

ARK: <https://n2t.net/ark:/87558/tekhne.28.2.1>

Técnica para Evaluar la Fiabilidad del Sistema Talud y la Fiabilidad del Factor de Seguridad del Sistema Talud en Suelos, utilizando Factores de Seguridad Aleatorios

Manuel Felipe Brito Quijada¹

[manuelbritophb@gmail.com¹](mailto:manuelbritophb@gmail.com)

[https://orcid.org/0009-0003-9828-977X¹](https://orcid.org/0009-0003-9828-977X)

Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería

Resumen

En este artículo se propone una técnica para evaluar la fiabilidad del sistema talud (FST) y la fiabilidad del factor de seguridad del sistema talud (FFSST) utilizando factores de seguridad aleatorios, considerando así, los efectos de la incertidumbre de los parámetros geotécnicos, no considerados en los métodos de equilibrio límite. Existen numerosos métodos que tienen varias consideraciones para el análisis que son para satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos entre dovelas o tajadas. Los métodos de equilibrio límite (MEL) y el método de elemento finito (MEF) son comúnmente utilizados para calcular la estabilidad de taludes. En general, tres métodos son usados en análisis probabilístico de estabilidad de taludes: el método de primer orden segundo momento (FOSM), el método de la estimación puntual (MEP) y el método de Simulación de Monte Carlo (MSMC). La técnica presentada es una alternativa diseñada para cuantificar los efectos de la incertidumbre de los parámetros de entrada en los parámetros de salida de un sistema talud. La data de quince sitios de estudios son usados para el análisis de la (FST) y la (FFSST) en suelos. Los resultados obtenidos de la FST y la FFSST son comparados con los factores de seguridad obtenidos y publicados por otros profesionales. Los resultados obtenidos en el presente estudio evidencian que la técnica propuesta para la evaluación de la fiabilidad del factor de seguridad del sistema talud (FFSST) en suelos, da resultados consistentes al hacer la comparación con los resultados de los factores de seguridad publicados en las referencias citadas.

Palabras claves: estabilidad de talud, factor de seguridad, probabilidad de falla, índice de fiabilidad, fiabilidad del

Technique to Evaluate the Reliability of the Slope System and the Reliability of the Safety Factor of the Slope System in Soils using

Abstract

This article presents a technique to evaluate the reliability of the slope system (FST) and the reliability of the safety factor of the slope system (FFSST) in Soils using Random Safety Factors, considering thus, the effect of the uncertainty of the geotechnical parameters, not considered in the limit equilibrium methods. There are numerous methods that have several considerations for the analysis in order to satisfy the balance of forces and moments between voussoirs or slices. The limit equilibrium methods (MEL) and the finite element method (FEM) are commonly used to calculate slope stability. In general, three methods are used in probabilistic analysis of slope stability: the first order second moment method (FOSM), the point estimation method (MEP) and the Monte Carlo simulation method (MSMC). The technique presented is an alternative designed to quantify the effects of the uncertainty of the input parameters on the output parameters of a slope system. Data from fifteen study sites are used for analysis of (FST) and slope system factor of safety reliability (FFSST) in soil. The results obtained from the FST and the FFSST are compared with the safety factors obtained and published by other professionals. The results obtained in the present study show that the technique proposed for the evaluation of the reliability of the safety factor of the slope system (FFSST) in soils, gives consistent results when making the comparison with the results of the safety factors published in the references cited.

Keywords: slope stability, safety factor, probability of failure, reliability index, reliability of the safety factor of the

Random Safety Factors

Técnica para avaliar a confiabilidade do sistema de taludes e a confiabilidade do fator de segurança do sistema de taludes em solos utilizando fatores de segurança aleatórios

Resumo

Este artigo apresenta uma técnica para avaliar a confiabilidade do sistema de taludes (FST) e a confiabilidade do fator de segurança do sistema de taludes (FFSST) em solos utilizando Factores de Seguridad Aleatorios, considerando, assim, o efeito da incerteza dos parâmetros geotécnicos, não considerados nos métodos de equilíbrio limite. Existem inúmeros métodos que possuem diversas considerações para a análise, a fim de satisfazer o equilíbrio de forças e momentos entre aduelas ou fatias. Os métodos de equilíbrio limite (MEL) e o método dos elementos finitos (FEM) são comumente utilizados para calcular a estabilidade de taludes. Em geral, três métodos são utilizados na análise probabilística da estabilidade de taludes: o método dos momentos de primeira ordem e segundo momento (FOSM), o método da estimativa pontual (MEP) e o método de simulação de Monte Carlo (MSMC). A técnica apresentada é uma alternativa projetada para quantificar os efeitos da incerteza dos parâmetros de entrada sobre os parâmetros de saída de um sistema de taludes. Dados de quinze locais de estudo são utilizados para análise da confiabilidade do fator de segurança do sistema de taludes (FST) e do fator de segurança do sistema de taludes (FFSST) em solos. Os resultados obtidos do FST e do FFSST são comparados com os fatores de segurança obtidos e publicados por outros profissionais. Os resultados obtidos no presente estudo mostram que a técnica proposta para avaliação da confiabilidade do fator de segurança do sistema de taludes (FFSST) em solos, apresenta resultados consistentes ao se fazer a comparação com os resultados dos fatores de segurança publicados nas referências citadas.

I. INTRODUCCIÓN

En el análisis de estabilidad de taludes, el método de equilibrio límite y el método de elemento finito son comúnmente usados. Los métodos determinísticos no toman explícitamente en consideración la variabilidad y la incertidumbre de los parámetros del suelo.

El objetivo de esta propuesta es desarrollar una técnica o procedimiento para cuantificar la prefabilidad del sistema talud (PFST), la fiabilidad del sistema talud (FST) y la fiabilidad del factor de seguridad del sistema talud (FFSST) en suelos, tomando en consideración la incertidumbre de las propiedades geotécnicas del suelo que no son consideradas en los métodos tradicionales de análisis de estabilidad de taludes como es el caso de los métodos de

equilibrio limite. Esta técnica tiene como datos de entradas los factores de seguridad aleatorizados obtenidos con la aplicación de métodos de equilibrio límite; en el presente caso, se utilizó el método de Fellenius y el método simplificado de Bishop, en consonancia con lo publicado según referencias.

La PFST es un indicativo inicial de la probabilidad de falla y de la estabilidad general del sistema talud. En la determinación de la FFSST se considera un nivel de significancia de 0,05; este valor puede ser optativo y se puede considerar otro nivel de confianza a juicio del Ing. Geotécnico. La técnica propuesta es aplicada a la data de quince sitios de estudios. En la tabla 4 y 5 se resumen los resultados de la FFSST de los quince casos analizados. Se

incluye en la presente memoria, tres hojas electrónicas de cálculo, tablas (6, 7 y 8) y tres figuras (2-4) de contraste entre la FFSST y los FS publicados según referencias. Se cumple con los postulados de la regresión lineal múltiple, obteniéndose la FFSST representativa de la estabilidad del sistema talud

II. ANTECEDENTES

El desarrollo de los conceptos y técnicas para el análisis de confiabilidad de componentes, equipos y sistemas ha estado asociado al desarrollo de tecnologías complejas y de alto riesgo, tales como la aeronáutica, militar y nuclear. A partir de los años 60 tiene lugar un gran desarrollo de los fundamentos y de los conceptos teóricos relacionados con la confiabilidad y se produce la consolidación de la Teoría de la Confiabilidad. Barlow and Proschan (1964,1975-ref. 12), y Gendenko et al. (1965-ref. 13) exponen por primera vez una teoría matemática de la confiabilidad.

Se han desarrollado varias metodologías probabilísticas complementarios al método determinístico e incorporando las incertidumbres para evaluar la estabilidad de taludes: el método de primer orden (FORM); este método también se conoce como Índice de Confiabilidad de Hasofer-Lind, desarrollado por Michael Hasofer y Niels Lind en 1974. (ref.14 y 15); el método de primer orden segundo momento (FOSM), también conocido como método de segundo momento de primer orden de valor medio, es un método probabilístico para determinar los momentos estocásticos de una función con variables de entrada aleatorias (ref.16-17); el método de superficies de respuesta (RSM), este método fue introducido por George E. P.Box y

K.B Wilson (1951) es un método que explora las relaciones entre varias variables explicativas y una o más variables respuestas (ref.18) y la Simulación de Monte Carlo (MCS) que fue desarrollado por John Von Neumann y Stanislaw Ulam (1944). (ref. 19-20). El método probabilístico aplicado a estabilidad de taludes determina la confiabilidad del talud basado en el cálculo del índice de confiabilidad y la probabilidad de falla correspondiente a la superficie de falla o superficie de deslizamiento crítica.

III. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

Se propone el diseño de una propuesta técnica cuya metodología está basada en la integración de criterios estadísticos, probabilísticos y de fiabilidad, para determinar la prefiabilidad del sistema talud (PFST), la fiabilidad del sistema talud (FST) y la fiabilidad del factor de seguridad del sistema talud (FFSST); con esta propuesta técnica, la gestión de la incertidumbre en el análisis de estabilidad de taludes contará con una nueva herramienta, complementaria de los métodos determinísticos.

Las laderas y taludes constituyen un sistema, es una fuente de datos cuyos parámetros (ϕ , c , γ , u ) pueden ser evaluados para la interpretación y conocimiento del comportamiento de dicho sistema.

El factor de seguridad (FS) en la práctica geotécnica no considera el grado de incertidumbre asociado al sistema, cuya complejidad e incertidumbre requiere la implementación de herramientas probabilísticas que permitan considerar los efectos de la variabilidad e incertidumbre de los parámetros o propiedades geotécnicos del suelo en el sistema

talud; en este sentido, se requiere evaluar el factor de seguridad mediante el uso de números aleatorios, siendo la técnica de simulación una forma de estudiar los procesos aleatorios.

En alcance a lo previamente expuesto, se plantea un procedimiento técnico que permite mediante una hoja electrónica de cálculo, calcular la prefabilidad del sistema talud (PFST), la fiabilidad del sistema talud (FST) y la fiabilidad del factor de seguridad del sistema talud (FFSST) en suelos mediante el **uso de números aleatorios con la aplicación de una función sigmoide**. A partir de la función sigmoide se desarrolla todo el proceso para obtener la fiabilidad del sistema talud (FST) y la fiabilidad del factor de seguridad del sistema talud (FFSST)", siendo este el **objetivo principal de la investigación** para contrastar la FFSST con los FS obtenidos y publicados por otros profesionales. También se ha incluido en el proceso, la evaluación estadística basados en criterios estadísticos de la estadística descriptiva y de la estadística inferencial e igualmente, se determina la PFST usando los valores de entrada de los factores de seguridad aleatorizados (FSinput). En la hoja electrónica de cálculo se entra con los factores de seguridad en condiciones aleatorias (FSinput) y se obtiene su promedio para normalizar la data y aplicar la función sigmoide. En la determinación de la prefabilidad del sistema talud se utilizan los datos aleatorizados del factor de seguridad (datos de entrada (FSinput)). Se calcula el promedio o la esperanza de los datos aleatorizados del factor de seguridad ((FSinput.p)) y la desviación estándar del factor de seguridad ((FSinput.S); se determinan el índice de fiabilidad

$\beta = [FSinput.p - 1] / S(FSinput.p)$, (1) la probabilidad de falla ($Pf = F(\beta)$) (2) y la prefabilidad del sistema talud ($PFST = (1 - Pf)$) (3) A partir de la aplicación de la función sigmoide se calculan los residuos, incluidos los residuos corregidos estandarizados, para luego determinar la desviación estándar de los residuos que es función de la varianza de los residuos; después de este proceso, se calculan los factores de seguridad corregidos y los factores de seguridad a la salida cuyos promedios deben ser iguales, así como también deben ser iguales sus desviaciones estándar y el promedio de los residuos corregidos estandarizados y la desviación estándar de los residuos. Con los datos previamente calculados se procede a la evaluación estadística cumpliendo con los criterios y postulados establecidos por la técnica de regresión lineal.

En la determinación de la fiabilidad del sistema talud (FST) se calcula el promedio o la esperanza de los factores de seguridad de salida $FSout = FSCp + RCe * S(FSC)$ (4) y la desviación estándar del factor de seguridad de salida (S_{FSout}); con estos valores se determinan el índice de fiabilidad $\beta = [FSout.p - 1] / S_{FSout}$, (5), la probabilidad de falla ($Pf = F(\beta)$) y la fiabilidad del sistema talud: $FST = (1 - Pf)$, (6). La fiabilidad del factor de seguridad del sistema talud se determina: $FFSST = FSout_p * (1 + S_{RC}) * (1 + \alpha)$, (7)

La determinación de la FFSST está estructurada según el procedimiento indicado en la Tabla I.

Tabla 1. Procedimiento Metodológico para determinar la FFSST

Datos de entrada (FSinput)	Son los valores aleatorizados del FS
Normalización de los datos de entrada	$FSN_i = \frac{FSinput(i) - FSinput_p}{S(FSinput)}$
Función Sigmoide	$F_{(x)} = \frac{1}{1 + e^{-ax}}$ Si $x \geq 0 \Rightarrow F_x \rightarrow 1$ Si $x \leq 0 \Rightarrow F_x \rightarrow 0$
Promedio de los residuos	$Ri = \frac{(FSNi - Fsig)}{n}$
Residuos corregidos	$RCi = Ri - Rip$
Residuos corregidos al cuadrado	$RCi^2 = (Ri - Rip)^2$
Varianza de los residuos	$VARi = \sum RCi^2 / (n - 1)$
Desviación estándar de los residuos	$S_{RC} = (VAR)^{0,5}$
Residuos corregidos estandarizados	$RCei = RCi / S_{RC}$
Factor de seguridad corregido	$FSCi = FSinput_i - RCi$
Factor de seguridad de salida	$FSout(i) = FSCp + RCei * S(FSCi)$
Índice de fiabilidad	$\beta = \frac{E(FS) - 1.0}{\sigma(FS)}$
Fiabilidad del Sistema Talud	$FST = 1 - Pf$ $Pf = f(\beta)$
Fiabilidad del Factor de Seguridad del Sistema Talud	$FFSST = FSout_p * (1 + S_{RC}) * (1 - \alpha)$ $\alpha=0,05$: Nivel de Significancia α : Variable a juicio del Ing. Geotécnico.

De la estadística descriptiva se utilizan los estadísticos (ref. 21-22-23): la esperanza, media o promedio (estadística de posición), varianza, desviación estándar y coeficiente de variación (estadísticos de dispersión), coeficiente de asimetría (A) y coeficiente de curtosis (K) (estadísticos de forma), covarianza (COV) y coeficiente de correlación lineal (r) (estadísticos

de asociación). De la estadística inferencial (ref. 20-21-22), se utilizan los estadísticos de coeficiente de determinación (R^2), error típico (Etípico), suma de los cuadrados totales (SCT), suma de los cuadrados de la regresión (SCR), suma de los cuadrados de los errores o residuos (SCE (SCR)), Fisher, la T_student y, se verifica la normalidad (estadístico Jarque-Vera), la independencia (estadístico Durbin Watson), y la homocedasticidad.

En la Tabla 2 se resumen los criterios utilizados para la valoración estadística. En la Fig. 1, se presenta un esquema general del procedimiento para determinar la fiabilidad de factor de seguridad del sistema talud.

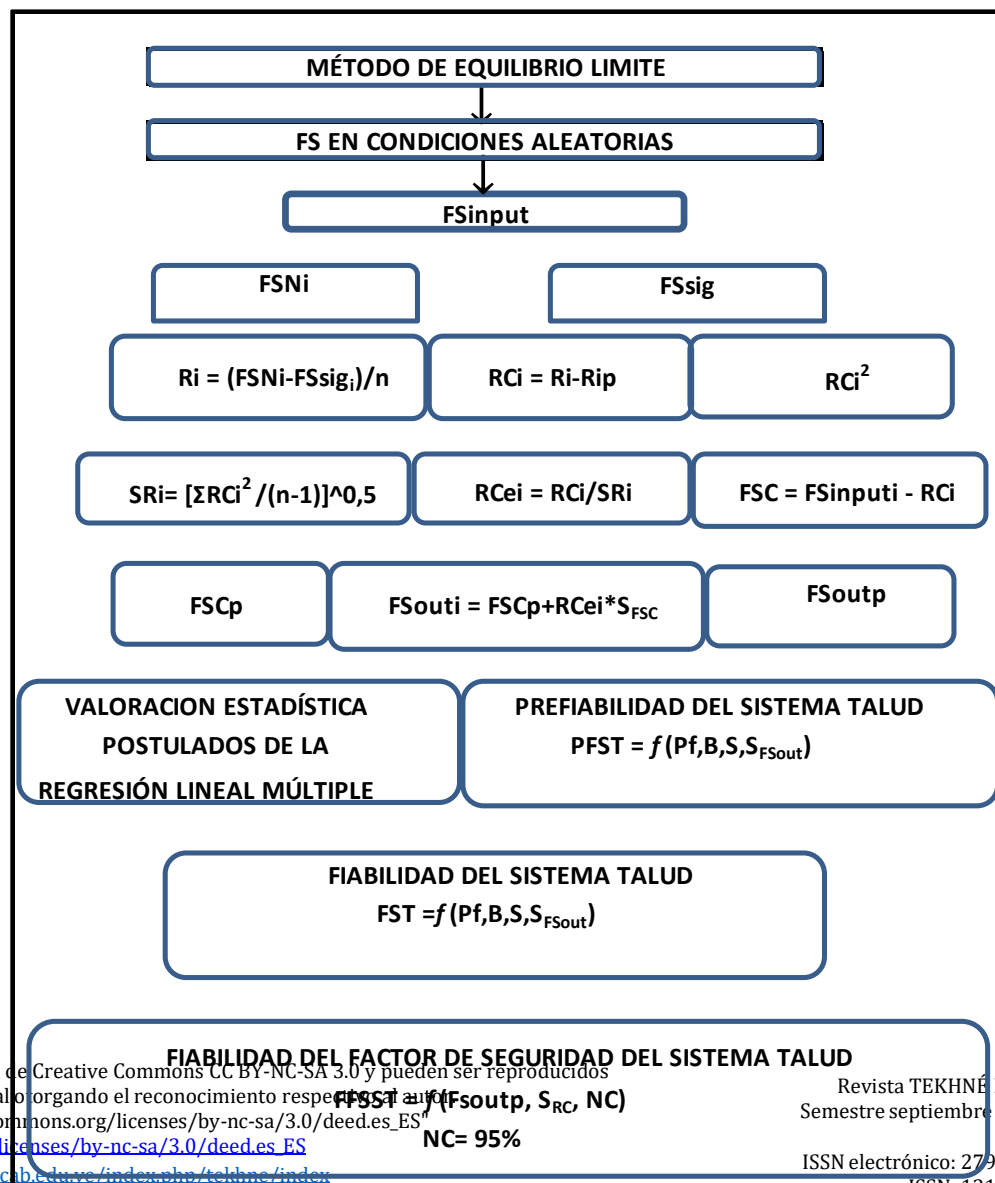
Tabla 2. Evaluación Estadística del Sistema Talud

Linealidad: la esperanza del residuo es nula.	$\sum Ri = 0$
Homocedasticidad: la varianza de los residuos es constante.	$VAR(s) = \sigma^2 I_{n \times n}$
Normalidad: La distribución de los residuos aleatoriamente tienen distribución normal: (media cero y varianza constante: $0, \sigma^2 I$).	$JB = T \left[\frac{(A2/6) + (K - 3)2}{24} \right]$ $T: \text{tamaño muestral}$ $A: \text{asimetría}$ $K: \text{curtosis o apuntamiento}$
Independencia: los residuos son independientes entre sí.	$DW = \frac{\sum_{i=2}^n [(Ri - Ri-1)]^2}{\sum_{i=1}^n Ri^2}$
La variable explicativa se obtiene sin error.	

Variabilidad total.	SCT (suma de los cuadrados totales).
Variabilidad explicada.	SCR (suma de los cuadrados de la regresión).
Variabilidad no explicada.	SCE (suma de los cuadrados de los errores o residuos).
Coeficiente de determinación.	$R^2 = \frac{SCR}{SCT} = 1 - \frac{SCE}{SCT}$; $0 \leq R^2 \leq 1$
"F" de Fisher del FS. Si $F_{calculado} > F_{de\ tabla}$ → modelo significativo	$F = \frac{\frac{SCR}{gl}}{\frac{SCE}{n - gl - 1}}$
"t" de student del FS.	

Coeficiente de variación (CV).	$CV = S(FSinput) / FSinput_p$
Covarianza (COV).	$COV = \sum_{i,j}^n [(FSinput(i) - FSinput_p) * (FSout(i) - FSout_p)] / (n-1)$
Coeficiente de correlación lineal (r).	$r = \frac{COV}{Sininput * Sout}$

Fig. 1. Procedimiento General "Fiabilidad de Factor de Seguridad del Sistema Talud".



IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La técnica propuesta para calcular la fiabilidad del factor de seguridad del sistema talud (FFSST) en suelos mediante el **uso de números aleatorios con la aplicación de una función sigmoide** es validada por comparación de los resultados obtenidos con los valores de los factores de seguridad publicados (ver referencias) por otros profesionales.

En la tabla 3 se indican los parámetros geotécnicos como, cohesión, fricción, peso unitario, presión de poro y características generales de los taludes evaluados según lo publicado en las referencias citadas.

En la Tabla 4 se resumen los resultados-comparación de los quince (15) casos de taludes tal como han sido publicados según las referencias y los resultados de los valores de la FFSST obtenidos al aplicar la técnica propuesta. En la tabla 5 se tienen los valores de la pre-fiabilidad del sistema talud, de la fiabilidad del sistema talud y de la fiabilidad del factor de seguridad del sistema talud, obtenidos con la técnica propuesta. Los coeficientes de variación (CV) son inferiores al 30 %, indicativo de mediana a baja dispersión.

De los quince análisis realizados con la técnica propuesta, para determinar la fiabilidad del factor de seguridad del sistema talud, se incluyen tres (3) hojas electrónicas de cálculo que evidencian los resultados obtenidos con la aplicación de la técnica propuesta.

Las tablas 6, 7 y 8, son tres de las quince hojas electrónica de cálculo resultante del

procedimiento de la aplicación de la técnica propuesta; se puede observar las variables involucradas en el proceso o procedimiento para determinar la PFST, FST y FFSST incluida las variables para la valoración estadística del sistema talud.

Las Figuras (2-4) son tres de los quince casos de talud analizados; se tiene la comparación gráfica entre los resultados de factores de seguridad publicados según referencias citadas y los valores de la fiabilidad del factor de seguridad del sistema talud calculados con la técnica propuesta.

La suma de la diferencia y el promedio entre (FSinput-FSout) es prácticamente cero, con una bondad de ajuste próxima al 100 %.

El coeficiente de correlación lineal dio valores indicativos de una correlación fuerte y el coeficiente de variación para determinar la FST dio valores menores a 30 % indicativos de mediana a baja dispersión.

La suma y el promedio o media de los residuos (RC y RCe) es cero, lo que indica que el modelo analítico propuesto establece excelente relación entre las variables independientes y las variables dependientes.

Los resultados de la evaluación estadística del sistema talud indican que se cumple con los postulados de la regresión lineal múltiple.

Los factores de seguridad obtenidos con la técnica propuesta evidencian buenos resultados al contrastarlos con los valores de los factores de seguridad reportados en las publicaciones citadas en referencia

Tabla 3. Parámetros Geomecánicos y Características Generales según Referencias

R1	Suelo OH SC-SM OH SC-SM	Altura (m) 11 Densidad: 12,16 (KN/m ³) Densidad: 18,44 (KN/m ³)	Talud 	Coh. (KN/m ²) 58,86 34,34	Ang. Fricc. 6 10	Ym (KN/m ³) 10	U (KN/m ²) 0 0	Dovelas 14
R2	Suelo	Altura (m) 10	Talud 45 °	Coh. (KN/m ²) 20	Ang. Fricc. 10	Ym (KN/m ³) 17	U (KN/m ²) 0	30
R2-1	Suelo 1 2	Altura (m) 15 5	Talud 45°	Coh. (KN/m ²) 30 20	Ang. Fricc. 30 10	Ym (KN/m ³) 16 17	U (KN/m ²)	19
R3	Suelo SC	Altura	Talud 2:1 (H:V)	Coh. (KN/m ²) 5	Ang. Fricc. 20	Ym (KN/m ³)	U (KN/m ²) 0	14
R4	Suelo SM CL	Altura	Talud	Coh. (KN/m ²) 4,8 35,9	Ang. Fricc. 35 0	Ym (KN/m ³) 17,3 17,3	U (KN/m ²) 0 0	2 8
R5	Suelo Terrap. (S) Arcilla Sat.	Altura (m) 30,48 15,24	Talud 2:1 (H:V) Subsuelo	Coh. (KN/m ²) 0 119,70	Ang. Fricc. 40 0	Ym (KN/m ³) 6,28 21,99	U (KN/m ²) 0 0	3 8
R5-1	Suelo Dique (S) Arcilla Arc. Marina Arc. Lacust. Arc. Lacust. Muy fuerte	Altura (m) 12 4 8 6,5 	Talud 3:1 (H:V) Subsuelo Subsuelo Subsuelo Subsuelo Subsuelo	Coh. (KN/m ²) 0 41 34,5 31,5 34,5 41	Ang. Fricc. 30 0 0 0 0 0	Ym (KN/m ³) 20 20 18,8 20,3 20,3 20,3	U (KN/m ²) 0 0 0 0 0 0	1 1 1 6 1 1
R5-2	Suelo Terraplen Homogeneo (SC)	Altura (m) 14,63	Talud 2,5:1 (H:V)	Coh. (KN/m ²) 4,79 4,79 4,79 4,79 4,79 4,79 4,79 4,79 4,79	Ang. Fricc. 30 30 30 30 30 30 30 30 30	Ym (KN/m ³) 15,71 15,71 15,71 15,71 15,71 15,71 15,71 15,71 15,71	U (KN/m ²) 0 33,46 80,90 104,15 117,03 118,76 105,72 75,71 28,43	1 1 1 1 1 1 1 1 1
R5-3	Suelo PT-Terraplen shell core shell	Altura (m) 60,96	Talud 2,75:1 (H:V) 1,5:1 (H:V) 2,75:1 (H:V)	Coh. (KN/m ²) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Ang. Fricc. 38 20 20 20 20 20 20 38 38 38	Wtajada (kN) 163,06 957,09 3040,33 3977,36 6256,49 7331,55 1402,84 4695,82 3860,45 440,32	U (KN/m ²) 0 69,43 114,62 165,47 179,26 102,37 34,43 38,59 21,55 0	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Tabla 3—continuación. Parámetros Geomecánicos y Características Generales según Referencias

R6	Suelo	Altura (m)	Talud	Coh. (kN/m ²)	Ang. Fricc.	Wtajada (kN)	U (kN/m ²)	
				0,036	5	0,04	0	1
				0,036	5	0,10	0	1
				0,036	5	0,16	0	1
	suelo 1			0,036	5	0,22	0	1
				0,036	5	0,28	0	1
				0,036	5	0,32	0	1
				0,036	5	0,31	0	1
	suelo 2			0,036	5	0,25	0	1
	suelo 3			0,005	30	0,17	0	1
				0,003	35	0,04	0	1
R7	Suelo	Altura (m)	Talud	Coh. (kN/m ²)	Ang. Fricc.	Ym (kN/m ³)	U (kN/m ²)	
	Terrap. (SC)	10	1,75:1 (H:V)	28	18	19,61	0	1
				28	18	19,61	0	1
				28	18	19,61	0	1
				28	18	19,61	0	1
				28	18	19,61	0	1
				28	18	19,61	0	1
				28	18	19,61	0	1
				28	18	19,61	0	1
				28	18	19,61	0	1
				28	18	19,61	0	1
				28	18	19,61	0	1
R8	Suelo	Altura (m)	Talud	Coh. (kN/m ²)	Ang. Fricc.	Ym (kN/m ³)	U (kN/m ²)	
				17,17	20	17,95	3,846	1
				17,17	20	17,95	13,047	1
				17,17	20	17,95	21,621	1
				17,17	20	17,95	25,898	1
	Ladera			17,17	20	17,95	30,872	1
				17,17	20	17,95	34,100	1
				17,17	20	17,95	33,580	1
				17,17	20	17,95	25,398	1
				17,17	20	17,95	5,248	1

Tabla 3—continuación. Parámetros Geomecánicos y Características Generales según Referencias

R9	Suelo-T	Altura (m)	Talud	Coh. (kN/m ²)	Ang. Fricc.	Wtajada (kN)	U (kN/m ²)	
	S			0	40	0,63571	0	1
	S	10,06	2:1 (H:V)	0	36	0,17387	0	1
	S			0	36	0,37817	7,182	1
	C			52,668	0	1,23922	-	1
	C			52,668	0	1,65552	-	1
	C			52,668	0	1,85172	-	1
	C			52,668	0	1,89262	-	1
	C			52,668	0	1,76637	-	1
	C	10,67		52,668	0	1,59566	-	1
	C			52,668	0	1,39650	-	1
	C			52,668	0	1,17264	-	1
	C			52,668	0	0,98889	-	1
	C			52,668	0	0,72018	-	1
	C			52,668	0	0,43863	-	1
	G			0	36	14,66850	7,182	1
	G			0	36	4,88950	0	1
R10	Suelo	Altura (m)	Talud	Coh. (kN/m ²)	Ang. Fricc.	Ym (KN/m ³)	U (kN/m ²)	
				30	20	18	0	1
				30	20	18	0	1
				30	20	18	0	1
				30	20	18	0	1
				30	20	18	0	1
				30	20	18	0	1
				30	20	18	0	1
				30	20	18	0	1
				30	20	18	0	1
R11	Suelo	Altura	Talud (°)	Coh. (kN/m ²)	Ang. Fricc.	Ym (KN/m ³)	Coh. (kN/m ²)	
	SC		20	10	28	20	18,99	1 a 16
La determinación del FS calculado con la Red Conexionista propuesta, se realizó tomando los datos de los factores de seguridad en condiciones aleatorias reportados en el artículo, según la Referencia R13.								

Tabla 4. Factores de Seguridad Publicados versus Factores de Seguridad Calculados

Ref.	Bishop	Fellenius	Janbu	Morgenstens-Price	Spencer	Stb-2001	FS (*Ref.: 7 y 10)	FFSST	Nº Datos
1	0,7	0,65	0,67					0,737	14
2	Geoslope:					1,290		1,165	30
	1,041								
	Excel-Bishop								
2_1	Geoslope:					1,022		1,411	19
	0,618								
	Excel-Bishop								
	1,21								
3	1,36	1,18	1,16	1,112	1,14			1,190	14
4	1,52	1,43						1,568	10
5	PROCEDIMIENTO		UTEXAS4	SLOPE/W	SLIDE	PHASE ²		1,147	11
	Spencer		1,19	1,2	1,2				
	Bishop Simplificado		1,22	1,22	1,23				
	Janbu Simplificado		1,16	1,16	1,17				
	(no corrección)								
Janbu Simplificado con corrección					1,19				
5_1	PROCEDIMIENTO		UTEXAS4	SLOPE/W	SLIDE	MFBQ: Método de Fellenius: FS=1,14		1,154	11
	SUPERFICIE DE FALLA CIRCULAR								
	Spencer		1,45	1,45	1,45				
	SUPERFICIE DE FALLA NO CIRCULAR								
	Spencer				1,16				
	SUPERFICIE DE FALLA COMPUESTA								
	Spencer			1,17	1,17				
	Elmento Finito (SRF)								
Equilibrio de Fuerza					1,17				
5_2	PROCEDIMIENTO-SPENCER		UTEXAS4	SLIDE	SLOPE/W	PHASE ²	MFBQ: Método de Fellenius: FS=1,19	1,237	9
	(PRESIÓN DE PORO)								
	SUPERFICIE DE FALLA CIRCULAR								
	Elemento Finito		1,19	1,19	1,19	1,11			
	Linea Piezometrica		1,16	1,16	1,16	1,07			
	Linea Piezometrica con S.F.		1,24	1,22	1,22	N/A			
5_3	PROCEDIMIENTO-SPENCER		UTEXAS4	SLIDE	SLOPE/W	PHASE ²	MFBQ: Mëtodo de Bishop: FS=1,61	1,693	10
	(PRESIÓN DE PORO)								
	SUPERFICIE DE FALLA CIRCULAR								
	Elemento Finito		1,69	1,70	1,67	1,57			
	Linea Piezometrica		1,67	1,69	1,67	1,56			
	Linea Piezometrica Ajustada		1,70	1,70	1,62	N/A			
6		1,74						1,684	10
7	Aproximación Semigráfica						2,00	2,012	11
8	1,35	1,21	0,95					1,232	9
9	1,63	1,36						1,407	16
10		2,060						2,135	9
11	Point Estimate Method						1,47	1,46	16
	First Order Second Moment						1,46		
	Monte Carlo Simulation						1,46		

Figuras (2-4) -.Contraste de Factores de Seguridad (FS) de Métodos

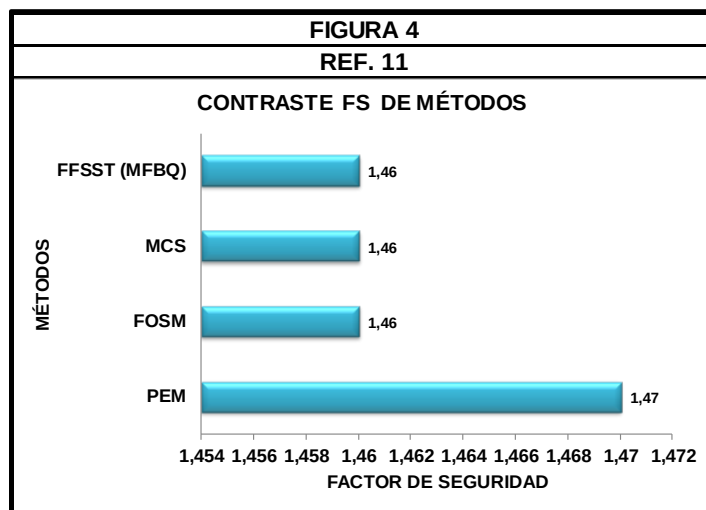
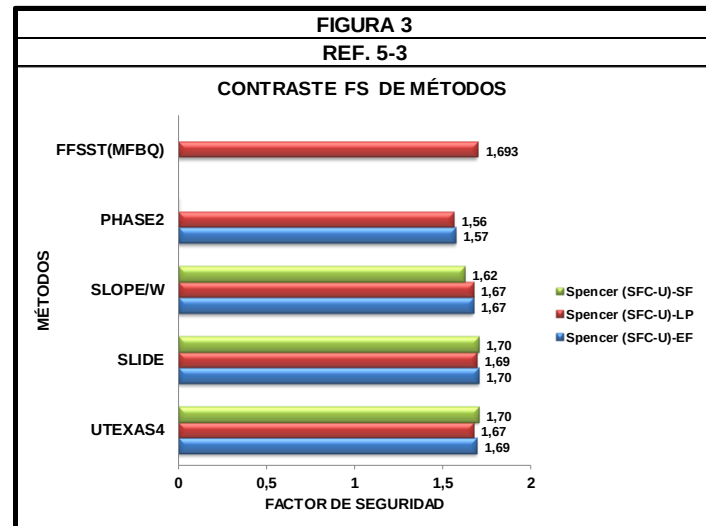
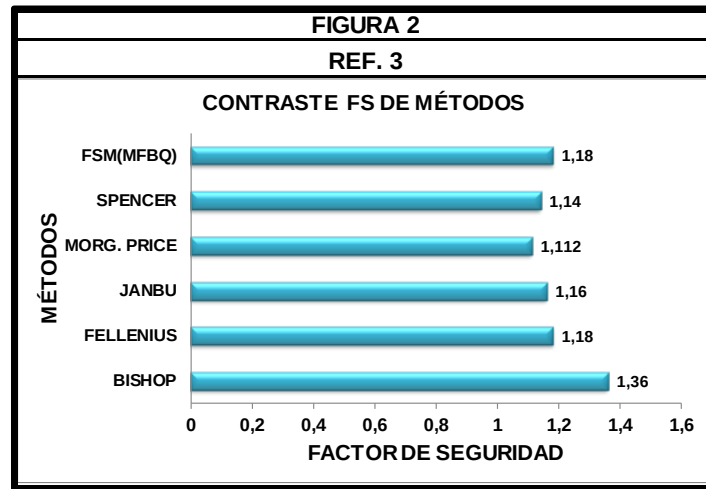


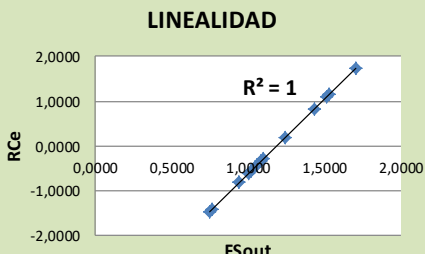
Tabla 5. Fiabilidad del Factor de Seguridad del Sistema Talud

Ref.	Fiabilidad	CV	B	Pf	PFST	FST	FFSST
1	Pre fiabilidad	0,2454	-1,4692	>0,5000	<0,500		0,737
	Fiabilidad	0,170	-2,1266	>0,5000		<0,500	
2	Pre fiabilidad	0,2261	0,7216	0,2431	0,7569		1,165
	Fiabilidad	0,2043	0,7987	0,2119		0,7882	
2_1	Pre fiabilidad	0,1467	2,0366	0,0228	0,9772		1,411
	Fiabilidad	0,1178	2,5372	0,0047		0,9953	
3	Prefiabilidad	0,3005	0,5229	0,3085	0,6915		1,190
	Fiabilidad	0,2536	0,6196	0,2743		0,7257	
4	Pre fiabilidad	0,3373	1,0294	0,1587	0,8413		1,568
	Fiabilidad	0,2881	1,2049	0,1151		0,8849	
5	Pre fiabilidad	0,1975	0,5717	0,2743	0,7257		1,147
	Fiabilidad	0,1343	0,8407	0,2119		0,7881	
5_1	Pre fiabilidad	0,3335	0,3535	0,3446	0,6554		1,154
	Fiabilidad	0,270	0,4363	0,3085		0,6915	
5_2	Pre fiabilidad	0,2776	0,5947	0,2743	0,7257		1,237
	Fiabilidad	0,2051	0,805	0,2119		0,7881	
5_3	Pre fiabilidad	0,2758	1,4459	0,0668	0,9332		1,693
	Fiabilidad	0,2336	1,7072	0,0454		0,9546	
6	Pre fiabilidad	0,3027	1,2965	0,0979	0,9021		1,684
	Fiabilidad	0,2578	1,5221	0,0668		0,9332	
7	Pre fiabilidad	0,1378	3,5897	0,0002	1,000		2,012
	Fiabilidad	0,1019	4,8505	0,0000		1,000	
8	Pre fiabilidad	0,3024	0,5357	0,3085	0,6915		1,232
	Fiabilidad	0,230	0,7055	0,2431		0,7569	
9	Pre fiabilidad	0,0147	19,872	0,0000	1,000		1,407
	Fiabilidad	0,020	14,7108	0,0000		1,000	
10	Prefiabilidad	0,0127	40,7632	0,0000	1,000		2,135
	Fiabilidad	0,0292	17,7075	0,0000		1,000	
11	Pre fiabilidad	0,1782	1,7808	0,0359	0,964		1,460
	Fiabilidad	0,1447	2,1938	0,0139		0,9861	

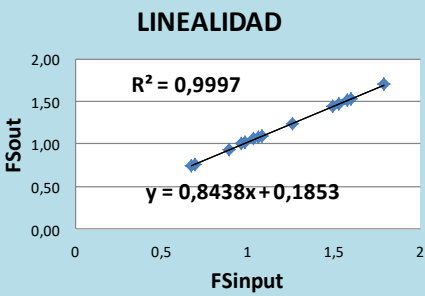
Tabla 6. Fiabilidad del Factor de Seguridad del Sistema Talud. Talud con Cohesión y Fricción. Los FSinput se calcularon con el Método de Fellenius

Nº	FSinput	FSNi	Fsig	Ri	RCi	RCi²	SRi	RCei	FSC i	FSout i
1	0,69	-1,3924	0,1990	-0,1137	-0,0782	0,0061	0,0557	-1,4042	0,7682	0,7639
2	1,06	-0,3546	0,4123	-0,0548	-0,0193	0,0004	0,0557	-0,3460	1,0793	1,0823
3	0,98	-0,5790	0,3592	-0,0670	-0,0315	0,0010	0,0557	-0,5659	1,0115	1,0162
4	1,03	-0,4387	0,3920	-0,0593	-0,0238	0,0006	0,0557	-0,4281	1,0538	1,0576
5	0,89	-0,8314	0,3033	-0,0811	-0,0455	0,0021	0,0557	-0,8182	0,9355	0,9402
6	0,96	-0,6351	0,3464	-0,0701	-0,0346	0,0012	0,0557	-0,6214	0,9946	0,9995
7	1,08	-0,2985	0,4259	-0,0517	-0,0162	0,0003	0,0557	-0,2916	1,0962	1,0987
8	1,26	0,2064	0,5514	-0,0246	0,0109	0,0001	0,0557	0,1953	1,2491	1,2452
9	1,60	1,1600	0,7613	0,0285	0,0640	0,0041	0,0557	1,1498	1,5360	1,5324
10	0,67	-1,4485	0,1902	-0,1171	-0,0815	0,0066	0,0557	-1,4649	0,7515	0,7456
11	1,79	1,6929	0,8446	0,0606	0,0961	0,0092	0,0557	1,7268	1,6939	1,7060
12	1,49	0,8514	0,7009	0,0108	0,0463	0,0021	0,0557	0,8314	1,4437	1,4366
13	1,58	1,1039	0,7510	0,0252	0,0607	0,0037	0,0557	1,0911	1,5193	1,5147
14	1,53	0,9636	0,7239	0,0171	0,0526	0,0028	0,0557	0,9459	1,4774	1,4710
FSinput-p	FSinput-S	ΣFSNi	FSNip	Rip	RCip = ΣRCi	ΣRCi²	S-Ri	ΣRCei= RCeip	FSCp	FSoutp
1,1864	0,3565	0,0000	0,0000	-0,0355	0,0000	0,0403	0,0557	0,0000	1,1864	1,1864
								S FSC=SFsout	0,3009	0,3009
PRE-FIABILIDAD DEL SISTEMA TALUD				VALORACIÓN ESTADÍSTICA DEL SISTEMA TALUD						
CV	B	Pf	PFST	VAR RC =S²	SRC	SRcei	SCE	SCR	NORMALIDAD	
0,3005	0,5229	0,3085	0,6915	0,0031	0,0557	1	0,0403	134,1908	A	JB
GRADOS DE LIBERTAD				R²estand	R²ajustado	Etípico	SST	FISHER	0,19	0,83
n	n-1	k	n-k-1	0,9997	0,9997	0,0579	134,2311	39988,0000	K	JB <c²(2), 0,05
14	13	1	12					FISHERtab	1,87	
				COV (FSinput vs FSout)		r (Coef. Correlac. Lineal)		4,75	c²(2), 0,05	5,99
				0,1073		0,9999			No se rechaza Ho	

LINEALIDAD



LINEALIDAD

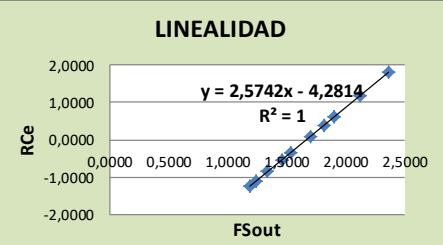


T STUDENT		FIABILIDAD DEL SISTEMA TALUD (FST)		
T13,0.025=	2,1604	FSout	1,1864	
IC(+)=	1,36015809	S	0,3009	
IC(-)=	1,012699053	CV	0,2536	
IC(-)	<FFSST< IC(+)	B	0,6196	
ESTADIST. DE DURBIN-WATSON		Pf	0,2743	
(AUTOCORRELAC.-INDEPENDEN.)		FST	0,7257	
dl=	1,045	FIABILIDAD DEL FACTOR DE SEGURIDAD		
DW	1,581	DEL SISTEMA TALUD (FFSST)		
du=	1,350	FFSST		1,190
No rechazar la H0		OBSERVACION:		
HOMOCEDASTICIDAD		RESULTADO SEGÚN TECNICA PROPUESTA		
Todas las Perturbaciones o Residuos tienen la misma Varianza.		MFBQ	FFSST	1,190
Var(ei)= σ²=cte. 1,0000		RESULTADOS DE PUBLICACIÓN		
		Referencia	Método	FS
		3	Fellenius	1,18
			Bishop	1,36
			Spencer	1,14
			Jambu	1,16
		Morgestern-Price		1,112
ECUACIÓN DE LA FFSST				
FFSST = (0,1853+ 0,8438*FSout p) * (1+SRC) * (1-α)				
α = 0,05				

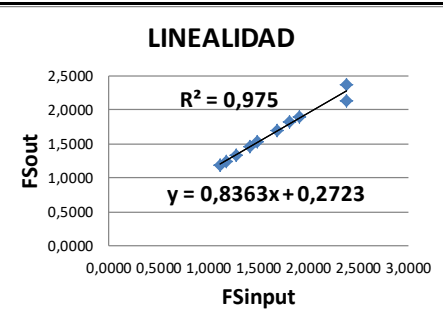
Tabla 7. Fiabilidad del Factor de Seguridad del Sistema Talud. Talud de Terraplén con Fricción y Cohesión. Los FSinput se calcularon con el Método de Bishop. "EARTH DAM WITH CORE-STEADY SEEPAGE"

Nº	FSinput	FSNi	Fsig	Ri	RCi	RCi²	S Ri	RCEi	FSC i	FSout i	
1	1,9020	0,5206	0,6273	-0,0107	0,0431	0,0019	0,0713	0,6049	1,8589	1,8982	
2	2,3840	1,5715	1,2700	0,0301	0,0839	0,0070	0,0713	1,1777	2,3001	2,1207	
3	1,2770	-0,8420	0,3011	-0,1143	-0,0605	0,0037	0,0713	-0,8495	1,3375	1,3332	
4	1,4117	-0,5483	0,3662	-0,0915	-0,0377	0,0014	0,0713	-0,5288	1,4494	1,4578	
5	1,1785	-1,0568	0,2579	-0,1315	-0,0777	0,0060	0,0713	-1,0903	1,2562	1,2397	
6	1,8112	0,3226	0,5800	-0,0257	0,0280	0,0008	0,0713	0,3935	1,7832	1,8161	
7	1,6790	0,0344	0,5086	-0,0474	0,0064	0,0000	0,0713	0,0892	1,6726	1,6979	
8	1,1183	-1,1880	0,2336	-0,1422	-0,0884	0,0078	0,0713	-1,2403	1,2067	1,1814	
9	2,3838	1,5710	0,8279	0,0743	0,1281	0,0164	0,0713	1,7974	2,2557	2,3615	
10	1,4866	-0,3850	0,4049	-0,0790	-0,0252	0,0006	0,0713	-0,3539	1,5118	1,5257	
FSinput-p	FSinput-S	ΣFSNi	FSNip	Rip	RCip = ΣRCi	ΣRCi²	S-Ri	ΣRCEi= RCEip	FSCp	FSoutp	
1,6632	0,4587	0,0000	0,0000	-0,0538	0,0000	0,0457	0,0713	0,0000	1,6632	1,6632	
								S FSC=SFSout	0,3885	0,3885	
PRE-FIABILIDAD DEL SISTEMA TALUD				VALORACIÓN ESTADÍSTICA DEL SISTEMA TALUD							
CV	B	Pf	PFST	VAR RC =S²	SRC	SRCEi	SCE	SCR	NORMALIDAD		
0,2758	1,4459	0,0668	0,9332	0,0051	0,0713	1	0,0457	1,7824	A	JB	
GRADOS DE LIBERTAD				R²estand	R²ajustado	Etípico	SST	FISHER	0,45	0,64	
n	n-1	k	n-k-1	0,9750	0,9719	0,0756	1,8281	312,0000	K	JB <c²(2), 0,05	
10	9	1	8					FISHERtab	2,15		
				COV (FSinput vs FSout)			r (Coef. Correlac. Lineal)		5,32	c²(2), 0,05	5,99
				0,1759			0,9874			No se rechaza Ho	

LINEALIDAD



LINEALIDAD



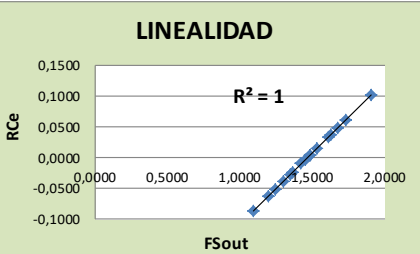
T STUDENT			FIABILIDAD DEL SISTEMA TALUD			
T9,0.025= 2,2622			FSout 1,6632			
IC(+) = 1,970548462			S 0,3885			
IC(-) = 1,414742613			CV 0,2336			
IC(-) <FFSST< IC(+)			B 1,7072			
			Pf 0,0454			
ESTADIST. DE DURBIN-WATSON			FST 0,9546			
(AUTOCORRELAC.-INDEPENDEN.)			FIABILIDAD DEL FACTOR DE SEGURIDAD			
di 0,879			DEL SISTEMA TALUD (FFSST)			
DW 2,045			FFSST 1,693			
du 1,320			OBSERVACION:			
No rechazar la H0			RESULTADO SEGÚN TECNICA PROPUESTA			
HOMOCEDASTICIDAD			MFBQ	FFSST 1,693		
Todas las Perturbaciones o Residuos tienen la misma Varianza.			RESULTADOS DE PUBLICACIÓN			
Var(ei)= σ2=cte. 0,0051			Referencia	Método FS		
PROCEDIMIENTO-SPENCER			5 3	Bishop 1,61		
(PRESIÓN DE PORO)			UTEXAS4	SLIDE	SLOPE/W	PHASE ²
SUPERFICIE DE FALLA CIRCULAR						
Elemento Finito			1,69	1,70	1,67	1,57
Linea Piezometrica			1,67	1,69	1,67	1,56
Linea Piezometrica Ajustada			1,7	1,7	1,62	N/A

ECUACIÓN DE LA FFSST

FFSST = (0,2733+ 0,8363*FSout p) * (1+SRC) * (1-α)

α = 0,05

Tabla 8. Fiabilidad del Factor de Seguridad del Sistema Talud. Riddolls & Grocott Ltd. (1999). Study Report (N° 83 (1999) "Quantitative Assessment Methods for Determining Slope Stability Risk in the buuilding Industry". Appendix A, Pag. 47

N°	FSinput	FSNi	Fsig	Ri	RCi	RCi²	SRI	RCEi	FSC i	FSout i
1	1,5500	0,3255	0,5807	-0,0159	0,0152	0,0002	0,0492	0,3087	1,5348	1,5304
2	1,7300	1,0148	0,7340	0,0176	0,0487	0,0024	0,0492	0,9899	1,6813	1,6748
3	1,7900	1,2446	0,7764	0,0293	0,0604	0,0036	0,0492	1,2280	1,7296	1,7253
4	1,9900	2,0105	0,8819	0,0705	0,1017	0,0103	0,0492	2,0672	1,8883	1,9032
5	1,2500	-0,8234	0,3051	-0,0705	-0,0394	0,0016	0,0492	-0,8009	1,2894	1,2952
6	1,4100	-0,2106	0,4475	-0,0411	-0,0100	0,0001	0,0492	-0,2034	1,4200	1,4219
7	1,4900	0,0957	0,5239	-0,0268	0,0044	0,0000	0,0492	0,0889	1,4856	1,4838
8	1,6700	0,7851	0,6868	0,0061	0,0373	0,0014	0,0492	0,7579	1,6327	1,6256
9	1,3100	-0,5936	0,3558	-0,0593	-0,0282	0,0008	0,0492	-0,5735	1,3382	1,3434
10	1,4500	-0,0574	0,4856	-0,0339	-0,0028	0,0000	0,0492	-0,0571	1,4528	1,4529
11	1,4900	0,0957	0,5239	-0,0268	0,0044	0,0000	0,0492	0,0889	1,4856	1,4838
12	1,6500	0,7085	0,6701	0,0024	0,0335	0,0011	0,0492	0,6818	1,6165	1,6095
13	1,0100	-1,7425	0,1490	-0,1182	-0,0871	0,0076	0,0492	-1,7706	1,0971	1,0897
14	1,1300	-1,2829	0,2171	-0,0937	-0,0626	0,0039	0,0492	-1,2731	1,1926	1,1952
15	1,1900	-1,0531	0,2586	-0,0820	-0,0509	0,0026	0,0492	-1,0339	1,2409	1,2458
16	1,3300	-0,5170	0,3736	-0,0557	-0,0245	0,0006	0,0492	-0,4987	1,3545	1,3593
FSinput-p	FSinput-S	ΣFSNi	FSNip	Rip	RCip = ΣRCi	ΣRCi²	S-Ri	ΣRCEi= RCEip	FSCp	FSout p
1,4650	0,2611	0,0000	0,0000	-0,0311	0,0000	0,0363	0,0492	0,0000	1,4650	1,4650
								S FSC=FSout	0,2120	0,2120
PRE-FIABILIDAD DEL SISTEMA TALUD				EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DEL SISTEMA TALUD						
CV	B	PI	PFST	VAR RC = S²	SRC	SRCei	SCE	SCR	NORMALIDAD	
0,1782	1,7808	0,0359	0,9641	0,0024	0,0492	1	0,0363	60,4391	A	JB
GRADOS DE LIBERTAD				R²estand	R²ajustado	Etípico	SST	FISHER	0,20	0,22
n	n-1	k	n-k-1	0,9994	0,9994	0,0509	60,4754	23319,3333	K	JB <c² (2), 0,05
16	15	1	14					FISHERtab	2,58	
				COV (FSinput vs FSout)		r (Coef. Correlac. Lineal)		4,60	c² (2), 0,05	5,99
				0,0553		0,9997		No se rechaza Ho		
LINEALIDAD 				T STUDENT			FIABILIDAD DEL SISTEMA TALUD (FST)			
				T _{15,0,025} = 2,1315			FSout			
				IC(+) = 1,57794788			S			
				IC(-) = 1,35205212			CV			
				IC(-) <FFSST< IC(+)			B			
				ESTADIST. DE DURBIN-WATSON			FST			
				(AUTOCORRELAC.-INDEPENDEN.)			FIABILIDAD DEL FACTOR DE SEGURIDAD			
				dl 1,106			DEL SISTEMA TALUD (FFSST)			
				DW 1,29			FFSST			
				du 1,371			1,460			
				La prueba no es concluyente			OBSERVACION:			
				HOMOCEDASTICIDAD			RESULTADOS SEGÚN TECNICA PROPUESTA			
				Todas las Perturbaciones o Residuos tienen la misma Varianza.			MFBQ			
				Var(ei)= σ²=cte. 0,0024			FFSST			
				LA PRUEBA NO ES CONCLUYENTE			1,46			
							RESULTADOS DE PUBLICACIÓN			
							Referencia		Método	
							11		FS	
									Point Estimate	
									Method	
									First Order	
									Second Moment	
									Monte Carlo	
									Simulation	
ECUACIÓN DE LA FFSST										
FFSST = (0,2762 + 0,8115*FSout p) * (1+SRC) * (1-α)										
α = 0,05										

V. CONCLUSIONES

La técnica propuesta es una herramienta o procedimiento técnico para evaluar mediante números aleatorios la variabilidad de los parámetros geotécnicos en la extensión de la superficie de deslizamiento, variabilidad que no son considerados en los métodos tradicionales de análisis de estabilidad de taludes que definen un valor único determinístico.

La técnica propuesta conjuga conceptos de la teoría de probabilidades y estadística para un mejor análisis racional de la incertidumbre implícita en los problemas de la Ingeniería Geotécnica, muy especialmente en los parámetros geotécnicos, cuantificándose la incertidumbre en las variables, PFST, FST y FFSST.

La técnica propuesta es una herramienta con la que el Ingeniero Geotécnico puede contar para la toma de decisiones sobre la confiabilidad en estabilidad de taludes en suelos. Se puede obtener una mejor precisión del factor de seguridad y probabilidad de falla.

La determinación de PFST, FST y FFSST basado en factores de seguridad aleatorios como datos de entrada a la hoja electrónica de cálculo para la aplicación de la técnica propuesta, implica determinar el índice de confiabilidad y la probabilidad de falla del sistema talud lo que amplía el criterio de evaluación y mayor certeza en la toma de decisiones sobre la estabilidad del sistema talud.

Con los parámetros geotécnicos en condiciones aleatorias, se puede aplicar el método de

equilibrio límite de preferencia y obtener así, los FS en condiciones aleatorias; se tendrán tantos FS aleatorios como número de dovelas que se haya determinado con la geometría del círculo de falla. El campo aleatorio considera la variabilidad espacial de los parámetros geotécnicos.

La variabilidad de las características del suelo o de los parámetros geotécnicos en toda la extensión de la superficie del talud indica que la estabilidad del talud representa un escenario probabilístico más que determinístico.

Los factores de seguridad (FST y FFSST) obtenidos con la técnica propuesta, tomando en consideración las condiciones aleatorias de los parámetros geotécnicos o variabilidad espacial de las propiedades del suelo, indican que se obtienen buenos resultados al comparar dichos valores con los factores de seguridad reportados en las publicaciones citadas en referencia.

Los resultados obtenidos a través de los quince (15) taludes analizados, cuyo resumen está en tabla IV, permiten concluir que la técnica propuesta, utilizando factores de seguridad aleatorizados y, con la aplicación de una función sigmoide y evaluación estadística de los residuos, puede ser usada como una herramienta de predicción para evaluar la fiabilidad del sistema talud (FST) y la fiabilidad del factor de seguridad del sistema talud (FFSST) mediante el uso de números aleatorios, considerándose así, la variabilidad y la incertidumbre no implícita en el análisis clásico de estabilidad de taludes en suelos.

En la técnica propuesta y aplicada a quince (15) casos de taludes tal como han sido publicadas según las referencias, se evaluó la incertidumbre considerando los parámetros geotécnicos de fricción y cohesión. Se analiza un solo caso con valores aleatorios del peso unitario (γ_{fill} , γ_{clay}). Se puede considerar la variabilidad de otros parámetros geotécnicos.

La serie de valores aleatorios deben ser muy bien seleccionados para obtener valores del factor de seguridad aleatorizado (F_{Sinput}) bien representativos del sistema talud.

Los factores de seguridad aleatorizados (F_{Sinput}) se pueden determinar con cualquier método de análisis de estabilidad de taludes de equilibrio límite. En la propuesta técnica se utilizó, según el caso presentado, el método de Fellenius y el Método de Bishop Simplificado.

La técnica propuesta es válida para análisis de fiabilidad en suelos considerando secciones de talud en dovelas o tajadas.

En la técnica propuesta y aplicada a los problemas indicados en las referencias se cumplen con los postulados de la regresión lineal múltiple.

Los postulados de la regresión lineal múltiple deben ser cumplidos para la determinación de la fiabilidad del sistema talud (FST) y la determinación de la fiabilidad del factor de seguridad del sistema talud (FFSST).

Los residuos se compensan unos a otros de forma que la suma de los residuos corregidos y la suma de los residuos corregidos estandarizados es siempre cero. La desviación de los residuos estandarizados es uno (1).

La suma de la diferencia y el promedio entre los factores de seguridad de entrada y los factores

de seguridad de salida ($F_{Sinput}-F_{Sout}$) es cero (0) con una bondad de ajuste próxima al 100 %.

La media de los F_{Sinput} coincide con la media o promedio de los FSC y los F_{Sout} , lo que significa que el valor absoluto medio es cero.

La desviación estándar de los F_{Sinput} es diferente a la desviación estándar de los FSC y F_{Sout} y La desviación estándar de los FSC es igual a la desviación estándar de los F_{Sout} .

Los resultados del coeficiente de determinación y el coeficiente de correlación lineal expresan la intensidad de la relación entre los F_{Sinput} y los F_{Sout} .

El coeficiente de variación a nivel de la FST es siempre inferior al 30%.

La prefiabledad del sistema talud (PFST) es un valor inicial-indicativo de la viabilidad del sistema talud y siempre es menor a la fiabilidad del sistema talud (FST).

La desviación estándar de los residuos corregidos (S_{RC}) es considerada para calcular la FFSST.

En la determinación de la FFSST se considera un nivel de significancia de 0,05. Este valor puede ser optativo y se puede considerar otro nivel de confianza a juicio del Ing. Geotécnico.

En el problema citado en la Ref. 11, se aplicó la técnica propuesta utilizando los valores de los factores de seguridad (FOS) dados en dicha publicación (pag. 47). Los resultados obtenidos indican buena correlación entre el FFSST y los valores de los factores de seguridad (FOS) publicados. Los resultados de la aplicación del estadístico Durbin-Watson, determinan que "La prueba no es concluyente".

De los quince análisis realizados con la técnica propuesta para determinar la fiabilidad del factor

de seguridad del sistema talud, se incluyen tres (3) hojas electrónicas de cálculo (tabla 6, 7, 8) y tres figuras (2-4) que evidencian los resultados obtenidos con la aplicación de la técnica propuesta.

VI. REFERENCIAS

- [1] Méndez, Eugenia (2016), análisis de estabilidad de taludes y factor de seguridad, CAPITULO V -1_644_282_497_5026. Pag.69-74
- [2] De Matteiss Alvaro F. 2003. "Geología y Geotécnia", Estabilidad de Taludes. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Ejercicio N° 1, pag. 33-36. Ejercicio N° 2, pag. 33, 37-39. GEOLOGIA Y GEOTECNIA-ESTABILIDAD DE TALUDES.
- [3] GEOSLOPE INTERNATIONAL, Ltd, 2018. "Stability Modeling with Geostudio". 1200,700-6th Ave SW, Calgary, AB, Canada T2O OT8. Pag. 31-33.
- [4] Duncan J. Michael. "Soil Slope Stability Analysis. Chapter 13. Sr.247-013.pdf. Page. 358.
- [5] Duncan J. Michael, Wright Stephen G, Thomas L. Brandom, 2014. "Soil Strength and Slope Stability". John Wiley & Sons, INC. New Jersey. Example 4. Pag. 142, 143, 144. Example 6. Pag. 147, 148, 149, 150. Example 7. Pag. 151-154. Example 8. Pag. 155-156.
- [6] Duncan J. M., Buchinani A.L. , De Wet, Marius, March, 1987. "An Engineering Manual for Slope Stability Studies". Report of a study performed by the Virginia Tech Center for Geotechnical Practice and Research. Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Civil and Environmental Engineering. Pag. 55 a 57.
- [7] Cernica John N., 1982. " Geotechnical Engineering" . Holt-Saunders International Editions. Japan. Example 11-3. Pag. 290-291.
- [8] Caro Soler John Freddy IBAGUÉ 2012. "ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES POR MÉTODOS DE DOVELAS". MÉTODO SIMPLIFICADO DE FELLENIUS, BISHOP Y JANBÚ. Seminario I. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil. Pag. 14.
- [9] Research Gate. Soil and Foundation, lesson 6, chapter 6-slope stability. Page 107-110.
- [10] Brady Pallavi, "Slope Stability". Slope stability-170412060011.pdf. Pag. 49-56.
- [11] Riddolls & Grocott Ltd, 1999. Quantitative Risk Assessment Methods for Determining Slope Stability Risk in the Building Industry. Building Research Association of New Zealand, Study Report SR 83, Judgeford. Pag.
- [12] Barlow, R.E. and Proschan, F. (1975). Statistical Theory of Reliability and Life Testing. Holt, Rinehart and Winston, NewYork.

[13] Genedenko B, et.al. (1965), Mathematical methods in the theory of reliability, Nauka, Moscow, p.524.

[14] Hasofer, Abraham M. y Lind, Niels C. (1974). "Un formato exacto e invariante de confiabilidad de primer orden". *Revista ASCE de la División de Ingeniería Mecánica*. Vol. 100. EM1. Febrero de 1974. 111-121

[15] Huang, Jinsong y DV Griffiths. "Observaciones sobre FORM en un ejemplo geomecánico simple". *Structural Safety* 33, no. 1 (2011): 115-119.

[16] G. Baecher, B, y J. T. Christian, *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, Chichester: John Wiley & Sons, 2003, 605 p.

[17] H. Wu, Reliability analysis of slopes," en *Reliability Based Design in Geotechnical Engineering-Computations and Applications*, K. K. Phoon, ed., Londres Taylor Francis, 2008. pp. 385-412.

[18] Box, G.E.P.; Wilson, K.B. (1951). «On the Conditions». *Journal of the Royal Statistical Society: Series B* 13 (1): 1-45. doi:10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067.x

[19] Castillón, Domínguez., David, Sergio (2014). Simulación. <https://www.academia.edu/7207310/Librodesimulacion>

[20] Casal, Rubén, Fernandez., Caos, Ricardo., Costa Julián (2023). Técnicas de Simulación y

Remuestreo.

<https://rubenfcasal.github.io/simbook/Simulacion.pdf>

[21] Ojeda, L.R. (2007), Probabilidad y Estadística Básica para Ingenieros. Escuela Superior Politécnica del Litoral de Ciencias Matemáticas, Guayaquil-Ecuador.

[22] Estuardo, M, G.A (2012), Estadística y Probabilidades. Instituto Profesional Virginio Gómez, Chile.

[23] Wackerely, D, Mendenhall , William, Scheaffer, L.R. (2009). Estadística Matemática con Aplicaciones, University of Florida. Cengage Learning.