

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE LOS  
METODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE APLICADO A TALUDES O LADERAS  
ALEDAÑAS AL CERRO DE LA POPA, CASCO URBANO DE CARTAGENA.**

**TRABAJO DE GRADO PARA TITULO DE:**

**INGENIERO CIVIL.**



**OSCAR ALEJANDRO AGUILAR GOENAGA.**

**CAMILO ERNESTO ZÚÑIGA ROMERO.**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**PROGRAMA INGENIERIA CIVIL**

**2015**



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE APLICADO A TALUDES O LADERAS ALEDAÑAS AL CERRO DE LA POPA, CASCO URBANO DE CARTAGENA.**

**Línea De Investigación:**

**EVALUACIÓN, EXPLORACION GEOTECNICA DEL SUBSUELO**

**Grupo De Investigación:**

**GEOMAT (GEOTECNIA Y MATERIALES)**

**Co-investigadores:**

**OSCAR ALEJANDRO AGUILAR GOENAGA.**

**CAMILO ERNESTO ZÚÑIGA ROMERO.**

**Investigador Y Director:**

**MSC. GUILLIAM BARBOZA**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARTAGENA D. T. Y C. – BOLIVAR**

**2015**



## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
1. MARCO DE REFENCIA. ....	9
2.1. Generalidades.....	9
2.2. Antecedentes.....	9
2.3. Estado del arte.....	10
2.4. Marco Teórico.....	14
1.4.1 Análisis de estabilidad.....	14
1.4.2 Método de Análisis de equilibrio limite o límite de equilibrio.....	14
1.4.3 Parámetros Utilizados en los Análisis de Límite de Equilibrio.....	18
1.4.4 Limitaciones de los Métodos de Límite de Equilibrio. ....	21
1.4.5 METODOS DE ANALISIS .....	23
1.4.6 Método Ordinario o de Fellenius.....	29
1.4.7 Método de Bishop simplificado.....	30
1.4.8 Método de Janbú simplificado.....	31
1.4.9 Método de Spencer .....	32
1.4.10 Método de Morgenstern y Price. ....	34
1.4.11 Comparación de los diversos métodos .....	35
2. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	38
2.3. DELIMITACIÓN ESPACIAL .....	39
3. METODOLOGIA .....	43
4. RESULTADOS Y DISCUCIONES.....	49
5. ANALISIS DE RESULTADOS. ....	105
5.6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS. ....	110



6. CONCLUSIONES. ....	113
7. RECOMENDACIONES. ....	115
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	116
ANEXOS .....	119

### LISTA DE TABLAS E ILUSTRACIONES.

Tabla 1:Listado de tablas para cálculo de estabilidad de taludes disponibles .....	23
Tabla 2: Tabla de resultados de factores de seguridad (azul).....	45
Tabla 3: Tabla para factores de seguridad de perfiles típicos (verde).....	46
Tabla 4: Tabla representativa de las ventajas y desventajas de cada método (amarillo).....	47
Tabla 5: Factores de seguridad obtenidos por el método de bishop simplificado pa .....	51
Tabla 6: Factores de seguridad obtenidos por el método ordinario o fellenius para .....	52
Tabla 7: Factores de seguridad obtenidos por el método de .....	52
Tabla 8: Factores de seguridad obtenidos por el método de Spencer para cada uno de los perfiles del sector del diamante por cada una de las condiciones. ....	53
Tabla 9: Factores de seguridad obtenidos por el método de morgenstern-price .....	53
Tabla 10: información geotécnica perfil 1 loma del Diamante. ....	55
Tabla 11: factores de seguridad perfil 1 loma del Diamante.....	56
Tabla 12: información geotécnica perfil 2 loma del Diamante. ....	57
Tabla 13: factores de seguridad perfil 2 loma del Diamante.....	57
Tabla 14: Perfil 1 con sus respectivos estratos de El Diamante .....	58
Tabla 15: información geotécnica perfil 4 loma del Diamante. ....	59
Tabla 16: factores de seguridad perfil 4 loma del Diamante.....	59
Tabla 17: información geotécnica perfil 12 loma del Diamante. ....	60
Tabla 18: factores de seguridad perfil 12 loma del Diamante.....	61
Tabla 19 : información geotécnica del sector lo amator.....	62
Tabla 20: Factores de seguridad obtenidos por el método de bishop.....	63
Tabla 21: Factores de seguridad obtenidos por el método Ordinario o Fellenius.....	63



Tabla 22: Factores de seguridad obtenidos por el método de Janbú .....	64
Tabla 23: Factores de seguridad obtenidos por el método de Spencer.....	65
Tabla 24: Factores de seguridad obtenidos por el método de morgenstern-price. ....	65
Tabla 25: información geotécnica perfil 1 lo Amador. ....	66
Tabla 26: : factores de seguridad perfil 1 lo Amador. ....	67
Tabla 27: información geotécnica perfil 2 lo Amador. ....	68
Tabla 28: factores de seguridad perfil 2 lo Amador. ....	68
Tabla 29: información geotécnica perfil 4 lo Amador. ....	69
Tabla 30: factores de seguridad perfil 4 lo Amador. ....	70
Tabla 31: información geotécnica perfil 6 Lo Amador. ....	71
Tabla 32: factores de seguridad perfil 6 lo Amador. ....	71
Tabla 33: información geotécnica del sector Salto del Carbron.....	72
Tabla 34: Factores de seguridad obtenidos por el método de bishop simplificado .....	73
Tabla 35: Factores de seguridad obtenidos por el método de Bishop simplificado .....	73
Tabla 36: Factores de seguridad obtenidos por el método de ordinario o fellenius .....	74
Tabla 37: Factores de seguridad obtenidos por el método ordinario o fellenius.....	74
Tabla 38: Factores de seguridad obtenidos por el método de janbú para cada uno de los perfiles del sector del salto del cabrón (lado derecho) por cada una de las condiciones.....	75
Tabla 39: Factores de seguridad obtenidos por el método de Janbú s.....	75
Tabla 40: Factores de seguridad obtenidos por el método de sepencer es .....	76
Tabla 41:Factores de seguridad obtenidos por el método de Spencer.....	76
Tabla 42: : Factores de seguridad obtenidos por el método de morgenstern-price .....	77
Tabla 43: Factores de seguridad obtenidos por el método de morgenstern-price .....	77
Tabla 44: información geotécnica perfil 1 Salto del Carbron. ....	78
Tabla 45: factores de seguridad perfil 1 salto del cabron lado derecho. ....	79
Tabla 46: factores de seguridad perfil 1 salto del cabron lado izquierdo. ....	79
Tabla 47: información geotécnica perfil 2 Salto del Cabron.....	80
Tabla 48: factores de seguridad perfil 2 Salto del Cabron. ....	81
Tabla 49: información geotécnica perfil 4 salto del cabron .....	81
Tabla 50: factores de seguridad perfil 4 salto del cabron lado derecho. ....	82
Tabla 51: factores de seguridad perfil 4 salto del cabron lado izquierdo. ....	82



Tabla 53: información geotécnica perfil 8 salto del cabron. ....	83
Tabla 54: factores de seguridad perfil 4 Salto del cabron lado derecho. ....	84
Tabla 55: información geotécnica del sector San Francisco fase I. ....	85
Tabla 56: Factores de seguridad obtenidos por el método de Bishop simplificado . ....	85
Tabla 57: Factores de seguridad obtenidos por el método de Ordinario o Fellenius . ....	86
Tabla 58: Factores de seguridad obtenidos por el método de janbú. ....	86
Tabla 59: Factores de seguridad obtenidos por el método de Spencer . ....	87
Tabla 60: Factores de seguridad obtenidos por el método de morgenstern-price . ....	87
Tabla 61: información geotécnica perfil 1 san francisco 1. ....	88
Tabla 62: factores de seguridad perfil 1 San Francisco 1. ....	89
Tabla 63: información geotécnica perfil 3 san francisco 1. ....	90
Tabla 64: factores de seguridad perfil 3 san francisco 1. ....	91
Tabla 65: información geotécnica perfil 4 san francisco 1. ....	92
Tabla 66: factores de seguridad perfil 4 san francisco 1. ....	92
Tabla 67: información geotécnica perfil 6 san francisco 1. ....	94
Tabla 68: factores de seguridad perfil 6 san francisco 1. ....	94
Tabla 69: información geotécnica perfil 6 san francisco 1. ....	95
Tabla 70: Factores de seguridad obtenidos por el método de Bishop simplificado . ....	96
Tabla 71: Factores de seguridad obtenidos por el método Ordinario o Fellenius. ....	96
Tabla 72: Factores de seguridad obtenidos por el método de janbú . ....	97
Tabla 73: Factores de seguridad obtenidos por el método de spencer . ....	97
Tabla 74: Factores de seguridad obtenidos por el método de morgenstern-price. ....	98
Tabla 75: información geotécnica perfil 1 san francisco 2. ....	99
Tabla 76: factores de seguridad perfil 1 san francisco 2 . ....	100
Tabla 77: información geotécnica perfil 3 san francisco 2. ....	101
Tabla 78: factores de seguridad perfil 3 san francisco 2. Elaborado: los autores. ....	101
Tabla 79: información geotécnica perfil 4 san francisco 2. ....	102
Tabla 80 : factores de seguridad perfil 4 san francisco 2. ....	103
Tabla 81: factores de seguridad perfil 5 san francisco 2. ....	105
Tabla 82: Tabla de paramentaros, ventajas y desventajas de cada método. ....	112



## RESUMEN

Ante los riesgos latentes que se encuentra en distintos sectores del cerro LA POPA (Loma del Diamante, Salto Del Cabron, y Lo Amador) y sectores del barrio San Francisco , la Universidad de Cartagena se ha puesto en la tarea de mitigar los fenómenos de movimientos en masa, a través de estudios y obras ejecutadas en este sector de la ciudad, nuestro proyecto de grado abarcara una parte de estos estudios, a través de un análisis comparativo de los factores de seguridad y los parámetros que influyen en el cálculo de este (geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de los sismos, flujo de agua, propiedades de resistencia y peso unitario de los suelos, etc.). Para realizar el proyecto se tomaron 4 perfiles típicos de cada zona de estudio, a los cuales se le definió la estratigrafía y todos los datos geotécnicos para proceder a calcular el factor de seguridad utilizando el software Slide. Los métodos que mayor factor de seguridad brindan en cada una de las zonas son el de Spencer, Bishop simplificado y Morgenstern Price y los que menos factor de seguridad arrojan son los de Janbú y el Ordinario o Fellenius.

## ABSTRAC

Given the latent risks found in various sectors of Cerro La Popa (Loma del Diamante, Jumping Bastard, and The Amador) and Sectors neighborhood San Francisco, the University of Cartagena has been m in Task mitigate phenomena movements in mass, through studies and works carried out in this sector of the city, our graduation project will cover a part of these studies, a UN Through comparative analysis of safety factors and parameters that influence the calculation This (geometry of the slope, geological parameters, presence of tension cracks, dynamic loads per share of earthquakes, water flow, strength properties and unit weight of the soil, etc.). For the project four typical profiles of each area of study, which will define the stratigraphy and all geotechnical data one paragraph procedure to calculate the factor of the floor, using the software slides were taken. The methods Security factor mayor offered in each of the areas the son Spencer, simplified Bishop and Morgenstern Price and least safety factor Janbu throw the child and the Ordinary or Fellenius.



## INTRODUCCIÓN

El cerro de la Popa es uno de los sitios más históricos y emblemáticos de la ciudad de Cartagena, se está viendo afectado debido a la deforestación y la invasión de personas que han construido viviendas en sus laderas. Muchos han talado los árboles y las plantas para transformarlos en leña, que luego usan para cocinar ante la carencia de servicios públicos. También han llevado animales para el pastoreo que, de paso, han compactado el suelo y han arrasado con las plantas. Aunque hay que aclarar que no faltan las casas que tienen agua y energía eléctrica e incluso títulos de propiedad”, explicó Rodrigo Sánchez, profesional del Establecimiento Público Ambiental de Cartagena (EPA).

Esta deforestación ha sido el “cáncer” de la Popa, ya que como no hay árboles suficientes el suelo ha perdido resistencia provocando erosión en el terreno y grandes deslizamientos ya que el suelo es de un material arcilloso y calcáreo muy frágil, explica personal de la Subdirección de Amenazas Geológicas del Ingeominas.

Cabe resaltar que se han identificado 110 Has (hectáreas) con problemas de movimientos en masa en esta zona de la ciudad (cerro de la popa), de los cuales La facultad de ingeniería de la Universidad de Cartagena ha realizado estudios en sectores que se encuentra en estado crítico, como lo son: Loma del diamante, lo amator, Salto de Cabron y San Francisco por eso se hace necesario tomar medidas urgentes para salvar la Popa, la Universidad de Cartagena ya ha adelantado estudios a estas zonas que se han visto afectadas.

En el proyecto se realizara un análisis comparativo de los factores de seguridad que arrojan los diferentes métodos de equilibrio límite a través de la utilización de la herramienta informática SLIDE el cual nos permite calcular los factores de seguridad usando como metodología algunos de los métodos de equilibrio limite, los cuales son: Ordinario o de Fellenius, Bishop simplificado, Janbú simplificado, Spencer, Morgenstern y Price. Y así posteriormente identificar teniendo en cuenta los parámetros que utiliza cada método para identificar cual es más conservador para cada uno de los sectores críticos que ya han sido sometidos a estudios con anterioridad.





## 1. MARCO DE REFERENCIA.

### 2.1.Generalidades.

Con el fin de resolver los problemas en las áreas de estudio por sus características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas son susceptibles a fenómenos denotativos tipo erosión en surcos y cárcavas, así como a fenómenos de remoción en masa tipo caída de bloques, flujos de fragmentos (rocas y detritos) y deslizamientos, se ha optado por la necesidad de la realización de estudios de estabilidad, ya que es una de las zona con mayor historia y patrimonio, que data su existencia de siglo anteriores, además de esto se le suma el factor antropico y es necesario garantizar la seguridad de los sectores de los alrededores.

A partir de los estudios realizados a sectores aledaños a la popa (Lo Amador, Salto del Cabrón, San Francisco y La Loma del Diamante) surge la necesidad de la estabilidad de alguno de los taludes estudiados en la zona, aplicaremos algunos de los métodos de limite de equilibrio con el fin de comparar los factores de seguridad arrojados, haciendo una de la software *SLIDE*.

### 2.2.Antecedentes.

La Oficina de Planeación Distrital de Cartagena conjuntamente con la Universidad de Cartagena llevaron a cabo los estudios “*EVALUACIÓN GEOTECNICA Y DISEÑOS DE OBRAS DE ESTABILIZACIÓN EN TRES SITIOS CRÍTICOS DEL CERRO DE LA POPA, CASCO URBANO DE CARTAGENA*”, en el ámbito, geológico, geotécnico, geomorfológico, geoamenzas, entre otros, como Plan para la Recuperación Integral del Cerro de la Popa.

Debido a la falta de disponibilidad de recursos económicos para elaborar todos los estudios simultáneamente, se planteó la necesidad de llevar a cabo un Plan de Acción, con el objeto de realizar por fases dichos estudios técnicos, partiendo de los sitios que generan mayores riesgos. Por lo tanto, en esta etapa del Plan, se definieron tres sectores: Sector Salto del



Cabrón y su área de influencia (10 Has), la Loma del Diamante (8,5 Has) y la zona de Lo Amador, Sector Ricaurte (2,8 Has).

La elaboración del presente estudio requirió el conocimiento de las características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, geotécnicas, de cobertura y uso del suelo del terreno. [3]

A partir de estos estudios surge la necesidad de la realización nuestro trabajo de grado, haciendo uso de estos estudios y otros datos que obtendremos posteriormente en el campo, por ello, se podría resaltar que nuestro trabajo de grado es un complemento o continuación de los estudios ya realizados con el fin de mitigar los riesgo ocurrido en el cerro de la popa.

### **2.3.Estado del arte.**

- **(SANHUEZA PLAZA, C.; RODRÍGUEZ CIFUENTES L):** corresponde a una investigación aplicada sobre un talud natural ubicado en la Quinta Región del país, donde uno de los objetivos fue comparar diferentes métodos de cálculo de estabilidad de taludes, bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. La comparación de los resultados ha sido llevada a cabo mediante la obtención de los factores de seguridad de las superficies potenciales de falla, a través del empleo del software GeoSlope, considerando los casos más desfavorables y empleando los modelos propuestos por Fellenius, Bishop y Janbú (método de las dovelas). Como resultado, se ha podido observar la influencia del sismo sobre un talud finito, la cual depende tanto de la magnitud Richter del terremoto, como de los valores de los coeficientes de aceleración sísmica (horizontal y vertical).

Las metodologías de cálculo utilizadas para analizar la estabilidad de un talud, basadas en el método de las dovelas, sigue siendo el de mayor uso, incrementándose aún más con la incorporación de herramientas computacionales. Por ello, en esta investigación se ha empleado el software GeoSlope, el cual se basa en los 3 parámetros del suelo (densidad, cohesión y ángulo de fricción). Sin embargo, se obvian otros de gran importancia como el módulo de deformación.



De los resultados obtenidos en el caso estático, se ha podido concluir que el método menos conservador resulta ser el propuesto por Janbú, en el cual se cumple el equilibrio de fuerzas, a diferencia de Bishop y Fellenius, quienes se basan en el equilibrio de momentos. Lo anterior se ve reforzado con las simplificaciones que cada método realiza. [18]

Este proyecto trata una temática similar al nuestro, de hecho, de los artículos, proyectos y tesis de grados este proyecto en particular, es el que presenta mayor similitud con nuestro proyecto, del cual se diferencian además de la localización geográfica, las condiciones a las que está sometido el talud en el que predominaban problemas sísmicos, también hace uso del software GeoSlope, mientras en nuestro proyecto haremos uso de la herramienta informática *SLIDE*.

- **B.S. Tork, E. Reyes, J.C. Gálvez y V. Navarro (2003):** En este trabajo se estudia la posibilidad de aplicar los modelos cohesivos de fractura al cálculo del factor de seguridad frente a deslizamiento de un talud de arcilla sobre consolidada. El modelo se aplica a dos taludes y los resultados obtenidos se comparan con los proporcionados por el método clásico.

En los ejemplos estudiados el modelo cohesivo proporciona valores medios del factor de seguridad  $F$  a deslizamientos similares a los proporcionados por el método clásico, pero pone de manifiesto que  $F$  puede variar considerablemente a lo largo de la línea de deslizamiento. Los resultados obtenidos animan a profundizar en el estudio de la aplicación de los modelos cohesivos de fractura al análisis de la estabilidad a deslizamiento de taludes.

Así como la determinación de criterio geométricos, el establecimiento de un factor de seguridad y la correcta ubicación de la obra y su proceso constructivo y como cada uno tiene variables específicas que lo hacen particular, porque debemos ser sumamente cuidadosos en el análisis de estas estructuras terreas ya que la información



obtenida en el proyecto da una mayor visión de lo que se puede llegar a la realidad.

[6]

La diferencia con nuestro proyecto es que el nuestro solo se limita a la comparación de los factores de seguridad arrojados por los métodos y así tener una fiabilidad de cual elegir. Este proyecto mencionado se extiende hasta la posibilidad de probar otro método distinto a los ya planteados.

- **Carlos Eduardo Espinoza Durán y Leandro Enrique Tapia Berzoza (2013) de la facultad de cuenca:** En este estudio la investigación se enfocó en utilizar las herramientas de modelación digital para cuantificar la seguridad de una presa de tierra. Se muestra una introducción al comportamiento de los esfuerzos a los que se verán sometidas las presas del proyecto PACALORI. Previo al cálculo, se efectúan muestreos y ensayos para asignar las características geotécnicas de resistencia propias del cimiento y el terraplén. Posteriormente, en el software SLOPE/W se realiza la modelación de la geometría de la presa y la introducción de sus características mecánicas; parámetros que regirán el funcionamiento mismo de la estructura. Se considera la variabilidad de hipótesis que se puede asignar a los métodos usados en el análisis de estabilidad de taludes, así como las condiciones en que éstos resultan confiables en la obtención del factor de seguridad. Con esta información se procede a la modelación del comportamiento mecánico de la presa, permitiendo aproximar los factores de seguridad mínimos que se tendrán para el diseño y futuras medidas de mitigación. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones sobre los resultados de la modelización para cálculos del resto de presas del proyecto a tratar.[7]

La principal diferencia con nuestro proyecto son las condiciones a las que está sometida el área de estudio, además de las herramientas usadas para el cálculo de los factores de seguridad.

- **Low y Tang (2001):** proponen un algoritmo un algoritmo de computador basado en una hoja de cálculo. La implementación incluye el cálculo determinántico bajo



suposiciones de los métodos *Spencer* y *Bishop* simplificado y el desarrollo de técnicas de *Optimización restringida*. Adicionalmente, el análisis contiene la búsqueda automática de la superficie de falla crítica y análisis de incertidumbre y variabilidad automática de la superficie de falla crítica y análisis de incertidumbre de variabilidad espacial de parámetro del suelo. [15]

Su principal diferencia radica en las herramientas utilizadas, además que la anterior tesis involucra mayor alcance en cuanto al análisis de incertidumbre, variabilidad automática de la superficie de falla crítica y análisis de incertidumbre de variabilidad espacial de parámetro del suelo.

- **Low (2003):** desarrolla una metodología práctica que involucra el cálculo del método *Spencer* con inclinación variable de las fuerzas laterales de las dovelas. La superficie de falla crítica se localiza por medio de *optimización restringida* presentado en el estudio anterior realizado en 2001.[16]

La diferencia con nuestro trabajo de grado radica en la utilización de los métodos, en nuestro proyecto se usa mas métodos que involucran el límite de equilibrio, mientras que el proyecto anterior se basa todo su estudio el cálculo del método *Spencer*

- **A.O. Oliva; M.A. Rodríguez; M.B. Prendes.** La rotura plana se produce en aquellos taludes donde por determinadas condiciones geológicas o geotécnicas, el deslizamiento de la masa de suelo ocurre a través de una única superficie plana, llamada plano de rotura. En el presente trabajo se proponen formulaciones analíticas basadas en el equilibrio límite, que permiten calcular el factor de seguridad y estudiar el comportamiento de los parámetros que intervienen en la estabilidad de taludes donde ocurre este tipo de rotura. Se comparan en diferentes taludes, los factores de seguridad calculados al aplicar las formulaciones analíticas con los obtenidos según los métodos clásicos. [1]



Este proyecto contiene algunos de los objetivos de nuestro proyecto pero su diferencia radica en las condiciones en las que esta los taludes de nuestro proyecto a la hora de hacer el cálculo de los factores de seguridad.

## **2.4.Marco Teórico.**

### **1.4.1 Análisis de estabilidad.**

Cuando se habla de estabilidad de un *talud* (acumulación de fragmentos de roca partida en la base de paredes de roca, acantilados de montañas, o cuencas de valles.) se trata de encontrar la altura crítica del talud o la carga de colapso aplicada sobre una porción del talud, para una geometría y características de suelo dados. Evaluar la estabilidad de un talud implica un estudio en el cual se debe, entre otros eventos: caracterizar la resistencia del suelo, establecer el perfil del talud así como las condiciones de filtración y agua subterránea, seleccionar una superficie de deslizamiento o falla y calcular su factor de seguridad, finalmente, a partir de este factor de seguridad (el cual se elige en base al destino del talud) se deberá determinar la superficie de falla crítica.

Dentro de las metodologías disponibles, se encuentran los métodos de límite de equilibrio, los métodos numéricos y los métodos dinámicos para el análisis de caídos de roca y flujos, entre otros. Para el análisis de estabilidad de nuestro talud en el cerro de la popa, se utilizara el los métodos que se desprenden a partir del método de límite de equilibrio o equilibrio limite.

### **1.4.2 Método de Análisis de equilibrio limite o límite de equilibrio.**

A través del método de límite de equilibrio permite obtener un factor de seguridad o a través de un análisis regresivo, obtener los valores de la resistencia al cortante en el momento de la falla. Una vez se han determinado las propiedades de resistencia al cortante de los suelos, las presiones de poros y otras propiedades del suelo y del talud, se puede

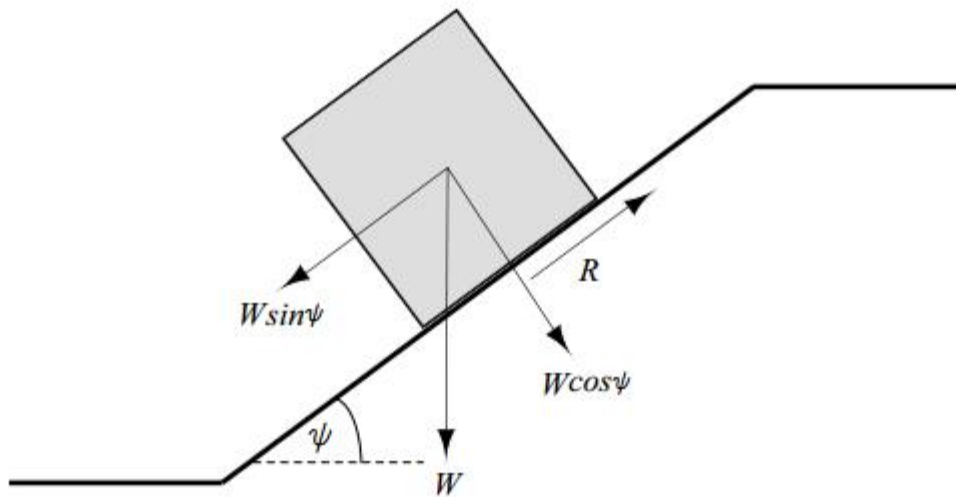


proceder a calcular el factor de seguridad del talud. Este análisis de estabilidad consiste en determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos de cortante que tienden a causar la falla o deslizamiento.

La mayoría de los métodos de límite de equilibrio tienen en común, la comparación de las fuerzas o momentos resistentes y actuantes sobre una determinada superficie de falla. Las variaciones principales de los diversos métodos son, el tipo de superficie de falla y la forma cómo actúan internamente las fuerzas sobre la superficie.

A partir de lo anterior se describirá el comportamiento físico (estático) en el cual está fundamentado los métodos del límite de equilibrio:

Consideremos un bloque de peso  $W$  que descansa sobre un plano inclinado de Angulo  $\psi$  respecto a la horizontal. El bloque solo es afectado por la fuerza de la gravedad de manera que el peso  $W$  actúa verticalmente como lo muestra la figura 1



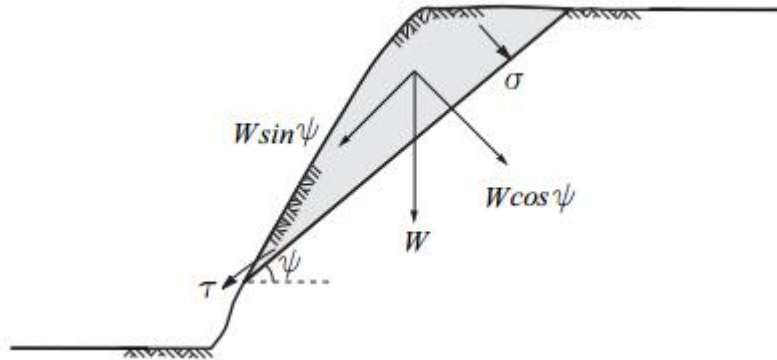
**Ilustración 1:** Bloque sobre plano inclinado a un ángulo  $\psi$  de la horizontal.

**Fuente:** (Hoek-E and Bray-J.W.1981)

La componente de  $W$  que tiende a mover el bloque hacia abajo es  $W \sin \psi$  y la componente que ayudar a estabilizarlo es  $W \cos \psi$ .



Al suponer que el bloque y la superficie está formada por *suelo*, entonces el *esfuerzo normal*  $\sigma$  que actúa a lo largo de la superficie de deslizamiento, se encuentra dado por:



**Ilustración 2:** Talud con superficie de falla plana a  $\psi$  grados de la horizontal. *Fuente:* Wyllie- D.C and Mah-C.W.2005

$$\sigma = \frac{W \cos \psi}{A} \quad (1)$$

Donde

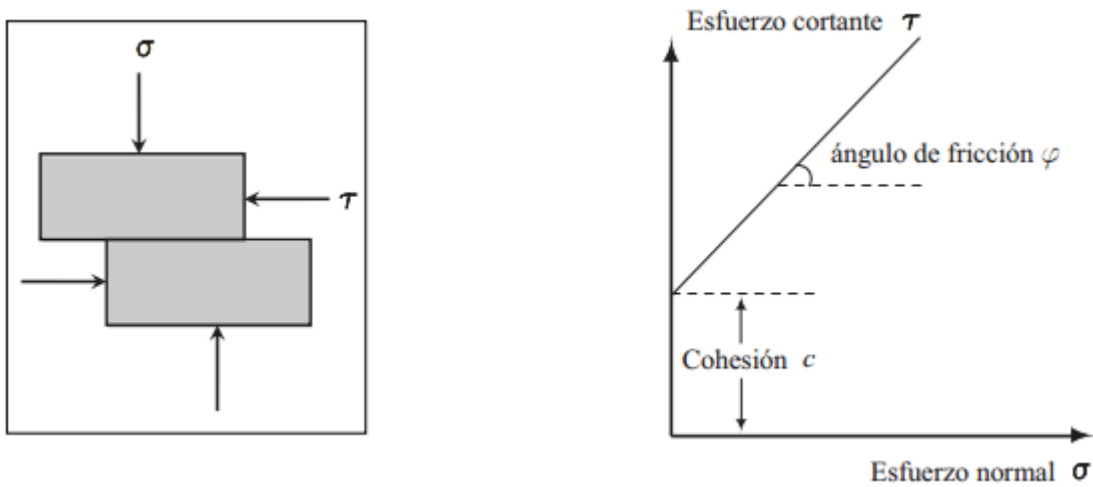
A= Área de la base del bloque.

El *esfuerzo cortante*  $\tau$  que actúa en esta superficie de “falla”, según la ecuación de *Mohr-Coulmbes*:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

La ecuación anterior, surge de la relación entre el *esfuerzo cortante* y el *esfuerzo normal* de una superficie de roca típica o de una muestra de suelo (Hoek-E and Bray-J.W.1981) Ver figura 3.





**Ilustración 3:** relación entre el esfuerzo cortante  $\tau$  y esfuerzo normal  $\sigma$ . *Fuente:* (Hoek-E and Bray-J.W 1981)

Sustituyendo la ecuación 1 en 2.

$$\tau = c + \frac{W \cos \psi}{A} \tan \varphi \quad (3)$$

La Ecuación 3 se convierte en:

$$R = cA + W \cos \psi \tan \varphi \quad (4)$$

Donde  $R = \tau A$ ; *Fuerza cortante que resiste el deslizamiento del bloque.* Ver figura 1.

El bloque se encuentra a punto de deslizarse o en *Equilibrio límite*, cuando la fuerza que tiende a mover el bloque hacia abajo del plano es exactamente igual a la *fuerza resistente*. De manera que:

$$W \sin \psi = cA + W \cos \psi \tan \varphi \quad (5)$$



Con el fin de incorporar el concepto de equilibrio límite en la estabilidad de taludes, se requiere el uso de un *Factor de seguridad*, este se define como la relación de todas las fuerzas que intervienen en la resistencia al deslizamiento sobre el total de las fuerzas que aportan al movimiento.

Considerando el bloque de la figura 1 tenemos que  $\eta$  se encuentra dado por:

$$\eta = \frac{cA + W \cos \psi \tan \varphi}{W \sin \psi} \quad (6)$$

Cuando el talud se encuentra en estado de *Equilibrio límite*, todas las fuerzas de *resistencia* y las fuerzas *desestabilizadoras* son iguales. En el caso anterior  $\eta = 1.0$  según la ecuación 6. EL talud es estable cuando las *fuerzas resistentes* son mayores a las *fuerzas desestabilizadoras*, de tal forma, que el factor de seguridad  $\eta$ , tiene que ser mayor que uno ( $\eta > 1.0$ ). En la Práctica, el factor de seguridad para taludes en minas a cielo abierto, generalmente varía entre 1.0 y 1.3, ya en estos taludes la estabilidad no se requiere para largos periodos de tiempo. En el caso de taludes adyacentes a vías principales el factor de seguridad es de 1.5 (Hoek-E and Bray-J.W.1981).

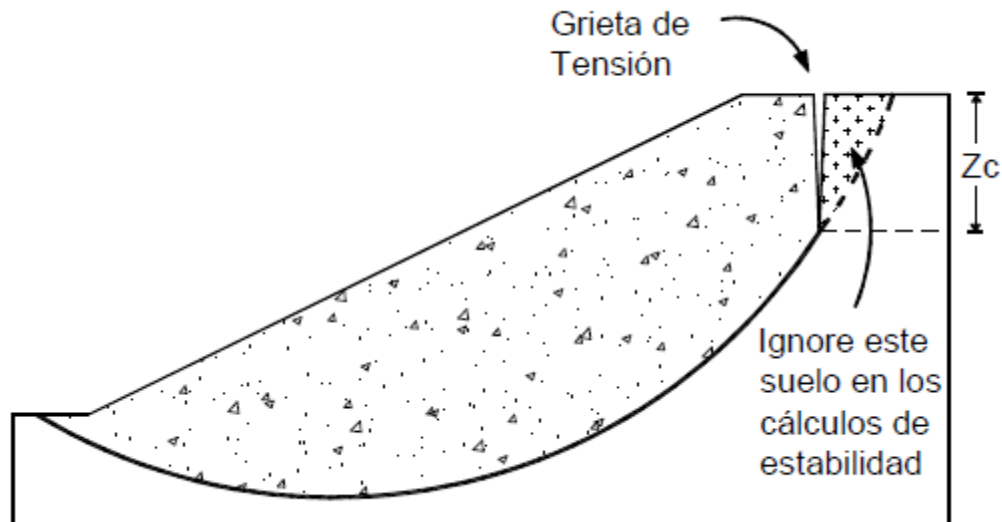
### 1.4.3 Parámetros Utilizados en los Análisis de Límite de Equilibrio

Los modelos tienen en cuenta los factores primarios que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de los sismos, flujo de agua, propiedades de resistencia y peso unitario de los suelos, etc. Sin embargo, no todos los factores que afectan la estabilidad de un talud se pueden cuantificar para incluirlos en un modelo matemático de límite de equilibrio. Por lo tanto, hay situaciones en las cuales un enfoque de límite de equilibrio no produce resultados satisfactorios.



- **Pesos unitarios**

El peso unitario es tal vez el parámetro más sencillo de medir para el análisis de estabilidad de los taludes, es el que influye menos en el factor de seguridad. Los pesos unitarios totales son pesos húmedos por encima del nivel freático y saturados por debajo de éste nivel. En el caso de que se utilicen pesos sumergidos, se debe ignorar la presencia de nivel freático. La densidad saturada se puede determinar asumiendo un valor de gravedad específica  $G$ , el cual se puede suponer igual a 2.68 para la mayoría de los suelos (Cornforth, 2005). (Jaime Suarez. 2002)



**Ilustración 4:** Esquema de una grieta de tensión para análisis de límite de equilibrio.

**Fuente:** Jaime Suarez. 2002

- **Resistencia al cortante.**

La resistencia al cortante que se va a utilizar en los análisis, puede ser medida por alguno de los métodos de laboratorio o de campo que se indicaron en el capítulo 3. Se debe tener en cuenta si se trata de condiciones drenadas o no drenadas o si el análisis es realizado en estado no-saturado. Los parámetros deben corresponder a los niveles de esfuerzos sobre las superficies de falla potenciales. En los casos en los cuales ya ha ocurrido la falla del talud, se recomienda emplear las resistencias residuales (Skempton, 1970, 1977,1985).



Igualmente, debe tenerse en cuenta la disminución de resistencia, con el tiempo. Para suelos que son completamente saturados, el ángulo de fricción para condiciones no drenadas, es igual a cero. La resistencia no drenada para suelos saturados puede ser determinada a partir de los ensayos no-consolidados no-drenados.(Jaime Suarez. 2002).

- **Condiciones drenadas o no drenadas.**

Las fallas de los taludes pueden ocurrir en condiciones drenadas o no drenadas. Si la inestabilidad es causada por los cambios en la carga, tal como la remoción de materiales de la parte baja del talud o aumento de las cargas en la parte superior (en suelos de baja permeabilidad) éstos pueden no tener tiempo suficiente para drenar durante el tiempo en el cual ocurre el cambio de carga. En ese caso, se dice que las condiciones son no drenadas. Generalmente, los suelos tienen permeabilidades suficientes para disipar las presiones de poros en exceso y se comportan en condiciones drenadas. Para las ratas normales de carga que equivalen a meses o semanas, se pueden considerar drenados suelos con permeabilidades mayores de  $10^{-4}$  cm/seg. En cambio, los suelos con permeabilidades menores de  $10^{-7}$  cm/seg, se consideran no drenados. Mientras, las permeabilidades intermedias se consideran parcialmente drenadas (Jaime Suarez. 2002).

Para determinar las condiciones de drenaje Duncan (1996) sugiere utilizar la siguiente expresión:

$$T = \frac{C_v t}{D^2} \quad (7)$$

*Dónde:*

T= Factor adimensional

C<sub>v</sub>= Coeficiente de consolidación

t = Tiempo de drenaje

D = Longitud del camino de drenaje o distancia de salida del agua al cambio de presiones.

Si T es mayor de 3, la condición es drenada.



Si  $T$  es menor de 0.01, la condición es no drenada.

Si  $T$  está entre 0.01 y 3.0, ocurre drenaje parcial durante el tiempo de cambio de cargas. En este caso, deben analizarse ambas condiciones, el caso drenado y el caso no drenado. (Jaime Suarez. 2002).

- ***Esfuerzos totales y efectivos***

Como se estudió en el capítulo anterior, los problemas de estabilidad de taludes pueden analizarse suponiendo sistemas de esfuerzos totales o efectivos. En principio, siempre es posible analizar la estabilidad de un talud utilizando el método de presión efectiva, porque la resistencia del suelo es gobernada por las presiones efectivas tanto en la condición drenada, como en la condición no drenada; sin embargo, en la práctica es virtualmente imposible determinar con precisión cuáles son los excesos de presión de poros que se van a generar por los cambios en las cargas (excavaciones, colocación de rellenos o cambios en el nivel de agua). (Jaime Suarez. 2002).

- ***Estabilidad a corto y a largo plazo***

En la estabilidad a corto plazo debe tenerse en cuenta que los suelos que no tienen un drenaje rápido, están sujetos a presiones de poros por acción de las cargas aplicadas. En la estabilidad a largo plazo, se supone que los suelos están drenados. Para la estabilidad (a corto plazo) de las arcillas normalmente consolidadas y de limos, se recomienda modelar con análisis de esfuerzos totales. Aunque se puede realizar el análisis empleando esfuerzos efectivos, es muy difícil estimar o medir las presiones de poros para su utilización en el análisis (Jaime Suarez. 2002).

#### **1.4.4 Limitaciones de los Métodos de Límite de Equilibrio.**

Los análisis de límite de equilibrio tienen algunas limitaciones entre las cuales se encuentran las siguientes:

- ***Se basan solamente en la estática.***



Como los métodos de límite de equilibrio se basan solamente en la estática y no tienen en cuenta las deformaciones, las distribuciones de presiones, en muchos casos, no son realistas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos esfuerzos no realistas, generalmente ocurren en algunas tajadas del análisis y no significa que el factor de seguridad general sea inaceptable (Jaime Suarez. 2002).

- ***Suponen los esfuerzos uniformemente distribuidos.***

Debe tenerse cuidado cuando existan concentraciones de esfuerzos debidos a la forma de la superficie de falla o a la interacción de suelo-estructura (Jaime Suarez. 2002)

- ***Utilizan modelos de falla muy sencillos.***

El diseño de taludes utilizando solamente la modelación con métodos de límite de equilibrio es completamente inadecuado si los procesos de falla son complejos, especialmente cuando están presentes los procesos de “creep”, la deformación progresiva, el flujo, la rotura por fragilidad, la licuación y otras formas de deterioro de la masa del talud(Jaime Suarez. 2002).

- ***Generalmente se asume el material como isotrópico.***

La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema, asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares. Sin embargo, el mecanismo de falla en los materiales residuales donde aparece el suelo, la roca meteorizada y la roca sana, así como las formaciones aluviales y coluviales no-isotrópicas, requiere de nuevos enfoques y del estudio de las superficies de falla no simétricas (Jaime Suarez. 2002).

- ***Presiones de poros.***

Las condiciones de presión de poros son generalmente obtenidas de las características de las aguas subterráneas y pueden especificarse para los análisis utilizando los siguientes métodos (Jaime Suarez. 2002)



- *Superficie freática*
- *Datos piezométricos*
- *Relación de presión de poros*
- *Superficie piezométrica*
- *Presión de poros constante*

#### 1.4.5 METODOS DE ANALISIS

A continuación se presentan algunos métodos de análisis universalmente conocidos para el cálculo del Factor de Seguridad de taludes con cualquier superficie de falla o cualquier deformación.

- **Método de tablas o número de estabilidad**

Para taludes simples homogéneos se han desarrollado tablas que permiten un cálculo rápido del Factor de Seguridad. Existe una gran cantidad de tablas desarrolladas por diferentes Autores. La primera de ellas fue desarrollada por Taylor en 1937 y 1948, las cuales son aplicables solamente para análisis de esfuerzos totales, debido a que no considera presiones de poro. Desde entonces varias tablas han sido sucesivamente presentadas por Bishop y Morgenstern (1960), Hunter y Schuster (1968), Janbú (1968), Morgenstern (1963), Spencer (1967), Terzaghi y Peck (1967) y otros, las cuales se resumen en la tabla 1 (Jaime Suarez. 2002).

**Tabla 1:** Listado de tablas para cálculo de estabilidad de taludes disponibles

utor	Parámetros	Inclinación de talud	Método analítico utilizado	Observaciones
<b>Taylor (1948)</b>	$c_u$	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado.
	$c, \phi$	0-90°	Círculo de fricción	Taludes secos solamente.



ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE APLICADO A TALUDES O LADERAS ALEDAÑAS AL CERRO DE LA POPA, CASCO URBANO DE CARTAGENA.



autor	Parámetros	Inclinación de talud	Método analítico utilizado	Observaciones
<b>Bishop y Morgenstern (1960)</b>	$c, \phi, r_u$	11-26.5°	Bishop	Primero en incluir efectos del agua.
<b>Gibsson y Morgenstern (1960)</b>	$c_u$	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con cero resistencias en la superficie y $c_u$ aumenta linealmente con la profundidad.
<b>Spencer (1967)</b>	$c, \phi, r_u$	0-34°	Spencer	Círculos de pie solamente.
<b>Janbú (1968)</b>	$c_u$ $c, \phi, r_u$	0-90°	$\phi = 0$ Janbú GPS	Una serie de tablas para diferentes efectos de movimiento de agua y grietas de tensión.
<b>Hunter y Schuster (1968)</b>	$c_u$	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con una resistencia inicial en la superficie y $c_u$ aumenta linealmente con la profundidad.
<b>Chen y Giger (1971)</b>	$c, \phi$	20-90°	Análisis límite	
<b>O'Connor y Mitchell (1977)</b>	$c, \phi, r_u$	11-26°	Bishop	Bishop y Morgenstern (1960) extendido para incluir $N_c = 0.1$
<b>Hoek y Bray (1977)</b>	$c, \phi$ $c, \phi$	0-90° 0-90°	Círculo de fricción Cuña	Incluye agua subterránea y grietas de tensión. Análisis de bloque en tres dimensiones.





autor	Parámetros	Inclinación de talud	Método analítico utilizado	Observaciones
<b>Cousins (1978)</b>	$c, \phi$	0-45 °	Círculo de fricción	Extensión del método de Taylor (1948).
<b>Charles y Soares (1984)</b>	$\phi$	26-63 °	Bishop	Envolvente de falla no lineal de Mohr-Coulomb.
<b>Barnes (1991)</b>	$c, \phi, r_u$	11-63 °	Bishop	Extensión de Bishop y Morgenstern (1960) para un rango mayor de ángulos del talud.

**Fuente:** Jaime Suarez. 2002

A continuación se presenta un resumen de las tablas desarrolladas por Janbú (1968). Esta serie de tablas tiene en cuenta diferentes condiciones geotécnicas y factores de sobrecarga en la corona del talud, incluye sumergencia y grietas de tensión.

*a. Para suelos  $\phi = 0$*

Las tablas indicadas en la Figura 5 pueden ser utilizadas para el análisis de estabilidad de taludes de suelos arcillosos sin fricción, de acuerdo a procedimiento desarrollado por Janbú (1968).

El Factor de Seguridad se obtiene por la siguiente expresión:

$$F.S. = N_o \frac{c}{\gamma H} \quad (8)$$

Donde:

$N_o$  = Número de estabilidad que se obtiene de la tabla

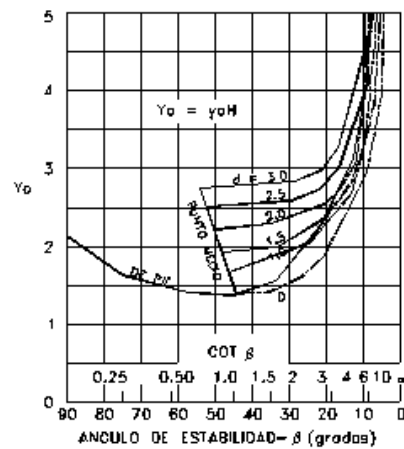
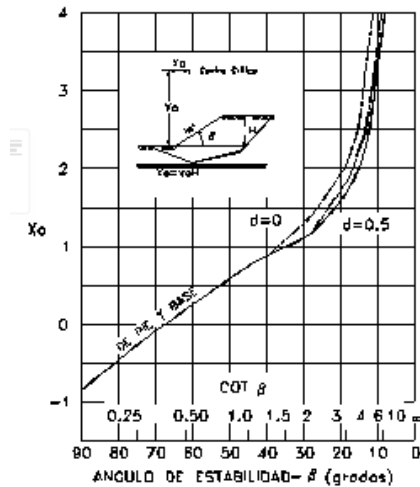
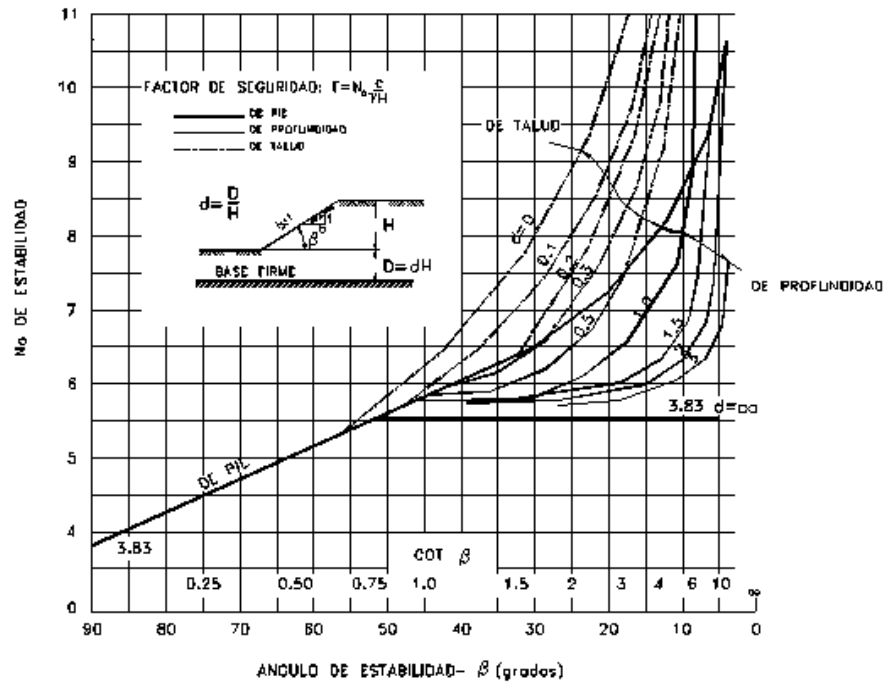
$c$  = Cohesión

$\gamma$  = Peso unitario del suelo

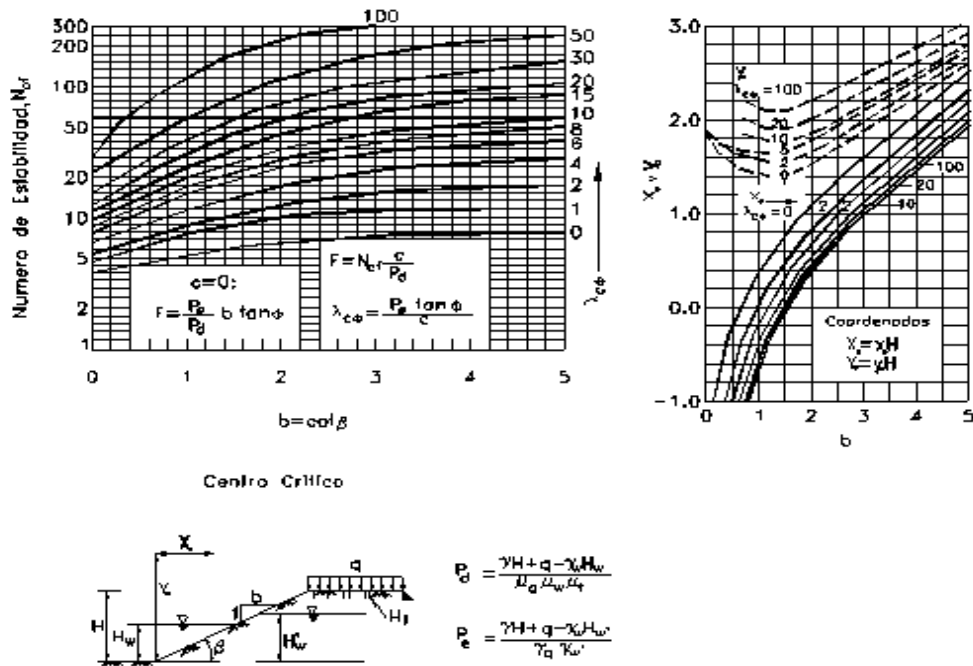
$H$  = Altura del talud



ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE APLICADO A TALUDES O LADERAS ALEDAÑAS AL CERRO DE LA POPA, CASCO URBANO DE CARTAGENA.



**Ilustración 5:** Tablas de estabilidad para suelos cohesivos ( $\phi = 0$ ) de acuerdo a Janbú (1968). estabilidad para suelos cohesivos ( $\phi = 0$ ) de acuerdo a Janbú (1968). **Fuente:** Jaime Suarez. 2002



**Ilustración 6 :** Tablas de estabilidad para suelos no cohesivos  $\phi > 0$  de acuerdo a Janbú (1968). *Fuente:* Jaime Suarez, 2002

**b. Para suelos  $\phi > 0$**

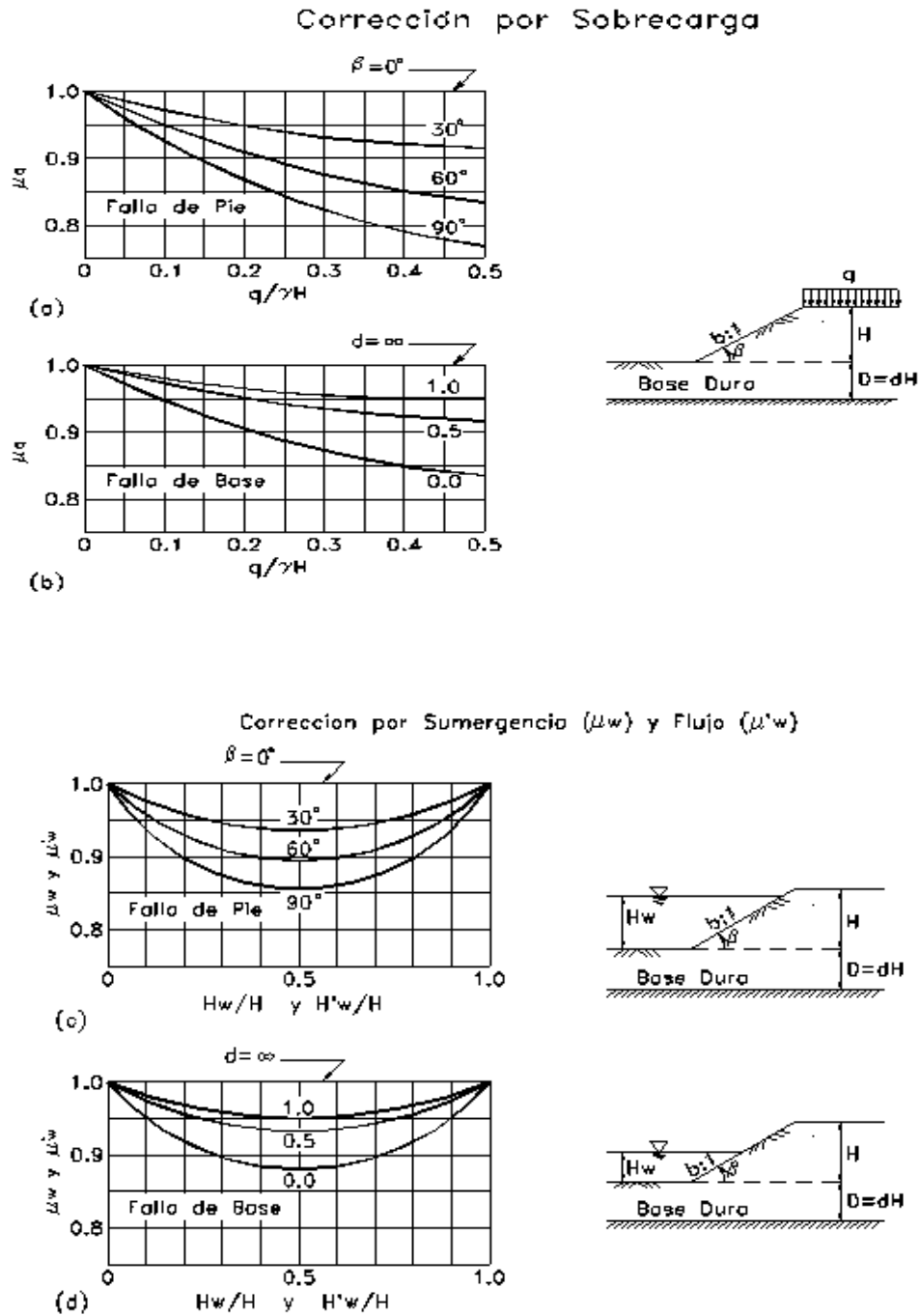
En la mayoría de los casos para suelos  $\phi > 0$  el círculo crítico pasa por el pie del talud y la tabla de estabilidad que se muestra en la figura 6, se basa en esta suposición. El factor de seguridad  $F$  es calculado por la expresión:

$$F.S. = N_{cf} \frac{C}{P_d} \quad (9)$$

Dónde:

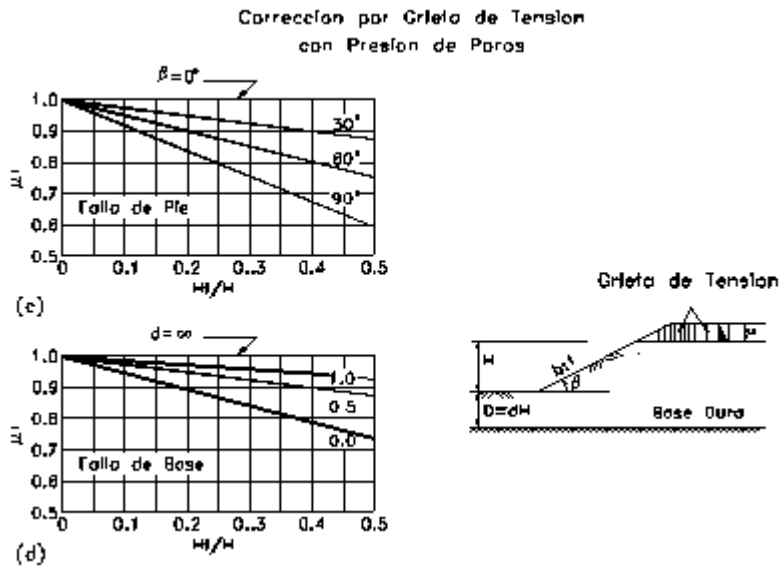
$N_{cf}$  y  $P_d$  son los obtenidos en la gráfica y  $c$  es la cohesión promedio

Al utilizar las tablas de Janbú se pueden emplear los factores de corrección por grietas de tensión, sobrecarga, sumergencia y flujo que se presentan en las figuras 7 y 8.



**Ilustración 7:** Factores de corrección por sobrecarga, sumergencia y flujo (Janbú, 1968).

*Fuente:* Jaime Suarez. 2002



**Ilustración 8:** Factores de corrección por grietas de tensión para su uso en las tablas de estabilidad (Janbú 1968). **Fuente:** Jaime Suarez. 2002

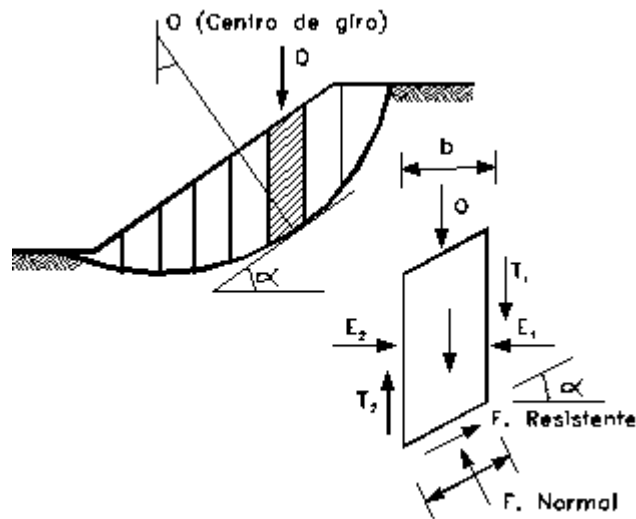
A partir de ellos mencionaremos los métodos los cuales haremos uso específico para la realización de la comparación de los resultados arrojados, los métodos son los siguientes:

#### 1.4.6 Método Ordinario o de Fellenius

Conocido también como método Sueco, método de las Dovelas o método U.S.B.R. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de estas fuerzas obtiene el Factor de Seguridad.

Las fuerzas que actúan sobre una dovela son (Figura 10):

- a. El peso o fuerza de gravedad, la cual se puede descomponer en una tangente y una normal a la superficie de falla.
- b. Las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en forma tangente a la superficie de falla.
- c. Las fuerzas de presión de tierras y cortante en las paredes entre dovelas, las cuales no son consideradas por Fellenius, pero sí son tenidas en cuenta en otros métodos de análisis más detallados (Jaime Suarez. 2002).



**Ilustración 9:** Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas. *Fuente:* Jaime Suarez. 2002

El método de Fellenius calcula el Factor de seguridad con la siguiente expresión:

$$F.S. = \frac{\sum [C' b \sec \alpha + (W \cos \alpha - u b \sec \alpha) \tan \phi]}{\sum W \sin \alpha} \quad (10)$$

$\alpha$  = Angulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada.

$W$  = Peso total de cada tajada.

$u$  = Presión de poros =  $\gamma_w h_w$

$b$  = Ancho de la tajada

$C', \phi$  = Parámetros de resistencia del suelo.

#### 1.4.7 Método de Bishop simplificado

Bishop (1955) presentó un método utilizando Dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las Dovelas.



La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón se utiliza una versión simplificada de su método, de acuerdo a la expresión (Jaime Suarez. 2002):

$$F.S. = \frac{\sum [C'b + (W - ub) \tan \alpha]}{\sum W \sin \alpha} \quad (11)$$

Donde:

$$ma = \cos \alpha \left( 1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{FS} \right) \quad (12)$$

$b$  = Ancho de la Dovela

$W$  = Peso de cada dovela

$C', \phi$  = Parámetros de resistencia del suelo.

$u$  = Presión de poros en la base de cada dovela =  $\gamma_w \times h_w$

$\alpha$  = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.

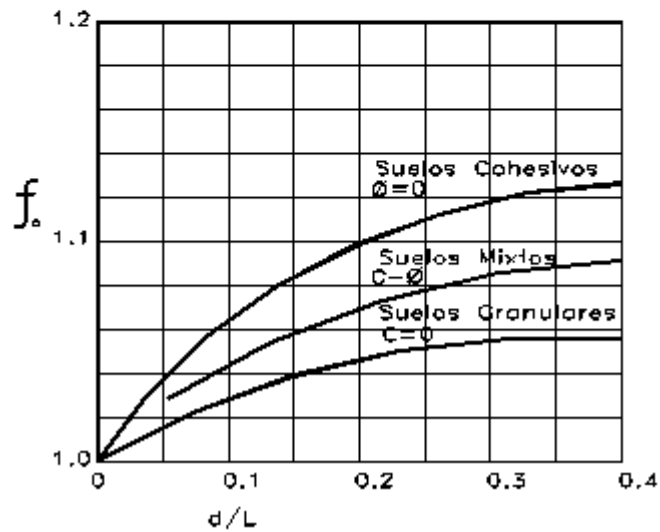
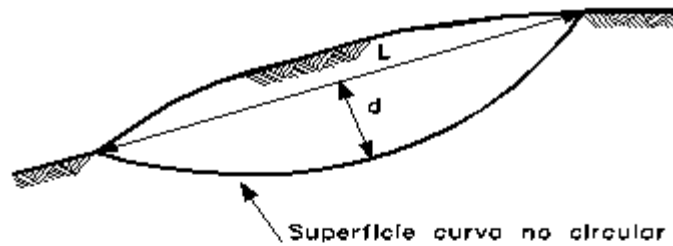
#### 1.4.8 Método de Janbú simplificado

Janbú (1973) presenta un método de Dovelas para superficies de falla curvas, no circulares.

De acuerdo con Janbú (ecuación modificada):

$$F.S. = \frac{f_o \sum [C'b + (W - ub) \tan \phi]}{\sum W \tan \alpha} \frac{1}{\cos \alpha ma} \quad (13)$$

Donde  $f_o$  depende de la curvatura de la superficie de falla (figura 11).



**Ilustración 10:** Diagrama para determinar el factor  $f_0$  para el método de Janbú. **Fuente:** Jaime Suarez. 2002

Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección  $F_0$  para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.

#### 1.4.9 Método de Spencer

El método de Spencer es un método que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos. El procedimiento de Spencer (1967) se basa en la suposición



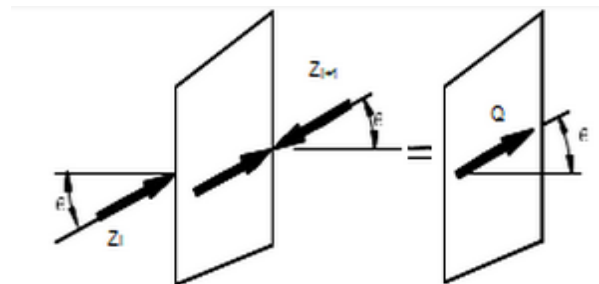


de que las fuerzas entre dovelas son paralelas unas con las otras, o sea, que tienen el mismo ángulo de inclinación.

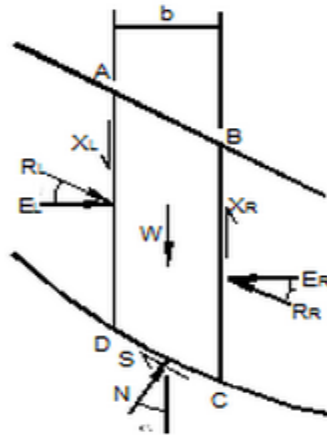
La inclinación específica de estas fuerzas entre partículas, es desconocida y se calcula como una de las incógnitas en la solución de las ecuaciones de equilibrio. Spencer inicialmente propuso su método para superficies circulares pero este procedimiento se puede extender fácilmente a superficies no circulares. Spencer plantea dos ecuaciones una de equilibrio de fuerzas y otra de equilibrio de momentos, las cuales se resuelven para calcular los factores de seguridad  $F$  y los ángulos de inclinación de las fuerzas entre dovelas  $\theta$ .

Para resolver las ecuaciones  $F$  y  $\theta$ , se utiliza un sistema de ensayo y error donde se asumen los valores de estos factores (en forma repetitiva) hasta que se alcanza un nivel aceptable de error.

Una vez se obtienen los valores de  $F$  y  $\theta$  se calculan las demás fuerzas sobre las dovelas individuales. El método de Spencer se considera muy preciso y aplicable para casi todo tipo de geometría de talud y perfiles de suelo y es tal vez, el procedimiento de equilibrio más completo y más sencillo para el cálculo del factor de seguridad. (Jaime Suarez, 2002).



**Ilustración 11:** Análisis Del Angulo De Inclinación En El Método De Spencer. *Fuente:* Jaime Suarez. 2002



**Ilustración 12:** Análisis De Fuerzas Por Dovelas En El Método De Spencer .*Fuente:* Jaime Suarez. 2002

#### 1.4.10 Método de Morgenstern y Price.

El método de Morgenstern y Price (1965) asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas.

Esta función puede considerarse constante, como en el caso del método de Spencer, o puede considerarse otro tipo de función. La posibilidad de suponer una determinada función para determinar los valores de las fuerzas entre dovelas, lo hace un método más riguroso que el de Spencer.

Sin embargo, esta suposición de funciones diferentes tiene muy poco efecto sobre el cálculo de factor de seguridad cuando se satisface el equilibrio estático y hay muy poca diferencia entre los resultados del método de Spencer y el de Morgenstern y Price. El método de Morgenstern y Price, al igual que el de Spencer, es un método muy preciso, prácticamente aplicable a todas las geometrías y perfiles de suelo. (Jaime Suarez, 2002).



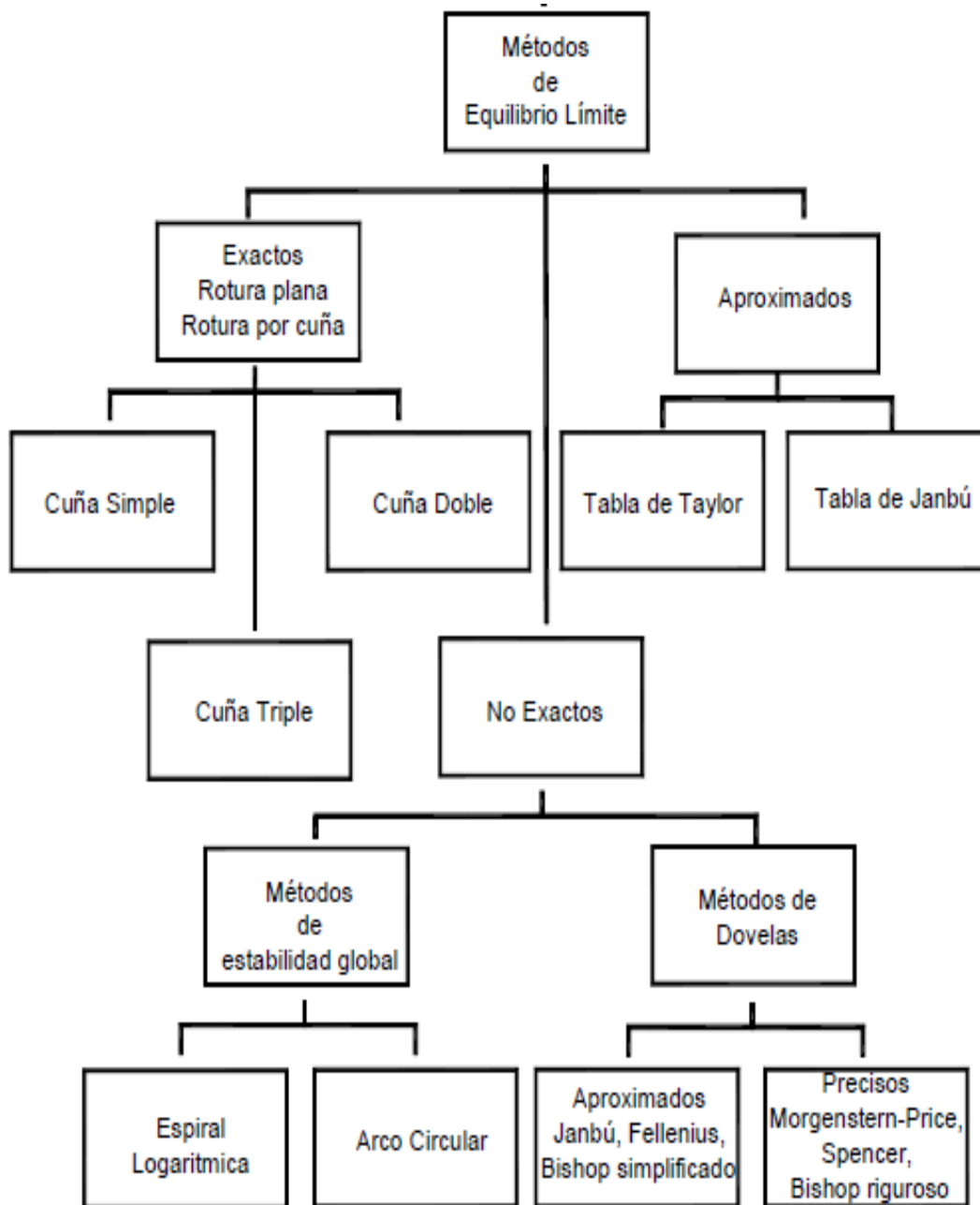
#### 1.4.11 Comparación de los diversos métodos

La cantidad de métodos que se utilizan, los cuales dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad.

Los métodos más utilizados por los ingenieros geotécnicos en todo el mundo son los simplificados de Bishop y de Janbú, los cuales en su concepción teórica no satisfacen equilibrios de fuerzas o de momentos. Los valores de factores de seguridad que se obtienen por estos dos métodos generalmente, difieren en forma importante de resultados utilizando procedimientos que satisfacen el equilibrio, como son los métodos de Spencer y de Morgenstern-Price (Jaime Suarez.2002)

Aunque una comparación directa entre los diversos métodos no es siempre posible, los factores de seguridad determinados con el método de Bishop difieren por aproximadamente el 5% con respecto a soluciones más precisas, mientras el método simplificado de Janbú generalmente, subestima el factor de seguridad hasta valores del 30%, aunque en algunos casos los sobrestima hasta valores del 5%. Esta aseveración fue documentada por Fredlund y Krahn (1977). Los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis. En los métodos más complejos y precisos se presentan con frecuencia problemas numéricos que conducen a valores no realísticos de FS. Por las razones anteriores se prefieren métodos más sencillos pero más fáciles de manejar como son los métodos simplificados de Bishop o de Janbú (Jaime Suarez.2002).

A continuación en la figura 18 y 19 veremos un desglose de los métodos de límite de equilibrio, donde observamos que la mayoría de los métodos que usamos en nuestro proyecto parten del grupo de los no exactos y luego en la figura 19 veremos las características y la superficie de falla de alguno de los métodos existentes y algunos de los que usaremos para el cálculo de los factores de seguridad en nuestro proyecto.



**Ilustración 13:** Mapa conceptual de los métodos de límite de equilibrio. *Fuente:* Abramson, L.W., Lee T.S., Sharma S., Boyce G.M.,(1996)



ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE APLICADO A TALUDES O LADERAS ALEDAÑAS AL CERRO DE LA POPA, CASCO URBANO DE CARTAGENA.



Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación.
Arco circular, (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ( $\phi = 0$ ).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, sea asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.

**Ilustración 14:** Métodos de análisis de estabilidad de taludes. *Fuente:* Abramson, L.W., Lee T.S., Sharma S., Boyce G.M., (1996)



## 2. OBJETIVOS Y ALCANCE

### 2.1. OBEJETIVO GENERAL

Realizar un análisis comparativo de estabilidad de taludes mediante los métodos de equilibrio límite aplicado a taludes o laderas aledañas al cerro de la popa, casco urbano de Cartagena para determinar que método brinda mayor factor de seguridad y analizar ventajas y desventajas de cada método en cada una de las zonas estudiadas.

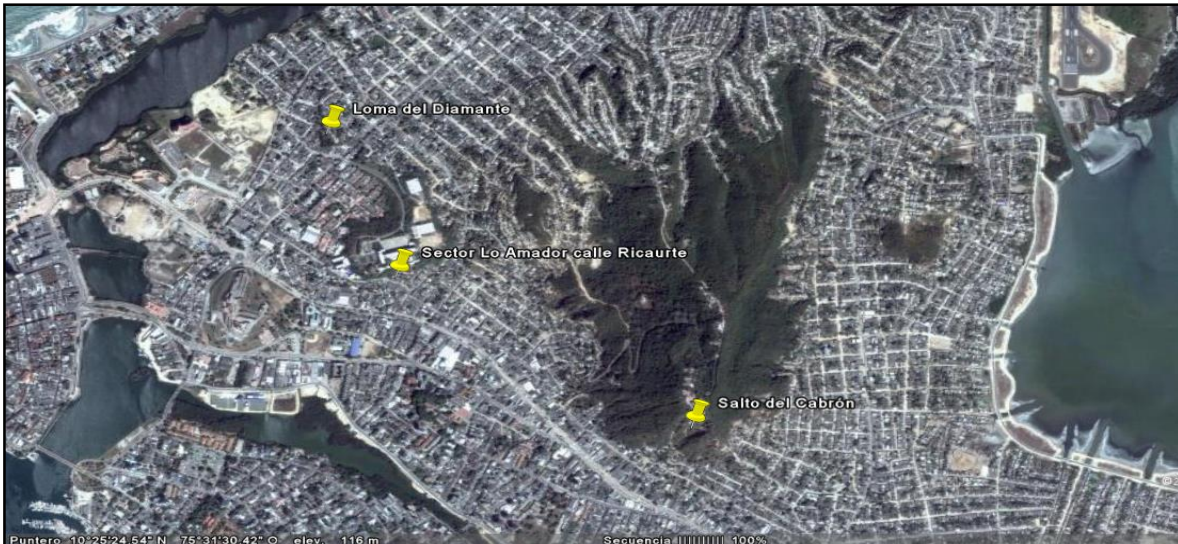
### 2.2.. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis comparativo de los factores de seguridad obtenidos mediante de la herramienta informática *SLIDE*, haciendo uso de los perfiles estratigráficos elaborados por la Universidad de Cartagena para cada una de las zonas de estudio.
- Generar la forma geométrica de la superficie de falla en cada una de las laderas a estudiar, con el fin de aplicar el método que corresponda a cada una de las diferentes superficies de falla (circular, plana o de cualquier formar).
- Identificar los parámetros (resistencia al corte, pesos unitarios, condiciones drenadas o no drenadas, esfuerzos efectivos y estabilidad a corto y largo plazo) que influyen a la hora de determinar los factores de seguridad,
- Determinar las ventajas y desventajas que ofrece cada método.
- Identificar las variaciones que existen entre los diferentes métodos.



### 2.3.DELIMITACIÓN ESPACIAL

El estudio y la información necesaria para nuestro proyecto se llevó a cabo en zonas específicas del cerro de la Popa, las cuales se encuentran en estado crítico, como lo son: Lo Amador y su área de influencia, Diamante, Salto del Cabrón y San Francisco.



**Ilustración 15:** Localización de los tres sectores críticos, La Popa. Fuente: Tomado y modificado de Google Earth..

El área de estudio que corresponde a la **Loma del Diamante**, se encuentra localizado en la estribación Noroccidental del Cerro de La Popa, en el Barrio Torices. Posee una extensión aproximada de **8,5 Hectáreas**. La zona se encuentra afectada por procesos de erosión hídrica y fenómenos de remoción en masa.

El área de estudio que corresponde a **Lo Amador, Sector Ricaurte**, se encuentra localizado en la estribación occidental del Cerro de La Popa. Posee una extensión aproximada de **2,8 Hectáreas**. La zona se encuentra afectada por fenómenos de remoción en masa.

El área de estudio que corresponde al **Salto del Cabrón**, se encuentra localizado sobre el relieve principal del Cerro de La Popa, en el extremo sur. Posee una extensión aproximada de **12,1 Hectáreas**. La zona se encuentra afectada por procesos de erosión hídrica y fenómenos de remoción en masa.





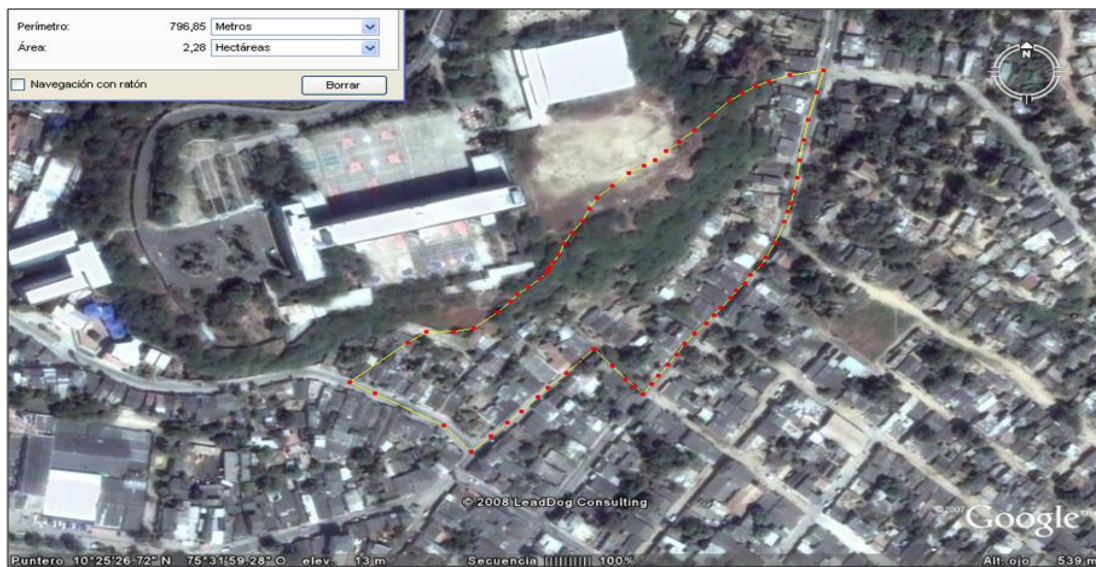
**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE APLICADO A TALUDES O LADERAS ALEDAÑAS AL CERRO DE LA POPA, CASCO URBANO DE CARTAGENA.**



El área evaluada se localiza en la parte alta y baja de la ladera que ha estado afectada por procesos de movimientos en masa desde hace varios años teniendo en cuenta la información primaria recopilada en campo de los estudios realizados por la universidad de Cartagena, se pudo establecer que la zona de influencia del estudio está conformada por cinco sectores a saber: Lomas de San Francisco, África, San José, Pista y Poza.



**Ilustración 16:** Localización de la Loma del Diamante. **Fuente:** Tomado y modificado de Google Earth.



**Ilustración 17:** Localización Lo Amador sector Ricaurte. **Fuente:** Tomado y modificado de Google Earth.





**Ilustración 18:** Localización del Salto del Cabrón. **Fuente:** Tomado y modificado de Google Earth.



**Ilustración 19:** Localización del Salto del Cabrón. **Fuente:** Tomado y modificado de Google Earth.

#### 2.4.ALCANCE

El proyecto total tuvo una duración de 6 meses y se realizó en el 1 semestre del año 2015. El resultado final son unos cuadros comparativos en donde se muestra los factores de seguridad arrojados por cada método en cada una de las zonas de estudio además de un



cuadro comparativo que refleja las ventajas y desventajas de cada método. Los métodos que se utilizaron en el proyecto son los siguientes:

- Bishop Simplificado.
- Ordinario o Fellenius.
- Janbú.
- Morgenstern y Price.
- Spencer.

También se realizó un análisis de cada método teniendo en cuenta los parámetros que abarcan cada uno los cuales se aplicaran en cada una de las zonas a realizar el estudio, para determinar qué condiciones o parámetros influenciaron en cada método para que arrojen factores de seguridad distintos.

Los informes en donde se tomó la información geotécnica de los perfiles fueron tomados de la Universidad De Cartagena, la cual realizó los ensayos de laboratorio en los años 2008, 2009, 2010 y 2011 y en la actualidad algunos de esos taludes han sido tratados.

Cabe resaltar que este proyecto es solo un estudio de los métodos de estabilización de taludes que se deben aplicar en cada una de las zonas ya mencionadas y que no se procedió a realizar la estabilización de estas.



### 3. METODOLOGIA

El proyecto se plantea como una investigación tipo mixta, ya que comprende una parte de investigación y recolección de información y otra parte experimental en la que por medio del software SLIDE se calcularán los factores de seguridad, para luego realizar el análisis comparativo para cada ladera.

Para este proyecto se ha plantado la siguiente metodología, la cual consta de 8 fases: recolección de información, organización de información recolectada para cada zona de estudio, determinación de las características de la superficie de falla para cada ladera, determinar parámetros que maneja cada método, cálculo de los factores de seguridad, elaborar cuadro comparativo, análisis de los datos obtenidos, organización y preparación del informe final del proyecto.

A continuación se describirá en qué consiste cada una de las fases planteadas para desarrollar este proyecto investigativo:

#### 3.1. Recopilación de información.

Se recopiló toda la información necesaria para poder realizar el proyecto, la cual se enfocó en 3 aspectos importantes:

- Se solicitaron estudios que se han venido realizando sobre evaluación geotécnica y diseños de obras de estabilización en tres sectores críticos del Cerro de la Popa y evaluación geotécnica y diseños de obras de estabilización de las laderas del sector nororiente del cerro la popa, en el barrio San Francisco. De donde recopilaremos toda la información topográfica, geológica, geomorfológica y geotécnica necesaria para realizar el proyecto. Estos estudios se solicitarán a la Universidad De Cartagena.
- Se consultaron proyectos de análisis sobre la estabilidad de taludes mediante los métodos de límite de equilibrio que se han realizado, los cuales servirán de guía para realizar el proyecto.



- Se consultó el manual de uso del software SLIDE, el cual se usará para calcular los factores de seguridad de los distintos métodos.

### **3.2.Organización de información**

Para poder realizar el proyecto se tomaron los estudios geotécnicos (parámetros necesarios para correr el software) y los perfiles estratigráficos realizados por la Universidad De Cartagena que fueron necesarios para poder realizar el análisis.

En esta parte se organizó la información por cada sector de estudio, de la siguiente manera:

- **Estratigrafía:** Se tomaron 4 perfiles típicos que representaron a todos los perfiles dibujados por la Universidad de Cartagena por medio de la exploración del subsuelo mediante sondeos y apiques efectuados; para cada uno de los sectores.
- **Geotecnia:** Se tomaron los resultados del estudio realizado por la Universidad de Cartagena necesaria para hacer el proyecto.

### **3.3.Determinar características de la superficie de falla:**

Se toman de forma tentativa y se dependiendo de la geomorfología del perfil estudiado.

### **3.4.Determinar parámetros que maneja cada método:**

Se tomaron los parámetros que necesita el software para calcular los factores de seguridad de los estudios de laboratorio realizado por la Universidad de Cartagena, tales como peso unitario seco, peso húmedo, humedad relativa, ángulo de fricción y cohesión.

### **3.5.Calcular los factores de seguridad por cada zona**

Para calcular los factores de seguridad se tomaron 4 condiciones en cada uno de los perfiles, saturada sin sismo, saturada con sismo, no saturada sin sismo y no saturada con sismo.



Para la condición sísmica se tomaron los valores que se manejan en la ciudad de Cartagena, que son 0.15 horizontal y 0.1 vertical debido a que son las condiciones sísmicas que se presentan en Cartagena.

Para la condición saturada se toma la más crítica que es cuando el nivel freático está al nivel del terreno, en este caso la literatura nos indica un  $R_u = 0,5$ .

Los métodos que se utilizaron en el proyecto son los siguientes:

- Bishop simplificado.
- Ordinario o Fellenius.
- Janbú.
- Spencer.
- Morgenstern y Price.

Luego se organizaron los factores de seguridad obtenidos por cada método con cada una de las condiciones, se utilizó el siguiente cuadro:

<b>FACTORES DE SEGURIDAD METODO</b>				
<b>PERFIL</b>	<b>SATURADA Y CON SISMO</b>	<b>SATURADA Y SIN SISMO</b>	<b>NO SATURADA CON SISMO</b>	<b>NO SATURADA Y SIN SISMO</b>
<b>1</b>				
<b>2</b>				
<b>3</b>				
<b>4</b>				
<b>5</b>				

**Tabla 2:** Tabla de resultados de factores de seguridad (azul).

### **3.6..Elaborar cuadro comparativo.**

Se realizaron cuadros donde se compararon los resultados obtenidos por cada sector para cada uno de los perfiles, luego se elaboraron cuadros donde se tabularon los factores de





seguridad de la condición crítica (saturada con sismo) obtenidos por cada método en los perfiles típicos de cada sector. El cuadro que se usó fue el siguiente:

PERFIL 1 SECTOR	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	
ORDINARIO O FELLENIUS	
JANBU	
SPENCER	
MORGENSTERN-PRICE	

**Tabla 3:** Tabla para factores de seguridad de perfiles típicos (verde).

### 3.7. Análisis de los datos obtenidos.

Para realizar el análisis se tomó la condición más crítica que es saturada y con sismo, el análisis se hizo escrito y se realizó un análisis distinto en cada una de las zonas estudiadas.

### 3.8. Ventajas y desventajas

Para analizar las ventajas y desventajas de cada método se utilizó un cuadro comparativo en donde se tuvo en cuenta las características de la superficie de falla y los parámetros que utilizaron cada método. El cuadro que se utilizó fue el siguiente.



VENTAJAS Y DESVENTAJAS			
METODO	SUPERFICIE DE FALLA	PARAMETROS	VENTAJAS Y DESVENTAJAS
BISHOP SIMPLIFICADO			
ORDINARIO O FELLENIUS			
JANBU			
SPENCER			
MORGENSTERN-PRICE			

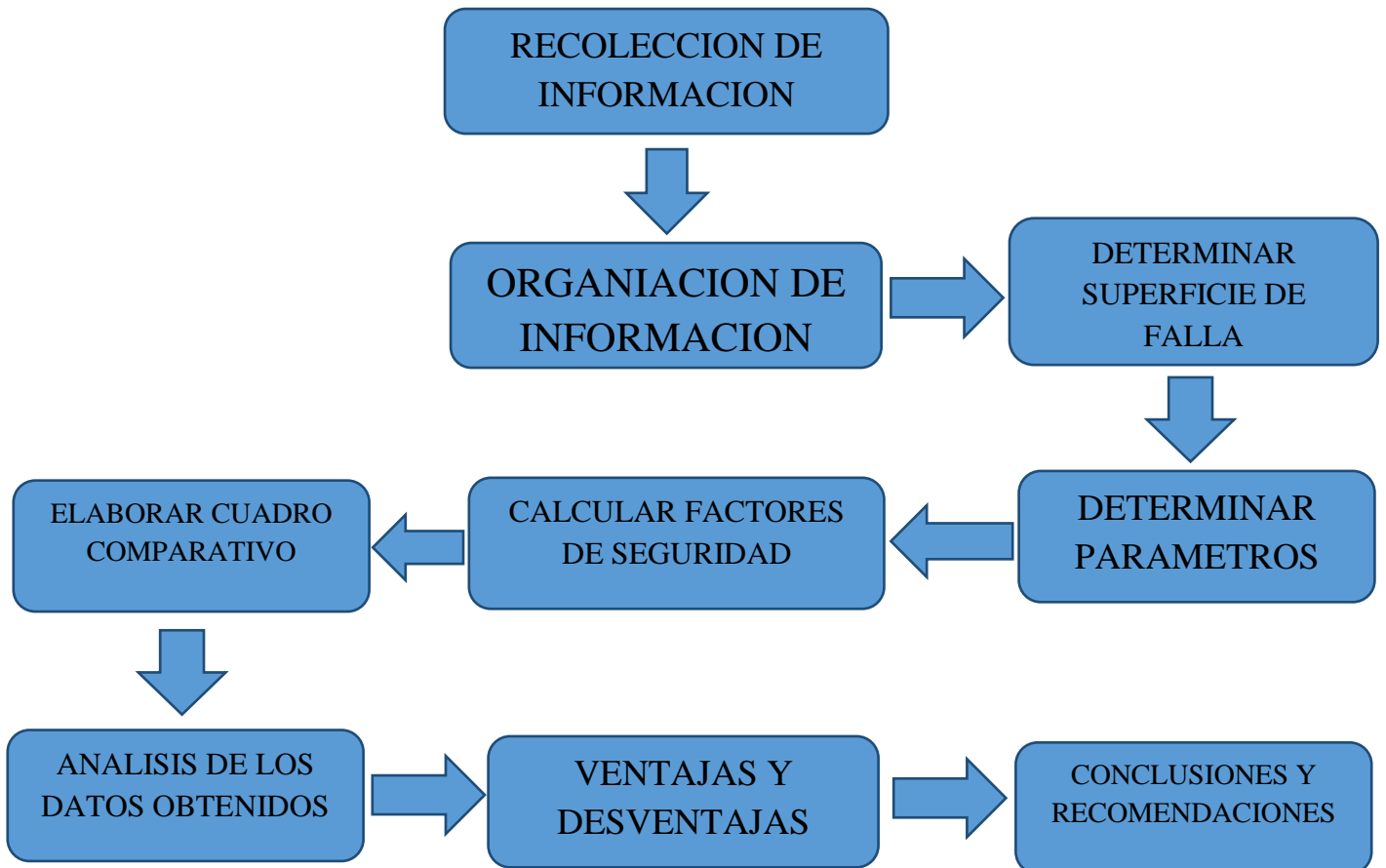
**Tabla 4:** Tabla representativa de las ventajas y desventajas de cada método (Naranja).

### 3.9. Conclusiones y recomendaciones.

Se organizó toda la información obtenida por el análisis comparativo en un informe que contiene toda la investigación realizada, las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó después de haber realizado esta investigación.



A Continuación se mostrará el esquema de la metodología:



**Ilustración 20:** Esquema metodológico del proyecto.





#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se hallaron los factores de seguridad para cada uno de los perfiles en cada zona de estudio teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Saturada y con sismo: Es la condición más crítica y es cuando el perfil estudiado está con un nivel freático alto y bajo la condición sísmica.
- No saturada y con sismo: el perfil está por encima del nivel freático y bajo la condición sísmica.
- Saturada y sin sismo: el perfil esta con un nivel freático alto y la condición sísmica no se tiene en cuenta.
- No saturada y sin sismo: Es la más favorable ya que el perfil no está influenciado ni por el nivel freático ni por la condición sísmica.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

##### 4.1. EL DIAMANTE:

- **Geotecnia:**

Toda la información geotécnica del sector se organizó en un solo cuadro.

LOMA DEL DIAMANTE					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (Φ)
Caliza arrecifal de la formación popa	2,2	9,3	2,01	50	36
Arcilla calcárea limosa parda clara con vetas grises y óxido	1,98	21,2	1,63	42	19
Relleno de arcilla calcárea limo-arenosa parda amarillenta con raíces	1,8	14,5	1,57	30	30
Relleno de material calizo con presencia de escombros	1,9	7,3	1,77	43	29



LOMA DEL DIAMANTE					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION ( $\phi$ )
Relleno de arcilla calcárea limo-arenosa gris clara, rastros de escombros y basuras	1,83	14,3	1,60	60	33
Material calcáreo meteorizado de la formación popa	1,93	9,3	1,77	30	30
Relleno de arena calcárea limosa fina amarillenta con rastros de basura y bolsas plásticas	1,85	16,9	1,58	42	30
Arcilla calcárea limo-arenosa parda clara	1,98	19,8	1,65	42	19
Material arcilloso suelto	1,78	10,2	1,62	30	28
Relleno de arcilla calcárea parda oscura con presencia de escombros	1,98	14,3	1,73		
Arena calcárea limo-arcillosa amarillenta	1,7	13,4	1,50	39	29
Relleno de arcilla calcárea limosa oscura con rastros de basuras	1,92	19,9	1,60		
Relleno mezcla de arcilla calcárea limosa oscura y arcilla calcárea limo-arenosa parda clara con basuras y escombros	1,8	15,9	1,55	30	30

**Ilustración 21:** información geotécnica del sector loma del Diamante. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.



- **Factores De Seguridad:**

Se calcularon todos los factores de seguridad de cada uno de los perfiles y se organizaron según el método aplicado para calcularlo en los siguientes cuadros:

- **BISHOP SIMPLIFICADO**

<b>FACTORES DE SEGURIDAD METODO BISHOP SIMPLIFICADO</b>				
<b>PERFIL</b>	<b>SATURADA Y CON SISMO</b>	<b>SATURADA Y SIN SISMO</b>	<b>NO SATURADA CON SISMO</b>	<b>NO SATURADA Y SIN SISMO</b>
1	3,003	3,937	3,720	4,878
2	1,108	1,178	1,539	1,808
3	1,137	1,544	1,330	1,811
4	1,633	2,290	2,275	3,203
5	0,928	1,253	1,397	1,905
6	1,110	3,780	1,754	2,339
7	2,139	2,744	2,949	3,781
8	1,140	1,445	1,662	2,108
9	2,305	4,099	3,278	5,690
10	1,240	1,696	1,772	2,453
11	1,585	2,535	2,292	3,731
12	5,838	10,488	7,589	13,207

**Tabla 5:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Bishop simplificado para cada uno de los perfiles del sector del diamante por cada una de las condiciones.

- **ORDINARIO O FELLENIUS**

<b>FACTORES DE SEGURIDAD METODO ORDINARIO</b>				
<b>PERFIL</b>	<b>SATURADA Y CON SISMO</b>	<b>SATURADA Y SIN SISMO</b>	<b>NO SATURADA CON SISMO</b>	<b>NO SATURADA Y SIN SISMO</b>
1	3,003	3,937	3,719	4,878
2	1,139	1,354	1,743	5,163
3	1,111	1,505	1,305	1,771
4	1,600	2,245	2,245	3,159
5	0,850	1,156	1,337	1,824



FACTORES DE SEGURIDAD METODO ORDINARIO				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
6	0,970	3,737	1,672	2,241
7	2,141	2,750	2,952	3,786
8	1,174	1,492	1,727	2,184
9	2,168	3,989	3,163	5,580
10	1,158	1,587	1,705	2,361
11	1,458	2,306	2,186	3,525
12	5,577	10,050	7,487	13,027

**Tabla 6:** Factores de seguridad obtenidos por el método Ordinario o Fellenius para cada uno de los perfiles del sector del diamante por cada una de las condiciones.

- JANBU

FACTORES DE SEGURIDAD METODO JANBU				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	2,989	3,978	3,705	4,928
2	1,102	1,178	3,409	4,613
3	1,098	1,502	1,286	1,768
4	1,553	2,179	2,170	3,054
5	0,835	1,147	1,281	1,772
6	1,005	3,695	1,625	2,215
7	2,136	2,781	2,946	3,826
8	1,124	1,480	1,683	2,205
9	2,138	3,885	3,051	5,383
10	1,115	1,573	1,605	2,284
11	1,450	2,298	2,106	3,373
12	5,475	9,873	7,255	12,587

**Tabla 7:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Janbú para cada uno de los perfiles del sector del diamante por cada una de las condiciones.



- SPENCER

FACTORES DE SEGURIDAD METODO SPENCER				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	3,003	4,366	3,717	5,396
2	2,410	3,685	3,371	5,163
3	1,144	1,547	1,337	1,815
5	0,921	1,251	1,395	1,899
6	1,127	3,780	1,748	2,374
7	2,140	3,306	2,947	3,781
8	1,166	1,792	1,705	2,523
9	2,308	4,099	3,282	5,69
10	1,242	1,697	1,772	2,453
11	1,594	2,536	2,300	3,728
12	5,832	10,472	7,574	13,191

**Tabla 8:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Spencer para cada uno de los perfiles del sector del diamante por cada una de las condiciones.

- MORGENSTERN-PRICE

FACTORES DE SEGURIDAD METODO MORGENSTERN-PRICE				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	3,070	4,365	3,798	5,397
2	1,182	3,392	3,373	4,593
3	1,137	1,542	1,331	1,808
4	1,632	2,288	2,273	3,199
5	0,922	1,250	1,390	1,900
6	1,125	3,779	1,760	2,372
7	2,139	3,494	3,001	4,594
8	1,145	1,784	1,970	2,509
9	2,306	4,098	3,279	5,690
10	1,239	1,691	1,768	2,448
11	1,588	2,534	2,294	3,727
12	5,834	10,469	7,571	13,188

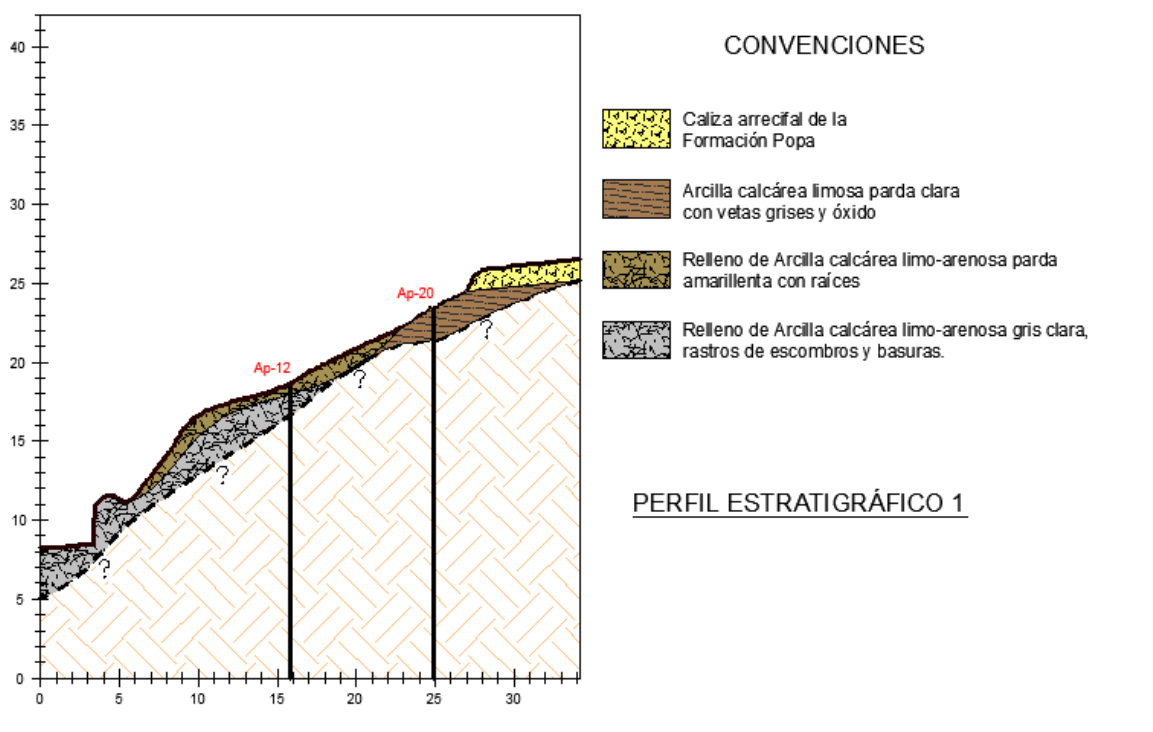
**Tabla 9:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Morgenstern y Price para cada uno de los perfiles del sector del diamante por cada una de las condiciones.

- **Perfiles Típicos:**

Se tomaron 4 perfiles típicos del sector dependiendo la geomorfología y las características geotécnicas de cada perfil y se les hizo el análisis a la condición más crítica, como sigue:

- **Perfil 1:** Este perfil representa los perfiles 1, 7, 9.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.



**Ilustración 22:** Perfil 1 con sus respectivos estratos de El Diamante. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

PERFIL 1 LOMA DEL DIAMANTE					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (φ)
Caliza arrecifal de la formación popa	2,2	9,3	2,01	50	36



PERFIL 1 LOMA DEL DIAMANTE					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (φ)
Arcilla calcárea limosa parda clara con vetas grises y óxido	1,98	21,2	1,63	42	19
Relleno de arcilla calcárea limo-arenosa parda amarillenta con raíces	1,8	14,5	1,57	30	30
Relleno de arcilla calcárea limo-arenosa gris clara, rastros de escombros y basuras	1,83	14,3	1,60	60	33

**Tabla 10:** información geotécnica perfil 1 loma del Diamante. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 1 SECTOR DIAMANTE	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	3.003
ORDINARIO O FELLENIUS	3.003
JANBU	2.989



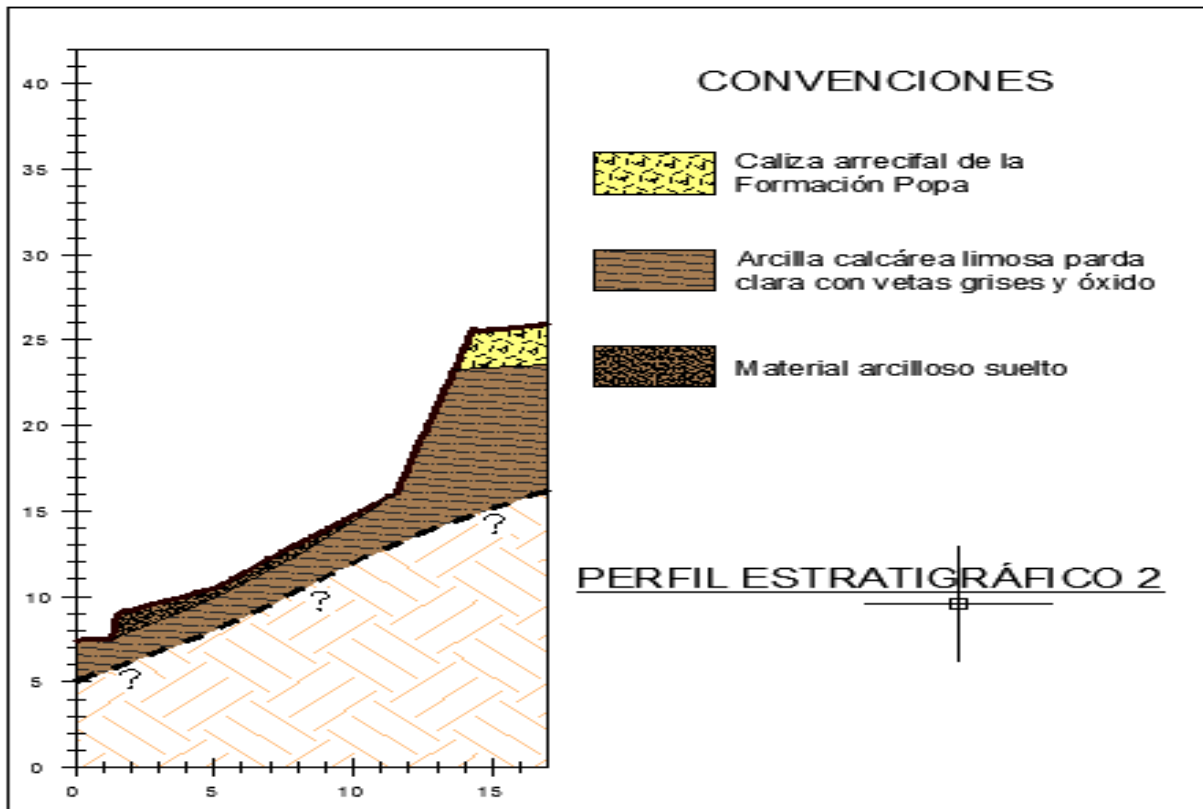
PERFIL 1 SECTOR DIAMANTE	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
SPENCER	3.003
MORGENSTERN-PRICE	3.070

**Tabla 11:** Factores de seguridad perfil 1 loma del Diamante.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Morgenstern-Price y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.

- **Perfil 2:** Este perfil representa los perfiles 2, 8.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.



**Ilustración 23:** Perfil 2 con sus respectivos estratos de El Diamante. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.





PERFIL 2 LOMA DEL DIAMANTE					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (φ)
Caliza arrecifal de la formación popa	2,2	9,3	2,01	50	36
Arcilla calcárea limosa parda clara con vetas grises y óxido	1,98	21,2	1,63	42	19
Material arcilloso suelto	1,78	10,2	1,62	30	28

**Tabla 12:** información geotécnica perfil 2 loma del Diamante. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 2 SECTOR DIAMANTE	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	1.108
ORDINARIO O FELLENIUS	1.139
JANBU	1.102
SPENCER	2.410
MORGENSTERN-PRICE	1.182

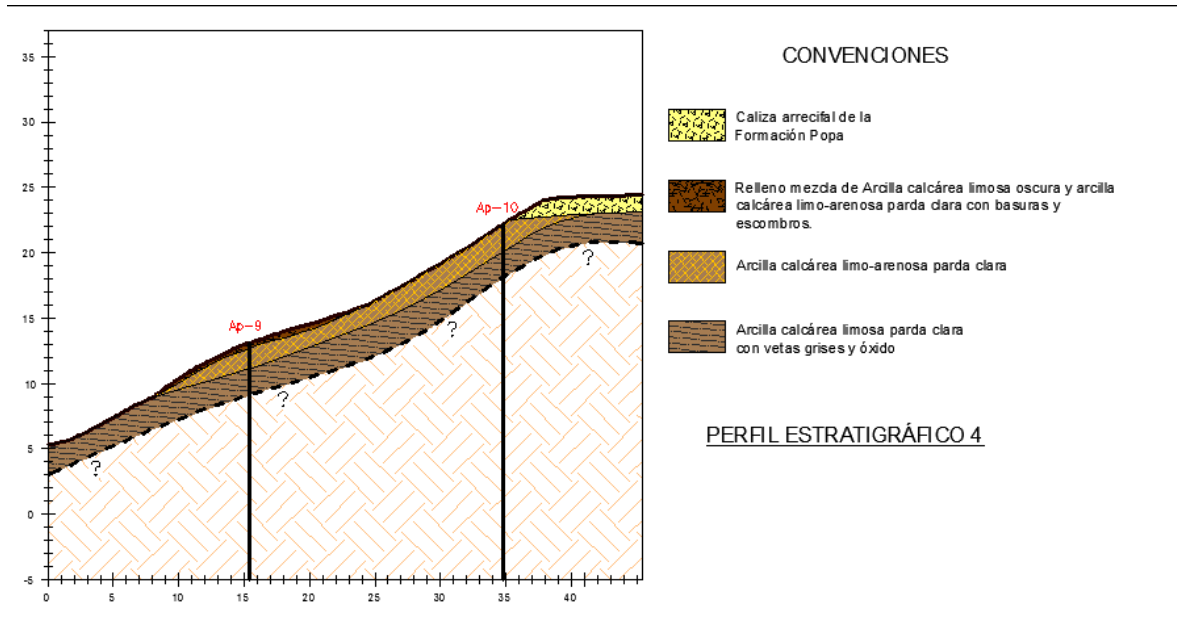
**Tabla 13:** Factores de seguridad perfil 2 loma del Diamante.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Spencer y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.



- **Perfil 4:** Este perfil representa los perfiles 3, 4, 10.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.



**Tabla 14:** Perfil 1 con sus respectivos estratos de El Diamante. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

PERFIL 4 LOMA DEL DIAMANTE					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (φ)
Caliza arrecifal de la formación popa	2,2	9,3	2,01	50	36
Relleno de arcilla calcárea limo-arenosa gris clara, rastros de escombros y basuras	1,83	14,3	1,60	60	33
Arcilla calcárea limo-arenosa parda clara	1,98	19,8	1,65	42	19



PERFIL 4 LOMA DEL DIAMANTE					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (φ)
Arcilla calcárea limosa parda clara con vetas grises y óxido	1,98	21,2	1,63	42	19

**Tabla 15:** Información geotécnica perfil 4 loma del Diamante. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 4 SECTOR DIAMANTE	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	1.633
ORDINARIO O FELLENIUS	1.600
JANBU	1.553
SPENCER	1.638
MORGENSTERN-PRICE	1.632

**Tabla 16:** Factores de seguridad perfil 4 loma del Diamante.

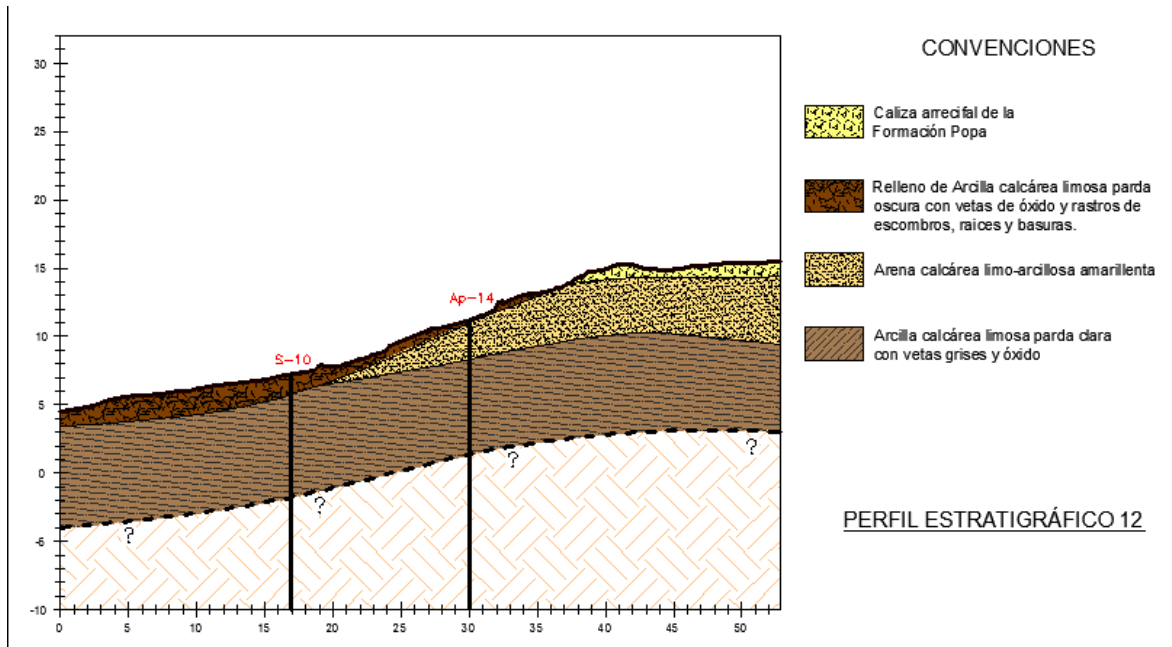
En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Spencer y el que menos factor de seguridad brinda es el ordinario.

- **Perfil 12:** Este perfil representa los perfiles 5, 6, 11, 12.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.



ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE APLICADO A TALUDES O LADERAS ALEDAÑAS AL CERRO DE LA POPA, CASCO URBANO DE CARTAGENA.



**Ilustración 24:** Perfil 12 con sus respectivos estratos de El Diamante. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

PERFIL 12 LOMA DEL DIAMANTE					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (φ)
Caliza arrecifal de la formación popa	2,2	9,3	2,01	50	36
Relleno de arcilla calcárea limo-arenosa gris clara, rastros de escombros y basuras	1,83	14,3	1,60	60	33
Arena calcárea limo-arcillosa amarillenta	1,7	13,4	1,50	39	29
Arcilla calcárea limosa parda clara con vetas grises y óxido	1,98	21,2	1,63	42	19

**Tabla 17:** información geotécnica perfil 12 loma del Diamante. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.



Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 12 SECTOR DIAMANTE	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	1.585
ORDINARIO O FELLENIUS	1.458
JANBU	1.450
SPENCER	1.594
MORGENSTERN-PRICE	1.588

**Tabla 18:** Factores de seguridad perfil 12 loma del Diamante.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Spencer y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.

#### 4.2. LO AMADOR:

- **Geotecnia:**

Toda la información geotécnica del sector se organizó en un solo cuadro.

LO AMADOR					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION (Φ)
Arena limo-arcillosa parda con vetas grises y óxido	1,8	7	1,68	46,4	32
Material calizo granular de alta compacidad	2,2	7,1	2,05	50	35
Relleno de arena limo-arcillosa y/o arcilla limosa, con gravas y escombros	1,83	7,1	1,71	50	30



LO AMADOR					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (Φ)
arcilla limosa parda clara grisácea con vetas de óxido	1,78	29,9	1,37	49	19
Relleno de arena limo-arcillosa con vetas de óxido y basuras	1,82	10,2	1,65	40	30
Arcilla limosa parda oscura con vetas de óxido rojo	1,78	23,9	1,44	42.5	18
Arcilla limosa parda amarillenta con vetas grises y óxido	1,82	19,8	1,52	49	19
Relleno de arena con arcilla y presencia de escombros	1,8	30,7	1,38	50	30

**Tabla 19** : Información geotécnica del sector lo amador. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

- **Factores De Seguridad:** Se calcularon todos los factores de seguridad de cada uno de los perfiles y se organizaron según el método aplicado para calcularlo en los siguientes cuadros:

- **BISHOP SIMPLIFICADO**

FACTORES DE SEGURIDAD METODO BISHOP				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	3,690	5,900	4,895	7,938
2	2,344	3,135	3,200	4,336
3	1,900	2,603	2,317	3,041
4	2,216	2,974	3,101	4,181
5	2,444	3,292	3,419	4,612
6	2,664	3,780	3,699	5,150
7	2,229	3,315	3,260	4,702
8	2,072	2,734	2,946	3,894
9	2,414	3,470	3,401	4,761



<b>FACTORES DE SEGURIDAD METODO BISHOP</b>				
<b>PERFIL</b>	<b>SATURADA Y CON SISMO</b>	<b>SATURADA Y SIN SISMO</b>	<b>NO SATURADA CON SISMO</b>	<b>NO SATURADA Y SIN SISMO</b>
<b>10</b>	1,917	2,630	2,772	3,724
<b>11</b>	1,514	2,051	2,230	3,031
<b>12</b>	1,679	2,361	2,450	3,467

**Tabla 20:** Factores de seguridad obtenidos por el método de bishop simplificado para cada uno de los perfiles del sector de lo amador por cada una de las condiciones.

- ORDINARIO O FELLENIUS**

<b>FACTORES DE SEGURIDAD METODO ORDINARIO</b>				
<b>PERFIL</b>	<b>SATURADA Y CON SISMO</b>	<b>SATURADA Y SIN SISMO</b>	<b>NO SATURADA CON SISMO</b>	<b>NO SATURADA Y SIN SISMO</b>
<b>1</b>	3,446	5,522	4,670	7,556
<b>2</b>	2,153	2,895	3,056	4,139
<b>3</b>	1,960	2,570	2,292	3,009
<b>4</b>	2,161	2,906	3,046	4,111
<b>5</b>	2,431	3,275	3,408	4,596
<b>6</b>	2,632	3,737	3,670	5,225
<b>7</b>	2,197	3,297	3,231	4,695
<b>8</b>	2,074	2,724	2,948	3,886
<b>9</b>	2,396	3,463	3,384	4,754
<b>10</b>	1,846	2,623	2,725	3,717
<b>11</b>	1,493	2,023	2,211	3,008
<b>12</b>	1,628	2,290	2,403	3,406

**Tabla 21:** Factores de seguridad obtenidos por el método Ordinario o Fellenius para cada uno de los perfiles del sector de lo amador por cada una de las condiciones.



- **JANBU**

<b>FACTORES DE SEGURIDAD METODO JANBU</b>				
<b>PERFIL</b>	<b>SATURADA Y CON SISMO</b>	<b>SATURADA Y SIN SISMO</b>	<b>NO SATURADA CON SISMO</b>	<b>NO SATURADA Y SIN SISMO</b>
<b>1</b>	3,386	5,465	4,489	7,307
<b>2</b>	2,131	2,926	2,949	4,059
<b>3</b>	1,914	2,531	2,243	2,967
<b>4</b>	2,092	2,821	2,926	3,593
<b>5</b>	2,412	3,261	3,384	4,572
<b>6</b>	2,594	3,635	3,609	5,153
<b>7</b>	2,155	3,286	3,157	4,667
<b>8</b>	2,068	2,720	2,951	3,880
<b>9</b>	2,388	3,448	3,367	4,730
<b>10</b>	1,789	2,581	2,617	3,699
<b>11</b>	1,468	2,000	2,168	2,967
<b>12</b>	1,594	2,249	2,336	3,319

**Tabla 22:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Janbú para cada uno de los perfiles del sector de lo amateur por cada una de las condiciones.

- **SPENCER**

<b>FACTORES DE SEGURIDAD METODO SPENCER</b>				
<b>PERFIL</b>	<b>SATURADA Y CON SISMO</b>	<b>SATURADA Y SIN SISMO</b>	<b>NO SATURADA CON SISMO</b>	<b>NO SATURADA Y SIN SISMO</b>
<b>1</b>	3,683	5,893	4,890	7,927
<b>2</b>	2,344	3,129	3,191	4,325
<b>3</b>	2,014	2,614	2,337	3,050
<b>4</b>	2,340	2,983	3,117	4,190
<b>5</b>	2,440	3,290	3,421	4,612
<b>6</b>	2,662	3,780	3,699	5,264
<b>7</b>	2,229	3,319	3,621	4,703
<b>8</b>	2,071	2,733	2,948	3,897
<b>9</b>	2,415	3,470	3,403	4,760
<b>10</b>	1,918	2,632	2,770	3,720





FACTORES DE SEGURIDAD METODO SPENCER				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
11	1,511	2,063	2,227	3,031
12	1,678	2,36	2,446	3,465

**Tabla 23:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Spencer para cada uno de los perfiles del sector de lo amador por cada una de las condiciones.

- **MORGENSTERN-PRICE**

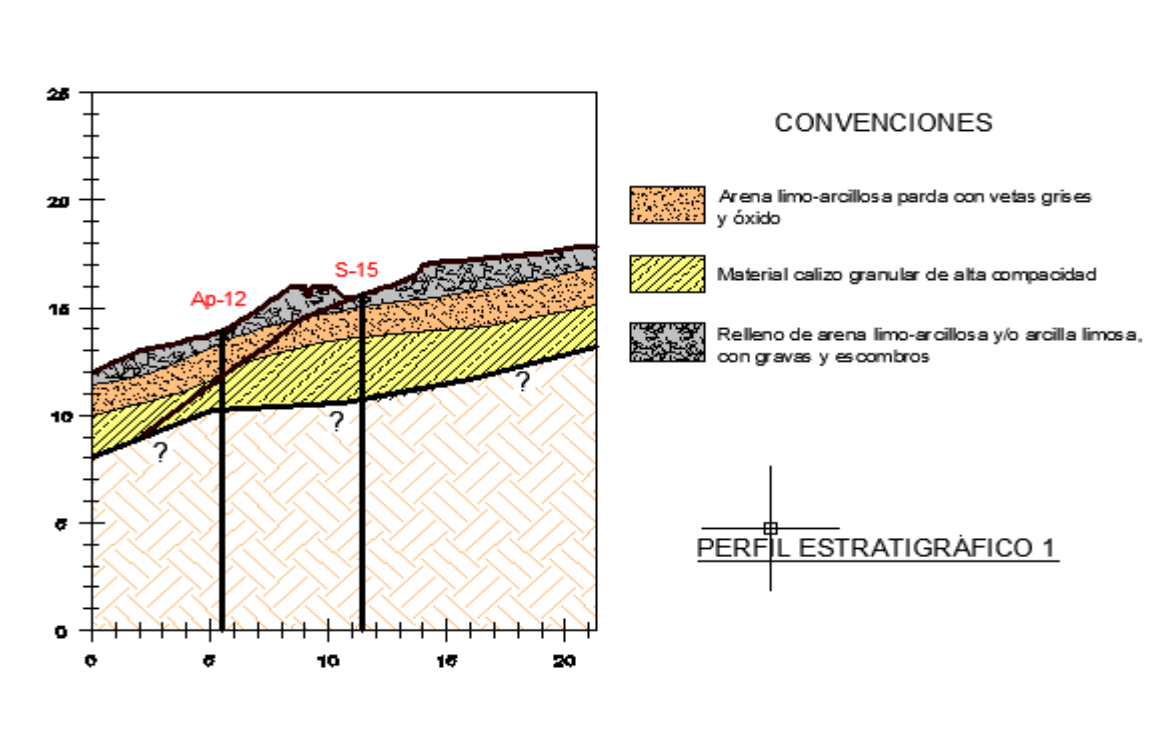
FACTORES DE SEGURIDAD METODO MORGENSTERN				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	3,689	5,892	4,891	7,926
2	2,343	3,127	3,195	4,328
3	2,007	2,610	2,334	3,040
4	2,235	2,985	3,113	4,190
5	2,439	3,287	3,420	4,607
6	2,667	3,799	3,700	5,268
7	2,227	3,315	3,260	4,702
8	2,070	2,737	2,943	3,894
9	2,417	3,473	3,403	4,763
10	1,913	2,629	2,768	3,722
11	1,510	2,049	2,226	3,030
12	1,678	2,359	2,449	3,463

**Tabla 24:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Morgenstern-Price para cada uno de los perfiles del sector de lo amador por cada una de las condiciones.

- **Perfiles Típicos:**

Se tomaron 4 perfiles típicos del sector dependiendo la geomorfología y las características geotécnicas de cada perfil y se les hizo el análisis a la condición más crítica, como sigue:

- **Perfil 1:** Este perfil es único en esta zona de estudio.



**Ilustración 25:** Perfil 1 con sus respectivos estratos de Lo Amador. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 1 LO AMADOR					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION ( $\phi$ )
Arena limo-arcillosa parda con vetas grises y óxido	1,8	7	1,68	46,4	32
Material calizo granular de alta compacidad	2,2	7,1	2,05	50	35
Relleno de arena limo-arcillosa y/o arcilla limosa, con gravas y escombros	1,83	7,1	1,71	50	30

**Tabla 25:** información geotécnica perfil 1 lo Amador. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.



Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

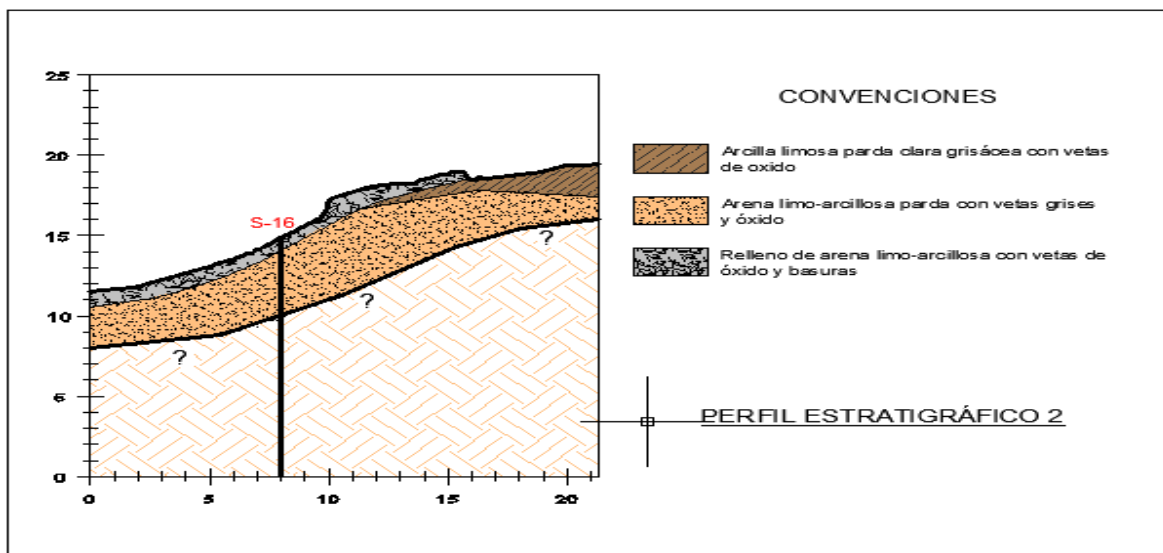
El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 1 LO AMADOR	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	3.690
ORDINARIO O FELLENIUS	3.446
JANBU	3.386
SPENCER	3.683
MORGENSTERN-PRICE	3.689

**Tabla 26:** Factores de seguridad perfil 1 lo Amador.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Bishop simplificado y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.

- **Perfil 2:** Este perfil representa los perfiles 2, 3.



**Ilustración 26:** Perfil 2 con sus respectivos estratos de Lo Amador. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.



En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 2 LO AMADOR					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (Φ)
Arcilla limosa parda clara grisácea con vetas de óxido	1,78	29,9	1,37	49	19
Arena limo-arcillosa parda con vetas grises y óxido	1,8	7	1,68	46,4	32
Relleno de arena limo-arcillosa con vetas de óxido y basuras	1,82	10,2	1,65	40	30

**Tabla 27:** información geotécnica perfil 2 lo Amador. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

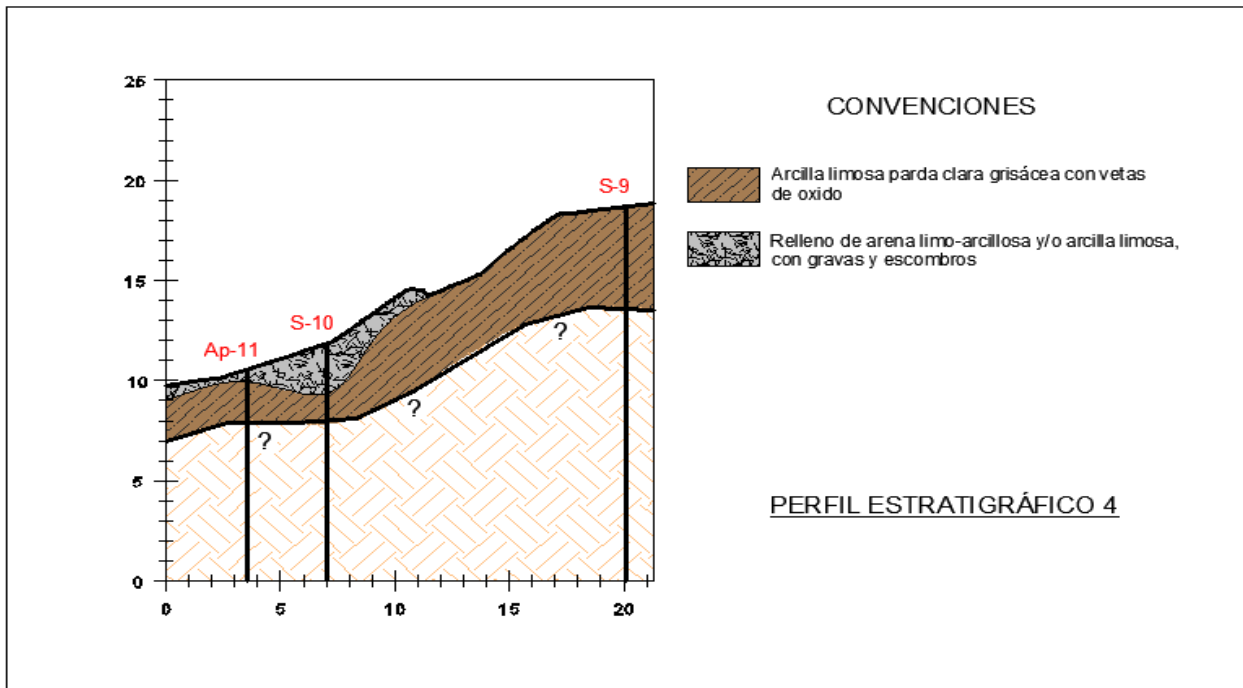
PERFIL 2 LO AMADOR	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	2.344
ORDINARIO O FELLENIUS	2.153
JANBU	2.131
SPENCER	2.340
MORGENSTERN-PRICE	2.343

**Tabla 28:** Factores de seguridad perfil 2 lo Amador.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de bishop simplificado y el que menos factor de seguridad brinda es el janbu.



- **Perfil 4:** Este perfil representa los perfiles 4, 9, 10, 11, 12.



**Ilustración 27:** Perfil 4 con sus respectivos estratos de Lo Amador. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 4 LO AMADOR					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION (φ)
Arcilla limosa parda clara grisácea con vetas de óxido	1,78	29,9	1,37	49	19
Relleno de arena limo-arcillosa y/o arcilla limosa, con gravas y escombros	1,83	7,1	1,71	50	30

**Tabla 29:** información geotécnica perfil 4 lo Amador. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.



Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

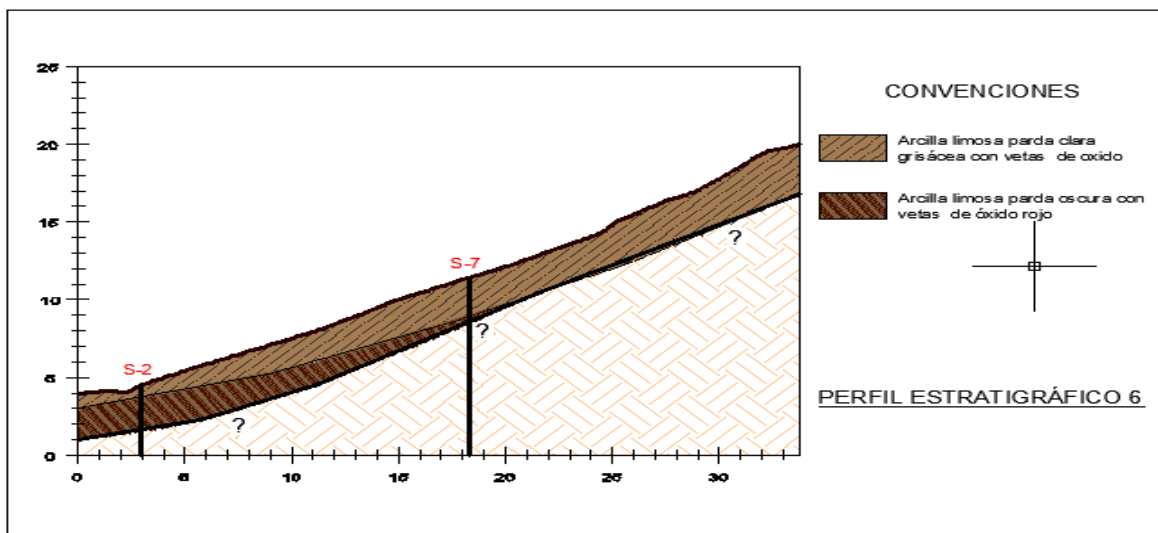
El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 4 LO AMADOR	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	2.216
ORDINARIO O FELLENIUS	2,161
JANBU	2.092
SPENCER	2.239
MORGENSTERN-PRICE	2.235

**Tabla 30:** Factores de seguridad perfil 4 lo Amador.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Spencer y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.

- **Perfil 6:** Este perfil representa los perfiles 5, 6, 7, 8.



**Ilustración 28:** Perfil 4 con sus respectivos estratos de Lo Amador. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.



En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 6 LO AMADOR					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (φ)
Arcilla limosa parda clara grisácea con vetas de óxido	1,78	29,9	1,37	49	19
Arcilla limosa parda oscura con vetas de óxido rojo	1,78	23,9	1,44	42.5	18

**Tabla 31:** información geotécnica perfil 6 Lo Amador. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 6 LO AMADOR	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	2.664
ORDINARIO O FELLENIUS	2.632
JANBU	2.594
SPENCER	2.662
MORGENSTERN-PRICE	2.667

**Tabla 32:** Factores de seguridad perfil 6 lo Amador.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Morgenstern y Price el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.



#### 4.3. SALTO DEL CABRON:

- **Geotecnia:**

Toda la información geotécnica del sector se organizó en un solo cuadro.

SALTO DEL CABRON					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION ( $\phi$ )
Arcilla calcárea limo-arenosa parda clara con vetas grises y óxido	1,98	11,7	1,77	60	27
Arcilla calcárea limosa parda clara con vetas grises y óxido	2	11,9	1,79	50	24
Relleno de arcilla limo-arenosa parda oscura con vetas grises y escombros	1,88	6,8	1,76	30	28
Arcilla calcárea parda oscura con vetas grises y óxido	1,88	25	1,50	53	24
Relleno de arcilla limo-arenosa parda clara con escombros y basuras.	1,82	20,9	1,51	20	30

**Tabla 33:** información geotécnica del sector Salto del Cabron. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

- **Factores De Seguridad:**

Se calcularon todos los factores de seguridad tanto del lado derecho como del lado izquierdo de cada perfil debido a la geomorfología de los mismos (el que lo requiera, y se llenó con “NO” los que no) y se organizaron según el método aplicado para calcularlo en los siguientes cuadros:





- BISHOP SIMPLIFICADO

FACTORES DE SEGURIDAD METODO BISHOP (DERECHO)				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	1,426	1,853	1,988	2,567
2	NO	NO	NO	NO
3	NO	NO	NO	NO
4	1,295	1,685	1,855	2,425
5	2,440	3,913	3,535	5.908
6	NO	NO	NO	NO
7	1,036	1,327	1,573	2,013
8	1,690	2,261	2,245	3,001
9	0,977	1,279	1,481	1,965
10	2,585	3,592	3,294	4,591
11	2,941	4,123	3,763	5,288

**Tabla 34:** Factores de seguridad obtenidos por el método de bishop simplificado para cada uno de los perfiles del sector salto del cabrón (lado derecho) por cada una de las condiciones.

FACTORES DE SEGURIDAD METODO BISHOP (IZQUIERDO)				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	0,720	0,885	0,790	0,975
2	0,959	1,185	1,509	1,904
3	1,725	2,285	3,342	3,100
4	0,895	1,117	1,423	1,817
5	1,593	2,239	2,301	3,252
6	0,996	1,228	1,481	1,878
7	NO	NO	NO	NO
8	NO	NO	NO	NO
9	NO	NO	NO	NO
10	NO	NO	NO	NO
11	NO	NO	NO	NO

**Tabla 35:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Bishop simplificado para cada uno de los perfiles del sector salto del cabrón (lado izquierdo) por cada una de las condiciones.



- ORDINARIO O FELLENIUS

FACTORES DE SEGURIDAD METODO ORDINARIO (DERECHO)				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	1,420	1,905	2,003	2,513
2	NO	NO	NO	NO
3	NO	NO	NO	NO
4	1,262	1,648	1,831	2,394
5	2,007	3,913	3,212	5,28
6	NO	NO	NO	NO
7	1,011	1,301	1,553	1,993
8	1,689	2,260	2,244	3,000
9	0,904	1,196	1,420	1,897
10	2,537	3,527	3,255	4,542
11	2,862	4,021	3,683	5,183

**Tabla 36:** Factores de seguridad obtenidos por el método de ordinario o Fellenius para cada uno de los perfiles del sector salto del cabrón (lado derecho) por cada una de las condiciones.

FACTORES DE SEGURIDAD METODO ORDINARIO (IZQUIERDO)				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	0,689	0,866	0,762	0,957
2	0,867	1,101	1,482	1,880
3	1,700	2,255	2,321	3,081
4	0,711	0,912	1,336	1,721
5	1,333	1,937	2,157	3,056
6	0,914	1,157	1,445	1,845
7	NO	NO	NO	NO
8	NO	NO	NO	NO
9	NO	NO	NO	NO
10	NO	NO	NO	NO
11	NO	NO	NO	NO

**Tabla 37:** Factores de seguridad obtenidos por el método ordinario o Fellenius para cada uno de los perfiles del sector del salto del cabrón (lado izquierdo) por cada una de las condiciones.



- JANBU

FACTORES DE SEGURIDAD METODO JANBU (DERECHO)				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	1,397	1,960	1,967	2,686
2	NO	NO	NO	NO
3	NO	NO	NO	NO
4	1,246	1,649	1,803	2,388
5	1,945	3,221	2,874	4,885
6	NO	NO	NO	NO
7	1,004	1,297	1,538	1,982
8	1,675	2,252	2,225	2,991
9	0,895	1,191	1,376	1,859
10	2,481	3,445	3,180	4,427
11	2,782	3,941	3,555	5,041

**Tabla 38:** Factores de seguridad obtenidos por el método de janbú para cada uno de los perfiles del sector del salto del cabrón (lado derecho) por cada una de las condiciones.

FACTORES DE SEGURIDAD METODO JANBU (IZQUIERDO)				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	0,680	0,886	0,753	0,983
2	0,871	1,121	1,514	1,971
3	1,691	2,258	2,304	3,076
4	0,745	0,941	1,288	1,683
5	1,405	2,047	2,067	3,016
6	0,914	1,214	1,418	1,871
7	NO	NO	NO	NO
8	NO	NO	NO	NO
9	NO	NO	NO	NO
10	NO	NO	NO	NO
11	NO	NO	NO	NO

**Tabla 39:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Janbú para cada uno de los perfiles del sector del salto del cabrón (lado izquierdo) por cada una de las condiciones.



- SPENCER

FACTORES DE SEGURIDAD METODO SPENCER (DERECHO)				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	1,427	1,878	1,996	2,614
2	NO	NO	NO	NO
3	NO	NO	NO	NO
4	1,305	1,694	1,869	2,431
5	2,464	3,909	2,542	5,900
6	NO	NO	NO	NO
7	1,032	1,329	1,575	2,015
8	1,699	2,268	2,251	3,009
9	0,984	1,284	1,482	1,966
10	2,582	3,586	3,290	4,591
11	2,941	4,117	3,759	5,282

**Tabla 40:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Spencer para cada uno de los perfiles del sector del salto del cabrón (lado derecho) por cada una de las condiciones

FACTORES DE SEGURIDAD METODO SPENCER (IZQUIERDO)				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	0,726	0,891	0,794	0,986
2	0,974	1,207	1,510	2,103
3	1,723	2,285	2,343	3,108
4	0,912	1,128	1,505	1,879
5	1,607	2,246	2,308	3,252
6	1,002	1,239	1,471	1,876
7	NO	NO	NO	NO
8	NO	NO	NO	NO
9	NO	NO	NO	NO
10	NO	NO	NO	NO
11	NO	NO	NO	NO

**Tabla 41:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Spencer para cada uno de los perfiles del sector del salto del cabrón (lado izquierdo) por cada una de las condiciones.



- **MORGENSTERN-PRICE**

<b>FACTORES DE SEGURIDAD METODO MORGENSTERN (DERECHO)</b>				
<b>PERFIL</b>	<b>SATURADA Y CON SISMO</b>	<b>SATURADA Y SIN SISMO</b>	<b>NO SATURADA CON SISMO</b>	<b>NO SATURADA Y SIN SISMO</b>
1	1,427	1,877	1,995	2,600
2	NO	NO	NO	NO
3	NO	NO	NO	NO
4	1,297	1,687	1,855	1,811
5	2,452	3,907	3,539	5,902
6	NO	NO	NO	NO
7	1,038	1,329	1,570	2,012
8	1,692	2,266	2,245	3,005
9	0,981	1,283	1,482	1,964
10	2,582	3,589	3,292	4,590
11	2,937	4,117	3,758	5,282

**Tabla 42:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Morgenstern-Price para cada uno de los perfiles del sector del salto del cabrón (lado derecho) por cada una de las condiciones

<b>FACTORES DE SEGURIDAD METODO MORGENSTERN (IZQUIERDO)</b>				
<b>PERFIL</b>	<b>SATURADA Y CON SISMO</b>	<b>SATURADA Y SIN SISMO</b>	<b>NO SATURADA CON SISMO</b>	<b>NO SATURADA Y SIN SISMO</b>
1	0,722	0,893	0,788	0,982
2	0,956	1,189	1,511	2,287
3	1,726	2,284	2,342	3,100
4	0,896	1,118	1,422	1,811
5	1,604	2,244	2,305	3,252
6	1,000	1,228	1,480	1,879
7	NO	NO	NO	NO
8	NO	NO	NO	NO
9	NO	NO	NO	NO
10	NO	NO	NO	NO
11	NO	NO	NO	NO

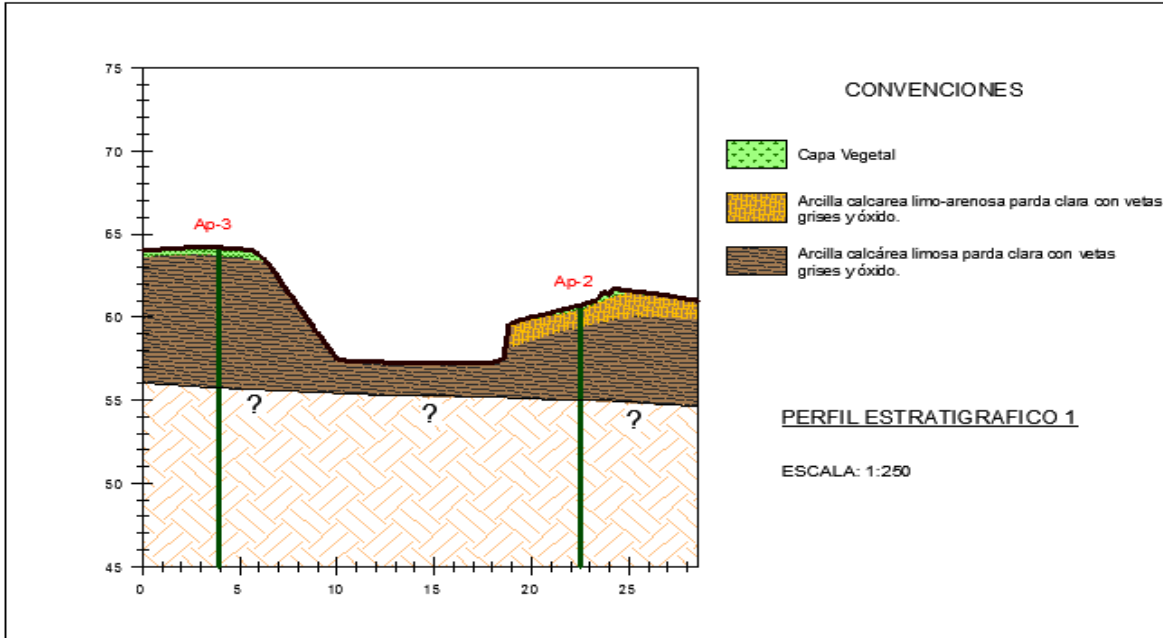
**Tabla 43:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Morgenstern-Price para cada uno de los perfiles del sector del salto del cabrón (lado izquierdo) por cada una de las condiciones.



- **Perfiles Típicos:**

Se tomaron 4 perfiles típicos del sector dependiendo la geomorfología y las características geotécnicas de cada perfil y se les hizo el análisis a la condición más crítica, como sigue:

- **Perfil 1:** Este perfil representa los perfiles 1, 6.



**Ilustración 29:** Perfil 1 con sus respectivos estratos de Lo Amador. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 1 SALTO DEL CABRON					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION ( $\phi$ )
Arcilla calcárea limo-arenosa parda clara con vetas grises y óxido	1,98	11,7	1,77	60	27
Arcilla calcárea limosa parda clara con vetas grises y óxido	2	11,9	1,79	50	24

**Tabla 44:** información geotécnica perfil 1 Salto del Cabron. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.



Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 1 SALTO DEL CABRON (DERECHO)	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	1.462
ORDINARIO O FELLENIUS	1.420
JANBU	1.397
SPENCER	1.427
MORGENSTERN-PRICE	1.427

**Tabla 45:** Factores de seguridad perfil 1 salto del Cabron lado derecho.

En este lado del perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de bishop simplificado, aunque los métodos de Spencer y Morgenstern-Price arrojaron resultados cercanos y el que menos factor de seguridad brinda es el de janbu.

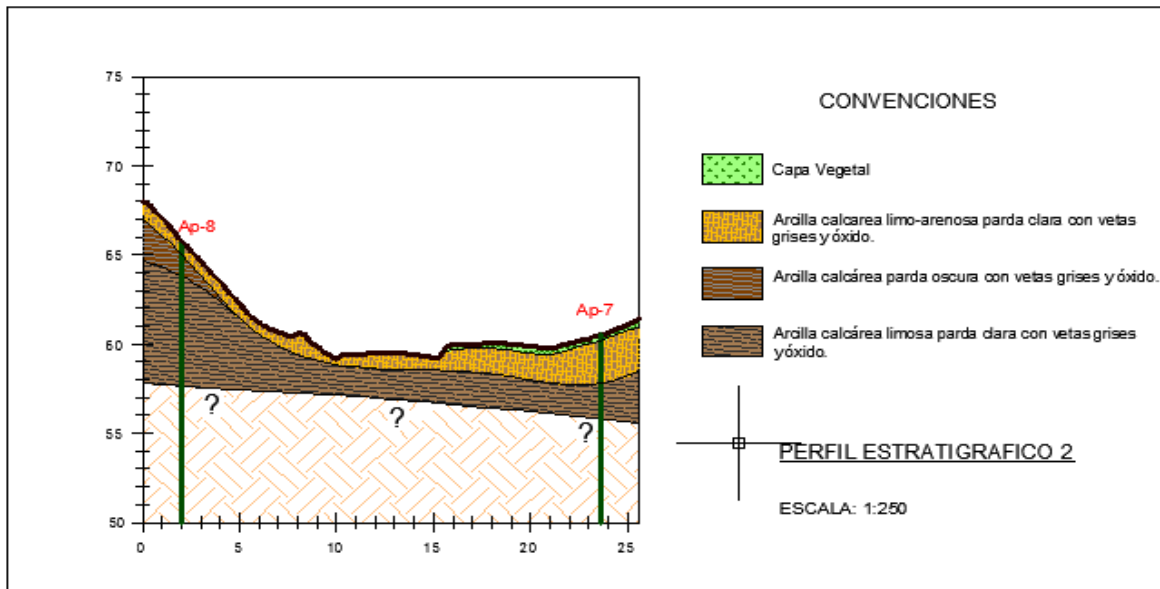
PERFIL 1 SALTO DEL CABRON (IZQUIERDO)	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	0.720
ORDINARIO O FELLENIUS	0.689
JANBU	0.680
SPENCER	0.726
MORGENSTERN-PRICE	0.722

**Tabla 46:** factores de seguridad perfil 1 salto del Cabron lado izquierdo.

En este lado del perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Spencer, aunque los métodos de Bishop y Morgenstern-Price arrojaron resultados cercanos y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.



- **Perfil 2:** Este perfil representa los perfiles 2, 3.



**Ilustración 30:** Perfil 2 con sus respectivos estratos de Lo Amador. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 2 SALTO DEL CABRON					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION ( $\phi$ )
Arcilla calcárea limo-arenosa parda clara con vetas grises y óxido	1,98	11,7	1,77	60	27
Arcilla calcárea parda oscura con vetas grises y óxido	1,88	25	1,50	53	24
Arcilla calcárea limosa parda clara con vetas grises y óxido	2	11,9	1,79	50	24

**Tabla 47:** información geotécnica perfil 2 Salto del Cabron. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.





PERFIL 2 SALTO DEL CABRON	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	0.959
ORDINARIO O FELLENIUS	0.867
JANBU	0.871
SPENCER	0.974
MORGENSTERN-PRICE	0.956

**Tabla 48:** Factores de seguridad perfil 2 Salto del Cabron.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Spencer y el que menos factor de seguridad brinda es el Ordinario.

- **Perfil 4:** Este perfil representa los perfiles 4, 5.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 4 SALTO DEL CABRON					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION (φ)
Arcilla calcárea limo-arenosa parda clara con vetas grises y óxido	1,98	11,7	1,77	60	27
Arcilla calcárea limosa parda clara con vetas grises y óxido	2	11,9	1,79	50	24

**Tabla 49:** información geotécnica perfil 4 salto del Cabron **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.



PERFIL 4 SALTO DEL CABRON (DERECHO)	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	1.295
ORDINARIO O FELLENIUS	1.262
JANBU	1.246
SPENCER	1.305
MORGENSTERN-PRICE	1.297

**Tabla 50:** Factores de seguridad perfil 4 salto del Cabron lado derecho.

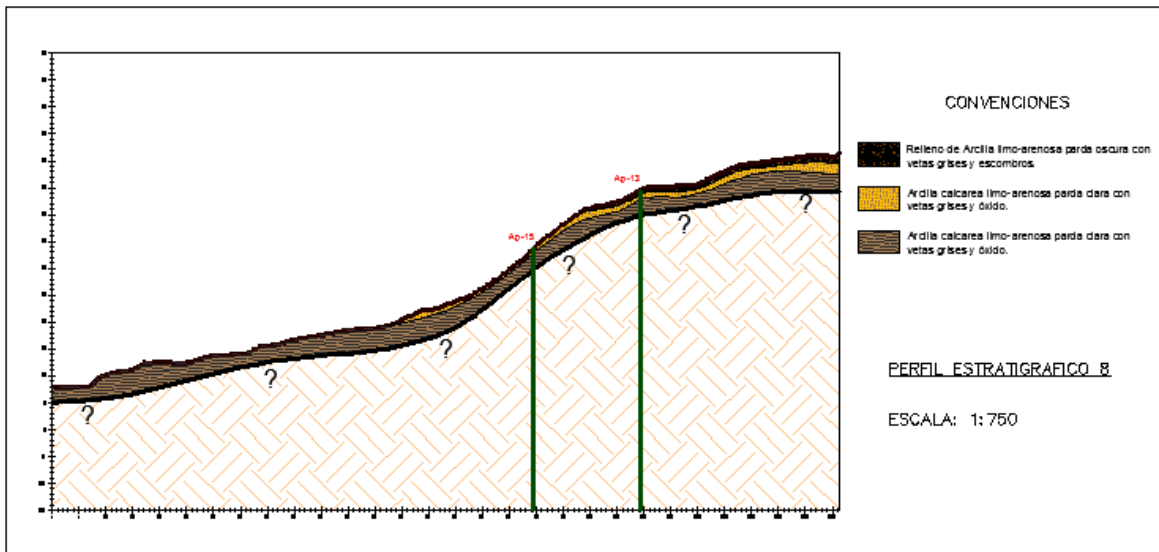
En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Spencer y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.

PERFIL 4 SALTO DEL CABRON (IZQUIERDO)	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	0.895
ORDINARIO O FELLENIUS	0.711
JANBU	0.745
SPENCER	0.912
MORGENSTERN-PRICE	0.896

**Tabla 51:** Factores de seguridad perfil 4 salto del Cabron lado izquierdo.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Spencer y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.

- **Perfil 8:** Este perfil representa los perfiles 8, 9, 10,11.



**Tabla 52:** Perfil 8 con sus respectivos estratos de Lo Amador. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 8 SALTO DEL CABRON					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (φ)
Relleno de arcilla limo-arenosa parda oscura con vetas grises y escombros	1,88	6,8	1,76	30	28
Arcilla calcárea limo-arenosa parda clara con vetas grises y óxido	1,98	11,7	1,77	60	27
Arcilla calcárea limosa parda clara con vetas grises y óxido	2	11,9	1,79	50	24

**Tabla 53:** información geotécnica perfil 8 salto del Cabron. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.



PERFIL 8 SALTO DEL CABRON	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	1,690
ORDINARIO O FELLENIUS	1,689
JANBU	1,675
SPENCER	1,699
MORGENSTERN-PRICE	1,692

**Tabla 54:** factores de seguridad perfil 4 Salto del Cabron lado derecho.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Spencer y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.

#### 4.4. SAN FRANCISCO FASE 1:

- **Geotecnia:**

Toda la información geotécnica del sector se organizó en un solo cuadro.

SAN FRANCISCO FASE 1					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (φ)
Material relleno de mezcla de arcillas, arena y ocasionalmente escombros y rastros de grava caliza	1,7	35,5	1,25	50	32
Material calcáreo de la formación popa	1,8	10,9	1,62	80	30
Arcilla limo-arenosa parda clara con vetas grises, oxido, vetas calizas y/o gravas	1,72	35,9	1,27	40	24



SAN FRANCISCO FASE 1					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION (φ)
Arcilla limosa parda clara con vetas grises, oxido y gravas calizas	1,68	33,5	1,26	70	28
Arena limo-arcillosa amarilla con piedras calizas y/o vetas grises	1,72	35,5	1,27	40	30
Arcilla parda oscura con vetas de oxido	1,78	24,2	1,43	90	25

**Tabla 55:** información geotécnica del sector San Francisco fase I. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

- **Factores De Seguridad**

Se calcularon todos los factores de seguridad de cada uno de los perfiles y se organizaron según el método aplicado para calcularlo en los siguientes cuadros:

- **BISHOP SIMPLIFICADO**

FACTORES DE SEGURIDAD METODO BISHOP				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	0,839	1,091	1,383	1,805
2	0,892	1,156	1,441	1,867
3	1,024	1,319	1,593	2,044
4	0,969	1,257	1,526	1,979
5	0,655	0,830	1,182	1,523
6	0,542	0,694	1,118	1,442

**Tabla 56:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Bishop simplificado para cada uno de los perfiles del sector san francisco fase 1 por cada una de las condiciones.



- ORDINARIO O FELLENIUS

FACTORES DE SEGURIDAD METODO ORDINARIO				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	0,829	1,086	1,378	1,800
2	0,889	1,158	1,440	1,868
3	1,016	1,312	1,586	2,039
4	0,964	1,255	1,524	1,978
5	0,551	0,719	1,155	1,496
6	0,534	0,694	1,117	1,446

**Tabla 57:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Ordinario o Fellenius para cada uno de los perfiles del sector de san francisco fase 1 por cada una de las condiciones.

- JANBU

FACTORES DE SEGURIDAD METODO JANBU				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	0,825	1,086	1,367	1,798
2	0,885	1,158	1,435	1,868
3	1,011	1,310	1,577	2,033
4	0,961	1,255	1,519	1,977
5	0,583	0,751	1,145	1,486
6	0,535	0,703	1,112	1,455

**Tabla 58:** Factores de seguridad obtenidos por el método de janbú para cada uno de los perfiles del sector de san francisco fase 1 por cada una de las condiciones.

- SPENCER

FACTORES DE SEGURIDAD METODO SPENCER				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	0,836	1,091	1,384	1,805
2	0,894	1,158	1,444	1,868



FACTORES DE SEGURIDAD METODO SPENCER				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
3	1,022	1,321	1,587	2,047
4	0,964	1,260	1,521	1,980
5	0,663	0,833	1,193	1,525
6	0,563	0,702	1,127	1,451

**Tabla 59:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Spencer para cada uno de los perfiles del sector de san francisco fase 1 por cada una de las condiciones.

- **MORGENSTERN-PRICE**

FACTORES DE SEGURIDAD METODO MORGENSTERN				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	0,839	1,092	1,381	1,804
2	0,887	1,158	1,444	1,869
3	1,021	1,321	1,587	2,046
4	0,964	1,260	1,523	1,485
5	0,652	0,831	1,194	1,981
6	0,548	0,726	1,123	2,372

**Tabla 60:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Morgenstern-Price para cada uno de los perfiles del sector de san francisco fase 1 por cada una de las condiciones.

- **Perfiles Típicos:**

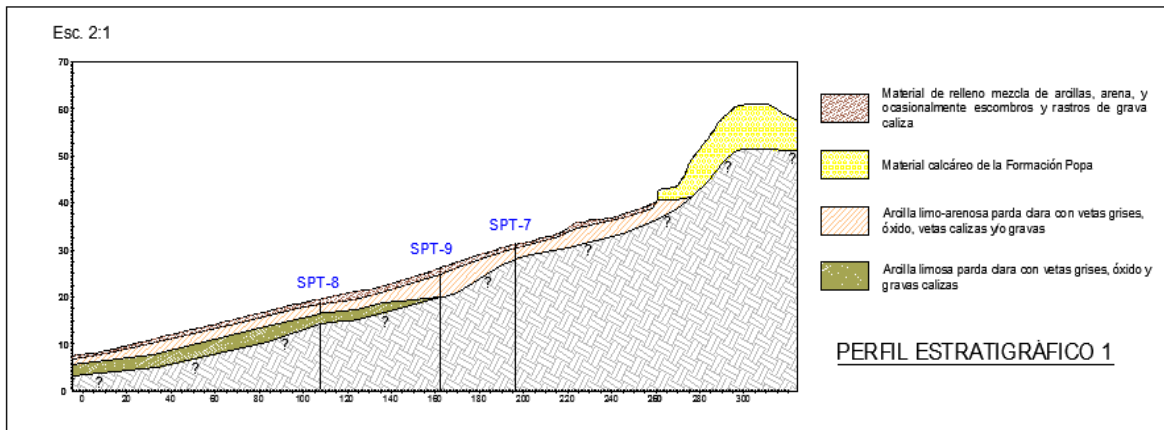
Se tomaron 4 perfiles típicos del sector dependiendo la geomorfología y las características geotécnicas de cada perfil y se les hizo el análisis a la condición más crítica, como sigue:



ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE APLICADO A TALUDES O LADERAS ALEDAÑAS AL CERRO DE LA POPA, CASCO URBANO DE CARTAGENA.



- **Perfil 1:** Este perfil representa los perfiles 1 y 2.



**Ilustración 31:** Perfil 1 con sus respectivos estratos de San Francisco 1. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 1 SAN FRANCISCO 1					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION (φ)
Material relleno de mezcla de arcillas, arena y ocasionalmente escombros y rastros de grava caliza	1,7	35,5	1,25	50	32
Material calcáreo de la formación popa	1,8	10,9	1,62	80	30
Arcilla limo-arenosa parda clara con vetas grises, oxido, vetas calizas y/o gravas	1,72	35,9	1,27	40	24
Arcilla limosa parda clara con vetas grises, oxido y gravas calizas	1,68	33,5	1,26	70	28

**Tabla 61:** información geotécnica perfil 1 san francisco 1. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.





Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

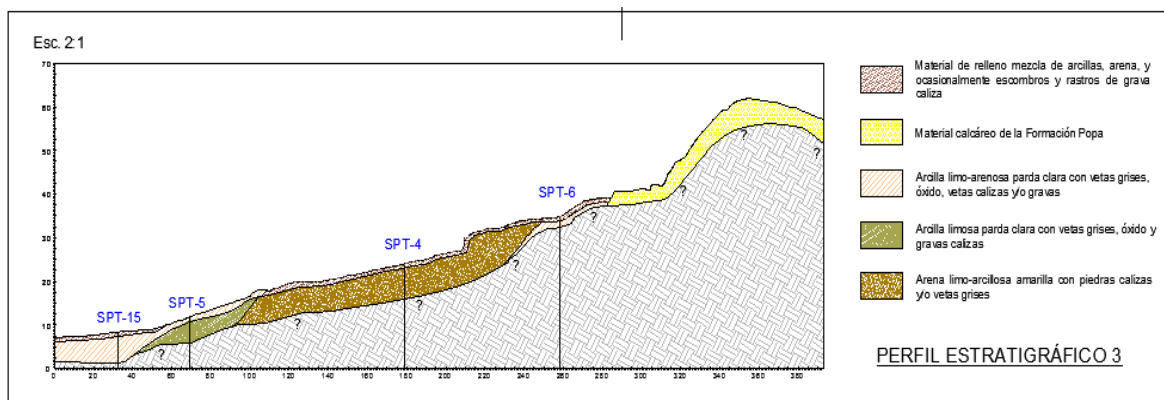
El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 1 SAN FRANCISCO 1	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	0.839
ORDINARIO O FELLENIUS	0.829
JANBU	0.825
SPENCER	0.836
MORGENSTERN-PRICE	0.839

**Tabla 62:** Factores de seguridad perfil 1 San Francisco 1.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Morgenstern-Price y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.

- **Perfil 3:** Este perfil es único en esta zona.



**Ilustración 32:** Perfil 3 con sus respectivos estratos de San Francisco 1. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.



En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 3 SAN FRANCISCO 1					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (Φ)
Material relleno de mezcla de arcillas, arena y ocasionalmente escombros y rastros de grava caliza	1,7	35,5	1,25	50	32
Material calcáreo de la formación popa	1,8	10,9	1,62	80	30
Arcilla limo-arenosa parda clara con vetas grises, oxido, vetas calizas y/o gravas	1,72	35,9	1,27	40	24
Arcilla limosa parda clara con vetas grises, oxido y gravas calizas	1,68	33,5	1,26	70	28
Arena limo-arcillosa amarilla con piedras calizas y/o vetas grises	1,72	35,5	1,27	40	30

**Tabla 63:** información geotécnica perfil 3 San Francisco 1. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 3 SAN FRANCISCO 1	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	1.024
ORDINARIO O FELLENIUS	1.016
JANBU	1.011

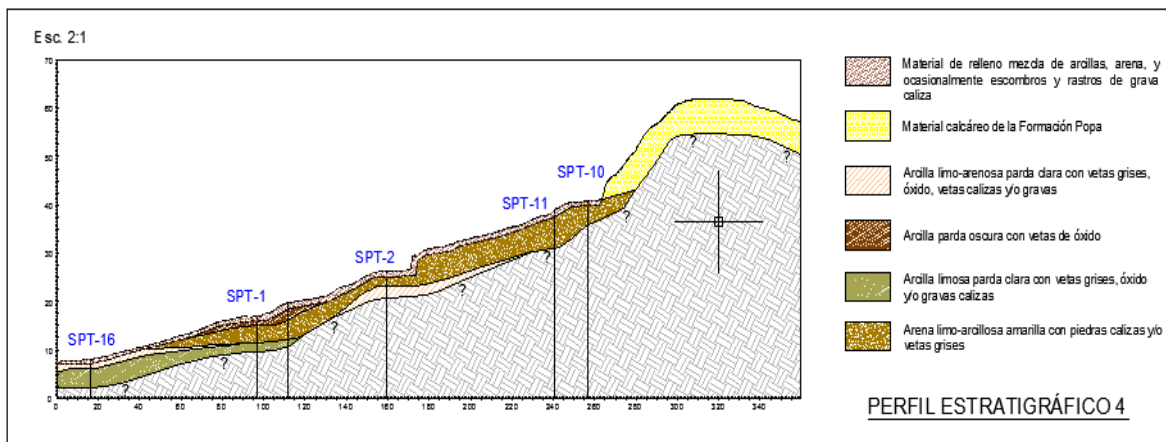


PERFIL 3 SAN FRANCISCO 1	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
SPENCER	1.022
MORGENSTERN-PRICE	1.021

**Tabla 64:** Factores de seguridad perfil 3 San Francisco 1.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Bishop simplificado y el que menos factor de seguridad brinda es el Janbu.

- **Perfil 4:** Este perfil es único en esta zona.



**Ilustración 33:** Perfil a con sus respectivos estratos de San Francisco 1. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 4 SAN FRANCISCO 1					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION (φ)
Material relleno de mezcla de arcillas, arena y ocasionalmente escombros y rastros de grava caliza	1,7	35,5	1,25	50	32
Material calcáreo de la formación popa	1,8	10,9	1,62	80	30



PERFIL 4 SAN FRANCISCO 1					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (φ)
Arcilla limo-arenosa parda clara con vetas grises, oxido, vetas calizas y/o gravas	1,72	35,9	1,27	40	24
Arcilla limosa parda clara con vetas grises, oxido y gravas calizas	1,68	33,5	1,26	70	28
Arena limo-arcillosa amarilla con piedras calizas y/o vetas grises	1,72	35,5	1,27	40	30
Arcilla parda oscura con vetas de oxido	1,78	24,2	1,43	90	25

**Tabla 65:** información geotécnica perfil 4 san francisco 1. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 4 SAN FRANCISCO 1	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	0.969
ORDINARIO O FELLENIUS	0.964
JANBU	0.961
SPENCER	0.964
MORGENSTERN-PRICE	0.964

**Tabla 66:** Factores de seguridad perfil 4 San Francisco 1.

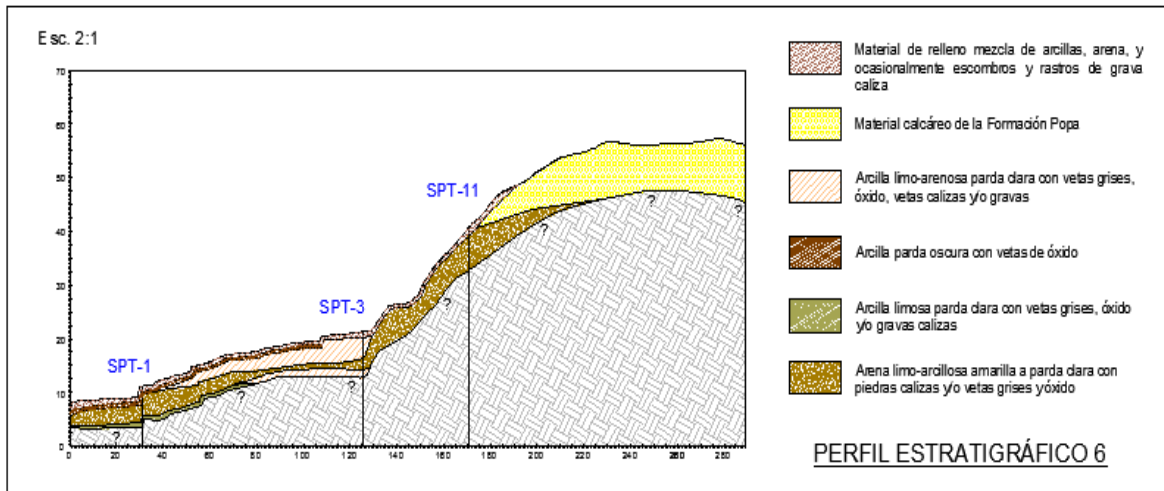


**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE LOS METODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE APLICADO A TALUDES O LADERAS ALEDAÑAS AL CERRO DE LA POPA, CASCO URBANO DE CARTAGENA.**



En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Bishop y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.

- **Perfil 6:** Este perfil representa los perfiles 5, 6.



**Ilustración 34:** Perfil 4 a con sus respectivos estratos de San Francisco 1. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 6 SAN FRANCISCO 1					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION (φ)
Material relleno de mezcla de arcillas, arena y ocasionalmente escombros y rastros de grava caliza	1,7	35,5	1,25	50	32
Material calcáreo de la formación popa	1,8	10,9	1,62	80	30
Arcilla limo-arenosa parda clara con vetas grises, oxido, vetas calizas y/o gravas	1,72	35,9	1,27	40	24
Arcilla limosa parda clara con vetas grises, oxido y gravas calizas	1,68	33,5	1,26	70	28



PERFIL 6 SAN FRANCISCO 1					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION ( $\phi$ )
Arena limo-arcillosa amarilla con piedras calizas y/o vetas grises	1,72	35,5	1,27	40	30
Arcilla parda oscura con vetas de oxido	1,78	24,2	1,43	90	25

**Tabla 67:** información geotécnica perfil 6 san francisco 1. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 6 SAN FRANCISCO 1	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	0.542
ORDINARIO O FELLENIUS	0.534
JANBU	0.535
SPENCER	0.563
MORGENSTERN-PRICE	0.548

**Tabla 68:** factores de seguridad perfil 6 San Francisco 1.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Spencer y el que menos factor de seguridad brinda es el ordinario.



#### 4.5. SAN FRANCISCO FASE 2:

- **Geotecnia:**

Toda la información geotécnica del sector se organizó en un solo cuadro.

SAN FRANCISCO FASE 2					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION (Φ)
Material calcáreo	1,82	12,7	2,95	30	50
Relleno	1,8	33,5	3,14	200	37
Arena limosa parda con vetas grises, óxido y calizas	1,72	35,5	3,08	20	26
Arena limosa con rastros de caracuchas menudas	1,68	35,9	3,04	20	33
Arena limo-arcillosa parda clara	1,72	20,5	2,93	520	41
arcilla limosa parda con rastro de arena y presencia ocasional de vetas de óxido, gravas y calizas	1,98	22,5	3,21	31	50

**Tabla 69:** información geotécnica perfil 6 san francisco 1. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

- **Factores De Seguridad:**

Se calcularon todos los factores de seguridad de cada uno de los perfiles y se organizaron según el método aplicado para calcularlo en los siguientes cuadros:



- **BISHOP SIMPLIFICADO**

<b>FACTORES DE SEGURIDAD METODO BISHOP</b>				
<b>PERFIL</b>	<b>SATURADA Y CON SISMO</b>	<b>SATURADA Y SIN SISMO</b>	<b>NO SATURADA CON SISMO</b>	<b>NO SATURADA Y SIN SISMO</b>
<b>1</b>	1,024	1,348	2,104	2,80
<b>2</b>	1,452	1,986	2,652	3,674
<b>3</b>	3,099	4,810	4,771	7,531
<b>4</b>	0,787	1,023	1,817	2,342
<b>5</b>	3,150	5,974	2,126	8,218

**Tabla 70:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Bishop simplificado para cada uno de los perfiles del sector de san francisco fase 2 por cada una de las condiciones.

- **ORDINARIO O FELLENIUS**

<b>FACTORES DE SEGURIDAD METODO ORDINARIO</b>				
<b>PERFIL</b>	<b>SATURADA Y CON SISMO</b>	<b>SATURADA Y SIN SISMO</b>	<b>NO SATURADA CON SISMO</b>	<b>NO SATURADA Y SIN SISMO</b>
<b>1</b>	1,009	1,335	2,091	2,787
<b>2</b>	1,439	1,961	2,633	3,653
<b>3</b>	3,012	4,705	4,697	7,440
<b>4</b>	0,769	1,017		2,336
<b>5</b>	3,064	5,874	5,042	8,122

**Tabla 71:** Factores de seguridad obtenidos por el método Ordinario o Fellenius para cada uno de los perfiles del sector de san francisco fase 2 por cada una de las condiciones.





- JANBU

FACTORES DE SEGURIDAD METODO JAMBU				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	1,009	1,339	2,082	2,784
2	1,442	1,968	2,625	3,648
3	3,045	4,723	4,698	7,412
4	0,770	1,019	1,803	2,334
5	3,129	5,883	5,063	8,097

**Tabla 72:** Factores de seguridad obtenidos por el método de janbú para cada uno de los perfiles del sector de san francisco fase 2 por cada una de las condiciones.

- SPENCER

FACTORES DE SEGURIDAD METODO SPENCER				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	1,024	1,344	2,106	2,795
2	1,462	1,990	2,650	3,675
3	3,066	4,778	4,743	7,505
4	0,791	1,021	1,812	2,337
5	3,137	5,898	5,119	8,146

**Tabla 73:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Spencer para cada uno de los perfiles del sector de san francisco fase 2 por cada una de las condiciones.



- **MORGENSTERN-PRICE**

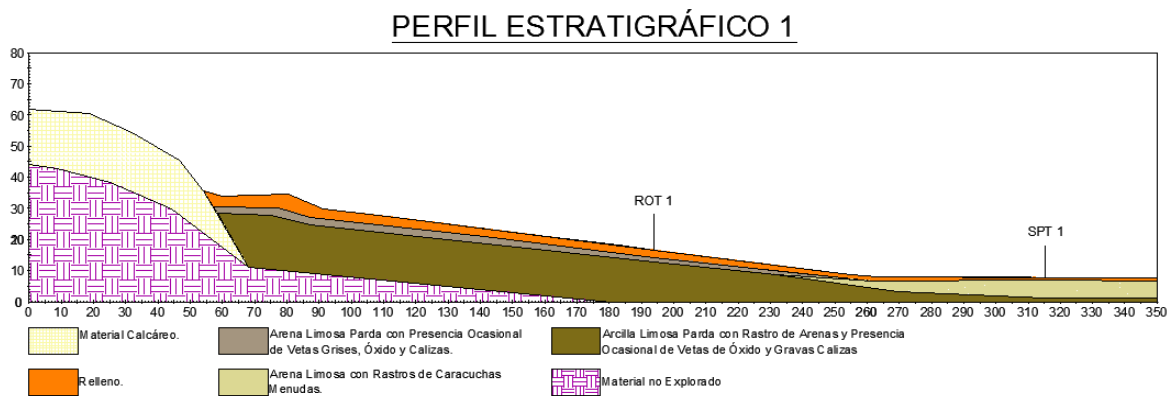
FACTORES DE SEGURIDAD METODO MORGENSTERN				
PERFIL	SATURADA Y CON SISMO	SATURADA Y SIN SISMO	NO SATURADA CON SISMO	NO SATURADA Y SIN SISMO
1	1,024	1,345	2,108	2,795
2	1,461	1,989	2,648	3,674
3	3,096	4,805	4,766	7,525
4	0,791	1,022	1,812	2,337
5	3,138	5,905	5,118	8,148

**Tabla 74:** Factores de seguridad obtenidos por el método de Morgenstern-Price para cada uno de los perfiles del sector de san francisco fase 2 por cada una de las condiciones.

- **Perfiles Típicos:**

Se tomaron 4 perfiles típicos del sector dependiendo la geomorfología y las características geotécnicas de cada perfil y se les hizo el análisis a la condición más crítica, como sigue:

- **Perfil 1:** Este perfil representa los perfiles 1 y 2.



**Ilustración 35:** Perfil 1 a con sus respectivos estratos de San Fransisco 2. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.



En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 1 SAN FRANCISCO 2					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (Φ)
Material calcáreo	1,82	12,7	2,95	30	50
Relleno	1,8	33,5	3,14	200	37
Arena limosa parda con vetas grises, oxido y calizas	1,72	35,5	3,08	20	26
Arena limosa con rastros de caracuchas menudas	1,68	35,9	3,04	20	33
Arcilla limosa parda con rastro de arena y presencia ocasional de vetas de óxido, gravas y calizas	1,98	22,5	3,21	31	50

**Tabla 75:** información geotécnica perfil 1 san francisco 2. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 1 SAN FRANCISCO 2	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	1.024
ORDINARIO O FELLENIUS	1.009
JANBU	1.009

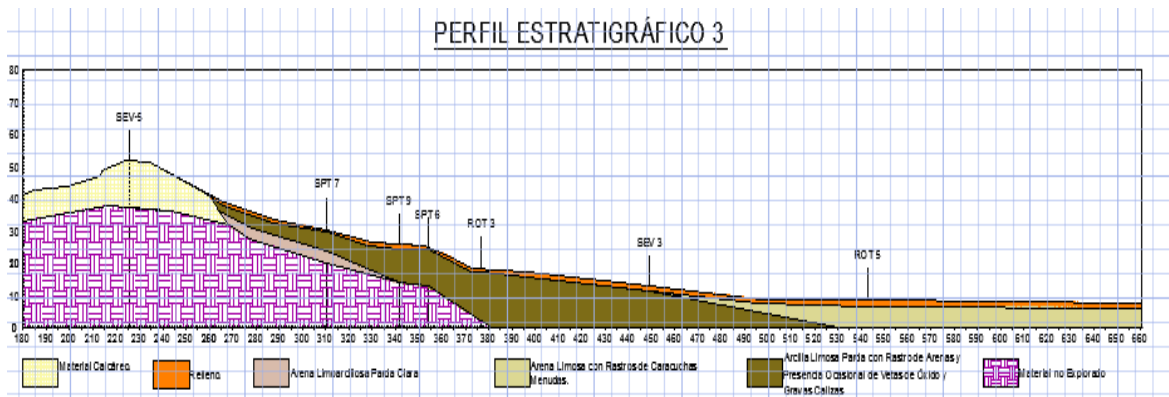


PERFIL 1 SAN FRANCISCO 2	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
SPENCER	1.024
MORGENSTERN-PRICE	1.024

**Tabla 76:** Factores de seguridad perfil 1 San Francisco 2

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Morgenstern-Price y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.

- **Perfil 3:** Este perfil es único en esta zona.



**Ilustración 36:** Perfil 3 a con sus respectivos estratos de San Francisco 2.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 3 SAN FRANCISCO 2					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION ( $\phi$ )
Material calcáreo	1,82	12,7	2,95	30	50
Relleno	1,8	33,5	3,14	200	37



PERFIL 3 SAN FRANCISCO 2					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C)	FRICCION (φ)
Arcilla limosa parda con rastro de arena y presencia ocasional de vetas de óxido, gravas y calizas	1,98	22,5	3,21	31	50
Arena limosa con rastros de caracuchas menudas	1,68	35,9	3,04	20	33
Arena limo-arcillosa parda clara	1,72	20,5	2,93	520	41

**Tabla 77:** Información geotécnica perfil 3 san francisco 2. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

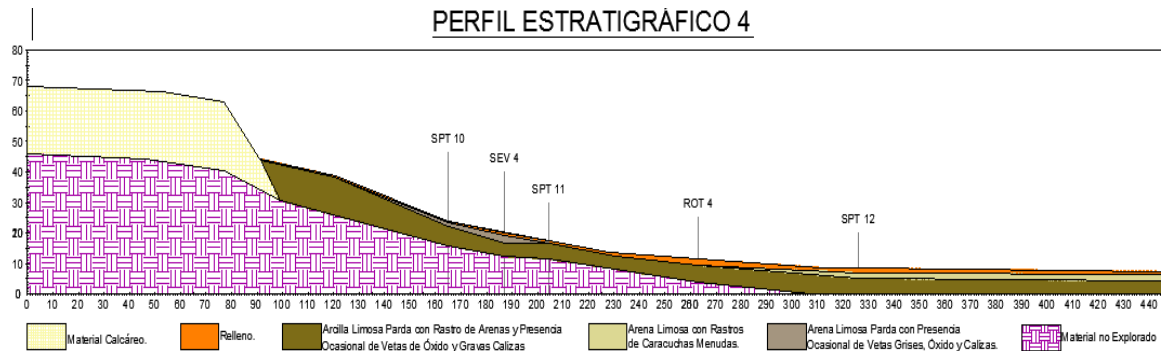
PERFIL 3 SAN FRANCISCO 2	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	3.099
ORDINARIO O FELLENIUS	3.012
JANBU	3.045
SPENCER	3.066
MORGENSTERN-PRICE	3.096

**Tabla 78:** Factores de seguridad perfil 3 San Francisco 2.



En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de bishop simplificado y el que menos factor de seguridad brinda es el ordinario.

- **Perfil 4:** Este perfil es único en esta zona.



**Ilustración 37:** Perfil 4 a con sus respectivos estratos de San Francisco 2.

En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil

PERFIL 4 SAN FRANCISCO 2					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION (Φ)
Material calcáreo	1,82	12,7	2,95	30	50
Relleno	1,8	33,5	3,14	200	37
Arena limosa parda con vetas grises, oxido y calizas	1,72	35,5	3,08	20	26
Arena limosa con rastros de caracuchas menudas	1,68	35,9	3,04	20	33
Arcilla limosa parda con rastro de arena y presencia ocasional de vetas de óxido, gravas y calizas	1,98	22,5	3,21	31	50

**Tabla 79:** información geotécnica perfil 4 san francisco 2. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.



Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

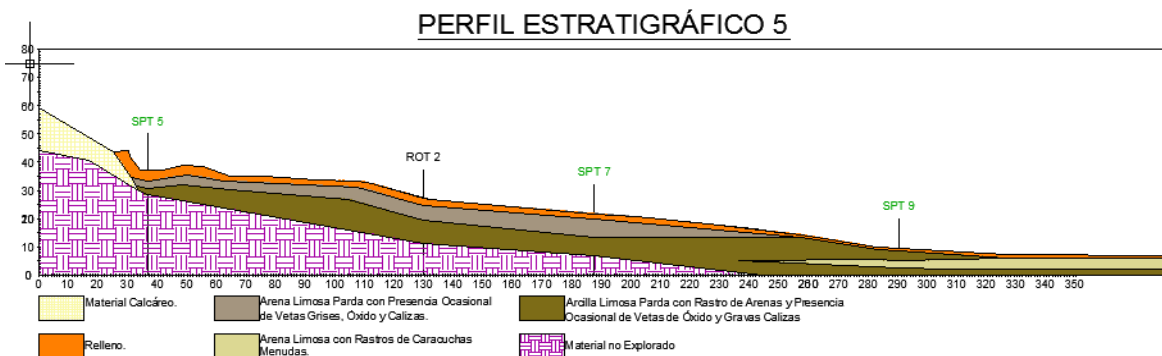
El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.

PERFIL 4 SAN FRANCISCO 2	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	0.787
ORDINARIO O FELLENIUS	0.769
JANBU	0.770
SPENCER	0.791
MORGENSTERN-PRICE	0.791

**Tabla 80 :** Factores de seguridad perfil 4 San Francisco 2.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Spencer y Morgenstern y Price y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu.

- **Perfil 5:** Este perfil es único en esta zona.



**Ilustración 38:** Perfil 5 a con sus respectivos estratos de San Francisco 2. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.



En el siguiente cuadro se resume toda la información geotécnica del perfil.

PERFIL 5 SAN FRANCISCO 2					
MATERIAL	PESO HUMEDO (TN/M3)	HUMEDAD NATURAL (%)	PESO SECO (TN/M3)	COHESION ( C )	FRICCION (φ)
Material calcáreo	1,82	12,7	2,95	30	50
Relleno	1,8	33,5	3,14	200	37
Arena limosa parda con vetas grises, oxido y calizas	1,72	35,5	3,08	20	26
Arena limosa con rastros de caracuchas menudas	1,68	35,9	3,04	20	33
Arcilla limosa parda con rastro de arena y presencia ocasional de vetas de óxido, gravas y calizas	1,98	22,5	3,21	31	50

**Ilustración 39:** información geotécnica perfil 5 san francisco 2. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.

Como muestra el cuadro este perfil está conformado en su mayoría por materiales arcillosos.

El siguiente cuadro muestra el resultado del factor de seguridad de cada método para la condición más crítica.





PERFIL 5 SAN FRANCISCO 2	
METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
BISHOP SIMPLIFICADO	3.150
ORDINARIO O FELLENIUS	3.064
JANBU	3.129
SPENCER	3.137
MORGENSTERN-PRICE	3.138

**Tabla 81:** factores de seguridad perfil 5 San Francisco 2.

En este perfil el método que obtuvo el mayor factor de seguridad fue el de Bishop simplificado y el que menos factor de seguridad brinda es el ordinario.

## 5. ANALISIS DE RESULTADOS.

El análisis de resultados se hizo por cada una de las zonas de estudio como sigue:

### 5.1. DIAMANTE

Esta zona consta de 12 perfiles en donde los perfiles típicos que se tomaron fueron:

- Perfil 1: este perfil representa los perfiles 1, 7, 9 y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Morgenstern-Price con un F.S=3,70 y el de menor factor de seguridad es el de Janbu con un F.S=2,989. Este perfil maneja factores de seguridad mayores a 2,5 y no se encuentra en tanto riesgo.
- Perfil 2: este perfil representa los perfiles 2,8 y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Spencer con un F.S=2,410 y el que menor factor de seguridad arroja es el de Janbu con un F.S=1,002. Este perfil maneja factores de seguridad por debajo de 2,5 por lo tanto se encuentra en riesgo.



- Perfil 4: este perfil representa los perfiles 3, 4, 10 y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Spencer con un  $F.S=1,638$  y el que menos factor de seguridad brinda es el Ordinario con un  $F.S=1,600$ . Este perfil maneja factores de seguridad por debajo de 2 por lo tanto este perfil se encuentra en inminente riesgo.
- Perfil 12: este perfil representa los perfiles 5, 6, 11, 12 y el método que mayor factor de seguridad arroja es el de Spencer con un  $F.S=1,594$  y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu con un  $F.S=1,450$ . Este perfil maneja factores de seguridad por debajo de 2 y se encuentra en un gran riesgo.

Los métodos que mayor factor de seguridad brindaron en esta zona de estudio fueron los de Spencer, Bishop modificado y Morgenstern-price y los que más desfavorables fueron los de Janbu y el Ordinario o fellenius.

## 5.2. LO AMADOR

Esta zona consta de 12 perfiles en donde los perfiles típicos que se tomaron fueron:

- Perfil 1: este perfil es único en esta zona de estudio y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Bishop modificado con un  $F.S=3,690$  y el de menor factor de seguridad es el de Janbu con un  $F.S=3,386$ . Este perfil maneja factores de seguridad mayores a 3 y no se encuentra en riesgo.
- Perfil 2: este perfil representa los perfiles 2,3 y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Bishop modificado con un  $F.S=2,344$  y el que menor factor de seguridad arroja es el de Janbu con un  $F.S=2,131$ . Este perfil maneja factores de seguridad por debajo de 2,5 por lo tanto se encuentra en riesgo.
- Perfil 4: este perfil representa los perfiles 4, 9, 10, 11, 12 y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Spencer con un  $F.S=2,239$  y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu con un  $F.S=2,092$ . Este perfil maneja factores de seguridad por debajo de 2,5 por lo tanto este perfil se encuentra en riesgo.
- Perfil 6: este perfil representa los perfiles 5, 6, 7, 8 y el método que mayor factor de seguridad arroja es el de Morgenstern-Price con un  $F.S=2,667$  y el que



menos factor de seguridad brinda es el de Janbu con un  $F.S=2,594$ . Este perfil maneja factores de seguridad por encima de 2,5 y no se encuentra en riesgo.

Los métodos que mayor factor de seguridad brindaron en esta zona de estudio fueron los de Spencer, Bishop modificado y Morgenstern-Price y los que más desfavorables fueron los de Janbu, y el Ordinario o Fellinius.

### 5.3. SALTO DEL CABRON

Esta zona consta de 11 perfiles en donde los perfiles típicos que se tomaron fueron:

- Perfil 1: este perfil representa los perfiles 1, 6 y se tuvo que hacer el análisis en 2 partes por la geomorfología del perfil. En el lado derecho el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Bishop simplificado con un  $F.S=1,462$  y el de menor factor de seguridad es el de Janbu con un  $F.S=1,397$ , este lado del perfil maneja factores de seguridad menores a 1,5 y se encuentra en riesgo inminente. En el lado izquierdo el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Spencer con un  $F.S=0,726$  y el que menor factor de seguridad arroja es el de Janbu con un  $F.S=0,680$ , este lado del perfil maneja factores de seguridad por debajo de 1 y reflejan movimiento pero en la actualidad se han trabajado y se encuentran en un equilibrio límite con factores de seguridad un poco mayores a 1.
- Perfil 2: este perfil representa los perfiles 2,3 y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Spencer con un  $F.S=0,974$  y el que menor factor de seguridad arroja es el Ordinario con un  $F.S=0,867$ . Este perfil maneja factores de seguridad por debajo de 1 pero en la actualidad se encuentran en un equilibrio límite con factores de seguridad un poco mayores a 1.
- Perfil 4: este perfil representa los perfiles 4, 5 y se tuvo que hacer el análisis en 2 partes por la geomorfología del perfil. En el lado derecho el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Spencer con un  $F.S=1,305$  y el de menor factor de seguridad es el de Janbu con un  $F.S=1,246$ , este lado del perfil maneja factores de seguridad menores a 1,5 y se encuentra en riesgo inminente. En el lado izquierdo el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Spencer con un  $F.S=0,912$  y el que menor factor de seguridad arroja es el de



Janbu con un  $F.S=0,745$ , este lado del perfil maneja factores de seguridad por debajo de 1 pero en la actualidad se encuentran en un equilibrio límite con factores de seguridad un poco mayores a 1.

- Perfil 8: este perfil representa los perfiles 8, 9, 10, 11 y el método que mayor factor de seguridad arroja es el de Spencer con un  $F.S=1,699$  y el que menos factor de seguridad brinda es el de Janbu con un  $F.S=1,675$ . Este perfil maneja factores de seguridad por debajo de 2 y se encuentra en un gran riesgo.

Los métodos que mayor factor de seguridad brindaron en esta zona de estudio fueron los de Spencer, Morgenstern-Price y Bishop modificado los que más desfavorables fueron los de Janbu y el Ordinario.

#### **5.4. SAN FRANCISCO FASE 1**

Esta zona consta de 6 perfiles en donde los perfiles típicos que se tomaron fueron:

- Perfil 1: este perfil representa los perfiles 1, 2 y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Morgenstern-Price con un  $F.S=0,839$  y el que menor factor de seguridad arroja es el de Janbu con un  $F.S=0,835$ . Este perfil maneja factores de seguridad por debajo de 1 pero en la actualidad se encuentran en un equilibrio límite con factores de seguridad un poco mayores a 1.
- Perfil 3: este perfil es único en esta zona y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Bishop simplificado con un  $F.S=1,024$  y el que menor factor de seguridad arroja es el de Janbu con un  $F.S=1,011$ . Este perfil maneja factores de seguridad de casi 1 por lo tanto se encuentra en estado crítico.
- Perfil 4: este perfil es único en esta zona y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Bishop simplificado con un  $F.S=0,969$  y el que menor factor de seguridad arroja es el de Janbu con un  $F.S=0,961$ . Este perfil maneja factores de seguridad menores que 1 pero en la actualidad se encuentran en un equilibrio límite con factores de seguridad un poco mayores a 1.
- Perfil 5: este perfil representa los perfiles 5,6 y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Spencer con un  $F.S=0,563$  y el que menor factor de seguridad arroja es el Ordinario con un  $F.S=0,534$ . Este perfil maneja factores



de seguridad por debajo de 1 pero en la actualidad se encuentran en un equilibrio límite con factores de seguridad un poco mayores a 1.

Los métodos que mayor factor de seguridad brindaron en esta zona de estudio fueron los de Spencer, Morgenstern-Price y Bishop modificado y los que más desfavorables fueron los de Janbu y el Ordinario.

## 5.5. SAN FRANCISCO FASE 2

Esta zona consta de 6 perfiles en donde los perfiles típicos que se tomaron fueron:

- Perfil 1: este perfil representa los perfiles 1, 2 y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Morgenstern-Price con un  $F.S=1,024$  y el que menor factor de seguridad arroja es el de Janbu con un  $F.S=1,009$ . Este perfil maneja factores  $> 1$  por lo tanto se encuentra en estado crítico.
- Perfil 3: este perfil es único en esta zona y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Bishop simplificado con un  $F.S=3,099$  y el que menor factor de seguridad arroja es el Ordinario con un  $F.S=3,012$ . Este perfil maneja factores de seguridad por encima de 3 por lo tanto se encuentra estable.
- Perfil 4: este perfil es único en esta zona y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Spencer con un  $F.S=0,791$  y el que menor factor de seguridad arroja es el de Janbu con un  $F.S=0,770$ . Este perfil maneja factores de seguridad menores que 1 por lo tanto se encuentra en estado crítico.
- Perfil 5: este perfil es único en esta zona y el método que mayor factor de seguridad brinda es el de Bishop simplificado con un  $F.S=3,150$  y el que menor factor de seguridad arroja es el Ordinario con un  $F.S=3,064$ . Este perfil maneja factores de seguridad por encima de 3 por lo tanto se encuentra estable.

Los métodos que mayor factor de seguridad brindaron en esta zona de estudio fueron los de Spencer, Morgenstern-Price y Bishop modificado y los que más desfavorables fueron los de Janbu y el Ordinario.



### 5.6.VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

Uno de los objetivos del proyecto es identificar las ventajas y desventajas de cada método en cada una de las zonas de estudio; pero como para calcular el factor de seguridad para cada uno de los métodos se usó la misma superficie de falla, manejaron los mismos parámetros y tuvieron un comportamiento similar en cada una de las zonas de estudio, se generalizaron las ventajas y desventajas de cada método en un solo cuadro comparativo que generaliza a todas las zonas de estudio como sigue:

VENTAJAS Y DESVENTAJAS			
METODO	SUPERFICIE DE FALLA	PARAMETROS	VENTAJAS Y DESVENTAJAS
<b>BISHOP SIMPLIFICADO</b>	Circular	Fricción ( $\Phi$ ), cohesión (C), Presión de poros (Ru)	A pesar de que no realiza el análisis de equilibrio completo, ya que asume las fuerzas entre develas es cero; este método es uno de los más ventajosos ya que es uno de los que brinda mayor factor de seguridad en cada una de la zonas estudiadas y es el que mejores resultados arrojó en los perfiles 1 y 2 de lo amador, 1 lado derecho del salto del carbón, 3 y 4 de san francisco fase 1, 3 y 5 de san francisco fase 2; y en los demás perfiles obtuvo valores parecidos a los métodos de Spencer y Morgenstern-Price.
<b>ORDINARIO</b>	Circular	Fricción ( $\Phi$ ), cohesión (C), Presión de	Es un método con un análisis sencillo el cual obtiene el factor de seguridad mediante una sumatoria de fuerzas actuantes y resultantes,



<b>FELLENIOUS</b>		poros (Ru)	donde los factores de seguridad obtenidos en cada una de las zonas estudiadas fueron uno de los más bajos y en los perfiles 2 del diamante, 2 del salto del cabrón, 5 de sanfrancisco fase 1, 3 y 5 de san francisco fase 2 fue el método que menor factor de seguridad arrojó.
<b>JANBU</b>	Circular	Fricción ( $\Phi$ ), cohesión (C) , Presión de poros (Ru)	Los factores de seguridad arrojados en cada una de las zonas de estudio calculados por este método son bajos y sobredeterminados, ya que no satisfacen completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Este fue el método más desventajoso del estudio, ya que en excepción con los perfiles donde el ordinario fue el que menor factor de seguridad arrojó, este método fue el que menos factor de seguridad brinda en el resto de perfiles en cada una de las zonas de estudio; aunque sus valores son muy parecidos a los obtenidos por el método ordinario o fellenius.
<b>SPENCER</b>	Circular	Fricción ( $\Phi$ ), cohesión (C) , Presión de poros (Ru)	Este método es uno de los más ventajosos debido a que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos y en cada uno de los sectores estudiados fue uno de los métodos que mayor valor arroja el factor de seguridad y en los perfiles 2, 4, 12 del diamante, 4 de loa amador, (1 lado izquierdo), 2, 4 8 del salto del cabrón, 5 de san francisco fase 1, 4 de san francisco fase 2, fue el método que mayor factor de seguridad arrojó. Aunque



			<p>sus valores fueron cercanos a los brindados por los métodos de Morgenstern-Price y bishop simplificado.</p> <p>Pero como es un método que satisface en forma más completa el equilibrio es más complejo de analizar y se presentan con frecuencia problemas numéricos que conducen a la valores no realísticos del factor de seguridad</p>
<p><b>MORGENSTER N-PRICE</b></p>	<p>Circular</p>	<p>Fricción (<math>\Phi</math>), cohesión (C) , Presión de poros (Ru)</p>	<p>Este método al igual que el de Spencer es un método muy preciso y es prácticamente aplicable a todas las geometrías y perfiles de suelo; fue uno de los que mayor factor de seguridad brinda en cada una de las zonas estudiadas y en los perfiles 1 del diamante, 6 de lo amador, 1 de san francisco fase 1, 1 san francisco fase 2 fue el método que mayor factor de seguridad arrojó. Aunque obtuvo valores similares a los de Bishop simplificado y Spencer en los demás perfiles por cada uno de los sectores estudiados.</p> <p>Al igual que el método de Spencer el análisis de Morgenstern y Price puede llegar a ser complejo debido a que satisface de forma más completa el equilibrio.</p>

**Tabla 82:** Tabla de paramentaros, ventajas y desventajas de cada método. **Fuente:** Estudios geotécnicos de la universidad de Cartagena.





## 6. CONCLUSIONES.

Después de haber realizado el proyecto podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Los métodos que mayor factor de seguridad brinda en los sectores estudiados fueron los de Spencer, Morgenstern-Price y Bishop modificado, arrojando factores de seguridad muy similares en cada uno de los perfiles típicos que representaban la zona estudiada.
- Los métodos que menor factor de seguridad brinda en los sectores estudiados fueron los de Janbu y Ordinario o Fellenius, arrojando factores de seguridad muy similares en cada uno de los perfiles típicos que representaban la zona estudiada, debido a que son métodos muy sencillos en los cuales no se satisface completamente las condiciones de equilibrio y se asume que las fuerzas entre dovelas es cero, lo que produce factores de seguridad bajos y sobredeterminados.
- En la Loma del Diamante el método que mejor aplica es el de Spencer, ya que en tres de los cuatro perfiles típicos que se tomaron para esta zona fue el método que mayor factor de seguridad arrojó. Y el método que menos aplica en esta zona es el de Janbú, ya que en tres de los cuatro perfiles típicos es el que menos factor de seguridad brinda.
- En Lo Amador el método que mejor aplica es el de Bishop simplificado, ya que en dos de los cuatro perfiles típicos que se tomaron para esta zona fue el método que mayor factor de seguridad arrojó. Y el método que menos aplica en esta zona es el de Janbú, ya que en los cuatro perfiles típicos es el que menos factor de seguridad brinda.
- En el Salto del Cabrón el método que mejor aplica es el de Spencer, ya que en los cuatro perfiles típicos que se tomaron para esta zona fue el método que mayor factor de seguridad arrojó. Y el método que menos aplica en esta zona es el de Janbú, ya que en tres de los cuatro perfiles típicos es el que menos factor de seguridad brinda.
- En san francisco fase 1 el método que mejor aplica es el de Bishop simplificado, ya que en tres de los cuatro perfiles típicos que se tomaron para esta zona fue el método que mayor factor de seguridad arrojó. Y el método que menos aplica en esta



zona es el de Janbú, ya que en tres de los cuatro perfiles típicos es el que menos factor de seguridad brinda.

- En San Francisco fase 2 el método que mejor aplica es el de Bishop simplificado, ya que en dos de los cuatro perfiles típicos que se tomaron para esta zona fue el método que mayor factor de seguridad arrojó. Y el método que menos aplica en esta zona es el de Janbú, ya que en tres de los cuatro perfiles típicos es el que menos factor de seguridad brinda.
- Los perfiles 2, 4, 12 de la Loma del Diamante, 1 (lado derecho), 4 (lado derecho), 8 del salto del cabrón, 3 de sanfrancisco fase 1, 1 de sanfrancisco fase dos arrojaron factores de seguridad menores que dos por cada uno de los métodos, por lo tanto esta zona se encuentra en inminente riesgo geológico.
- Los perfiles 1(lado izquierdo), 2, 4(lado izquierdo) del salto del cabrón, 1, 4, 6 de san francisco fase 1, 4, 5 de san francisco fase 2 obtuvieron factores de seguridad por debajo de 1 por cada uno de los métodos, esto quiere decir que no se encuentran en equilibrio y que en la actualidad debieron haber fallado, pero a estos perfiles se le han hecho soluciones momentáneas en los últimos años y se encuentran en un equilibrio límite, es decir, ahora mismo manejan factores de seguridad un poco mayores o iguales que 1. Cabe resaltar que los estudios con los que se recolectó toda la información geotécnica de los perfiles fueron hechos por la Universidad De Cartagena en el periodo del 2008 a 2012, por lo tanto algunos datos no han sido actualizados y se presentan estos resultados inesperados e incoherentes.



## 7. RECOMENDACIONES.

Después de haber realizado el estudio ofrecemos las siguientes recomendaciones:

- Los perfiles 1 de la loma del diamante, 1 de lo amador, 3, 5 de san francisco fase dos arrojaron factores de seguridad por encima de 3 y no presentan falla por estabilidad, sin embargo las fallas se pueden presentar por erosión, ya que se puede apreciar la falta de la capa vegetal en la superficie de los perfiles.
- En las zonas que se encuentran en estado crítico y en riesgo se recomienda tomar medidas urgentes para estabilizar esos taludes.
- El estudio se realizó aplicando los métodos de equilibrio límite, por lo tanto se basó solamente en la estática y no se tuvo en cuenta las deformaciones, por lo tanto en los perfiles en los que aparece materiales residuales y roca meteorizada, se recomienda un estudio con nuevos enfoques y superficies de falla no simétricas, para obtener mejores resultados.
- Para realizar el proyecto se utilizó una información suministrada por la Universidad De Cartagena. La universidad realizó estos laboratorios en los años de 2008, 2009, 2010 y 2011, por lo tanto si se quiere resultados más precisos se recomienda realizar nuevos laboratorios para actualizar los datos geotécnicos de estos perfiles ya que han sufrido cambios en los últimos años.



## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1]. **A.O. Oliva; M.A. Rodríguez; M.B. Prendes.** Estudio analítico de estabilidad de taludes con rotura plana – Universidad central de las villas, santa Clara, Cuba.
- [2] **Abramson, L.W., Lee T.S., Sharma S., Boyce G.M.,(1996),** "Slope stability and stabilization methods".
- [3] **ALCALDIA MAYOR DE CARTAGENA CONVENIO No. 09- 430- 431 (2009) -** *evaluación geotécnica y diseños de obras de estabilización en tres sitios críticos del cerro de la popa.* Tomo I, II y III.
- [3] **ALCALDIA MAYOR DE CARTAGENA CONVENIO No. 09- 430- 431 (2009)-** *EVALUACIÓN GEOTÉCNICA Y DISEÑOS DE OBRAS DE ESTABILIZACIÓN DE LAS LADERAS DEL SECTOR NORORIENTE DEL CERRO LA POPA, EN EL BARRIO SAN FRANCISCO.*
- [4] **Ali MoradiA. frapoli, MortezaOsanloo.- International Journal of Mining Science and Technology 24 (2014) 105–110-** Department of Mining, Metallurgy and Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran 15875-4413, Iran - *Determination and stability analysis of ultimate open-pit slope under geomechanical uncertainty.*
- [5] **B. K. Lowa & Wilson H. Tangb** *Computers and Geotechnics, Vol. 21, No. 2, pp. 121-142, 1997 -Probabilistic Slope Analysis Using Janbu's Generalized Procedure of Slices.*
- [6] **B.S. Tork, E. Reyes, J.C. Gálvez y V. Navarro -** ANALES DE MECÁNICA DE LA FRACTURA Vol. 20 (2003) - E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Castilla La Mancha, Av. Camilo José Cela, s/n, 13071-Ciudad Real.
- [7] **Carlos Eduardo Espinoza Durán y Leandro Enrique Tapia Berzoza. (Cuenca – Ecuador 2013) -** *Análisis comparativo entre los métodos de estabilidad de taludes*



*aplicados a las presas de tierra del Proyecto PACALORI*

[8] **Ching-Chuan Huang** - **Engineering Geology 157 (2013) 39–47** –ChingDepartment of Civil Engineering, National Cheng Kung University, No. 1, University Road, Tainan 70101, Taiwan - *Developing a new slice method for slope displacement analyses.*

[9] **Diego Bernabé Morales**. Procedimientos de investigación y comparación de los métodos de bishop modificado, janbú y fellenius para el cálculo de estabilidad de taludes - **Universidad San Carlos Guatemala.**

[10] **ErlyBahsan a, Hung-Jiun Liao a, JianyeChing b, Szu-Wei Lee b.** **Engineering Geology 172 (2014) 85–94**-Department of Civil and Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, *Statistics for the calculated safety factors of undrained failure slopes.*

[11] **Hoek-E and Bray-J.W.** *Rock slope engineering.* Institution of mining and metallurgy, London.1981.

[12] **Jaime Suarez Díaz** – *Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales*, cap. 4 - 2002.

[13] **JianliangDenga, HiroshiKameya b, Yukika Miyashita c, JiroKuwano d, Reiko Kuwano c, Junichi Koseki c** - **Engineering Geology 123 (2011) 302–314** - *Study on a failed dip slope with a thin sandy layer in 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake.*

[14] **Lee, T.S. Hull and H.G. Poulos** **Computers and Geotechnics 17 (1995) 1-16 0 1995** - C.Y. School of Civil and Mining Engineering The University of Sydney NSW 2006, Australia - *SIMPLIFIED PILE-SLOPE STABILITY ANALYSIS.*

[15] **Low-B.K. and Tang-W.H.** Probabilistic slope analysis using janbu's generalized procedure of slices. *Computer and geotechnics*, 21:121-142.1997.

[16] **Low-B.K.** Practical probabilistic slope stability analysis. Proceeding, soil and rock America 2003.



- [17] **M. Rabie.** - **HBRC Journal (2014) 10, 160–168;**Civil Engineering Dept., Helwan University, Cairo, Egypt- *Comparison study between traditional and finite element methods for slopes under heavy rainfall.*
- [18] **Maciñeira Alonso, Enrique (2004) – Universidad da Coruña.** Departamento de Métodos Matemáticos e de Representación - *Determinación de una fórmula para el cálculo de la estabilidad del morro de un dique en talud.*
- [19]**Revista de la Construcción vol.12 no.1 Santiago abr. 2013** - Revista de la construcciónversión On-line ISSN 0718-915X.
- [20] **Walter W. Chen a,n, Zhe-Ping Shen a, Jian-An Wang a,Fuan Tsai b** - **Neurocomputing 148 (2015) 167–174** - *Scripting STABL with PSO for analysis of slope stability.*
- [21] **Wyllie- D.C and Mah-C.W (2005)** - *Rock slope engineering-Civil and mining.* SponPress.



# ANEXOS



# Lo Amador





# El Diamante



# Salto del Cabron



# San Francisco