 30 días bastaron para elevar la posición de la tabla de agua en más de 60 cm.

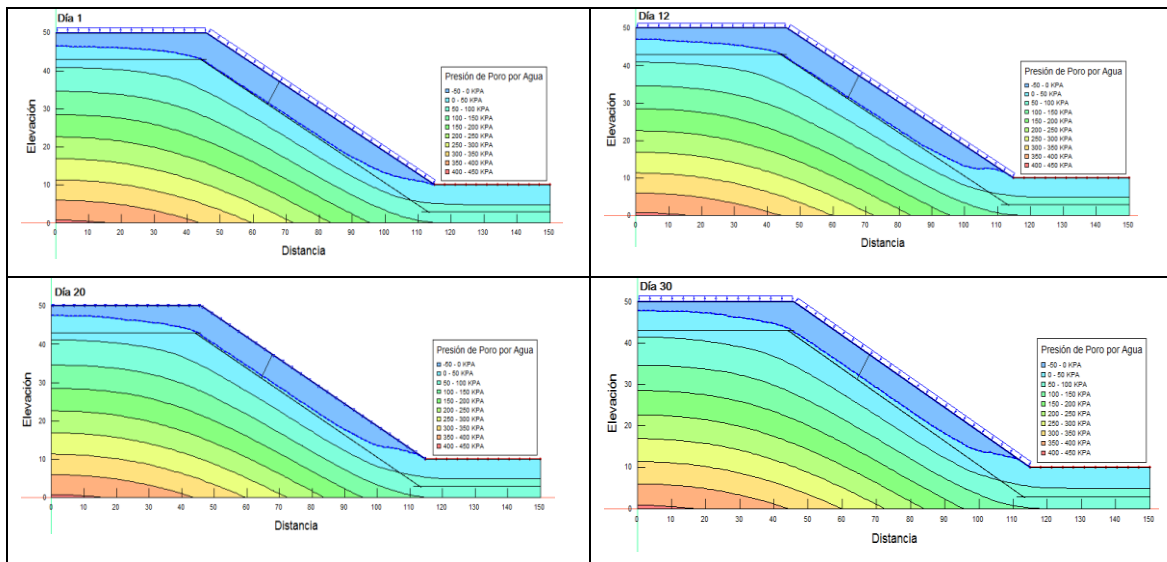


Figura 3- 10 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad hidráulica de $7e^{-7}$ (deslizamientos profundos)

Evolución de la infiltración en materiales arenos limosos, conductividad hidráulica $1e^{-6}$ m/s: para arreglos superficiales, la mayor conductividad permite variaciones más drásticas en las condiciones del talud.

Inicialmente, la tabla de agua se encuentra a 2,04 m, transcurridas 24 horas, solo se aprecia la reducción de las presiones de poros negativas debido al humedecimiento de la masa de suelo. Posteriormente y luego de ser sometido a los días con mayor precipitación, se presenta un ascenso importante en el nivel freático llegando a 1,54 m el día 4. Luego se presentan dos días sin precipitación que no afecta el ascenso del nivel ya que se produce una migración del fluido de la parte superior a la inferior elevando la posición aun sin estar lloviendo. El talud alcanza prácticamente la saturación a los 13 días, sin embargo, vuelven a cesar las precipitaciones por lo que se produce una disminución en la tabla de agua de aproximadamente 20 cm en dos días.

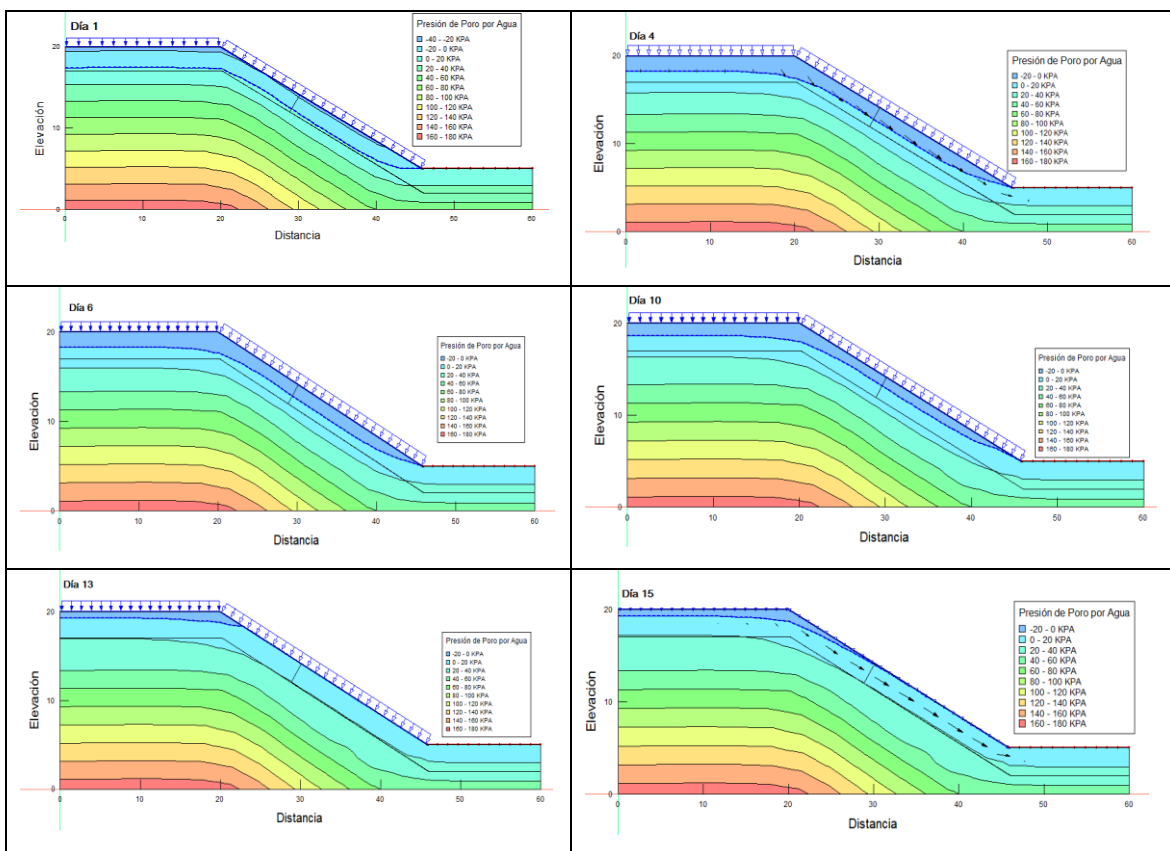


Figura 3- 11 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad hidráulica de $1e^{-6}$ (deslizamientos superficiales)

Para deslizamientos profundos, se tiene que la tabla de agua sube de manera mucho más lenta y progresiva que en el análisis anterior (deslizamiento superficial). Se inicia a una profundidad de 6,33 metros, los cuales permanecen prácticamente estáticos hasta los 10 días, en este momento, donde las presiones negativas se han reducido se inicia un lento

levantamiento de la posición de la tabla de agua que poco lo afecta los cortos periodos secos. Al cabo de 30 días el nivel ha ascendido hasta los 5,59 metros (ver Figura 3- 12).

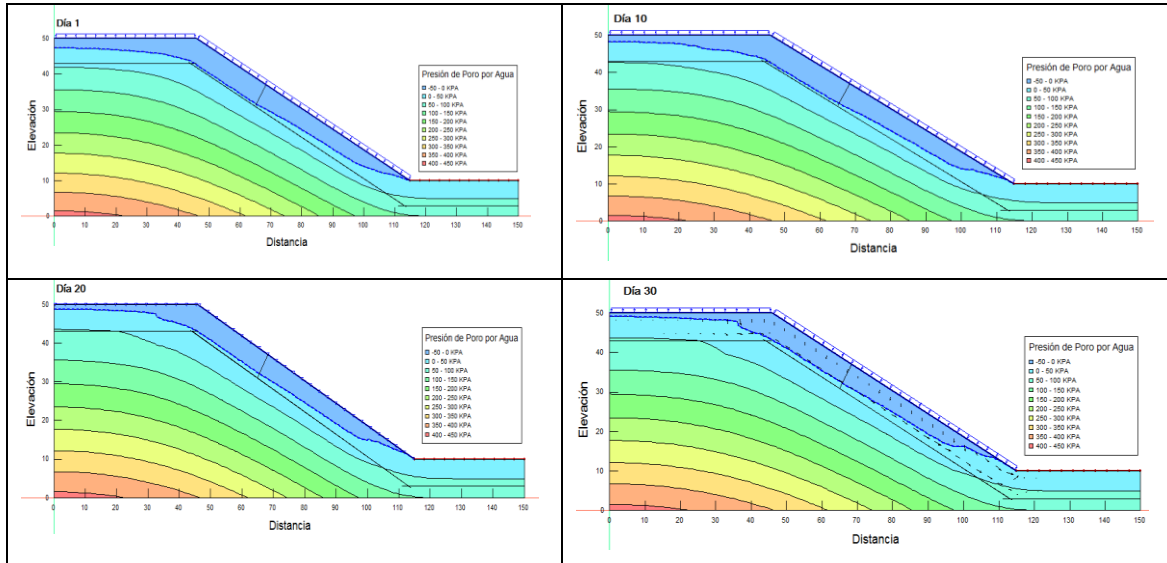


Figura 3- 12 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad hidráulica de $1e^{-6}$ (deslizamientos profundos)

Evolución de la infiltración en materiales arenosos y gravosos, conductividad hidráulica mayor a $1e^{-5}$ m/s: para el análisis realizado materiales con valores de conductividad mayores a $1e^{-5}$, presentan grandes variaciones en el comportamiento con respecto a los explicados anteriormente.

Las lluvias antecedentes no juegan un papel relevante ya que a pesar de que si se pueden presentar incrementos en el nivel freático, una vez finalizado el evento de precipitación, las presiones de poros se disipan de manera bastante rápida, por lo cual no permite una elevación considerable.

Sin embargo, ante eventos de lluvias intensas en cortos periodos de tiempo y con geometrías superficiales, si se producen cambios notorios que pueden ser observados en la Figura 3- 13.

Suponiendo que los 79,4 mm caído el día 12, no se distribuyen a tasa constante a lo largo de 24 horas sino en 15 minutos, se puede decir que la intensidad de la lluvia será igual a $8,82e^{-5}$ m/s; aplicando esta tasa al talud por ese periodo de tiempo se tiene que la posición

de la tabla de agua varia alrededor de 42 cm que representa aproximadamente un 30% de la altura inicial.

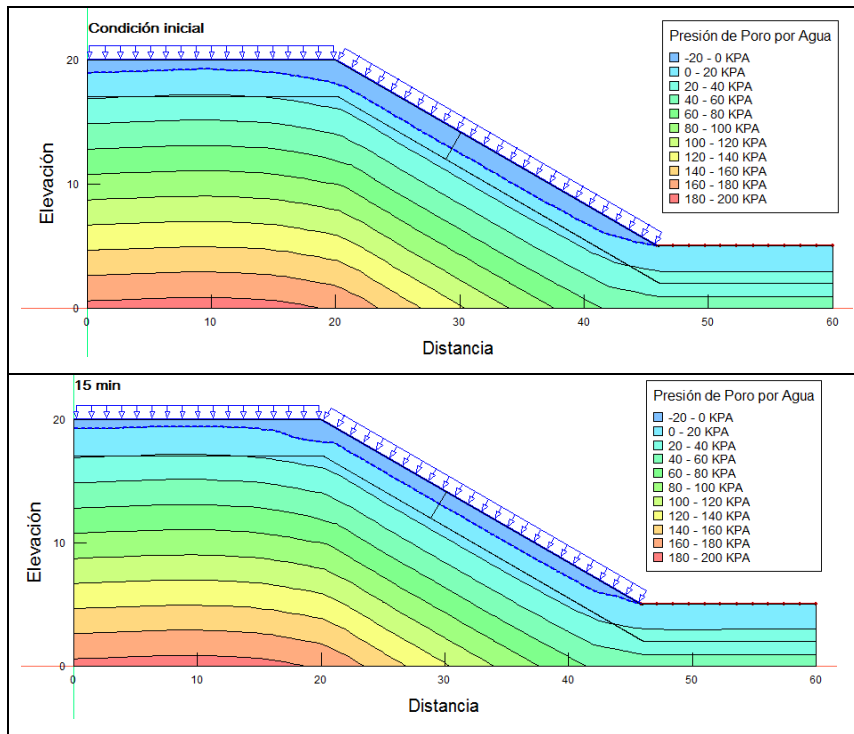


Figura 3- 13 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad hidráulica de $1e^{-5}$ (deslizamientos superficiales)

De manera muy similar actúan los materiales gravosos que para este caso les fue asignado una conductividad de $1e^{-4}$ m/s. La rápida disipación de presión que presenta, genera que la lluvia antecedente o prolongada no afecte de gran forma la posición del nivel freático. Sin embargo, aplicando nuevamente una modelación de lluvias intensas se observa como el nivel freático asciende desde su posición inicial (1,41 m) aproximadamente 70 cm en tan solo 15 minutos, lo cual representa un aumento del 50%. (Ver Figura 3- 14)

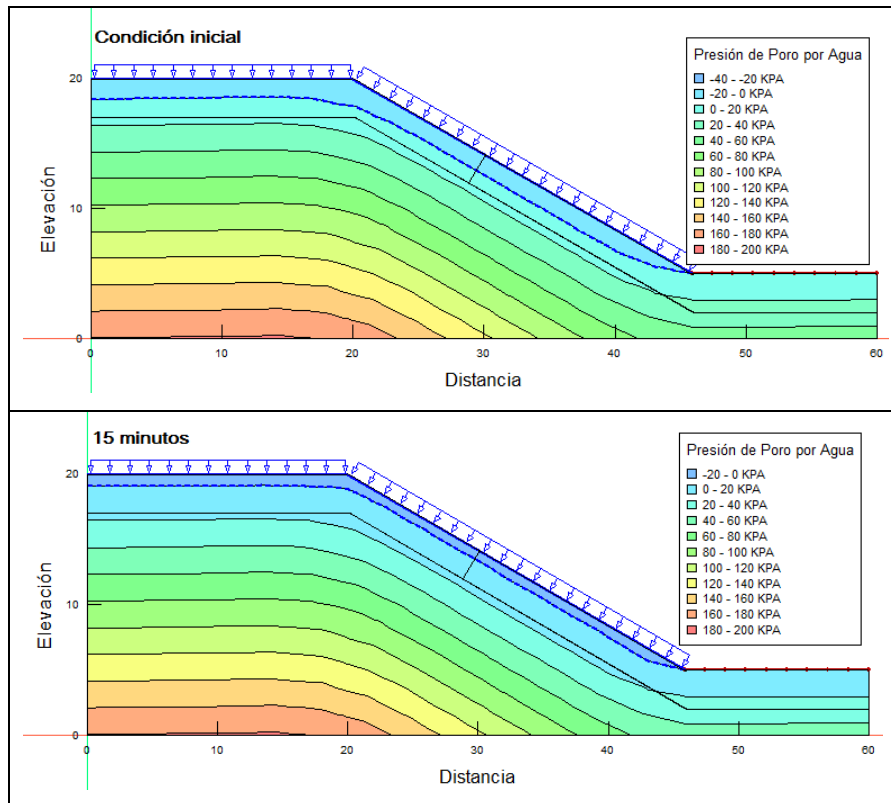


Figura 3- 14 Evolución de la infiltración en materiales con conductividad hidráulica de $1e^{-4}$ (deslizamientos superficiales)

Análisis de estabilidad para los ascensos en el nivel freático generados por las lluvias:

Es necesario conocer que representa con respecto al factor de seguridad los resultados de las modelaciones realizadas, por lo que se selecciona el limo y las gravas para un análisis de estabilidad (equilibrio límite) que contemple los resultados aquí obtenidos.

En tal sentido, para el material Limoso: se le asignaron las siguientes propiedades

$$Y=18,2 \text{ KN/m}^3$$

$$C=6 \text{ KPa}$$

$$\phi=29^\circ$$

Deslizamientos profundos: las condiciones iniciales con respecto al nivel freático arrojaron un factor de seguridad mínimo de 1,119 (Ver Figura 3- 15), en estado estático con lo cual

se puede definir el sistema como estable. A pesar de existir un ascenso en el nivel freático al cabo de 30 días, el aumento no es suficiente como para causar grandes cambios en las condiciones de estabilidad del talud ($fs=1,065$).

En caso de extender el análisis y según las condiciones de las lluvias, es posible que siga aumentando la tabla de agua y en algún momento genere una pérdida significativa de la estabilidad.

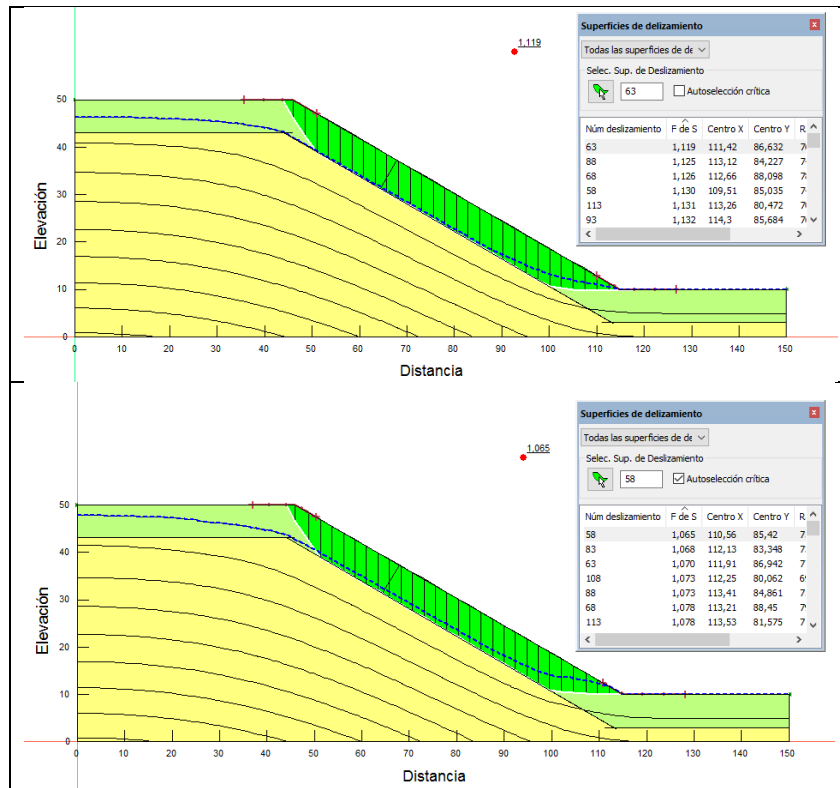


Figura 3- 15 Análisis de estabilidad asociado a los ascensos del nivel freático deslizamientos profundos. (Material: Limo).

Deslizamientos superficiales: las condiciones de estabilidad se ven completamente comprometidas con el aumento de la posición de la tabla de agua que se genera en el análisis, pasando de presentar un factor de seguridad de 1,286 en sus condiciones iniciales a 0,934 luego de 13 días de un periodo atípicamente húmedo. Esto significaría la ocurrencia de un deslizamiento. (Ver Figura 3- 16)

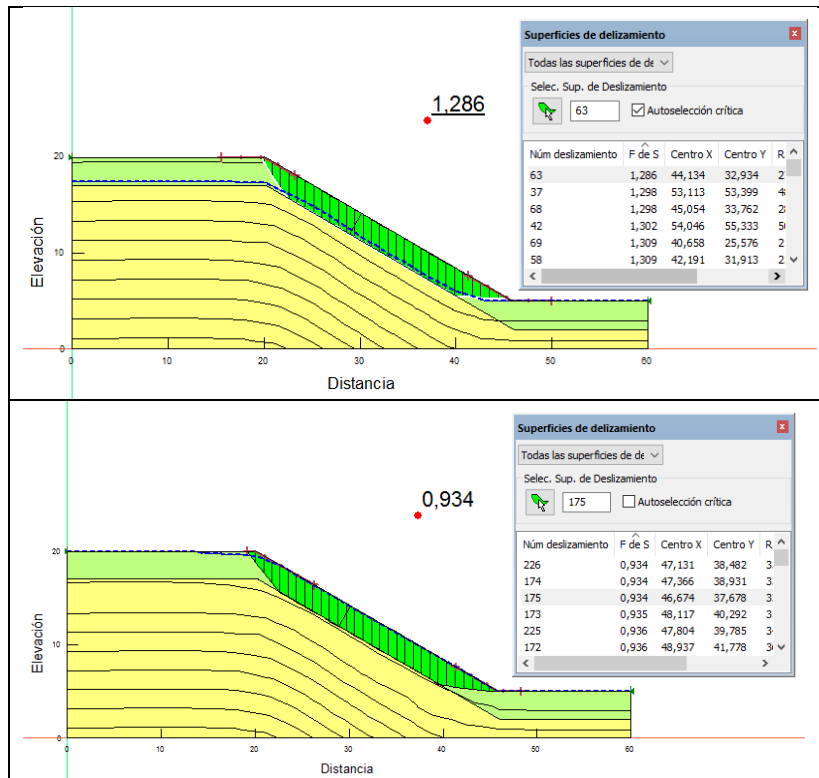


Figura 3- 16 Análisis de estabilidad asociado a los ascensos del nivel freático deslizamientos superficiales. (Material: Limo).

Igualmente las arenas fueron definidas con las siguientes propiedades geotécnicas

$$Y=17 \text{ KN/m}^3$$

$$C=0 \text{ KPa}$$

$$\phi=36^\circ$$

A pesar de que el nivel freático asciende de manera importante en un corto periodo de tiempo, el factor de seguridad no presenta un descenso considerable quedando inestable en cualquiera de sus dos condiciones. No obstante, al variar las características de las lluvias, es posible que se presente un aumento mayor que pueda generar pérdidas más drásticas de las condiciones del talud.

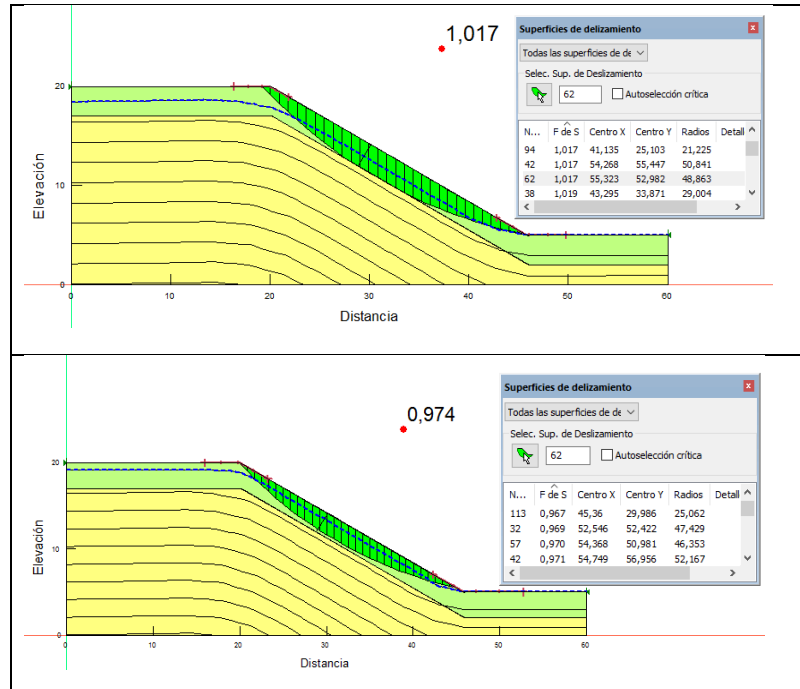


Figura 3- 17 Análisis de estabilidad asociado a los ascensos del nivel freático deslizamientos superficiales. (Material: Arena).

A partir de toda la información generada en este capítulo, se puede construir la Tabla 3- 3, para asociar los posibles aspectos a evaluar según las características del talud en cuanto a la conductividad hidráulica de los materiales que lo conforman y la posición del nivel freático.

Tabla 3- 3 Aspectos a evaluar según la conductividad hidráulica y posición del nivel freático de un talud.

Conductividad hidráulica (m/s)	Posición del nivel freático	Influencia de la lluvia	Aspectos a evaluar
$K < 1e^{-7}$	Indiferente	Baja - nula	Efectos del agrietamiento del suelo. Reducción de las presiones de poros negativas principalmente en el manto superficial del suelo.
$1e^{-7} < K < 1e^{-5}$	Somero	Alta	Lluvias antecedentes – prolongadas. Regímenes subterráneos. Efectos del agrietamiento del suelo.
	Profunda	Baja - Media	Regímenes subterráneos. Efectos del agrietamiento del suelo. Reducción de las presiones de poros negativas principalmente en el manto superficial del suelo. Aportes hidrológicos adicionales a las lluvias (Factor antrópico).
$K > 1e^{-5}$	Somera	Media - Alta	Lluvias intensas. Regímenes subterráneos.
	Profunda	Baja	Regímenes subterráneos. Aportes hidrológicos adicionales a las lluvias (Factor antrópico).

4. Comparación de los resultados de amenaza obtenidos para una misma zona implementando diferentes metodologías.

En busca de conocer las variaciones en los resultados implementando diferentes metodologías, a continuación se presentan 3 diferentes análisis de amenaza haciendo uso de una metodología combinada y dos metodologías determinísticas que varían en el análisis del componente hidrológico.

Para encontrar las diferencias y a qué se deben estas, se decide evaluar un área en común que se presenta específicamente en la ciudad de Manizales, capital del departamento de Caldas (ver Figura 4 - 1), en el centro occidente del país sobre la Cordillera Central de los Andes. Se escoge esta área porque se tiene disponibilidad de información detallada y necesaria para cumplir con los lineamientos técnicos de cada análisis.

4.1 Características principales del área a evaluar.

La topografía característica es muy accidentada que junto con el clima templado tropical lluvioso de temperatura anual promedio cerca de los 18°C, lo convierte en una zona vulnerable a los procesos de remoción en masa. (Naranjo y Ríos, 1989).

Específicamente, el Barrio de Villa Julia (zona de estudio), se encuentra localizado en la comuna Ciudadela del Norte, al noroeste de Manizales, en una zona montañosa, utilizada otrora como botadero de materiales, acción que se piensa es el factor contribuyente más importante que da lugar a los movimientos. Otra característica relevante es que la loma se encuentra rodeada por La Quebrada Olivares, la cual ejerce acciones de socavación en todas las bases de los taludes.

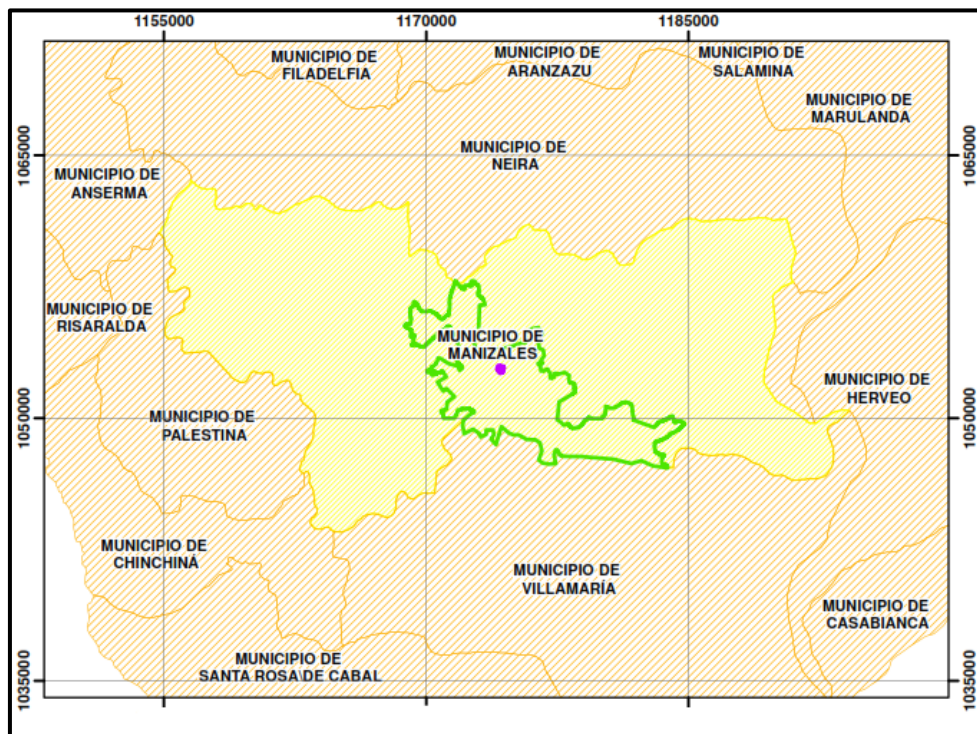


Figura 4 - 1 Localización específica de la zona objeto de estudio. (JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015)

4.1.1 Morfometría.

El Barrio de Villa Julia se encuentra asentado sobre una explanación realizada en la cumbre de una loma alrededor de los años 70, la misma inicialmente sirvió como un botadero, donde luego se instauró el barrio que actualmente se asienta en la zona, por este motivo encontramos pendientes en un rango que va desde moderado hasta alto. En general, todas las laderas inician en la explanación de la loma y finalizan con el contacto con el cauce de La Quebrada Olivares y sus procesos erosivos. Por las características de cada una de las laderas, estas se pueden dividir en tres, de las cuales a pesar de ser la que presenta la topografía más suave, la ladera oriental es la que tiene los problemas más graves de inestabilidad, con la presencia de al menos 5 procesos secundarios embebidos en un gran movimiento rotacional que abarca casi la totalidad de la misma (Ver Figura 4 - 2)

De igual manera en la zona objeto de estudio se encuentran las laderas sur y occidental, en las cuales se presentan pendientes de entre 45° y 60° . No obstante, estas solo evidencian procesos de menor importancia los cuales es posible que hayan sido

controlados por las obras que sobre estas se implantan como las pantallas ancladas (CORPOCALDAS, 2001).

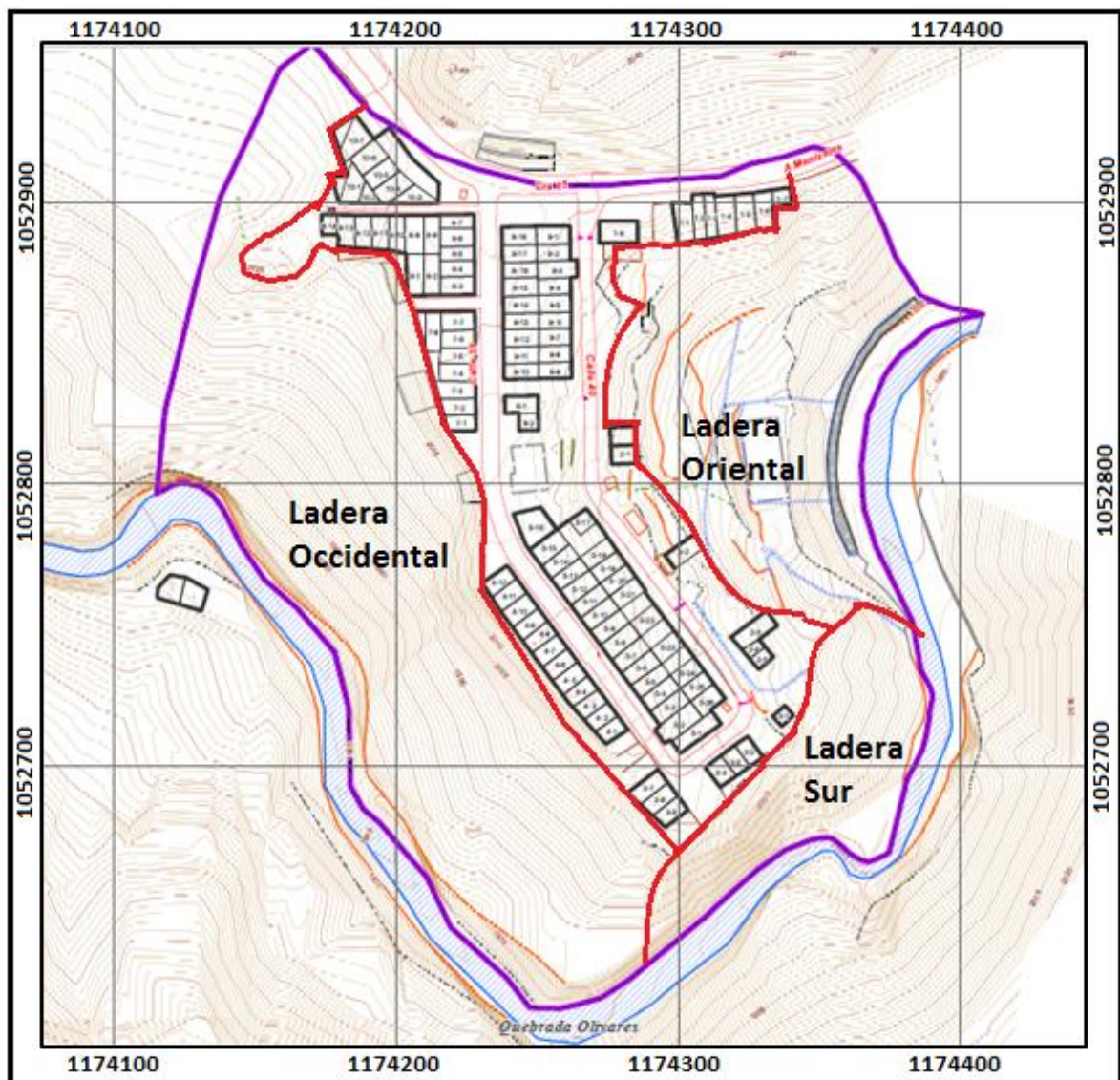


Figura 4 - 2 Ubicación de las laderas en el área objeto de estudio. (JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015)

4.1.2 Aspectos relevantes (antecedentes)

Las características más importantes dentro de la zona objeto de estudio son las siguientes:

El uso de suelos en la zona ha cambiado con el tiempo produciendo una combinación de zona rural y zona urbana, que repercute en el desarrollo natural de los suelos.

En la ladera oriental es donde se concentra prácticamente la totalidad de los procesos erosivos que afectan el barrio actualmente, concordando con la zona donde se encuentra la mayor parte de relleno por lo que presumiblemente, sea este material el que favorece en mayor grado el deslizamiento. La colocación sin ningún tipo de diseño del material, cercenó los drenajes preexistentes, por este motivo se infiere que deben existir problemas en la conducción de las aguas. Aunado a esto el crecimiento del barrio y por ende el aumento del caudal de aguas servidas debe también ser estudiado.

Las precipitaciones de la región tienen en promedio un máximo de 1880 mm anuales registrando un máximo en los últimos 17 años de 3010 mm anuales según la serie histórica de la estación meteorológica Emas, lo cual combinado con la baja permeabilidad del suelo allí presente (por su tamaño de grano), conforma un ambiente que favorece la saturación de los materiales que conforman la ladera oriental (CORPOCALDAS, 2001).

4.1.3 Cartografía base

A nivel de cartografía base se cuenta con planchas de diferentes épocas las cuales pueden ser comparadas para llevar a cabo un análisis multitemporal de los cambios sufridos por la acción del hombre y naturaleza, la cartografía base fue ubicada en el Instituto Agustín Codazzi (IGAC) a escala 1:2.000 del plano urbano de Manizales con las siguientes características: Coordenadas cartesianas con origen en el vértice geodésico Colegio de Cristo, coordenadas geográficas 5°04'15"300 Latitud Norte, 75°30'52".100 longitud al Oeste de Greenwich, al cual se le asignaron coordenadas planas 1.052.391,13 metros al Norte y 1.173.727,04 metros al Este.

También se cuenta con un mapa topográfico actualizado a escala 1:1000 de la zona de estudio que comprende alrededor de 180.000 m² de área. Este insumo es fundamental para la aplicación de la metodología y sobre este se trabajó para evaluar la estabilidad de las laderas (Ver Figura 4 - 3).

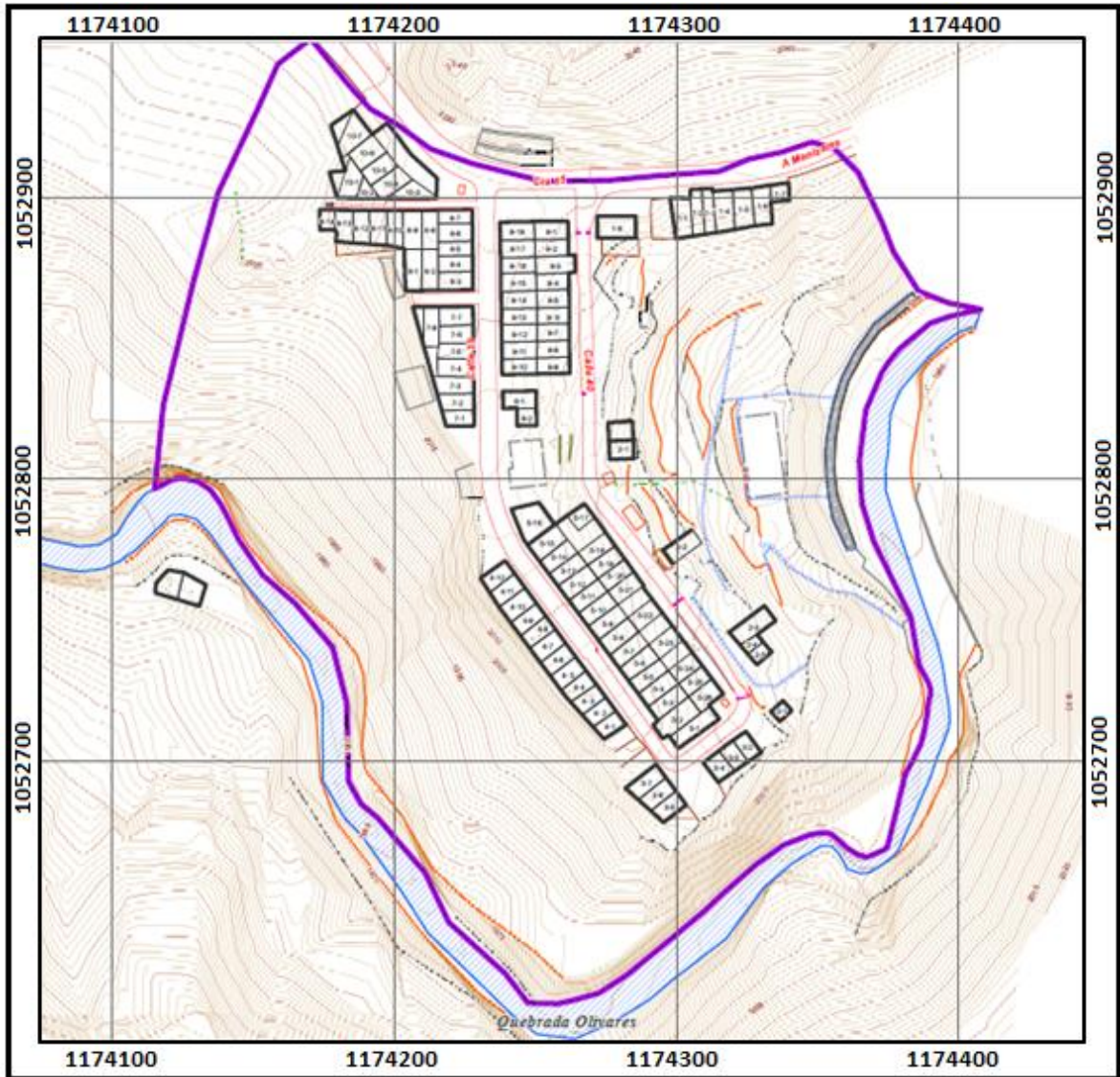


Figura 4 - 3 Mapa topográfico de la zona (JAM Ingeniera y Medio Ambiente S.A.S, 2015)

4.1.4 Componente geológico.

El barrio Villa Julia ocupa las estribaciones de una vertiente montañosa bordeada por La Quebrada Olivares, que en el sitio forma una curva en “U” de unos 250 m de longitud y un poco más de 150 de ancho.

La geología regional de la zona fue estudiada por el INGEOMINAS (Actualmente Servicio Geológico Colombiano), en la década de 1970 y publicada y actualizada en escala 1:100.000 en 1998, esta sirve de base para los análisis preliminares y diagnósticos de los

materiales y problemas que se pueden presentar en cuanto a inestabilidad. (Ver Figura 4 - 4)

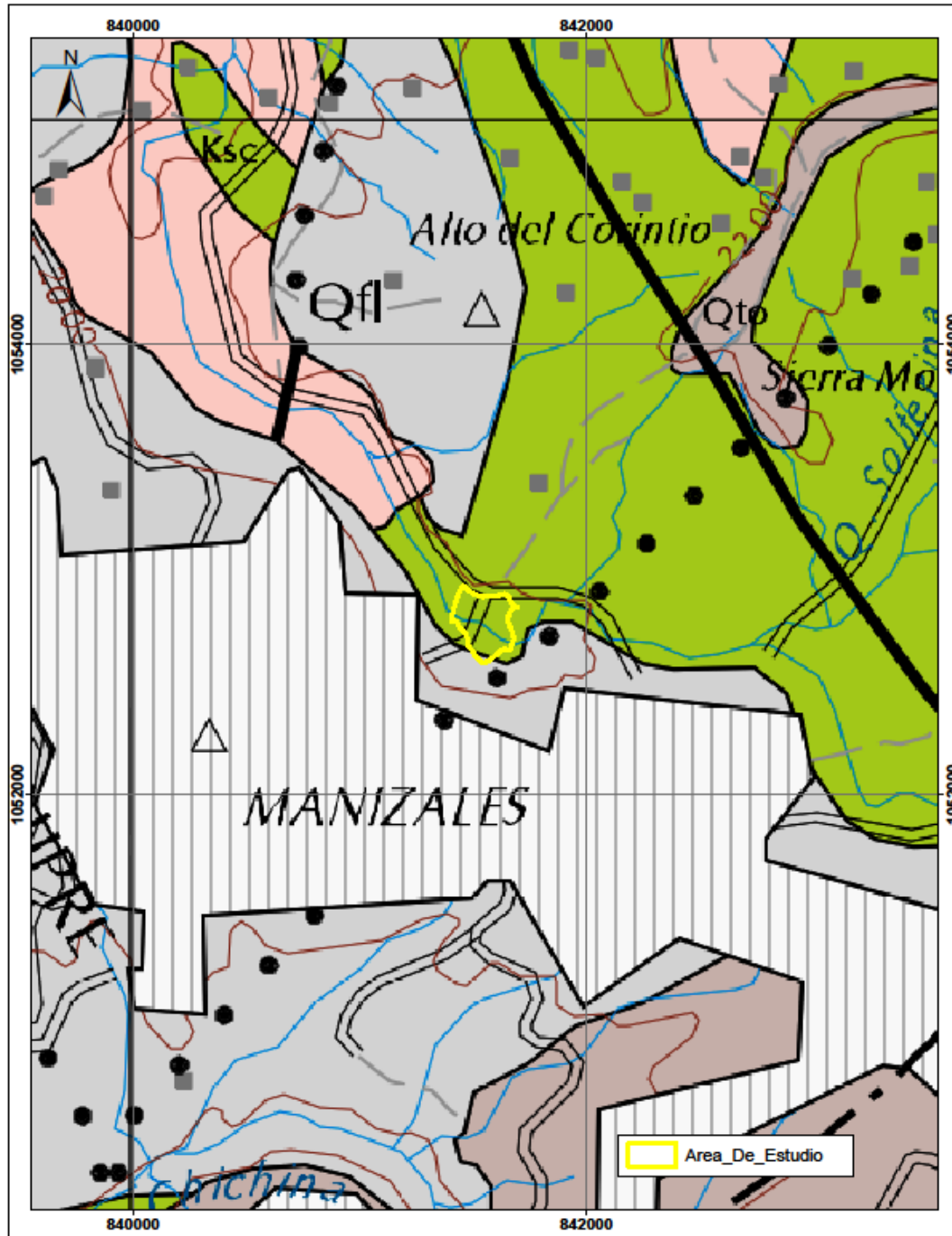


Figura 4 - 4 Localización del barrio Villa Julia en el mapa geológico escala 1:100.000 de INGEOMINAS (1998). Verde= Formación Quebradagrande; rosa pálido (Qto)= Depósitos de cenizas; azul pálido (Qfl)= Flujos. (Ingeominas 1998, Modificado JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015).

Se destaca en este mapa de escala regional, pero alta precisión en cuanto a la localización de las unidades litológicas, especialmente las de edades antiguas, que se define la composición del subsuelo de Villa Julia como perteneciente a la Formación Quebradagrande, miembro sedimentario, por lo que se presentan estratos que sirven como planos de debilidad y pueden llegar a generar los problemas de inestabilidad.

El componente sedimentario de la Formación Quebradagrande está definido con referencia a afloramientos en la Quebrada Olivares, como una secuencia de “sedimentitas intercaladas con rocas volcánicas básicas, areniscas feldespáticas y limolitas con cuarzo lechoso que se presenta en venas” (CORPOCALDAS, 2001). Ésta es justamente la sucesión que se aprecia en Villa Julia, corroborada con el material de las perforaciones realizadas, en las cuales se identifica la roca en superficie como un macizo meteorizado que solamente muestra roca casi fresca en superficie al nivel de la quebrada sobre ambos márgenes, unos 100 m aguas abajo del extremo sur de los gaviones que bordean el lecho de la quebrada. Al interior de la colina, la roca fresca se presenta a partir de aproximadamente 18 m de profundidad inferidos por las velocidades de ondas disponibles dentro de la información otorgada para este documento.

El mapa más detallado de Villa Julia (ver Figura 4 - 5) corresponde al estudio de CORPOCALDAS (2001), levantado en escala 1:2.000, donde se presenta el basamento del barrio, compuesto también por rocas pertenecientes a la Formación Quebradagrande, miembro sedimentario, mientras que en la parte central el mapa citado define una zona de cubierta de cenizas volcánicas a lo largo de la calle 39 que corresponde al corte realizado en 1969, lo que implica que las cenizas fueron removidas en este proceso, luego en el sitio la composición correcta corresponde a suelos residuales de Quebradagrande, el resto del mapa es correcto para la fecha.

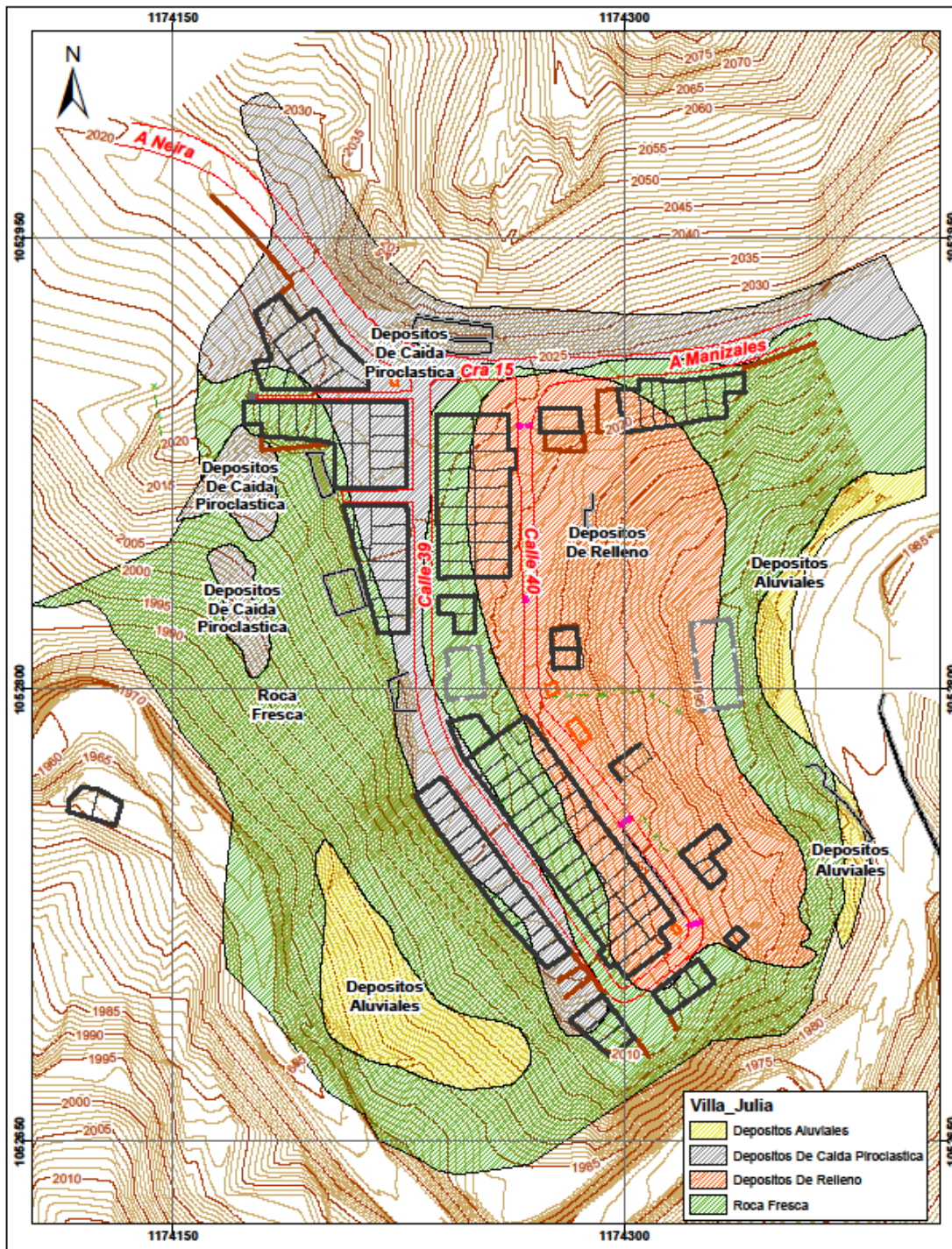


Figura 4 - 5 Mapa geológico a escala 2.000 de Villa Julia, Verde= Formación Quebradagrande; Amarillo= Depósitos Aluviales, Rosado= Lleno antrópico. (CORPOCALDAS 2001, modificado por. JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015).

▪ Formaciones superficiales Villa Julia

Suelos Residuales de la Formación Quebradagrande (Kqg). La explanación donde se asienta el barrio Villa Julia, se compone de suelo residual de la Formación Quebradagrande, con una ladera occidental escarpada, compuesta por éste tipo de suelos, mientras que en la ladera sur se encuentra cubierto por llenos de suelos que ni los sondeos con recuperación de núcleos ni la geofísica permitieron determinar claramente, tal como se discutirá en mayor detalle más adelante. La roca original se encuentra fracturada, con una densidad de diaclasas del orden de 6 a 8 diaclasas/metro, sin separación reconocible en los afloramientos.

El perfil de meteorización y suelos es importante para definir el macizo rocoso porque los horizontes superiores del suelo (A y B), revelan las condiciones de formación de ellos hasta en las últimas decenas de miles de años, mientras que el perfil de meteorización puede dar información de los últimos centenares y hasta millones de años, de acuerdo con su espesor.

Por tratarse el lote de Villa Julia de un cerro compuesto por un macizo rocoso recortado en su cima, los horizontes A y B u horizontes orgánicos del suelo no afloran en la parte central del barrio, por lo que ellos se determinaron en los alrededores, sobre afloramientos en vías vecinas (A y B), siendo necesario aclarar que en este caso su espesor no es muy importante porque en el lote hay involucrado un perfil de meteorización grueso de la Formación Quebradagrande, determinado con perforaciones del orden de 18 metros de espesor.

El perfil generalizado de suelos y de meteorización (Dearman, 1991) que se presenta en Villa Julia, de acuerdo con los registros de perforación es el siguiente:

Profundidad (cm.)	Descripción
0 a 20	Horizonte A, orgánico, color negro a gris muy oscuro, limoarenoso a limoarcilloso, con mezcla de cenizas volcánicas, raíces vivas.
20 a 45	Horizonte B, en partes orgánico color gris y en otras, las más pendientes color pardo rojizo por oxidación, limoarcilloso, plástico.
45 a 600	Horizonte C-VI, color pardo – ocre, isotrópico, homogéneo sin textura de estratificación original, limoarcilloso, plástico.

600 a 1800	Horizonte C-V, color pardo-ocre, se aprecia la textura original de la roca, se pudo observar al sur de la cancha polideportiva en construcción, con resistencia al penetrómetro de mano $>4.5 \text{ kg/cm}^2$, diaclasas cerradas (sin separación), que muestran motas negras milimétricas de óxidos de manganeso (figura 3). Por tratarse de núcleos de perforación, en este intervalo deben estar los suelos tipo C-IV, C-III y C-II, por tratarse de rocas sedimentarias con laminación (lodolitas), fácilmente son molidas en el proceso de perforación.
>1800	Horizonte C-I, La roca se encuentra casi fresca, se aprecia oxidación en diaclasas. Esta profundidad puede ser un poco mayor, en vista de que los pozos más profundos que cortaron la roca (sondeos 4, 6 y 7), no se perforaron en el lomo de la colina.

Lleno antrópico (Lla). En años posteriores a 1969 y antes de 1982, cuando se dio el proceso de urbanización, la vertiente oriental de Villa Julia fue objeto de llenos no tecnificados, realizados mediante vertimiento a la ladera de los materiales removidos para la ampliación de la explanación en el sector sur del lote y tal vez, otros suelos derivados de excavaciones vecinas, que con posteridad a 1987, recibieron los escombros de las viviendas que se afectaron en el barrio en la calle 40, que aún son parcialmente visibles en superficie.

Con excepción de los escombros visibles en superficie, el lleno antrópico lo componen suelos limoarcillosos, pobremente compactados que se caracterizan en los núcleos de perforación por mostrar una textura moteada con cambios bruscos de coloración en razón a la mezcla de materiales de diferentes grados de meteorización. Los sondeos S2 y S4 muestran este tipo de material hasta unos 6 m de profundidad, destacándose en el S2 la presencia del "paleosuelo" a esta profundidad, que define la superficie original del terreno.

Suelo residual deformado (Srd). El tercio inferior de la vertiente oriental de la colina muestra en el sondeo S3, una acumulación anómala de suelo orgánico entre 3 y 6 metros, que se explica por la yuxtaposición de estos niveles mediante los diferentes episodios de inestabilidad generados en la vertiente desde 1987, es decir, un poco más abajo del sitio de perforación, sale el plano de falla que se genera en el lleno antrópico. En profundidad, a partir de los 6 m, estos suelos se componen de materiales limoarcillosos de color pardo a gris, posiblemente mezclados por el empuje de la masa superior sobre la base de la vertiente en los episodios de inestabilidad generados por la socavación de la quebrada en

1987 y poco después de 1994, cuando fueron destruidos los deflectores de la corriente por episodios de crecientes. El resultado es un suelo superficial remodelado muy plástico, de alto contenido de agua natural y de precarias condiciones de resistencia al corte, al que podría mejorársele su resistencia mediante la disminución de sus condiciones de contenido de agua.

- **Cortes geológicos**

Con base en toda la información recopilada y generada que permitió un mejor entendimiento de la zona y los procesos que sobre ella tienen lugar, se elaboró un corte geológico con la disposición de los materiales en profundidad, sobre el perfil presentado en la Figura 4 - 6.

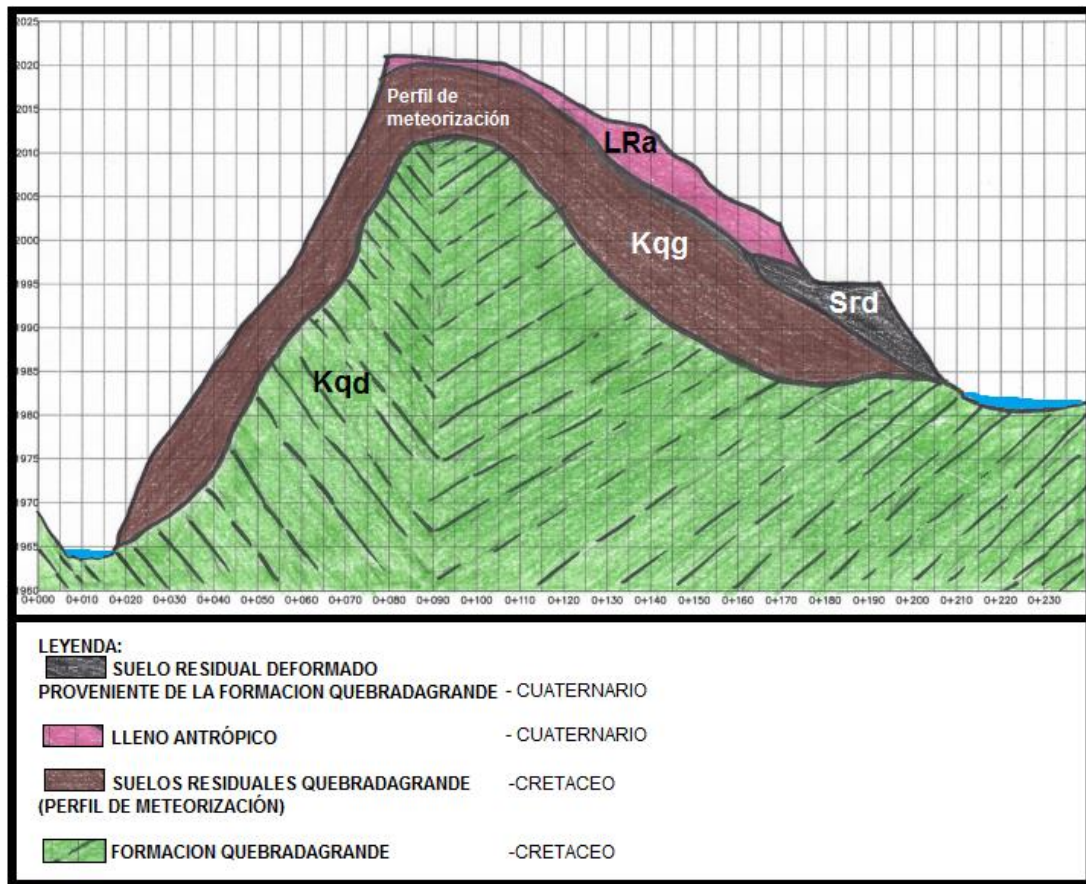


Figura 4 - 6 Corte geológico típico de la zona de estudio. (JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015)

Esta configuración geológica es la que apoya y sirve de base para la construcción del modelo geológico – geotécnico, dato fundamental para el procesamiento del análisis de

estabilidad con la inclusión de los parámetros hidrológicos, que además es apoyado por la exploración y ensayos de laboratorio.

4.1.5 Componente geotécnico

Uno de los mayores retos dentro del análisis de estabilidad, es el de definir los parámetros correctos a ser usados dentro de la modelación.

Para este caso real, los parámetros se determinaron con base en una serie de acciones que posteriormente serán explicadas pero que en todo caso están encaminadas a definir las propiedades que se utilizaran tanto en la escala básica como en la detallada.

El estudio consto de una exploración directa del subsuelo mediante la ejecución de sondeos mecánicos para la obtención de muestras alteradas e “inalteradas” y la realización de trincheras. Por otro lado, la exploración indirecta se llevó a cabo con líneas de refracción sísmica para establecer la distribución espacial de los diferentes materiales en profundidad haciendo un especial énfasis en los espesores de suelo.

- **Exploración directa**

Se contó con los datos reales de 9 sondeos mecánicos distribuidos como se presenta en la Figura 4 - 7, cabe destacar que se ubicaron de igual manera los sondeos mecánicos y manuales proporcionados por estudios anteriores en la misma figura tal y como lo indica la leyenda. No se encontró información de muestras inalteradas debido al bajo autoaporte que presenta el material, de este modo solo se logró recolectar información de muestras alteradas las cuales son representativas. Aplicando ensayos de laboratorios selectivos estas muestras pueden arrojar datos importantes para la caracterización de la zona.

La ubicación aproximada de los sondeos y la longitud para cada uno se presentan en la Tabla 4 - 1.

Tabla 4 - 1 Localización de los Sondeos y Profundidad

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)	COORDENADAS
S-1	16.00	5° 4'19.91"N / 75°30'22.89"O
S-2	10.00	5° 4'19.97"N / 75°30'22.32"O
S-3	8.10	5° 4'20.00"N / 75°30'20.34"O
S-4	19.00	5° 4'18.65"N / 75°30'22.08"O
S-5	8.00	5° 4'17.68"N / 75°30'20.21"O
S-6	19.00	5° 4'17.06"N / 75°30'20.93"O
S-7	13.50	5° 4'16.42"N / 75°30'20.03"O
S-8	24.00	5° 4'15.06"N / 75°30'21.09"O
S-9	16.00	5° 4'15.54"N / 75°30'21.89"O

JAM Ingeniera y Medio Ambiente S.A.S, 2015

La Figura 4 - 7, presenta la ubicación espacial de la exploración llevada a cabo por JAM Ingeniería (2015) y los sondeos utilizados como información secundaria.

- **Caracterización de los materiales**

A partir de la información recolectada, se lograron identificar en profundidad cuatro (4) tipos diferentes de materiales los cuales se han presentado gráficamente en el modelo geológico – geotécnico ya mencionado. A continuación se presenta la caracterización de propiedades índice, propiedades de resistencia y compresibilidad de los estratos identificados.

- **Relleno**

Este es el material más superficial, no se encuentra en toda la zona debido a su presencia antrópica, su espesor es variable con un máximo de 5 metros aproximadamente hasta su ausencia total, se presenta con mayor profundidad y abarcando una mayor área sobre la ladera oriental la cual alguna vez se utilizó como botadero, provocando una mayor acumulación. (Ver Tabla 4 - 2)

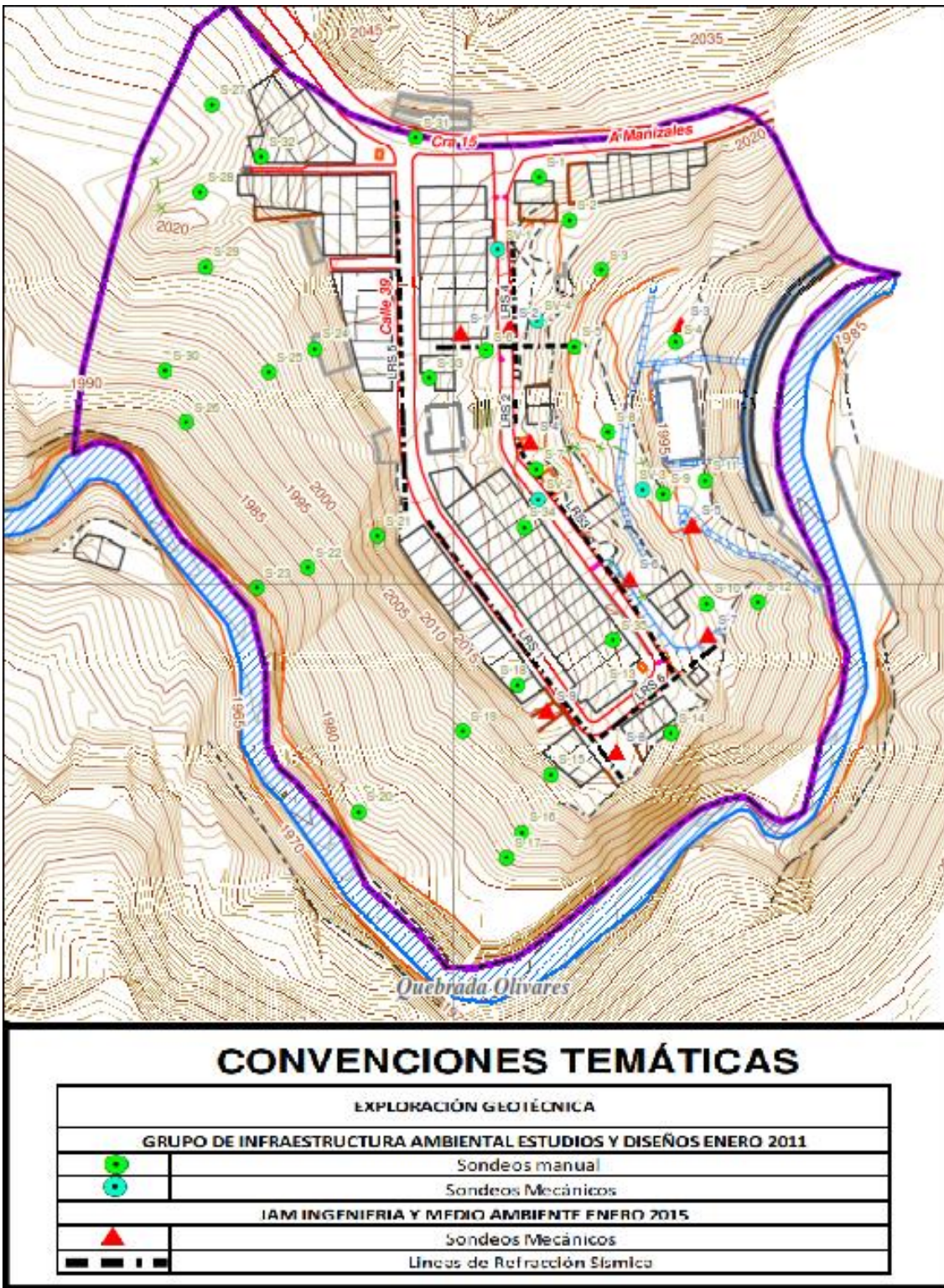


Figura 4 - 7 Exploración realizada junto con información secundaria. (JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015).

Tabla 4 - 2 Propiedades del material de relleno

	Propiedad	Valor	Unidad
LL	Límite líquido	26.4 a 64.28	%
LP	Límite plástico	13.8 a 45.26	%
IP	Índice de plasticidad	2.10 a 26.55	%
w	Contenido de agua natural	13.4 a 56.8	%
G	Gravas	10.74	%
A	Arenas	40.07	%
F	Finos	49.12	%
IL	Índice de liquidez	-1.04 a 0.68	-
γ	Peso unitario total	1.82	Ton/m3
c	Cohesión	Varía entre 0.10 a 2.26	Ton/m2
φ	Ángulo de fricción	Varía entre 23.0 a 41.6	Grados
N	Valor del ensayo SPT (Nc)	2 a 22	golpes/pie
G	Módulo de corte	11.1 a 20.5	MPa
E	Módulo de elasticidad	28.86 a 53.24	MPa
Vs	Velocidad de onda de corte	168.8	m/s
Vp	Velocidad de onda longitudinal	315.6	m/s

- Limo arenoso

Una capa bastante constante y espesor promedio de máximo 2 metros aproximadamente, resistencia media, contenido de agua variable y alta presencia de finos, se puede inferir que es producto de la actividad volcánica de la zona, con presencia de cenizas volcánicas. Posee un color claro de varias tonalidades. (Ver Tabla 4 - 3)

Tabla 4 - 3 Propiedades del material Limo arenoso

	Propiedad	Valor	Unidad
LL	Límite líquido	27.6 a 198.4	%
LP	Límite plástico	11.8 a 93.5	%
IP	Índice de plasticidad	4.4 a 104.9	%
w	Contenido de agua natural	7.9 a 142.9	%
G	Gravas	14.26	%
A	Arenas	25.74	%
F	Finos	59.4	%
IL	Índice de liquidez	-2.3 a -0.98	-
γ	Peso unitario total	1.78	Ton/m3
c	Cohesión	Varía entre 0.48 a 2.65	Ton/m2

ϕ	Ángulo de fricción	Varía entre 28.0 a 31.6	Grados
N	Valor del ensayo SPT (Nc)	6 a 51	golpes/pie
G	Módulo de corte	134.1	MPa
E	Módulo de elasticidad	74.71 a 612.63	MPa
Vs	Velocidad de onda de corte	227.36	m/s
Vp	Velocidad de onda longitudinal	425.16	m/s

- Suelo residual

Al profundizarnos, encontramos las diferentes etapas de los materiales según el perfil de meteorización, en este estudio y usando la clasificación dada por Dearman (1991) debido a su aplicabilidad en cualquier tipo de roca, se definió como tipo IV meteorización alta conformada por bloques de roca y suelo, donde es posible observar a simple vista la estructura de la roca madre, presenta una coloración gris, café y consistencia muy firme. (Ver Tabla 4 - 4)

Tabla 4 - 4 Propiedades del Suelo residual

	Propiedad	Valor	Unidad
LL	Límite líquido	27.05 a 54.05	%
LP	Límite plástico	21.47 a 33.45	%
IP	Índice de plasticidad	5.65 a 22.26	%
w	Contenido de agua natural	12.9 a 39.71	%
IL	Índice de liquidez	-1.24 a 0.95	-
γ	Peso unitario total	1.87	Ton/m ³
c	Cohesión	Varía entre 1.55 a 1.65	Ton/m ²
ϕ	Ángulo de fricción	Varía entre 23.6 a 28.6	Grados
G	Gravas	13.73	%
A	Arenas	30.09	%
F	Finos	56.15	%
N	Valor del ensayo SPT (Nc)	21 a Rechazo	golpes/pie
G	Módulo de corte	131.44 a 661.63	MPa
E	Módulo de elasticidad	341.74 a 1720.24	MPa
Vs	Velocidad de onda de corte	398.9	m/s
Vp	Velocidad de onda longitudinal	745.94	m/s

- Roca metasedimentaria meteorizada

Material rocoso en etapa de transición. En sectores aparece roca y suelo, la fábrica se conserva y la estructura del macizo rocoso se mantiene parcialmente, a medida que profundizamos la encontramos con mejores propiedades. (Ver Tabla 4 - 5)

Tabla 4 - 5 Propiedades de la roca meta sedimentaria meteorizada

	Propiedad	Valor	Unidad
γ	Peso unitario total	2.4	Ton/m ³
c	Cohesión	196.2	Ton/m ²
ϕ	Ángulo de fricción	20	Grados
G	Módulo de corte	486.35 a 2950.99	MPa
E	Módulo de elasticidad	1264.51 a 7672.59	MPa
Vs	Velocidad de onda de corte	793.0	m/s
Vp	Velocidad de onda longitudinal	1482.91	m/s

Este material se encuentra en el área urbana en profundidades aproximadamente mayores a 20 metros, suprayaciendo a un nivel de roca de mayor competencia mecánica, con velocidades de propagación de onda de corte mayores a los 1100 m/s.

- **Zonificación geotécnica**

Con toda la información recopilada y generada, se procedió a realizar una zonificación preliminar de la zona. Esta tuvo sus fundamentos más importantes en las siguientes características:

- Caracterización de los materiales según sus propiedades geotécnicas, espesores y proximidad a la roca, para lo cual se contó con toda la información generada en la exploración geotécnica.
- Tipologías de la topografía dentro de la zona de estudio, básicamente el grado de la pendiente, observado en campo y resultado del levantamiento topográfico.
- Morfodinámica de los últimos 50 años aproximadamente, definida por la valiosa herramienta de contar con la cartografía de cuatro épocas diferentes, lo que permite observar el dinamismo de la loma.

De esta manera, se configuro una zonificación preliminar de 4 zonas con las siguientes características:

Zona 1.-Representada por la totalidad de la ladera oriental, superficialmente se encuentra una capa de material de relleno el cual cercenó los drenajes naturales, creando problemas con la conducción de las aguas. Básicamente toda esta zona sufre un movimiento que comienza en la calle 40 con gran afectación de las estructuras y termina sobre los gaviones. Presenta una cantidad considerable de grietas y escarpes secundarios.

Zona 2.-Posiblemente es en la actualidad la ladera con menor movimiento, se encuentra completamente cubierta por vegetación. A pesar de ser la ladera con el mayor grado de pendiente, esta es estable debido a que la roca se encuentra bastante somera y solo son posibles algunos movimientos superficiales, en la cabecera del talud.

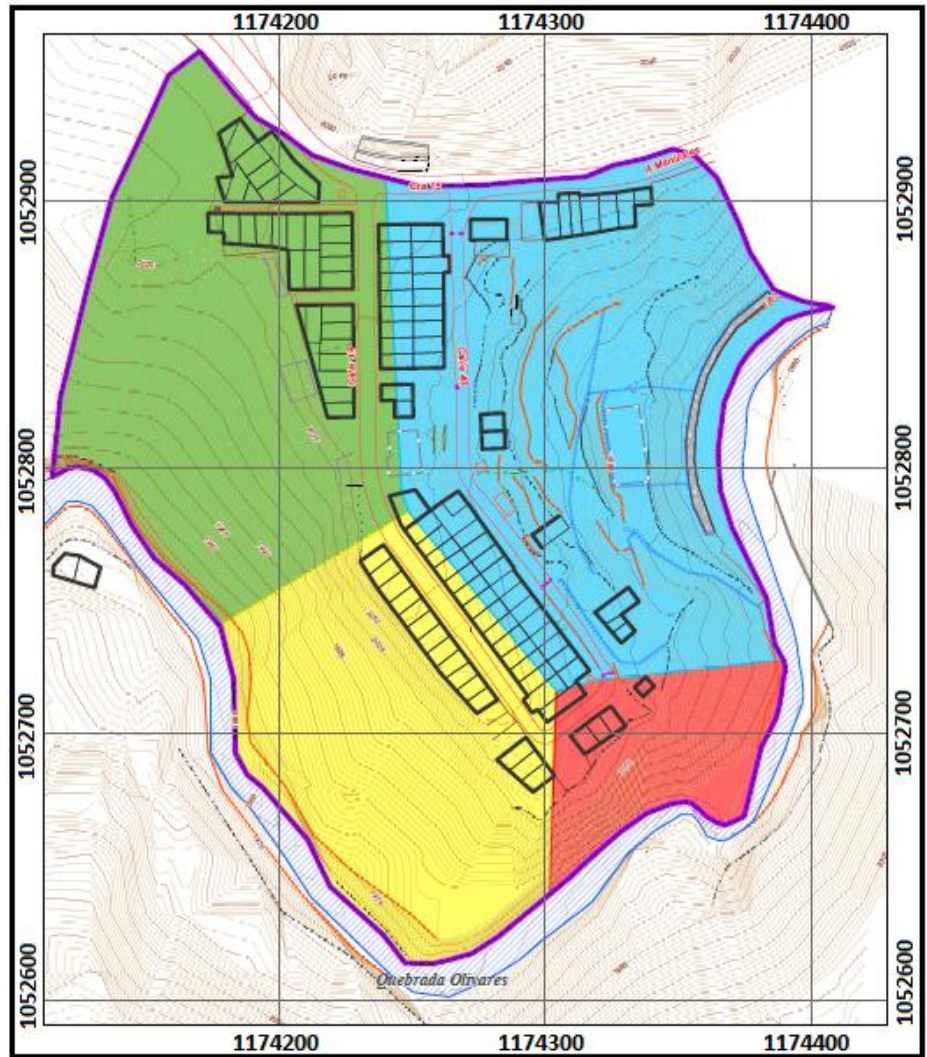
Zona 3.-La morfo dinámica observada, a través de los años indica que la ladera no ha sufrido grandes modificaciones. No obstante, esto no indica que posea una estabilidad como para garantizar o salvaguardar las vidas de las personas que sobre esta zona asentaron sus viviendas, al contrario, esta ladera no ha sido expuesta a agentes detonantes, que en caso de que tengan lugar, generarían repercusiones supremamente importantes sobre los primeros metros de la topografía actual y longitudinalmente podría verse afectada hasta la vía que comunica la zona.

Zona 4.-Es la zona noroccidental del área de estudio, aquí es posible ubicar a lo largo de la historia del barrio, algunos movimientos, la mayoría de estos sin mayor relevancia, no obstante, esto evidencia que es susceptible a sufrir procesos de inestabilidad a largo plazo, además se puede ubicar un proceso de algo más de 35 años todavía activo que puede comprometer la integridad de algunas estructuras que sobre esta se soportan.

La Figura 4 - 8 permite observar la zonificación geotécnica definida.

- **Modelo geológico geotécnico**

De acuerdo con los datos disponibles de la exploración geotécnica, de los ensayos de laboratorio y de la caracterización geológica, se estableció el perfil del suelo y sus propiedades índices y mecánicas, los cuales se presentan en la Figura 4 - 9 y Figura 4 - 10, junto con los perfiles en planta de las secciones que pueden observarse en la Figura 4 - 11.



CONVENCIONES TEMÁTICAS

ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA	
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
1	Representada por totalidad ladera oriental con grandes procesos dinámicos activos
2	Ladera sur cubierta completamente por vegetación, con alto grado de pendiente, en la actualidad bajo movimiento
3	Antiguos movimientos en estado inactivo, debido posiblemente a la colocación de pantallas ancladas
4	Zona Noroccidental, se aprecia un movimiento activo con aproximadamente 35 años de movimiento

Figura 4 - 8 Zonificación Geotécnica (JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015).

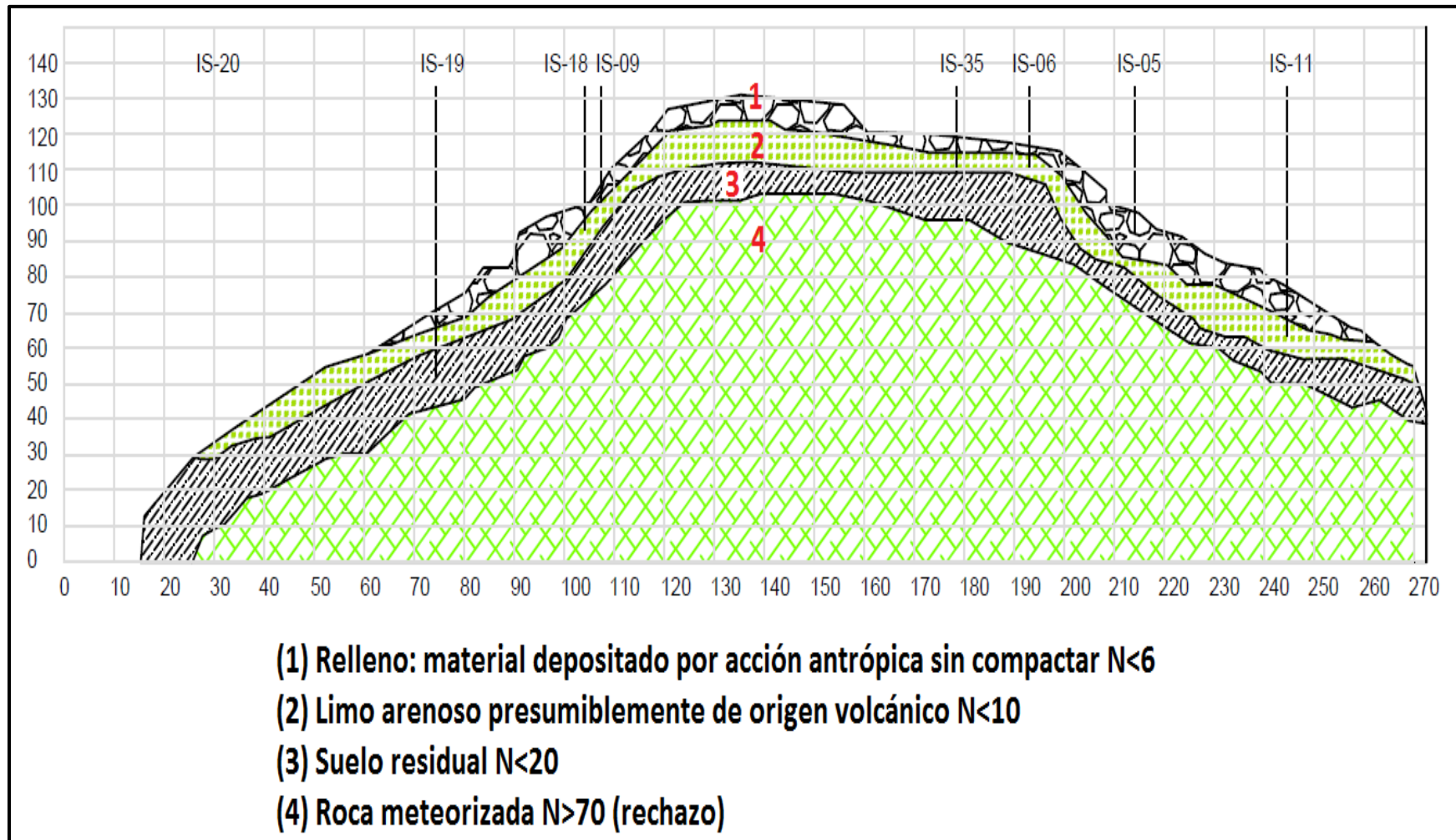


Figura 4 - 9 . Modelo Geotécnico 1 (JAM Ingeniera y Medio Ambiente S.A.S, 2015)

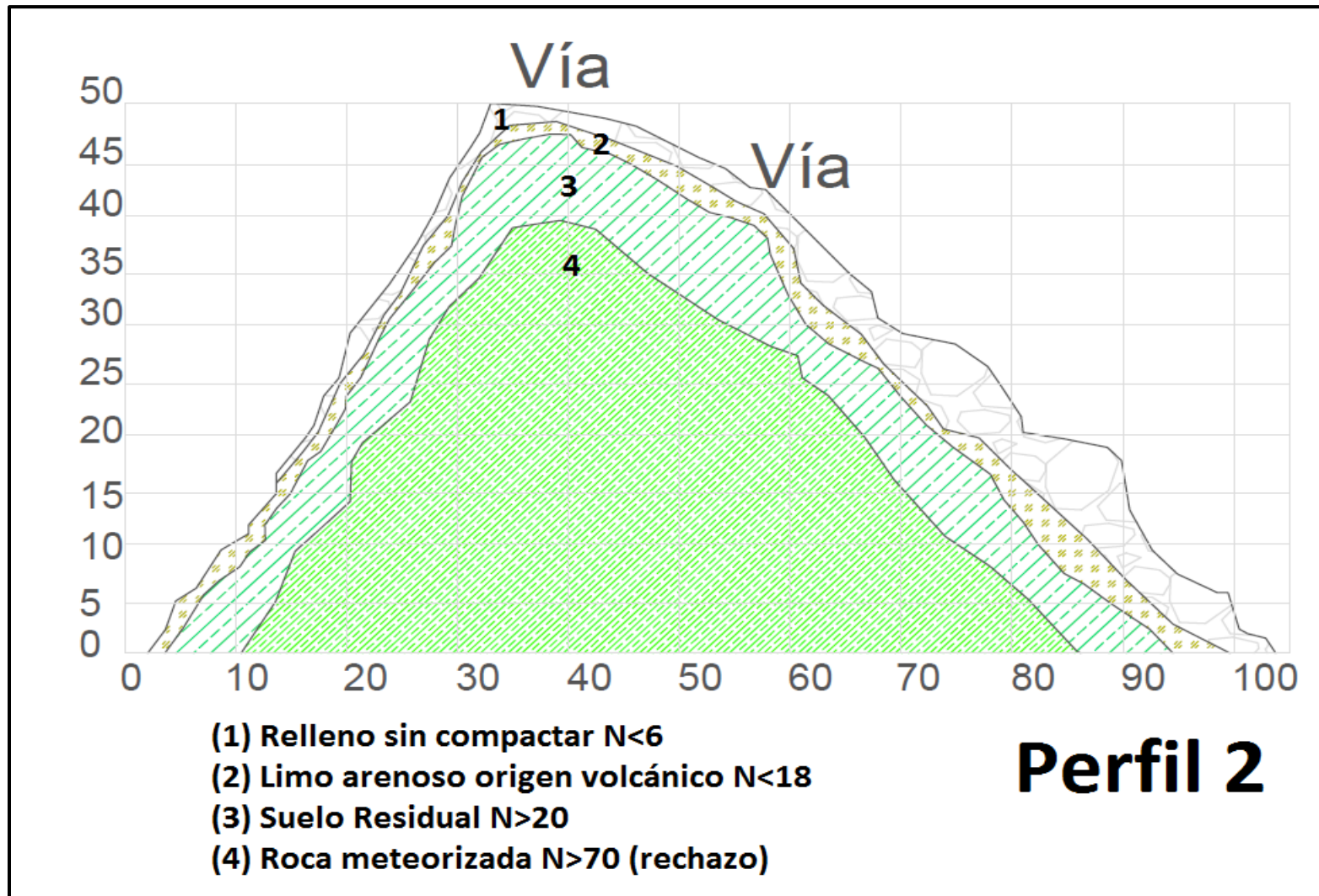


Figura 4 - 10 Modelo Geotécnico 2 (JAM Ingeniera y Medio Ambiente S.A.S, 2015)

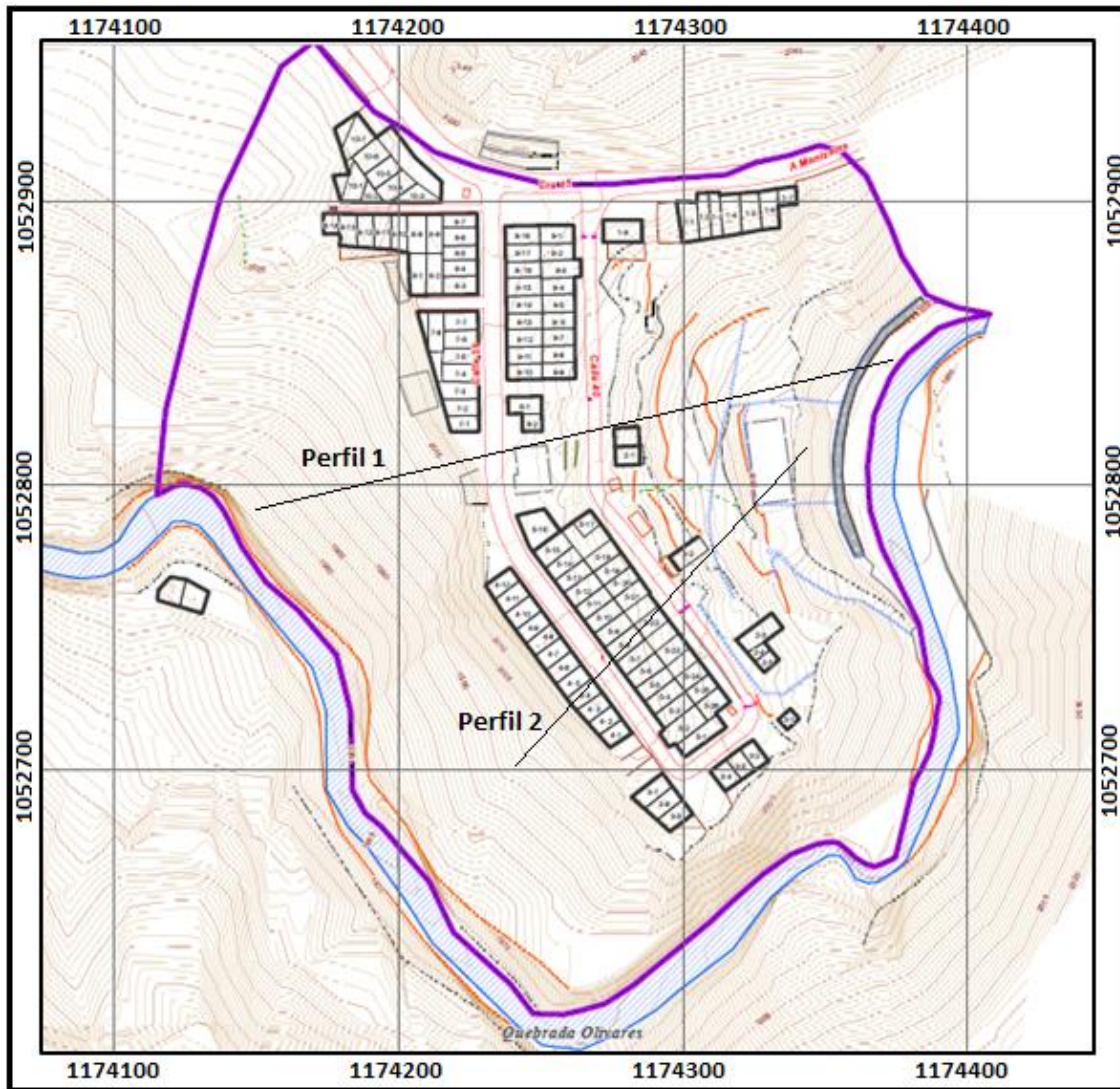


Figura 4 - 11 Ubicación en planta de los perfiles 1 y 2

Teniendo en cuenta los parámetros del modelo geológico-geotécnico y a partir del análisis de los resultados de los ensayos in situ y de laboratorio, se determinaron los parámetros de diseño utilizados para realizar la evaluación de la estabilidad y a la cual se le acoplan los resultados del análisis hidrológico (ver Tabla 4 - 6).

Tabla 4 - 6 Parámetros del modelo geológico-geotécnico.

#	MATERIAL	γ (t/m ³)	Φ°			C(kPa)		
			max	prom	min	max	prom	min
1	Arena limosa de baja plasticidad y compacidad media (Relleno)	1.82	41.6	35.0	23.0	22.6	12.0	1.0
2	Material limo arenoso de consistencia muy firme	1.78	31.6	29.0	28.0	26.5	14.0	4.8
3	Suelo residual	1.87	28.6	28.0	23.6	16.5	16.3	15.5
4	Roca parcialmente inalterada y roca sana	2.4		20.0			1962.0	

JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015

4.1.6 Propiedades hidráulicas

Como se presenta de manera común en el medio, la exploración de campo, no contempla mayores inversiones en las características hidráulicas de los materiales, siendo este el principal inconveniente en los estudios hidrológicos en cuanto a la estabilidad de taludes. No obstante, dentro de la información secundaria disponible en el área, se cuenta con los resultados de un ensayo in situ de permeabilidad según el método del profesor Álvaro J, González (1987), el cual sirve para tener un valor de referencia acerca de la conductividad hidráulica del material más superficial que está definido como relleno (Ver Figura 4 - 12). Con base en los resultados se puede afirmar que la permeabilidad es mayor a 2 cm/días ($3,36 \times 10^{-7}$ m/s) y se puede inferir debido a su heterogeneidad que es considerablemente mayor a la que presenta el otro material superficial de la zona (limo).



Figura 4 - 12 Ensayo de permeabilidad in situ. (JAM Ingeniería y medio ambiente S.A.S, 2015)

4.2 Guía metodológica SGC-UN (2015). (Método combinado)

La normatividad colombiana en la temática de gestión del riesgo y ordenamiento territorial, hace explícito que la evaluación de la amenaza por movimiento de remoción en masa se realice implementando herramientas de naturaleza determinística y probabilística.

La Universidad Nacional realizó para el SGC una guía metodológica acorde con estos requerimientos, por tal razón luego de haber visto el panorama general de la forma de incorporar las variables hidrológicas en los análisis de estabilidad de taludes se plantea a continuación un análisis más detallado de lo indicado en la guía citada con el fin de evaluar sus ventajas y limitaciones en la aplicación para estudios.

Partiendo del hecho que la escala es un factor importante a la hora de la inclusión de los agentes condicionantes y detonantes a ser evaluados, la guía presenta una subdivisión en estudios básicos, los cuales se ejecutarían a un nivel de detalle 1:5000 y los estudios detallados a escala de 1:2000.

No obstante, sea cual sea la escala utilizada será necesario contar con una lista de insumos indispensables para la aplicabilidad de la guía, entre estos tenemos:

Cartografía reciente, la cual puede ser comparada con mapas antiguos para dar indicios y evidencias de los procesos que ha sufrido el área objeto de estudio. Este aspecto puede apoyarse además en los sensores remotos y fotografías aéreas.

Otro insumo indispensable, es el *modelo digital del terreno*, la mayor importancia de este es que facilita considerablemente el procesamiento de datos, optimizando los tiempos de ejecución. Este tipo de modelo está presente en la mayoría de las metodologías recientes.

Los registros de lluvias, este forma parte de uno de los insumos de mayor importancia dentro del estudio ya que de ello va a depender en gran medida la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos. En Colombia, el IDEAM dispone de la mayor base de datos en lo que se refiere a precipitaciones, se recomienda que los registros contengan al menos 15 años de información, no obstante, también existen las estaciones meteorológicas de los aeropuertos y de entidades como las corporaciones autónomas y las empresas de acueducto que conviene consultar y en algunos casos estaciones privadas que son válidas

también como fuente de información, mientras más robusta esta información mayor posibilidad de efectividad tendrán los resultados arrojados.

En cuanto al *componente geológico*, la guía plantea la ejecución de la investigación siguiendo la metodología de las unidades de geología para ingeniería (UGI), la cual se encuentra bien descrita y dividida para caracterizar los materiales, teniendo en cuenta factores tan importantes como el origen y los espesores, estableciendo la correcta nomenclatura dentro de los mapas generados.

Las principales características que debe aportar el mapa de UGI serían las que se describen a continuación:

- Permitir la diferenciación de los materiales en superficie, distinguiendo al menos entre suelos y rocas, aunque es recomendable las formaciones y los orígenes de estos.
- Debe indicar en caso de ser suelo el espesor del mismo, aunado a esto a qué material está subyaciendo el suelo y la permeabilidad del mismo, ya que de esto puede configurar un escenario favorable para los deslizamientos superficiales.
- Por último, el mapa debe proporcionar también las propiedades mecánicas del material las cuales son obtenidas con los ensayos de laboratorio o correlaciones disponibles.

La escala de trabajo limita el área mínima cartografiable, para escala básica es de 2500 m², y escala detallada de 1000 m², esto exige manejar con prudencia la información ya que la “homogeneidad” en muchos casos obliga a desestimar condiciones puntuales dentro de los análisis.

El aspecto hidrogeológico, plantea un conocimiento general del régimen subterráneo, la inclusión y exigencia de propiedades del suelo como: textura, porosidad, cobertura vegetal, uso, magnitud y variabilidad de la infiltración, contenido de agua, entre otros, son factores que tienen en cuenta. No obstante, la hidrogeología puede complementar o corroborar la altura promedio del nivel freático, dato importante dentro de la modelación y para el cual en la guía no se expresa de manera explícita su incorporación.

La exploración de subsuelo se plantea mediante sondeos o perforaciones que no siempre alcanzan la profundidad necesaria para ubicar el nivel freático, aunque se da la opción de usar técnicas no destructivas como la geofísica para tales fines, buscando métodos que

faciliten la ubicación del agua y niveles freáticos como los sondeos eléctricos verticales. Este parámetro presenta sin duda alguna muchas incertidumbres que pueden ser reducidas con un mayor enfoque y esfuerzos para la determinación real del comportamiento del agua en condiciones normales en el subsuelo. El problema en cualquier caso es determinar cuál es la probable variabilidad del nivel freático en un sector determinado.

Geomorfología, debe ser evaluada en sus cuatro componentes según la propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica desarrollada por el Servicio Geológico Colombiano (Carvajal, 2012) donde diferencia entre: morfogénesis, morfología, morfometría y morfodinámica. El propósito del análisis es delimitar las unidades geomorfológicas según las características planteadas en la guía.

Así mismo, presentan una nomenclatura estándar para clasificar las unidades y elementos geomorfológicos definidos, similar a la de la geología y mapa de cobertura y uso del suelos que será explicado a continuación.

La metodología planteada no evalúa de forma explícita el factor antrópico dentro de la inestabilidad de laderas, siendo esta característica una de considerable importancia ya que generalmente los procesos de remoción en masa y erosión en general, están siendo promovidos en mayor o menor grado por algún tipo de agente antrópico. Es así, como plantean la evaluación de cobertura y uso de suelo como un factor condicionante, en el cual discurren de manera implícita el factor antrópico.

La metodología adoptada para este parámetro en específico de cobertura es la de Corinne Land Cover, mientras que el alcance de la cobertura y uso de suelo se relaciona con la estimación del número de curva (CN, por sus siglas en inglés), del método de lluvia-esorrentía del Servicio de Conservación de Suelos (SCS de Estados Unidos). Para la escala detallada sería conveniente considerar además dentro del mapa los aspectos antrópicos relevantes como cortes, rellenos, explanaciones, cambios en el uso del suelo, entre otros, esto para estimar las afectaciones antrópicas que no son discutidas en ningún otro parámetro y eventualmente pueden afectar las condiciones de esorrentía e infiltración.

Inventario de movimientos en masa (y catálogo): se plantea en la guía la realización de un inventario de movimientos en masa para cada proyecto de zonificación, donde se reflejen los procesos actuales y de ser posible la historia de movimientos en el área de estudio con las características de los mismos, mecanismo de falla, material, daño, entre otros. Esta es una labor dispendiosa pero muy importante porque permite identificar las características de los procesos y sus posibles causas. Es conveniente siempre hacer un análisis de los eventos inventariados (catálogo), por esto, se referencia la base de datos del SGC el cual se denomina Sistema de Información de Movimientos en Masa (Simma) que aporta diferente información dependiendo de si se busca el catálogo o el inventario, siendo este último mucho más técnico con respecto a los datos aportados. Esta base de datos puede ser consultada por internet de forma gratuita. (Ver Figura 4 - 13).

Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio: recomienda un mínimo de puntos de exploración y se aportan algunas especificaciones para realizarlos, las mismas pueden ser consultadas en la Guía. No obstante, es bueno destacar que la dividen en básica y detallada, y deben ser precedidas por una exploración geológica para poder caracterizar en el caso de la exploración básica las unidades geológicas y geomorfológicas encontradas y posteriormente densificar y concentrar la exploración en los sectores de amenaza alta identificados.

Los ensayos de laboratorio, en la escala básica, deben ser enfocados en caracterizar físicamente los materiales, mientras que para la detallada deben tener como finalidad la determinación de las propiedades mecánicas.

Posteriormente, con toda la información recopilada y generada se define el modelo geológico-geotécnico, en el cual se tienen en cuenta básicamente la pendiente del terreno, el espesor del suelo, la variabilidad, litoestratigrafía hasta el sustrato rocoso y la posición del nivel freático. Con base en este modelo, se calculan los factores de seguridad, generalmente se resuelve por medio del equilibrio límite, sin embargo esto puede variar según la configuración del perfil y el mecanismo de falla asociado.

Es importante resaltar que para la determinación de la posición del nivel freático, la guía plantea de manera explícita un análisis detallado de la variabilidad de éste, asociado a los regímenes de lluvia y un periodo de retorno dado. Adicionalmente, propone hasta tres tipos diferentes de análisis, según la escala de trabajo y las condiciones geométricas de la ladera en estudio, apoyándose en las metodologías planteadas por SCS y Pradel y Raad (1993).

Este punto es dentro de la guía el de mayor importancia e innovación por lo que se analiza a fondo más adelante en el presente documento.

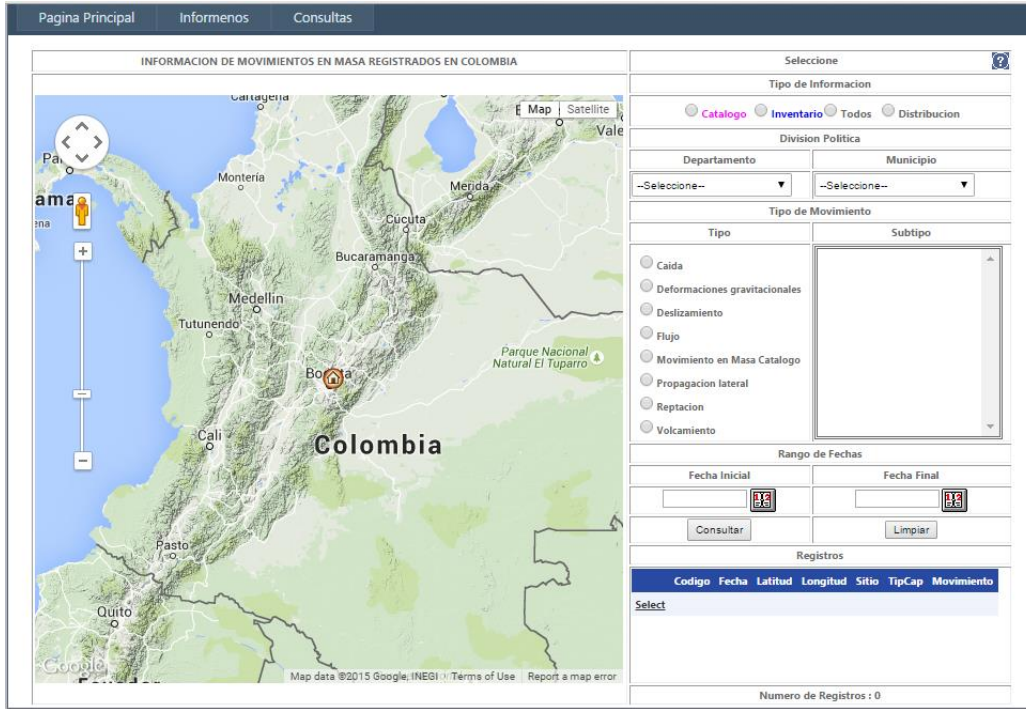


Figura 4 - 13 Plataforma pública SIMMA, del servicio geológico colombiano

A continuación se presentan los cálculos para la determinación fundamentalmente del factor de seguridad en un talud de un proyecto específico, siguiendo los pasos de la escala básica y detallada, los cuales analizan primeramente un componente hidrológico para continuar con la aplicación del modelo de estabilidad, evaluando así las posibilidades reales de que el deslizamiento se desencadene o no.

4.2.1 Análisis de estabilidad con la inclusión de parámetros hidrológicos

Una vez obtenido todos los datos requeridos para el análisis, se supone la aplicación de las dos escalas que plantea la guía metodológica SGC-UN comenzando por la básica.

- Análisis con la escala Básica

Con esta escala se desea solo tener una idea o aproximación de la estabilidad general del talud o taludes estudiados, por lo que su análisis es bastante superficial. Se implementa

únicamente cuando los datos son precarios e importancia de la condición de estabilidad así lo permita, es decir, que no tenga un alto riesgo asociado.

Se inicia con el cálculo de la lámina de infiltración y frente húmedo. (Análisis Hidrológico)

El insumo fundamental son las curvas IDF, por lo que antes de realizar los cálculos de precipitación efectiva en el área, es necesario construirlas. Por ende siguiendo los lineamientos de la metodología, se analizó la precipitación que se pueda generar como representativa para la zona de estudio, por esta razón se parte de un análisis de tipo espacial, como lo son los Polígonos de Thiessen.

En la Figura 4 - 14, se muestra la influencia de cada una de las estaciones:

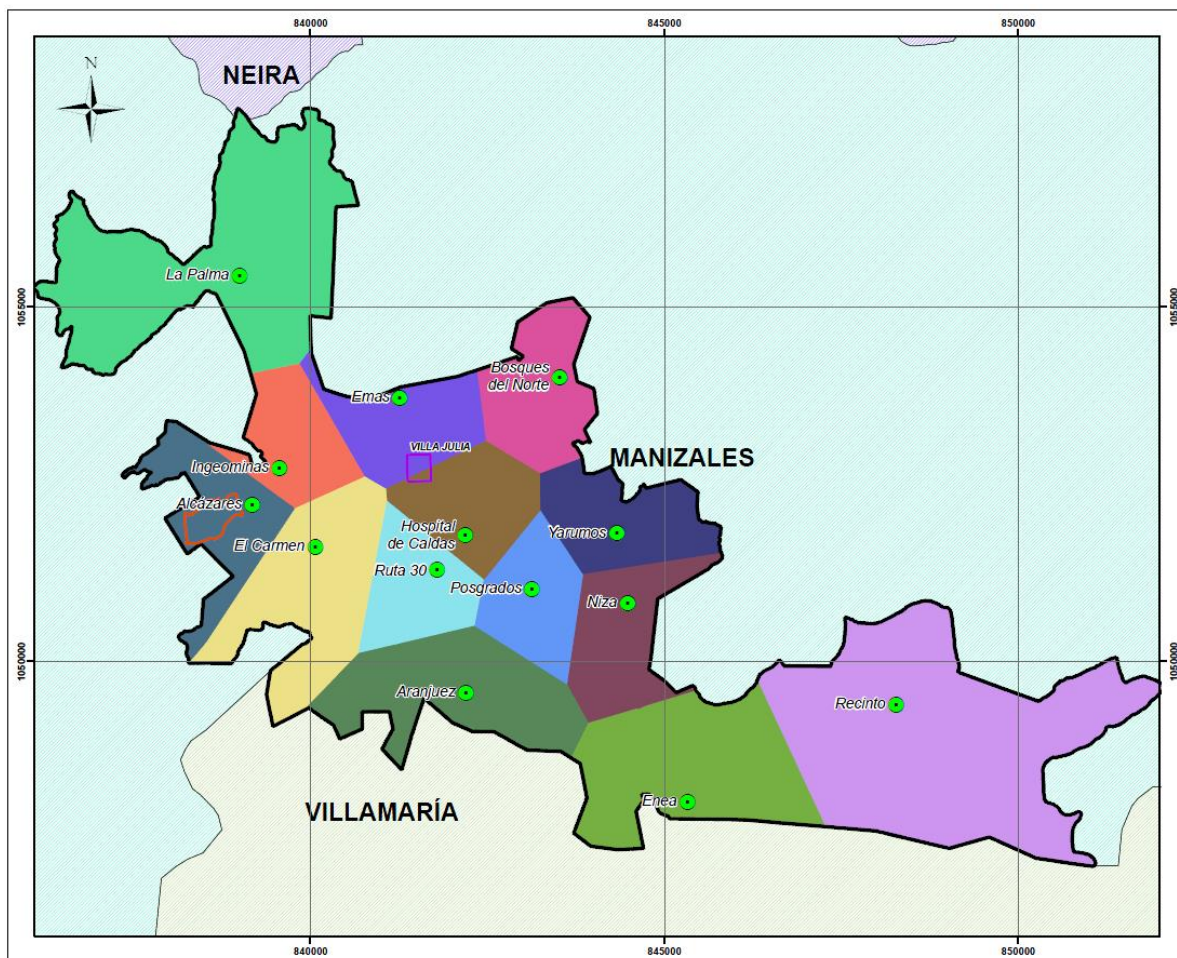


Figura 4 - 14 Polígonos de Thiessen para las estaciones ubicadas en el casco urbano de la ciudad de Manizales (JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S, 2015)

Dentro del análisis de los polígonos de Thiessen se tiene como resultado la influencia de dos estaciones con registros históricos pluviométricos, cualquiera de estos puede llegar a ser representativos para describir el régimen de precipitación de la zona de estudio. Sin embargo, se asume únicamente la estación EMAS por tener una mayor área de influencia dentro del proyecto, adicionalmente tiene una serie de precipitaciones más robusta de modo que se puede tener un análisis más confiable.

Para la construcción de las curvas IDF correspondientes a la estación seleccionada (Emas), no se requiere realizar un análisis de tipo estadístico, esto en virtud de que se cuenta con la serie anual multianual de las precipitaciones máximas en 24 horas, por lo que se procede a usar la siguiente metodología:

INVIAS (2009), presenta el manual de diseño de drenaje para carreteras con una metodología que se rige mediante la ecuación 17, la construcción de las curvas IDF se realizará utilizando dicha metodología por su fácil implementación.

$$i = \frac{a \cdot T^b \cdot M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c} \quad \text{Ecuación 17}$$

Dónde:

i: Intensidad de la lluvia en (mm/h)

M: corresponde al promedio de los datos de la serie de precipitación, para lo valores máximos de cada año

t: corresponde a la duración de la precipitación en minutos

T corresponde al periodo de retorno en años.

Y los parámetros a, b, c, d están estimados para las diferentes regiones de Colombia. En el caso concreto del área donde se ubica el proyecto, se encuentra representado por la zona R1 (Región Andina), tal como se indicará en la Tabla 4 - 7.

Tabla 4 - 7 Valores de los coeficientes a, b, c, d para el cálculo de las curvas intensidad – duración – frecuencia, IDF, para Colombia

REGIÓN	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

INVIAS, 2009.

En Tabla 4 - 8, se presentan los valores máximos anuales para el cálculo del parámetro M.

Tabla 4 - 8 Precipitación Máxima diaria multianual

Año	Vr Máximo diario (mm)
2014	64
2013	91
2012	84,6
2011	83,4
2010	50,2
2009	78,6
2008	87,4
2007	45,2
2006	72
2005	88,6
2004	79,2
2002	72,8
2001	57,8
2000	63,2
1999	67,4
1998	58,6
1997	79,4
Promedio(M)	71,965

Con los parámetros seleccionados anteriormente se calcula la respectiva curva IDF para la estación EMAS

Tabla 4 - 9 Curvas IDF estacion EMAS

Duración (min)	CURVA IDF Estación EMAS						
	Periodos de Retorno (años)						
	2,33	10	15	20	25	50	100
5	196,30	255,15	274,47	289,06	300,90	340,89	386,19
10	124,23	161,48	173,71	182,94	190,43	215,74	244,41
20	78,63	102,20	109,93	115,78	120,52	136,54	154,68
30	60,16	78,20	84,12	88,59	92,22	104,48	118,36
40	49,76	64,68	69,58	73,27	76,28	86,41	97,89
50	42,95	55,82	60,05	63,24	65,83	74,58	84,49
60	38,08	49,49	53,24	56,07	58,37	66,12	74,91
70	34,39	44,70	48,09	50,65	52,72	59,73	67,66
80	31,49	40,93	44,03	46,37	48,27	54,69	61,96
90	29,14	37,87	40,74	42,90	44,66	50,60	57,32
100	27,18	35,33	38,00	40,02	41,66	47,20	53,47
110	25,52	33,17	35,69	37,58	39,12	44,32	50,21
120	24,10	31,32	33,69	35,48	36,94	41,85	47,41
130	22,86	29,71	31,96	33,66	35,04	39,69	44,97
140	21,77	28,29	30,43	32,05	33,37	37,80	42,82
150	20,80	27,03	29,08	30,63	31,88	36,12	40,92
160	19,93	25,91	27,87	29,35	30,55	34,61	39,21
170	19,15	24,89	26,77	28,20	29,35	33,25	37,67
180	18,44	23,97	25,78	27,15	28,27	32,02	36,28
1440	4,67	6,08	6,54	6,88	7,17	8,12	9,20

*Los valores de intensidad, ubicados en la parte interna de la tabla se presentan en unidades de mm/h

A partir de los datos obtenidos se representa gráficamente las curvas Intensidad Duración frecuencia, las cuales se muestran en la Figura 4 - 15 Curvas IDF estación EMAS.Figura 4 - 15.

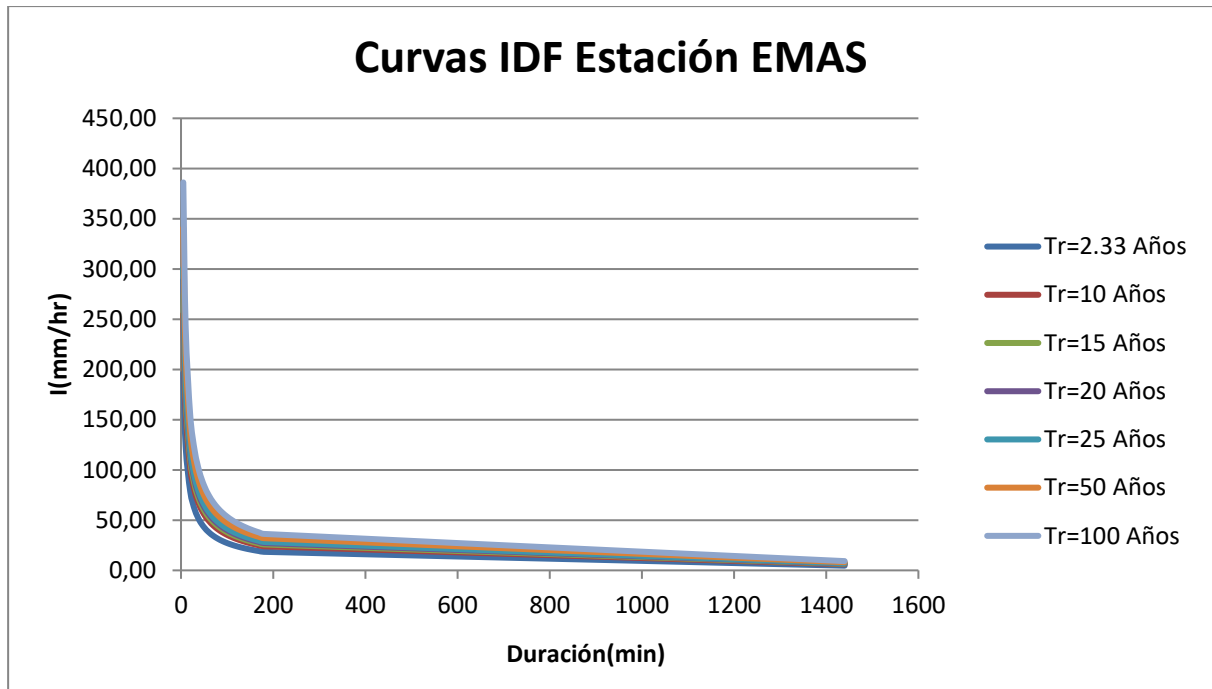


Figura 4 - 15 Curvas IDF estación EMAS.

Una vez construidas las curvas IDF se procede a determinar la variación del nivel freático para un periodo de retorno asociado de la siguiente forma:

Partiendo de la información diaria de lluvias, se procede al cálculo de la precipitación efectiva para cada uno de los días considerados dentro del periodo de análisis (Años 1997 a 2014) en información diaria anual multianual.

La metodología planteada por el Servicio Geológico Colombiano y la Universidad Nacional de Colombia parte de considerar el método propuesto de cálculo de caudales de escorrentía por el Soil Conservation Service (Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos-SCS) denominado Curva Número (CN).

El respectivo valor de CN, viene dado por las características del suelo del área de estudio y las condiciones antecedentes de contenido de agua en el suelo.

Para el caso concreto de análisis, se toma como condición antecedente de contenido de agua la numero II, ya que así lo establece la guía para todo el registro de precipitación en función de considerarlo suficiente para el análisis a realizar. El método del Soil Conservation Service considera números de curva para tres condiciones de humedad antecedente (I, II y III), que para las estaciones climáticas en las cuales hay crecimiento de

vegetación se determinan según la precipitación acumulada de los cinco días previos al del análisis: inferior a 35 mm, entre 35 y 53 mm, o superior a 53 mm, respectivamente.

El valor de CN es 80, que corresponde a un tipo de suelos D (suelos arcillosos altamente plásticos), con óptimas condiciones de cobertura de vegetación, mayoritariamente pastos.

Se calcula el coeficiente S, que representa el almacenamiento del suelo, mediante la aplicación de la ecuación 18:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \dots \text{Ecuación 18}$$

Donde al sustituir CN por el valor determinado (80), se obtiene:

$$S = 63.5$$

Para el cálculo de la precipitación superficial (Ps), que corresponde a la precipitación que se convierte en escorrentía directa, se deben seguir las siguientes dos condiciones:

- Si $P < 0.2S$ el valor de Ps es 0
- Si $P > 0.2S$ se considera el uso de la ecuación 19

$$P_s = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{Ecuación 19}$$

Luego la condición de análisis será:

$$Ca = 0.2S = 0.2 * 63.5 = 12.7 \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde Ca es igual a la condición de análisis o precipitación por encima de la cual existirá escorrentía.

Una vez se obtiene la precipitación superficial, se procede a la evaluación de la precipitación infiltrada o efectiva en estabilidad de taludes, como la diferencia entre la precipitación total y la precipitación superficial:

$$P_i = P_T - P_s \quad \text{Ecuación 21}$$

La precipitación total se obtiene a partir de los registros históricos de lluvia obtenidos de las estaciones meteorológicas.

Dando como resultado para el acumulado total anual de las láminas de infiltración a lo largo de la serie multianual lo presentado en la Tabla 4 - 10.

Tabla 4 - 10 Precipitacion infiltrada por año en mm

Año	Pi(mm) Acum
1997	892,039
1998	1717,926
1999	2139,975
2000	1628,799
2001	1445,240
2002	1457,460
2003	1996,495
2004	1927,534
2005	2210,961
2006	1815,196
2007	1928,312
2008	2658,610
2009	1608,636
2010	2165,344
2011	2382,103
2012	1583,518
2013	1571,347
2014	1414,558
Promedio	1808,003
Desvest	416,737
CV	0,230

El coeficiente de variación (CV) se calcula como se muestra en la ecuación 22:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{P}_i} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde σ es la desviación estándar y \bar{P}_i es la media de las precipitaciones infiltradas acumuladas de la serie diaria anual multianual.

Con el procedimiento realizado se determina la posición del nivel freático suponiendo una variación a largo plazo que sigue una distribución normal con un periodo de retorno de 20 años, de esta manera la profundidad se puede estimar con la ecuación 23:

$$P_{f20} = (\bar{P}_f - 1.65CVP_f) - (I_{t20} * 24) \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

P_{f20} : Profundidad del nivel freático para un periodo de retorno de 20 años.

\bar{P}_f : Profundidad media del nivel freático en milímetros. La guía establece que se debe tomar como profundidad media, la que se obtenga en las perforaciones. Sin embargo al no encontrarse la posición del nivel freático con los sondeos, recomiendan utilizar entonces la profundidad a la cual se encuentre la superficie de falla más probable, para este caso y al no lograr identificar el nivel freático con las perforaciones, se trabajará con 6.5 metros lugar donde se encuentra el contacto entre el relleno y el suelo residual.

CVP_f : corresponde a la desviación estándar asignada a la variación del nivel freático, expresada en términos del coeficiente de variación de los acumulados anuales de precipitación infiltrada en milímetros, para el estudio en particular $CV=0.230$ (Ver Tabla 4 - 10).

I_{t20} : Intensidad de lluvia infiltrada diaria para un periodo de retorno de 20 años, este periodo es determinado con base en experiencias que indican que la falla tiene recurrencias aproximadas a este tiempo.

Por lo tanto para una duración de 60 minutos y un periodo de retorno de 20 años la intensidad correspondiente es de 56.07 mm/h, obtenida de las curvas IDF de la estación Emas (ver Figura 4 - 18 y Tabla 4 - 9). A este dato, se le realiza el procedimiento para calcular la cantidad de lluvia infiltrada o efectiva, implementando las ecuaciones 19 y 21, obteniendo un valor de 17.6 mm/h para la zona.

En la Figura 4 - 16, tomada exacta de la guía en estudio se plantea gráficamente el arreglo de los datos necesarios:

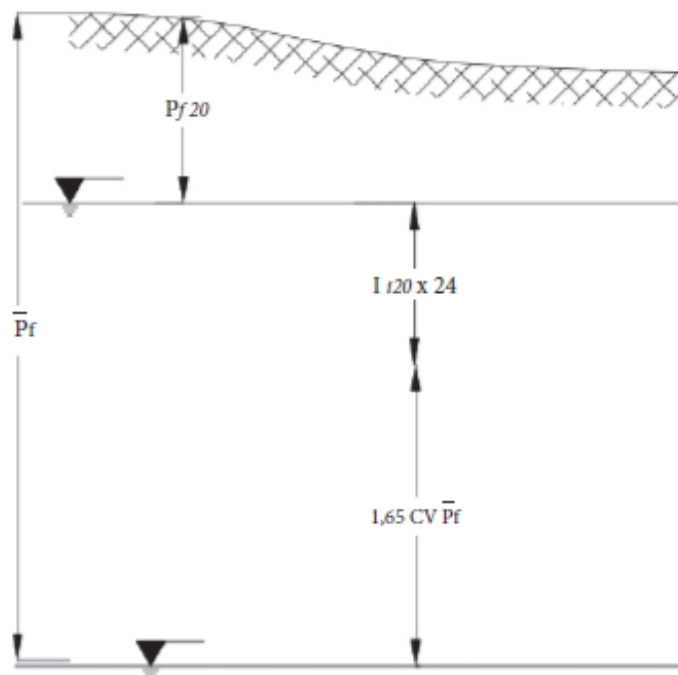


Figura 4 - 16 Representación de los términos utilizados para calcular la profundidad del nivel freático asociada a un periodo de retorno de 20 años. (Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgos por movimientos en masa, 2015)

Una vez introducidos los datos en la ecuación 23, se obtiene el valor de $P_{f_{20}} = 2682,28$ mm o el equivalente a 2.68 m bajo la superficie del terreno, dato que será utilizado para el análisis de la estabilidad en el componente geotécnico.

Este punto es el más importante dentro del estudio que aquí se realiza porque define la ubicación del nivel freático para los análisis de estabilidad, considerando de buena forma el componente hidrológico.

Análisis de estabilidad básico

En busca de una zonificación básica de la amenaza y posterior a todo el análisis del componente hidrológico, se determina el factor de seguridad para el talud en estudio, el cual está basado, como la mayoría de las metodologías analizadas, en la aplicación del método de equilibrio límite. De esta manera se desarrolla la ecuación del factor de seguridad para talud infinito el cual plantea una división de las fuerzas resistentes sobre las fuerzas actuantes, así el factor de seguridad para este caso específico se expresa como lo muestra la ecuación 24:

$$FS = \frac{(c' b \sec \alpha + (\gamma b h \cos \alpha - k \gamma b h \sin \alpha - \gamma_w h_w \cos^2 \alpha) \tan \phi')}{\gamma b h \sin \alpha + k \gamma b h \cos \alpha} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde:

ϕ' y c' : son los parámetros de resistencia del suelo en la base de la columna de suelo, en término de esfuerzos efectivos.

γ : peso unitario del suelo que se desliza

b : ancho de la tajada o celda, 1m generalmente

h : altura del suelo por encima de la superficie potencial de deslizamiento

γ_w : peso unitario del agua

h_w : altura de la lámina de agua, determinada a partir del nivel freático correspondiente a una lluvia de 20 años de periodo de retorno. Esta viene dada por la ecuación

$$h_w = P_f - P_{f20}$$

α : ángulo de inclinación de la superficie de falla

k : coeficiente de aceleración horizontal para un periodo de retorno de 100 años (no aplica para el presente estudio, lo cual obliga a la eliminación de los términos que lo contengan)

La Figura 4 - 17, es un esquema donde se indican los parámetros anteriormente presentados.

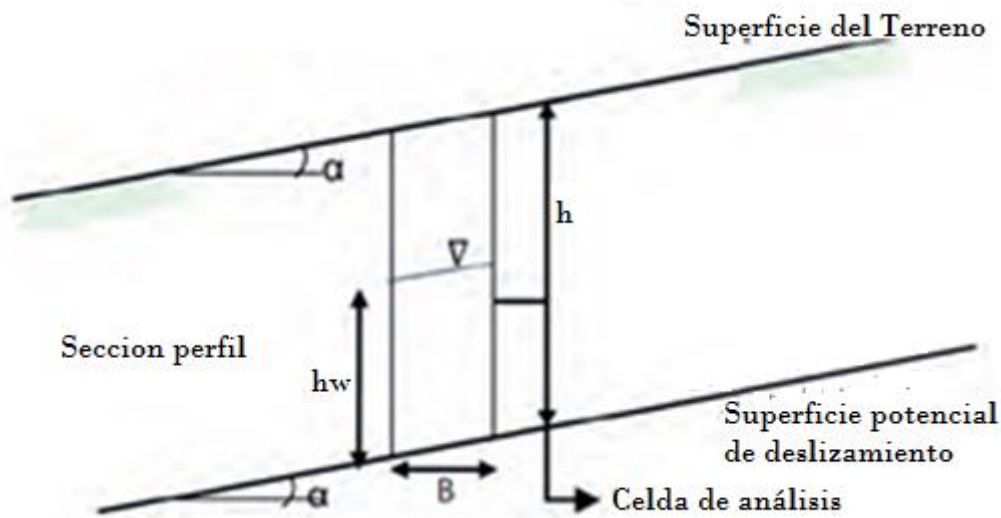


Figura 4 - 17 Parámetros para el análisis de amenaza básica en unidades tipo suelo (Servicio Geológico Colombiano, 2015)

Se realizó la programación de la Ecuación 24 en una hoja de Excel que facilita los cálculos siguiendo los lineamientos de la ecuación del factor de seguridad (FS).

Según las zonas en las que se subdividió el estudio (ver Figura 4 - 8), se presentan las propiedades implementadas para el cálculo del Factor de seguridad en cada una de ellas, como se ilustra en la Tabla 4 - 11.

Tabla 4 - 11 Datos definidos para la modelación

DATOS	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	UNIDAD
c	1,22	1,22	1,4	1,63	t/m ²
∅	35	35	29	28	grados
α	21	12	27	30	grados
γ	1,82	1,82	1,78	1,87	t/m ³
h	6,5	4,03	5	4,97	m
hw	3,82	1,32	2,32	2,29	m
b	1	1	1	1	m
γw	1	1	1	1	t/m ³

Las cuales resultaron en los siguientes factores de seguridad, que se asocian según la escala de la guía a los niveles de amenaza que pueden ser observados en la Tabla 4 - 12.

Tabla 4 - 12 Resultados de la zona objeto de estudio.

ZONA	FS	NIVEL DE AMENAZA
Z1	1,58	BAJA
Z2	3,53	BAJA
Z3	1,22	MEDIA
Z4	1,13	MEDIA

- Análisis con la escala detallada

Una de las mayores ventajas que presenta la guía es la evaluación de la estabilidad según el nivel de detalle que se requiera. Es por esto, que se decide suponer igualmente el caso

de un estudio detallado para así conocer con mayor profundidad el radio de acción, ventajas y limitaciones que esta presenta.

El mayor nivel de detalle exige el conocimiento o definición del mecanismo de falla, ya que el análisis difiere entre deslizamientos superficiales y profundos, considerando diferentes variables hidrológicas en cada uno de los casos.

En el caso de la zona objeto de estudio, se presentan mecanismos de falla tanto superficiales como profundos, es por esto que se requiere aplicar ambos procedimientos.

La evaluación de los *efectos de la lluvia en deslizamientos superficiales*, aplicados para el perfil de la zona geotécnica 4 (Ver Figura 4 - 8) se lleva a cabo de la siguiente manera:

Es importante aclarar que para fines del estudio, deslizamientos superficiales son aquellos en los cuales el plano deslizante no tiene una profundidad apreciable (menor a 2 metros) y su arreglo es más o menos paralelo a la superficie de la ladera.

En razón de que no se cuenta con información pluviográfica, pero sí con el registro de precipitación en 24 horas, la guía recomienda la implementación de las curvas LDF (lámina, duración, frecuencia), obtenidas mediante la aplicación del método de Díaz-Granados hasta una duración de 24 horas. Es necesario aclarar que estas curvas vienen siendo las denominadas PDF (profundidad, duración, frecuencia), no obstante, para la aplicación de la guía se adoptara el primer término (LDF) ya que así lo estipula el procedimiento, haciendo referencia a la lámina de agua precipitada.

Para intentar establecer la intensidad de lluvia mínima a la cual el suelo se satura y produce deslizamientos, se inicia con la construcción de las curvas LDF. De esta manera y con base en la metodología de estudio planteada por Díaz-Granados y Puentes (2006), se establece el procedimiento, a partir de registros pluviométricos anuales multianuales, con mediciones diarias que van desde 1997 hasta el 2014, para la estación seleccionada que corresponde a la EMAS operada por la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales.

La metodología parte del Cálculo de los Momentos Ponderados de Probabilidad (MPP) como un procedimiento de estimación robusto, alternativo a momentos y máxima verosimilitud. La estimación de parámetros con MPP requiere el cálculo de los momentos

$M_{l,j,k} = E[X^l F^j (1-F)^k]$, donde $E[.]$ es el valor esperado, l, j y k son números reales y X es una variable aleatoria que sigue una distribución específica $F = F(x) = Pr[X < x]$ y es expresable en forma inversa. Si j y k son enteros no negativos, el momento ponderado con probabilidad de orden (l, j, k) es proporcional al l -ésimo momento con respecto al origen de la estadística de orden $(j+1)$ para una muestra de tamaño $n = k + j + 1$. En el caso en que $j = k = 0$ y l un entero no negativo, $M_{l,0,0}$ es idéntico al momento convencional de orden l con respecto al origen. El método es atractivo con la distribución Gumbel pues puede ser resuelto analíticamente, dado por $f(x) = \exp\{-(x-m)/a - \exp(x-m)/a\}/a$ donde a y m son los parámetros de la distribución y x es la magnitud del evento extremo.

A partir de la teoría anterior, se procede al cálculo de los dos primeros momentos ponderados para la variable de precipitación, usando las ecuaciones 25 y 26:

$$M_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{Ecuación 25}$$

$$M_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \frac{n-i}{n-1} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde n es el número de datos históricos.

Siendo el primer valor la media de la muestra, conocida como la Esperanza Matemática $E[.]$ y el segundo valor la desviación estándar, se obtiene lo expresado en la Tabla 4 - 13:

Tabla 4 - 13 Primer y segundo momento ponderado

Primer Momento Ponderado		
n	6293	
Suma	35780.1	
Promedio	5.686	M0

Segundo Momento Ponderado		
n	6293	
Suma	17942.72	
Momento	2.851	M1

Posteriormente, se procede con un análisis puntual y global de los valores de M_0 y M_1 , tal como se enuncia en Díaz-Granados y Puentes (2006), siguiendo la metodología de Greis

y Wood (1983) propusieron un método de estimación regional de frecuencias de caudales máximos basado en el método de MPP para la evaluación de parámetro y lo ajustaron con la distribución de Gumbel. Díaz-Granados y Deeb (1988) aplicaron con algunas modificaciones este método de análisis regional en la cuenca del Alto Magdalena con resultados satisfactorios comparados con otros métodos.

En este trabajo para la estimación de curvas LDF se aplican elementos del método de Greis y Wood. Así, el procedimiento utilizado es el siguiente:

- Calcular $M_0, M_1, M_0/M_1$, para la estación EMAS Para estimar las curvas LDF esto permite adoptar el valor de $(M1/M0)$ diario estimado con la serie anual de lluvia diaria máxima (obtenible de registros pluviométricos) como representativo de otras duraciones t . en este caso $(M1/M0)= 0.50147175$
- Dado lo anterior, es necesario estimar M_0 o M_1 para diferentes duraciones t .

Por lo tanto dentro de la Metodología se plantea la estimación de M_0 a partir de registros pluviométricos de la estación. Es indispensable tener en cuenta que la estimación de M_0 va a variar según la duración para la cual se debe hallar, de dos maneras diferentes:

- Para duraciones de precipitación mayores o iguales a una hora, se sigue las siguientes ecuaciones para encontrar el valor de M_0 , donde es importante también conocer información adicional de la estación, tales como el número de días de precipitación de la serie anual Multianual (N) y el valor total de precipitación anual Multianual (P_A), además de la altura en msnm de la estación (E), con esta información se aplica la ecuación 27:

$$M_{0t} = k_1 + k_2 M_{0diario} + k_3 (P_A/N) + k_4 E \quad \text{Ecuación 27}$$

Y los valores de los coeficientes K se calcula como una función de la duración de la precipitación (t) en horas y aplicando las ecuaciones 28, 29, 30 y 31:

$$k_1 = a_1 + b_1 t + c_1 t \ln t + d_1 t^{0.5} \ln t + e_1 t^{-1.5} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$k_2 = a_2 + b_2 t \ln t + c_2 t^{2.5} + d_2 t^{0.5} \ln t \quad \text{Ecuación 29}$$

$$k_3 = a_3 + b_3 t + c_3 \ln t + d_3 t^{-0.5} \ln t + e_3 t^{-1.5} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$k_4 = a_4 + b_4 t + c_4 t^{1.5} + d_4 t^2 \ln t + e_4 e^{-t} \quad \text{Ecuación 31}$$

Los datos de las constantes de los coeficientes k_1 a k_4 , se presentan en Tabla 4 - 14:

Tabla 4 - 14 Valores de los coeficientes k_1 a k_4

COEFICIENTES	SUBÍNDICE			
	1	2	3	4
A	-761,087	0,22288	16,809	-0,0129
B	741,947	-0,07566	0,234	0,004169
C	-103,788	0,0005667	-5,8561	-0,001365
D	-586,892	0,32844	-17,8728	0,0001313
E	38,82		2,3229	0,014595

De donde resultan los datos que se presentan en la Tabla 4 - 15:

Tabla 4 - 15 Presentación de los Coeficientes

Calculo de Coeficientes				
t (min)	k1	k2	k3	k4
10	-3,59969341	1,05145781	8,07528549	-0,00124443
20	-2,91531369	1,10369814	8,73335722	0,00091069
30	-25,829561	1,41494145	8,89927085	0,00604761
40	-90,0072037	2,45613272	8,93727167	0,01861928
50	-199,391502	4,52699868	8,92722222	0,04119962
60	-353,891723	7,85525681	8,89603699	0,07552533
120	-2132,68682	63,374685	8,61878002	0,5837609
240	-9042,16122	434,276122	8,1456708	3,47538262
720	-61819,1359	7582,67122	7,1273121	44,6834087
1440	-181215,151	43890,787	6,37248609	203,664864

Para la estación EMAS, los valores de P, E y N se presentan en la Tabla 4 - 16 :

Tabla 4 - 16 Valores de P,E, N, para la estación EMAS

E(msnm)	2060
Pa(mm/hr)	2516.50
N	244.94

- Para duraciones de precipitación menores a 1 hora, se obtiene el valor de M_0 , basado en la ecuación 32:

$$\left(\frac{M_{ot}}{M_{01hr}}\right) = 0.3027 \ln t - 0.2806 \quad \text{Ecuación 32}$$

Conociendo previamente el valor de M01 hr

M01hr	0.50147175
-------	------------

Luego siguiendo la metodología anterior, como resultado en la Tabla 4 - 17 se presentan los valores de M0 buscados:

Tabla 4 - 17 Resultados de M0t obtenidos.

t(min)	M0t
10	0,20880908
20	0,3140257
30	0,37557348
40	0,41924232
50	0,45311451
60	0,4807901
120	0,58600673
240	0,69122335
720	0,85798775
1440	0,96320437

Con los valores de M0t, se construyen las curvas LDF para diferentes valores de periodo de retorno en los tiempos estimados, siguiendo la ecuación 33.

$$X_t = m - a \ln[-\ln(1 - 1/T)] \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde:

$$m = M_0 - \varepsilon a \quad \text{Ecuación 34}$$

$$a = (M_0 - 2M_1)/\ln(2) \quad \text{Ecuación 35}$$

Y tiene un valor constante de $\varepsilon=0.5772$.

Posteriormente se obtiene las Curvas LDF, presentadas en Figura 4 - 18:

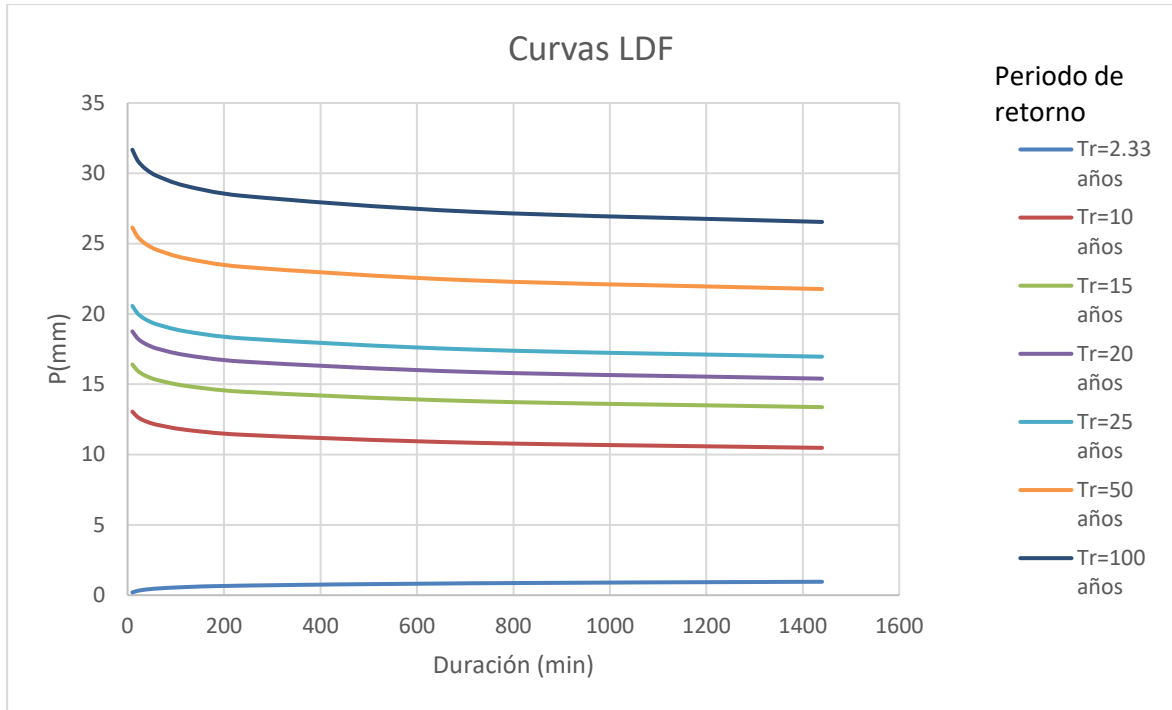


Figura 4 - 18 Curvas LDF obtenidas.

Después de obtener las curvas LDF se calcula la profundidad de la lluvia (P_{min}) que se puede correlacionar con la profundidad del frente húmedo en 24 horas, utilizando la ecuación 36

$$P_{min} = I_{min} * T_w \dots \text{Ecuación 36}$$

Donde

T_w corresponde a la duración de análisis

I_{min} es la intensidad mínima constante con cierta duración requerida para que el suelo alcance una saturación hasta una profundidad de frente húmedo supuesta. Esta a su vez se calcula de acuerdo con Pradel y Raad (1993) a través de la ecuación 37.

$$I_{min} = \frac{\mu}{T_w} \left[Z_w - \psi \ln \left(\frac{\psi + Z_w}{\psi} \right) \right] \left(\frac{Z_w + \psi}{Z_w} \right) \dots \text{Ecuación 37}$$

Donde

μ corresponde a la saturación efectiva calculada como la diferencia entre el contenido volumétrico de agua antes y después del frente húmedo.

Ψ corresponde a la cabeza de succión del frente húmedo.

Z_w corresponde a la profundidad del frente húmedo.

Para el caso concreto de análisis, y en vista de no poder realizar los ensayos para conocer todas las propiedades requeridas del suelo, algunas fueron definidas con base en referencias bibliográficas o de forma empírica, entre estas se tienen:

Pradel y Raad (1993) señalan que los valores de μ , varían comúnmente entre el 10% y 30%. Apoyándose en los resultados de laboratorio de humedad natural realizados a las diferentes muestras obtenidas de las perforaciones, se consideró que este no debía ser mayor a 20%, sin embargo este es un parámetro que debería evaluarse en laboratorio a partir del grado de saturación inicial o de las curvas de retención.

Mientras que para Ψ los valores típicos los acotan entre 80 cm para materiales gruesos y 140 cm para arcillas, con base en los resultados de granulometría de la zona se puede asignar entonces un valor de 140 cm (1400mm), ya que el material es predominantemente arcilloso.

Sustituyendo los valores descritos en la ecuación 37 y suponiendo diferentes profundidades del frente húmedo se obtiene los resultados de la Tabla 4 - 18.

Tabla 4 - 18 Valores obtenidos para diferentes Z_w

Z_w (mm)	T_w (min)	I_{min} (mm/min)	P_{min} (mm)
8000	1440	0,87	20,89
5000	1440	0,51	12,25
3000	1440	0,28	6,83
1000	1440	0,08	1,96

Se compara el registro de precipitaciones diarias para la serie multianual, donde se seleccionan las precipitaciones mayores o iguales a la precipitación mínima necesaria para saturar el suelo a una profundidad Z_w . Luego, se determina la media de dichos valores y se grafica sobre las curvas LDF de donde se obtiene un periodo de retorno asociado a dicha precipitación (ver Tabla 4 - 19 y Figura 4 - 19).

Tabla 4 - 19 Resultados obtenidos para la estimación del parámetro hidrológico en deslizamientos superficiales.

Zw (mm)	Tr (años)	Pprom (mm)
8000	100	34,50
5000	50	25,14
3000	25	19,14
1000	10	12,20

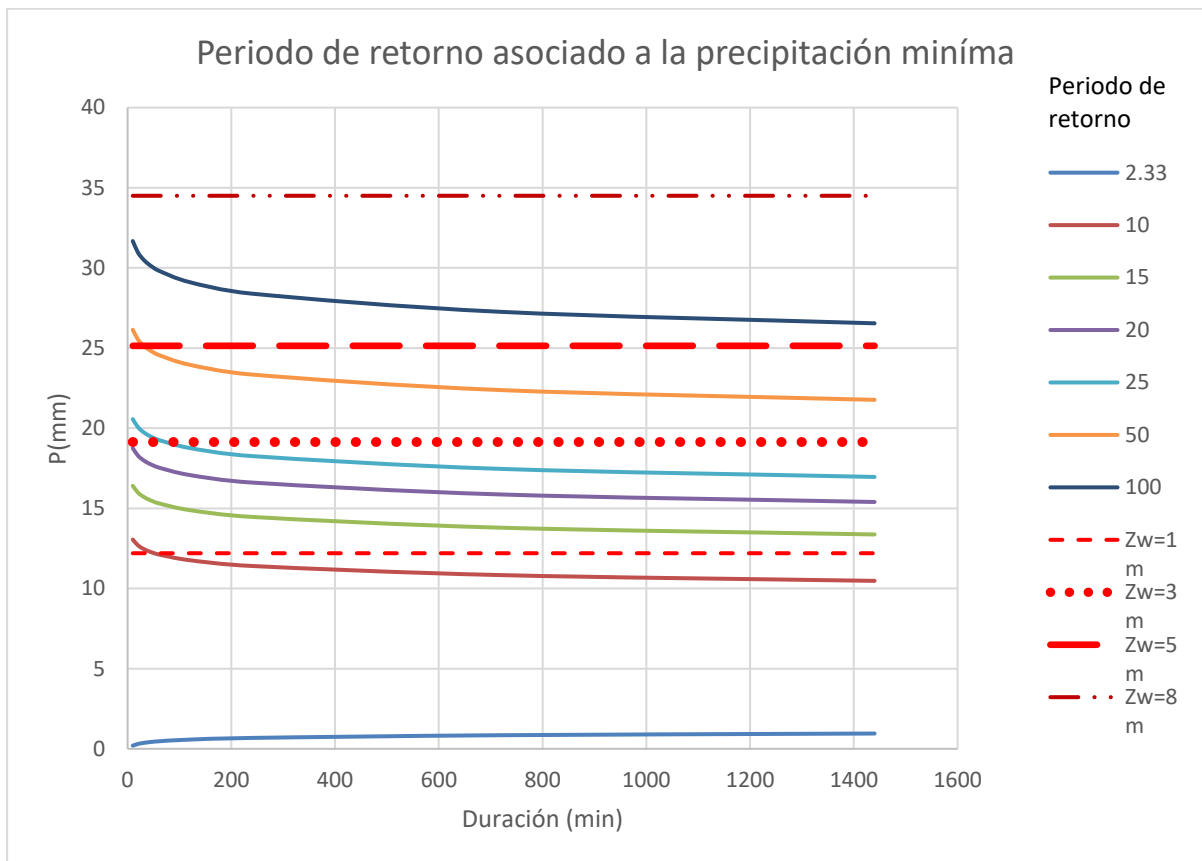


Figura 4 - 19 Periodos de retorno asociados a la Precipitación mínima.

Los valores obtenidos se utilizan en el análisis de estabilidad de la zona geotécnica 4 del presente documento. El valor seleccionado será el de 3 metros de profundidad del frente húmedo que corresponde con un periodo de retorno de 25 años. Aquí se observa un aspecto de gran importancia en la metodología y es poder asociar el avance del frente húmedo con un periodo de retorno, lo cual es esencial para la evaluación de amenazas y determinación de umbrales críticos.

Por otra parte, en las zonas geotécnicas 1, 2 y 3 el mecanismo de falla que rige el sistema es profundo, por lo que su análisis hidrológico varía considerablemente.

Este tipo de deslizamientos se asocia a un ascenso en el nivel freático por lo que requieren de una gran cantidad de agua para alcanzar condiciones detonantes en el suelo, es por esto, que son influenciados por periodos de lluvias previos o acumulados. En tal sentido, el análisis consiste en establecer la variabilidad anual del nivel freático en función de la cantidad de lluvia infiltrada.

Este paso se realiza de la misma forma que fue aplicada en la escala básica, a partir de la teoría planteada por SCS en función del tipo de suelo y humedades antecedentes.

El resultado es la obtención de la precipitación anual (acumulada) para cada uno de los años de registro, posteriormente se determina la media de la precipitación anual multianual y se asume que el nivel freático tiene una variabilidad anual alrededor de la posición promedio igual a la media de la precipitación infiltrable acumulada que para el caso es igual a 1.8 metros (Tabla 4 - 10). Es decir, que el nivel freático puede ascender en este caso 1.8 m respecto al determinado en la exploración de campo.

Análisis de estabilidad detallado

Las características encontradas en toda la etapa de exploración geotécnica, y los resultados de laboratorio, indican que el mecanismo de falla presente en las zonas geotécnicas 1, 2 y 3 es del tipo rotacional (profundo), mientras que para la zona 4 el tipo de movimiento relacionado es superficial. De esta forma y teniendo en cuenta que esta escala asocia la amenaza a una probabilidad de falla, se debe proceder a encontrar la función del comportamiento, que para este caso viene dada por la determinación del factor de seguridad por equilibrio límite.

En el caso de deslizamientos rotacionales se implementó el método de Bishop Simplificado, mientras que para deslizamientos superficiales se trabajó con la ecuación 38 de talud infinito.

$$FS = \frac{c \sec \alpha}{\gamma h \sin \alpha} + \left[\frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} - \frac{\gamma_w h_w}{\gamma h} \sec \alpha \right] \tan \varphi \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde

h_w es igual a 3 metros, para un periodo de retorno aproximado de 25 años. (Obtenido del análisis hidrológico para deslizamientos superficiales)

α varía entre 24 y 32°, h va de entre 3.5 a 2.5 metros, y los parámetros del suelo pueden ser vistos en la

Para la aplicación del método de Bishop Simplificado, se utilizó el software Slide. Los valores de c , φ y γ pueden ser observados en la

, mientras que el nivel freático se ubicó a 1.8 metros por encima de la superficie de falla (con base en lo obtenido con el análisis hidrológico para deslizamientos profundos). Esto resultó en una serie de datos con un universo de muestra de 1000 por cada zona de análisis. Los valores que representaron de mejor forma los posibles mecanismos de falla y los factores de seguridad más bajos, fueron seleccionados y se les definió la media y la desviación estándar (Ver Tabla 4 - 20).

Así, la probabilidad de que el factor de seguridad sea menor que 1,0 se calcula a través del índice de confiabilidad (β) según la ecuación 39:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde Betha (β), se calcula con la ecuación 40.

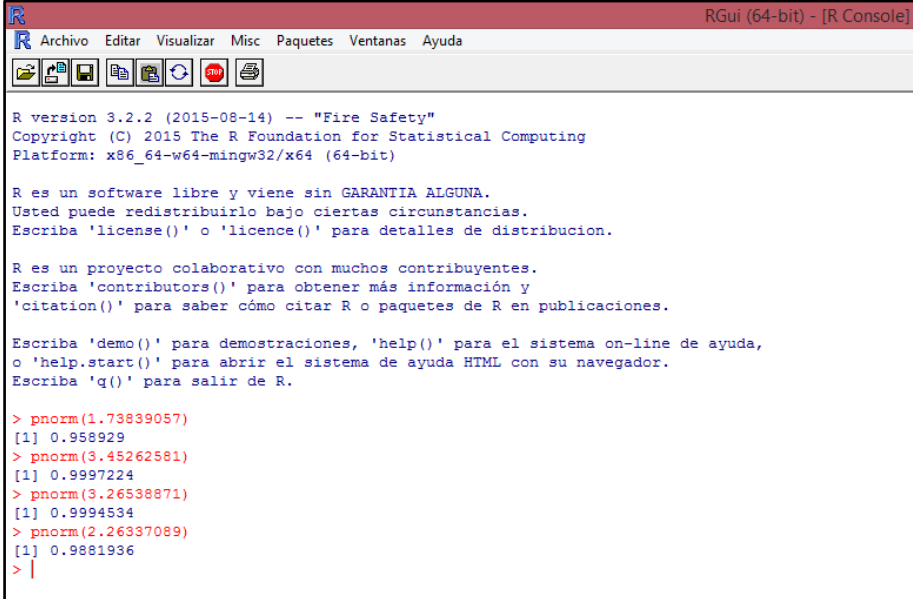
$$\beta = \frac{(\mu_{FS} - 1.0)}{\sigma_{FS}} \dots \text{Ecuación 40}$$

Y las incógnitas son representadas por:

μ_{FS} : Media del factor de seguridad

σ_{FS} : Desviación estándar del Factor de seguridad

Una vez obtenido β , y con ayuda del software libre R Project, se obtuvo la confiabilidad $\Phi(\beta)$, que es la probabilidad de no falla. En este caso se calcula como la función de probabilidad normal estándar para cada valor de betha (β) obtenido en las zonas geotécnicas.



```

R version 3.2.2 (2015-08-14) -- "Fire Safety"
Copyright (C) 2015 The R Foundation for Statistical Computing
Platform: x86_64-w64-mingw32/x64 (64-bit)

R es un software libre y viene sin GARANTIA ALGUNA.
Usted puede redistribuirlo bajo ciertas circunstancias.
Escriba 'license()' o 'licence()' para detalles de distribucion.

R es un proyecto colaborativo con muchos contribuyentes.
Escriba 'contributors()' para obtener más información y
'citation()' para saber cómo citar R o paquetes de R en publicaciones.

Escriba 'demo()' para demostraciones, 'help()' para el sistema on-line de ayuda,
o 'help.start()' para abrir el sistema de ayuda HTML con su navegador.
Escriba 'q()' para salir de R.

> pnorm(1.73839057)
[1] 0.958929
> pnorm(3.45262581)
[1] 0.9997224
> pnorm(3.26538871)
[1] 0.9994534
> pnorm(2.26337089)
[1] 0.9881936
>

```

Figura 4 - 20 Plataforma R Project, utilizada para la definición de $\phi(\beta)$.

De esta forma se obtienen los valores que presenta la Tabla 4 - 20 para cada zona del área objeto de estudio:

Tabla 4 - 20 Datos obtenidos para la determinación de la probabilidad de falla.

DATOS	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4
μ_{FS}	1,79223	2,23216	1,72030	1,66857
σ_{FS}	0,45572	0,35688	0,22059	0,29539
β	1,73839	3,45263	3,26539	2,26337
$\phi(\beta)$	0,95893	0,99972	0,99945	0,98819
P_f	0,04107	0,00028	0,00055	0,01181

La guía establece la clasificación de la amenaza así (Ver Tabla 4 - 21).

Tabla 4 - 21 Criterio para la clasificación de la amenaza en función de la probabilidad anual de falla.

Nivel de Amenaza	Probabilidad anual de falla
Baja	<0,001
Media	0,001-0,16
Alta	<0,16

Continuando con la aplicación de la guía encontramos finalmente que los criterios para la clasificación de la amenaza en función de la probabilidad anual de falla, arrojan como resultados definitivos para cada zona los presentados en la Tabla 4 - 22.

Tabla 4 - 22 Clasificación de la amenaza (Escala Detallada)

ZONA	PROBABILIDAD	NIVEL DE AMENAZA
ZONA 1	0,04107	MEDIA
ZONA 2	0,00028	BAJA
ZONA 3	0,00055	BAJA
ZONA 4	0,01181	MEDIA

4.3 Modelación matemática de la infiltración. (Método Determinístico)

Implementando el mismo procedimiento explicado en el capítulo 3, se realiza un análisis de las afectaciones de la lluvia sobre los deslizamientos en el barrio Villa Julia.

El software requiere de algunos datos de entrada para su parte hidráulica que no se encuentran disponibles por lo que se decide asignarlos mediante información bibliográfica o estimaciones que pueden realizarse con el mismo programa para diferentes materiales. En tal sentido, la conductividad hidráulica quedo definida como:

Relleno $3,36e^{-7}$ m/s (dato de la información secundaria)

Limo $9e^{-8}$ m/s (bibliográfico)

Por otra parte las propiedades geotécnicas son las mismas que se encuentran en la Tabla 4 - 6.

El mayor inconveniente que presenta este tipo de análisis, es que no se cuenta con una metodología o procedimiento claro y preciso que permita conocer los valores de lluvias a ser ingresados para el procesamiento del software. Existe mucha incertidumbre y realmente se cae en el empirismo a la hora de seleccionar los datos de precipitación tratando de aproximarse al problema por el lado seguro, que se traduce en un sobredimensionamiento de la causa.

Para este caso en específico, y al tratarse de materiales que se ven afectados únicamente por precipitaciones antecedentes o prolongadas debido a su conductividad hidráulica, se decide introducir 450 mm de lluvia correspondientes a 30 días de precipitación sacados de los registro reales de la zona.

La tasa de infiltración se aplica de manera constante a lo largo del periodo de análisis, condición irreal pero que se aproxima por el lado seguro a la solución ya que es la forma de precipitación más desfavorable en razón de las propiedades hidráulicas de los materiales presentes.

Posterior al procesamiento de dicha configuración para cada zona de estudio, se presenta un incremento en el nivel freático y se realiza un análisis de estabilidad mediante equilibrio límite implementando la posición final de la tabla de agua luego de suponer una lluvia durante 30 días en la ecuación. (Ver Figura 4 - 21)

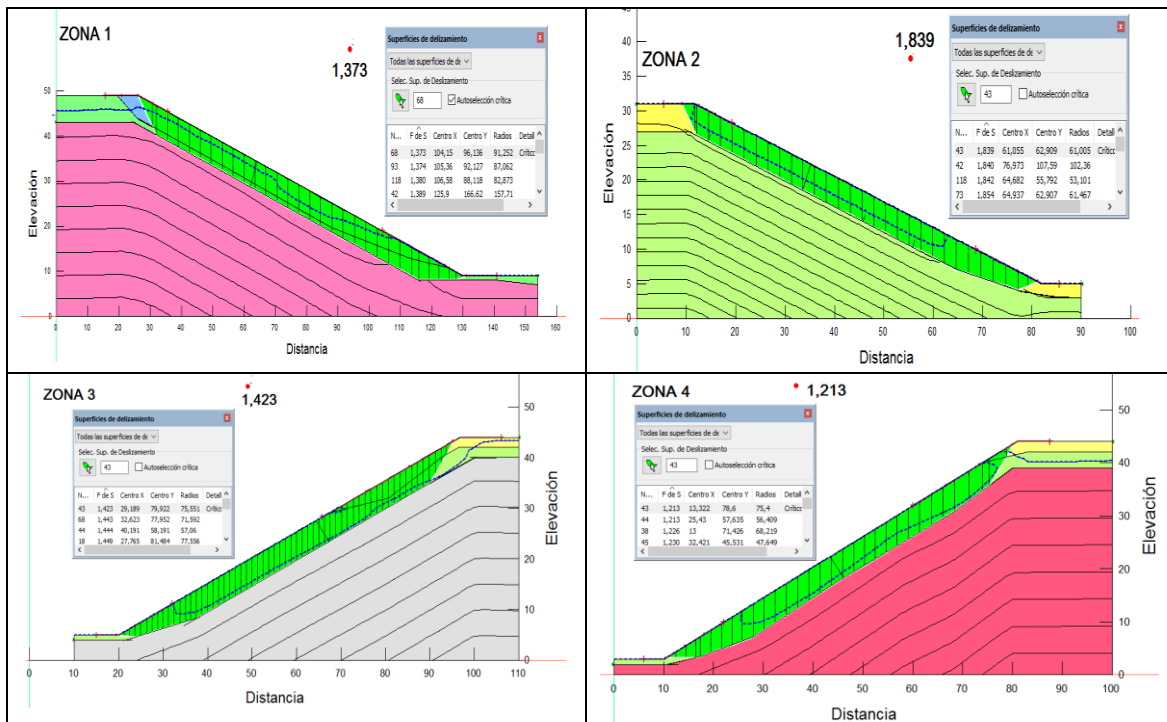


Figura 4 - 21 Análisis de estabilidad para las zonas de Villa Julia

En tal sentido y aplicando los criterios comunes de amenaza se tiene entonces los siguientes resultados:

Tabla 4 - 23 Clasificación de la amenaza con modelación matemática

ZONA	F.S	NIVEL DE AMENAZA
1	1,373	MEDIA
2	1,839	BAJA
3	1,423	MEDIA
4	1,213	MEDIA

4.4 Estimación de la amenaza variando la relación de presión de poros. (Método Determinístico)

A partir de la información secundaria se contó con los resultados de un estudio realizado en la zona para la determinación de la amenaza. Los análisis de estabilidad los realizaron implementando las ecuaciones de equilibrio límite, mientras que el componente hidrológico lo estiman únicamente evaluando 3 condiciones o posiciones de la tabla de agua sin ninguna justificación que permita suponer o predecir que tales condiciones sean alcanzadas.

Las condiciones evaluadas son:

- El nivel freático muy cerca de la base del espesor del suelo en análisis ($R_u=0.1$)
- El nivel freático aproximadamente en la mitad del espesor del suelo en análisis ($R_u=0.3$)
- El nivel freático muy próximo a la superficie, completamente saturado. ($R_u=0.5$)

Al final obtienen 3 resultados diferentes de los cuales escogen uno básicamente apoyados en el criterio de experto, obteniendo las categorías de la Tabla 4 - 24.

Tabla 4 - 24 Clasificación de la amenaza variando el R_u

ZONA	F.S	NIVEL DE AMENAZA
ZONA 1	1,24	MEDIA
ZONA 2	0,94	ALTA
ZONA 3	0,99	ALTA
ZONA 4	1,16	ALTA

4.5 Análisis de resultados

Como se puede observar la estimación de los componentes geológicos, geomorfológicos, cobertura y usos del suelo, entre otros, no varían de gran forma de una metodología a la otra, dirigidos todos a encontrar una caracterización que permita definir las propiedades y comportamiento del suelo. Todos estos son levantados siguiendo un procedimiento bien definido en el cual se trabaja con unidades detalladas, teniendo en consideración un número importante de aspectos que influyen de forma notoria sobre la estabilidad de taludes.

Por otra parte, la hidrogeología puede llegar a presentar mejoras sustanciales, proponiendo que se realicen estudios más a fondo que permitan la localización de la tabla de agua y ayuden a entender el régimen hidrogeológico que influye en la zona, puesto que este dato es supremamente importante dentro del análisis de estabilidad. Sin embargo puede salirse de los alcances de los estudios regionales.

La división del análisis según la escala de trabajo es otro aspecto relevante que mejora la calidad de los resultados. Con base en la modelación tenemos entonces que:

- Los resultados a través de la aplicación de la guía metodológica SGC-UN, están divididos en escala básica y detallada.

La escala básica, forma parte de una aproximación de fácil ejecución. Se basa en el método del Soil Conservation Service (SCS) en su parte hídrica para evaluar la infiltración y en el método de equilibrio límite en su componente geotécnico para evaluar la estabilidad. Requiere de la serie de datos de las estaciones pluviométricas influyentes en la zona de al menos 15 años de registro, de esto va a depender en gran parte la precisión de la variación del nivel freático. Al final de los cálculos de la parte hídrica se obtiene la profundidad del nivel freático asociado a un periodo de retorno de 20 años, este valor se le resta a la profundidad promedio del nivel freático, para conseguir el h_w , que es el valor con el cual se calculó el factor de seguridad.

En la parte geotécnica, no se tienen mayores limitaciones a las que aporta el método de talud infinito como tal, recordando que gran parte de la dificultad o incertidumbre recae sobre la escogencia de los parámetros con los cuales se modela, estos deben ser definidos con base en la exploración de campo directa e indirecta y los ensayos de laboratorio.

La escala detallada, trabaja según los mecanismos de falla asociados a los taludes algo que se presenta con marcada importancia para conocer el efecto de las lluvias sobre los deslizamientos.

Para mecanismos circulares profundos fue necesario aplicar el método de Bishop Simplificado, para el cual se utilizó el software Slide. Mientras que para fallas superficiales del tipo traslacional, se trabajó con talud infinito según la ecuación que plantea la guía.

El análisis de la información hidrológica lo presentan igualmente dividido para deslizamientos superficiales y profundos, apoyándose en las metodologías planteadas por Pradel y Raad (1993) y SCS, respectivamente.

Para deslizamientos superficiales, datos hidrológicos tanto del material (saturación efectiva, cabeza de succión del frente húmedo) como de las precipitaciones son requeridos (curvas IDF o LDF), y su implementación va encaminada a conocer la intensidad mínima constante necesaria para que el suelo alcance la saturación hasta una profundidad determinada. Esta profundidad es la que se toma como dato de entrada para la modelación de la estabilidad, y se asocia a un periodo de retorno.

Para deslizamientos profundos, son requerido datos de los registros de lluvias y de las características de la cobertura del suelo para así determinar un valor de CN en función de las condiciones antecedentes de humedad, de esta manera se intenta establecer la variabilidad anual del nivel freático según la cantidad de lluvia infiltrada.

En lo que se refiere al componente geotécnico, se determinaron los factores de seguridad implementando el valor de aproximadamente 1.8 metros de fluctuación del nivel freático (a partir de la posición media determinada como igual a la profundidad de la superficie de falla), el cual lo aporó la etapa de evaluación del efecto de la lluvia en deslizamientos profundos.

En este caso los factores de seguridad, sirven como funciones del comportamiento que se someten a un procesamiento probabilístico para encontrar el nivel de amenaza, determinando una categoría baja para las zonas 1 y 4 y media para las zonas 2 y 3.

- Con la implementación del software Geoslope, se pudo recrear de manera confiable las afectaciones de la lluvia sobre el área en estudio. Sin embargo, la evaluación del componente hidrológico en este caso, tiene grandes limitaciones en cuanto a la intensidad y periodo de lluvia a aplicar en el análisis. No existe una metodología o procedimiento, que

ayude a establecer de manera confiable los datos de entradas con los cuales trabajar, es por esto que se aplican criterios bastante adversos muchas veces irreales para conocer de manera segura las posibles afectaciones debido a la lluvia, siendo un tema en el cual todavía existe mucho por conocer.

- Por último, los resultados a partir de la información secundaria obtenida se realizan al igual que el estudio anterior por medio de una metodología determinística, no obstante, el análisis del componente hidrológico no cuenta con mayor esfuerzo que el de variar la posición de la tabla de agua, incluyendo la completa saturación del suelo, algo que ni siquiera con condiciones absurdamente desfavorables se alcanzó. Por otra parte, el resultado final se encuentra muy relacionado con el criterio del ingeniero a cargo, ya que decide a partir de la experiencia, que nivel de amenaza colocar con base en los resultados de las tres situaciones diferentes.

La mayor similitud entre los resultados del método combinado y la aplicación del software geoslope, que disminuyen de manera considerable los niveles de amenaza, hacen pensar que es posible que actualmente se esté sobredimensionando las soluciones, diseñando para condiciones que probablemente no puedan ser alcanzadas con la oferta hídrica que tienen las área en estudio. Adicionalmente, se dejan por fuera de análisis muchos factores hidrológicos que es probable que influyan de forma importante sobre la estabilidad del sistema, incluso con mayor repercusión que las lluvias, que como se pudo observar en el capítulo 3, no es tan fácil que tengan consecuencias evidentes sobre la posición del nivel freático.

Los resultados aquí obtenidos no deben ser utilizados para otro fin que no sea académico, muchas de las modelaciones realizadas se llevaron a cabo mediante pendientes supuestas. Además se tiene en cuenta únicamente la acción del agua dentro de la estabilidad por lo que los términos que contienen las afectaciones debido al sismo fueron eliminados al igual que los diferentes escenarios de amenaza. El fin de esta modelación es entonces, la evaluación de las diferencias entre los resultados obtenidos por distintas metodologías y no indican de manera concluyente los niveles de amenaza a los que están expuestos en el área objeto de estudio.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

La inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes es un tema complejo debido a la dificultad de calcular los incrementos críticos de la presión de poros que dan origen a procesos de inestabilidad, las variaciones de la succión en las laderas por infiltración o los cambios en la posición del nivel freático después de la ocurrencia de ciertos eventos de lluvia. Adicionalmente estos procesos son acoplados, es decir los cambios en las presiones de agua generan a su vez cambios en las cargas y cambios en la resistencia de los materiales y en todo el proceso influyen muchas variables que están íntimamente relacionadas, como son la pendiente del terreno, la cobertura, las condiciones estratigráficas, la presencia de discontinuidades, entre otras.

En el trabajo se realizó la consulta de varios estudios que ayudaron a mejorar el entendimiento de las causas que intervienen en los procesos morfodinámicos detonados por lluvias y cómo son evaluadas e integradas con los modelos de estabilidad utilizados actualmente. Se planearon tres etapas de trabajo: la primera consistió en la contextualización y análisis del problema, dirigido a determinar los procesos más influyentes y con mayores limitaciones en la estabilidad del sistema, la segunda fue de clasificación, calificación y análisis de los diferentes estudios y su forma de inclusión de los parámetros hidrológicos en los análisis de estabilidad además de conocer mediante modelación el comportamiento del agua en un talud cuando se presenta un evento de lluvia. Y la tercera consistió en la comparación de los resultados obtenidos aplicando distintas metodologías para una misma zona de estudio.

Con base en todas estas acciones se concluye lo siguiente:

- i. Acerca de las metodologías para la inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes.**
- Dentro de las distintas metodologías se identifican principalmente las siguientes: heurísticas (basadas en la experiencia y conocimiento del experto), determinísticas (basadas en mediciones y modelos cuantitativos), estadísticas (basadas en relaciones de lluvias precedentes y ocurrencia de eventos de inestabilidad) y combinados (que usan dos o más de las metodologías anteriores).
 - Se analizaron un total de 35 estudios representativos, que han sido publicados o que son de común utilización, realizados con diferentes metodologías y en distintos lugares del mundo, en un periodo comprendido entre 1993 y 2015. De estos estudios el 46% usaron métodos estadísticos para la incorporación de los efectos de las lluvias, 31% utilizaron métodos combinados, 20% emplearon métodos determinísticos y el 3% métodos heurísticos.
 - Los métodos heurísticos presentan ventajas principalmente en las etapas preliminares o casos de emergencia donde se requieran tomar decisiones de manera inmediata y pueden generar buenos resultados dependiendo de la experiencia del ingeniero. Por otro lado, carecen de rigurosidad matemática y de objetividad, por lo que su repetitividad es muy baja.
 - Las principales ventajas de los métodos estadísticos se presentan en la sencillez y efectividad de los resultados, además son ampliamente utilizados en sistemas de alerta temprana pues trabajan con los registros de lluvia de cada estación. La mayor limitación que tienen es la disponibilidad de la información de las precipitaciones puesto que en muchos casos no se cuenta con el mínimo de tiempo de registro requerido (15 años), no tienen continuidad o resulta difícil asociar tales lluvias con los procesos de inestabilidad identificados.
 - Los métodos determinísticos tienen como ventajas principales su carácter objetivo, su reproducibilidad y de rigor que permite la aplicación de modelos matemáticos para su solución. En general relacionan el problema principalmente con los cambios en la presión de poros, que es lo que detona el movimiento. Sin embargo, la dificultad en determinar los parámetros de entrada y la inherente variabilidad espacial de estos, se presentan como las mayores limitantes, pues se requiere de instrumentación continua de lluvias, bien sea con estaciones pluviográficas o sistemas de radar, y de las variaciones de presión producidas por tales lluvias, mediante piezómetros o tensiómetros

- Los métodos combinados, son los que presentan una mejor evaluación del componente hidrológico y adicionalmente evalúan el componente geotécnico de manera explícita, ya que en los otros métodos simplemente se tiende a relacionar las precipitaciones con los procesos de inestabilidad observados. Esto representa una buena complementación que permite utilizarlos en sistemas de alerta temprana aportando datos sobre las condiciones y lugares con mayor susceptibilidad a deslizamientos. No obstante, la mayor limitación que presenta es que se requiere de grandes volúmenes de información tanto de lluvias como de los materiales presentes, por lo que en muchas ocasiones es difícil aplicarlos.
- De los métodos analizados se puede concluir que los que intentan satisfacer de mejor forma las incógnitas, y por ende los más convenientes de implementar en los análisis de estabilidad de laderas con inclusión de parámetros hidrológicos, son los métodos combinados, puesto que asocian valores representativos de lluvia al análisis de estabilidad y buscan cantidad de agua antecedente en el talud, la cantidad de agua infiltrada y la profundidad crítica del nivel freático a la cual se desencadena el movimiento.

ii. **Acerca de los parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes.**

- Los parámetros hidrológicos más utilizados son las características de las precipitaciones y las características hidráulicas del suelo. Otros parámetros influyentes como la pendiente o cobertura vegetal son estimados de manera implícita o solo para los análisis de estabilidad, en la mayoría de los casos.
- El brillo solar, la humedad relativa, la temperatura son parámetros que rara vez son considerados en los análisis y existe mucha incertidumbre asociada a qué tan influyentes pueden ser para la determinación de la estabilidad de laderas. Dentro de los 35 estudios analizados tan solo dos tuvieron en cuenta estos parámetros.
- Para los estudios que trabajan con registro de precipitación, lo conveniente es disponer de datos horarios, pero en muchos casos esta información no está disponible o no cumple con la antigüedad o continuidad mínima requerida que se considera de 15 años. De los estudios evaluados el 54% trabajó con información horaria, mientras que el restante (46%) lo hizo con información diaria, la diferencia es poco significativa debido a la dificultad de contar con los datos continuos.

- La influencia de las lluvias antecedentes es difícil de cuantificar y depende de muchos factores y condiciones, incluyendo las geológicas, las hidrogeológicas, las geomorfológicas, climáticas, entre otras. De los 22 estudios que evalúan los registros de precipitación, el 73% considera los efectos de la lluvia antecedente, donde los periodos de estimación más comunes son de 1, 3, 5, 10, 15, 30, y 60 días, existiendo análisis de hasta 180 días, como por ejemplo la metodología planteada por el IDEAM. En todo caso, las metodologías muestran una significativa importancia al análisis de los 30 últimos días, posterior a esto los análisis se reducen considerablemente.
- Cuando se estiman las propiedades hidráulicas del material, los datos generalmente son obtenidos en laboratorio y son representados por ensayos de la curva de retención del suelo (en suelos parcialmente saturados) y coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica (en suelos saturados). El 35% de los estudios analizados en este documento consideraron estos parámetros.
- Existen estudios que trabajan directamente con los datos obtenidos con base en la instrumentación de algunos sectores o taludes específicos, midiendo en tiempo real la presión de poros y el contenido de agua, dichos estudios que hacen parte de los métodos determinísticos son inusuales y representaron el 9% de la totalidad de los estudios analizados.
- Otros parámetros como la cobertura de vegetación, pendientes o morfología, variabilidad espacial de las características y materiales, escala y factor antrópico son evaluados frecuentemente pero de diversas formas y no siempre se consideran como factores que influyen la infiltración o hidrología de la ladera sino que se estiman en los análisis de estabilidad de manera indirecta o como factores contribuyentes mediante parámetros de ponderación. Dentro los 35 estudios analizados, los más frecuentemente evaluados fueron la cobertura de vegetación (74% de los estudios), el factor antrópico (71%), la variabilidad espacial (67%) y los menos considerados fueron el nivel de detalle o escala y la geomorfología con un 57%.
- La cobertura vegetal se evalúa con un amplio rango de métodos que dependen básicamente de las preferencias del autor de cada estudio que se analice. La metodología del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, se presenta como una fácil y rápida alternativa para estimar la influencia de este parámetro en los análisis hidrológicos puesto que posee valores tabulados según

condiciones de humedad antecedente, usos del suelo y características del material que lo conforma para obtener la retención potencial máxima, valor importante para estimar la infiltración.

iii. Acerca de la modelación matemática y comparación de los resultados aplicando distintas metodologías.

Con base en la modelación numérica realizada para evaluar los efectos de la geometría y características hidráulicas de los materiales sobre las afectaciones en la estabilidad debido a las lluvias, se puede observar lo siguiente:

- Para un mismo ángulo de inclinación en un talud, a medida que aumenta la conductividad hidráulica, se requiere de mayor tasa de infiltración para generar un ascenso en el nivel freático, esto se debe, principalmente a la mayor capacidad de almacenamiento y que parte del flujo que ingresa, vuelve a salir de la masa de suelo (existe drenaje).
- El proceso de saturación de un suelo es altamente no lineal pues depende de la variación de la conductividad hidráulica que a su vez es función de la succión del suelo y también depende de la geometría del talud que controla las direcciones de flujo. No obstante, de acuerdo con la modelación se puede correlacionar una mayor tasa de infiltración con el aumento en la pendiente de un talud.
- El tiempo requerido para lograr la saturación del suelo o un aumento importante en la posición de la tabla de agua, disminuye con el aumento de la conductividad.
- Materiales con muy baja conductividad hidráulica (menores a $1e^{-7}$ m/s), compuestos principalmente por arcillas de alta plasticidad, son prácticamente impermeables, por lo tanto, el volumen de agua que ingresa al suelo es bajo y solo se da después de periodos prolongados de lluvia, por lo cual, no se generan fluctuaciones significativas en la posición del nivel freático. Esto implica que las fallas de taludes que usualmente se presentan en periodos lluviosos, deben estar asociadas a infiltración de agua a través de grietas y a reducciones de la succión en los 20 a 50 cm superiores.
- Materiales con valores de conductividad hidráulica entre $1e^{-7}$ y $1e^{-5}$ m/s, representados principalmente por limos y arenas finas, en la mayoría de los casos presentarán un aumento considerable del nivel freático únicamente en

deslizamientos superficiales y debido a lluvias antecedentes de varios días, pues las lluvias intensas pero de corta duración causan muy baja infiltración y por lo tanto, una mínima fluctuación del nivel freático. En este caso, la infiltración también puede producirse a través de grietas en el suelo y generar reducciones de la succión en el caso de materiales limosos. Para deslizamientos profundos, no se descarta la influencia de la lluvia aunque en caso de que exista, esta debe ser analizada por prolongados periodos de lluvia que superen los 30 días antecedentes.

- Taludes conformados por materiales con valores de conductividad hidráulica mayores a $1e^{-5}$ m/s, como son arenas, son sensibles a las lluvias intensas y de corta o moderada duración que generan aumentos rápidos en el nivel freático y aunque los descensos son igualmente rápidos, pueden causar incrementos de carga y reducciones de resistencia que generan falla en los taludes.
- El desfase que se produce en algunas zonas inestables entre la lluvia y la ocurrencia de deslizamientos, se debe principalmente a que en materiales con valores medios de conductividad hidráulica, al cesar la lluvia, se produce una migración hacia abajo del agua ganada en los metros superficiales, lo cual puede generar un ascenso en la tabla de agua en los días posteriores al evento y producir la falla.

A partir de la comparación de los resultados de tres diferentes metodologías aplicadas para una misma zona de estudio, se puede definir que:

- La que presenta mayores niveles de amenaza es la metodología determinística que trabaja variando la relación de presión de poros, esto se debe, a que diseñan para condiciones extremas que si bien se acerca a la solución por el lado seguro, representa situaciones que probablemente no se puedan alcanzar generando la pérdida de recursos por sobredimensionamiento de la solución.
- La modelación numérica, genera una aproximación importante en el estudio de la influencia de las lluvias en la estabilidad de taludes. No obstante, los valores del factor de seguridad resultantes para el caso de estudio, son altamente dependientes de la conductividad hidráulica del material, la posición inicial del nivel freático y existe mucha incertidumbre asociada a los valores de lluvia que deben ser introducidos en la modelación.

-
- La guía metodológica SGC-UN si bien muestra mejoras en el análisis del componente hidrológico e intenta asociar valores representativos de lluvia a las posibles afectaciones en la estabilidad de un talud que va en pro de la reducción de los niveles de amenaza. También presenta muchas suposiciones que no son claramente sustentadas. Adicionalmente, con los avances de los modelos matemáticos que actualmente se tienen por la implementación de softwares de relativamente fácil acceso y buena confiabilidad, este tipo de metodologías no justifican el gasto en recursos.
 - En algunas guías metodológicas como la de los POMCAS se pide analizar las condiciones de estabilidad para nivel freático en superficie, lo cual resulta muy poco probable de que se presente en la realidad a menos que la tabla de agua este muy próxima a la superficie y que tenga una alimentación bien sea través de regímenes subterráneos o un embalse próximo.

5.2 Recomendaciones

- Se debe incrementar el uso de sistemas continuos de medición de tipo radar o estaciones que permitan tener un mayor control de los datos climáticos. Este tipo de sistemas ya están empleándose en Colombia pero su uso aun no es muy extensivo en el campo de la geotecnia por lo cual resulta muy útil hacerlo evidente con análisis metodológicos como el que aquí se presenta.
- Es conveniente realizar modelos de laboratorio y a escala natural con adecuada instrumentación que permitan mejorar el conocimiento respecto a los mecanismos que se generan durante la infiltración y la escorrentía. Para esto se puede usar piezómetros, tensiómetros e instrumentos de medición de deformación y de cargas.
- Estudios posteriores deben ir enfocados en la predicción temporal de los procesos de remoción en masa, este componente se encuentra menos desarrollado que el espacial que presenta menos complejidad en su estimación, pero es supremamente importante para la generación de sistemas de alerta más efectivos.
- El cambio climático está generando periodos más intensos bien sea de sequía o de lluvia, los cuales pueden llegar a alterar los periodos de retorno

que se definen a través de las series de datos antiguos, se recomienda investigar este tema para lograr estimar los valores extremos que puedan presentarse por fuera de las series históricas.

- Investigaciones futuras, deben ir enfocadas en los aspectos que presentan mayor incertidumbre en el análisis, tales como la influencia real de la vegetación, las características morfométricas del talud, el efecto de las grietas en el suelo, la resistencia que aporta el enraizamiento y la estimación de las condiciones iniciales de humedad.
- Es conveniente realizar estudios en zonas instrumentadas donde se puedan medir las variables hidrológicas directamente.

Bibliografía

Abid. A, Jinsong. H, Lyaming. A.V, Sloan. S.W, Cassidy. M.J., 2014. Boundary effects of rainfall – induced landslides. *Computers and Geotechnics* 61. Pp 341–354

Aleotti, P. 2004. A warning system for rainfall – induced shallow failures. *Engineering Geology* 73, 247-265

Alonso E.E., Gens A. y Josa A., (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*. 40, pp. 405-430.

Álvarez-Mozos, J. Casalí, J. González-Audícana, M y López, J.J. 2005. Estimación de la humedad superficial del suelo mediante teledetección radar en presencia de una cubierta de cereal. Universidad Pública de Navarra, Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural, Los Tejos, Arrosadia s/n, 31006 Pamplona.

Alzate, B.A, Cifuentes, C.L.D, Toro, V.N.M. 2012. Relación entre comportamiento de algunas variables climatológicas y la susceptibilidad de ocurrencia de eventos catastróficos (deslizamientos), en el perímetro urbano del municipio de Pereira, periodo 1964-2004. *Espíritu Ingenieril*, V1. Pp 70-80.

Aparicio, F. 1989. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Editorial Limusa. Grupo Noriega Editores. ISBN 968-18-3014-8

Arango, G.J.D. 2000. Relaciones lluvias - deslizamientos y zonificación geotécnica en la comuna dos de la ciudad de Manizales. Monografía, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Aristizábal. E, González. T, Montoya. J.D, Vélez. J.I, Martínez. H, Guerra. A. 2011. Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia. *Revista EIA*, ISSN 1794-1237 Número 15, p. 95-111

Aristizábal, E, Gamboa, M.F, Leoz, F.J. 2010. Sistema de alerta temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia para El Valle de Aburrá, Colombia. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 13, p. 155-169.

Aristizábal, E, Martínez, H, Vélez, J. I. Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. 2010. Revista académica colombiana de ciencia. Volumen XXXIV. 209-227.

Ávila, G, Cubillos, C, Granados, A, Medina, E, Rodríguez, E, Rodríguez, C, Ruiz, G. 2015. Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. ISBN: 978-958-99528-5-6. Imprenta Nacional de Colombia.

Berrio, J.F, Et al. 2004. Relación lluvias – aguas subterráneas – deslizamientos en Fredonia, Antioquia, Colombia. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil.

Bordoni, M. Meisina, C. Valentino, R. Lu, N. Bittelli, M. Chersich, S. 2015. Hydrological factors affecting rainfall-induced shallow landslides: from the field monitoring to a simplified slope stability analysis. Engineering Geology 193. pp 19–37.

Bransford y Stein, (1984). The Ideal Problem Solver. W.H.Freeman & Co Ltd. ISBN-10: 0716716690.

Breña A., Jacobo M. (2006) Principios y Fundamentos de la Hidrología superficial. Proyecto especial. Universidad Autónoma Metropolitana. México.

Brunetti, M; Peruccacci, S; Rossi, M; Luciani, S; Valigi, D; Guzetti, F. 2010. Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy.

Cahuana, A. y Morales, W. 2009. Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233. Universidad Mayor de San Simón. Bolivia.

Canales, C. 2011. Cálculo de umbrales para la ciudad de Tegucigalpa. Proyecto Fondo de Adaptación. Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Instituto Hondureño de Ciencias de la tierra. Convenio SERNA/UNAH.

Carvajal, J. H. (2012). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Castellanos, R. 1996. Lluvias críticas en la evaluación de amenaza de eventos de remoción en masa. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Cho, S. 2014. Probabilistic stability analysis of rainfall-induced landslides considering spatial variability of permeability. *Engineering Geology* 171. Pp 11–20

Cho, S. 2009. Infiltracion analysis to evaluate the superficial stability of two-layered slopes considering rainfall characteristics. *Engineering Geology* 105. Pp 32–43

Chow, V, Maidment, D, Mays, L. 1994. *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill Interamericana S.A. Santa fe de Bogotá, Colombia. ISBN958-600-171-7.

Chen, H. Lee C.F. 2003. A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes. *Geomorphology* 51. pp 269–288.

CORPOCALDAS, 2001. Estudio Geológico – Geotécnico Barrio Villa Julia. Manizales.

Copping, N, J y Richards, I,G. 1990. *Use of vegetation in civil engineering*. Ciria. Cambridge. Inglaterra.

Cruz, P.J.L y Muñoz R,L,F. 2002. Investigación de la resistencia de los sistemas radicales como elementos estructurales para el reforzamiento del suelo. Trabajo de grado modalidad proyecto de investigación para optar al título de ingeniero. Universidad Nacional de Colombia, Manizales.

Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). *Hidrología subterránea*. Ed. Omega. 2 vol. Barcelona.

Dearman, W.R., (1991), *Engineering Geological Mapping*. Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, U.K.

Díaz-Granados M; Deeb Páez, A. 1988; Balance hídrico en la cuenca media del río Magdalena, modelación de la interacción río, acuífero, suelo, vegetación y atmósfera; Vol 2; XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica; La Habana; Cuba.

Díaz-Granados, M; Puente A, X. (2006). Estimación de curvas Intensidad –Duración - Frecuencia a partir de información pluviométrica. XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología.

Espitia, D. 2009. Análisis y modelación de la influencia mecánica de la vegetación en la estabilidad de taludes. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Fredlund, D.G. (1995). The relationship of the unsaturated soil shear strength functions to the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, Vol. 32.

Gariano, S.L, Brunetti, M.T, Lovine, G, Melillo, M, Peruccacci, S, Terranova, O, Vennari, C, Guzzetti, F., 2014. Calibration and validation of rainfall thresholds for shallow landslide forecasting in Sicily, southern Italy. *Journal Geomorphology* 228. 653–665

Georgakakos, K.P., and O.W. Baumer,. 1996. Measurement and analysis of on-site soil moisture data, *Journal of Hydrology*.

Gonzalez De Vallejo, L. 2002. *Ingeniería Geológica*. Editorial Pearson. ISBN: 9788420531045

Graciano, S. 2015. Estimación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en las microcuencas de los corregimientos de Villa Restrepo y juntas de la cuenca Combeima Ibagué – Tolima. Trabajo de Grado. Universidad del Tolima.

Greis, N; Wood, E. 1983. Correction to “Regional Flood Frequency Estimation and Network Desing”. *Water resources research*. Vol.19, No. 2, Pp. 589-590.

Guzzetti, F, Peruccacci, S., Rossi, M, Colin P.S. 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides* 5. Pp 3-17.

Hong-Quiang, D, Tong-Chun, H, Xiao-Nan, G, Zhang, J. 2014. Probabilistic slope stability analysis considering the variability of hydraulic conductivity under rainfall infiltration-redistribution conditions. *Engineering Geology* 183. pp 1–13.

INGEOMINAS. (2002). *Geología de las planchas 205 Manizales y 225 Nevado del Ruiz*, memoria explicativa.

INVIAS. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. Pp 2-70, 2-71, 2-72.

Jaehong Kim, Sang Seom J, Seongwan Park, Jitendra Sharma. 2004. Influence of rainfall – induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. *Engineering Geology* 75. Pp 251–262

JAM Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S. 2015. Elaborar el estudio geológico-geotécnico e hidráulico, la zonificación geotécnica, y los diseños de las obras de estabilidad de taludes, manejo de aguas lluvias y control de cauces en El Barrio Villa Julia, Municipio de Manizales.

Keh-Jian, S, Chic-Ming, Y, 2015. Predictive analysis of landslides susceptibility under climate change conditions. A study on the Chingshui river watershed of Taiwan. *Engineering Geology* 192. pp 46–62.

Kuriakose, A., Livia, B. and Bachofen, C. (2009). Assessing vulnerability and adaptive capacity to climate risks: Methods for investigation at local and national levels. Washington DC, World Bank.

Larsen, M.C y Simon, A., (1993). A rainfall intensity - duration threshold for landslides in a humid - tropical environment, Puerto Rico. *Geografiska Annaler*, 75A. pp 13-23.

Lee, Chyi – Tyi. 2014. Multi-stage Statistical Landslide Hazard Analysis: Rain-Induce Landslides. *Landslide Science for a safer Geoenvironment*, Vol.3. pp 291-298.

Lembo-Fazio, A. Ribacchi, R, Grandori, R. 1990 Excavation of the ridracoli hydraulic tunnels using a double-shield TBM. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Volume 23, Issue 3, Pp .141-165

Mayorga, R. 2003. Desarrollo de una metodología para la determinación de lluvias detonantes de deslizamientos. Estudio de caso. *Meteorología Colombiana* N7. Pp.73-80. ISSN 0124-6984

Montero Olarte, J. 2005. Movimientos en masa en la región Andina. *Memorias III curso latinoamericano de Movimiento en Masa*. P. 13-16.

Moreno. H.A, Velez. M.V, Montoya, J.D, Remberto. L.R. 2006. La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, ISSN 1794-1237 Número 5. P. 59-69.

Muñoz-Carpena R y Gowdish L. 2005. Aplicación del método de infiltración de Green-Ampt con redistribución de humedad del suelo entre encharcamientos. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* Vol.VII. Pp 205-213.

Naranjo, J. L., y Ríos, H. (1989). Geología Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. *Universidad de Caldas*, 10(1-3), 1-113.

Ojeda, C. 2003. Criterios de selección y diseño de la parte vegetativa en obras de bioingeniería para el control de erosión y estabilización de taludes. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Olivella S., Gens A., Carrera J. and Alonso E.E. (1996). Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGTH) for the coupled analysis of saline media. *Int. Journal Engineering Computations*, 13 (7): 87 - 112.

Park J.H., Lee H.J, Woo. I. 2013. Assessment of rainfall - induced shallow landslide susceptibility using a GIS - based probabilistic approach. *Engineering Geology* 161. P 1–15

Peruccacci, S; Brunetti, M; Luciani, S; Calzolari, M; Bartolini, D; Guzzetti, F., 2014. Topographic and pedological thresholds for the prediction of shallow landslides in Central Italy. *Landslide Science for a safer Geoenvironment*, Vol.3. pp 291-298.pp 299-304. *Journal Geomorphology*.

Peruccacci, S; Brunetti, M; Luciani, S; Vennari, C; Guzzetti, F. 2011. Lithological and seasonal control on rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in Central Italy. *Natural Hazards and Earth Shystem Sciences* 10, 447-458.

Pimienta, J. 1980. La captación de aguas subterráneas. Barcelona, España. Editores Técnicos Asociados S.A. ISBN 84-7146-186-2.

Pizarro, R.; Pizarro, J.P.; Sangüesa, C.; Martínez, E. (2003): Módulo 2: Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia. Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos LTDA.

Rodríguez-Iturbe (2000). *Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics*. Vol. 36.

Sabogal, R. 2005. Influencia de la vegetación en la estabilidad de taludes. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Sánchez. L.R, Mayorga. M.R, Urrego. L.F, Vargas. C.G. 2002. Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamiento en tiempo real. Simposio Latinoamericano de Control de Erosión.

Santoso. A, Phoon. K, Quek. S. 2011. Effects of soil spatial variability on rainfall-induced landslides. *Computers and Structures* 89. pp 893–900.

Segoni. S, Rossi. G, Rosi. A, Catani. F. 2013. Landslides triggered by rainfall: a semi-automated procedure to define consistent intensity-duration thresholds. *Computers & Geosciences* 63. Pp 123–131.

Servicio Geológico Colombiano, 2015. Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Pp 13-77

Suarez, J., 1998, Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales-Capítulo 7. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Ingeniería de Suelos Ltda. Colombia

Tarback, E, Lutgens, F. 2005. Ciencias de la Tierra 8 Edición – Una Introducción a la Geología Física. Madrid, España. Pearson Educacion S.A. ISBN 978-84-832-2690-2.

Tarolli, P. Borga, M. Tsung Chan, K. Chiang, C. 2011. Modeling shallow landsliding susceptibility by incorporating heavy rainfall statistical properties. *Geomorphology* 133. pp 199–211.

Terlien. M.T.J. 1998. The determination of statistical and deterministic hydrological landslide - triggering thresholds. *Environmental Geology*, V.32. P 124-130.

Troch, P.A., Paniconi, C. and Emiel van Loon, E. (2003). Hillslope-storage boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1. formulation and characteristic response. *Water Resources Research* 39: doi: 10.1029/2002wr001728. issn: 0043-1397.

Tsaparas. I, Rahardjo. H, Toll. D.G, Leong. E.C. 2001. Controlling parameters for rainfall-induced landslide. *Computers and Geotechnics*, Volume 29, Pp 1–27.

Tu, X.B. Kwong, A.K.L. Dai, F.C. Tham, L.G. Min, H. 2009. Field monitoring of rainfall infiltrations in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslide. *Engineering Geology* 105. pp 134–150.

Van Westen. C.J, Terlien. M.T.J. 1996. An approach towards deterministic landslide hazard analysis in G.I.S a case study from Manizales. Colombia. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol 21. P. 853-868.

Vélez, M. 1999. *Hidráulica de aguas subterráneas*. 2da Edición. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Colombia.

Villarraga, C. Ruiz, D. Vaunat, J. Casini, F., 2014. Modelling landslides induced by rainfall: a coupled approach. *Procedia Earth and Planetary Science* 9. pp 222 – 228.

Wang, G. Sassa, K. 2003. Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content. *Engineering Geology* 69. pp 109–125.