
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y PROBABILIDAD DE FALLA DE DOS TALUDES DE SUELO TROPICAL EN LA AUTOPISTA MEDELLÍN – BOGOTÁ EN EL TRAMO DE VÍA ENTRE MARINILLA Y SANTUARIO.

ANALYSIS AND PROBABILITY OF FAILURE OF TWO TROPICAL SOIL SLOPE OF HIGHWAY MEDELLIN - BOGOTA IN THE STRETCH OF ROAD BETWEEN MARINILLA AND SANTUARIO.

Luis Javier Escobar Toro¹ & Yamile Valencia González²

1. Magister en Ingeniería – Geotecnia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

*2. Doctora en Geotecnia, Profesora Asociada, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
ljescoabar@gmail.com*

Recibido para evaluación: 4 de Noviembre de 2011 / Aceptación: 10 de Mayo de 2012 / Recibida versión final: 10 de Junio de 2012

RESUMEN

En la práctica de la ingeniería, es común definir la estabilidad de un talud en términos de un Factor de Seguridad (F.S.), obtenido de un análisis matemático determinístico; cuyos modelos, deben tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad, como son la geometría del talud, parámetros geológicos, cargas dinámicas por efecto de los sismos, flujos de agua, propiedades de los suelos, etc. Es por esto, que el presente estudio evalúa la estabilidad para diferentes inclinaciones, de dos taludes de suelos de origen tropical, ubicados en el km 41+500 y km 49+200 de la autopista Medellín – Bogotá del tramo de vía entre Marinilla y Santuario, aplicando métodos probabilísticos, que estiman no solo el Factor de seguridad, si no la probabilidad de falla, el índice de confianza y el parámetro del suelo de mayor peso en la estabilidad; con el fin de determinar el talud de corte más seguro en la ejecución de este tramo de vía.

PALABRAS CLAVES: Suelos Tropicales, Probabilidad de falla, Análisis de Estabilidad, Municipio de Marinilla (Antioquia, Colombia), Municipio del Santuario (Antioquia, Colombia)

ABSTRACT

In practice, it is common to define the slope stability in terms of a safety factor (S.F.), obtained from a deterministic mathematical analysis of stability; whose models must take into account the factors that affect the stability such as the geometry of the slope, geological parameters, the effect of dynamic loads of earthquakes, water flows, soil properties, etc. This is why the present study evaluates the stability for different inclinations of two soil slopes of tropical origin, located at km 41 +500 and km 49 +200 of the Medellin - Bogotá highway, between Marinilla and Santuario, by applying probabilistic methods to estimate not only the safety factor, but the probability of failure, the reliability index and the most influential soil parameter on the stability, in order to determine the more safe slope in the execution of this section of the road.

PALABRAS CLAVES: Suelos Tropicales, Probabilidad de falla, Análisis de Estabilidad, Municipio de Marinilla (Antioquia, Colombia), Municipio del Santuario (Antioquia, Colombia)

1. INTRODUCCIÓN

Con el fin de encontrar solución a problemas geotécnicos, se vienen adelantando estudios e investigaciones acerca de las propiedades de los suelos tropicales en los últimos años en el país y a nivel mundial. Estos estudios, han permitido caracterizar de una mejor manera los suelos en regiones tropicales (aquellos que se localizan entre los paralelos

30°N y 30°S de latitud), como una alternativa a la teoría clásica de caracterización y evaluación de suelos, generada para materiales de otras latitudes. Colombia está ubicada en una región tropical, por tal motivo presenta suelos con características geotécnicas diferentes a las de suelos de regiones templadas, que torna importante su estudio más fondo. Es por esto, que el presente trabajo brinda un concepto adicional en el análisis de la estabilidad de dos taludes de suelos de origen tropical, ubicados en el km 41+500 y km 49+200 de la autopista Medellín – Bogotá del tramo de vía entre los Municipios de Marinilla y Santuario, aplicando métodos probabilísticos y no solo determinísticos, que permitan obtener el factor de seguridad y adicionalmente la probabilidad de falla, el índice de confianza y el parámetro del suelo de mayor peso en la estabilidad; con el fin de determinar el talud de corte más seguro en la ejecución de este tramo de vía.

2. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se ubica entre el Municipio de Marinilla y el Municipio de Santuario al oriente del Departamento de Antioquia y en la parte norte de la Cordillera Central de los Andes colombianos. Las áreas de muestreo se encuentran en las coordenadas 6°10'07"N y 75°19'56"W y a unos 2090 m sobre el nivel del mar (km 41+500) y en las coordenadas 6°8'14"N y 75°16.55'3"W y a unos 2124 m sobre el nivel del mar (km 49+200).

En el marco geológico el principal cuerpo ígneo es de tipo intrusivo. Este cuerpo se denomina Batolito Antioqueño, aflora en la parte axial de la Cordillera Central y cubre un área de 7.800 km², sin incluir los cuerpos satélites separados del cuerpo principal por rocas metamórficas. Presenta una homogeneidad litológica marcada y profundos perfiles de meteorización que oscilan entre 10m y 50m. Su desintegración origina suelos arenosos con algunos limos y afloramientos de cuarzdiorita, granodiorita y una mineralogía compuesta por plagioclasa, cuarzo, biotita y hornblenda. En la zona de estudio se encuentran depósitos de ceniza volcánica que cubren los suelos residuales, con espesores que varían entre 1m y 2m, y que al meteorizarse produce los denominados Andosoles del Oriente Antioqueño (González, 2000)

En el área de estudio se diferencian las siguientes unidades geomorfológicas: Unidad I – Depósitos aluviales. La Unidad II – Depósitos de Vertientes (enunciada en el informe pero no corresponde al área de estudio de este artículo). Unidad III – Vertientes sobre roca “in situ”. (Vertientes sobre rocas del Batolito Antioqueño). Unidad IV – Altiplanos. (Devimed, 1997)

La temperatura media anual para la zona es de 17.1°C y precipitaciones que oscilan entre 1.800 y 2.800 mm anuales. Se presentan cuatro períodos climáticos: dos lluviosos de Abril a Mayo y de Agosto a Noviembre, y dos de verano, uno corto entre Junio y Julio y otro más prolongado entre Diciembre y Marzo. La humedad relativa en promedio es de 80%. Los vientos tienen dirección Este, con promedios en velocidad de 1.7 km/seg. (Duquer, 1999).

Las muestras para la determinación de los diferentes parámetros geotécnicos, fueron colectadas en el horizonte residual a una profundidad con relación a la superficie del terreno de 15 m por debajo de la capa orgánica. La selección de cada sitio y horizonte de suelo a estudiar obedeció a que visiblemente presentaran características de avanzado estado de meteorización, facilidad de acceso y principalmente, a que en cada uno de ellos se originan suelos provenientes de rocas representativas de la región.

3. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS MATERIALES DE ESTUDIO

Las muestras de suelo de los km 41+500 (Marinilla) y km 49+200 (Santuario) fueron sometidas a diferentes ensayos que permiten la caracterización física, química, mineralógica y mecánica de los materiales. Los resultados son presentados en las Tablas 1 a 4.

Tabla 1. Principales características físicas de los suelos

CARACTERÍSTICA	km 41+500	km 49+200
Clasificación AASHTO	A-2-4	A-4
Clasificación USC	SM	SM
Clasificación MCT Expedita (Nogami, J.S. & Villibor, D.F., 1995)	NS'-NA'	NS'-NA'
Límite líquido	38%	38%
Límite plástico	36%	37%
Índice de plasticidad	2%	1%
% pasa 200	25%	382%
Gs: Gravedad específica de los sólidos	2,8	2,75
g_{nat} : Peso unitario húmedo de los suelos	13,3 kN/m ³	16,13 kN/m ³
e: Relación de vacíos	1,4	1,02
n: Porosidad	58,3%	50,5%
w _n : Humedad natural	19%	24%
S: saturación	37%	66%
Ia: Índice de actividad	0.015	0.010
Densidad aparente INV-E222	2,49	2,48
Densidad aparente sss INV-E222	2,54	2,53
Densidad nominal INV-E222	2,62	2,62
Absorción	2,01%	2,08%
Peso Unitario Suelto	10,4 kN/m ³	11,8 kN/m ³
Peso Unitario Compacto	12,2 kN/m ³	13,5 kN/m ³
Densidad máxima Proctor modificado	16,12 kN/m ³	17,32 kN/m ³
Humedad óptima Proctor modificado	18%	14%
Densidad aparente INV-E128	2,61	2,61
Humedad de equilibrio	21%	17%
CBR para el 90% de la densidad seca	1,7%	4,0%
CBR para el 95% de la densidad seca	1,3%	4,0%

Tabla 2. Principales características químicas de los suelos

PARÁMETRO	km 41+500	km 49+200
Materia Orgánica	0.2 %	0.18 %
pH en Agua	5.5	5.0
Fósforo (P)	45 ppm	4 ppm
Aluminio (Al)	1 (meq / 100 g de suelo)	4,3 (meq / 100 g de suelo)
Calcio (Ca)	0.7 (meq / 100 g de suelo)	0.2 (meq / 100 g de suelo)
Magnesio (Mg)	1.9 (meq / 100 g de suelo)	0.1 (meq / 100 g de suelo)
Potasio (K)	0.36 (meq / 100 g de suelo)	0.05 (meq / 100 g de suelo)
CICE	4	4.7

Tabla 3. Composición mineralógica de los suelos

MINERAL	km 41+500	km 49+200
Cuarzo	36%	12%
Caolinita	35%	32%
Moscovita-1M, magnésiana	29%	16%
Ilita	-	39%
Hematita (Como óxido de hierro)	-	1%

Tabla 4. Algunas características mecánicas de los suelos, a partir de ensayos de corte directo (CU)

PARÁMETRO	Km 41+500	Km 49+200
Estado Natural		
γ (kN/m ³)	13.3	16.1
Cohesión (kPa)	19	20
Angulo de fricción (°)	29	34
Estado Saturado		
γ (kN/m ³)	13.6	16.4
Cohesión (kPa)	8	7
Angulo de fricción (°)	28	35

3.1. Curva característica o de retención de agua de los suelos

Dentro de los ensayos específicos para la caracterización de suelos tropicales se encuentra la definición de la curva de retención de agua. En las Figuras 1 y 2 se presentan estas curvas para la muestra del km 41+500 y para la muestra del km 49+200, respectivamente.

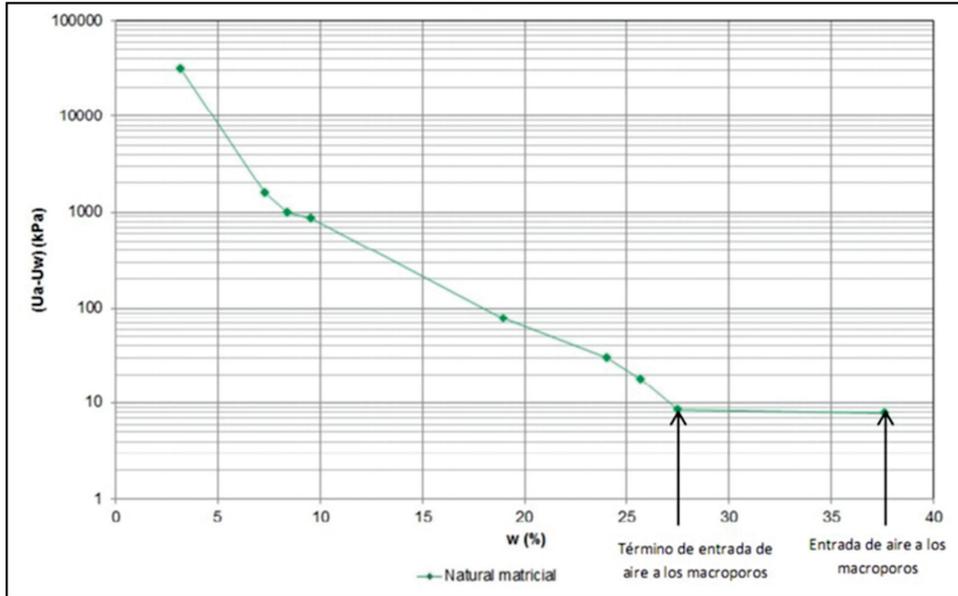


Figura 1. Curva característica o de retención de agua del km 41+500

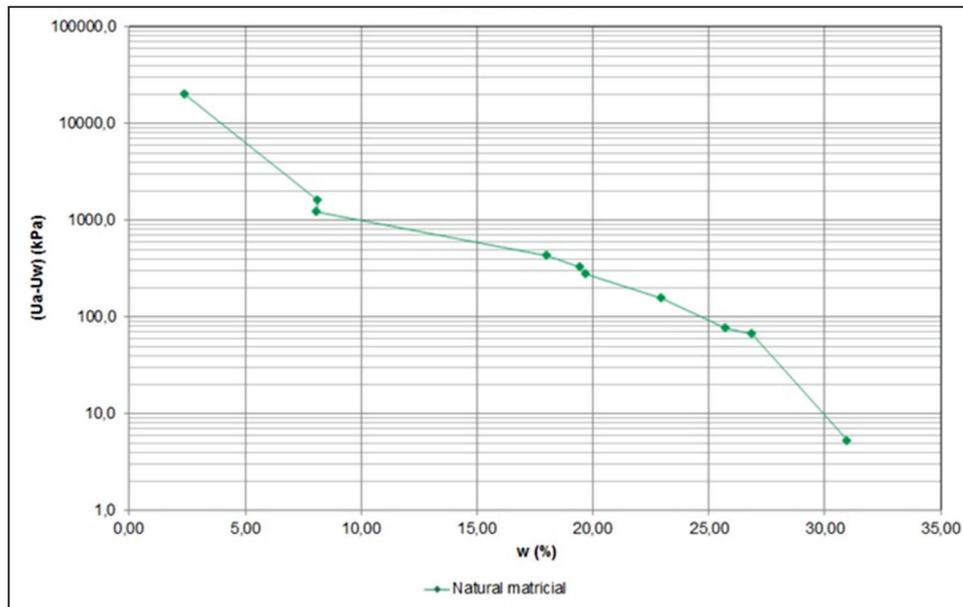


Figura 2. Curva característica o de retención de agua del km 49+200

Para el caso de la muestra del km 41+500, desde la entrada de aire en los macroporos hasta el final de la entrada de aire en los macroporos, se observa que la succión varía poco, lo cual tendrá, por consecuencia, poca influencia en

el comportamiento mecánico. Para valores de humedad menores al punto final del término de entrada de aire en los macroporos, las variaciones en la succión son importantes, con reflejo directo en el comportamiento mecánico.

En la muestra del km 49+200, la forma de la curva indica un suelo con variación gradual de poros, esto indica que variaciones en la humedad general cambios importantes en la succión y por consiguiente efectos significativos en la resistencia.

4. MÉTODOS DE ESTABILIDAD USADOS

4.1 Métodos de análisis para estabilidad de taludes

Existen en el medio, diferentes métodos de análisis para determinar la estabilidad de taludes. Los más comunes son:

- Método del círculo de rotura
- Método de dovelas

Métodos aproximados:

Método ordinario o de Fellenius

Método simplificado de Bishop

Método simplificado de Janbú

Métodos Precisos:

Método de Morgenstern - Price

Método de Spencer

Método de Sarma

- Soluciones basadas en ábacos

En casi todos los métodos que son de carácter determinístico, la seguridad de un talud se cuantifica por medio del Factor de Seguridad (F.S.), que se define como el coeficiente entre la resistencia al corte en la superficie de deslizamiento y la necesaria para mantener el equilibrio estricto, el cual se supone constante en toda la superficie de deslizamiento (Alzate, 2005).

Para este trabajo sólo se tendrá en cuenta el método de Bishop Simplificado, método comúnmente usado y que es trabajado en el programa “Slide”, utilizado para el análisis de estabilidad de los sitios estudiados.

4.2. Métodos probabilístico

Los métodos probabilísticos son métodos que permiten determinar la distribución de probabilidad de una variable dependiente en función del conocimiento de las distribuciones estadísticas de las variables independientes las cuales generan la variable dependiente. En el caso del factor de seguridad de la estabilidad de un talud, se determina su curva de distribución de probabilidad a partir del conocimiento de las distribuciones estadísticas de las variables de cohesión, ángulo de fricción, peso específico, etc. A partir de esta distribución se puede determinar la probabilidad de ruptura (P_r), definida como la parte del área bajo la curva de distribución de probabilidad del F.S. menor que 1,0. Existen varios métodos para determinar la distribución de probabilidad de una variable dependiente, entre ellos se encuentra el método FOSM (“First-order, second moment”), (Valencia et al., 2005).

4.2.1. Métodos probabilístico FOSM

Según Maia & Assis, (2004), citados por Valencia et al. (2005), este método probabilístico se desarrolla a partir de la expansión de la serie de Taylor, siendo las variables independientes y los resultados de la variable dependiente expresadas por sus valores medios y desviaciones estándar.

La expansión de la serie de Taylor de una función de dos variables $F(x,y)$ en los puntos medios \bar{x} e \bar{y} y con solamente los términos de primer orden, está dado por:

$$F(x, y) = F(\bar{x}, \bar{y}) + \frac{\partial F}{\partial x}(x - \bar{x}) + \frac{\partial F}{\partial y}(y - \bar{y})$$

Donde todas las derivadas se estiman para los puntos medios ($x = \bar{x}$ e $y = \bar{y}$)

Tomando \bar{x} e \bar{y} como los valores esperados medios de las variables y aplicando la fórmula para distribuciones binarias se tiene:

$$E[F(x, y)] = F(\bar{x}, \bar{y})$$

$$V[F(x, y)] = \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 V(x) + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 V(y) + 2\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial F}{\partial y}\right) \text{cov}(x, y)$$

Para N variables aleatorias no correlacionadas, $F(x_1, x_2, \dots, x_N)$, conservando solo los términos lineales de la serie de Taylor, se tiene:

$$E[F] = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N)$$

$$V[F] = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)^2 V(x_i)$$

4.2.2 Método de índice de confianza

Este método es una aplicación directa del método FOSM que ha sido ampliamente aplicado en geotecnia, especialmente en la evaluación estadística de los factores de seguridad de los taludes. Los procedimientos sugeridos de aplicación se mencionan a continuación (Assis, 2002):

- Varianza del factor de seguridad, $V [FS]$, calculada a través de la fórmula de primer orden y segundo momento (FOSM). El cálculo consiste en obtener la varianza del factor de seguridad debido al incremento de cada uno de los parámetros (γ , c , ϕ , posición del nivel freático, etc.) que intervienen en el cálculo del factor de seguridad. La evaluación de estas variaciones proporciona la importancia relativa para cada uno de los parámetros que intervienen en las propuestas de diseño;
- El índice de confiabilidad, β , del factor de seguridad, que se define a partir de la siguiente expresión, teniendo en cuenta que el factor de seguridad crítico es igual a 1,0:

$$\beta = \frac{\{E[FS] - 1\}}{\sigma[FS]}$$

Donde:

- $E[FS]$ es el valor usual (determinístico), del factor de seguridad calculado con los parámetros medios;
- $s[FS]$ es la desviación estándar del factor de seguridad

El método relaciona el índice β con la probabilidad de ruptura, lo que permite una evaluación más coherente de la estabilidad.

La probabilidad de ruptura, viene dada por la porción del área bajo la curva unitaria de la distribución de frecuencia, correspondientes a los valores del factor de seguridad por debajo de 1,0. La Figura 3 ilustra dos situaciones hipotéticas: la distribución de “A”, que tiene un factor de seguridad medio, bajo (1,2) y la desviación estándar de factor de seguridad, pequeña (0,1); y distribución de “B”, con un factor de seguridad medio, alto (1,5) y alta desviación estándar elevada (0,5). La probabilidad de ruptura es menor en el caso de A (área de la zona de negro) que de B (zona clara), a pesar de que el factor de seguridad es mucho mayor para B que para A (Assis, 2002).

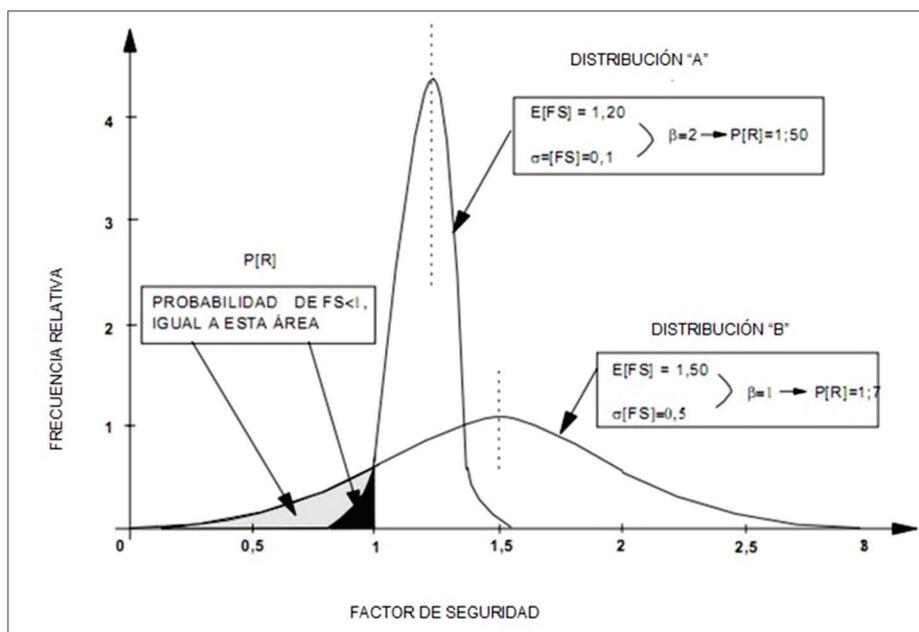


Figura 3. Distribución de frecuencias del factor de seguridad (Assis, 2002)

La probabilidad de ruptura se expresa por su inverso, $1/P[R]$. Así que cuando se habla de 1:50, la probabilidad es de 0,02 (o 1/50). Otra forma de presentación es en porcentaje, multiplicando su valor por 100, es decir, la probabilidad de 0,02 se expresa por 2%.

El índice de confiabilidad indica el número de desviaciones estándar que distancian la ruptura del factor de seguridad encontrado. El valor de β complementa el valor del factor de seguridad y permite estimar la probabilidad de ruptura. Este índice puede ser relacionado con la probabilidad de ruptura, $P[R]$, siempre y cuando se conozca la forma de la distribución del factor de seguridad. La Figura 4 muestra la relación entre β y $P[R]$ para el caso de la distribución normal (Gaussiana) del factor de seguridad (Assis, 2002).

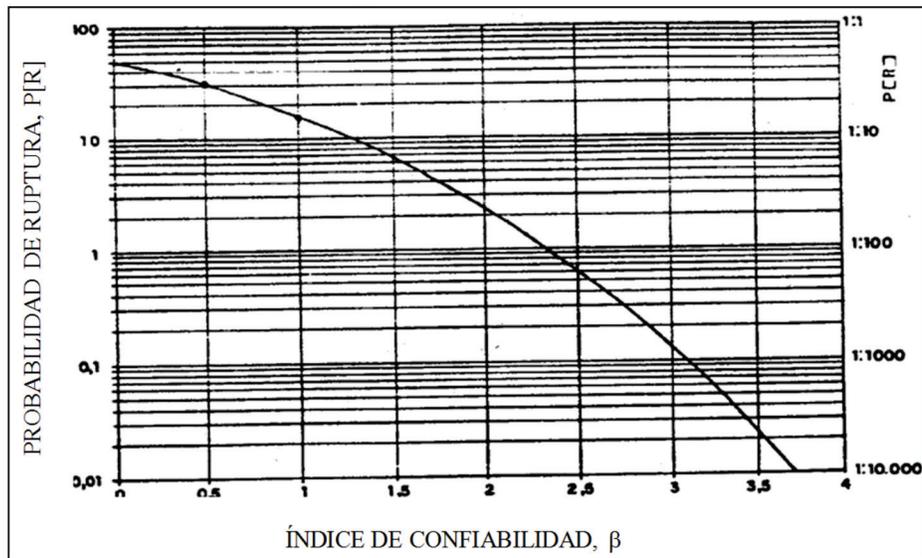


Figura 4. Relación entre β y $P[R]$ para la distribución normal, del Factor de Seguridad (Assis, 2002)

La Figura 5 muestra la relación entre el factor de seguridad y $P[R]$ para valores de $s[FS]$ entre 0,05 y 0,25. La desviación estándar refleja la variabilidad de los parámetros y se puede ver que, dependiendo de su valor, una misma probabilidad de ruptura puede corresponder a una amplia gama de valores de los factores de seguridad.

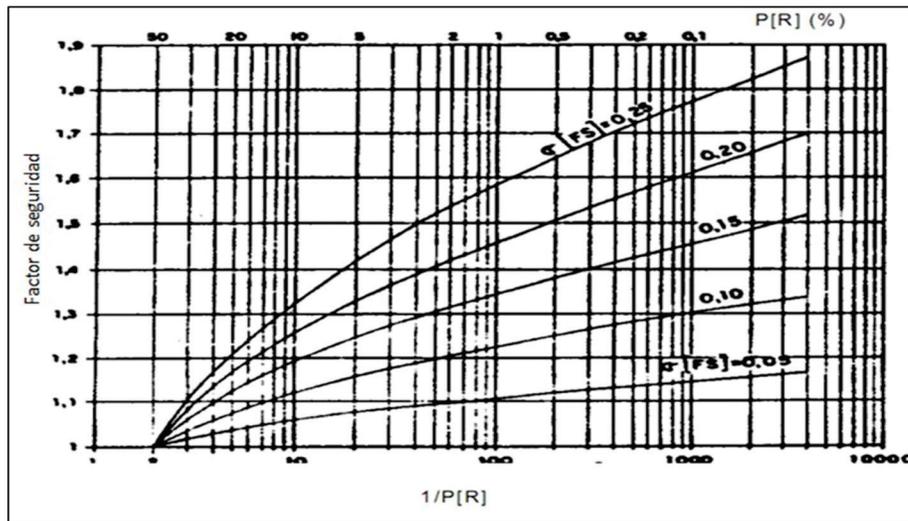


Figura 5. Relación entre $P[R]$ y el factor de seguridad para diversos valores de desviación del Factor de Seguridad (Assis, 2002)

Cuando no se disponga de un número suficiente de ensayos se puede, de carácter preliminar, utilizar coeficientes de variación estimados, a partir de valores típicos. La Tabla 5 muestra los rangos de los coeficientes de variación de los parámetros geotécnicos de interés para el análisis de estabilidad de taludes (Assis, 2002). De igual forma para este trabajo, dichos valores fueron validados a partir de investigaciones realizadas en suelos del Batolito Antioqueño, donde determinaban el peso específico, cohesión y ángulo de fricción y cuyo coeficiente de variación coincide con el adoptado de la Tabla 5. (Escobar, 2011)

Tabla 5. Valores típicos de coeficientes de variación (Assis, 2002)

Parámetro	Coficiente de Variación
Peso específico	03 (02 a 0.8)
Cohesión	40 (20 a 80)
Angulo de fricción	10 (04 a 20)
Cohesión no drenada	30 (20 a 50)

5. RESULTADOS ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y PROBABILIDAD DE FALLA

Los factores de seguridad obtenidos a través del programa “Slide” (Versión 5.025 de 2006) para diferentes inclinaciones de taludes (Figura 6 y Figura 7), con los parámetros respectivos de cada material, se presentan en la Tabla 6.

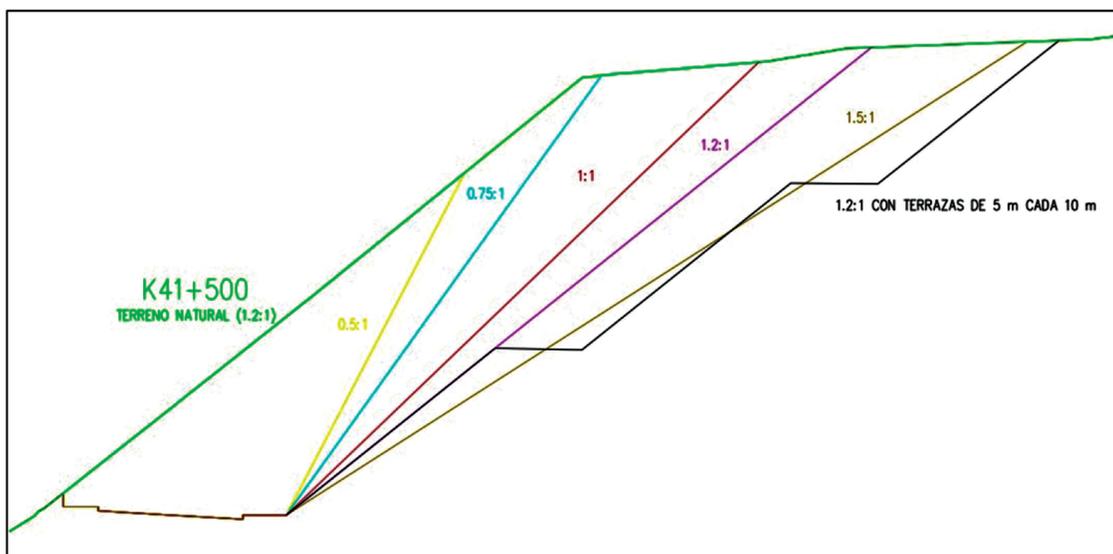


Figura 6. Inclinaciones del talud para análisis de estabilidad km 41+500

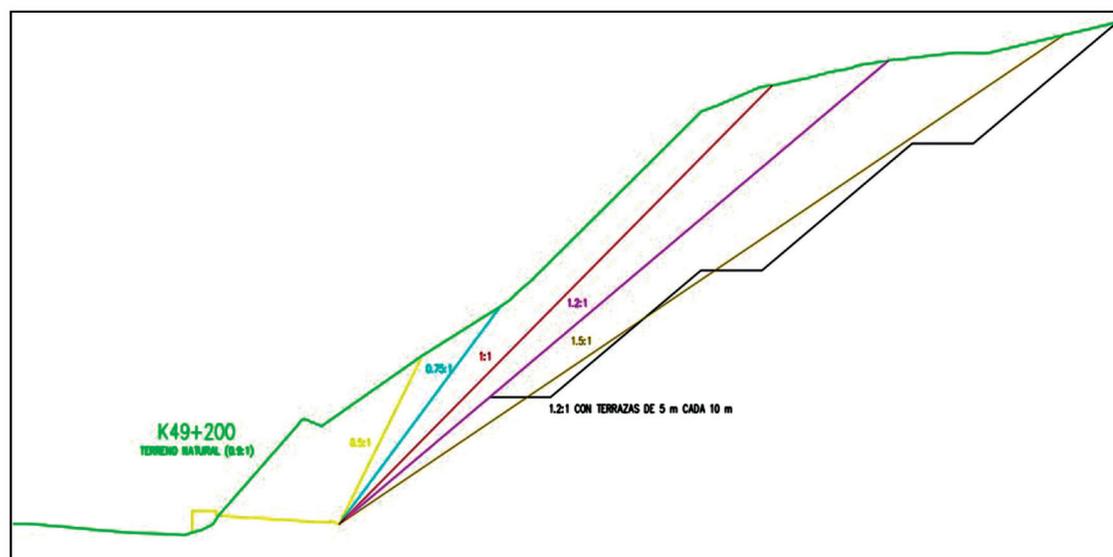


Figura 7. Inclinaciones del talud para análisis de estabilidad km 41+500

Tabla 6. Factores de seguridad muestra km 41+500 y del km 49+200

Muestra	Muestra no saturada	Muestra Saturada
km 41+500	Factor de Seguridad Bishop	Factor de Seguridad Bishop
Talud		
Terreno Natural (1.2:1)	1,3	1,0
0,5:1	0,9	0,6
0,75:1	1,0	0,7
1:1	1,2	0,9
1.2:1	1,3	1,0
1.5:1	1,4	1,0
1.2:1 con terrazas	1,6	1,3
Muestra	Muestra no saturada	Muestra Saturada
km 49+200	Factor de Seguridad Bishop	Factor de Seguridad Bishop
Talud		
Terreno Natural (0.9:1)	1,4	1,2
0,5:1	1,2	0,8
0,75:1	1,1	0,9
1:1	1,2	1,0
1.2:1	1,3	1,1
1.5:1	1,6	1,4
1.2:1 con terrazas	1,6	1,3

Una vez obtenidos los factores de seguridad, se procede a realizar tres nuevas evaluaciones, efectuando incrementos para cada valor de cohesión, ángulo de fricción y peso específico, en un 10%, planteada en el método de FOSM. Posteriormente, se procede a calcular la desviación y la varianza de los resultados obtenidos, y se calcula el peso en porcentaje que cada variable tiene en el valor del factor de seguridad para los taludes, los resultados se muestran en las Tablas 7 y 8.

Tabla 7. Peso en porcentaje de cada variable en la composición del factor de seguridad para el talud del km 41+500 para la muestra no saturada y para la muestra saturada

Muestra	Peso de cada variable en la composición del factor de seguridad Bishop Muestra no saturada		
km 41+500	γ	Cohesión	Angulo de fricción
Talud	(kN/m ³)	(kPa)	(°)
Terreno Natural (1.2:1)	0,5%	62,5%	36,9%
0,5:1	0,7%	76,6%	22,7%
0,75:1	0,8%	73,3%	25,9%
1:1	0,5%	67,5%	32,0%
1.2:1	0,5%	59,6%	39,9%
1.5:1	0,5%	59,0%	40,6%
1.2:1 con terrazas	0,5%	54,3%	45,2%
Muestra	Peso de cada variable en la composición del factor de seguridad Bishop Muestra Saturada		
km 41+500	γ	Cohesión	Angulo de fricción

Talud	(kN/m ³)	(kPa)	(°)
Terreno Natural (1.2:1)	0,2%	37,4%	62,4%
0,5:1	0,5%	59,2%	40,3%
0,75:1	0,3%	38,9%	60,8%
1:1	0,4%	43,7%	55,9%
1.2:1	0,3%	32,8%	66,9%
1.5:1	0,2%	34,0%	65,8%
1.2:1 con terrazas	0,2%	28,0%	71,7%

Tabla 8. Peso en porcentaje de cada variable en la composición del factor de seguridad para el talud del km 49+200 para la muestra no saturada y para la muestra saturada

Muestra	Peso de cada variable en la composición del factor de seguridad Bishop Muestra no saturada		
km 49+200	g	Cohesión	Angulo de fricción
Talud	(kN/m ³)	(kPa)	(°)
Terreno Natural (0.9:1)	0,3%	31,3%	68,4%
0,5:1	0,5%	39,7%	59,8%
0,75:1	0,3%	42,0%	57,7%
1:1	0,0%	41,1%	58,9%
1.2:1	0,4%	32,6%	67,0%
1.5:1	0,3%	33,4%	66,3%
1.2:1 con terrazas	0,3%	36,2%	63,5%

Muestra	Peso de cada variable en la composición del factor de seguridad Bishop Muestra Saturada		
km 49+200	γ	Cohesión	Angulo de fricción
Talud	(kN/m ³)	(kPa)	(°)
Terreno Natural (0.9:1)	0,4%	39,4%	60,2%
0,5:1	0,5%	50,5%	49,1%
0,75:1	0,4%	29,0%	70,7%
1:1	0,2%	13,3%	86,5%
1.2:1	0,1%	9,1%	90,9%
1.5:1	0,1%	11,8%	88,1%
1.2:1 con terrazas	0,1%	9,3%	90,6%

Para la muestra en estado natural del km 41+500 la variable que más peso tiene en la estabilidad del talud de corte es la cohesión y para la muestra en estado natural del km 49+200 la variable que más peso tiene en la estabilidad del talud de corte es el ángulo de fricción. Esta diferencia puede deberse al alto valor de ángulo de fricción de la muestra del km 49+200. Para las muestras saturadas el peso de la cohesión como es de esperarse, es menor.

El índice de confiabilidad y la probabilidad de falla de las diferentes inclinaciones de taludes analizadas para las muestras en estado no saturado y en estado saturado se calculan posteriormente, y los resultados se presentan en la Tabla 9 para el talud del km 41+500 y en la Tabla 10 para el km 49+200.

Tabla 9. Índice de confiabilidad y probabilidad de falla del talud del km 41+500

Muestra	Muestra no saturada		Muestra Saturada	
km 41+500	Índice de confiabilidad	Probabilidad de falla	Índice de confiabilidad	Probabilidad de falla
Talud				
Terreno Natural (1.2:1)	2,1	1,9%	0,2	41,4%
0,5:1	Menor a 0	70,5%	Menor a 0	100,0%
0,75:1	0,1	45,6%	Menor a 0	99,7%
1:1	1,3	9,2%	Menor a 0	81,7%
1.2:1	2,0	2,2%	0,1	45,5%
1.5:1	2,2	1,6%	0,4	36,1%
1.2:1 con terrazas	3,2	0,1%	2,0	2,3%

Tabla 10. Índice de confiabilidad y probabilidad de falla del talud del km 49+200

Muestra	Muestra no saturada		Muestra Saturada	
km 49+200	Índice de confiabilidad	Probabilidad de falla	Índice de confiabilidad	Probabilidad de falla
Talud				
Terreno Natural (0.9:1)	2,7	0,4%	1,3	9,4%
0,5:1	1,4	8,8%	Menor a 0	96,5%
0,75:1	1,1	14,6%	Menor a 0	73,1%
1:1	1,6	6,0%	0,1	46,4%
1.2:1	2,4	0,9%	1,1	13,1%
1.5:1	3,4	0,0%	2,5	0,6%
1.2:1 con terrazas	3,2	0,1%	2,3	1,1%

Los taludes de minas tienen probabilidades de ruptura aceptables en el rango de 1/10 a 1/100 y en el caso de las vías el rango aceptable de probabilidad es de 1 a 2%. (Assis, 2002).

A partir de esta consideración, de la Tabla 9, se concluye que, en estado no saturado los taludes de corte, 1,5:1 y 1,2:1 con terrazas, presentan una probabilidad de falla aceptable. El talud 1,2:1 que presenta un valor de 2,19% está muy cerca al límite propuesto y eventualmente puede ser considerado con precaución. Los demás taludes de corte 0,5:1; 0,75:1 y 1:1 no deben tenerse en cuenta ya que es bastante probable su falla.

Para el estado saturado ningún talud de los analizados cumple con el rango indicado. El talud de corte 1,2:1 con terrazas presenta un valor de 2,31% que está cerca al límite propuesto e igualmente puede, eventualmente ser considerado con suma precaución.

De la Tabla 10 se puede concluir que, en estado no saturado los taludes de corte, 1,2:1, 1,5:1 y 1,2:1 con terrazas, presentan una probabilidad de falla aceptable. Los demás taludes de corte 0,5:1; 0,75:1 y 1:1 no deben tenerse en cuenta, ya que es bastante probable que fallen.

Para el estado saturado los taludes de corte, 1,5:1 y 1,2:1 con terrazas presentan una probabilidad de falla aceptable. Los demás taludes de corte 0,5:1; 0,75:1, 1:1 y 1,2:1 no deben considerarse, ya que es bastante probable que fallen.

De estos resultados es importante resaltar que a pesar de tener factores de seguridad en algunos casos mayores de 1, no significa que su probabilidades de ruptura sea <1%.

5. CONCLUSIONES

- A la luz de los resultados, la disminución de la resistencia en los suelos de los taludes está dada por las pérdidas en la cohesión y las pérdidas en el valor de succión al pasar del estado natural al estado saturado.
- El método FOSM ofrece el valor agregado de obtener el efecto (o peso) de cada variable en el factor de seguridad, y por ende su probabilidad de falla.
- Es importante resaltar que a pesar de tener factores de seguridad en algunos casos mayores de 1, no significa que sus probabilidades de ruptura sean menor de 1%.
- Para ambos casos analizados, se evidencia una alta probabilidad de ruptura del talud de corte cuando se encuentra en estado saturado, para casi todas las inclinaciones analizadas, lo que demuestra la necesidad de construcción de drenes en el talud que permitan tener una probabilidad más cercana a la reflejada en la muestra en estado no saturado.
- La aplicabilidad de los métodos probabilísticos, en comparación con los métodos determinísticos, se ve reflejada en el hecho de que permiten determinar la probabilidad de ruptura, yendo más allá del brindar un simple valor de factor de seguridad, el cual de una manera independiente no predice esta probabilidad, y se convierte en un número sólo. Para algunos casos se posee factores de seguridad mayores a 1, con probabilidades de falla superiores a las permitidas, por lo que el método probabilístico tiene un valor agregado mayor que el determinístico.
- La distancia existente entre las zonas de muestreo (7800 m) no permite extrapolar los resultados obtenidos de los análisis, al tramo comprendido entre ellas, debido a que la topografía y el relieve de la zona mencionada presentan variaciones y por ende los tipos de suelos que se pueden encontrar pueden cambiar con respecto a los evaluados. No obstante, muestras obtenidas de esta zona comprendidas entre el km 41+500 y el km 49+200 que presenten una clasificación similar a las muestras evaluadas, permitirían prever un comportamiento similar al analizado.

REFERENCIAS

- ALZATE, R. C. (2005). Estabilidad de taludes con aplicación en zonas húmedas tropicales. Universidad Tecnológica del Chocó Diego Luis Córdoba. Departamento de Ingeniería de Minas y Ambiental. Facultad de Ingeniería. Colombia.
- ASSIS, A.P. (2002). Métodos estadísticos e probabilísticos em geotecnia. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasil.
- BELL, F. G. (2000). Engineering properties of soil and rocks. Blackwell Science Ltd. Oxford. Pag 58-70
- DEVIMED (1997). Informe del Estudio de Geología para Ingeniería y Geotecnia elaborado por Sedic para Devimed.
- DUQUER, J.L. (1999). Programa de creación, declaratoria, manejo y administración de un distrito agrario en el municipio de Marinilla - Antioquia. Marinilla.
- ESCOBAR, L. J. (2011). Clasificación y caracterización de suelos tropicales en un talud de la autopista Medellín – Bogotá en el tramo de vía entre Marinilla y Santuario; Tesis de Maestría. Universidad Nacional, Sede Medellín.
- GONZÁLEZ C., M. (2000). El terreno. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, Barcelona.
- MAIA, J.A.C. & ASSIS, A.P. (2004). Etapas para estudios probabilísticos aplicados a geotecnia. Universidad de Brasília.
- NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1995). Pavimentação de baixo custo com Solos Lateríticos. São Paulo, Ed. Vilibor, SP, Brasil.
- VALENCIA, Y. G., ASSIS, A.P., CARVALHO, J.C. (2005). Estudo do efeito da intemperização na estabilidade de um talude de solo metamórfico aplicando métodos probabilísticos. II Simpósio sobre solos tropicais e processos erosivos no centro-oeste, Goiânia, GO, Brasil.

