



**EVALUACIÓN CRÍTICA DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA
ESTABILIDAD DE TALUDES EN LADERAS NATURALES Y LAS
PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN**

*Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de
magister en ingeniería*

Presentado por:

JOSÉ ALBERTO CÓRDOBA ARIAS

Ingeniero Civil

Asesor:

JORGE ALONSO PRIETO SALAZAR PhD

ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD EAFIT

MEDELLÍN 2023

DEDICATORIA

En primer lugar, quiero darle gracias y dedicado a Dios por siempre estar presente en todo momento, dándome el conocimiento y las fuerzas para seguir adelante a pesar de las dificultades del día a día, permitiéndome cumplir cada día con los objetivos propuestos.

A mi esposa Lisneider Hinestroza Cuesta, por su apoyo y paciencia durante este trabajo en el cual está plasmado su voz de aliento y de tu puedes que me permitían no desfallecer en el proceso.

A mi hijo Carlos Santiago, quien es mi vida y fortaleza para seguir luchando por alcanzar logros que me permitan contribuir en su formación.

A mi tutor el ingeniero Jorge Alonso Prieto Salazar, quien fue el motor e inspiración para adelantar este trabajo, por sus consejos, directrices y apoyo en mi formación en esta línea de profundización, muchas gracias, querido profesor.

A mis padres José Clarildo y Rufina, por darme la vida y el apoyo en la formación de los cimientos que permitieran ser el tipo de persona que soy hoy.

A mis hermanos, Jhon Alexander, Yenny Patricia y Jesús Orlando, por su apoyo y acompañamiento en todo el proceso.

Muchas gracias a todos y que Dios siempre me los esté bendiciendo.

AGRADECIMIENTO

Especialmente a Dios por mantenerme con vida y salud, así como lucido para afrontar todas las dificultades que se me presentaron en este proceso.

A Lisneider Hinstroza, por siempre estar y recordarme que las cosas que se empiezan siempre deben terminarse no permitiéndome rendirme a pesar de los momentos difíciles.

A mi hermano Jhon Alexander Córdoba Arias, por su apoyo desinteresado y siempre estar presto para darme una aclaración, impulsando el desarrollo de este trabajo.

A mi tutor el Ing. Jorge Alonso Prieto Salazar, quien fue el precursor de esta idea y de orientarme para navegar por esta experiencia de profundización en el tema de los taludes, que son una gran problemática en mi región y causante de muchas pérdidas humanas, gracias profe por todos los conocimientos impartidos y por siempre estar dándome una voz de apoyo.

A mis amigos y compañeros del grupo de investigación de Ingeniería y Ciencias de la Tierra por su apoyo, consejo y participación en la construcción de la propuesta de profundización y siempre dando una voz de apoyo para seguir adelante.

Finalmente le agradezco a todas las personas que de una u otra manera intervinieron en el desarrollo de este trabajo, dando un consejo o un tu puedes ya te falta poco.

MUCHAS GRACIAS

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
CONTENIDO DE FIGURAS	VII
CONTENIDO DE TABLAS	VIII
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. OBJETIVOS.....	17
1.1.1. OBJETIVO GENERAL	17
1.1.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS	17
1.2. METODOLOGÍA	18
1.2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	18
1.2.2. ELABORACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....	18
1.2.3. REALIZACIÓN DE UN ANÁLISIS CRÍTICO.....	18
1.2.4. IDENTIFICAR LAS POSIBLES PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN.....	18
1.2.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	19
2. ESTADO DEL ARTE SOBRE LOS PARÁMETROS Y FACTORES QUE INCIDEN EN LA ESTABILIDAD DE LAS LADERAS NATURALES, Y LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE MEDIOS CONTINUOS, DISCRETOS Y RETROSPECTIVOS.....	20
2.1. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS Y DISCIPLINAS QUE INCIDEN EN LA ESTABILIDAD DE LA LADERA.....	20
2.1.1. GEOLOGÍA.....	20
2.1.2. GEOTECNIA.....	20
2.1.3. MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS.....	21
2.1.4. CAPACIDAD DE CARGA DEL SUELO.....	21
2.1.5. PERMEABILIDAD.....	21
2.1.6. FACTORES QUE INCIDEN EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES NATURALES.....	21
2.1.6.1. Comportamiento del material constitutivo.....	22
2.1.6.2. Fuerzas aplicadas.....	22
2.1.6.3. Equilibrio de fuerzas aplicadas.....	22
2.1.6.4. Compactabilidad.....	22
2.1.6.5. Condiciones de frontera.....	23
2.1.7. MOVIMIENTOS EN MASA.....	27
2.1.7.1. Clasificación de los movimientos en masa.....	27
2.1.8. SUPERFICIE DE FALLA.....	32
2.1.8.1. Formas de la superficie de falla.....	33
2.2. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES APLICADO A LADERAS NATURALES.....	34
2.2.1. MÉTODOS DE MEDIOS CONTINUOS.....	34
2.2.1.1. Análisis por Equilibrio limite.....	35
2.2.1.1.1. Base teórica de Cuñas (Caídas de Rocas).....	36
2.2.1.1.2. Base teórica de las Tablas de Janbú.....	39
2.2.1.1.3. Base teórica de Talud Infinito.....	45
2.2.1.1.4. Base teórica de Espiral Logarítmica.....	46
2.2.1.1.5. Base teórica de Falla Circular.....	47

2.2.1.1.6. Base teórica de Janbú.	48
2.2.1.1.7. Base teórica de Fellenius.	50
2.2.1.1.8. Base teórica de Bishop Simplificado.	51
2.2.1.1.9. Base teórica de Morgenstern-Price.	53
2.2.1.1.10. Base teórica de Spencer.	54
2.2.1.2. Análisis Numéricos.	55
2.2.1.2.1. Base teórica sobre Elementos Finitos.	56
2.2.1.2.2. Base teórica sobre Diferencias Finitas.	58
2.2.2. MÉTODOS DE MEDIOS DISCRETOS.	61
2.2.2.1. Método de Elementos Discretos (DEM).	62
2.2.2.2. Método de Diferencias Discretas (DDM).	64
2.2.2.3. Método de Bloques.	64
2.2.3. MÉTODOS RETROSPECTIVOS.	64
2.2.3.1. Método de Elementos Finitos Inverso.	65
2.2.3.2. Método de Deformación Límite.	66
2.2.3.3. Método de Análisis de Sensibilidad.	66
2.2.3.4. Métodos de Taludes Naturales (MTN).	66
2.3. RESUMEN SOBRE LOS MÉTODOS DE ESTABILIDAD.	67
2.3.1. CRITERIO DE ROTURA DE HOEK & BROWN.	73
3. EVALUACIÓN CRÍTICA DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE MEDIOS CONTINUOS, MEDIOS DISCRETOS E RETROSPECTIVO, APLICADOS A LA ESTABILIDAD DE LADERAS NATRUALES, SUS VENTAJAS Y DESVENTAJAS.	75
3.1. MÉTODOS DE MEDIOS CONTINUOS.	77
3.1.1. LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LIMITE.	78
3.1.1.1 Cuñas (caída de rocas).	80
3.1.1.2. Talud Infinito.	81
3.1.1.3. Espiral Logarítmica.	81
3.1.1.4. Fellenius.	82
3.1.1.5. Falla Circular.	83
3.1.1.6. Janbú.	84
3.1.1.7. Tablas de Janbú.	85
3.1.1.8. Bishop Simplificado.	85
3.1.1.9. Spencer.	86
3.1.1.10. Morgenstern-Price.	87
3.1.2. MÉTODOS NUMÉRICOS.	87
3.1.2.1. Elementos finitos.	88
3.1.2.2. Diferencias Finitas (DDM).	89
3.2. MÉTODOS DE MEDIOS DISCRETOS (MMD).	90
3.2.1. MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS (DEM).	91
3.2.2. MÉTODO DE DIFERENCIAS DISCRETAS (DDM).	92
3.2.3. MÉTODO DE BLOQUES.	93
3.3. MÉTODOS RETROSPECTIVOS.	94
3.3.1. ELEMENTOS FINITOS INVERSO.	94
3.3.2. DEFORMACIÓN LÍMITE.	95
3.3.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.	95
3.3.4. MÉTODOS DE TALUDES NATURALES (MTN).	96

3.4. CRITERIO DE ROTURA DE HOEK & BROWN	100
4. PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIONES SOBRE LA ESTABILIDAD DE TALUDES, APLICADOS A LADERAS NATURALES.	102
5. CONCLUSIONES	106
6. RECOMENDACIONES	107
7. BIBLIOGRAFÍA	108

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Talud artificial y ladera natural.....	9
(Fuente: Suárez, 1998)	9
Figura 2. Afectaciones graves por eventos naturales y Departamentos, 1998-2021.	14
Figura 3. Zonas con condiciones muy críticas a amenazas hidrometeorológicas.	15
Fuente (DNP, 2019).....	15
Figura 4. Diagrama metodológico del trabajo de grado.	19
Fuente (Elaboración propia).....	19
Figura 5. Superficies de rotura más frecuentes. a) Deslizamientos rotacionales; b) Deslizamientos traslacionales.	33
Figura 6. Esquema general de la falla en cuñas. a) Caso general; b) Sin grietas de tensión; c) Talud en condición drenada; d) Cuña con igual ángulo de fricción en los dos planos.	37
Figura 7. Esquema del análisis cinemático de la falla en cuña. a) Falla en cuña; b) Interpretación de la falla en cuña.....	38
Figura 8. Tablas de estabilidad para suelos cohesivos ($\phi = 0$) de acuerdo a Janbú (1968).	41
Figura 9. Tablas de estabilidad para suelos no cohesivos $\phi > 0$ de acuerdo a Janbú (1968).....	42
Figura 10. Factores de corrección por sobrecarga, sumergencia y flujo (Janbú 1968).....	43
Figura 11. Factores de corrección por grietas de tensión para su uso en las tablas de estabilidad (Janbú 1968).	44
Figura 12. Esquema para cálculo método talud infinito.	45
Figura 13. Modelo geométrico (método de la espiral logarítmica).	46
Figura 14. La inestabilidad potencial de una superficie de falla circular.	48
Figura 15. Diagrama del factor f_0 utilizado en el método de Janbú (Suárez, 2011)	49
Figura 16. Modelo de análisis (método de Janbú).	50
Figura 17. Modelo de análisis (método de Fellenius).	51
Figura 18. Rebanadas con respecto al centro de rotación.	52
Figura 20. Centro de rotación friccional aplicado a superficies no circular	54
Figura 21. Malla típica para el análisis de un talud vertical por elementos finitos (Ashford y Sitar 1994)...	58
Figura 22. Modelos para análisis de estabilidad con el uso del MDF (Oliva, 1999).	59
Figura 23. Modelos para el cálculo del factor de seguridad (Oliva, 1999).....	60

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de fenómenos extremos de origen natural según la Base de Datos Internacional sobre Desastres EM-DAT del Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres.....	11
Tabla 2. Factores que intervienen en el cálculo de la estabilidad de taludes naturales.	25
Tabla 3. Clasificación de los movimientos.	29
Tabla 4. Los métodos de análisis de medios continuos y sus bases teóricas.	35
Tabla 5. Métodos que permiten un cálculo rápido del Factor de Seguridad (Suarez, D.J. 2002)	39
Tabla 6. Los métodos de análisis de medios discretos y sus bases teóricas.	61
Tabla 7. Los métodos de análisis retrospectivos y sus bases teóricas.	65
Tabla 8. Características principales de los distintos métodos analizados en este trabajo.	69
Tabla 9. Los métodos de análisis de medios continuos, discretos y retrospectivos y sus bases teóricas.	75
Tabla 10. Requisitos básicos para la solución que deben satisfacer los diferentes métodos de análisis de estabilidad de taludes en laderas naturales.	76
Tabla 11. Análisis convencionales de medios continuos en el diseño de taludes.	79
Tabla 12. Ventajas y desventajas de los métodos, de medios continuos, discretos, retrospectivos y sus bases teóricas.	98
Tabla 13. Resumen algunas bases teóricas y sus ventajas/desventajas para análisis de estabilidad de taludes.	99

1. INTRODUCCIÓN

La geotecnia es una rama de la ingeniería civil que estudia las propiedades del suelo utilizando métodos de campo, que consisten en extraer muestras in situ, antes de caracterizar las propiedades mecánicas y físicas de una zona específica mediante pruebas de laboratorio. Estos estudios técnicos son necesarios para la ejecución de proyectos de ingeniería, como edificios o carreteras, ya que permiten obtener parámetros de construcción que garanticen la seguridad de la obra, dependiendo de la topografía del sitio, se encontrarán diferentes elevaciones en el terreno, que afectarán directamente la estabilidad del suelo, por ejemplo, taludes o laderas naturales.

La geotecnia y la geología estudian la inestabilidad de las laderas utilizando métodos físicos y matemáticos basados en las propiedades mecánicas del suelo. Los taludes pueden estar hechos de roca, tierra o materiales depositados, o pueden ser de origen artificial (terrazas, presas), que han sido alterados por acciones antropogénicas.

El término talud, hace referencia a cualquier superficie inclinada con respecto a la horizontal que haya de adoptar permanentemente una estructura de tierra. Técnicamente hablando, cuando su conformación actual proviene de un proceso natural, se define como ladera; cuando se forma artificialmente se define como talud (Cruz, 2013; Rico y Del Castillo, 1976). Estos no solo se diferencian, por las circunstancias de formación, sino también por su historia geológica, el clima al cual ha estado sometido y la influencia de los seres vivos (Cruz, 2013; De Matteis, 2003) (Figura 1).

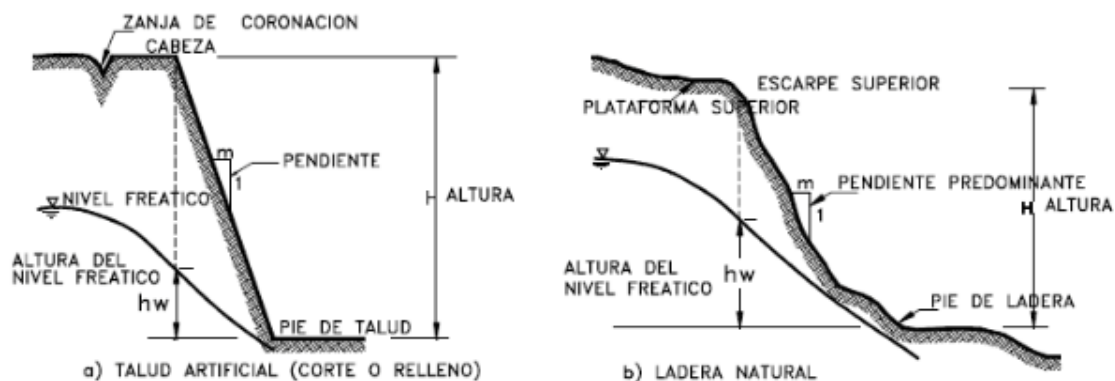


Figura 1. Talud artificial y ladera natural
(Fuente: Suárez, 1998)

La posibilidad de que un talud colapse va a depender de elementos como: la topografía, geología de la zona, sismicidad del lugar, propiedades mecánicas del suelo y de factores antropogénicos como la vegetación del sitio, las actividades del hombre y de las condiciones climatológicas, (ARMAS ZAGOYA, 2004)

El análisis de la estabilidad de las laderas naturales es fundamental para garantizar la seguridad de las estructuras y las personas que habitan o transitan cerca de estas áreas. Dicha inestabilidad representa una constante amenaza, especialmente en épocas de lluvia donde se incrementa la saturación de las laderas naturales, lo que genera un incremento en las presiones de poros y una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante, y por lo tanto una mayor probabilidad de falla de estos (González - Silva, 2023). En general, la estabilidad del talud está determinada por factores geométricos, geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos. La combinación de estos cuatro factores puede determinar la condición de falla del terreno, ocasionando un movimiento de la masa de tierra (Sanhueza y Rodríguez, 2013).

Algunas fallas ocurren bruscamente con un ligero aviso o ninguno, mientras que otras se producen pausadamente después de anunciar su intensidad por un asentamiento lento o por la formación de grietas (Oliva, 2015). Las fallas localizadas en un solo punto de la masa de tierra no indican necesariamente, que la masa sea inestable. La inestabilidad sólo se produce como resultado de la falla por esfuerzo cortante en una serie de puntos que definen una superficie, en la cual se produce el movimiento. El desarrollo urbano rápido y desordenado, además de las diversas intervenciones antropogénicas tales como; cortes, deforestación, concentración de aguas servidas, determinan en buena parte la ocurrencia de deslizamientos (Núñez, 2018). Amaral y otros, (1996) encontraron que el 60% de los deslizamientos son consecuencia de asentamiento desordenados, asociados con los cortes indiscriminados, rellenos sobre laderas de alta pendientes, fugas incontroladas en ducto de agua y descarga directa de agua doméstica y acueducto.

El informe elaborado por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastre (UNISDR) y el Centro para la Investigación en Epidemiología de los Desastres (CRED), anunciaron que entre 1998 y 2017, los desastres de origen geofísico y relacionados con el clima, ocasionaron la muerte de 1.3 millones de personas y dejaron otros 4.4 millones de heridos, sin hogar, desplazados o en necesidad de asistencia de emergencia (Mizutori & Guha-Sapir, 2019). El riesgo de desastres hace alusión a la posibilidad de que se registren pérdidas de vidas humanas, personas heridas, o activos dañados o destruidos en un sistema,

sociedad o comunidad en un período específico de tiempo, determinado probabilísticamente en función de la amenaza, la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta (Ocampo y otros, 2020).

La amenaza, se refiere a la probabilidad de que ocurran fuerzas naturales o antropogénicas capaces de causar daño en un período de tiempo y área determinada, por ejemplo, un deslizamiento de tierra, por eso es importante el estudio de los fenómenos naturales y antrópicos con potencial de causar destrucción en un territorio y que son identificados como amenazas (CRED, 2020). Por otro lado, la exposición evalúa la proximidad o la presencia y valor de los elementos vulnerables como infraestructuras en la zona afectada por fenómenos naturales que son capaces de desatar procesos que causan daños físicos y la pérdida de vidas humanas y de capital. Mientras que la vulnerabilidad, analiza la susceptibilidad de esos elementos a sufrir daños.

La combinación de estos factores (amenaza, exposición y vulnerabilidad) ayuda a evaluar el riesgo total. Por ejemplo, un talud con alta amenaza de deslizamiento, exposición significativa (por la presencia de infraestructuras importantes) y baja capacidad para resistir el deslizamiento debido a su vulnerabilidad, representará un riesgo mayor. El análisis detallado de estos elementos permite tomar medidas preventivas y mitigadoras para reducir el riesgo de desastre en laderas naturales.

En la tabla 1, se muestra la clasificación de fenómenos extremos según su origen de acuerdo con la base de datos internacionales sobre desastres EM-DAT que realizó en su centro de investigaciones sobre la epidemiología de desastres.

Tabla 1. Clasificación de fenómenos extremos de origen natural según la Base de Datos Internacional sobre Desastres EM-DAT del Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres.

Subgrupo	Definición	Tipo de desastre
Geofísico	Un peligro procedente de tierra sólida. Los términos “geofísico” y “geológico” pueden usarse de manera indistinta	Terremoto Movimiento de tierra (seca) Actividad volcánica
Meteorológico	Un peligro causado por condiciones atmosféricas y climáticas de corta duración, de microescala a mesoescala, que duran desde minutos hasta días.	Temperatura extrema Niebla Tormenta

Subgrupo	Definición	Tipo de desastre
Hidrológico	Un peligro causado por la ocurrencia, el movimiento y la distribución de agua dulce y salada a nivel superficial y subsuperficial.	Inundación Deslizamiento de tierra Marea
Climatológico	Un peligro causado por procesos atmosféricos de larga duración, de microescala a mesoescala, cuya variabilidad climática puede variar entre intraestacional y multidecadal.	Sequía Desbordamiento repentino de lagos y glaciares Incendios
Biológico	Un peligro causado por la exposición a organismos vivos y sus sustancias tóxicas (como veneno) o enfermedades que portan a través de vectores. Por ejemplo, fauna silvestre e insectos venenosos, plantas venenosas y mosquitos portadores de agentes causantes de enfermedades, como parásitos, bacterias o virus (como malaria o coronavirus).	Epidemia Infestación de insectos Accidente animal
Extraterrestre	Un peligro causado por asteroides, meteoritos y cometas al pasar cerca de la Tierra, entrar a la atmósfera o impactar en la Tierra, y por cambios en las condiciones interplanetarias que afectan la magnetósfera, la ionósfera y la termósfera de la Tierra.	Impacto Clima espacial

Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), sobre la base de Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED), Base de Datos Internacional sobre Desastres EM-DAT, 2020 [en línea] <https://www.emdat.be/>.

En el caso específico de los deslizamientos de tierra, 3.7 millones de km² de tierra y 300 millones de personas están en riesgo en todo el mundo (Kjekstad y Highland, 2009). En el caso de Colombia ocupó el puesto 19 entre los países más vulnerables según el Índice de Riesgo Climático Global en 2017, lo que indica un nivel de riesgo alto ante eventos extremos cuya frecuencia son cada vez mayores, constituyendo una clara evidencia del cambio climático en el planeta (Eckstein y otros, 2019).

En Colombia 286 de sus municipios están en alerta por derrumbes, según el informe de la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo y Desastres (UNGRD, 2023). Los departamentos más afectados son Antioquia, Chocó y Cauca, según el informe presentado en conjunto con el

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2023). La UNGRD y el IDEAM señalaron que 44 municipios se encuentran en alerta roja, 136 en alerta naranja y 106 en alerta amarilla. Estas alertas se concentran principalmente en la región Andina, con un 53%, y en la región Pacífica, con un 17.5%. Colombia enfrentó una fuerte temporada de lluvias ocasionadas por el fenómeno climático de La Niña, que obligó al Gobierno a declarar la situación de desastre y que dejaron más de 216 muertos, 48 desaparecidos y 538.000 damnificados en 2022 (IDEAM, 2023).

En los últimos 23 años, la mitad de los eventos naturales se han concentrado en once departamentos: Antioquia, Putumayo, Santander, Caldas, Atlántico, Nariño, Cauca, Cundinamarca, Tolima, Valle del Cauca y Chocó. Sin embargo, los departamentos más impactados en términos de afectados graves han sido Antioquia, Putumayo, Santander, Nariño, Valle del Cauca y Chocó. Aunque en estos últimos tuvo lugar solo el 18% de los eventos naturales en el periodo 1998-2021, se han presentado el 43% de los afectados graves, de los cuales el 47% corresponden a muertes (Figura 2).

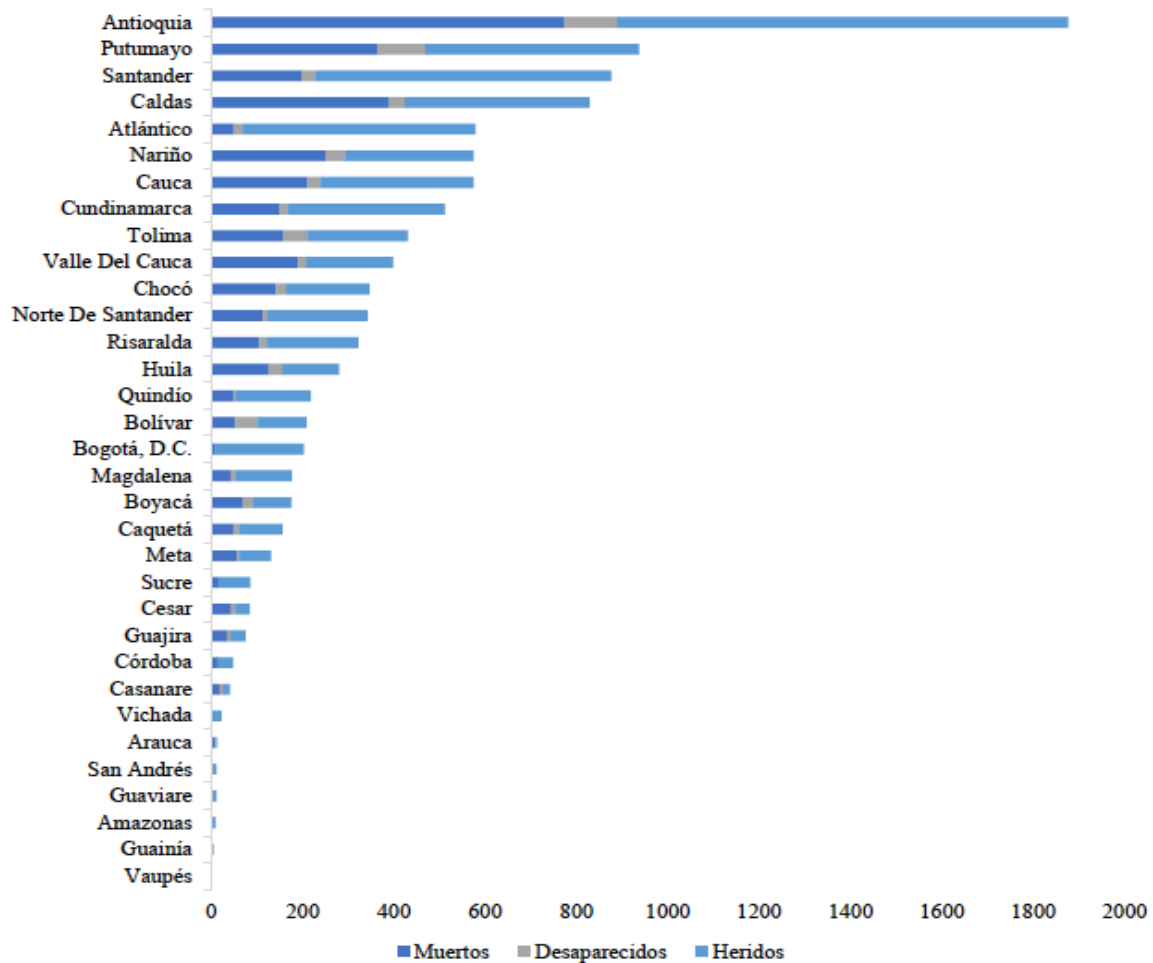


Figura 2. Afectaciones graves por eventos naturales y Departamentos, 1998-2021.

Fuente: Ayala-García y Ospino Ramos, (2023)

Alrededor de dieciocho (18) millones de personas en Colombia se encuentran asentadas en zonas con condiciones muy críticas a amenazas hidrometeorológicas (DNP, 2019) (Figura 3).

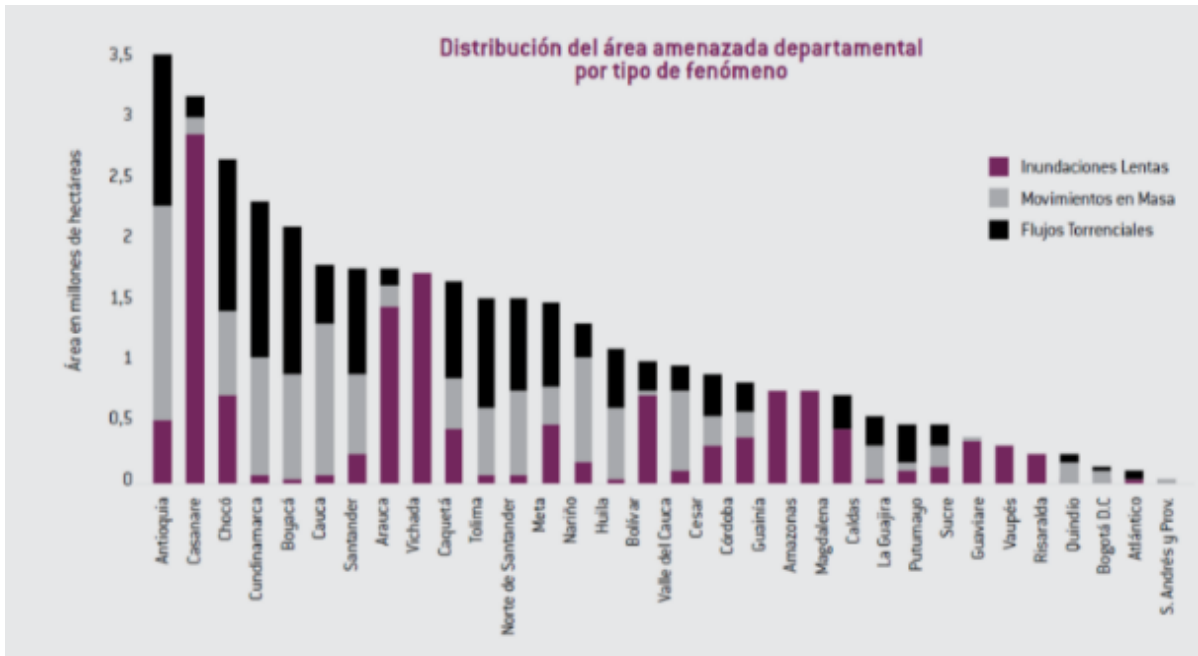


Figura 3. Zonas con condiciones muy críticas a amenazas hidrometeorológicas.
Fuente (DNP, 2019).

La ocurrencia de procesos de movimientos en masas en Colombia es permanente y cada vez más preocupante durante los períodos de lluvias, donde el 18% del territorio nacional se ubica en zonas de alta y muy alta amenaza, principalmente en los departamentos de la región andina y la región pacífica, que tienen un gran porcentaje de su superficie expuesta a este fenómeno (Unidad Nacional de Gestión del Riesgo, 2016).

Skempton y Hutchinson (1969), en un estudio de taludes de tierra y roca, manifestaron que los problemas varían desde la geomorfología pura, hasta la predicción de estabilidad de taludes para propósitos de ingeniería civil y el diseño de medidas correctivas donde un deslizamiento ha destruido o amenaza vidas humanas, propiedades o medios de comunicación. De acuerdo con lo anterior, el estudio de la estabilidad de taludes es un tema clásico y continuo, en donde se han realizado numerosos análisis, utilizando diferentes métodos para evaluar la estabilidad de taludes en laderas naturales.

Los mecanismos de falla son muy complejos e incluyen factores muy difíciles de investigar, generando la necesidad de explorar métodos de análisis que determinen en detalle, los comportamientos más cercanos a la realidad de los diferentes procesos de movimientos en masas. A lo largo de los años, se han desarrollado diferentes métodos y enfoques para

evaluar la estabilidad de taludes en laderas naturales, entre los cuales se destacan los métodos de medios continuos, medios discretos y retrospectivos. El estudio de la estabilidad de taludes es un tema clásico y que sigue evolucionando, utilizando diferentes enfoques. En este trabajo se presenta una revisión del estado del arte sobre los métodos de análisis de estabilidad de laderas. También se hace una crítica (ventajas y desventajas) y se dan perspectivas de investigación sobre dichos métodos de análisis.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar una evaluación crítica sobre los métodos de análisis y los factores que intervienen en la estabilidad de taludes de laderas naturales y sus perspectivas de investigación, mediante una revisión bibliográfica.

1.1.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Profundizar en el estado del arte sobre los parámetros y factores que inciden en la estabilidad de las laderas naturales y los métodos de análisis de medios continuos, discretos y retrospectivos.
- Realizar una evaluación crítica de los métodos de análisis para la estabilidad de taludes, donde se plantean las ventajas y desventajas de cada método.
- Resaltar y proponer perspectivas de investigaciones sobre estabilidad de taludes aplicado a laderas naturales.

1.2. METODOLOGÍA

Con este trabajo se pretende realizar un análisis crítico sobre los distintos métodos que se utilizan para determinar la estabilidad de un talud y poder identificar perspectivas de investigación para desarrollar en el futuro.

1.2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

En el presente trabajo se realizó una búsqueda sistemática de selección, obtención, organización, procesamiento, análisis e interpretación de la información, representada principalmente en artículos científicos, informes y reportes institucionales, trabajos de grados, reviews de diferentes bases de datos multidisciplinares como *Scopus*, *Web of Science*, *Sciencedirect*, *Scielo* y *pubmed* siguiendo ecuaciones de búsqueda.

1.2.2. ELABORACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.

Con toda la información recopilada se nos permitió la elaboración de un esquema donde se resaltan las ventajas y desventajas de los métodos de análisis de estabilidad de taludes aplicados a laderas naturales, con el objetivo de tener una descripción aproximada de cada uno de los métodos más utilizados para este fin.

1.2.3. REALIZACIÓN DE UN ANÁLISIS CRÍTICO.

En esta parte se realiza una comparación de los aspectos más relevantes que presenta cada uno de los métodos utilizados para el análisis de la estabilidad de taludes aplicados a laderas naturales (Medios continuos, Discretos y Retrospectivos), así como entre las ventajas y desventajas que presentan entre cada uno de ellos, identificando sus debilidades y fortalezas ante cada una de las situaciones y la información que se tenga para el cálculo.

1.2.4. IDENTIFICAR LAS POSIBLES PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN.

Con relación a este aspecto, a partir del análisis crítico donde se identifican las posibles debilidades o desventajas que presenten algunos métodos utilizados para el análisis de la

estabilidad de taludes en laderas naturales, se plantean posibles perspectivas de investigación para adelantar en el futuro que permitan simplificar los cálculos sin perder su confiabilidad.

1.2.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Por último, se realizará un análisis de las situaciones encontradas durante el proceso de construcción de este trabajo, que nos permita realizar unas conclusiones y recomendación que sirvan de guía para enfrentar trabajos parecidos a este.

En la figura 4, se presenta un esquema a partir de la construcción del estado del arte para este trabajo de grado



Figura 4. Diagrama metodológico del trabajo de grado.

Fuente (Elaboración propia).

2. ESTADO DEL ARTE SOBRE LOS PARÁMETROS Y FACTORES QUE INCIDEN EN LA ESTABILIDAD DE LAS LADERAS NATURALES, Y LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE MEDIOS CONTINUOS, DISCRETOS Y RETROSPECTIVOS.

En este segundo capítulo se presentan un estado del arte donde se relaciona los parámetros y factores que inciden en la estabilidad de las laderas naturales y se profundiza en el análisis de los métodos de medios continuos, discretos y retrospectivos.

2.1. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS Y DISCIPLINAS QUE INCIDEN EN LA ESTABILIDAD DE LA LADERA.

Es importante indicar que la estabilidad de la ladera, tienen una estrecha relación con las disciplinas como la geología, la geotecnia, la mecánica de rocas y suelos, y los parámetros como la capacidad de carga del suelo y la permeabilidad.

2.1.1. GEOLOGÍA.

La geología es crucial para comprender la formación y la estructura de las laderas naturales. El conocimiento de la composición geológica, las capas de roca y suelos, así como las características de los estratos geológicos, es esencial para evaluar la estabilidad de los taludes, ya que la presencia de fallas, diaclasas, estratos inclinados o discontinuidades puede influir en la estabilidad del talud.

2.1.2. GEOTECNIA.

La geotecnia, permite determinar las propiedades y el comportamiento de los suelos y rocas, para predecir la estabilidad de las laderas naturales y tomar las medidas necesarias para mitigar los riesgos asociados a posibles deslizamientos o colapsos. Además, proporciona técnicas que ayudan a identificar posibles modos de falla, como deslizamientos, volcamientos o deformaciones.

2.1.3. MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS.

La mecánica de rocas y suelos, se centra en analizar las masas rocosas y el suelo, mediante parámetros como la resistencia al corte en rocas, la orientación de las discontinuidades, la presencia de debilidades geológicas, la compresibilidad, la permeabilidad y condiciones del suelo que pueden afectar la estabilidad de las laderas.

2.1.4. CAPACIDAD DE CARGA DEL SUELO.

La capacidad de carga del suelo, es importante evaluarla para determinar si puede soportar las cargas impuestas por la ladera y las presiones adicionales debido a la topografía y las condiciones ambientales. La compresibilidad del suelo se debe considerar para evaluar la deformación y el asentamiento que puede ocurrir en el talud. La resistencia al corte, es una propiedad fundamental que se evalúa en el análisis de estabilidad del talud, para comprobar la resistencia a la ruptura o deslizamiento a lo largo de una superficie de falla. Esta depende de parámetros como la densidad, cohesión del suelo y el ángulo de fricción interna, la mayoría de los movimientos del terreno dependen de la resistencia al corte que presente el suelo, por lo tanto, los parámetros que definen dicho valor, resultan ser los que determinan el comportamiento que tendrá el talud (Atkinson y Potts, 1975).

2.1.5. PERMEABILIDAD.

La permeabilidad también es un parámetro para tener en cuenta ya que el agua puede desempeñar un papel crucial en la estabilidad del talud, porque si el suelo es altamente permeable, el agua puede infiltrarse y saturar el suelo, disminuyendo la resistencia al corte y aumentando las presiones de poro, lo que puede llevar a la falla del talud.

2.1.6. FACTORES QUE INCIDEN EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES NATURALES.

Para comprender, evaluar y predecir los factores que intervienen o actúan sobre la estabilidad de las laderas, es fundamental tener en cuenta el comportamiento del material constitutivo, las fuerzas aplicadas, el equilibrio de fuerzas aplicadas, la compatibilidad y las condiciones de frontera.

2.1.6.1. Comportamiento del material constitutivo.

El comportamiento del material constitutivo se refiere a la respuesta de un suelo o una roca a las cargas aplicadas. Los suelos pueden tener diferentes comportamientos, como elástico, plástico, viscoso o una combinación de ellos. Es importante comprender el comportamiento constitutivo del suelo para predecir su deformación y resistencia ante las fuerzas que actúan sobre él. Por ejemplo, un suelo con un comportamiento plástico puede experimentar deformaciones permanentes y fluir bajo cargas aplicadas, lo que puede afectar la estabilidad de un talud (Atkinson y Potts, 1975).

2.1.6.2. Fuerzas aplicadas.

Los taludes naturales están sujetos a diversas cargas que pueden afectar su estabilidad. Estas cargas incluyen el peso propio del suelo y las rocas, cargas adicionales como estructuras, cargas dinámicas debido a terremotos o vibraciones, y cargas debido a la presencia de agua. Comprender cómo estas cargas se transmiten y distribuyen a lo largo del talud es fundamental para evaluar su estabilidad (Atkinson y Potts, 1975).

2.1.6.3. Equilibrio de fuerzas aplicadas.

El equilibrio es uno de los conceptos fundamentales en la geotecnia y se refiere al estado en el que las fuerzas que actúan sobre un talud se encuentran en balance. Para evaluar la estabilidad de una ladera natural, es necesario analizar las fuerzas que actúan sobre ella, como el peso propio del suelo, la presión del agua, las cargas externas y las fuerzas sísmicas. Si las fuerzas que empujan hacia abajo son mayores que las fuerzas que resisten el deslizamiento, la ladera puede ser inestable (Atkinson y Potts, 1975).

2.1.6.4. Compactabilidad.

La compactabilidad es una propiedad del suelo que se refiere a su capacidad para ser compactado mediante la aplicación de fuerzas externas, como la compresión o la vibración. En el contexto de la estabilidad de taludes, la compactabilidad del suelo es importante porque puede influir en su resistencia al corte y en su capacidad para soportar cargas. Un suelo más compacto tiende a ser más resistente y menos propenso al deslizamiento (Atkinson y Potts, 1975).

2.1.6.5. Condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera se refieren a las condiciones externas que actúan sobre un talud, tanto en términos de fuerzas como de desplazamientos. Las fuerzas externas pueden incluir la carga de la ladera superior, la presión del agua en el suelo, la sobrecarga por estructuras adyacentes, entre otras. Los desplazamientos pueden ser causados por movimientos sísmicos, cambios en los niveles de agua subterránea o la erosión de la ladera. Estas condiciones de frontera pueden afectar significativamente la estabilidad de la ladera y deben ser consideradas en el análisis (Atkinson y Potts, 1975).

Cuando se compara las fuerzas que actúan en el talud (el peso del suelo) con las fuerzas que resisten el deslizamiento (la fricción entre las partículas del suelo), se habla de un factor de seguridad adecuado que indica que el talud es estable si esta relación es mayor o igual a 1.0. Esta hace alusión a la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento.

El fenómeno de inestabilidad de laderas es un problema común que puede presentar un riesgo potencial para las comunidades que viven aledañas y en el cuerpo del talud, este fenómeno tiene impacto directo en las actividades económicas y en muchas de las obras construidas por los seres humanos. por ejemplo, las edificaciones en los sectores de vivienda, el transporte, las vías de comunicación, los conductos de combustible, los servicios públicos, etc., a menudo son afectados severamente por los desplazamientos que experimenta el terreno durante un movimiento de ladera (Gallardo y *otros*, 2013).

Estos factores que intervienen en la inestabilidad pueden ser naturales o antropogénicos. Dentro de los factores naturales se encuentran: el agua, el hielo, la nieve, la sismicidad, el vulcanismo, la cubierta vegetal y la subsidencia regional. Mientras que, dentro de los factores antropogénico, se pueden mencionar: las excavaciones, las voladuras y las sobrecargas. Todos estos aspectos se deben tener en cuenta al momento de estudiar la estabilidad de un talud natural (Sanhueza y Rodríguez, 2013).

Los primeros signos de inestabilidad de laderas son la aparición de grietas de tracción y hundimientos en la parte superior del talud y en los flancos del movimiento de ladera. Estas grietas pueden llenarse de agua, facilitando la saturación de los suelos con la subsiguiente reducción de su resistencia al esfuerzo cortante; al mismo tiempo se incrementan los empujes hidrostáticos que desestabilizan la ladera (Gallardo y *otros*, 2013).

La distribución espacial y temporal de los movimientos de masa está condicionada por la presencia de diversos factores, propios de la ladera y externos a ella. En la tabla 2 mostraremos los factores que intervienen según algunos autores.

Tabla 2. Factores que intervienen en el cálculo de la estabilidad de taludes naturales.

Autor	Factor	Definición	
Suarez, (1998)	Condiciones originales del talud	Determinan la susceptibilidad al deterioro.	
	Factores de deterioro	Producen una modificación lenta de las condiciones originales del talud y son capaces de producir movimientos leves.	
	Factores detonantes	Son los que activan el movimiento; pueden traslaparse con los factores de deterioro.	
	Cambios en la cobertura vegetal	La vegetación cumple dos funciones principales: en primer lugar, tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y, en segundo, da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces.	
Mora Vahrson, (1993)	Factores de susceptibilidad: Aquellas que intrínsecamente forman parte de las propiedades y comportamiento del medio, es decir, que constituyen los elementos pasivos.	Topografía	Son las características morfológicas de la superficie terrestre.
		Constitución geológica	Tipo de material que se encuentra en la ladera, sus propiedades químicas y físicas, resistencia al esfuerzo, incluye las estructuras de los materiales del sitio, las fracturas, fallas, pliegues, planos de estratificación y la foliación.
		Contenido de humedad	Tiene la capacidad de acelerar la meteorización y disminuir la resistencia mecánica de los suelos.

Autor	Factor	Definición	
Mora y Vahrson, (1993)	<p>Factores detonantes: Los que inducen desde el exterior, hacía un comportamiento dinámico activo que, a partir de las condiciones iniciales generarán, con mayor o menor intensidad, los fenómenos de movilización.</p>	<p>Actividad volcánica</p>	
		<p>Los movimientos de masa pueden estar relacionados con la erupción o con sismos previos a ésta en un volcán.</p>	
		<p>Actividad antropogénica: El ser humano ha sido un permanente modificador de los elementos que conforman la superficie de la tierra y el efecto sobre los taludes, y ha sido el agente desestabilizador</p>	<p>Cambios en la topografía y cargas del talud: Ocasionados por la extracción de suelos y rocas para la construcción; aumento del peso de la ladera debido a los procesos de urbanización o rellenos ineficientes y por los efectos de la actividad subterránea, como la minería.</p>
			<p>Cambios en las condiciones de humedad: Debido a la alteración de los drenajes naturales. Alteración de los drenajes subterráneos, así como la presencia de infiltración y aumento de aguas superficiales por la deficiente instalación de acueductos y alcantarillados.</p>
<p>Vibraciones: Pueden actuar como desencadenantes de los movimientos, condicionado y disminuyendo la estabilidad de los macizos rocosos.</p>			
<p>Sobrecargas: Son el resultado del incremento de peso, debido a diversos tipos de construcciones, sobre el terreno natural dentro del área de influencia del talud.</p>			

Fuente: Construcción propia.

2.1.7. MOVIMIENTOS EN MASA

Muchos investigadores tienen su propia definición de movimientos de masa, por ejemplo; Medina (1991) los define como fenómenos geológicos que en su mecanismo involucran la movilización de volúmenes de materiales hacia niveles inferiores, bajo la acción directa de la gravitación terrestre.

Suárez (1998) afirma que son procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas que corresponden generalmente a movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforma un talud de roca, suelo natural, relleno artificial o una combinación de ellos. Los movimientos ocurren generalmente a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos. Algunos segmentos de la ladera pueden moverse hacia arriba mientras otros lo hacen hacia abajo.

Según estudios realizados se sabe que gran parte de los movimientos ocurren a causa del incremento de humedad, en el estudio de los movimientos ocurridos, las modelaciones se hacen mediante los métodos tradicionales de análisis de estabilidad, tomando como ingreso que el suelo se encuentra saturado. Adicionalmente existe una fuerte relación entre lo que dura una intensa precipitación de lluvia y la variación de la presión de poros en el suelo, el estudio de suelos no saturados aplicado en la agricultura es de gran ayuda y sus modelos son utilizados para analizar la responsabilidad de la hidrología en la estabilidad de taludes (Duque, 2017).

2.1.7.1. Clasificación de los movimientos en masa

La mayoría de las clasificaciones consideran dos variables básicas: el tipo de movimiento y el tipo de material involucrado.

Según Suárez (1998), se deben considerar cuatro etapas diferentes en la clasificación de los movimientos:

- a. Etapa de deterioro o antes de la falla, durante la cual el suelo está esencialmente intacto.
- b. Etapa de falla, caracterizada por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material.

- c. Etapa post-falla, incluye los movimientos de la masa involucrada en un movimiento de masa desde el momento de la falla y hasta el preciso instante en el cual se detiene totalmente.
- d. La etapa de posible reactivación, en la cual pueden ocurrir movimientos que pueden considerarse como una nueva falla, e incluye las tres etapas anteriores.

La forma de clasificar los distintos movimientos en masas, dependen si se trata de suelos o rocas. En estas clasificaciones se considera el mecanismo y tipo de rotura, en conjunto con otros aspectos, tales como el contenido de agua en el terreno, la velocidad y magnitud del movimiento, entre otros (Sanhueza y Rodríguez, 2013). Los tipos de movimientos se pueden clasificar en; deslizamientos, flujo, avalancha y desprendimientos.

Es importante tener en cuenta que a menudo varios factores actúan en conjunto, y la interacción entre ellos puede aumentar el riesgo de deslizamientos, flujo, avalancha o desprendimientos, estos movimientos se pueden agrupar en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de los movimientos.

Tipo de movimiento	Definición	Características	División del tipo de movimiento
Deslizamiento	Son movimientos relativos de masas de suelo o roca con respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura, que supera la resistencia al corte de estas superficies.	La masa generalmente se desplaza en conjunto, y puede alcanzar <u>grandes volúmenes.</u>	Deslizamiento rotacional: Es aquel en el que la superficie de falla está formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo en movimiento.
		La velocidad puede ser muy variable, pero suelen ser procesos rápidos.	
Flujo	Los flujos tienen la apariencia de un líquido viscoso y que pueden ser de carácter seco o húmedo. La diferencia entre ambos estados radica en la cantidad de agua presente en la masa de suelo que se mueve, adicionalmente la clara definición de la superficie	El movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente al largo de toda la <u>superficie de falla.</u>	Deslizamiento traslacional o planar: Es donde el movimiento de la masa se desplaza hacia fuera o hacia abajo a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación.
		Pueden ser de una sola masa que se mueve, o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes.	
Flujo	Los flujos tienen la apariencia de un líquido viscoso y que pueden ser de carácter seco o húmedo. La diferencia entre ambos estados radica en la cantidad de agua presente en la masa de suelo que se mueve, adicionalmente la clara definición de la superficie	Pueden ser consecuencia de deslizamientos o ser inducidos por desprendimientos.	Los Flujos de roca: Comprende las deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas grandes y pequeñas. Este tipo de movimiento ocurre en laderas muy empinadas mayores a 45°, son ligeramente húmedos y de velocidad rápida a muy rápida.
		Junto con los deslizamientos son los movimientos de masas más	

Tipo de movimiento	Definición	Características	División del tipo de movimiento
	de rotura, el tipo de suelo y el factor desencadenante.	extendidos, al afectar diversos tipos de materiales. En los flujos existen movimientos laterales de las partículas o bloques pequeños que se mueve o desliza sobre una superficie de falla.	más pequeños se van formando debido al transporte del material. Los flujos de lodos: Son materiales transportados muy finos y el contenido de humedad es muy alto.
Avalancha	Es un desprendimiento violento y estrepitoso de una masa o capa de nieve, que se produce de forma repentina. Puede llevar incorporado sustrato y materiales tanto del suelo firme como de la vegetación de la ladera afectada.	Se producen cuando las distintas capas de nieve no son homogéneas, cosa que facilita que una capa se desplace o deslice sobre otra.	Avalanchas de nieve reciente: Se suelen producir después de episodios de nevadas muy intensas y persistentes, que acumulan muchos centímetros de nieve nueva. Así nos encontramos con una capa de nieve bastante inestable dentro del manto.
		Se producen siempre a consecuencia de algún factor desencadenante, entre los que podemos destacar: orografía, viento, lluvia, cambios de temperatura, estado de la nieve, la forma y rugosidad del terreno, la vegetación existente y el propio ser humano.	Avalanchas de placa: Se producen debido al deslizamiento de una capa relativamente compacta y densa del manto de nieve sobre otra de una antigüedad superior, la cual actúa como si fuese una rampa, debido a la nula cohesión entre ambas capas.
		La inclinación de la ladera, la superficie desprendida y la velocidad alcanzada en su descenso, pueden determinar la	Avalanchas de fusión: Son las avalanchas típicas de la época primaveral y se trata del desplazamiento de masas de nieve húmeda sin cohesión, pudiendo ser

Tipo de movimiento	Definición	Características	División del tipo de movimiento
		mayor o menor gravedad del suceso.	desde pequeñas coladas de escasa importancia y muy localizadas, hasta avalanchas o aludes de grandes dimensiones. Se producen a causa del ascenso de las temperaturas que se produce progresivamente durante la primavera
Desprendimiento	Estos corresponden a caídas libres muy rápidas de bloques o masas rocosas desintegradas o descompuestas. Su superficie de rotura es en forma de cuña y bloques formados por diversas familias de discontinuidades.	Desintegración de un cierto volumen de material litológico a lo largo de la superficie del talud.	Caídas: Movimientos intermitentes en caída libre, asociadas a escarpes de rocas duras y fracturadas, el volumen de material es bajo y el tamaño varía de cantos a bloques
		Desplazamiento de cizallamiento que se produce en la superficie del talud.	Desprendimientos: Disgregación de una masa litológica, ya sea de suelo o de roca fracturada, mediante un descenso súbito con fragmentación del material a lo largo de la ladera.
		Las masas de cualquier tamaño se desprenden de las pendientes pronunciadas a lo largo de la superficie del talud	Desplomes: Disgregación de una masa litológica, generalmente rocosa y de volumen considerable, que forma un depósito de material grueso en la base.

Fuente: Elaboración propia con información tomada de (Suárez, 1998; Suarez, 2011) y (Sanhueza y Rodríguez, 2013)

2.1.8. SUPERFICIE DE FALLA.

El término superficie de falla se utiliza para referirse a una superficie asumida a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento. Generalmente, se asume un gran número de superficies de falla para encontrar el valor mínimo de factor de seguridad, la cual se denomina superficie crítica de falla, (Fariñas & Guido, 2014)

Según Abramson, lee & Sharma (2002), la superficie de falla es la que presenta las probabilidades más altas de que se produzca un deslizamiento o inestabilidad, además es conveniente considerar todas aquellas zonas en las cuales el factor de seguridad es mayor que la superficie crítica, de esta manera permitirá realizar un análisis más adecuado. Una característica principal de los suelos o rocas donde ha ocurrido un deslizamiento es su forma curva, denominada superficie de falla rotacional.

Las superficies de falla se pueden definir como las zonas de contacto o interfaz entre la masa de suelo o roca potencialmente inestable o en movimiento y la masa de terreno estable o estática del talud. Dichas superficies tienen formas geométricas muy variables, pero, en el caso particular de los deslizamientos, pueden considerarse dos grupos principales: las superficies curvilíneas y cóncavas características de los deslizamientos rotacionales; y las superficies planas u onduladas, típicas de los deslizamientos traslacionales (figura 5) (Oliva González, 2015).

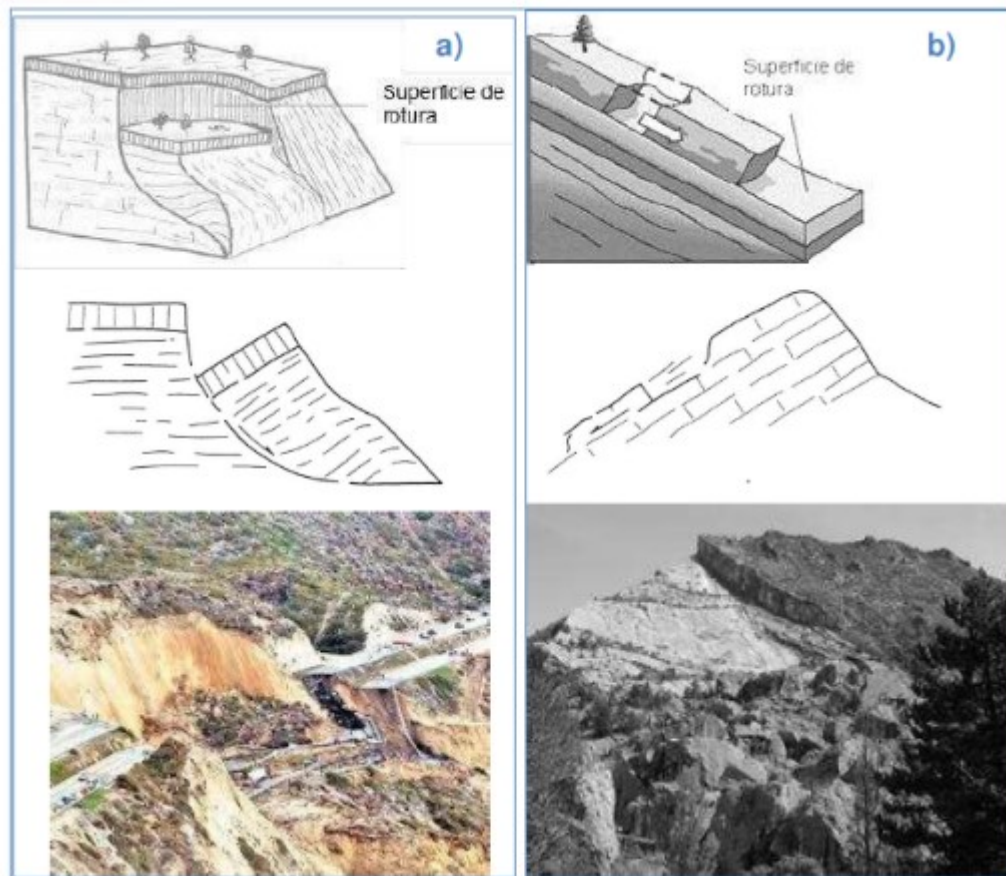


Figura 5. Superficies de rotura más frecuentes. a) Deslizamientos rotacionales; b) Deslizamientos traslacionales.
Fuente (Oliva González, 2015).

2.1.8.1. Formas de la superficie de falla.

Las técnicas de límite de equilibrio se utilizan cuando las fallas corresponden a los deslizamientos de traslación o de rotación sobre superficies de falla determinadas. Se pueden estudiar superficies planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de éstas. (Fariñas & Guido, 2014). En los suelos o rocas blandas, las superficies de falla a deslizamiento, tienden a tener una superficie curva. A estas superficies se les conoce como (círculos de falla o superficies de falla rotacionales). En los análisis de estabilidad de taludes, se debe determinar la localización de la superficie crítica de falla y el factor de seguridad más bajo a lo largo de esta superficie (Abramson & Boyce, 2002).

Después de abordar la extensa conceptualización sobre las disciplinas, los parámetros y factores que inciden en la estabilidad de las laderas, ahora se procede a profundizar en el análisis de los métodos de medios continuos, discretos y retrospectivos, utilizados para el análisis de estabilidad en taludes naturales.

2.2. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES APLICADO A LADERAS NATURALES.

Antes de la prevalencia de las computadoras, los ingenieros confiaban en tablas y gráficos empíricos para realizar cálculos rápidos de estabilidad de taludes. Estas herramientas proporcionaban relaciones simplificadas basadas en la experiencia y datos observacionales. Algunos ejemplos incluyen: Tablas de factores de seguridad, Gráficos de coeficientes de seguridad, Curvas de deslizamiento, Relaciones empíricas. Estos recursos eran esenciales en la ingeniería geotécnica y proporcionaban a los ingenieros herramientas prácticas para tomar decisiones rápidas en el campo. Aunque menos precisos que los métodos numéricos modernos, estos enfoques empíricos eran valiosos para evaluar la estabilidad de taludes en ausencia de tecnologías computacionales avanzadas.

En el contexto de la estabilidad de taludes, una regla de oro podría ser algo como: "Evitar construir taludes con pendientes superiores a cierto valor crítico basado en el tipo de suelo y las condiciones climáticas". Esta regla puede derivarse de observaciones históricas de deslizamientos en áreas similares y se convierte en un principio práctico para la toma de decisiones en la ingeniería geotécnica. Es importante señalar que estas reglas empíricas a menudo se basan en la experiencia y deben aplicarse con precaución, ya que pueden no tener en cuenta todas las variables específicas de un sitio. Además, con los avances en métodos analíticos y tecnologías de monitoreo, la ingeniería geotécnica moderna tiende a integrar tanto la experiencia empírica como los enfoques más avanzados para evaluar la estabilidad de taludes de manera más precisa y completa.

2.2.1. MÉTODOS DE MEDIOS CONTINUOS.

Los métodos de medios continuos son considerados como una de las herramientas más ampliamente utilizadas en el análisis de la estabilidad de taludes. Estos se basan en el supuesto de que la ladera se puede considerar como un medio homogéneo y continuo, lo

que simplifica el análisis al permitir la aplicación de principios de la mecánica de medios continuos. Estos métodos suelen ser eficientes en el análisis de taludes con geometrías simples y condiciones de carga uniformes.

Aunque la lista de los Métodos de Medios Continuos es extensa, en este análisis se considerarán los más ampliamente utilizados según sus resultados y disponibilidad. Dentro de los métodos de medios continuos disponibles, se encuentran los de análisis de equilibrio límite y los numéricos, con sus respectivas bases teóricas (Tabla 4).

Tabla 4. Los métodos de análisis de medios continuos y sus bases teóricas.

Métodos	Análisis	Bases Teóricas
Medios Continuo	Equilibrio Limite	Cuñas (Caídas de Rocas)
		Tablas de Janbú
		Talud Infinito
		Espiral Logarítmica
		Falla Circular
		Janbú
		Fellenius
		Bishop Simplificado
		Morgenstern-Price
		Spencer
	Numéricos	Elementos Finitos
		Diferencias Finitas

Fuente (Elaboración propia)

2.2.1.1. Análisis por Equilibrio limite.

Los métodos de análisis de Equilibrio Limite son los más sencillos de utilizar y permiten analizar los casos de falla traslacional y de falla rotacional, así como las fallas de inclinación y las fallas de cuña. En el caso de los sistemas de falla complejos, es conveniente utilizar metodologías de modelación que tengan en cuenta los factores que producen los movimientos.

En este orden de idea, el análisis de Equilibrio Límite se basa en comparar las fuerzas resistivas con las fuerzas impulsoras para determinar el factor de seguridad de un talud o ladera. Se asumen superficies de falla y se evalúan los momentos y las fuerzas actuantes. Este análisis se basa en el concepto de equilibrio límite de las fuerzas y momentos actuantes en el talud. Se utilizan criterios de resistencia al corte, como las bases teóricas de Mohr-Coulomb, para determinar la estabilidad del talud. Este se fundamenta en que, en la superficie de falla, el factor de seguridad entre las fuerzas actuantes y las resistentes es igual a 1.0 (Suarez, 1998). Donde el método puede estudiar el talud completo o puede dividirlo en franjas llamadas dovelas y realizar un análisis a cada una (Suarez, 2009). Sin embargo, Azorín (2014) menciona que las fallas de los taludes (en su gran mayoría) son progresivas; no inicia la falla al mismo tiempo, como lo suponen los métodos de equilibrio límite.

Es así como surgen para el análisis de suelos granulares y suelos cohesivos, aquellos que utilizan bases teóricas de superficie de falla circular, el de las dovelas, Fellenius, Bishop y fallas no circulares como el de Janbú. También podemos dividir a los métodos de equilibrio límite de acuerdo con las ecuaciones de equilibrio que satisfagan. La base teórica de Bishop satisface todas las ecuaciones de equilibrio estático. Los de Morgenstern – Price y Spencer satisfacen todas las ecuaciones de equilibrio (Morgenstern, 1965; Spencer, 1967).

2.2.1.1.1. Base teórica de Cuñas (Caídas de Rocas).

La falla de cuña ocurre cuando la masa de roca se desliza a lo largo de dos discontinuidades que se interceptan en un ángulo oblicuo a la superficie del talud. La formación de una falla en cuña depende primordialmente, de la litología y de la masa de roca. El análisis cinemático de una falla en cuña es controlado por la orientación de la línea de intersección de los dos planos (Suarez, 1998).

Según Suarez en 1988, las condiciones estructurales que se deben cumplir son las siguientes:

- a) La dirección de la línea de intersección debe ser aproximadamente cercana a la del buzamiento de la superficie del talud.
- b) El buzamiento de la línea de intersección debe ser menor que el de la superficie del talud.
- c) El buzamiento de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción promedio de las dos superficies.

En la figura 6 se muestran las distintas situaciones en las que se puede presentar el esquema general de una falla en cuña.

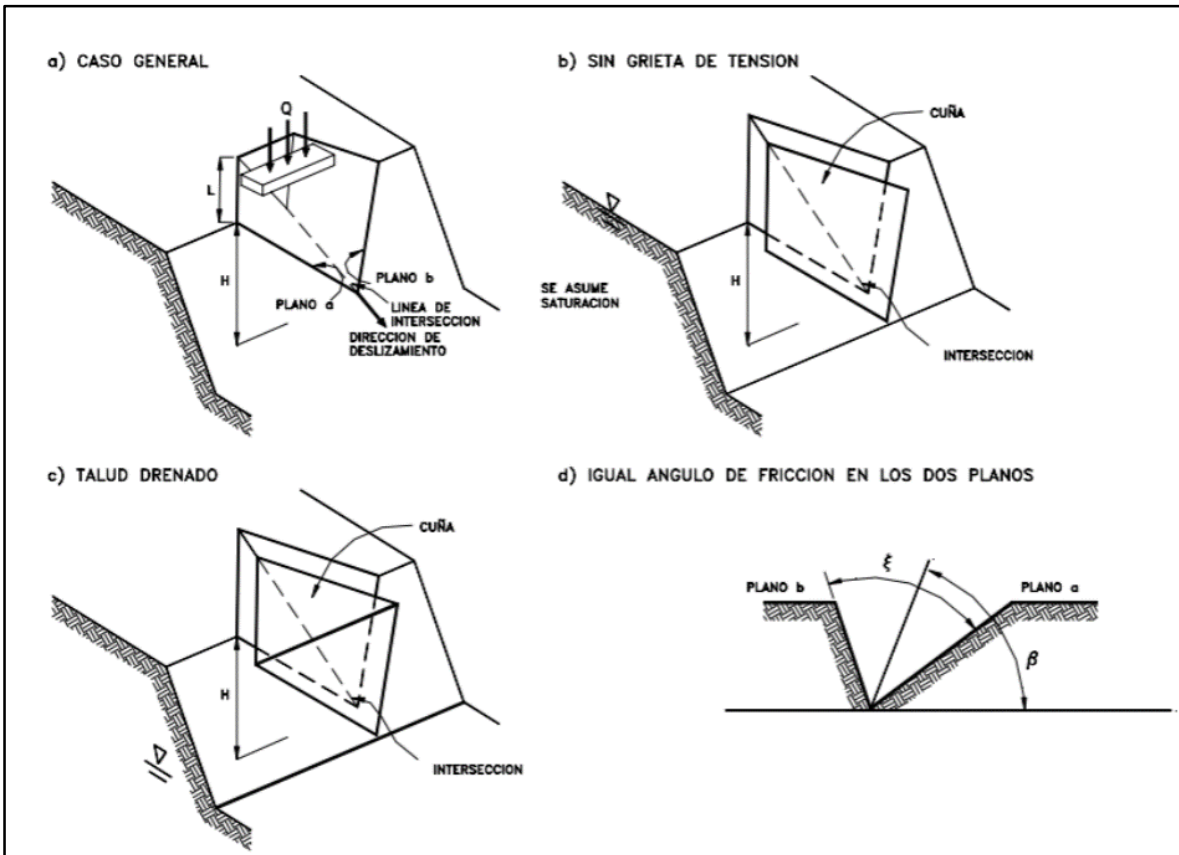


Figura 6. Esquema general de la falla en cuñas. a) Caso general; b) Sin grietas de tensión; c) Talud en condición drenada; d) Cuña con igual ángulo de fricción en los dos planos.

Fuente (Suarez, 1998).

En la figura 7, se presenta el esquema gráfico del análisis cinemático de la falla en cuña. una vez se ha realizado el análisis cinemático, usando métodos estereográficos, se puede calcular el factor de seguridad.

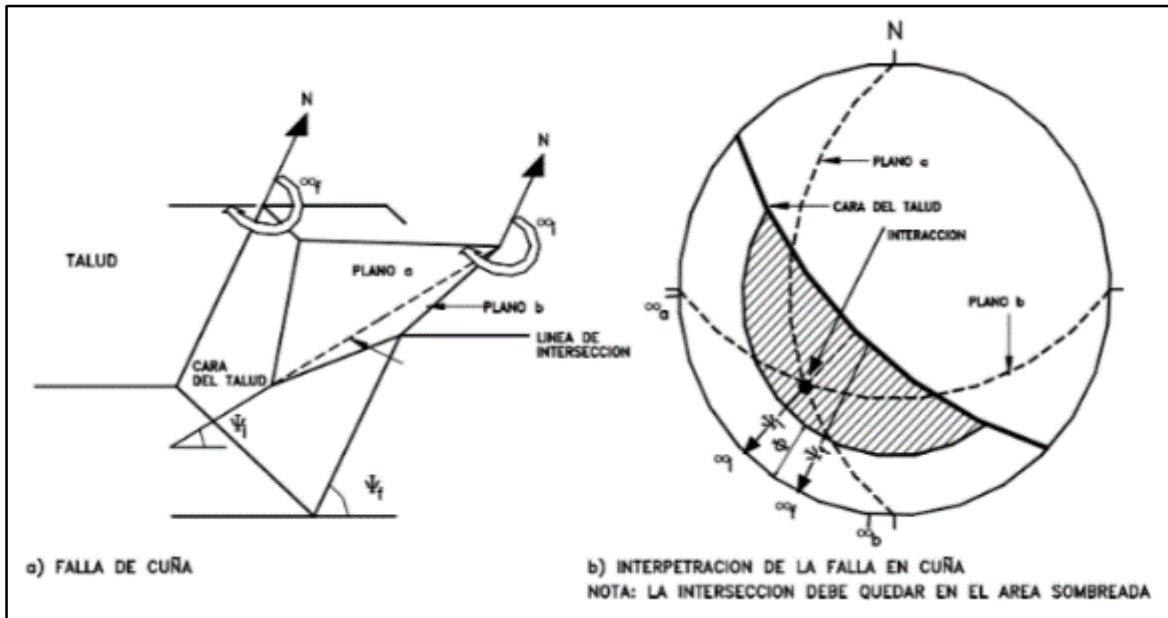


Figura 7. Esquema del análisis cinemático de la falla en cuña. a) Falla en cuña; b) Interpretación de la falla en cuña.

Fuente (Suarez, 1998).

El análisis de estabilidad de los taludes puede realizarse suponiendo superficies de falla rectas predeterminadas. Pueden analizarse superficies compuestas por una sola línea o por varias líneas, formando cuñas simples, dobles o triples.

Método de la cuña simple: Este método supone una superficie recta de un solo tramo, el cual puede analizarse como una cuña simple, con la superficie de falla inclinada a un determinado ángulo con la horizontal. Este método es apropiado cuando hay una superficie potencial de falla relativamente recta a lo largo de un material duro o blando.

Método de la cuña doble: Se hace el análisis con una cuña con dos tramos rectos de superficie de falla. La cuña superior tiene generalmente una pendiente fuerte y la inferior una pendiente más suave. La cuña superior genera una fuerza de empuje sobre la cuña inferior y esta debe ser capaz de resistir la fuerza impuesta por la cuña superior.

Método de la cuña triple: La falla de triple cuña es común en los grandes deslizamientos. Al igual que la falla de doble cuña, esta es controlada por detalles geológicos como, una formación de roca o la presencia de mantos blandos. La falla se presenta cuando ocurre un

hundimiento en la parte superior del deslizamiento y ocurre un levantamiento en la parte inferior del deslizamiento, de tal modo que se forma la tercera cuña.

2.2.1.1.2. Base teórica de las Tablas de Janbú.

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 5.

Tabla 5. Métodos que permiten un cálculo rápido del Factor de Seguridad (Suarez, D.J. 2002)

Autor	Parámetros	Inclinación de talud	Método analítico utilizado	Observaciones
Taylor (1948)	C_u	$0^\circ - 90^\circ$	$\Phi = 0$	Análisis no drenado
	C, Φ	$0^\circ - 90^\circ$	Círculo de fricción	Taludes secos solamente
Bishop y Morgenstern (1960)	C, Φ, r_u	$11^\circ - 26.5^\circ$	Bishop	Primero en incluir efectos del agua.
Gibsson y Morgenstern (1962)	C_u	$0^\circ - 90^\circ$	$\Phi = 0$	Análisis no drenado con cero resistencias en la superficie y C_u aumenta linealmente con la profundidad.
Spencer (1967)	C, Φ, r_u	$0^\circ - 34^\circ$	Spencer	Círculo de pie solamente
	C_u	$0^\circ - 90^\circ$	$\Phi = 0$	Una serie de tablas para diferentes efectos de movimiento de agua y grietas de tensión.
Janbú (1968)	C, Φ, r_u		Janbú GPS	
Hunter y Schuster (1968)	C_u	$0^\circ - 90^\circ$	$\Phi = 0$	Análisis no drenado con una resistencia inicial en la superficie y C_u aumenta linealmente con la profundidad.
Chen y Giger (1971)	C, Φ	$20^\circ - 90^\circ$	Análisis limite	

Autor	Parámetros	Inclinación de talud	Método analítico utilizado	Observaciones
O'Connor y Mitchell (1977)	C, Φ, r_u	$11^\circ - 26^\circ$	Bishop	Bishop y Morgenstern (1960) extendido para incluir $N_c = 0.1$
Hoek y Bray (1977)	C	$0^\circ - 90^\circ$	Circulo de fricción	Incluye agua subterránea y grietas de tensión.
	C	$0^\circ - 90^\circ$	Cuña	Análisis de bloque en tres dimensiones.
Cousins (1978)	C, Φ	$0^\circ - 45^\circ$	Circulo de fricción	Extensión del método de Taylor (1948).
Charles y Soares (1984)	Φ	$26^\circ - 63^\circ$	Bishop	Envolvente de falla no lineal de Mohr-Coulomb.
Barnes (1991)	C, Φ, r_u	$11^\circ - 63^\circ$	Bishop	Extensión de Bishop y Morgenstern (1960) para un rango mayor de ángulos del talud.

Fuente (Suarez, 1998)

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.

Para suelos con ángulo de fricción $\phi = 0^\circ$, Las tablas indicadas en la figura 8 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:

$$F.S. = N_o \frac{c}{\gamma H}$$

Donde:

N_o = Numero de estabilidad que se obtiene de la tabla

c = Cohesión

γ = Peso unitario del suelo

H = Altura del talud

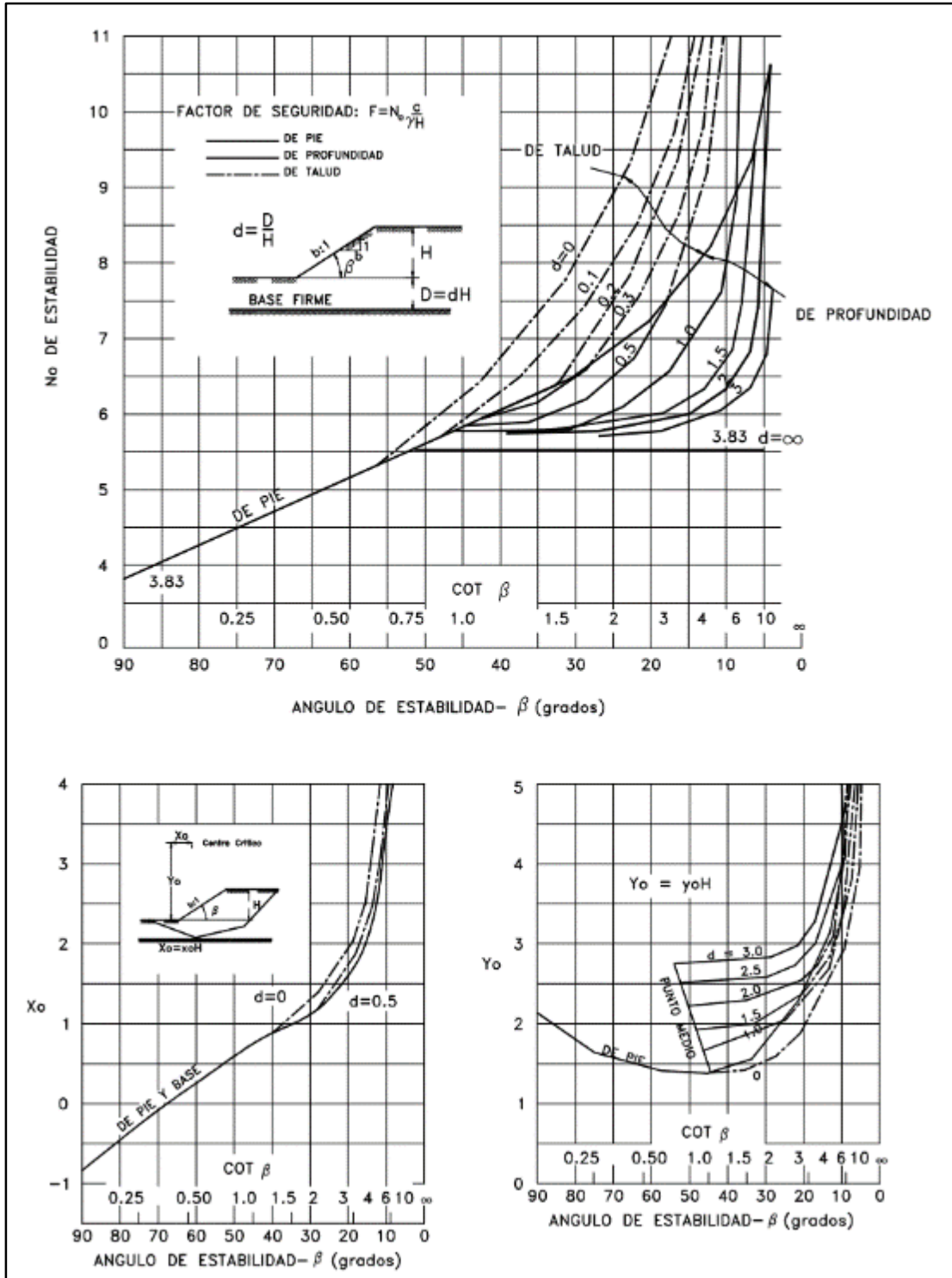


Figura 8. Tablas de estabilidad para suelos cohesivos ($\phi = 0$) de acuerdo a Janbú (1968).
Fuente (Suarez, 1998).

Para suelos con ángulo de fricción $\phi > 0^\circ$, en la mayoría de los casos para suelos $\phi > 0^\circ$ el círculo crítico pasa por el pie del talud y la tabla de estabilidad que se muestra en la figura 9, se basa en esta suposición. El factor de seguridad es calculado por la expresión:

$$F.S. = N_{cf} \frac{c}{P_d}$$

Donde:

N_{cf} y P_d = Son los obtenidos en la grafica

c = Cohesión promedio

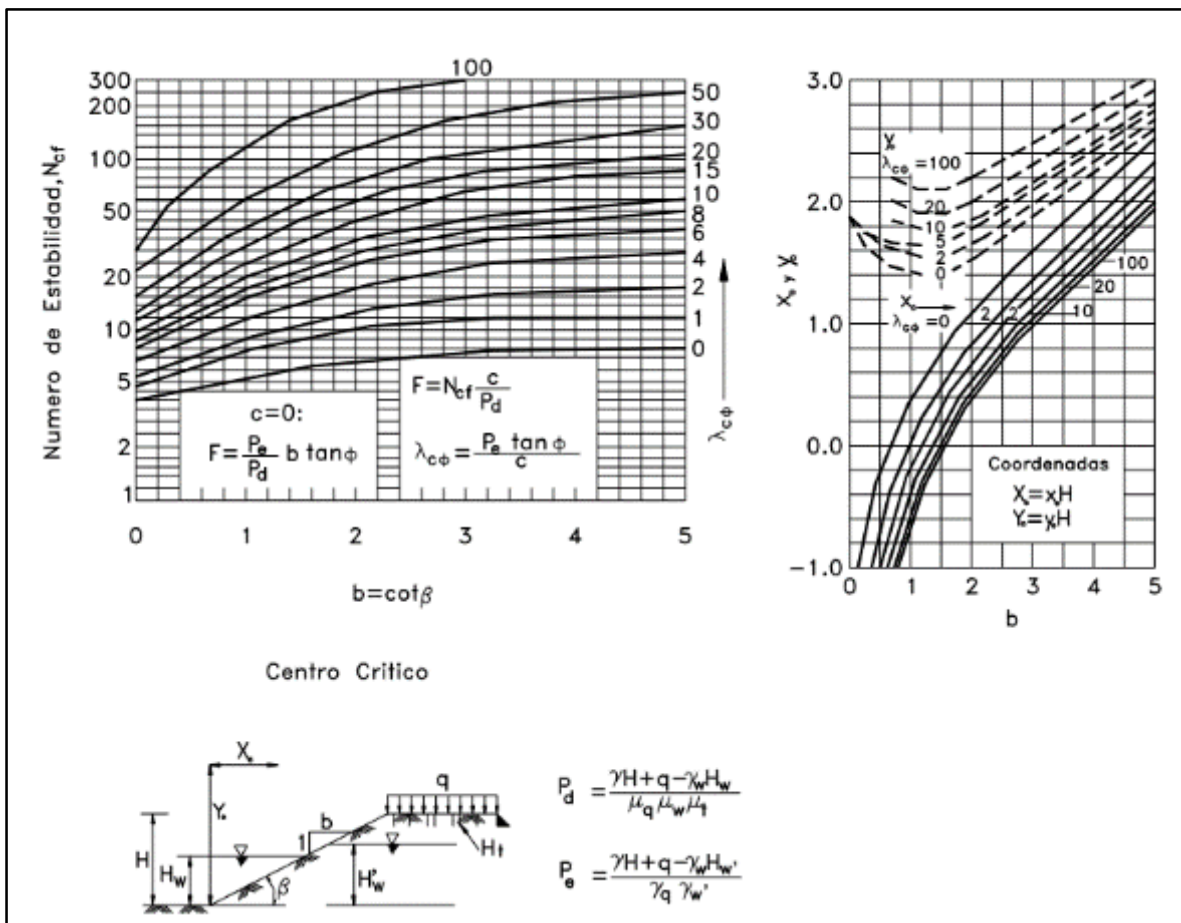


Figura 9. Tablas de estabilidad para suelos no cohesivos $\phi > 0$ de acuerdo a Janbú (1968).

Fuente (Suarez, 1998).

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 10 y 11.

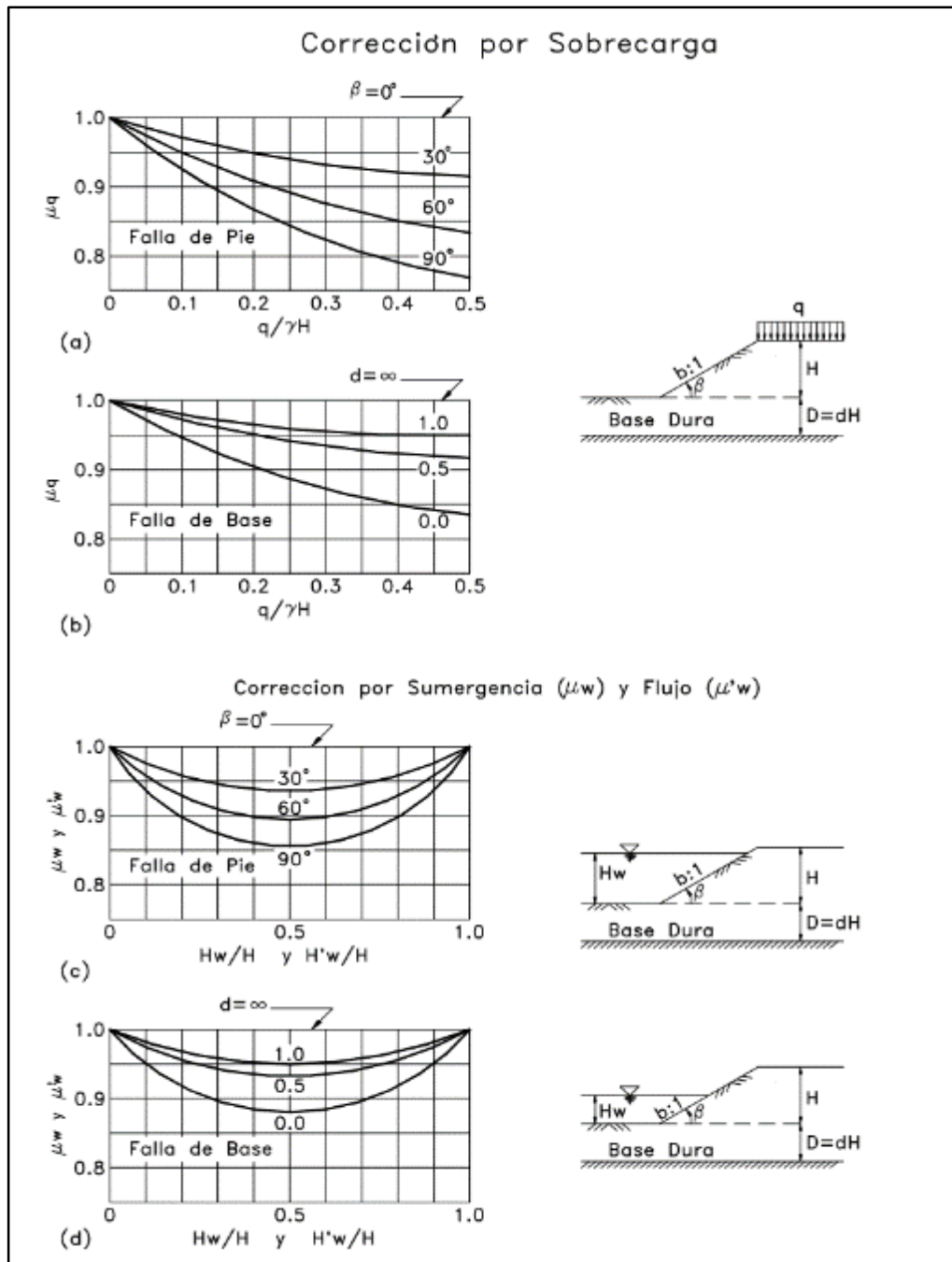


Figura 10. Factores de corrección por sobrecarga, sumergencia y flujo (Janbú 1968).
Fuente (Suarez, 1998).

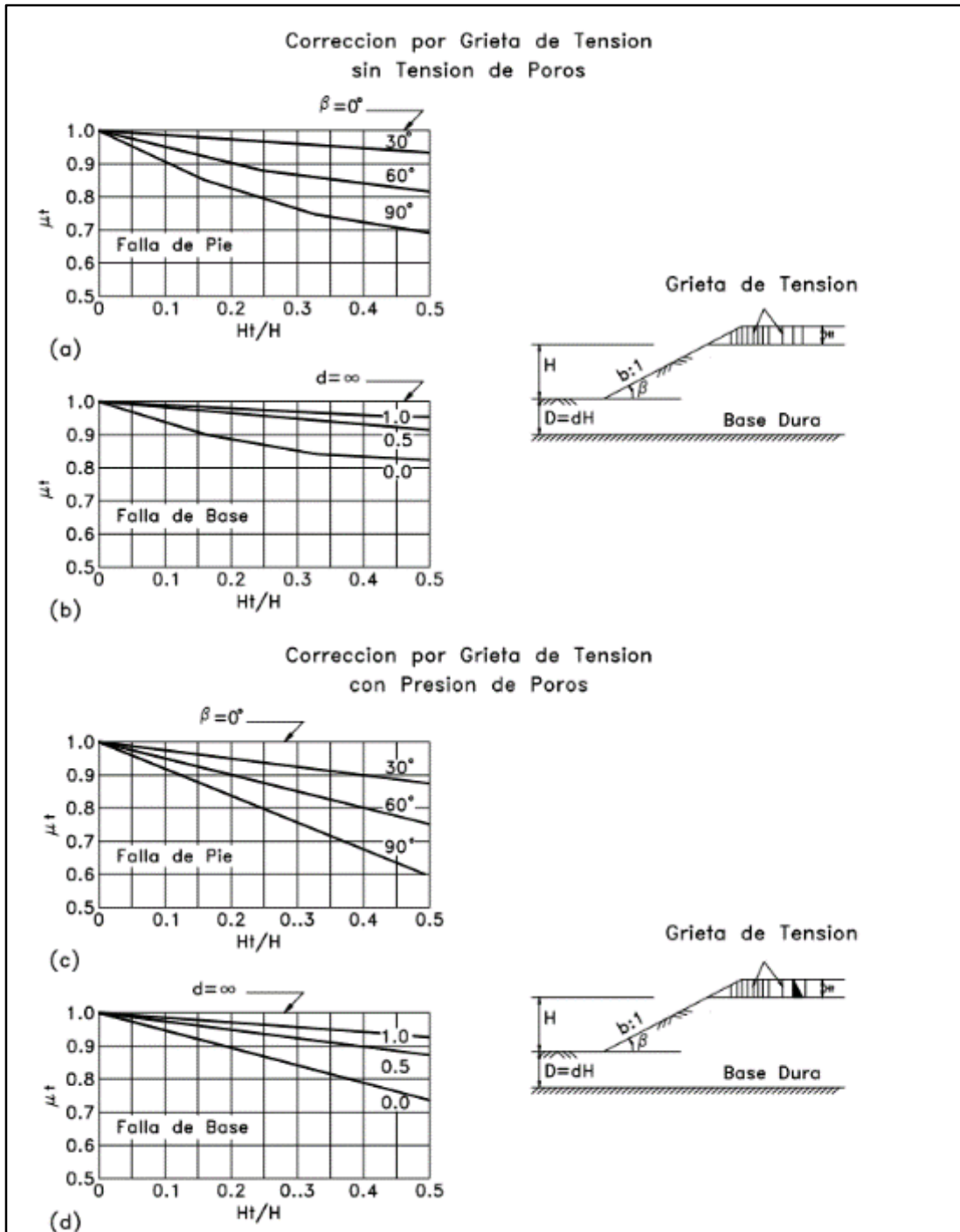


Figura 11. Factores de corrección por grietas de tensión para su uso en las tablas de estabilidad (Janbú 1968).

Fuente (Suarez, 1998).

2.2.1.1.3. Base teórica de Talud Infinito.

En las condiciones en las cuales se presenta una falla paralela a la superficie del talud, con una profundidad somera y la longitud de la falla sea larga comparada con su espesor, se puede utilizar en forma precisa aproximada, el análisis de talud infinito. Es un sistema muy rápido y sencillo para determinar el Factor de Seguridad de un talud, suponiendo un talud largo con una capa delgada de suelo, en el cual cualquier tamaño de columna de suelo es representativo de todo el talud.

Suposiciones:

- Suelo isotrópico y homogéneo.
- Talud infinitamente largo.
- Superficie de falla paralela al talud.

Para un talud uniforme y relativamente largo, en el cual el mecanismo de falla esperado no es muy profundo, los efectos de borde son despreciables y el FS puede calcularse para un talud infinito de una unidad de área utilizando el criterio Mohr – Coulomb (Figura 12).

$$FS = \frac{C + (\gamma h - \gamma_w h_w) \cos \alpha \tan \phi}{\gamma h \sin \alpha}$$

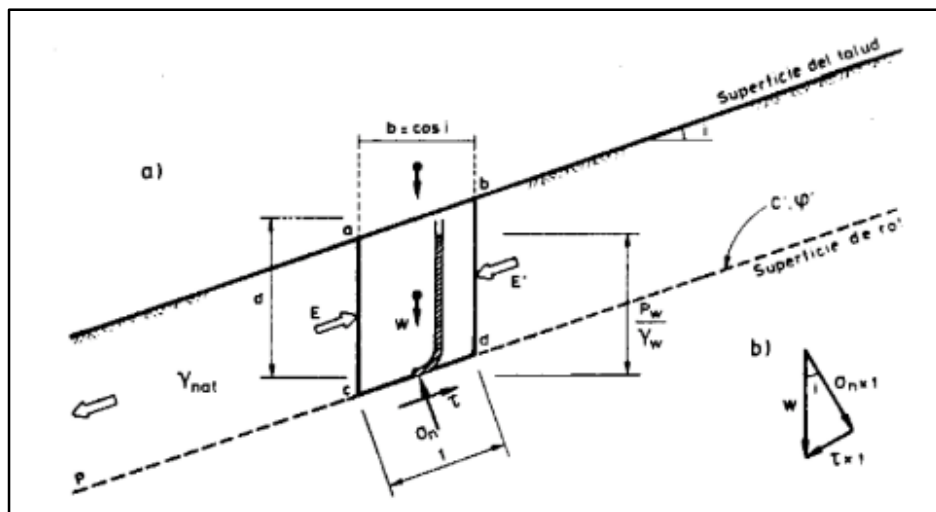


Figura 12. Esquema para cálculo método talud infinito.

Fuente (Pérez, 2005)

2.2.1.1.4. Base teórica de Espiral Logarítmica.

En este método, se considera que el terreno tiene una resistencia a la rotura (τ_{rot}) dada por:

$$\tau_{rot} = C + \sigma_n \operatorname{tg} \phi$$

Donde:

c y Φ son la cohesión y la fricción del terreno.

σ_n es el esfuerzo normal a la línea de rotura.

Se supone que el ángulo de fricción interna movilizado será:

$$\phi_m = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} \phi}{F_\phi} \right)$$

y se tantean distintas líneas de rotura en forma de espiral logarítmica (Figura 13), cuya ecuación será de la forma:

$$\rho = \rho_0 e^{\theta \operatorname{tg} \phi_m}$$

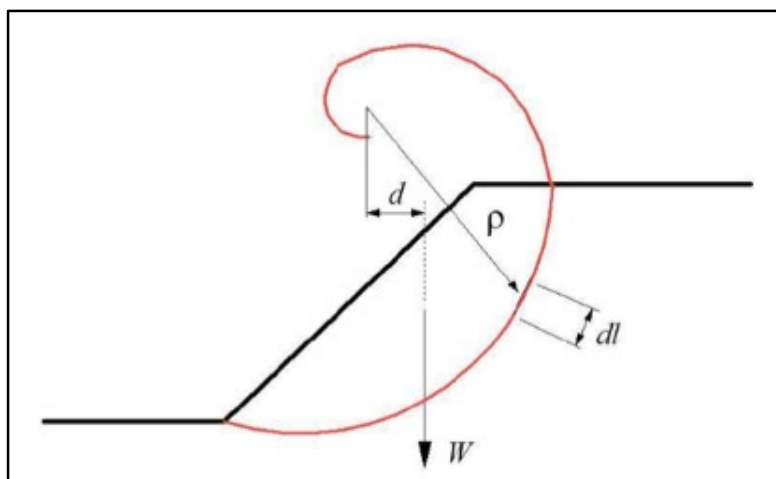


Figura 13. Modelo geométrico (método de la espiral logarítmica).

El equilibrio de momentos, en este caso, conduce a la siguiente ecuación del factor de seguridad (F_c):

$$F_c = \frac{\int_A^B c \rho \cos_m dl}{Wd}$$

De la ecuación anterior se obtiene un coeficiente de seguridad (F_c) que, si coincide con (F_ϕ), daría el factor de seguridad correspondiente. En otro caso habrían de tantearse otros valores de (F_ϕ) hasta que así ocurra.

2.2.1.1.5. Base teórica de Falla Circular.

Este análisis se realiza en términos de esfuerzos totales y considera el caso de una arcilla totalmente saturada, que soporta esfuerzos bajo condiciones no drenadas. Por lo tanto, permite determinar el factor de seguridad de un talud inmediatamente después de su construcción o de la aplicación de nuevas cargas sobre él. En sección se asume que la superficie potencial de falla es un círculo, permitiendo así que se encuentre el factor de seguridad considerando únicamente el equilibrio de momentos.

Como se muestra en la figura 14, la inestabilidad potencial de una superficie de falla circular, con centro en "o", radio "r" y longitud L_a , se debe al peso total de la masa de suelo (W por unidad de longitud) situada encima de la superficie de falla. Para que exista equilibrio, la resistencia al corte que debe movilizarse a lo largo de la superficie de falla se puede expresar como:

$$\tau_m = \frac{\tau_f}{FS} = \frac{c_u}{FS}$$

Donde FS es el factor de seguridad con respecto a la resistencia al corte. Haciendo suma de momentos alrededor de "O" se tiene:

$$W \times d = \frac{c_u}{FS} \times L_a \times r$$

Donde

$$FS = \frac{c_u \times L_a \times r}{W \times d}$$

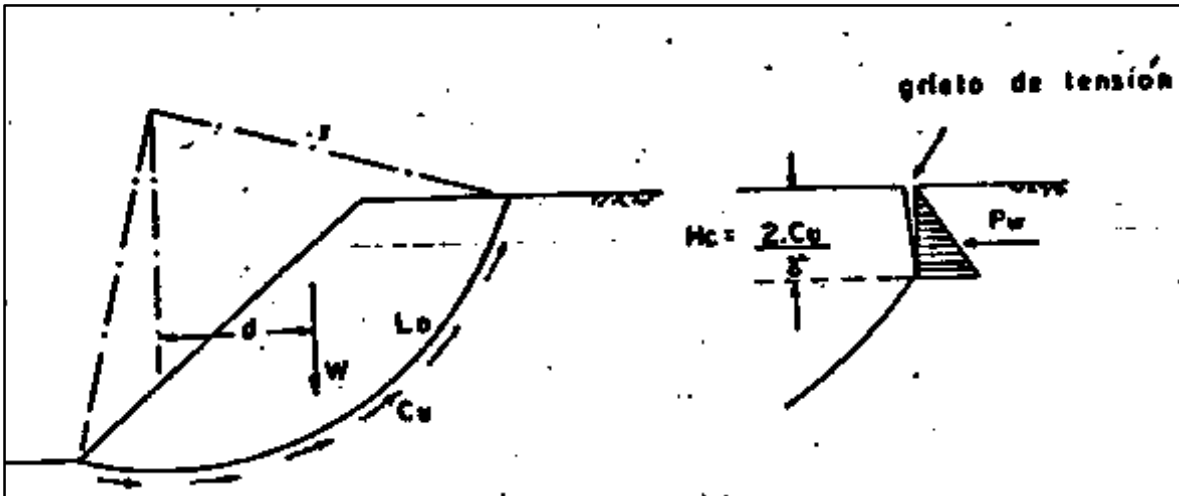


Figura 14. La inestabilidad potencial de una superficie de falla circular.

Si existe alguna fuerza adicional actuando sobre el talud, se debe tener en cuenta el momento correspondiente. Si consideramos una grieta de tensión en el extremo superior de la superficie de falla debe disminuirse la longitud L_a , y debe considerarse la fuerza hidrostática actuando normalmente a la grieta

2.2.1.1.6. Base teórica de Janbú.

La principal consideración de este método es que las fuerzas entre dovelas son solo horizontales, no toman en cuenta las fuerzas cortantes. Como se hace en los métodos de Fellenius y Bishop, que están basados fundamentalmente en la ecuación del equilibrio de momentos y no cumplen la ecuación de equilibrio horizontal, sin embargo, hay casos en los que esta ecuación parece intuitivamente más importante que la del equilibrio de momentos. A diferencia de los métodos anteriores, en este caso la superficie de falla no debe ser obligatoriamente circular. Esto se refleja en la aplicación de un factor de corrección f_0 , el que depende netamente del nivel de curvatura que presente la superficie de rotura (Figura 15).

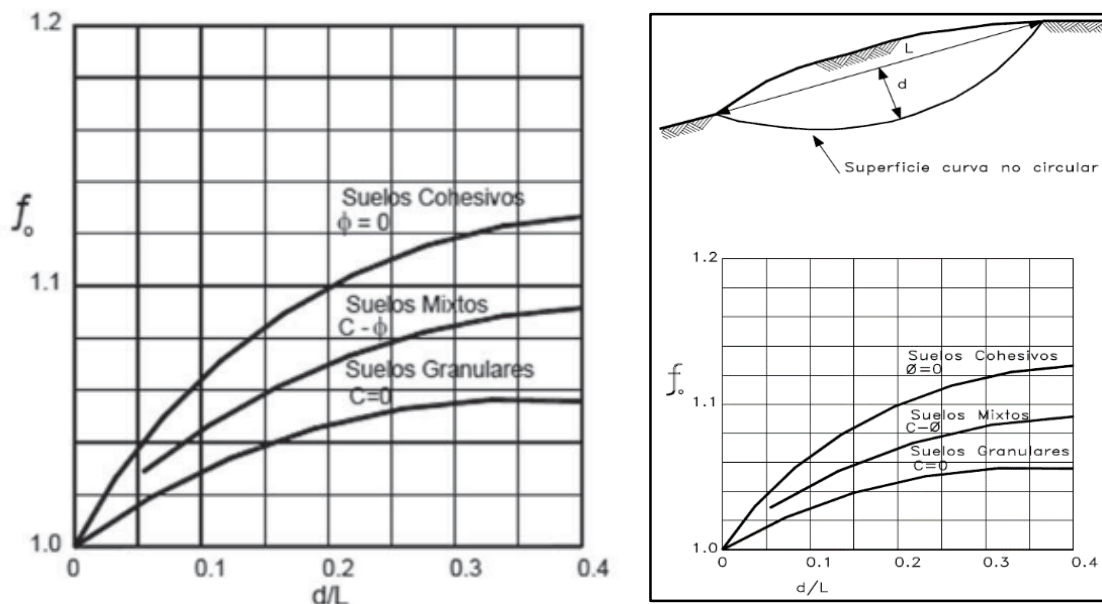


Figura 15. Diagrama del factor f_0 utilizado en el método de Janbú (Suárez, 2011)

Janbú extendió el método de Bishop a superficies de deslizamiento de cualquier forma. Cuando se tratan superficies de deslizamiento de cualquier forma el brazo de las fuerzas cambia (en el caso de las superficies circulares quedan constante e igual al radio), por este motivo es mejor valorar la ecuación del momento respecto al ángulo de cada bloque. Janbú (1973) presenta un método de Dovelas para superficies de falla curvas, no circulares.

Para determinar la estabilidad de un talud, Janbú considera el cálculo de un FS, el cual satisface el equilibrio de esfuerzos tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{f_0 * \Sigma \left\{ [c * b + W * \tan(\phi)] * \frac{1}{\cos(\alpha) * m * a} \right\}}{\Sigma W * \tan(\alpha)}$$

Donde f_0 depende de la curvatura de la superficie de falla

Tal pudiera ser el caso de reptaciones o de deslizamientos bastante planos. Con estas ideas, Janbú (1954a, 1954b, 1957) propuso un método aplicable a líneas de deslizamiento de cualquier tipo (no necesita un centro de círculo para tomar momentos), que está basado en satisfacer el equilibrio horizontal y el vertical. Como estas dos condiciones no son suficientes para calcular el coeficiente de seguridad, se llega a una expresión de éste que, además de

ser implícita como en el método de Bishop, contiene una serie de fuerzas desconocidas que son los esfuerzos tangenciales en las caras verticales de las rebanadas (Figura 16).

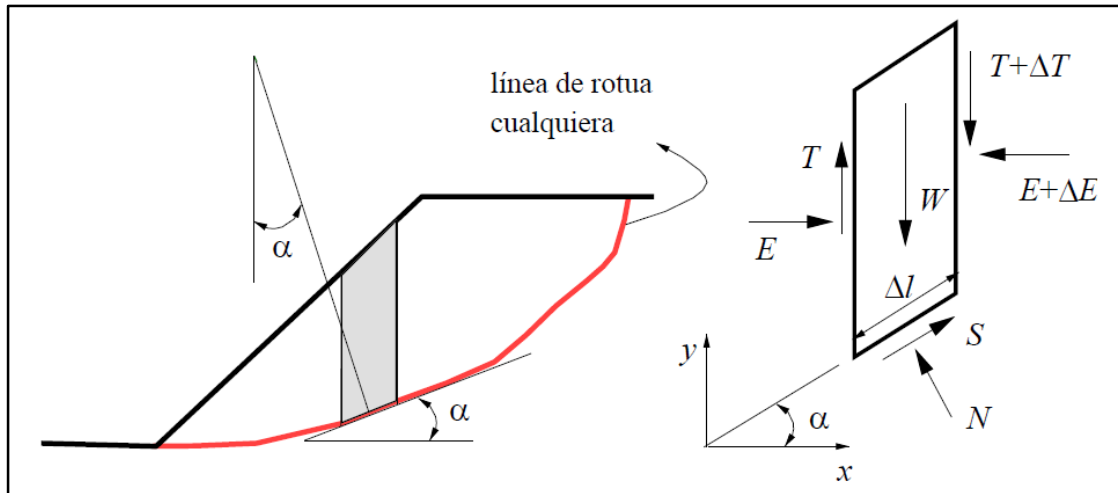


Figura 16. Modelo de análisis (método de Janbú).

2.2.1.1.7. Base teórica de Fellenius.

Fue el primer método para resolver el problema de taludes no homogéneos por división en rebanadas. Propuesto por Fellenius (1927), también se conoce como método ordinario.

El método es aplicable a líneas de rotura circulares y la ecuación básica es la de equilibrio de momentos respecto del centro del círculo. Las fuerzas volcadoras dan un momento claro de calcular (suma de pesos por distancias) mientras que las fuerzas resistentes (S), no son bien conocidas ya que, en materiales con fricción, dependen de la presión de contacto (N) entre la masa deslizante y su soporte.

Fellenius (1927), supuso que la presión de contacto (N) era similar al peso de cada rebanada (W), exactamente supuso que $N = W \cos \alpha$. Con esta hipótesis el problema tiene una solución muy sencilla, pero dicha hipótesis es cierta cuando la resultante de las fuerzas que actúan en las caras verticales de las dovelas es paralela a la línea de deslizamiento (Figura 17).

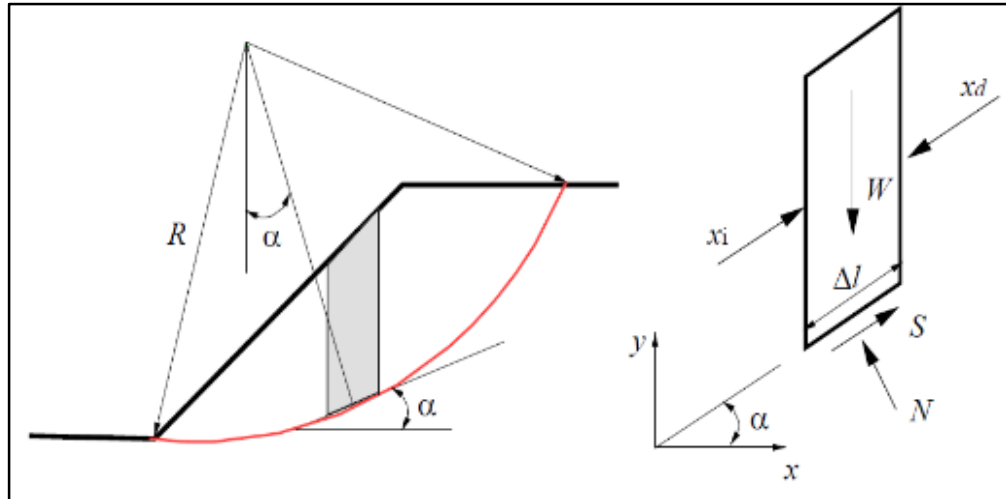


Figura 17. Modelo de análisis (método de Fellenius).

2.2.1.1.8. Base teórica de Bishop Simplificado.

El método propuesto por Bishop (1955), analiza la estabilidad de un talud con SPF del tipo circular, tomando en cuenta el efecto de las fuerzas entre dovelas. El método fue desarrollado para su solución, para tal caso se deben dibujar tajadas que dividan la masa de suelo a deslizarse.

El método supone que la superficie de falla es circular y plantea el equilibrio de momentos según el cual el momento actuante producido por el peso propio de cada tajada alrededor del centro de rotación es igual al momento resistente producido por la resistencia al corte del suelo a lo largo de la tajada.

Las fuerzas actuantes pueden dividirse en fuerzas generadas por empujes activos y empujes pasivos de acuerdo con la ubicación de la respectiva tajada.

En la figura 18, las tajadas ubicadas a la derecha del centro de rotación producen los empujes pasivos y a la izquierda producen los empujes activos

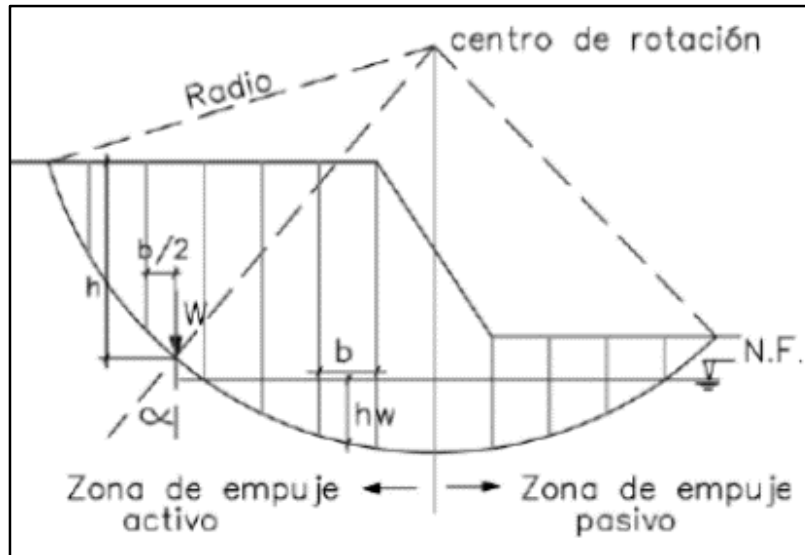


Figura 18. Rebanadas con respecto al centro de rotación.

La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón se utiliza una versión simplificada de su método, de acuerdo con la expresión

$$FS = \frac{\sum [C'b + (W - ub)\tan \phi' / ma]}{\sum W \sin \alpha}$$

Donde:

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

b = Ancho de la dovela.

W = Peso de cada dovela.

C', Φ = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela

α = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

2.2.1.1.9. Base teórica de Morgenstern-Price.

El método de análisis desarrollado por Morgenstern y Price (1965) puede ser aplicado tanto a superficies de rotura circulares como no circulares. Es un método parecido al método de Spencer, pero en el caso de Morgenstern-Price permite la especificación de las fuerzas entre rebanadas. El esquema de fuerzas entre rebanadas es el mismo que para el método de Spencer. Considera que las tensiones y las fuerzas varían continuamente en la superficie, resuelve las componentes normales y paralelas a la base para cada elemento formulando ecuaciones de equilibrio de fuerza generales. Supone que existe la siguiente relación entre esta componente vertical y normal:

$$X = \lambda \cdot f(x) E \lambda$$

dónde $f(x)$ es la función que varía de forma continua a lo largo de la línea, y λ es un valor escalar. Para una función dada $f(x)$, los valores de λ y f se encuentran de forma que se cumplan los equilibrios globales de Momentos y Fuerzas. De esta forma $F = F_m = F_f$.

Para escoger $f(x)$ se puede hacer considerando la distribución de tensiones normales a los límites de los elementos. En general no tiene que haber tensiones efectivas de tracción y las tensiones de corte deben ser menores a las requeridas por el equilibrio crítico local.

La idea de Morgenstern es fijar, con criterios ingenieriles cual es la forma de la inclinación de las fuerzas entre rebanadas ($f(x)$) y resolver el problema completo para esa función. Una parte de la solución es, precisamente, la altura a la que deben actuar los empujes para que puedan estar en equilibrio. Si esta parte de la solución parece lógica (empujes actuando al menos dentro de las caras entre rebanadas) el problema puede darse por resuelto. De otra forma habría que seguir calculando, adaptando el valor de $f(x)$, (Figura 19).

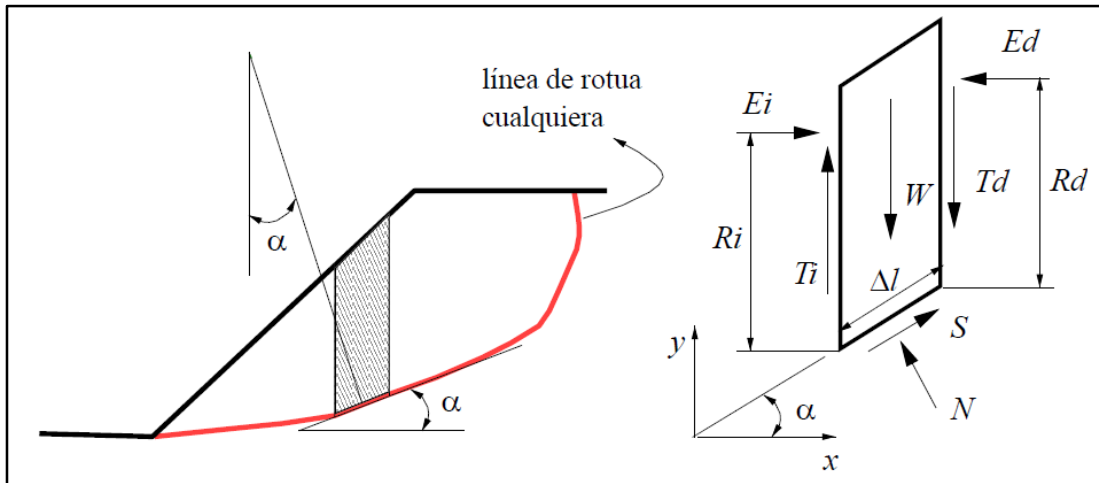


Figura 19. Modelo de análisis (método de Morgenstern-Price).

2.2.1.1.10. Base teórica de Spencer.

Inicialmente pensado para el análisis de superficies de rotura circulares, el método de Spencer (1967) puede ser aplicado a superficies no circulares siempre que se adopte uno centro de rotación friccional. En este método se suponen todas las fuerzas entre elementos (Figura 20).

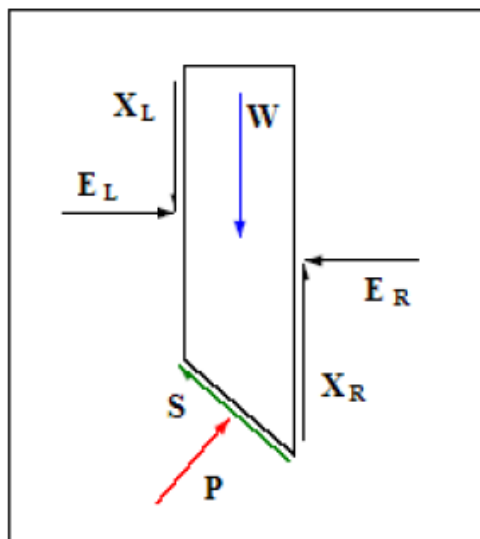


Figura 20. Centro de rotación friccional aplicado a superficies no circular

También se supone que las fuerzas entre rebanadas tienen una inclinación constante (θ) a lo largo de toda la recta, de forma que:

$$\frac{X}{E} = \tan \theta$$

dónde X son las fuerzas verticales y E las horizontales. La fuerza normal en la base del elemento será pues:

$$P = \frac{\left[W(E_R - E_L) \tan \theta - \frac{1}{FS} (c' l \sin i - ul \tan \phi' \sin i) \right]}{m_i}$$

Donde:

$$m_i = \cos i \cdot \left(1 + \tan i \cdot \frac{\tan \phi'}{F} \right)$$

Dónde FS es el factor de Seguridad definido como la tensión de corte movilizada respecto la disponible; E_R y E_L son las fuerzas horizontales derecha e izquierda respectivamente, entre los elementos de la rebanada; u es la presión de poro en la superficie de rotura; l es la longitud de la base de la rebanada; i la inclinación de la base del elemento; c' y ϕ' la cohesión y el ángulo de fricción en la superficie de rotura.

Suponiendo que el ángulo θ es constante para todos los elementos de la vertiente, se pueden hacer ambos, el equilibrio global de momentos y el de fuerzas, de manera que se encuentran dos valores del Factor de Seguridad, el del equilibrio de fuerzas (F_f) y el de momentos (F_m). Es puede encontrar un valor de θ tal que ambos factores de seguridad coincidan, que será el Factor de Seguridad de la vertiente. Spencer estudió la relación entre F_f y F_m por un problema tipo. Dedujo que el factor de seguridad resultante del equilibrio de momentos es relativamente insensible a las fuerzas entre elementos. Esta conclusión es coincidente con la de Bishop.

2.2.1.2. Análisis Numéricos.

A partir de la década del 60, la aparición de herramientas computacionales ha permitido manejar los cálculos iterativos de los distintos métodos de análisis de estabilidad de taludes.

El auge que ha tomado en los últimos años el uso software prácticamente ha obligado su empleo para el análisis de estabilidad de taludes, en la mayoría de los casos. Este sistema ha permitido incorporar más información en los modelos de análisis y permite analizar situaciones que no eran posibles con los sistemas manuales.

Los Métodos Numéricos (elementos finitos, diferencias Finitas, elementos discretos) son la base teórica que muestra la mejor aproximación al detalle de las condiciones de estabilidad en la mayoría de los casos de evaluación. Estos tienen un enfoque que utiliza modelos matemáticos y numéricos para representar la geometría y las propiedades del suelo. Este análisis, discretiza la masa de suelo en elementos más pequeños y se resuelven las ecuaciones de equilibrio para obtener una estimación de la estabilidad del talud. Permite considerar la variabilidad de los materiales y la geometría del talud de manera más precisa. Hoy en día ya existen algunos programas de análisis de estabilidad de taludes utilizando métodos numéricos para determinar el factor de seguridad.

Los modelos numéricos son muy útiles para analizar fallas en las cuales no existe una superficie continua de cortante como es el caso de las fallas por “volteo”. La incorporación de los defectos o discontinuidades dentro del modelo permiten estudiar el comportamiento del talud. Los elementos finitos pueden emplearse para estudiar las diversas posibilidades de falla en un talud conjuntas o para encontrar los efectos de varios sistemas de estabilización para el estudio en casos generales, donde las propiedades de los suelos o rocas y condiciones de frontera se pueden suponer

2.2.1.2.1. Base teórica sobre Elementos Finitos.

El método de elementos finitos resuelve muchas de las deficiencias de los métodos de equilibrio límite, este método fue introducido por Clough y Woodward (1967). El método esencialmente divide la masa de suelo en unidades discretas que se llaman elementos finitos. Estos elementos se interconectan en sus nodos y en bordes predefinidos. El método típicamente utilizado es el de la formulación de desplazamientos, el cual presenta los resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos a los puntos nodales. La condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos fallan simultáneamente. Aunque es una herramienta muy poderosa su utilización es muy compleja y su uso muy limitado para resolver problemas prácticos.

En general el método de los elementos finitos es la división de un continuo conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. De esta

forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no lineal, (Fariñas & Guido, 2014).

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir los siguientes parámetros:

- Dominio: espacio geométrico donde se va analizar el sistema.
- Condiciones de contorno: variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor.
- Incógnitas: variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema de desplazamientos, tensiones y temperaturas.

Al mismo tiempo los define por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre si los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos podemos calcular el resto de incógnitas que nos interesen: tensiones, deformaciones, desplazamientos, (Mendoza & Gabino, 2005).

En la figura 21, se muestra una malla típica para el análisis de un talud por elementos finitos (Ashford and Sitar 1997). Generalmente, las mallas analizadas contienen elementos de tamaño uniforme con anchos (W) y alturas (h) iguales. El tamaño y forma de los elementos influye en forma importante sobre los resultados obtenidos. Es común que entre más pequeños sean los elementos se obtienen mayores niveles de esfuerzos de tensión en la cresta del talud, para el caso de la figura 21.

La altura del elemento es tal vez el factor más importante y se recomiendan por lo menos diez niveles de elementos entre el pie y la cabeza del talud para simular en forma precisa el comportamiento del talud.

Existe en la literatura una gran cantidad de sistemas de elementos finitos con sus respectivos programas de computador, especialmente para taludes en roca, donde los defectos geológicos de la roca, más que la resistencia de la roca en sí, controlan la estabilidad de un talud determinado.

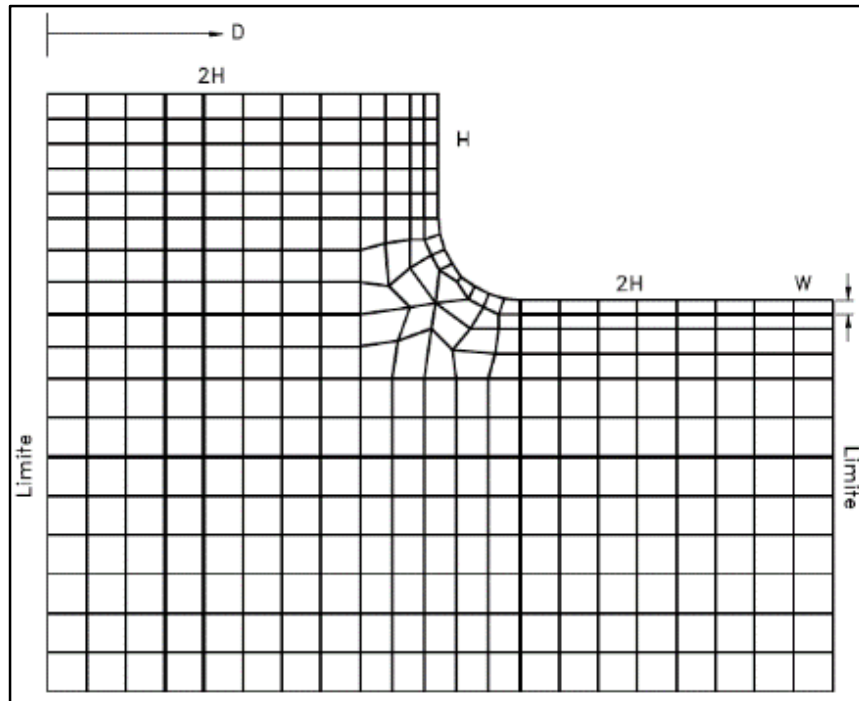


Figura 21. Malla típica para el análisis de un talud vertical por elementos finitos (Ashford y Sitar 1994).

2.2.1.2.2. Base teórica sobre Diferencias Finitas.

El análisis cuantitativo del progreso o desarrollo de las regiones plastificadas en un medio continuo, bajo condiciones generales de carga y limitaciones de borde, es un problema de la mecánica de los medios continuos, analíticamente irresoluble. Sin embargo, el empleo del Método de las Diferencias Finitas (MDF) permite obtener soluciones aproximadas a estos problemas, pues adapta el medio continuo que se desea analizar a un modelo matemático discreto, asegurándonos previamente de la convergencia y unicidad de la solución.

Las aplicaciones que utilizan el MDF parten de la formulación de la ecuación o sistema de ecuaciones diferenciales que rigen el problema y tienen como principio fundamental, sustituir la expresión diferencial por una equivalente en términos de incrementos finitos de las variables. Todas las variables del problema quedan discretizadas, lo que conduce a una subdivisión del dominio mediante una red ortogonal.

La discretización de las ecuaciones diferenciales permite obtener expresiones que relacionan los valores de las variables y sus incrementos, por tanto, permiten la solución en forma incremental. De forma general, el método sustituye cada derivada por una expresión algebraica finita en función de las variables de campo (tensiones, desplazamientos, presiones de poro, etc.) en puntos discretos del espacio.

En los últimos años se han elaborado muchos procedimientos que facilitan el análisis de la estabilidad de taludes y laderas, combinando métodos numéricos en diferencias finitas con métodos analíticos, no solo para evaluar el comportamiento tensodeformacional del terreno, sino para calcular el factor de seguridad. Básicamente, estos procedimientos combinan un método numérico en diferencias finitas explícito utilizado en la determinación del estado tensional del talud, con un método analítico para calcular el factor de seguridad. Los procedimientos de forma general constan de las siguientes etapas (Oliva, 1999): definición de la geometría del talud y propiedades del terreno; cálculo del estado tensional; definición de la curva o superficie de rotura; y cálculo del factor de seguridad (Figura 22).

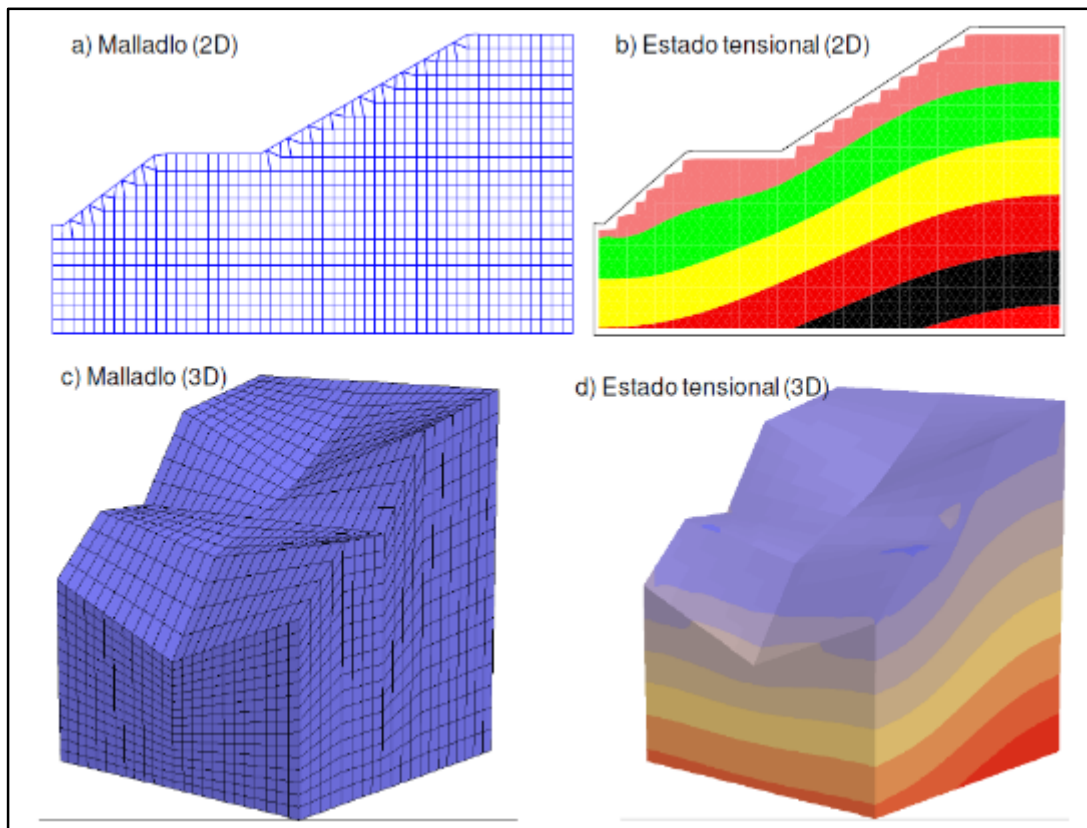


Figura 22. Modelos para análisis de estabilidad con el uso del MDF (Oliva, 1999).

Una vez definida la geometría del talud, utilizando programas informáticos en diferencias finitas como ALMEC (González C. y Menéndez A., 2002), se realiza el mallado del modelo y se establecen las condiciones de contorno. A continuación, se introducen las propiedades elásticas del material o materiales que lo constituyen, realizando los cálculos para determinar el estado tensional inicial del talud debido a la fuerza de gravedad (peso del terreno), u otras fuerzas externas como pueden ser las cargas existentes en la corona.

La próxima fase del análisis es la definición de la curva o superficie de rotura mediante dos opciones: considerando elipses o polilíneas en el caso bidimensional; y elipsoides si el análisis es en tres dimensiones.

Por último, se procede a determinar el factor de seguridad del talud o ladera, siguiendo el criterio de rotura de Mohr-Coulomb y calculando el vector tensión según la dirección de la normal y tangencial a dicha curva o superficie en el punto. Para el análisis en dos dimensiones (2D) se aproxima la curva de rotura por (n) elementos de arco; y en tres dimensiones (3D), se aproxima la superficie de rotura por (n) elementos cuadriláteros (Figura 23).

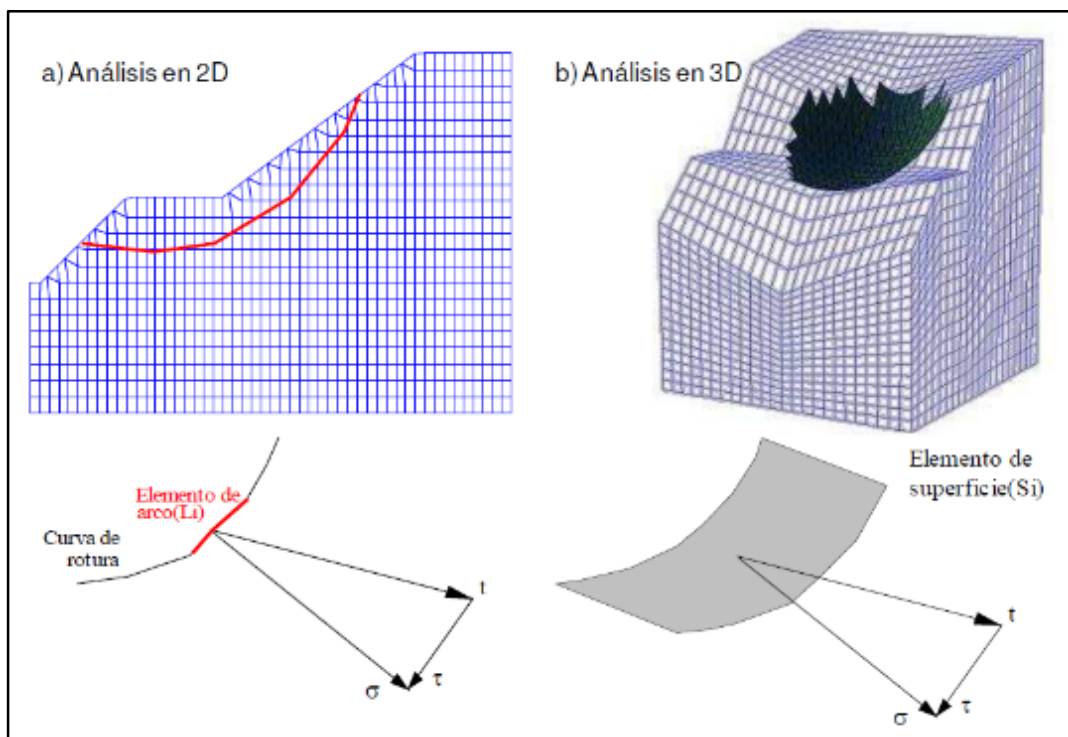


Figura 23. Modelos para el cálculo del factor de seguridad (Oliva, 1999).

Los procedimientos mencionados anteriormente son la base de varios códigos informáticos, que constituyen valiosas herramientas para agilizar y mejorar la fiabilidad del análisis de la estabilidad en taludes y laderas.

2.2.2. MÉTODOS DE MEDIOS DISCRETOS.

Los Métodos Discretos se distinguen los análisis de elementos discretos, diferencias discretas y métodos de bloques, donde sus bases teóricas dividen el talud en elementos discretos para modelar su comportamiento. Estos métodos utilizan técnicas numéricas para resolver las ecuaciones de equilibrio y las condiciones de borde del talud, teniendo en cuenta la interacción entre diferentes elementos y las propiedades del suelo. Aquí, se tienen en cuenta la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y permiten la incorporación de discontinuidades geotécnicas. Utilizan modelos matemáticos complejos y consideran el comportamiento no lineal del suelo (tabla 6).

Tabla 6. Los métodos de análisis de medios discretos y sus bases teóricas.

Métodos	Análisis	Bases Teóricas
	Método de Elementos Discretos (DEM)	Representación de partículas individuales y su interacción
Medios Discretos	Método de Diferencias Discretas (DDM)	Enfoque de partículas discretas
	Método de Bloques	Divide el talud en bloques discretos

Fuente (Elaboración propia)

Los Métodos de medios discretos, son computacionalmente intensivos y requieren datos detallados de las propiedades del suelo y la geometría del talud. La precisión de los resultados depende en gran medida de la calidad de los datos de entrada y del modelo utilizado. Son muy flexibles y pueden modelar con precisión la geometría compleja del talud y la variabilidad del suelo. Permiten tener en cuenta la interacción entre diferentes materiales y pueden considerar efectos como la variación de la cohesión y el ángulo de fricción a lo largo del talud.

El método de medios discretos para el cálculo de estabilidad en taludes naturales generalmente implica dividir el talud en bloques discretos y evaluar la estabilidad de cada bloque individualmente. Algunos aspectos clave de este enfoque incluyen:

- **División en Bloques:** Se divide el talud en bloques discretos, considerando las variaciones en la geometría del terreno y las propiedades del suelo.
- **Análisis de Fuerzas:** Para cada bloque, se analizan las fuerzas que actúan sobre él, como la gravedad, las presiones de agua y las cargas externas.
- **Propiedades del Suelo por Bloque:** Se asignan propiedades específicas del suelo a cada bloque, teniendo en cuenta las variaciones en cohesión, ángulo de fricción interna u otras características geotécnicas.
- **Interacción Bloque-Bloque:** Se evalúa la interacción entre bloques vecinos, ya que el deslizamiento en un bloque podría afectar a los bloques adyacentes.
- **Cálculo del Factor de Seguridad:** Se calcula el factor de seguridad para cada bloque individual, comparando las fuerzas estabilizadoras con las fuerzas que podrían provocar el deslizamiento.

Este método proporciona una evaluación detallada de la estabilidad del talud al considerar las variaciones locales en las condiciones geotécnicas. Sin embargo, puede ser computacionalmente intensivo y requiere datos precisos sobre las propiedades del suelo en diferentes ubicaciones del talud.

2.2.2.1. Método de Elementos Discretos (DEM).

El método de elementos discretos (DEM, por sus siglas en inglés) es un modelo matemático que representa el comportamiento de un sistema conformado por elementos independientes que se relacionan entre sí según leyes de interacción. Fue desarrollado por Cundall (1971) al querer abarcar problemas de mecánica de rocas, siendo este material entendido como un medio con discontinuidades. Posteriormente Cundall y Strack (1979) aplicaron el concepto inicial de DEM a ensamblajes granulares e interpretaron la interacción de las partículas como un problema transitorio con estados de equilibrio que se desarrollan cuando las fuerzas internas se equilibran (Huque, 2004).

De una manera práctica se puede decir que durante el contacto las partículas no se deforman, sino que se traslapan, dependiendo de la magnitud de la penetración y de la velocidad de una respecto de la otra se calculan las fuerzas entre ellas. El modelo utiliza dos tipos de ecuaciones, las primeras definen los movimientos de rotación y de traslación de las

partículas relacionando los parámetros dinámicos y cinemáticos (Newton – Euler) y las segundas corresponden a las leyes de contacto, las cuales determinan los parámetros dinámicos que resultan de la interacción entre partículas, y de estas con su entorno (Vega, 2016).

Principalmente se pueden distinguir las siguientes propiedades básicas que definen de forma global y a grandes rasgos este método de análisis numérico:

- Las partículas como elementos discretos que en su conjunto conforman el sistema complejo de partículas.
- Estos elementos distintos como también se le conoce se desplazan independientemente uno de otros e interaccionan entre sí en las zonas de contacto.
- En este método a nivel de cada partícula se hace uso de la mecánica del cuerpo rígido y los elementos discretos se consideran elementos rígidos en sí.

En este Método de Elementos Discretos (DEM) se tienen en cuenta las fuerzas de contacto entre partículas y se analiza la estabilidad global del talud. Se consideran las partículas de suelo como elementos individuales que interactúan entre sí. También se tiene en cuenta las interacciones entre partículas para simular el comportamiento del talud. Es especialmente útil para analizar el efecto de discontinuidades o fracturas en la estabilidad de los taludes. La aplicación de este análisis puede requerir un esfuerzo computacional significativo debido a la gran cantidad de partículas a considerar.

El Método de Elementos Discretos (DEM) se emplea para predecir el comportamiento de materiales en diferentes escenarios a partir de sistemas de partículas caracterizadas. Su uso permite evaluar un posible suceso específico, como lo es la deformación de un modelo o la generación de grietas, y determinar qué factores propiciaron el resultado y en qué medida. Debido a la ventaja que implica el no requerir distintos modelos físicos para comparar resultados, salvo que se busque corroborar la validez del método, la frecuencia de la implementación del DEM en experimentos ha ido en aumento.

Existen programas y códigos que emplean el DEM, pero que cumplen con ser de uso exclusivo para un grupo o una institución. La restricción limita enormemente su aplicación en proyectos que no sean de carácter investigativo o que no estén afiliados al poseedor de un código. Afortunadamente, también existen programas de libre disponibilidad que funcionan con el DEM y tienen un amplio rango de capacidades. Resulta necesario conocer

las funciones de las que disponen para poder seleccionar el más apropiado para el trabajo de modelización y simulaciones que se busque realizar.

El método de elementos discretos (DEM) puede utilizarse, para comprender la influencia de las propiedades de un modelo en su comportamiento y su estado resultante después de un evento simulado. Para conseguirlo, se comparan los ensayos de modelos caracterizados, modificando la propiedad de interés en cada simulación y conservando un mismo escenario. De esta manera, el DEM permite validar teorías que se tengan con relación a fórmulas o leyes del comportamiento de un material (Abe, 2016).

2.2.2.2. Método de Diferencias Discretas (DDM).

El análisis de Diferencias Discretas (DDM), se basa en el enfoque de partículas discretas, pero se orienta en el análisis de deslizamientos y deformaciones localizadas en una superficie de falla específica.

2.2.2.3. Método de Bloques.

El análisis de Bloques, discrepa de los anteriores, ya que este divide el talud en bloques discretos de suelo y analiza la estabilidad de cada bloque de manera independiente. Se utilizan criterios de resistencia al corte para determinar si un bloque está en equilibrio o puede experimentar un deslizamiento. Este método es adecuado para laderas con presencia de estratos o capas de suelo distintas.

2.2.3. MÉTODOS RETROSPECTIVOS.

Los Métodos Retrospectivos, también conocidos como métodos de retroanálisis, podemos mencionar algunos como el de Elementos Finitos Inverso, de Deformación Límite, de Análisis de Sensibilidad y el Métodos de Taludes Naturales (MTN). Estos métodos, se utilizan para determinar los parámetros del suelo, como la resistencia al corte, a partir de datos de campo y la observación del comportamiento de un talud inestable. Estos permiten ajustar los parámetros del suelo en un análisis retrospectivo para que los resultados del modelo se ajusten a la realidad observada. Los métodos inversos, como el método de los deslizamientos circulares y el método de las superficies de falla, se centran en encontrar la superficie de falla crítica que desencadenaría la inestabilidad del talud. Estos métodos

retroceden desde el estado límite de equilibrio hasta la superficie de falla para determinar los factores de seguridad (Tabla 7).

Los Métodos de Retrospectivos (Inversos), permiten utilizar mediciones de campo, como desplazamientos o deformaciones, para calibrar los parámetros del modelo y obtener una estimación más precisa de la geometría del talud o las propiedades del suelo. Se utilizan algoritmos de optimización para encontrar la mejor correspondencia entre los datos observados y los resultados del modelo. Sin embargo, la precisión de los resultados depende en gran medida de la calidad y cantidad de los datos de campo disponibles.

Tabla 7. Los métodos de análisis retrospectivos y sus bases teóricas.

Métodos	Análisis	Bases Teóricas
Medios Retrospectivos	Elementos Finitos Inverso	Análisis por elementos finitos para modelar el comportamiento del talud
	Deformación Límite	Teoría de la deformación límite para determinar los factores de seguridad de los taludes
	Análisis de Sensibilidad	Analiza la influencia de los diferentes parámetros geotécnicos en la estabilidad del talud
	Métodos de Taludes Naturales (MTN)	Analiza el comportamiento del talud a partir de la topografía y la geología.

Fuente (Elaboración propia)

2.2.3.1. Método de Elementos Finitos Inverso.

El análisis de elementos finitos inverso, utiliza un análisis por elementos finitos para modelar el comportamiento del talud. A partir de datos de monitoreo y observaciones de campo, se ajustan los valores de los parámetros del modelo hasta obtener una buena concordancia entre los resultados del análisis y los datos observados. Este enfoque combina la simulación numérica con los datos de campo para determinar los parámetros de estabilidad del talud.

2.2.3.2. Método de Deformación Límite.

El análisis de la deformación límite, se basa en la teoría de la deformación límite para determinar los factores de seguridad de los taludes. Se utiliza un enfoque iterativo para ajustar los valores de los parámetros geotécnicos hasta que se cumpla el criterio de falla de la deformación límite y los valores ajustados, se obtienen comparando los resultados del análisis con los datos de monitoreo o las características de la ladera.

2.2.3.3. Método de Análisis de Sensibilidad.

El método de sensibilidad, realiza un análisis para determinar la influencia de los diferentes parámetros geotécnicos en la estabilidad del talud, utilizando diferentes valores de los parámetros, y se comparan los resultados con las observaciones de campo. A partir de esta comparación, se ajustan los valores hasta obtener una buena concordancia entre los resultados del análisis y los datos de campo. Aquí es importante validar los resultados obtenidos mediante métodos inversos utilizando datos de estabilidad conocidos, como fallas previas o condiciones de inestabilidad observadas. La sensibilidad permite evaluar el efecto de las variaciones en los parámetros y las condiciones de carga en la estabilidad del talud.

2.2.3.4. Métodos de Taludes Naturales (MTN).

La metodología de taludes naturales (MTN) está enmarcada dentro del campo conceptual de la macrogeotecnia, y constituye un conjunto metodológico que permite la determinación y cálculo de parámetros geomecánicos y de estabilidad, apoyada en planos topográficos de escala y calidad adecuadas, indicando los contactos entre las diferentes formaciones geológicas y partiendo del supuesto "la naturaleza es el mejor ensayo *in-situ*", por lo tanto es importante resaltar que este método utiliza el análisis de la observación y medición organizada de dos parámetros geométricos cuantitativos como la longitud (L) y la altura (H), que se obtienen de agrupaciones adecuadamente delimitadas en los niveles de medición de taludes naturales (familia, subpoblación, población o universo) (Suarez, 2011).

Es importante tener en cuenta que estos parámetros geométricos se obtienen mediante técnicas de medición *in situ* o mediante análisis topográficos y geológicos realizados en el terreno. La información recopilada se utiliza para evaluar la estabilidad del talud y diseñar medidas de mitigación en caso de ser necesario. De esta manera, la MTN en sí no requiere

de informaciones adicionales, de sondeos, ni de ensayos de laboratorio o *in-situ*; y la economía de costos y la rapidez en la ejecución de los trabajos, le confieren a la MTN una ventaja comparativa significativa, en tiempo, costos y elementos físicos y humanos requeridos, con respecto a las metodologías convencionales de zonificación.

Aunque el propósito inicial de este método se circunscribe al campo de la estabilidad de taludes, tales como; la zonificación geotécnica de amenazas por inestabilidad de taludes naturales y movimientos en masa para vías, oleoductos, embalses, desarrollos urbanos, y diferentes componentes hidroeléctricos y túneles. Complementando lo relativo a la zonificación geotécnica, está la posibilidad del enlace de los parámetros probabilísticos de estabilidad con análisis de decisión económica, lo cual permite alcanzar un mayor grado de racionalidad y objetividad en la toma de decisiones relativas a la inestabilidad de taludes. Además, sirve de herramienta auxiliar para exploración geológica y la detección de rasgos geoestructurales; la exploración para yacimientos de minerales pesados y para agregados de concreto; y para el planeamiento, exploración y diseño de obras subterráneas.

La geomecánica, se centra en entender los procesos físicos que afectan la estabilidad de estructuras geotécnicas, como los taludes naturales. Uno de los métodos ampliamente utilizados es el MTN, que se basa en observar las características geológicas del terreno para evaluar la estabilidad de los taludes. Este método se apoya en conceptos físicos fundamentales para analizar la resistencia y la deformación de los materiales en los taludes. La geomecánica, integra una variedad de conceptos físicos para comprender y predecir el comportamiento de los taludes naturales.

2.3. RESUMEN SOBRE LOS MÉTODOS DE ESTABILIDAD.

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 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.

El número de ecuaciones de equilibrio disponibles es menor que el número de incógnitas, como consecuencia los métodos que no son rigurosos desde el punto de vista de equilibrio de fuerzas o momentos, emplean hipótesis adicionales para resolver el problema. Se sabe,

que en los métodos que satisfacen todas las ecuaciones de equilibrio, las hipótesis que incorporan, en general, no afectan significativamente el valor del factor de seguridad. En el caso de métodos que solo satisfacen el equilibrio de fuerzas y no el de momentos, el valor del factor de seguridad viene afectado por la hipótesis de inclinación de las fuerzas entre rebanadas. Como consecuencia estos métodos no dan siempre un grado de precisión tan elevado como los métodos que satisfacen todas las ecuaciones de equilibrio. En la tabla 8 se presentan un resumen de los métodos y sus principales características desarrolladas en este capítulo.

Tabla 8. Características principales de los distintos métodos analizados en este trabajo.

Métodos	Análisis	Bases Teóricas	Características
Medios Continuo	Equilibrio Limite	Cuñas (Caídas de Rocas)	La superficie de falla es entramos rectos formando una cuña, presenta equilibrio de fuerza, aquí se analiza la falla de cuña simple, doble o triple analizando las fuerzas que actúan sobre cada uno de los sectores de la cuña. Son útiles para analizar estabilidad de suelos estratificados o mantos de roca.
		Tablas de Janbú	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, son aplicables solamente para análisis de esfuerzos totales, debido a que no considera presiones de poro.
		Talud Infinito	La superficie de falla es recta, presenta equilibrio de fuerza e implícito de momento, se analiza un bloque superficial con un determinado espesor y una altura de nivel freático y se supone una falla paralela a la superficie del terreno.
		Espiral Logarítmica	Presenta una superficie de falla de espiral logarítmica, se determina equilibrio de fuerza y de momento, se asume una superficie de falla en espiral logarítmica en el cual el radio de la espiral varia con el ángulo de rotación sobre el centro de la espiral. Es muy útil para analizar estabilidad de taludes reforzados con geomallas o mailing. Se considera uno de los mejores métodos para el análisis de taludes homogéneos.

Métodos	Análisis	Bases Teóricas	Características
		Falla Circular	Presenta una superficie de falla circular, satisface equilibrio de momento e implícitamente de fuerza, se supone un círculo de falla, el cual se analiza como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ($\phi = 0$).
		Janbú	Puede tener cualquier forma de superficie de falla, satisface equilibrio de fuerza, al igual que Bishop asume que no hay fuerzas de cortante entre dovelas. La solución es sobre determinada 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.
		Fellenius	Presenta superficie de falla circular, satisface equilibrio de fuerza, este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizante como para las dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes plano con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
		Bishop Simplificado	Presenta superficie de falla circular, satisface equilibrio de momento, 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.

Métodos	Análisis	Bases Teóricas	Características
		Morgenstern-Price	Puede tener cualquier forma de superficie de falla, satisface equilibrio de momentos y fuerzas, asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo con una función arbitraria.
		Spencer	Puede tener cualquier forma de superficie de falla, satisface equilibrio de momentos y fuerzas, Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
	Numéricos	Elementos Finitos	Puede tener cualquier forma de superficie de falla, presenta análisis de esfuerzos y deformaciones, Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
		Diferencias Finitas	
Medios Discretos	Método de Elementos Discretos (DEM)	Representación de partículas individuales y su interacción	Puede analizar cualquier forma de superficie de falla, es utilizado para modelar el comportamiento del suelo, mediante la representación teórica de partículas individuales y su interacción.
	Método de Diferencias Discretas (DDM)	Enfoque de partículas discretas	Puede analizar cualquier forma de superficie de falla, se enfoca en el análisis de deslizamientos y deformaciones localizadas en una superficie de falla específica.

Métodos	Análisis	Bases Teóricas	Características
	Método de Bloques	Divide el talud en bloques discretos	Puede analizar cualquier forma de superficie de falla, pero este divide el talud en bloques discretos de suelo y analiza la estabilidad de cada bloque de manera independiente.
	Elementos Inverso	Finitos Análisis por elementos finitos para modelar el comportamiento del talud	A partir de datos de monitoreo y observaciones de campo, se ajustan los valores de los parámetros del modelo hasta obtener una buena concordancia entre los resultados del análisis y los datos observados.
	Deformación Límite	Teoría de la deformación límite para determinar los factores de seguridad de los taludes	Se utiliza un enfoque iterativo para ajustar los valores de los parámetros geotécnicos hasta que se cumpla el criterio de falla de la deformación límite y los valores ajustados se obtienen comparando los resultados del análisis con los datos de monitoreo o las características de la ladera
Medios Retrospectivos	Análisis de Sensibilidad	Analiza la influencia de los diferentes parámetros geotécnicos en la estabilidad del talud	Realiza un análisis para determinar la influencia de los diferentes parámetros geotécnicos en la estabilidad del talud, utilizando diferentes valores de los parámetros, y se comparan los resultados con las observaciones de campo
	Métodos de Taludes Naturales (MTN)	Analiza el comportamiento del talud a partir de la topografía y la geología.	Constituye un conjunto metodológico que permite la determinación y cálculo de parámetros geomecánicos y de estabilidad, apoyada en planos topográficos de escala y calidad adecuadas, indicando los contactos entre las diferentes formaciones geológicas y partiendo del supuesto "la naturaleza es el mejor ensayo <i>in-situ</i> "

Fuente (Elaboración propia)

Antes de cerrar este capítulo se hará una mención especial a la superficie real de falla para materiales dilatantes según el criterio de rotura según Hoek & Brown

2.3.1. CRITERIO DE ROTURA DE HOEK & BROWN.

Entre todos los criterios de rotura existentes en la literatura técnica específica de mecánica de rocas, se ha elegido y admitido como adecuado para su aplicación el criterio de Hoek & Brown, tanto en su versión original (1980) como en su versión modificada Hoek et al. (1992). Su uso está generalizado y extendido en el ámbito de la mecánica de rocas. Permite valorar, de manera sencilla, la rotura de un medio rocoso mediante la introducción de las principales características geológicas y geotécnicas del mismo. Es decir, mediante el tipo de roca, la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa, los factores que definen un índice de calidad del macizo rocoso {RMR - GSI}. La validez de este criterio de rotura viene limitada a aquellas situaciones en las que se den las condiciones de homogeneidad e isotropía. (Melentijevic, 2005).

El criterio originalmente propuesto (1980) fue desarrollado para los macizos rocosos duros para determinar los estados tensionales en el entorno de un túnel, para el análisis general de la estabilidad de taludes. Se trata de un criterio tipo Mohr cuyos parámetros se obtienen a partir de ensayos de laboratorio y que se aplica a medios fracturados, homogéneos e isótropos teniendo en consideración condicionantes empíricos. Se tiene en cuenta solamente la respuesta total del macizo rocoso, es decir la resistencia máxima desarrollada bajo cierto estado tensional. La influencia del tiempo de material no se tiene en cuenta.

Para el macizo rocoso, la línea de resistencia es marcadamente no lineal, con una pendiente decreciente con el aumento de la tensión de confinamiento. Por eso, si se ajusta una ley lineal que aproxima el criterio de rotura, el valor equivalente del ángulo de rozamiento (\emptyset) decrece con la tensión normal, y la cohesión aparente (c) aumenta.

El criterio modificado de Hoek et al. (1992) viene desarrollado por las limitaciones del criterio original para obtener valores de resistencia adecuados para el caso de las rocas extremadamente fracturadas {RMR < 25}. Con la formulación original se obtenían valores de resistencia a compresión y a tracción muy elevados para valores de confinamiento muy bajos. El criterio modificado de Hoek et al. (1992) supone un valor de resistencia a tracción

nula para los macizos rocosos muy fracturados, que es para lo que es válida esta hipótesis. (Melentijevic, 2005).

El criterio de rotura Hoek & Brown en su última versión tiene la misma expresión que la versión generalizada del año 1992 (Hoek et al., 2002), pero introduce un nuevo parámetro, el factor de alteración (D), dando lugar a una distinta formulación para la obtención de los valores de m_b , s y a

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{Ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{Ci}} + s \right)^a$$

El factor D representa un factor reductor de la resistencia que depende del grado de alteración que ha sufrido el macizo rocoso por efecto de voladuras o descompresión, es decir por efectos antrópicos. Adopta valores que van desde cero (0) para la roca no alterada en condiciones in situ, hasta el valor de uno (1) para la roca muy alterada. Basándose en los datos proporcionados por Sjöberg et al. (2001) y Pierce et al. (2001), a partir de las experiencias de taludes de gran altura en minería, Hoek et al. (2002) detectaron que el criterio de Hoek & Brown para la roca no alterada ($Z = 0$) da lugar a propiedades resistentes del macizo rocoso demasiado optimistas.

Para aplicar el criterio de rotura de Hoek & Brown (que es un criterio tipo Mohr) a la obtención de la resistencia en un plano de rotura (ley tipo Coulomb), es necesario conocer el ángulo de dilatancia (v) que determina la posición del plano de rotura respecto a la tensión principal mayor. Las leyes de fluencia que rigen los fenómenos de plastificación de los macizos rocosos son por ahora, casi totalmente desconocidas. La forma más sencilla de leyes de fluencia generales es la ley lineal. (Melentijevic, 2005).

Es imprescindible conocer previamente el valor del ángulo de dilatancia del material para poder deducir tensión normal y tensión tangencial sobre la superficie de rotura. Si se adopta un valor del ángulo de dilatancia constante, se facilita su uso en los cálculos. No hay muchos datos sobre los valores que alcanza el ángulo de dilatancia para distintos tipos de materiales. Las recomendaciones que existen en este aspecto en la literatura son escasos.

3. EVALUACIÓN CRÍTICA DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE MEDIOS CONTINUOS, MEDIOS DISCRETOS E RETROSPECTIVO, APLICADOS A LA ESTABILIDAD DE LADERAS NATURALES, SUS VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

Aquí se presentan un análisis crítico sobre los métodos de medios continuos, medios discretos, retrospectivos y sus bases teóricas, aplicados a la estabilidad de laderas naturales (Tabla 9). También se describen las ventajas y limitaciones de cada método. Se abordan sus características particulares en términos de eficiencia computacional y requerimientos de datos de entrada. Este análisis permite tener una visión integral de las diferentes aproximaciones utilizadas en el análisis de la estabilidad de taludes, para la toma de decisiones informadas al seleccionar el método más adecuado para un caso específico.

Tabla 9. Los métodos de análisis de medios continuos, discretos y retrospectivos y sus bases teóricas.

Métodos	Análisis	Bases Teóricas
Medios Continuo	Equilibrio Limite	Cuñas (Caídas de Rocas)
		Talud Infinito
		Espiral Logarítmica
		Fellenius
		Falla Circular
		Janbú
		Tabla de Janbú
		Bishop Simplificado
		Spencer
		Morgenstern-Price
Medios Discretos	Numéricos	Elementos Finitos
		Diferencias Finitas
	Método de Elementos Discretos (DEM)	Representación de partículas individuales y su interacción
	Método de Diferencias Discretas (DDM)	Enfoque de partículas discretas
	Método de Bloques	Divide el talud en bloques discretos

Métodos	Análisis	Bases Teóricas
Medios Retrospectivos	Elementos Finitos Inverso	Análisis por elementos finitos para modelar el comportamiento del talud
	Deformación Límite	Teoría de la deformación límite para determinar los factores de seguridad de los taludes
	Análisis de Sensibilidad	Analiza la influencia de los diferentes parámetros geotécnicos en la estabilidad del talud
	Métodos de Taludes Naturales (MTN)	Analiza el comportamiento del talud a partir de la topografía y la geología.

Fuente (Elaboración propia)

Como se ha señalado, estos métodos de análisis también pueden agruparse convenientemente en las siguientes categorías; análisis cerrado, simple y numérico, donde se puede resumir el alcance y capacidad de cada método para satisfacer los requisitos fundamentales y brindar información sobre el diseño de cada uno (Tabla 10).

Tabla 10. Requisitos básicos para la solución que deben satisfacer los diferentes métodos de análisis de estabilidad de taludes en laderas naturales.

Métodos de análisis	Requisitos de solución					
	Equilibrio	Compatibilidad	Comportamiento constitutivo	Condiciones de frontera		
				Fuerza	Muestra	
Forma cerrada	Satisface	Satisface	Elástico lineal	Satisface	Satisface	
Equilibrio límite	Altamente satisface	No Satisface	Rígido con un criterio de falla	Satisface	No Satisface	
Campo de esfuerzo	Satisface	No Satisface	Rígido con un criterio de falla	Satisface	No Satisface	
Análisis limite bajo	Satisface	No Satisface	Plasticidad asociada con regla de flujo asociado	Satisface	No Satisface	
	No Satisface	Satisface		No Satisface	Satisface	
Enfoque de primavera	Satisface	Satisface	Suelo modelado por resorte o factor de	Satisface	Satisface	

Métodos de análisis	Requisitos de solución				
	Equilibrio	Compatibilidad	Comportamiento constitutivo	Condiciones de frontera	
			interacción elástica	Fuerza	Muestra
Análisis numérico completo	Satisface	Satisface	Sin	Satisface	Satisface
Método de Elementos Discretos (DEM)	Satisface	Satisface	Sin	Satisface	Satisface
Método de Diferencias Discretas (DDM)	Satisface	Satisface	Sin	Satisface	Satisface
Método de Bloques	Satisface	Satisface	Sin	Satisface	Satisface
Elementos Finitos Inverso	Satisface	Satisface	Sin	Satisface	Satisface

Tomado de Paulos y Davis (1974)

3.1. MÉTODOS DE MEDIOS CONTINUOS.

Se comenzará abordando de manera crítica los métodos de medios continuos. Estos suelen ser eficientes en el análisis de taludes con geometrías simples y condiciones de carga uniformes. Pueden proporcionar resultados rápidos y aproximados, pero suelen simplificar la realidad del comportamiento del suelo y la geometría del talud. Sin embargo, pueden presentar limitaciones por considerar discontinuidades geológicas y heterogeneidades del terreno, como fallas o capas de alta permeabilidad.

Además, no tienen en cuenta la variabilidad espacial de las propiedades del suelo. Esto puede llevar a una falta de precisión en la evaluación de la estabilidad y a una posible subestimación de los riesgos. Una de sus limitaciones, es que se basan en suposiciones simplificadas sobre la geometría del talud y la distribución de esfuerzos en el suelo, lo que puede llevar a resultados conservadores o inexactos en ciertos casos. Además, estos

métodos no consideran explícitamente la interacción entre diferentes materiales presentes en el talud. Dentro de los métodos de medios continuos se encuentran el análisis equilibrio límite y análisis numéricos con diferentes bases teóricas como se puede observar en la tabla 9.

3.1.1. LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LIMITE.

Estos permiten analizar los casos de falla traslacional y de falla rotacional, así como las fallas de inclinación y las fallas de cuña. Una de sus limitaciones, es cuando los sistemas de falla son complejos, puesto que se debe apoyar con modelación que tengan en cuenta los factores que producen los movimientos. Este también se basa en comparar las fuerzas resistivas con las fuerzas impulsoras para determinar el factor de seguridad de un talud. Se asumen superficies de falla y se evalúan los momentos y las fuerzas actuantes. Se utilizan criterios de resistencia al corte, como el criterio de Mohr-Coulomb. Sin embargo, este método no considera la interacción entre partículas individuales del suelo y puede subestimar la inestabilidad en algunos casos. Se fundamenta en que, en la superficie de falla, el factor de seguridad entre las fuerzas actuantes y las resistentes es igual a 1. El método puede estudiar el talud completo o puede dividirlo en franjas llamadas dovelas y realizar un análisis a cada una (Suarez, 2009). Sin embargo, Azorín (2014) menciona que las fallas de los taludes (en su gran mayoría) son progresivas; no inicia la falla al mismo tiempo, como lo suponen los métodos de equilibrio límite y recomienda utilizar técnicas de modelación numérica, ya que pueden ser un poco más precisas y pueden incluir las deformaciones.

El análisis de procesos de inestabilidad en taludes, aplicando métodos convencionales de equilibrio límite, han demostrado que este no refleja las condiciones reales de resistencia mecánica de los materiales encontrados. La diferencia entre las distintas bases teóricas para el cálculo del factor de seguridad (Fellenius, Bishop, Janbú, Morgenstern-Price, entre otros) radica en las simplificaciones para reducir la indeterminación de las fuerzas entre las dovelas (Ortiz, 2019).

Entre las desventajas del método de equilibrio límite, es que en muchas ocasiones se debe apoyar en los métodos numéricos, lo que podría parecer una ventaja, haciendo que el modelo geotécnico sea más sencillo, ya que requiere menos información (no requiere parámetros elásticos), por ende, los recursos computacionales necesarios son menores. Aunque en este método no hay que especificar las condiciones de borde, esta práctica aumenta la incertidumbre en los modelos (Reyes, 2015).

Los métodos de equilibrio límite o llamados de solución rigurosa (Janbú, Morgenstern – Price, Spencer,) no pueden ser vistos como rigurosos en el sentido estrictamente mecánico, ya que las ecuaciones de equilibrio no se satisfacen para cada punto de la masa de suelo. Tampoco se satisface la regla de flujo, las condiciones de compactibilidad, ni las relaciones constitutivas pre-falla.

Hay toda una gama de métodos de análisis que se simplifican en medios continuos para el diseño de taludes en suelo o roca, los cuales pueden encuadrarse en dos grandes categorías que se presentan en la tabla 11.

Tabla 11. Análisis convencionales de medios continuos en el diseño de taludes.

ENFOQUE	ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LIMITE	ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS
Características	Bidimensional, Tridimensional (cuña) Masa rígida a semirrígida	Bidimensional, Tridimensional. Material de comportamiento elástico lineal no lineal. Con o sin resistencia a la tracción. Con o sin discontinuidades.
Datos de Entrada	Geometría Modo de falla: Traslacional, rotacional, plana, cuña. Parámetros c , Φ : de fluencia, pico, residual. Agua empuje hidrostático, fuerzas de infiltración, presiones neutras.	Geometría. Campo de esfuerzos natural, roca: E , μ , c , Φ . Discontinuidades: K_n , K_s , dilatancia, c , Φ . Agua: Efecto de las presiones neutras.
Resultados	Factores de seguridad	Campo de esfuerzos, Campos de deslizamiento.
Limitaciones	No considera deformaciones.	Por lo general admite únicamente desplazamientos pequeños.

Fuente (Elaboración propia)

3.1.1.1 Cuñas (caída de rocas).

Es importante indicar que esta base teórica considera la interacción entre las cuñas de suelo y la masa rocosa, identificando las posibles superficies de ruptura y evaluando la estabilidad del terreno. Sin embargo, aquí se considera un análisis general de los factores y parámetros involucrados en el suelo, roca, geometría del talud y condiciones ambientales.

Esta base teórica es útil, pero tiene limitaciones, desde el punto de vista de la identificación de las superficies de falla exactas, puede ser complicada debido a la variabilidad del suelo y las incertidumbres en los parámetros. Además, las condiciones cambiantes del terreno y la dificultad para considerar todas las variables pueden hacer que los resultados sean menos precisos. Es fundamental realizar una cuidadosa caracterización del suelo y un análisis detallado, utilizando datos de campo y modelos numéricos, para mejorar la precisión de las predicciones de estabilidad. La integración de métodos de ingeniería geotécnica avanzada y tecnologías de modelado puede ayudar a mejorar la fiabilidad de los análisis de estabilidad con el método de cuñas.

Una de las principales ventajas radica en su relativa simplicidad conceptual y aplicabilidad. Este método se basa en la identificación de bloques o cuñas de roca que podrían desprenderse, lo que facilita su comprensión por parte de geólogos y profesionales en el campo. Al centrarse en las características mecánicas de las formaciones rocosas, el método permite evaluar la estabilidad considerando la orientación de los planos de discontinuidad, la resistencia de la roca y otros factores clave que influyen en la estabilidad del talud. Es útil como una herramienta inicial para evaluar la estabilidad de un talud, porque proporciona una evaluación rápida y preliminar que puede ayudar a identificar áreas críticas que requieren un análisis más detallado.

Entre las limitaciones, se puede mencionar la simplicidad, ya que a menudo simplifica en exceso la geometría y la complejidad de las formaciones rocosas. Esto puede llevar a una evaluación inexacta de la estabilidad real del talud, ya que no considera todos los factores involucrados. El método al basarse en ciertas suposiciones sobre la naturaleza y el comportamiento de las cuñas de roca, puede conducir a resultados sesgados si estas suposiciones no representan con precisión las condiciones reales del terreno.

Así mismo, interacción entre múltiples cuñas o la presencia de discontinuidades complejas a menudo no se modela adecuadamente con este método, lo que limita su precisión en escenarios más complejos.

3.1.1.2. Talud Infinito.

Este método es una aproximación simplificada que considera un talud como una estructura infinita en una dirección determinada (generalmente horizontal). Aunque es una simplificación, puede proporcionar una visión valiosa de la estabilidad del suelo en determinadas condiciones. Este supone que el suelo tiene propiedades uniformes en todas las direcciones y bajo cualquier punto en consideración. Aquí se asume una superficie de falla plana y continua a lo largo del talud. Además, considera que el suelo alcanza el límite de su capacidad de carga sin deformaciones excesivas o colapso.

Ahora bien, este método tiene ventajas por su simplicidad, que permite un cálculo relativamente rápido y sencillo de la estabilidad del talud. Proporciona una base inicial para entender la estabilidad del talud y puede ser útil en etapas preliminares de diseño. Aunque simplificado, proporciona una perspectiva teórica útil para analizar los factores que afectan la estabilidad de un talud.

Las limitaciones del método se basan en las simplificaciones extremas, teniendo en cuenta que la suposición de un talud infinito puede llevar a resultados inexactos, ya que la realidad es que los taludes reales tienen dimensiones finitas y variabilidad en las condiciones del suelo. No tiene en cuenta aspectos como variaciones en la geometría del terreno, efectos de la lluvia, cambios estacionales, entre otros factores que pueden afectar la estabilidad. No tiene la capacidad de manejar estratos de suelo con propiedades diferentes o heterogeneidades dentro del suelo, lo que puede ser crucial en condiciones reales. Debido a sus suposiciones simplificadas, los resultados pueden ser aproximados y pueden requerir validación con métodos más avanzados para garantizar una evaluación precisa de la estabilidad del talud.

3.1.1.3. Espiral Logarítmica.

También conocido como método de Fellenius, es una técnica comúnmente utilizada para analizar la estabilidad de taludes. Este método se basa en principios de equilibrio límite y permite evaluar la estabilidad de un talud bajo diferentes condiciones de carga y suelo. Sin embargo, como cualquier herramienta de análisis, tiene sus ventajas y limitaciones.

Entre las ventajas, se encuentra la versatilidad en condiciones variadas, convirtiéndose en una de las mayores fortalezas del método, el cual le ofrece la capacidad para considerar una variedad de condiciones de suelo y carga. Puede manejar suelos cohesivos y granulares, así como diferentes ángulos de fricción interna y cohesión. La simplicidad relativa, en comparación con algunos métodos más avanzados, la espiral logarítmica es relativamente simple de entender y aplicar. El método evalúa la estabilidad considerando los factores de seguridad, lo que permite determinar el margen de seguridad del talud bajo diferentes condiciones.

Mientras que las limitaciones, basada en la representación de la realidad geotécnica, considerando que este método asume condiciones ideales y simplificadas del suelo, lo que puede llevar a resultados que no reflejan completamente la complejidad del comportamiento del terreno real.

Además, tiene una dependencia de parámetros determinados y estos parámetros pueden ser difíciles de determinar con precisión en situaciones reales. Ahora bien, este método no considera la variabilidad espacial, lo que puede llevar a una evaluación inexacta de la estabilidad en áreas donde la variación del suelo es significativa. Por último, la sensibilidad a la selección del método de cálculo, puede influir en los resultados. Pequeñas variaciones en la metodología de cálculo pueden producir diferencias significativas en la evaluación de la estabilidad del talud.

3.1.1.4. Fellenius.

El método de Fellenius es una de las aproximaciones más utilizadas para evaluar la estabilidad de taludes. Este se basa en principios de mecánica de suelos y considera la interacción entre la geometría del talud, las propiedades del suelo y las fuerzas actuantes.

Una de las ventajas principales del método de Fellenius radica en su simplicidad y facilidad de aplicación. Este enfoque permite calcular la seguridad de un talud utilizando parámetros como el ángulo de fricción del suelo, la cohesión y la geometría del talud. Además, su uso generalizado ha llevado al desarrollo de software especializado que simplifica y agiliza los cálculos. La capacidad del método de considerar múltiples escenarios y condiciones variables lo hace adaptable a diferentes situaciones de diseño. Al permitir la modificación de parámetros como la altura del talud o las características del suelo, se puede realizar

análisis detallados para optimizar la estabilidad con respecto a diferentes condiciones geológicas.

Sin embargo, este método también presenta limitaciones significativas. Una de las críticas principales es su dependencia de suposiciones simplificadas que pueden subestimar la complejidad del comportamiento del suelo en situaciones reales. La consideración de la variabilidad del suelo, la presencia de agua subterránea, la anisotropía y otros factores no lineales pueden no ser completamente representados en los cálculos, lo que limita su precisión. Además, el método a menudo no considera la posibilidad de análisis de estabilidad a largo plazo, ya que se enfoca principalmente en condiciones estáticas. La influencia de cargas dinámicas o cambios climáticos a lo largo del tiempo podría no ser completamente evaluada, lo que podría conducir a una evaluación subestimada de la estabilidad a largo plazo.

La determinación del factor de seguridad en condiciones estática y pseudoestáticas. 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. Lo que permite dilucidar, que la ladera es estable tanto para una condición estática como pseudoestática, lo cual se debe a las buenas características mecánicas que tenga el suelo del talud.

3.1.1.5. Falla Circular.

El método de falla circular se utiliza específicamente para analizar la estabilidad de los taludes en forma de cono o forma circular, mediante la teoría de la resistencia al corte y se evalúan los factores de seguridad. Sin embargo, puede requerir simplificaciones significativas para ser aplicado en laderas naturales.

Entre las ventajas del método se encuentra la simplicidad conceptual de las fuerzas y condiciones que influyen en la estabilidad de un talud, que facilita su aplicación y comprensión. El cálculo de la estabilidad se puede realizar con herramientas relativamente simples y software de análisis geotécnico estándar, esto reduce la complejidad de los cálculos y hace que el proceso sea más accesible. Es rápido en la evaluación preliminar de la estabilidad de taludes. Para diseños iniciales o análisis rápidos, este método puede proporcionar resultados en un corto período de tiempo, permitiendo una rápida toma de

decisiones. Es aplicable a una variedad de condiciones de taludes y suelos, lo que lo hace versátil en distintos escenarios geotécnicos.

Por otro lado, sus limitaciones se centran en la simplicidad, ya que puede pasar por alto factores importantes que podrían afectar la estabilidad del talud. Esto incluye la ignorancia de la variabilidad del suelo, la anisotropía, la presencia de discontinuidades u otros factores geométricos que podrían influir en el comportamiento real del talud. El método asume una forma de superficie de falla circular, lo que puede ser inadecuado para taludes con geometrías no circulares o para situaciones donde las condiciones de falla no se ajustan a este modelo.

La precisión de los resultados puede ser limitada en comparación con enfoques más avanzados que tienen en cuenta una gama más amplia de variables y condiciones específicas del sitio. Pequeños cambios en los parámetros de entrada, como el ángulo de fricción del suelo o la cohesión, pueden tener un impacto significativo en los resultados, lo que puede llevar a una incertidumbre considerable en las predicciones de estabilidad.

3.1.1.6. Janbú.

Su enfoque se basa en considerar la masa del suelo como una serie de rebanadas individuales, cada una sometida a diferentes fuerzas y condiciones.

Este método ofrece unas ventajas en su aplicación, el enfoque por rebanadas permite una representación detallada de la distribución de fuerzas y condiciones dentro del talud, lo que resulta en un análisis más preciso de la estabilidad. Este considera la variabilidad de las propiedades del suelo a lo largo del talud, lo que lo hace adaptable a diferentes situaciones geotécnicas. A pesar de su complejidad teórica, el método de Janbú se puede aplicar con relativa facilidad, lo que lo convierte en una herramienta útil para evaluar la estabilidad de taludes en proyectos reales.

Las limitaciones, están relacionada con suponer que las rebanadas de suelo están en equilibrio límite, lo que puede no reflejar completamente la realidad del comportamiento del suelo. La precisión, depende en gran medida de los parámetros utilizados en el análisis, como las propiedades del suelo y las condiciones de carga, lo que puede introducir incertidumbres en los resultados. En situaciones geotécnicas complejas, como la presencia de agua, suelos no homogéneos o estructuras subterráneas, el método puede no capturar completamente todos los factores que influyen en la estabilidad del talud.

El método simplificado de Janbú generalmente, subestima el factor de seguridad hasta por valores del 30%, aunque en algunos casos los sobrestima hasta valores del 5% (Linares, 2020). En los métodos más complejos y precisos se presentan con frecuencia problemas numéricos que conducen a valores no realísticos de factor de seguridad. Por las razones anteriores se prefieren métodos más sencillos, pero más fáciles de manejar como son los métodos simplificados de Janbú o Bishop. Aunque el modelo propuesto por Janbú, el cual plantea equilibrio de fuerzas, ha sido aquel que ha proporcionado los menores factores de seguridad. Se ha estudiado la determinación del factor de seguridad en condiciones estática y pseudoestáticas. 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.

3.1.1.7. Tablas de Janbú.

Este método se basa en el equilibrio límite y la mecánica de suelos para determinar la estabilidad de una pendiente. Su principal ventaja radica en su simplicidad relativa y su capacidad para proporcionar resultados rápidos y útiles en la evaluación preliminar de la estabilidad del talud. Su sencillez, hace que sean fáciles de entender y aplicar, lo que las hace accesibles. La rapidez, facilita una evaluación preliminar ágil de la estabilidad del talud sin la necesidad de realizar cálculos complejos. Son útiles como una herramienta de orientación inicial en el diseño de estructuras y pueden ayudar a identificar áreas críticas que necesitan un análisis más detallado.

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, las Tablas de Janbú también tienen ciertas limitaciones que deben considerarse al utilizarlas, por ejemplo, la simplificación del modelo que pueden no reflejar con precisión las condiciones reales del terreno y puede llevar a estimaciones inexactas de la estabilidad del talud. Están basadas en una serie de condiciones y propiedades del suelo específicas. Si las condiciones del suelo en cuestión difieren significativamente de las consideradas en las tablas, los resultados pueden no ser precisos ni confiables. El método de las Tablas de Janbú no considera todos los factores que pueden influir en la estabilidad del talud, como la variabilidad del agua, la presencia de fallas geológicas, cargas dinámicas, entre otros.

3.1.1.8. Bishop Simplificado.

El método más utilizado por la mayoría de los ingenieros geotécnicos en todo el mundo es el simplificado de Bishop, el cual 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, por lo que se tiene que recurrir a procedimientos que satisfacen el equilibrio, como son los métodos de Spencer y de Morgenstern-Price. La cantidad de métodos que se utilizan, dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad (Linares, 2020).

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 (Linares, 2020).

3.1.1.9. Spencer.

Su enfoque se basa en considerar la interacción entre el suelo y la estructura del talud para determinar la seguridad y estabilidad de la pendiente. El uso de este método ofrece ventajas como el enfoque simplificado y práctico para evaluar la estabilidad del talud. Utiliza ecuaciones que son relativamente fáciles de entender y aplicar en comparación con métodos más complejos. Este método permite evaluar la estabilidad teniendo en cuenta aspectos como la geometría del talud, las propiedades del suelo y la presencia de agua.

Permite calcular factores de seguridad, lo que proporciona una medida cuantitativa de la estabilidad del talud. Esto es esencial para tomar decisiones informadas en el diseño y la construcción de estructuras geotécnicas.

A pesar de su aplicabilidad práctica, el método de Spencer a menudo hace suposiciones simplificadas sobre la geometría del talud, las propiedades del suelo y otros factores. Estas pueden llevar a estimaciones imprecisas en condiciones geotécnicas complejas. El método puede tener limitaciones al tratar con la variabilidad del suelo, ya que las propiedades del suelo pueden ser heterogéneas y difíciles de caracterizar completamente, lo que puede afectar la precisión de los resultados. La sensibilidad del método de Spencer a la variación de ciertos parámetros (como la cohesión y el ángulo de fricción del suelo) puede limitar su aplicabilidad en contextos donde estos valores no puedan ser determinados con precisión.

3.1.1.10. Morgenstern-Price.

Este enfoque se basa en el equilibrio límite y la teoría de la plasticidad para determinar la estabilidad de un talud bajo ciertas condiciones. Aunque es ampliamente utilizado y ha demostrado ser útil, también presenta tanto ventajas como limitaciones que afectan su aplicación y precisión en la evaluación de la estabilidad del talud.

Una de las ventajas de este método, es que permite considerar la interacción entre la geometría del talud, las propiedades del suelo y las condiciones de carga, esto proporciona una visión integral al evaluar la estabilidad de un talud. También puede adaptarse para evaluar taludes con geometrías variadas, condiciones de suelo heterogéneas y diferentes tipos de cargas, lo que lo hace aplicable en una amplia gama de situaciones geotécnicas. Permite calcular factores de seguridad que indican la relación entre la resistencia del suelo y las fuerzas actuantes, lo que brinda una medida cuantitativa de la estabilidad del talud.

Así mismo presenta limitaciones, como las simplificaciones en la representación del comportamiento del suelo: Aunque considera la plasticidad del suelo, algunas condiciones reales pueden ser más complejas de modelar, lo que puede resultar en una estimación menos precisa de la estabilidad. La precisión de los resultados depende en gran medida de la selección precisa de los parámetros de suelo utilizados en el análisis. Errores en la estimación de estos parámetros pueden llevar a evaluaciones incorrectas de la estabilidad del talud. También presenta limitaciones en la predicción de la movilización de agua, este puede no capturar completamente los efectos de la saturación del suelo y la infiltración de la misma. Todo lo anterior, puede generar cierto sesgo hacia la seguridad del talud. En ciertos casos, el método puede ser conservador al estimar la estabilidad, lo que puede resultar en un diseño excesivamente cauteloso o costoso.

3.1.2. MÉTODOS NUMÉRICOS.

Los métodos numéricos tienen un enfoque que utiliza modelos matemáticos para representar la geometría y las propiedades del suelo. Sin embargo, su aplicación requiere la definición de propiedades del suelo y parámetros de resistencia adecuados, lo que puede ser un desafío en laderas naturales con condiciones heterogéneas.

3.1.2.1. Elementos finitos.

Bajo esta fundamentación teórica el talud infinito, permite dividir el terreno en elementos más pequeños, lo que facilita la simulación de condiciones reales. Algunos factores y parámetros relevantes en este análisis incluyen la geometría del talud, las propiedades del suelo, las cargas aplicadas y las condiciones de contorno.

Cuando estos se aplican en puntos críticos localizados, se apoya en información geológica, geotécnica e hidrológica para modelar el comportamiento mecánico de los materiales a través del software Midas GTS NX, por ejemplo. Mediante este método se han encontrado resultados más confiables frente al comportamiento real de los sitios estudiados, en comparación con los métodos basados en equilibrio límite, por lo que recomiendan el empleo de esta técnica de simulación numérica en reemplazo de los métodos convencionales, siendo una herramienta asequible y efectiva para el análisis de procesos de inestabilidad (Leguizamón y Menéndez, 2020).

Curasma & Quinto (2019), realizaron un estudio comparativo de los métodos equilibrio límite y elementos finitos en el análisis de estabilidad de ladera, llegando a una conclusión que el método de equilibrio límite es más sencillo de emplear en la práctica, aunque tiene deficiencias en su metodología de cálculo, al considerar que existe equilibrio estático en cada rebanada de la ladera y que la aceleración sísmica es constante, mientras que el método de elementos finitos es más preciso y se acerca más a la realidad por realizar discretización de masas, considerar peso propio de ladera, registros sísmicos completos y tomar en cuenta las propiedades dinámicas.

Una de las ventajas que ofrece este método en el análisis de estabilidad del talud, es el modelado detallado; permitiendo representar con precisión la geometría compleja del talud y las variaciones en las propiedades del suelo a lo largo del mismo, lo que mejora la precisión del análisis. Además, es flexible, ya que puede considerar una amplia gama de condiciones de carga, desde cargas estáticas hasta dinámicas, y evaluar su impacto en la estabilidad del talud. Otro aspecto que le puede ofrecer una ventaja a este método, es la optimización económica, ya que facilita el diseño del talud al permitir pruebas de diferentes escenarios y condiciones sin la necesidad de realizar pruebas físicas costosas.

Sin embargo, a pesar de tener bondades, también presenta una serie de desventajas, la cual se ve representada en la sensibilidad de la entrada de datos; lo que hace que los resultados puedan variar significativamente según la precisión de los datos de entrada, como las propiedades del suelo o las condiciones de contorno, lo que puede llevar a resultados no representativos si estos datos son inexactos. Así mismo los requerimientos computacionales y tiempo, puede ser intensivo, especialmente para modelos detallados o grandes, lo que puede limitar su aplicabilidad en ciertos casos. Otro aspecto que ya se mencionó es que, en general, los paquetes de software disponibles tienen en cuenta solo pequeñas deformaciones (no se trabaja para grandes deformaciones que son las que ocurren en general) Aunque el método de elementos finitos es poderoso, la validación experimental es crucial en relación a los resultados obtenidos con pruebas de laboratorio o datos de campo para garantizar su precisión y fiabilidad.

3.1.2.2. Diferencias Finitas (DDM).

El análisis bajo esta base teórica se convierte en una herramienta poderosa y ampliamente utilizada en el análisis de estabilidad del talud. Este método numérico se emplea para resolver ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento del suelo y las estructuras geotécnicas. Al aplicarlo, discretiza el área en pequeños elementos y la resolución iterativa de ecuaciones que describen el equilibrio del talud. Para comprender mejor el análisis crítico de este método en relación con los factores y parámetros que influyen en la estabilidad del talud, es crucial examinar sus ventajas y desventajas.

Algunas ventajas están basadas en la flexibilidad, es decir, que la versatilidad del método permite modelar con precisión diferentes geometrías de taludes y considerar variaciones en la topografía. Este, permite la inclusión de condiciones de frontera complejas, ya que puede manejar condiciones no lineales y variaciones en propiedades del suelo a lo largo del talud. Así mismo, por la consideración de la anisotropía y heterogeneidad del suelo, permite reflejar con mayor precisión la realidad del terreno. Otra ventaja que puede ofrecer el uso de este método, es la posibilidad de modelar cargas variables, debido a cambios estacionales o actividades humanas.

Con relación a las desventajas, es que requiere calibración y validación del modelo con datos de campo, lo que puede ser complejo y consumir tiempo. La sensibilidad a los parámetros de entrada, implica la necesidad de una cuidadosa selección y análisis de estos parámetros. Modelar problemas de taludes complejos puede requerir recursos computacionales significativos, especialmente cuando se aumenta la resolución del modelo. Aunque este

método permite cierto nivel de detalle, puede requerir simplificaciones en la representación del comportamiento del suelo debido a las limitaciones del mismo.

No considera la interacción entre bloques adyacentes, lo que puede ser una limitación en algunos casos. El análisis se vuelve complejo, por ser computacionalmente intensivos y requieren datos detallados de las propiedades del suelo y la geometría del talud. La precisión de los resultados depende en gran medida de la calidad de los datos de entrada y del modelo utilizado.

3.2. MÉTODOS DE MEDIOS DISCRETOS (MMD).

Es una herramienta fundamental en el análisis de estabilidad del talud, utilizada para evaluar y comprender la estabilidad de terrenos y estructuras. Este método se basa en la discretización del terreno en bloques o elementos, permitiendo el estudio detallado de la interacción suelo-estructura bajo diversas condiciones y cargas.

Uno de los factores clave en el análisis de estabilidad del talud es la geología del terreno. Este método tiene la capacidad de considerar la variabilidad geológica al dividir el terreno en elementos discretos, lo que facilita la representación de diferentes tipos de suelo, sus propiedades y comportamientos. Esto permite una aproximación más realista al modelar la respuesta del terreno frente a cargas externas, como la gravedad o cargas sísmicas.

La incorporación de parámetros como la cohesión del suelo, el ángulo de fricción interna, la geometría del talud y las condiciones de carga son fundamentales en el análisis de estabilidad. El método permite ajustar estos parámetros de manera más específica en diferentes zonas del terreno, lo que resulta en un análisis más detallado y preciso de la estabilidad del talud en comparación con otros métodos más simplificados.

No obstante, también presenta desventajas. Ya que la precisión del análisis depende en gran medida de la calidad y exactitud de los datos geotécnicos proporcionados. Además, la modelización detallada del terreno conlleva un aumento en la complejidad del análisis, lo que puede requerir recursos computacionales significativos y tiempo adicional para la realización del estudio.

Las ventajas, incluyen su capacidad para considerar la heterogeneidad del terreno, la flexibilidad para incorporar diferentes condiciones de carga y su potencial para simular el

comportamiento del suelo en condiciones variadas. Sin embargo, es esencial tener en cuenta las limitaciones y la necesidad de validar los resultados mediante datos de campo o pruebas de laboratorio para garantizar la precisión de las predicciones de estabilidad del talud.

3.2.1. MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS (DEM).

Recientemente aparecen los métodos de elementos discretos para modelar el comportamiento no lineal del suelo, mediante la representación de partículas individuales y su interacción, utilizando modelos matemáticos complejos, permitiendo una comprensión detallada de los fenómenos de movimiento de suelos y rocas.

Sin embargo, su aplicación puede requerir un esfuerzo computacional significativo debido a la gran cantidad de partículas a considerar. De acuerdo a lo anterior, la interpretación de los resultados puede ser compleja y requiere tener experiencia en el análisis numérico. Pero tiene una ventaja que son muy flexibles y pueden modelar con precisión la geometría compleja del talud y la variabilidad del suelo. Permiten tener en cuenta la interacción entre diferentes materiales y pueden considerar efectos como la variación de la cohesión y el ángulo de fricción a lo largo del talud. Sin embargo, requieren un nivel más alto de conocimientos técnicos y son más computacionalmente intensivos en comparación con los métodos de medios continuos.

Entre las ventajas del método, es que permite un modelado realista de la interacción partícula-partícula. Aquí se consideran las fuerzas entre partículas individuales, lo que permite capturar fenómenos como la fractura, la rotura y el deslizamiento con mayor precisión que otros métodos. Además, admite simulación de comportamiento no homogéneo, al considerar que las laderas generalmente tienen heterogeneidades en su composición, y se puede representar estas variaciones, lo que resulta en una evaluación más precisa del comportamiento real del terreno.

Por otro lado, este método permite explorar diferentes condiciones de carga, como la lluvia intensa o cambios en la carga sobre la ladera, que afectan su estabilidad. En relación a la escalabilidad; este es adaptable a diferentes escalas, desde pequeños segmentos de ladera hasta grandes extensiones, lo que lo hace versátil para diversos proyectos.

Ahora bien, con relación a las limitaciones del método en la estabilidad de laderas, las simulaciones pueden ser intensivas en recursos computacionales, especialmente para

modelos detallados o de gran escala, lo que puede limitar su aplicabilidad en ciertos contextos. Lo que hace que la representación de la realidad sea limitada, conllevando a resultados aproximados en ciertos escenarios. Este a su vez, presenta requisitos de calibración, por los parámetros utilizados y los resultados puede depender en gran medida de la precisión de estos parámetros. Otra dificultad, está en la incorporación de factores temporales, ya que su enfoque se centra más en las interacciones instantáneas.

3.2.2. MÉTODO DE DIFERENCIAS DISCRETAS (DDM).

Este es una herramienta valiosa debido a su capacidad para modelar la interacción suelo-estructura de manera detallada al dividir un talud en elementos discretos, lo que permite un análisis más preciso de las condiciones locales. Esto proporciona una comprensión profunda de la distribución de esfuerzos y deformaciones en el talud, lo que puede llevar a predicciones más precisas de su estabilidad. Además, es flexible, ya que puede considerar diferentes tipos de materiales y condiciones de carga, lo que lo hace aplicable a una amplia gama de situaciones geotécnicas.

Sin embargo, también tiene sus limitaciones. Una de las principales es la sensibilidad a la discretización del modelo y a la elección de parámetros. Pequeños cambios en la discretización pueden influir significativamente en los resultados, lo que requiere un análisis cuidadoso y una validación continua. Además, la precisión puede verse afectada por la complejidad de los fenómenos geotécnicos, como la inclusión de agua en el suelo, la presencia de estructuras cercanas o la variabilidad en las propiedades del suelo.

En cuanto a la estabilidad del talud, puede proporcionar una evaluación detallada de los factores que influyen en la estabilidad, como la geometría del talud, la cohesión del suelo, el ángulo de fricción y las cargas aplicadas. Sin embargo, su precisión depende en gran medida de la precisión con la que se modelen estos parámetros y las condiciones límite impuestas al análisis.

Es importante destacar que es una herramienta poderosa pero no infalible. Su aplicación exitosa requiere no solo una comprensión profunda de la teoría detrás del método, sino también una consideración cuidadosa de las condiciones del sitio y una validación continua con datos de campo y resultados de pruebas.

3.2.3. MÉTODO DE BLOQUES.

Este método ha sido una herramienta valiosa al considerar la estructura del suelo como una serie de bloques individuales. Aunque ofrece ventajas significativas, también presenta limitaciones que deben ser consideradas.

Una de las ventajas es que ofrece una representación simplificada pero efectiva de la estructura del suelo. Al dividir el talud en bloques, se facilita la identificación de las potenciales superficies de falla, permitiendo un análisis detallado de la estabilidad. Además, este enfoque permite considerar la variabilidad del suelo al evaluar diferentes bloques, lo que conduce a una comprensión más precisa de la estabilidad global del talud. Otra ventaja es su aplicabilidad en una variedad de condiciones geotécnicas. Puede adaptarse a diferentes tipos de suelo y geometrías de taludes, lo que lo convierte en una herramienta versátil para ingenieros y geotécnicos.

A pesar de sus ventajas, el método de bloques tiene limitaciones importantes. Una de las más destacadas es la simplificación excesiva de la realidad geotécnica. Al dividir el suelo en bloques, se ignoran ciertos aspectos complejos de la interacción suelo-estructura que podrían influir en la estabilidad del talud. Esto puede conducir a resultados inexactos o subestimaciones de los riesgos reales de falla. Además, el método puede ser sensible a la elección de los límites y la discretización de los bloques. Una mala elección de la geometría de los bloques o de las propiedades del suelo puede llevar a resultados erróneos, lo que resalta la importancia de la experiencia y el juicio ingenieril en su aplicación.

El Método de Bloques ofrece una herramienta valiosa para evaluar la estabilidad del talud, sin embargo, su aplicación requiere un enfoque crítico y equilibrado. Es esencial combinar este método con otros enfoques de análisis para obtener una evaluación más completa de la estabilidad del talud. La integración de métodos numéricos más avanzados o pruebas de campo puede complementar las limitaciones del método de bloques, mejorando la precisión de las predicciones de estabilidad.

3.3. MÉTODOS RETROSPECTIVOS.

Ahora bien, cuando se habla de los métodos retrospectivos, se hace referencia a los análisis de elementos finitos inverso, de deformación límite, de análisis de sensibilidad y métodos de taludes naturales (MTN). Estos métodos retrospectivos, se utilizan para determinar los parámetros del suelo, como la resistencia al corte, a partir de datos de campo y la observación del comportamiento de un talud inestable. Una de las limitaciones, es que utilizan algoritmos de optimización para encontrar la mejor correspondencia entre los datos observados y los resultados del modelo. Sin embargo, la precisión de los resultados depende en gran medida de la calidad y cantidad de los datos de campo disponibles.

Si bien los métodos retrospectivos pueden proporcionar una estimación razonable de los factores de seguridad, su principal limitación es que asumen una forma de superficie de falla antes de realizar el análisis. Esto puede llevar a resultados sesgados si se elige una forma de superficie de falla incorrecta o se pasa por alto una superficie de falla potencialmente crítica. Además, estos métodos asumen que el talud ha alcanzado un estado de falla estable, lo que puede no ser válido en todos los casos.

3.3.1. ELEMENTOS FINITOS INVERSO.

Este método en su análisis se centra en la determinación de las propiedades del suelo a partir de datos de campo y de laboratorio, en lugar de suponer propiedades del suelo conocidas. Esto permite obtener una representación más precisa del comportamiento del suelo y, por ende, una evaluación más precisa de la estabilidad del talud.

La ventaja del método, se basa en que considera datos reales del terreno, permitiendo un análisis más preciso de la estabilidad del talud. Al ajustar continuamente las propiedades del suelo según los datos recopilados, es más flexible para adaptarse a condiciones variables del terreno o incertidumbres en las propiedades del suelo. Al obtener propiedades del suelo más precisas, facilita la optimización de diseños, permitiendo ajustes específicos para reducir riesgos.

Sin embargo, el método de elementos finitos inverso no está exento de limitaciones, ya que la precisión del análisis depende en gran medida de la calidad y cantidad de datos recopilados, puede limitar la precisión del modelo resultante. Los cálculos en el método

pueden ser computacionalmente intensivos, lo que requiere recursos significativos en términos de potencia de procesamiento y tiempo. También es muy sensibilidad a pequeños errores en los datos de entrada o suposiciones incorrectas, lo que pueden afectar significativamente los resultados.

3.3.2. DEFORMACIÓN LÍMITE.

Este método se refiere al punto en el cual un material alcanza su máxima deformación antes de fallar. Esa deformación límite es fundamental para comprender el comportamiento de los suelos y rocas y predecir posibles deslizamientos. Este método presenta unas ventajas al considerar la deformación límite en la estabilidad del talud. Al conocer la deformación límite de un material, se puede prever con mayor precisión cuándo un talud puede experimentar fallas. Esto ayuda a tomar medidas preventivas para evitar deslizamientos.

Comprender la deformación límite es esencial al diseñar estructuras de contención, como muros de contención o sistemas de refuerzo, para garantizar que puedan resistir las presiones y deformaciones esperadas del terreno. También permite evaluar los riesgos asociados con la estabilidad del talud en diferentes condiciones, lo que resulta crucial al planificar y desarrollar proyectos de construcción en áreas con terrenos potencialmente inestables.

Por otro lado, las limitaciones, están relacionadas con los suelos y rocas que pueden tener propiedades variables, lo que dificulta predecir con precisión la deformación límite en todas las situaciones. Esto puede llevar a estimaciones erróneas de la estabilidad del talud. Los eventos como lluvias intensas, sismos u otras cargas externas pueden alterar las condiciones del suelo, afectando su deformación límite y complicando las predicciones de estabilidad. Los modelos matemáticos utilizados, pueden no capturar completamente la complejidad del comportamiento del suelo o de las rocas, lo que limita la precisión de las predicciones.

3.3.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

Este método de análisis de sensibilidad, realiza un análisis paramétrico para determinar la influencia de las diferentes medidas geotécnicas en la estabilidad del talud. Suarez (2006), plantea que de las formaciones que constituyen las laderas, no todas presentan el problema de susceptibilidad a deslizamientos con diferente grado, dado que las condiciones varían y

aun cuando contengan características similares, como la estratigrafía, el tipo de suelo o roca, el fracturamiento y si presenta precipitaciones máximas altas, entre otras, el hecho de localizarse en posición horizontal en la cima y de que la pendiente topográfica no sea pronunciada favorece a la estabilidad de estas, haciendo incluso nula la posibilidad de deslizamiento.

3.3.4. MÉTODOS DE TALUDES NATURALES (MTN).

Representan un enfoque innovador en la ingeniería geotécnica, buscando replicar la estabilidad y seguridad inherente de los taludes naturales en estructuras artificiales. Estos métodos buscan emular las características de estabilidad presentes en taludes naturales a través de técnicas que imitan las condiciones naturales del terreno.

El análisis crítico de la metodología de taludes naturales (MTN) es un tema de gran interés. Sin embargo, se considera una limitación que la efectividad de la MTN puede verse influenciada por varios factores como la geología del terreno, las condiciones climáticas, la actividad sísmica y la vegetación local. Además, la implementación exitosa de esta metodología requiere un conocimiento detallado de la topografía y la geología del área en cuestión, así como una planificación cuidadosa y la aplicación de técnicas de ingeniería adecuadas, que en ocasiones no se cuenta con dicha información.

Es importante tener en cuenta que, aunque la MTN puede ser efectiva en ciertos escenarios, no es una solución universal para todos los problemas de estabilidad en laderas. En algunos casos, pueden ser necesarias otras técnicas de estabilización, como estructuras de contención, refuerzo del suelo o drenaje adecuado. La efectividad de la metodología de taludes naturales depende de una evaluación exhaustiva de las condiciones específicas del sitio y de la aplicación cuidadosa de los principios de esta técnica. La colaboración entre geólogos, ingenieros y otros expertos es esencial para determinar la idoneidad de la MTN en un contexto particular y para garantizar la seguridad y estabilidad a largo plazo de las laderas naturales.

Finalmente, los métodos de taludes naturales (MTN), tienen una serie de aspectos importantes que deben tenerse en cuenta al aplicarlos, donde algunos de los aspectos clave a considerar son; un modelo de comportamiento del suelo que describa adecuadamente las propiedades y el comportamiento mecánico en la ladera, su elección adecuada es crucial, ya que afectará la precisión de los resultados y la capacidad para predecir la estabilidad.

Entre las ventajas, se encuentran los aspectos estéticos, ya que buscan integrarse mejor con el entorno natural, ofreciendo un aspecto estético más armonioso y menos invasivo en comparación con las estructuras de contención tradicionales. Este método ayuda en la reducción del Impacto Ambiental, al imitar la geometría y las propiedades de estabilidad de los taludes naturales, estos métodos pueden reducir el impacto ambiental al requerir menos movimiento de tierra y minimizar la alteración del paisaje.

Este método puede adaptarse a diferentes tipos de terreno y condiciones geotécnicas, lo que los hace versátiles en una variedad de entornos y situaciones. Al emular las condiciones naturales, se espera que estos métodos sean más resistentes a largo plazo, ya que se basan en principios que la naturaleza ha desarrollado durante períodos extensos.

Las limitaciones de los métodos de taludes naturales (MTN) presentan complejidad del diseño, esto requiere un profundo conocimiento de la geología y la mecánica de suelos para asegurar la estabilidad a largo plazo. Presenta costos iniciales que pueden ser más altos debido a la necesidad de estudios detallados del sitio, modelado geotécnico y técnicas especializadas de construcción. El tiempo requerido para implementar MTN puede ser mayor que el de las estructuras de contención convencionales debido a la necesidad de adaptarse a las condiciones naturales del terreno. Limitaciones en terrenos específicos, pueden no ser viables o eficaces en terrenos con características geotécnicas específicas, lo que puede limitar su aplicabilidad.

Finalmente, por tener una base teórica muy intuitiva, se debe destacar el papel que podría desempeñar la MTN en investigación aplicada y cuasi-básica en Geotecnia y complementarias con varias ramas de la Geología, tales como Geodinámica, Geohidrología, Geotectónica, Geología Estructural y Física, así como en Ingeniería Geológica, la Mecánica de Sólidos y Resistencia de Materiales.

Montoya (2009) manifiesta que el análisis de confiabilidad permite tomar en cuenta la incertidumbre asociada a los parámetros del suelo y a las cargas a la que está sometido, la incertidumbre es producto de dos factores principales; la estratigrafía y propiedades del subsuelo y las solicitaciones a la que se verá sometido.

En la tabla 12 y 13 se resumen algunas ventajas y desventajas de los métodos, análisis y bases teóricas sobre la estabilidad de taludes en laderas naturales constituidos por suelos.

Tabla 12. Ventajas y desventajas de los métodos, de medios continuos, discretos, retrospectivos y sus bases teóricas.

Métodos	Análisis	Bases Teóricas	Ventajas / Desventajas	
Medios Continuo	Equilibrio Limite	Cuñas (Caídas de Rocas)	Ventajas: 1. Proporciona una representación detallada del comportamiento del talud. 2. Permite el análisis de diferentes condiciones de carga y geometrías complejas. 3. Puede considerar la variación de las propiedades del suelo en profundidad. Desventajas: 1. Requiere suposiciones simplificadoras, como la linealidad elástica del suelo. 2. Los cálculos son computacionalmente intensivos y requieren software especializado. 3. No es adecuado para el análisis de taludes con discontinuidades importantes.	
		Talud Infinito		
		Espiral Logarítmica		
		Fellenius		
		Falla Circular		
		Janbú		
		Tabla de Janbú		
		Bishop Simplificado		
		Spencer		
		Morgenstern-Price		
Medios Discretos	Método de Elementos Discretos (DEM)	Representación de partículas individuales y su interacción	Ventajas: 1. Permite la representación de discontinuidades y condiciones geométricas complejas. 2. Considera la interacción entre los diferentes elementos discretos del talud. 3. Puede simular la propagación de fallas y caídas de bloques. Desventajas: 1. Requiere la asignación de propiedades y características a cada elemento discreto. 2. Los cálculos pueden ser computacionalmente intensivos y requerir software especializado. 3. No proporciona una descripción continua del comportamiento del talud.	
		Método de Diferencias Discretas (DDM)		Enfoque de partículas discretas
		Método de Bloques		Divide el talud en bloques discretos
Medios Retrospectivos	Elementos Finitos Inverso	Análisis por elementos finitos para modelar el comportamiento del talud	Ventajas: 1. Puede ser más rápido y más simple que los métodos continuos.	

Métodos	Análisis	Bases Teóricas	Ventajas / Desventajas
	Deformación Límite	Teoría de la deformación límite para determinar los factores de seguridad de los taludes	2. Útil para evaluar rápidamente la seguridad de un talud existente. 3. No requiere una descripción detallada de la geometría y las condiciones de carga.
	Análisis de Sensibilidad	Analiza la influencia de los diferentes parámetros geotécnicos en la estabilidad del talud	Desventajas: 1. No proporciona una comprensión completa del comportamiento del talud. 2. No considera la distribución de esfuerzos y deformaciones en el talud.
	Métodos de Taludes Naturales (MTN)	Analiza el comportamiento del talud a partir de la topografía y la geología.	3. La incertidumbre en la estimación de los parámetros de resistencia puede afectar los resultados.

Fuente (Elaboración propia)

Tabla 13. Resumen algunas bases teóricas y sus ventajas/desventajas para análisis de estabilidad de taludes.

BASE TEÓRICA	SUPERFICIE DE FALLA	EQUILIBRIO	VENTAJAS / DESVENTAJAS
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero, reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobre determinada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobre determinada 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.

BASE TEÓRICA	SUPERFICIE DE FALLA	EQUILIBRIO	VENTAJAS / DESVENTAJAS
Spencer (1967)	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo con una función arbitraria.
Elementos Finitos	Cualquier forma de superficie de falla	Análisis esfuerzos y deformaciones	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral logarítmica	Espiral logarítmica	Momentos y fuerzas	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio

Fuente (Elaboración propia)

3.4. CRITERIO DE ROTURA DE HOEK & BROWN

Los macizos rocosos son esencialmente medios heterogéneos, discontinuos y anisótropos, cuya discontinuidad empieza a escala de las microfisuras en y entre los granos minerales de la roca y se extiende, a escala macroscópica, a varios tipos de fracturas y fallas. Los ensayos de laboratorio se limitan a analizar muestras de dimensiones reducidas que no reflejan, por lo general, el comportamiento del macizo rocoso. Únicamente se podrían extrapolar los resultados obtenidos en laboratorio al campo, cuando los macizos rocosos son de muy buena calidad. En el resto de los casos hay que aplicar unos coeficientes de minoración.

Si se considera un macizo rocoso a medida que el tamaño de la muestra aumenta, se van representando muestras pertenecientes a la roca intacta, y al macizo rocoso. Estas muestras proporcionarían, sometidas a ensayos similares, diferentes resultados en cuanto a comportamiento, como consecuencia de lo que se conoce como "efecto de escala" (Pinto, 1993). Por lo tanto, es inevitable tener en cuenta este efecto de escala a la hora de seleccionar adecuadamente los parámetros del macizo rocoso. Esto significa que, en la medida en que se tenga en cuenta un volumen mayor del terreno que se estudia alrededor de una excavación, resultará que la muestra contendrá un mayor número de

discontinuidades. Si el volumen de la muestra es suficientemente grande sus discontinuidades serán las mismas que las que aparecen en el macizo. En estas circunstancias, las propiedades mecánicas de las muestras serán también las mismas que las del terreno.

El criterio de Hoek & Brown es aplicable, según Hoek (1983), para resolver los problemas de la estabilidad de taludes y el comportamiento elasto-plástico de la excavación de túneles, en el caso de que la roca sea del tipo: "roca intacta", "roca diaclasada" y "macizo rocoso". Estos tipos pueden ser considerados como homogéneos e isótropos.

Los parámetros del criterio de rotura de Hoek & Brown, entre otros factores, no dependen del tamaño de los bloques, de apertura de discontinuidades, del espaciamiento entre discontinuidades y de la orientación de discontinuidades. Las consideraciones de estos tres factores influyentes se deberían tener en cuenta en el momento de decidir si aplicar el criterio de Hoek & Brown o no.

Los primeros estudios sobre dilatación se efectuaron para suelos granulares (Reynolds, 1885) que ha descrito este fenómeno como la razón entre el cambio de volumen asociado en un elemento del material y la distorsión angular. Posteriormente Bent Hansen (1958) volvió a tratar el concepto del ángulo de dilatación cuyo seno se define como la relación entre el incremento de la deformación volumétrica plástica y el incremento de la deformación cortante plástica. Critescu (1982) ha definido la dilatación como una propiedad mecánica de las rocas que se manifiesta para presiones de confinamiento bajas, aumentando su afección con la deformación principal en la fase previa a la rotura (flujo plástico), y propone su cuantificación mediante el ángulo de dilatación.

Vermer & De Borst (1984) y Ogawa (1986) han propuesto expresiones para obtener el ángulo de dilatación a partir de los ensayos triaxiales, que son los ensayos a pequeña escala que permiten evaluar la influencia que tienen sobre la dilatación algunos de los parámetros geotécnicos y tensodeformacionales, pero teniendo en cuenta la influencia de la presión de confinamiento sobre este parámetro. A partir de estos ensayos se ha comprobado como la deformación volumétrica plástica que se produce a lo largo de la trayectoria de cargas depende de las tensiones. Los valores del ángulo de dilatación obtenidos por parte de estos autores han sido inferiores al ángulo de rozamiento y aproximadamente del orden de la mitad del ángulo de rozamiento. La dilatación depende de la tensión de confinamiento, del nivel de deformación plástica y de la escala de tal forma que aumentando los valores de estos tres parámetros aumenta la dilatación

4. PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIONES SOBRE LA ESTABILIDAD DE TALUDES, APLICADOS A LADERAS NATURALES.

Aquí, se identifican las perspectivas y futuros desarrollos que podrían mejorar la precisión y eficiencia de los métodos existentes. En última instancia, se espera que estas perspectivas contribuyan al avance y la mejora de la estabilidad de taludes, en laderas naturales.

Desarrollar modelos más precisos y realistas para predecir el comportamiento de los taludes. La integración de la topografía, la geología, la hidrología y otros factores en modelos de simulación más sofisticados puede proporcionar una mejor comprensión de los procesos que afectan la estabilidad de las laderas.

Se debe profundizar en las investigaciones que permitan utilizar tecnologías avanzadas, como sensores remotos, imágenes satelitales, drones y técnicas de teledetección, para monitorear de manera continua y en tiempo real los cambios en las laderas. Esto podría ayudar a detectar signos tempranos de inestabilidad y comprender mejor la evolución de los procesos geológicos.

Investigar cómo el cambio climático afecta la estabilidad de las laderas naturales. El aumento de la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, como lluvias intensas o sequías, podría tener un impacto significativo en la estabilidad de los taludes.

Las investigaciones futuras deberían estar basadas en desarrollar y perfeccionar técnicas de estabilización de taludes que sean más efectivas, sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Esto podría incluir métodos de bioingeniería, como la revegetación y el uso de materiales naturales, junto con técnicas de ingeniería civil tradicionales.

Profundizar en la mejora de las metodologías para evaluar y gestionar los riesgos asociados con la inestabilidad de las laderas. Esto podría incluir la identificación de áreas de alto riesgo, la evaluación de la vulnerabilidad de las comunidades cercanas y el desarrollo de estrategias de mitigación.

Se plantean investigaciones futuras encaminadas a comprender mejor cómo las estructuras humanas, como edificios o carreteras, interactúan con las laderas y cómo estas interacciones pueden afectar la estabilidad de los taludes.

También se proponen investigaciones relacionadas con técnicas de análisis de big data y machine Learning para procesar grandes conjuntos de datos geotécnicos e históricos y así identificar patrones y tendencias que puedan ayudar a predecir la estabilidad de los taludes con mayor precisión.

Como líneas futuras de investigación se tiene: profundizar en el control de succión en suelos no saturados, así como estudiar el comportamiento hidromecánico de estos suelos asociados a los cambios de succión y esfuerzo, a partir de estas investigaciones se puede crear un marco conceptual accesible para los ingenieros geotécnicos en la práctica de las obras de las vías terrestres. Actualmente, la investigación profundiza el desarrollo de una base teórica con nuevos conocimientos del comportamiento resistente, deformación e hidráulico de estos suelos. La línea de investigación se llevaría a cabo a través de diferentes procedimientos:

- a. Observación directa del comportamiento del suelo o construcciones cimentadas sobre ellos, mediante instrumentación y ensayos de campo, determinándose los parámetros necesarios para los análisis.
- b. Realización de ensayos en laboratorio, procurando reproducir los fenómenos reales y analizando la influencia de determinados parámetros del suelo en su comportamiento.
- c. Elaboración de modelos generales de comportamiento que permitan predecir, con cierta fiabilidad y a partir del menor número posible de parámetros obtenidos en laboratorio, la respuesta del suelo a las sollicitaciones a las que se vea sometido.

La relación entre estos procedimientos es clave, ya que es necesario que los resultados de los modelos constitutivos llenen los vacíos existentes en estas áreas del conocimiento y reproduzcan fielmente el comportamiento real en campo o en laboratorio.

Se ha presentado un modelo reducido basado en el concepto de macroelemento para analizar zonas potenciales de rotura a una escala que supera la capacidad computacional de los análisis numéricos basados en problemas de contorno. El modelo se basa en una envolvente plástica expresada en términos de fuerzas que se define a partir del criterio a rotura por corte de Mohr -Coulomb y que hace intervenir el peso de la cuña a rotura como variable de historia. El modelo se ha aplicado al caso de roturas planas bidimensionales en laderas cuya geometría se define por segmentos y con nivel de agua variable. Los resultados se comparan favorablemente con los obtenidos por un cálculo elementos finitos. Estos

resultados preliminares permiten considerar futuros desarrollos orientados a la inclusión de superficie de rotura no planar, momentos y rotación en las variables de control y de modelos tridimensionales.

También se deben plantear iniciativas de investigación que permitan superar las limitaciones en la representación de la realidad: por ejemplo; los métodos de medios continuos actualmente no capturan la variabilidad espacial y las heterogeneidades presentes en las laderas naturales. De igual manera en la actualidad se pueden observar en este tipo de métodos, simplificaciones excesivas; al suponer un comportamiento homogéneo del suelo, pasando por alto fenómenos locales importantes, como la presencia de capas delgadas con propiedades distintas. Las investigaciones futuras deben contribuir a mejorar la precisión limitada; si consideramos que los métodos de medios continuos, en muchas ocasiones, pueden no ser precisos para determinar la estabilidad en condiciones geotécnicas complejas o para analizar situaciones con movimientos locales y discontinuidades.

Es importante explorar sobre los nuevos desafíos relacionados con los métodos discretos, ya que estos requieren mayor complejidad y esfuerzo computacional, en el modelado y pueden ser computacionalmente intensivos. Con esto lo que se busca es reducir el requerimiento de datos detallados, para una modelización precisa sobre la geometría de las discontinuidades y las propiedades del suelo. Estas nuevas perspectivas de investigación contribuyen a mejorar las limitaciones en el análisis global, ya que en la actualidad estos métodos se centran más en el análisis local y pueden no proporcionar una visión general completa de la estabilidad del talud.

Ahora bien, con relación a los métodos retrospectivos, las futuras investigaciones deben estar enfocada a mejorar la dependencia de datos de calidad, si se tiene en cuenta que la precisión de los resultados depende en gran medida de la calidad y cantidad de los datos de campo disponibles. También se debe centrar en reducir la complejidad y esfuerzo computacionales para realizar las simulaciones.

Entre las perspectivas más importante esta impulsar investigaciones que permitan el fortalecimiento del talento humano para superar el desafío en la interpretación de los resultados retrospectivos, para que sigan siendo compleja y subjetiva en comparación con otros métodos. Es esencial tener en cuenta las limitaciones y suposiciones inherentes a esta metodología de talud naturales, como la variabilidad del terreno y la incertidumbre en los datos de entrada.

Se destaca que se debe seguir investigando y dotar de elementos tecnológicos la MTN, ya que es una herramienta valiosa para la evaluación de la estabilidad de laderas naturales, pero su aplicación efectiva requiere un enfoque cuidadoso y una comprensión profunda de las condiciones del sitio para obtener resultados precisos y confiables. Además, se introducen modelos físicos fuertes que le den respaldo a los resultados que se obtienen.

También se plantean investigaciones donde se plantea el uso de nuevos materiales como la mezcla de fibras sintéticas con suelo, para aumentar la cohesión y la resistencia al esfuerzo cortante del material del talud, reduciendo la probabilidad de falla por erosión. En el contexto de los suelos blandos con bajas propiedades mecánicas, un adecuado contenido de fibras de polietileno tereftalato PET, lo que provocaría el aumento del módulo de elasticidad y una menor disminución en el módulo de rigidez dinámica por acción de cargas cíclicas, lo cual repercute en un mejor comportamiento sísmico de los taludes reduciendo los deslizamientos superficiales (Gray y Al-Refeai, 1986).

Carrillo - Vega (2019) sustenta los beneficios del refuerzo de suelo-fibra y argumentan que puede ser utilizado en la protección y reparación superficial de taludes en suelos finos para disminuir su potencial de agrietamiento, aumentar la rigidez y la resistencia al corte. Además, los suelos mezclados con fibras distribuidas al azar se pueden usar en la reparación localizada de taludes con fallas incipientes, ya que se puede acomodar a la forma irregular de las pendientes fallidas.

Otro desafío que hay que superar con las nuevas perspectivas de investigación es el movimiento masivo de tierras (reducción de la pendiente) y aumentar el factor de seguridad para la estabilidad global mediante la aplicación de geomallas y geomantos ayudando a la revegetación de la ladera, mediante la siembra de césped en semilla sobre una capa de suelo vegetal que se puede colocar sobre un conglomerado.

Por otro lado, con respecto a la estabilidad de taludes naturales en rocas hay que estudiar más sobre las superficies reales de falla para materiales dilatantes de Hoek & Brown. Ya que la dilatación es un factor que interviene de una forma directa en los resultados que se obtienen.

5. CONCLUSIONES

Los métodos numéricos, especialmente el método de elementos finitos, han demostrado ser aplicables a varias condiciones, dando resultados favorables y similares a los obtenidos por métodos tradicionales; tomando en consideración la interacción suelo-estructura.

Los métodos computacionales arrojan valores más conservadores y muestran la necesidad del desarrollo de medidas preventivas, por lo cual se considera más adecuado trabajar el talud utilizando programas que nos permitan dar estas soluciones, tales como SLIDE, GEO-SLOPE, GEO5, GALENA, PHASES2, PLAXIS, ANSYS, SOIL-VISION, entre otros, siendo más efectivo para los factores de seguridad. La utilización de software especializado en el análisis de estabilidad de taludes permite observar de forma más clara y sencilla la interacción entre el factor de seguridad calculado por cada uno de los métodos (Fellenius, Bishop Simplificado y Janbú Simplificado) y las superficies de falla distribuidas en toda la masa de suelo.

La MTN ha demostrado ser una técnica valiosa para evaluar la estabilidad de laderas naturales, utilizando las características geotécnicas del terreno y minimizando la intervención humana. Además, se ha observado que la MTN puede proporcionar resultados precisos cuando se aplican correctamente, considerando factores como la topografía, geología, hidrología y condiciones climáticas específicas del área en estudio.

No hay una metodología única que sea aplicable universalmente a todos los casos debido a la complejidad inherente de las condiciones geológicas y ambientales. Sin embargo, se ha reconocido que un enfoque integral que combine la observación de campo, el mapeo detallado de la geología y la geomorfología, análisis geotécnicos y modelos numéricos puede proporcionar una evaluación más precisa de la estabilidad de los taludes naturales.

Otro de los factores más importantes en el análisis de la estabilidad de pendientes es el efecto de la infiltración del agua. Este proceso genera un cambio en el estado tensorial en la pendiente modificando las propiedades del suelo, especialmente la permeabilidad cambiando las propiedades del flujo del agua.

6. RECOMENDACIONES

Se debe considerar que al momento de tomar muestras o datos geotécnicos se debe tener una mayor precisión para mejorar los métodos sin importar si se va a trabajar por software o de manera manual a través de Excel.

Elaboración de modelos generales de comportamiento que permitan predecir, con cierta fiabilidad y a partir del menor número posible de parámetros obtenidos en laboratorio, la respuesta del suelo a las sollicitaciones a las que se vea sometido. La relación entre estos procedimientos es clave, ya que es necesario que los resultados de los modelos constitutivos reproduzcan fielmente el comportamiento real en campo o en laboratorio.

Se debe determinar los factores de riesgo que se puedan estar presentando al momento de estudiar la estabilidad de un talud aplicado a laderas naturales, ya que, al tener factores de seguridad inestables, pueden generar deslizamientos en cualquier momento y afectar la población ubicada cerca de la zona de la ladera.

7. BIBLIOGRAFÍA

Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., Boyce, G. M. (1996): Slope stability and stabilization methods. John Wiley, New York.

Aliaga (2023). Ceniza de carbón vegetal en la estabilización de suelos arcillosos aplicado a subrasantes, Provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020. Tesis de pregrado de Ingeniero Civil. Huancayo – Perú.

Alonso, E. (1989). Análisis de la estabilidad de taludes y laderas naturales. Sociedad Española de la Geomorfología, 97-118.

Alonso, E. (2005). Estabilidad de Taludes. Universitat Politècnica de Catalunya.

Alter, A. J. (1970). Environmental health experiences in disaster. American Journal of Public Health and the Nations Health, 60 (3), 475-480

Amaral C., Vargas E. and Krauter E. (1996) “Analysis of Río de Janeiro landslide Inventory data” Seventh international symposium on landslides Trondheim Norway. pp 1843-1846.

Arévalo, D., & Parias, J. (2013). Análisis de amenaza por fenómenos de remoción en masa en la región del boquerón ubicada entre los departamentos de Cundinamarca y Tolima mediante el uso de un sistema de información geográfica de libre distribución [Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/931>

Ashford, S. and Sitar, N. (1997). Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff. Bulletin of the Seismological Society of America 87(3), 692–700

Atterberg, A. (1911). Bariumsulfat–eine plastische Substanz. Angewandte Chemie, 24(20), 928-929.

Atkinson J.H. y Potts, D.M. (1975). A not associated field solutions boundary value problem in a variable, variable vs soil, Geotechnique. Vol. 25 No.2. pp 379-284.

Ayala-García, J., & Ospino-Ramos, K. (2023). Desastres naturales en Colombia: un análisis regional. Documento sobre economía regional y urbana; No. 317.

Azorín C. R. (2014). Análisis de Estabilidad de Taludes mediante técnicas de modelación numérica en 3D utilizando Plaxis 3D Foundation. Tesis de pregrado de Ingeniero Civil. Cuba, Villa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Disponible en: <http://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/2544>

Barnes, G.E. (1991), "A simplified version of the Bishop and Morgenstern Slope-Stability Charts", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 28, No.4, pp. 630-632.

Benko B., Stead D. (1993). "The characterization and prediction of landslide movements using numerical modelling techniques". Seventh international conference and field workshop on landslides in Czech and Slovak Republics, pp. 131-136.

Bishop A.W. (1955). "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes". Geotechnique. Vol 5.

Bishop A.W., Morgenstern N. (1960). "Stability Coefficients for Earth Slopes". Geotechnique Vol 10, No. 4.

Bloom, A. L. (1991). Geomorphology: A Systematic Analysis of Late Cenozoic Landforms. New Jersey: 532 p.

Carrillo Vega, C. M. (2019). Estudio de la inclusión de fibras Pet. en el reforzamiento de suelos cohesivos para terraplenes de obras viales, La Libertad 2018 -2019.

Charles, J.A. y Soares M.M., (1984). "Stability of compacted rockfill slopes", Geotechnique, Vol. 34, No.1, pp. 61-70.

Chen, WF., Giger M.W., (1971). "Limit analysis of slopes", Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE, Vol. 97, No. SM-1, January, pp.19-26.

Clough, R.W., Woodward R.J., (1967). "Analysis of Embankment Stresses and deformations". Journal of geotechnical division, ASCE, July, pp 529-549.

Collin, A. (1846). Recherches expérimentales sur les glissements des terrains argileux. Carilian- Goeury et Dalmont, Paris. Conference on soil mechanic and foundation engineering, Caracas, Vol. 2, p.p. 243 – 254.

Corrales, C. (2 de Abril de 2013). Análisis retrospectivo del deslizamiento barrio la sultana. Obtenido de [https://estabilidad-de-taludes7.webnode.es/news/marco-teorico/Coulomb\(1776\)](https://estabilidad-de-taludes7.webnode.es/news/marco-teorico/Coulomb(1776)),

Coulomb, C.A., (1776). Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs al architecture. Mem. Math. Phys. Acad. R. Sci., 7, 343-382.

Cousin, B.F., (1978), “Stability charts for simple earth slopes”, Journal of Geotechnical division, ASCE, Vol. 104, No. GT-2, February, pp. 267-279.

Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres – CRED. (2020), Base de Datos Internacional sobre Desastres EM-DAT [en línea] <https://www.emdat.be/>.

Cruz, E. (2013). diagnóstico de estabilidad de taludes en la localidad de usme a través de los sistemas de información geográfica de libre distribución. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/849/2/Diagn%C3%B3sti...pdf>

Curasma Crispín, N. A., & Quinto Soriano, R. G. (2019). Estudio comparativo entre el método de equilibrio límite y elementos finitos en el análisis de estabilidad de ladera en el sector Heramocco-Comunidad de Sacsamarca-2019.

De Matteis, A. (2003). Geología y geotecnia: Estabilidad de Taludes. Universidad Nacional De Rosario

Departamento Nacional de Planeación de Colombia – DNP. (2014). “3.181 muertos y 12,3 millones de afectados: las cifras de desastres naturales entre 2006 y 2014,” pp. 1. [Online]. Available: <https://www.dnp.gov.co/Paginas/3-181-muertos,-21-594-emergencias-y-12,3-millones-deafectados-las-cifras-de-los-desastres-naturales-entre-2006-y-2014-.aspx>.

Departamento Nacional de Planeación de Colombia - DNP. (2019). Índice Municipal de Riesgo de Desastres Ajustado por Capacidades. Departamento Nacional de Planeación. Bogotá D.C., Colombia.
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/IndicemunicipalRiesgos.pdf>

Departamento Nacional de Planeación de Colombia - DNP. (2021). CONPES 4058: Política Pública para Reducir las Condiciones de Riesgo de Desastres y Adaptarse a los Fenómenos de Variabilidad Climática.

Duncan J.M., Wright S. G. (2005). "Soil Strength and Slope Stability". John Wiley and Sons. Inc. Hoboken. New Jersey 297p.

Duque Ríos, M. E. (2017). Plan para Repotenciación y mejoramiento del laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad San Francisco de Quito (Bachelor's thesis, Quito: USFQ, 2017).

Eckstein, D. Hutfils, M.-L. and Maik, W. (2019). "Global Climate Risk Index" pp. 28–35, 2018. [Online]. Available: [https://www.germanwatch.org/sites/germanwatch.org/files/Global Climate Risk Index 2019_2.pdf](https://www.germanwatch.org/sites/germanwatch.org/files/Global%20Climate%20Risk%20Index%202019_2.pdf).

Falorca, I. M. C. F. G., & Pinto, M. I. M. (2011). Effect of short, randomly distributed polypropylene microfibres on shear strength behaviour of soils. *Geosynthetics International*, 18(1), 2-11.

Fellenius (1936). "Calculation of the Stability of Earth Dams". Proc. 2nd int. Congress on Large Dams. Vol. 4, pp. 445-463.

Feng, S., & Liu, H. N. (2020). Análisis analítico de los efectos mecánicos e hidrológicos de la vegetación sobre la estabilidad de taludes poco profundos. *Elsevier, Computadoras y geotecnia*, 118, 103-335. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103335>.

Freddlund D.G. y Krahn J. (1977). "Comparison of slope stability methods of analysis", *Canadian geotechnical Journal*, Vol. 14, pp. 429-439

Gallardo A., R. J., Guerrero B., T. E. y Macgregor T., A. A. (2013). "Investigación Geotécnica para la estabilización de las laderas del Barrio San Fermín, municipio de Ocaña, departamento de Norte de Santander (Colombia)". *Revista INGECUC*, Vol. 9, No. 2.

Gerscovich, D. (2015). Estabilidad de taludes. (M. García, Trad.) Bogotá, Colombia: Lemoine Editores.

Gibson, M., and Morgenstern N.R. (1962). "A note on the stability of cuttings in normally consolidated clays", *Geotechnique*, Vol. 12, No. 3, pp. 212-216.

González Silva, F. B. (2023). Zonificación de la amenaza por movimientos en masa disparados por lluvias en el barrio San Luis de Miravalle, parroquia la Ferroviaria, suroriente del distrito metropolitano de Quito (Bachelor's thesis, Quito: EPN, 2023.).

Granados, A. (2006). Estabilización de talud Zona del Distrito de Barranco. Lima. (Tesis de grado). Pontifica Universidad Católica del Perú.

Grange S., Kotronis P., and Mazars J. (2009). A macro-element to simulate 3D soil-structure interaction considering plasticity and uplift. *International Journal of Solids and Structures*, 46(20):3651-3663.

Gray, D. H., Al-Refeai, T. O. (1986). "Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand". *Journal of Geotechnical Engineering ASCE* 112(8): 804-820. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:8\(804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:8(804)).

Gurruchaga, R. Daniela;, and Viscarra A. Fabiana. (2020). "Análisis De Estabilidad De Taludes Hoek , E y Bray, J.W. (1977). "Rock Slope Engineering" The Institution of Mining and Metallurgy, Londres. Segunda Edición revisada.

Hoek, E. y Bray, JW. (1981). *Rock slope engineering*. The Institution of mining and metallurgy

Hunter, J.H., Schuster R.L. (1968), "Stability of simple cuttings in normally consolidated clays", *Geotechnique*, Vol. 18, No. 3, pp. 373-378.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2017). Análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático en Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2023). Informe en conjunto con el Unidad Nacional de Gestión del Riesgo y Desastres-UNGRD del 15 de junio, los departamentos más afectados en Colombia por deslizamientos de tierra. <https://www.radionacional.co/actualidad/medio-ambiente/riesgo-de-derrumbes-en-antioquia-choco-y-cauca-informate-aqui>.

Janbú, N. (1968). "Slope stability computations". Soil mechanics and foundation engineering report. Technical University of Norway, Trondheim.

Janbú, N. (1973). Slope Stability Computation, Embankment- Dam Engineering: Casagrande Volume; John Wiley & Sons: New York, NY, USA: pp. 47–86.

Jiménez, G. y Viáfara, J. (2011). Análisis 3D de drenes horizontales para la estabilización de taludes. Repositorio Institucional Pontificia Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7305/tesis507.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Jin Z., Yin Z-Y, Kotronis P., Li Z. and Tamagnini C. (2019). A hypoplastic macroelement model for a caisson foundation in sand under monotonic and cyclic loadings. *Marine Structures*, 66, 2019, 16-26.

Kenney, T. C. (1959). Discussion of "Geotechnical Properties of Glacial Lake Clays," by T. H. Wu, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 85, No. SM3, pp. 67-79.

Kjekstad, O. and Highland, L. (2009). "Economic and Social Impacts of Landslides," in *Landslides - Disaster Risk Reduction*. S. Kyoji P. and Canuti, P. (Eds). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 573–587. [Online]. Doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_30.

Leguizamón L. C. Barreto and Menéndez Téllez J. J.. (2020). "Analysis of Slope Instability Processes Through Comparison of Limit Equilibrium and Finite Element Methods," *Revista Ingeniería Solidaria*, Vol. 16, No. 1. Doi: <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2020.01.03>

León, C. y Gonzales, O. (2013). Análisis cuantitativo de la estabilidad en taludes y laderas (tesis de pregrado). Universidad de las Californias Internacional, Tijuana, Baja California.

Li Z., Kotronis P. & Escoffier S. 2014. Numerical study of the 3D failure envelope of a single pile in sand. *Computers and Geotechnics*, 62:11–26.

Linares, V. M. (2020). Análisis Comparativo de Estabilidad de Taludes Usando Metodologías Gráficas, Numéricas y de Equilibrio Límite. Tesis de posgrado – Especialización en Ingeniería de Pavimentos. Universidad Militar Nueva Granada. 1-95 p. Bogotá.

Mizutori, M., & Guha-Sapir, D. (2019). Pérdidas económicas, pobreza y desastres 1998-2017. EIRD. <https://www.eird.org/americas/docs/perdidas-economicas-pobreza-y-desastres.pdf>

Montejo Fonseca, A. (2010). Ingeniería de Pavimentos: Evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías. Bogotá, D.C.: Universidad Católica de Colombia

Montoya, A. (2009). Confiabilidad en Estabilidad de taludes. México (Tesis de Maestro). Universidad Nacional Autónoma de México.

Mora S and Vahrson, W. (1993). "Macrozonation methodology for landslide hazard determination", Bull. Intl. Ass. Eng. Geology.

Morales, J. (2000). Análisis y Diseño de Taludes Mediante Método Computacional. Lima (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería.

Morgenstern, N.R. & Price, V.E. (1965). The analysis of the stability of general Slip Surfaces. London: Geotechnique, 15, 77–93.

Mostajo, J. (2002) Estudio de probabilidad de falla e implementación de alternativas de solución al deslizamiento de taludes Andinos, Lima (Tesis de pregrado) . Universidad Ricardo Palma

Mylonakis G. and Gazetas G. 2000. Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental, Journal of Earthquake Engineering, 4(3):277-301.

Nova, R. and Montrasio, L. (1991). A complete three-dimensional failure envelope for shallow footings on sand. Géotechnique, 41:243–256.

Núñez, N. A. (2018). Riesgo sísmico en la estabilidad de taludes de la comunidad urbana autogestionaria de Huaycén Zona "S" y "X" 2018. Universidad César Vallejo, Lima, Perú.

O'Connor, M.J., Mitchell, (1977). "An extension of the Bishop and Morgenstern slope stability charts" Canadian Geotechnical Journal. Vol. 14 No.1 pp. 144-151.

Ocampo López, O. L., Vélez Upegui, J. J., Marín Salazar, J. P., & Forero Hernández, A. T. (2020). Análisis de tendencias climáticas con RCLindex en el departamento de Caldas,

Colombia. Scientia et Technica, 25(4), 595–603.
<https://doi.org/10.22517/23447214.22771>.

Oliva G., A. O. (2015). Estabilidad de taludes y laderas. Análisis cualitativo y cuantitativo. Grupo Iteico Euroamericano. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/324507337_Estabilidad_de_taludes_y_laderas_Analisis_cuantitativo_y_cualitativo.

Olivera B. (2009). Estructuración de Vías Terrestres. 1- 11 p. México.

Ortiz, T.D. (2019). Análisis de estabilidad de taludes de la zona ‘Los Baluartes’ en el Parque Arqueológico de Saqsayhuamán. Yachay - Revista Científico Cultural, 7(1), 322-333. Osorio, S. (2010). Apuntes de Geotecnia con Énfasis en Laderas.

Pérez de Ágreda, E. A. (2005). Estabilidad de taludes. Departamento de ingeniería del terrano, cartografía y geofísica. Universidad Politécnica de Catalunya

Petterson, K.E. (1955). “The early history of circular sliding surfaces”, Geotechnique 5(4), 275.296.

Poulos H.G. y Davis G.H. (1974). Elastic solution for soil and rock techniques Wiley. New York

Rendulic, L., 1937. “Ein Grundgesetz der Tonmechanik und sein experimenteller Beweis” (“A fundamental law of clay mechanics and its experimental verification”). Bauingenieur, 18:459-467.

Reyes, P. (2015). Análisis Tridimensional de Estabilidad de Taludes por el Método de Equilibrio Límite de Depósitos de Desmonte de Mina (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Rico, A. y Del Castillo, H. (1976). La ingeniería de suelos en las vías terrestres, No. 1, Limusa, México.

Rodríguez Solís, D. D. (2023). Análisis de alternativas y rediseño de pavimento flexible y rígido por el método AASHTO 93 de la calle Hernán Malo para 10 años (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).

Sahueza, C., & Rodríguez. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la construcción*, 12(1), 17 - 29. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rconst/v12n1/art03.pdf>

Salciarini D and Tamagnini, C. (2009). A hypoplastic macroelement model for shallow foundations under monotonic and cyclic loads. *Acta Geotechnica*, 4:163-176.

Sarma, S.K. (1973). "Stability analysis of embankments and slopes", *Geotechnique*, 23(3), 423-433.

Shuk (1990). "Implicaciones de las diferencias entre Microgeotecnia y Macrogeotecnia en la enseñanza de la Geotecnia". *Memorias de las Sextas Jornadas Geotecnia – Sociedad Colombiana de Ingenieros*, Bogotá.

Skempton y Hutchinson (1969). "Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations" *Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. & Foundn. Engrg. México. State of the Art Vol.* pp. 291 -340.

Soeters, R. & Van Westen, C. J. (1996). Chapter 8: Slope instability recognition, analysis, and zonation. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247 (pp. 129-177). National Academy Press. <https://trid.trb.org/view/462506>.

Spencer, E. (1967). *Method of Analysis of The Stability if Embankments Assuming parallel inter-slice forces*. *Geotechnique*.

Suarez Díaz, J. (2002). *Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales*, cap. 4.

Suarez Díaz, J. (2011). *Deslizamientos. Análisis Geotécnico*

Suarez J. (Agosto de 2013). *Deslizamientos*. Obtenido de <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Estabilidad%20de%20Taludes.pdf>

Suarez, J (2009). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zona tropicales*. Colombia. Ediciones Universidad Industrial de Santander

Suárez, J. (1998). Capítulo 1: Caracterización de los Movimientos. En *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. (p. 2). Instituto de Investigaciones sobre Erosión y deslizamientos.

Suarez, O. (2006). Susceptibilidad a deslizamiento de laderas en la Sierra Madre Oriental. México (Tesis de Maestro). Universidad Autónoma de México

Taylor, D.W. (1948). Fundamentals of soil mechanics. Wiley, New York.

Terzaghi, K. y Peck R.B. (1967). "Soil Mechanics in Engineering Practice". New York: Wiley

Unidad Nacional de Gestión del Riesgo y Desastres - UNGRD. (2022). Consolidado Anual de Emergencias. Recuperado de <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Consolidado-Atencion-de-Emergencias.aspx>.

Unidad Nacional de Gestión del Riesgo y Desastres -UNGRD. (2023). Informe en conjunto con el IDEAM del 15 de junio, reporte de 286 municipios del país en alerta por derrumbes. <https://www.radionacional.co/actualidad/medio-ambiente/riesgo-de-derrumbes-en-antioquia-choco-y-cauca-informate-aqui>.

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia. (2016). "Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres 2015-2025," pp. 106–107. [Online]. Available: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/756/PNGRD-2016.pdf?sequence=27&isAllowed=y>.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction - UNDRR, 2021. "International Cooperation in Disaster Risk Reduction", United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Obtenido de:<https://www.undrr.org/media/74265/download?startDownload=true>.

Vargas, G. (2000). Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa. Boletín de Geología, 22(37), 39 - 67. doi:10.18273/revbol

Vargas, M. (1982). Estabilidad de Taludes. I Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Santafé de Bogotá.

Varnes, D. J. (1978). "Slope movement types and processes," Special report 176: Landslides: Analysis and control. Schuster R.L. and Krizek, R.J. (Eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-33.

Wallemacq, P. & House, R. (2018). Economic losses, poverty & disasters: 1998-2017. CRED & United Nations Office for Disaster Risk Reduction. <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/61119>

We li, Z., Yang, X.-L., & Li, T.-Z. (2020). Evaluación de la estabilidad estática y sísmica de taludes 3D con grietas. *Elservie, Ingeniería Geológica*, 265, 105-450. doi: <https://Doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105450>.

Yamagami T, Jiang, J.C. (1996). "A generalized method for determining the critical slip surface in three-dimensional slope stability analysis". *Seventh International Symposium on Landslides*. Trondheim, pp 1433-1439.