

4- ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

4.1. INTRODUCCIÓN

Al hablar de deslizamientos se ha ilustrado la importancia que puede adquirir el estudio de la estabilidad de taludes en nuestro medio, pero ese es apenas uno de los aspectos que trata dicha rama de la geotecnia, puesto que también es pieza fundamental en otras actividades de la ingeniería tales como el diseño y construcción de presas de tierra y enrocado, diques, rellenos y terraplenes. Dichas estructuras de tierra, en conjunto con los cortes o excavaciones que se practican en los proyectos de ingeniería, forman lo que se ha denominado los taludes artificiales; estos se diferencian de las laderas y taludes naturales, por la naturaleza de los materiales involucrados en cada caso o por las circunstancias de formación del talud, su historia geológica, el clima al cual ha estado sometido y la influencia del hombre. (Rico y Del Castillo, 1974).

Dentro de los taludes artificiales deben reconocerse las diferencias entre los cortes y los terraplenes, teniendo en cuenta que éstos, como en las presas, el grado de control que puede ejercer la ingeniería es mayor, dado que se seleccionan los materiales que los forman, los sistemas de colocación, compactación y drenaje. En las excavaciones de laderas habrá que trabajar con los materiales en su estado natural, con todas las variaciones que puedan presentarse de un punto a otro en las condiciones hidrológicas y geológicas, las propiedades geotécnicas de suelos y rocas y el grado de meteorización. En cualquier caso deberán considerarse a mediano y largo plazo factores tales como el cambio que introduce en el medio ambiente toda obra de ingeniería, la influencia del agua sobre la resistencia, la estabilidad y la respuesta de los materiales a las cargas aplicadas y las modificaciones que sufren los materiales con el tiempo (en especial por la meteorización intensa que puede ocurrir en nuestro medio tropical).

Dicen Skempton y Hutchinson (1969) en uno de los trabajos más importantes sobre la materia: el estudio científico de taludes de tierra y roca tiene aplicaciones que varían desde problemas de 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.

Sea cual fuere el enfoque dado al tema, se requiere un conocimiento adecuado de numerosos puntos que pueden reunirse en cuatro grupos relacionados entre sí:

Reconocimiento y clasificación de los diversos tipos de movimientos en masa que pueden ocurrir, sus características morfológicas, ambiente geológico, velocidad y causas de la falla.

Clasificación y descripción precisa de los materiales englobados en los movimientos en masa y medidas cuantitativas de sus propiedades relevantes.

Método del cálculo de la estabilidad del talud en términos del tipo de falla, real o prevista y las propiedades de los materiales.

Correlación entre las observaciones de campo y los resultados del cálculo de estabilidad.

Agregan los autores citados que "los movimientos en masa ocurren principalmente en respuesta a fuerzas gravitacionales, ayudadas algunas veces por actividad sísmica. La manera como un talud cede ante dichas fuerzas está controlada por una multitud de factores, entre los cuales los más importantes son la geología, la hidrología, la hidráulica, el relieve, el clima y la meteorización".

4.2 FACTOR DE SEGURIDAD

Una definición del factor de seguridad contra la falla de un talud, es la del valor resultante de dividir la resistencia al corte disponible del suelo, a lo largo de una superficie crítica de deslizamiento, por la resistencia al corte requerida para mantener el equilibrio (Bishop, 1955)

La tarea del ingeniero encargado de analizar la estabilidad de un talud es determinar el factor de seguridad. En general el factor de seguridad se define como

$$FS_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (4.1)$$

Donde FS_s = Factor de seguridad con respecto a la resistencia
 τ_f = Resistencia cortante promedio del suelo
 τ_d = Esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla.

La resistencia cortante de un suelo consta de dos componentes, la cohesión y la fricción, y se expresa como

$$\tau_f = c + \sigma' \times \tan \phi \quad (4.2)$$

Donde c = Cohesión
 ϕ = Ángulo de fricción
 σ' = Esfuerzo normal efectivo sobre la superficie potencial de falla

De manera similar

$$\tau_d = C_d + \sigma' \times \tan \phi_d \quad (4.3)$$

Donde c_d y ϕ_d son, respectivamente, la cohesión efectiva y el ángulo de fricción que se desarrolla a lo largo de la superficie potencial de falla. Sustituyendo las ecuaciones (2) y (3) en la ecuación (1), se obtiene.

$$FS_s = \frac{c + \sigma' \times \tan \phi}{c_d + \sigma' \times \tan \phi_d} \quad (4.4)$$

Se puede introducir algunos otros aspectos del factor de seguridad, es decir, el factor de seguridad con respecto a la cohesión FS_c y el factor de seguridad con respecto a la fricción FS_ϕ y se define como sigue:

$$FS_c = \frac{C}{C_d} \quad (4.5)$$

y

$$FS_\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d} \quad (4.6)$$

Cuando se comparan las ecuaciones (4.4), (4.5) y (4.6), se aprecia que cuando FS_c se vuelve igual a FS_r , ese es el factor de seguridad con respecto a la resistencia. O si

$$\frac{C}{C_d} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d}$$

Se puede escribir

$$FS_S = FS_C + FS_\phi \quad (4.7)$$

Cuando FS es igual a 1,00, el talud está en un estado de falla incipiente. Generalmente un valor de 1,40 como factor de seguridad con respecto a la resistencia es aceptable para el diseño de un talud estable.

El valor mínimo del factor de seguridad aceptable en una ladera depende de varias circunstancias, que se pueden asociar con el tipo de talud. A continuación se incluyen algunas recomendaciones relacionadas con los taludes nuevos, los existentes, los naturales y los construidos en obras temporales.

a. Taludes nuevos.

Un factor de seguridad de diseño contra la falla de un talud depende de la magnitud de las pérdidas económicas y de vidas que dicha falla pueda producir. En el "Geotechnical Manual of Slopes (1984)" se indican los factores de seguridad recomendados para taludes nuevos que se presentan en la tabla 4.1. Dichos factores de seguridad son válidos para condiciones de aguas resultantes de una lluvia con período de retorno de 10 años. Hay tres categorías de riesgo en cada caso, despreciable, bajo y alto. La categoría "riesgo para vida" refleja la probabilidad de pérdidas de vida en el evento de falla.

Tabla 4.1 Factores de seguridad recomendados para taludes nuevos, considerando una lluvia con período de retorno de diez años.

| Riesgo para Vida | | Factor de Seguridad recomendado contra pérdidas de vidas para una lluvia con período de retorno de diez años. | | |
|------------------|--------------|---|------|--------------------|
| | | Despreciable | Bajo | Alto |
| Riesgo económico | Despreciable | >1 | 1,2 | 1,4 ⁽¹⁾ |
| | Bajo | 1,2 | 1,2 | 1,4 ⁽¹⁾ |
| | Alto | 1,4 | 1,4 | 1,4 ⁽¹⁾ |

Nota ⁽¹⁾ Adicionalmente al factor de seguridad de 1,4 para lluvia con período de retorno de diez años, un talud en la categoría alta "riesgo para vida" debe tener un factor de seguridad de 1,1 con las condiciones más críticas posibles del agua subterránea.

⁽²⁾ Los factores de seguridad dados en esta tabla son valores recomendados. Sin embargo, pueden adoptar valores mayores o menores, particularmente en relación con las pérdidas económicas probables.

(Geotechnical Manual for Slopes, 1984)

La categoría de "riesgo económico" refleja la magnitud probable de las pérdidas económicas en los casos de falla. En las tablas 4.2 y 4.3 se presentan ejemplos típicos de las situaciones de fallas en taludes correspondientes a cada categoría de riesgo, tomados del "Geotechnical Manual for Slopes (1984)"

Se debe señalar que los factores de seguridad contra pérdidas económicas y los ejemplos típicos de falla de taludes en cada categoría de riesgo económico, se deben utilizar como una guía, dado que no cubren todas las situaciones de falla posibles. Es esencial que el diseñador adopte una decisión

adecuada haciendo un balance entre las pérdidas económicas potenciales en el evento de la falta y el costo adicional de construcción, requerido para garantizar un factor de seguridad más alto.

Tabla 4.2 Ejemplos de fallas de taludes en cada categoría de riesgo para vida.

| Ejemplo | Riesgo de Vida | | |
|--|----------------|------|------|
| | Despreciable | Bajo | Alto |
| 1. Fallas que afectan parques campestres y áreas de recreación a cielo abierto con uso ligero. | (*) | | |
| 2. Falla que afecta carreteras con densidad de tráfico baja | (*) | | |
| 3. Fallas que afectan bodegas de materiales (no peligrosos). | (*) | | |
| 4. Fallas que afectan espacios abiertos con uso masivo y facilidades de recreación (áreas de descanso, campos de deporte, parqueaderos). | | (*) | |
| 5. Fallas que afectan carreteras con densidad vehicular, o tráfico peatonal altos. | | (*) | |
| 6. Fallas que afectan áreas públicas de espera (plataformas de ferrocarril, paraderos de buses, estaciones de gasolina). | | (*) | |
| 7. Fallas que afectan edificios ocupados (residenciales, educacionales, comerciales, industriales) | | | (*) |
| 8. Fallas que afectan edificios de almacenamiento de materiales peligrosos. | | | (*) |

(Geotechnical Manual for Slopes, 1984)

Tabla 4.3 Ejemplos de fallas de taludes en cada categoría de riesgo económico.

| Ejemplo | Riesgo Económico | | |
|---|------------------|------|------|
| | Despreciable | Bajo | Alto |
| 1. Fallas que afectan parques campestres. | (*) | | |
| 2. Falla que afecta carreteras rurales, ramales, distribuidoras distritales y distribuidoras locales, que no son el único acceso. | (*) | | |
| 3. Fallas que afectan parqueaderos al aire libre. | (*) | | |
| 4. Fallas que afectan carreteras rurales o distribuidoras primarias, que no son el único acceso. | | (*) | |
| 5. Fallas que afectan servicios esenciales, que pueden causar pérdidas de ese servicio en forma temporal (conducciones de agua, gas, electricidad). | | (*) | |
| 6. Fallas que afectan carreteras troncales rurales o urbanas, de importancia estratégica. | | | (*) |
| 7. Fallas que afectan servicios esenciales que pueden causar pérdidas de ese servicio por un período largo. | | | (*) |
| 8. Fallas que afectan edificaciones a las que les pueden causar un daño estructural excesivo. | | | (*) |

Nota Los ejemplos anteriores son una guía. El diseñador debe decidir el grado de riesgo económico y debe balancear el riesgo económico potencial en el evento de la falla, contra el incremento de los costos de construcción que se requiere para lograr un factor de seguridad alto.

(Geotechnical Manual for Slopes, 1984)

Las fallas en la categoría de riesgo alto para la vida no son aceptables aún en el evento de condiciones excepcionales de agua subterránea. Adicionalmente un factor de seguridad de 1,4 para una lluvia con período de retorno de diez años, un talud en la categoría mencionada debe alcanzar un factor de seguridad de 1,1 con las peores condiciones esperadas de agua subterránea.

En cualquier área de préstamo o en el sitio de un proyecto en desarrollo, los factores de seguridad que se adopten para el diseño de los taludes deben estar de acuerdo con el uso futuro del área, considerando las sobrecargas al talud que puedan resultar del desarrollo posterior. Cuando se desconozca el uso futuro del terreno, se debe asumir que este es residencial.

b. Taludes existentes.

Cuando se analiza un talud antiguo para determinar la extensión de cualquier obra correctiva o preventiva requerida, la historia del comportamiento de dicho talud puede ser de gran importancia para el diseñador. Se presenta por ejemplo, la oportunidad de examinar la geología del talud

mucho mejor que en el caso de un sitio por desarrollar y de obtener una información más confiable del agua subterránea. El diseñador puede, por lo tanto, adoptar con confianza unos factores de seguridad para las obras remediales o preventivas, menores de los señalados anteriormente para los taludes nuevos. Siempre que se realicen unas investigaciones rigurosas de geología y geotecnia (las cuales incluyen un completo examen de la historia del mantenimiento del talud, los registros del agua subterránea, los registros de lluvias y los registros de instrumentación del talud), se podrán utilizar los factores de seguridad incluidos en la tabla 4.4 para el diseño de obras remediales o preventivas, siempre y cuando que las condiciones de carga, la forma básica del talud modificado y el régimen del agua subterránea se mantengan substancialmente iguales a aquellas del talud existente.

Para el diseño de las obras remediales o preventivas, se puede asumir que el talud existente tiene un factor de seguridad mínimo de 1,00 para las condiciones más críticas de cargas y de aguas subterránea. En el caso de un talud fallado o peligroso, se deben identificar las causas de la falla o del peligro para tenerlas en cuenta en el diseño de las obras. En aquellos casos donde el talud se modificará sensiblemente, o donde su estabilidad será afectada por nuevas obras, se deben adoptar los factores de seguridad recomendados en la tabla 4.1.

Tabla 4.4 Factores de seguridad recomendados para el análisis de taludes existentes y para el diseño de las obras remediales y preventivas, considerando una lluvia con período de retorno de 10 años.

| Riesgo para la Vida | Factor de seguridad recomendado contra pérdidas de vida para una lluvia con período de retorno de 10 años. | | |
|---------------------|--|------|------|
| | Despreciable | Bajo | Alto |
| | 1,00 | 1,10 | 1,20 |

Notas Estos factores de seguridad son valores mínimos para utilizar únicamente donde se han efectuado estudios geológicos y geotécnicos rigurosos, donde los taludes han permanecido estables durante un tiempo considerable, y donde las condiciones de las cargas, el régimen de agua subterránea y la forma básica del talud modificado permanecen substancialmente iguales a las del talud existente.

Se debe adoptar el procedimiento de análisis regresivo para el diseño de las obras remediales o preventivas, se puede asumir que el talud existente alcanzó un factor de seguridad mínimo de 1,00 para las peores condiciones conocidas de carga y de agua subterránea.

Para un talud fallado o en peligro de falla, las causas de la falla o del peligro deben identificar específicamente y tener en cuenta para el diseño de las obras remediales.

(Geotechnical Manual for Slopes, 1984)

c. Taludes naturales

Los taludes naturales generalmente se encuentran cerca del equilibrio límite en áreas extensas, de tal manera que las medidas preventivas pueden ser costosas y difíciles. Obviamente no es recomendable en estos casos acometer el abatimiento del talud para lograr solo un mejoramiento marginal de estabilidad. En tales casos se pueden desarrollar rápidamente presiones de poros altas. En estos casos generalmente no se produce una señal previa al deslizamiento, y el material en movimiento, si hay licuación, puede viajar grandes distancias a velocidad alta, aún sobre superficies relativamente planas. Materiales como un peso unitario seco menor que la densidad crítica se pueden formar debido a la compactación inadecuada de un relleno, por la disposición de material coluvial en un estado suelto o por la meteorización in situ.

Las rocas que tienen una meteorización alta o total se pueden comportar como suelo en términos de sus propiedades de ingeniería, de tal manera que los taludes con estos materiales se deben evaluar analizando una amplia variedad de superficies potenciales de falla. En roca menos meteorizada la falla del talud es controlada por el sistema de fisuras.

4.3 ANÁLISIS Y DISEÑOS.

Como requisito para un buen análisis, los ingenieros deben determinar con suficiente precisión los mecanismos de falla que intervinieron en el deslizamiento bajo estudio, o que pueden actuar en el futuro. Además deben estar familiarizados con las técnicas de investigación del terreno, la exploración, los ensayos de campo y laboratorio y conocer los sistemas de obras correctivas y preventivas disponibles. La experiencia de campo permite mejorar nuestra comprensión general sobre los tipos de falla de taludes y los mecanismos actuantes y suministra bases para su reconocimiento y clasificación.

Tanto el análisis como el diseño de taludes de excavaciones y rellenos constituyen una aplicación de la investigación y los avances que se logran en la mecánica de suelos y la mecánica de rocas, ciencias que proporcionan los métodos para cuantificar el factor de seguridad y la probabilidad de falla. Esa aplicación en casi todos los casos requiere simplificaciones, pero esto no obsta para que siempre sea recomendable algún análisis, por simple que sea, en todas las labores de diseño. Al mismo tiempo, es esencial que no se pierdan de vista las diferencias entre la realidad, a menudo compleja y el modelo teórico simplificado, en particular, cuando se están interpretando los resultados del análisis.

a. Procedimiento general de diseño.

Se presenta en la tabla 4.5 un procedimiento general de diseño de taludes (y de fundaciones), que también describe la secuencia diseño-construcción. El diseño en ingeniería busca ofrecer un margen de seguridad adecuado, dentro de las condiciones económicas y sin perder de vista las posibilidades reales (físicas, técnicas y financieras) de llevar a cabo las obras.

La secuencia descrita en la tabla 4.5 puede considerarse sencilla, pero su realización en los proyectos, en la vida real, no es siempre fácil. Al estudiarla puede plantearse un contraste entre la investigación y la práctica de la ingeniería; la investigación permite, y más aún, estimula el desarrollo de las ideas acaecidas por individuos, mientras que un diseño de ingeniería puede no ser mejorado por un refinamiento extremo en los detalles, sino que está gobernado por el eslabón más débil en la secuencia compleja de diseño.

Un eslabón débil puede producirse por errores u omisiones tales como:

- a) datos de entrada, irreales o errados;
- b) análisis irreal en el diseño;
- c) criterios de diseño insuficientes;
- d) diseño poco práctico;
- e) documentos contractuales deficientes, confusos e imprecisos, en los cuales el problema real no esté adecuadamente definido;
- f) construcción deficiente, pobre o defectuosa. En ocasiones puede ser el fruto de un control descuidado.

Por otra parte se debe tener en cuenta que el análisis no es igual al diseño; el análisis debe servir para guiar el diseño y solo entonces será útil en la ingeniería práctica. El análisis es una componente importante del diseño funcional de un talud, junto con las consideraciones de drenaje y el control de la construcción. En el análisis se avalúan las propiedades mecánicas de los materiales, para llegar a diseñar una configuración acorde con los requisitos de comportamiento del talud (Morgenstern y Sangrey, 1978).

Tabla 4.5 Proceso diseño-construcción. (*)

| | |
|--|---|
| Diseño preliminar: Abarca un estimativo de los problemas potenciales de diseño, basado en: | Requisitos del proyecto, técnicos y económicos. Selección del sitio. Evaluación preliminar de las condiciones del terreno. |
| Investigación de campo, consiste en: | Exploración. Ensayos en el sitio y en el laboratorio. Mediciones (instrumentación). |
| Idealización (o modelado) de: | Condiciones naturales, incluyendo el estado de esfuerzos. Propiedades de los materiales naturales (parámetros geotécnicos). Mecanismos potenciales de falla. |
| Análisis, el cual producirá: | Resultados numéricos. Conclusiones y recomendaciones para el diseño. |
| Diseño: basado tanto en los resultados del análisis como en el criterio de ingeniería (buen juicio y experiencia práctica) de generalistas y especialistas. Ente sus limitaciones juega papel importante la economía del proyecto. Comprende: | Criterios de diseño. Concepto del diseño. Dimensiones de la estructura. Detalles de diseño. Especificaciones de construcción. |
| Contrato: | Cantidades de obra. Presupuesto. Especificaciones generales y particulares. Determinación del precio y el plazo. Sistema de contratación. Selección del contratista. |
| Construcción: | Ejecución del proyecto. Inspección y control de la obra (Interventoría). Ajustes al diseño. Instrumentación. Pruebas de funcionamiento. |
| Control y Mantenimiento de la estructura terminada: | Observaciones y mediciones de la instrumentación. Interpretación de registros de las anteriores. Mantenimiento rutinario. Obras complementarias. |

(*) Adaptada de K.N. John (1975)

El análisis requiere conocimiento sobre la geometría del terreno y las obras de ingeniería proyectadas o ya existentes, la resistencia al corte de los materiales y las condiciones de presión de poros. En caso de inestabilidad actual, es necesario definir el tipo de movimiento de falla del talud, mientras que en la predicción del comportamiento, se debe establecer el tipo de inestabilidad con mayores posibilidades de ocurrir; esto requiere un buen conocimiento y utilización de la geología, la geomorfología, la foto interpretación, el poder de observación y la experiencia. Algunos tipos de inestabilidad, básicos o simples, son susceptibles de análisis convencionales; otros no y por lo tanto debe acudir a técnicas de observación y análisis probabilístico.

Las mayores dificultades residen en la determinación de la geometría de la falla (forma y tipo de movimiento, localización de la superficie de deslizamiento), la predicción del tipo de falla que puede ocurrir y sobre todo, la selección de los parámetros de resistencia al corte apropiados, su variabilidad en el tiempo y el espacio y las condiciones de presión de poros.

Los taludes artificiales de obras en tierra, donde hay selección de materiales, control de la construcción, colocación y compactación del suelo que los forma, se llega a una masa relativamente homogénea, en la cual el tipo de movimiento de falla es común, simple y definido. En los taludes naturales la forma de la falla estará fijada por las condiciones geológicas, la resistencia de los materiales presentes y la geometría del talud; la multiplicidad de factores y su variabilidad, pueden llevar a situaciones muy complejas.

b. Métodos de análisis.

Hay toda una gama de métodos de análisis para el diseño de taludes en suelo o roca, los cuales pueden encuadrarse en dos grandes categorías que se presentan en la tabla 4.6.

1. El concepto del Equilibrio Límite, que se desarrolló primero en la mecánica de suelos y más tarde se adoptó en la mecánica de rocas.
2. El Método de los Elementos Finitos, con sus muchas variaciones, más reciente. Se aplica en el llamado Análisis de Deformación.

Tabla 4.6 Análisis convencionales en el diseño de taludes.

| ENFOQUE | ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE | ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS |
|-------------------------|--|--|
| CARACTERÍSTICAS | Bidimensional, Tridimensional (cuña) Masa rígida o 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: Translacional, 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 , dilatación, 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. |

(*) Tomada de K.W. John (1975).

Existe en la actualidad una tendencia definida a combinar los dos enfoques anteriores – análisis de equilibrio límite y método de los elementos finitos – buscando un sistema cada vez más unificado en el cual, los resultados del segundo, campos de esfuerzos y patrones de deformación, son reanalizados por medio de diferentes procedimientos de equilibrio límite, con el fin de suministrar respuestas adicionales a los diseñadores. El análisis se ve facilitado con los computadores y la disponibilidad de programas.

En los métodos de equilibrio límite se postula una condición de falla incipiente a lo largo de una superficie continua de deslizamiento cuya forma es conocida o supuesta. Se obtiene luego un estimativo del factor de seguridad del talud con respecto a la resistencia al corte, examinando el equilibrio de la masa de suelo sobre la superficie e rotura. En líneas generales el Factor de Seguridad (FS) se define como la relación entre la resistencia al corte disponible por el suelo y la requerida para mantener el equilibrio (Bishop, 1954, citado por Skempton y Hutchinson, 1969). Esta es la noción convencional del Factor de Seguridad y su cálculo se basa en un análisis estático que predice los esfuerzos cortantes asociados con la falla del talud natural o artificial. Otro desarrollo de la geotecnia tiende al concepto más lógico de la probabilidad de falla del talud, en el cual se hace una evaluación apropiada de la confiabilidad de las variables consideradas en el análisis de estabilidad.

c. Datos de entrada para el análisis.

En un análisis de estabilidad de taludes se requiere contar con una información confiable sobre la topografía del sitio, la geología, la resistencia de los materiales y las cargas externas que actúan sobre el talud. A continuación se indican algunas de las condiciones que deben satisfacer cada uno de estos datos:

Topografía. Es indispensable contar con un plano preciso del sitio, donde se localizan la posición de los sondeos, las áreas donde se efectuó el levantamiento de las fisuras la localización de estructuras y de las secciones que se deben analizar. Estas secciones se deben levantar con un detalle tal que se puedan dibujar a una escala adecuada para medir las dimensiones con una exactitud de 0,10 m. Generalmente una escala 1:100 es suficiente aunque una escala 1:50 o 1:20 se puede necesitar cuando la altura del talud es menor de 10 m.

Geología. Como resultado de la investigación del terreno se debe establecer la profundidad de meteorización, la presencia de las formaciones superficiales como las capas de cenizas volcánicas, los depósitos de coluviones, rellenos y las estructuras del macizo rocoso.

En los análisis de estabilidad la información geológica se debe interpretar en términos de capas o zonas de materiales con características de ingeniería similares. En el caso de que se tengan rocas meteorizadas en el talud, se pueden adoptar uno de los perfiles internacionalmente aceptados (ejemplo el de la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica, 1981). No obstante lo anterior, en algunos sitios específicos puede resultar necesario desarrollar esquemas individuales para clasificar zonas de material.

Los detalles de geología disponibles para el análisis generalmente se basan en una información restringida, la cual frecuentemente puede tener más de una interpretación. Consecuentemente en el análisis se debe considerar todo el rango de posibilidades. Las condiciones geológicas se deben evaluar continuamente durante la construcción, y el diseño se debe modificar si las condiciones geológicas reales difieren de aquellas asumidas. La estructura geológica adoptada para el diseño se debe mostrar en las secciones seleccionadas para el análisis.

Resistencia al corte de los materiales. Tal como se mencionó en el capítulo anterior, la resistencia al corte de los materiales que conforman el talud se debe expresar en términos de los parámetros de esfuerzos efectivos. c' y ϕ' , y deben obtenerse ensayando muestras representativas de los materiales de la matriz y de los que se encuentran en las discontinuidades. Las muestras se deben ensayar en un rango de esfuerzos comparables a los existentes en el talud y en condiciones saturadas, a menos que haya evidencia que los materiales no llegarán a una situación cercana a la saturación durante la lluvia de diseño.

La resistencia al corte de un material no saturado generalmente es bastante mayor que la del mismo material en condiciones saturadas. Sin embargo, tanto los taludes con vegetación como los protegidos pueden alcanzar contenidos de humedad cercanos a la saturación durante la lluvia de 10 años de período de retorno, a no ser que los taludes se encuentren protegidos efectivamente contra la infiltración directa e indirecta. Por lo tanto, no es conveniente confiar en la succión del suelo como un factor que contribuya a la estabilidad a largo plazo.

Para que las medidas de protección de un talud se mantengan trabajando es necesario suministrarles un mantenimiento adecuado. Por razones ambientales se prefiere la vegetación a los materiales duros (concreto lanzado) como cubierta protectora para controlar la erosión superficial.

Agua Subterránea. Las condiciones del agua subterránea deben evaluarse durante y después de efectuada la investigación del terreno, mediante la instalación y lectura de piezómetros y a través de la observación de tasas de infiltración. Los niveles que se obtengan durante el período de observación seguramente no representan los niveles máximos que deben producirse durante la lluvia de diseño; por lo tanto, debe hacerse una predicción de los niveles que pueda alcanzar el agua como consecuencia de la lluvia y otros factores (fugas de redes).

Los taludes se deben diseñar para las condiciones del agua subterránea que resulten de la lluvia de diez años de período de retorno. Adicionalmente, los taludes que se encuentren en categoría de alto riesgo para la vida se deben evaluar para determinar la sensibilidad de su estabilidad, a niveles de la tabla de agua superiores a los que se predigan para la lluvia de los diez años de período de

retorno, es decir, para las peores condiciones esperadas. Estas condiciones críticas pueden ser ocasionadas por la rotura de las tuberías de acueducto o alcantarillado, por el taponamiento de los filtros de drenaje, por una lluvia excepcionalmente fuerte (con período de retorno superior a diez años) y el subsecuente llenado de las grietas de tensión o de las fisuras abiertas. En la sección del talud que se utilice para efectuar el análisis de estabilidad, se deben mostrar las tablas de agua esperadas para la lluvia de diez años de período de retorno y las de peores condiciones posibles.

Mediante el examen de los perfiles de los materiales del talud, se debe considerar la posibilidad de que presenten niveles de agua colgada en la interface de las capas con diferentes permeabilidades. Las tablas de agua colgadas se pueden formar en la interface entre el coluvión o relleno y el suelo subyacente, entre las zonas de meteorización, o entre las zonas de meteorización y el coluvión. Estas condiciones transientes normalmente se forman y se disipan relativamente rápido, y son difíciles de detectar con la medición de los piezómetros o con la observación de la infiltración.

En los taludes de roca presiones máximas del agua se pueden desarrollar durante las lluvias fuertes, como resultado del llenado de las grietas de tensión y de las fisuras abiertas. La presión del agua en estos casos debe asumirse con el valor máximo en la base de la grieta de tensión, y con un valor cero en la superficie. La presión del agua puede variar entre fisura y fisura dentro de la masa rocosa, de tal manera que los valores medidos con los piezómetros solo tienen significado para las fisuras interceptadas por el filtro que rodea la punta del piezómetro. Estos valores son confiables solo si el filtro intercepta una sola fisura.

Cargas externas. Todas las cargas que pueden influir sobre la estabilidad del talud se deben incluir en el análisis, teniendo en cuenta los factores de seguridad que se les hallan asignado durante su evaluación. Estas cargas pueden provenir del tráfico, de las fundaciones de edificaciones, de muros de contención, de botaderos de residuos de construcción, de explosiones, de hincado de pilotes, y finalmente, de los sismos que puedan afectar la región.

4.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS

Existen muchos métodos de análisis de estabilidad que se pueden utilizar en el diseño de taludes. La mayoría de ellos se basan en el principio del equilibrio límite, aunque algunos utilizan la teoría del límite plástico, y otros se basan en deformación.

Históricamente se han presentado dos maneras de resolver los problemas relacionados con la estabilidad de taludes:

- 1. Solución matemática.** Fue propuesta por Rankine en 1857 y formalizada por Kotter en 1903. En 1939 fue desarrollada por Sokolovsky. Consiste en formular un sistema soluble de ecuaciones para encontrar las cargas límites que puede sostener el suelo, de acuerdo con la forma y la naturaleza de la superficie a lo largo de la cual se produce la falla, en el instante en que esta se genera. Este tipo de solución puede emplear el método analítico o el numérico (elementos finitos), pero presenta el inconveniente de requerir, además de los parámetros de resistencia al corte, otros parámetros como el módulo elástico y la relación de Poisson. Dado que no todos estos parámetros se pueden definir de una manera muy precisa, los resultados que se obtienen dependen de la incertidumbre de los datos iniciales.
- 2. solución convencional o de equilibrio limite.** Esta solución fue propuesta por Coulomb en 1776. consiste en asumir la forma geométrica de la superficie de falla, generalmente basándose en observaciones de superficies de falla reales, e introducir procedimientos simplificadorios entre los cuales se aproxima el esfuerzo normal sobre la superficie de falla,

hasta encontrar la relación entre las fuerzas actuales y las resistentes en la condición de equilibrio límite o de falla inminente. Teniendo en cuenta las dificultades que presenta la solución matemática y las facilidades del cálculo de la solución convencional, la mayoría de los métodos de análisis se basan en el principio del equilibrio límite.

a. Soluciones de equilibrio límite

4.4.1 Condiciones idealizadas. En el análisis de estabilidad de taludes se presentan dos factores que lo dificultan. El primero es la presencia de suelos heterogéneos, lo que determina que las propiedades del suelo en los taludes no sean homogéneas e isotrópicas. El segundo está relacionado con las condiciones de borde que definen la red de flujo, las cuales en la mayoría de los casos solo se conocen de una manera aproximada.

Para resolver las dificultades anteriores, se adoptan las siguientes simplificaciones:

- Se utiliza una sección promedia típica y se asume que no actúan esfuerzos de corte de dirección normal a la sección, y por lo tanto, que tenemos un caso bidimensional de esfuerzos. La masa que se analiza tiene dimensión unitaria en dimensión normal a la sección.
- Se asume que la sección promedio está formada por suelos uniformes, cada uno con propiedad constante. En la mayoría de los casos se supone que toda la masa está formada por una solo tipo de suelo.
- Se asume que la resistencia al corte de cada suelo individual presente en la sección se puede expresar mediante la ecuación de Mohr-Coulomb.
- Se asume que las condiciones de flujo de agua y las presiones correspondientes, representadas por una red de flujo, son conocidas.

4.4.2 Procedimiento de las soluciones. Las diferentes soluciones que emplean el principio del equilibrio límite utilizan el siguiente procedimiento:

- Se asume la superficie de falla.
- Se estudia el equilibrio de la masa de suelo que se deslizaría, considerando el conjunto de los esfuerzos actuales. El suelo genera cierta resistencia y se comporta como material rígido-plástico, es decir, no presenta movimientos antes de la falla.
- Se asume que el factor de seguridad, F_s , está dado por la relación entre la resistencia al corte disponible en el suelo, y los esfuerzos movilizados en el suelo por el sistema de fuerzas actuantes sobre la masa considerada.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_m} = \frac{\text{Resistencia al corte del suelo}}{\text{Resistencia al corte movilizado}} \quad (4.8)$$

Si F_s es mayor que 1,00 se supone que no hay movimiento, mientras que si es menor de 1,00, debe presentarse movimiento de la masa de suelo.

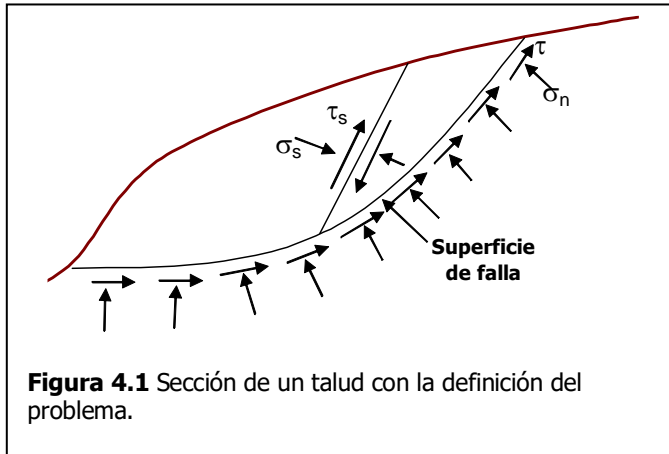
- Se utiliza el criterio de falla de Mohr-Coulomb, el cual señala que la resistencia disponible está dada por:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u) \times \tan \phi \quad (4.9),$$

Mientras que la resistencia al corte, movilizada se expresa como.

$$\tau_m = \frac{\tau_f}{FS} = \frac{1}{FS} \times (c' + (\sigma_n - u) \times \tan \phi) \quad (4.10)$$

4.4.3 Diferencias entre los métodos. Existen varios métodos basados en el principio del equilibrio límite que utilizan el procedimiento anterior; estos se diferencian en la entrada de datos, como se indica a continuación:



a. En la suposición sobre la forma de la superficie de falla. Algunos ejemplos son los siguientes:

| | |
|------------------------------------|---|
| Plana | Coulomb (1776), Culman (1866) |
| Arco cicloidal | Collin (1846) |
| Arco circular | Petterson (1916), Fellenius (1936), Bishop (1955) |
| Arco espiral logarítmica | Rendulic (1935) |
| Bloque deslizante | (dos o tres superficies planas) |
| Superficie parabólica | Vargas (1981) |
| Superficie de falla general | Kenney (1956), Janbu ((1973), Morgenstern-Price (1965), Chugaev (1964), Sarma (1973). |

- b. **El tipo de solución.** Estas pueden ser analíticas, como en el método de tajadas, o gráfica, como en los métodos de círculos de fricción de Taylor, como arco circular de Fellenius y bloque deslizante.
- c. **En la aplicabilidad del método.** Algunos se utilizan para analizar masas homogéneas de suelo, como el del círculo de Taylor, o el de Hoek y Bray (1981), otros a masas homogéneas de suelo a diferentes tipos de superficies de falla, como los de tajadas.
- d. **En las consideraciones sobre el equilibrio estático.** De acuerdo con las suposiciones que utilice el método, se obtendrán soluciones simplificadas, rigurosas o aceptables.
- e. **En el tipo de parámetros de resistencia al corte del suelo que emplea.** Las soluciones pueden aceptar parámetros en esfuerzos totales únicamente, otras aceptar los parámetros en totales y en esfuerzos efectivos y otros son utilizables únicamente cuando $u=0$.

4.4.4 Definición del problema. Como se indica en la figura 4.1, con los métodos basados en el principio de equilibrio límite se pretende, dada una posible superficie de falla, encontrar un conjunto de fuerzas actuantes a lo largo del límite de dicha superficie, de tal manera que la masa de suelo se encuentre en equilibrio.

La solución debe satisfacer:

1. σ_n y τ deben ser aceptables para el material.
2. $\sigma_n > 0$ y debe ser un esfuerzo de compresión.
3. τ debe tener una dirección.
4. τ debe ser positivo
5. τ_s y σ_s son esfuerzos internos en la masa deslizada, deben ser aceptables para el material y/o,

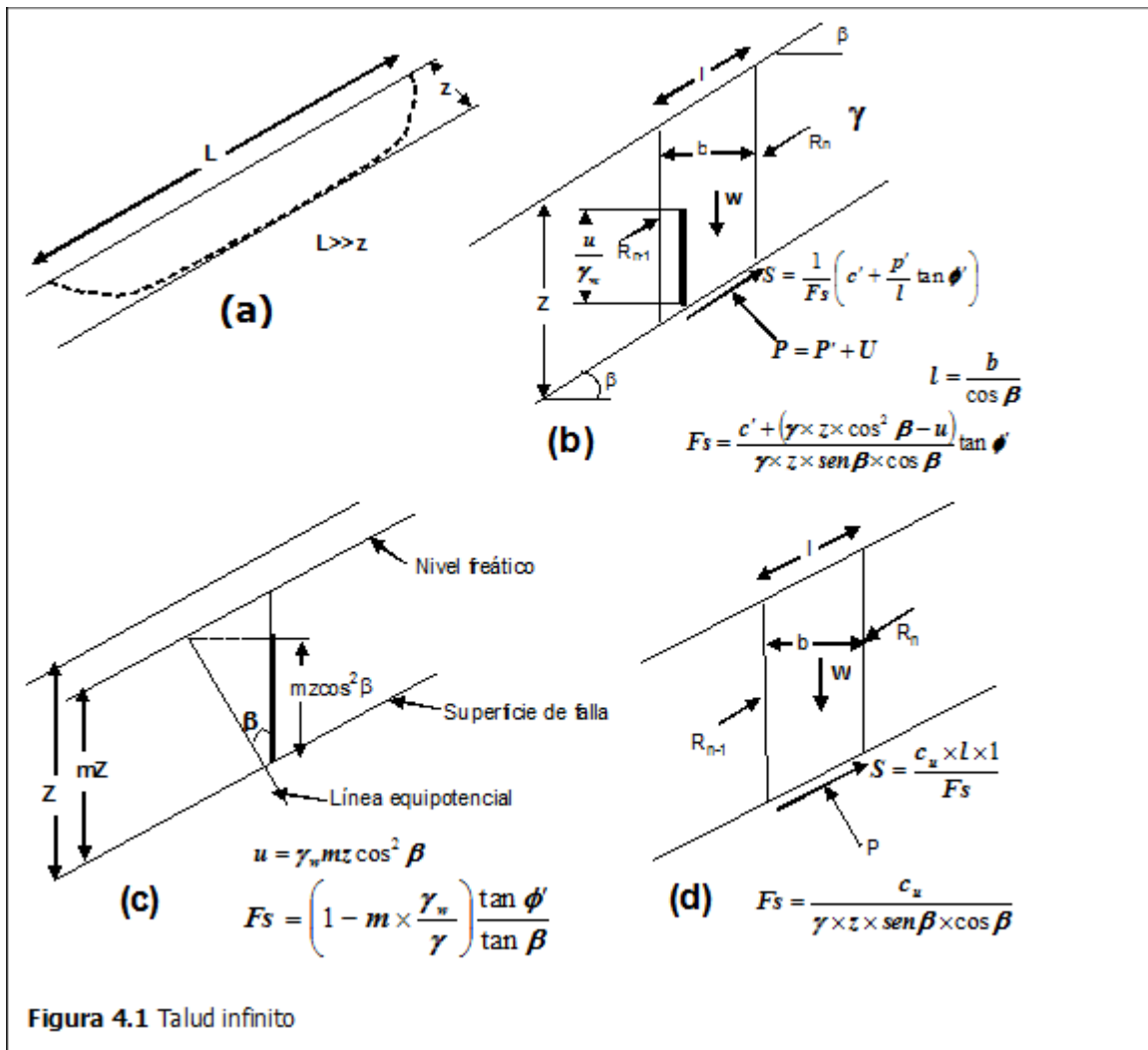
$$\tau_s \leq c'_p + (\sigma_s - u) \tan \phi'_p$$

Donde c'_p = Cohesión efectiva promedio

$$\phi'_p = \text{Ángulo de fricción interna efectivo promedio}$$

6. El punto de aplicación de la resultante de σ_s debe estar dentro de la masa de suelo.

4.5 ANÁLISIS PARA UN TALUD INFINITO.



Se entiende por talud infinito el que tiene una inclinación constante, una extensión ilimitada y unas condiciones y propiedades constantes del suelo a cualquier profundidad desde la superficie del talud. El talud puede estar constituido por estratos de diferentes suelos, si todos son paralelos a la superficie del talud. Por definición, cualquier columna de suelo dentro del talud infinito es igual a cualquier otra columna en todos sus aspectos. Tal como se indica en la figura 4.2a, el análisis del talud infinito se puede aplicar cuando la longitud del deslizamiento es mucho mayor que su espesor.

4.5.1 Análisis en términos de esfuerzos efectivos. Se asume una tajada vertical de ancho b , sobre la que actúan las fuerzas mostradas en la figura 4.2b. Aplicando las condiciones de equilibrio límite y teniendo en cuenta el tipo de falla, se concluye que las fuerzas R_n y R_{n+1} , son iguales, opuestas y colineales.

Sumando las fuerzas paralelas al talud se encuentra:

$$\frac{w \times \text{sen} \beta}{l \times 1} = S = \frac{\tau}{\tau_s} \times 1 \quad (\text{Profundidad unitaria})$$

Donde

$$W = \text{Peso de la tajada } \gamma \times z \times l \times \cos \beta \times 1$$

$$\tau = \text{Resistencia al corte del suelo } c' + \frac{P'}{l} \tan \phi'$$

Por lo tanto,

$$F_s = \frac{c' + \frac{P'}{l \times 1} \tan \phi'}{\gamma \times z \times \text{sen} \beta \times \cos \beta} \quad \left| \begin{array}{l} S = \frac{w \text{sen} \beta}{l} = \frac{\gamma \times b \times z \times \text{sen} \beta}{b / \cos \beta} \\ S = \gamma \times z \times \text{sen} \beta \cos \beta \end{array} \right.$$

Sumando fuerzas en dirección normal a la superficie de falla,

$$P = W \times \cos \beta = P' + U$$

De donde

$$P' = W \times \cos \beta - U = \gamma \times b \times z \times \cos \beta - U = \gamma \times z \times l \times \cos^2 \beta - U$$

$$U = u \times 1 \times l \quad \frac{P'}{l \times 1} = \frac{\gamma \times z \times l \times \cos^2 \beta - u \times l \times 1}{l \times 1}$$

Por lo tanto,

$$F_s = \frac{c' + (\gamma \times z \times \cos^2 \beta - u) \tan \phi'}{\gamma \times z \times \text{sen} \beta \times \cos \beta} \quad (4.11)$$

Esta expresión se reduce a los siguientes casos:

- a. Cohesión cero ($c' = 0$)

$$F_s = \left(1 - \frac{u}{\gamma \times z \times \cos^2 \beta} \right) \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (4.12)$$

- b. Cohesión y presión de poros cero ($c' = 0$ y $u = 0$) (arenas y gravas secas).

$$F_s = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (4.13)$$

c. Cohesión igual a cero $c' = 0$ y flujo paralelo a la superficie del terreno (Figura 4.2c)

$$F_s = \left(1 - m \times \frac{\gamma_w}{\gamma}\right) \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (4.14)$$

Donde, para $m=1$ (tabla de agua en la superficie)

$$F_s = \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}\right) \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (4.15)$$

y para $F_s=1$, $\tan \beta_{ult} = \frac{\gamma'}{\gamma} \tan \phi'$, donde $\gamma' = \gamma - \gamma_w$

4.5.2. Análisis en términos de esfuerzos totales. Se consideran las fuerzas mostradas en la figura 4.2d, asumiendo que la resistencia al corte del suelo está dada por,

$$\tau = c_u$$

Sumando fuerzas se encuentra que

$$F_s = \frac{c_u}{\gamma \times z \times \sin \beta \times \cos \beta} \quad (4.16)$$

4.6 ANÁLISIS PARA FALLA CIRCULAR CON $\phi=0$

Esta falla ocurre en uno de los siguientes modos:

- Cuando la falla ocurre de tal manera que la superficie de deslizamiento interfecta el talud, en una, o arriba de su pie es llamada **falla de talud**.

Al círculo de falla se le llama **círculo de pie** si este pasa por el pie del talud y **círculo de talud** si pasa arriba de la punta del talud.

En ciertas circunstancias es posible tener una falla de talud superficial como muestra en la figura 4.3

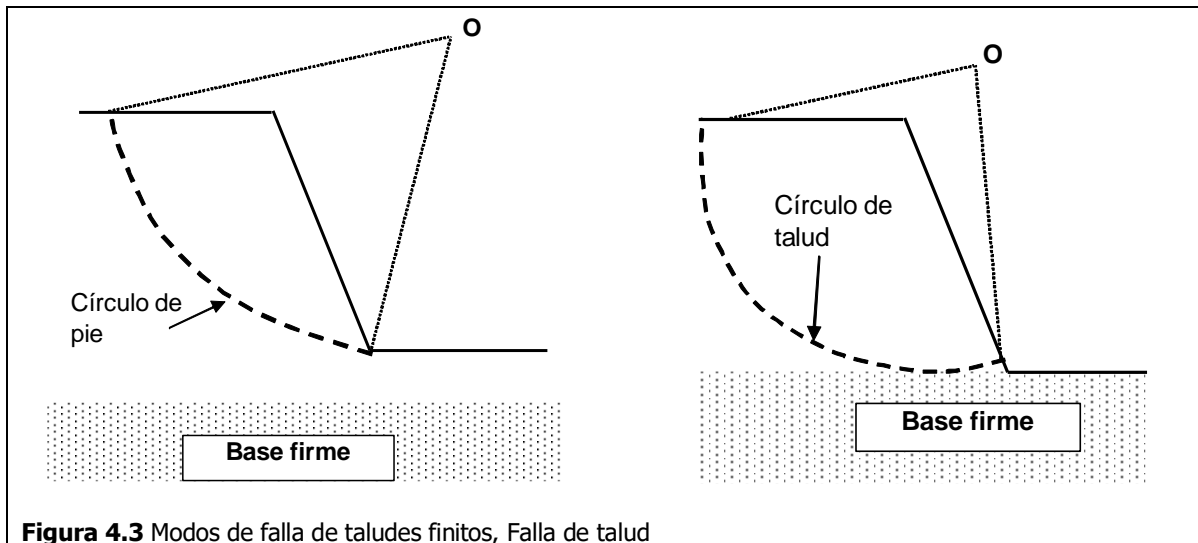


Figura 4.3 Modos de falla de taludes finitos, Falla de talud

- b. Cuando la falla ocurre de tal manera que la superficie de deslizamiento pasa a alguna distancia debajo del pie del talud, se llama **falla de base**. El círculo de falla en el caso de una falla de base se llama **círculo de medio punto**.

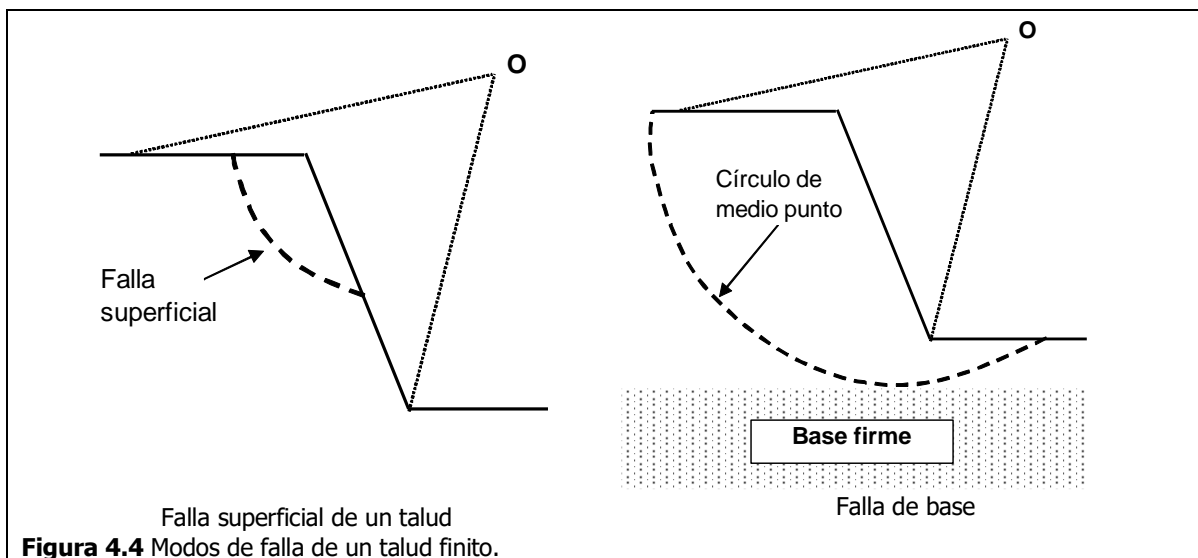


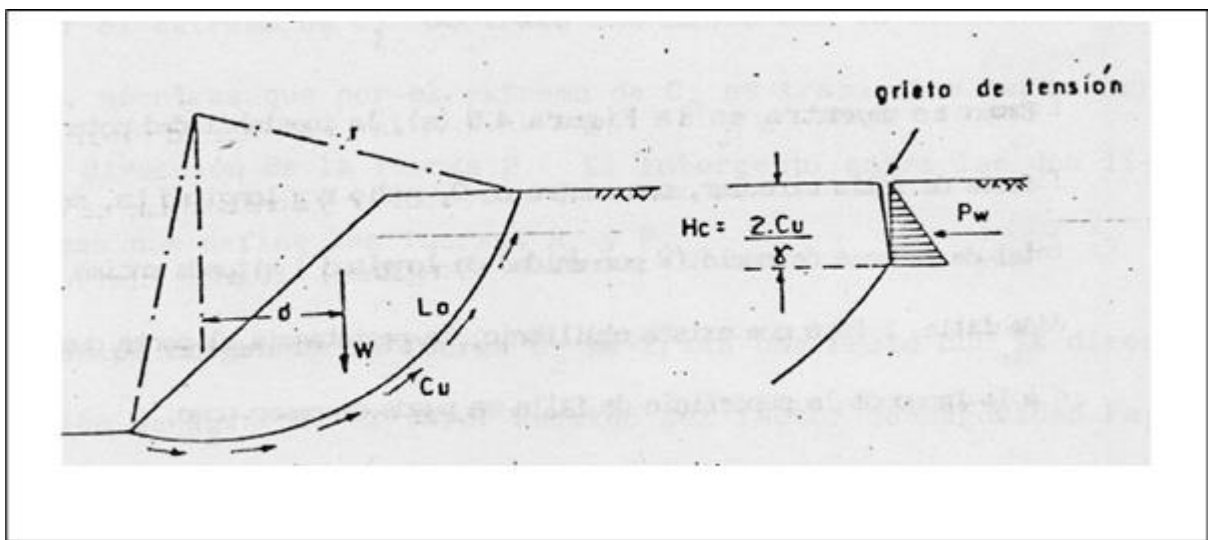
Figura 4.4 Modos de falla de un talud finito.

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 4.5, 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 mobilizarse a lo largo de la superficie de falla se puede expresar como,

$$\tau_m = \frac{\tau_f}{F_s} = \frac{c_u}{F_s} \quad (4.17)$$



Donde F_s es el factor de seguridad con respecto a la resistencia al corte.

Haciendo suma de momentos alrededor de "O" se tiene:

$$W \times d = \frac{c_u}{F_s} \times L_a \times r \quad (4.18)$$

De donde,

$$F_s = \frac{c_u \times L_a \times r}{W \times d} \quad (4.19)$$

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.

4.7 MÉTODO DE HOEK Y BRAY.

Hoek y Bray presentaron una serie de gráficas para el análisis de estabilidad de fallas circulares, que permiten determinar rápidamente el factor de seguridad de un talud, o establecer la sensibilidad de este a los cambios en las condiciones del agua subterránea. Las gráficas solo se deben utilizar para el análisis de superficies de fallas circulares, en suelos o en depósitos de rocas donde las propiedades no cambian (material homogéneo), y para las condiciones señaladas en cada gráfica. Las suposiciones adoptadas para encontrarlas fueron las siguientes:

- El material que forma el talud se asume homogéneo, y sus propiedades mecánicas no varían con la dirección de la carga.
- La resistencia al corte del material está determinada por una cohesión c y un ángulo de fricción ϕ , los cuales están relacionados con la ecuación,

$$\tau = c + \sigma \times \tan \phi \quad (4.20)$$

- La falla ocurre sobre una superficie circular que pasa por el pie del talud. De acuerdo con Terzaghi (1943), cuando el valor de ϕ es mayor de 5° , el círculo de falla cuyo extremo inferior pasa por el pie del talud, da el factor de seguridad mínimo.
- Se presenta una grieta de tensión vertical en la parte superior, o en la cara del talud.
- La geometría del talud es simple, es decir aquel donde las superficies del terreno limitantes, por la corona y por el pie, son horizontales.
- La localización de la grieta de tensión y la superficie de falla son tales que el factor de seguridad del talud es un mínimo, para las condiciones consideradas de la geometría y del agua subterránea.
- Se consideran cinco condiciones de drenaje, las cuales varían entre un talud completamente seco y un talud totalmente saturado. Estas condiciones se muestran en la figura 4.6.

Las gráficas que deben utilizarse para el análisis se presentan en las figuras 4.7 a 4.11, numeradas de 1 a 5 para coincidir con las condiciones de drenaje indicado en la figura 4.6. La forma de utilizarlas con el fin de obtener el factor de seguridad del talud es la siguiente:

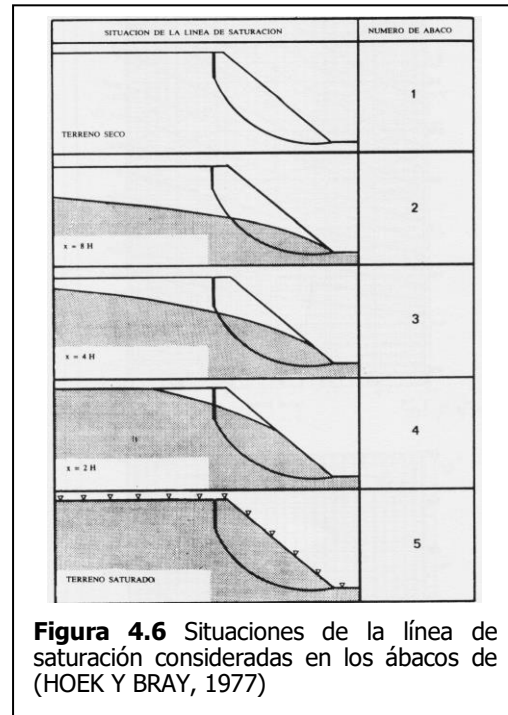


Figura 4.6 Situaciones de la línea de saturación consideradas en los ábacos de (HOEK Y BRAY, 1977)

- Decidir cuál o cuáles de las condiciones de drenaje del talud presentadas en la figura 4.6 se asemeja a las condiciones existentes o esperadas del agua subterránea en el talud.
- Calcular el valor adimensional de la relación,

$$\frac{c}{\gamma \times H \times \tan \phi}$$

Encontrar este valor en la escala circular de la gráfica correspondiente a la condición de drenaje seleccionada (1).

- Seguir la línea radial desde el valor encontrado en 2 hasta su intercepción con la curva que corresponda al ángulo del talud bajo consideración.
- Encontrar el valor correspondiente de $\frac{\tan \phi}{Fs}$ o $\frac{c}{\gamma \times H \times Fs}$, el que sea más conveniente, y calcular el factor de seguridad, Fs .
- Para localizar el círculo de falla crítico (mínimo valor de Fs) y la grieta de tensión crítica, correspondientes al equilibrio límite ($Fs=1$), se emplean las figuras 4.12 y 4.13. La primera se utiliza cuando se trata de taludes drenados, mientras que la segunda, cuando existe nivel freático.
- cualquier condición de drenaje, es decir, entre la 2 y la 5 de la figura 4.7 a 4.11.

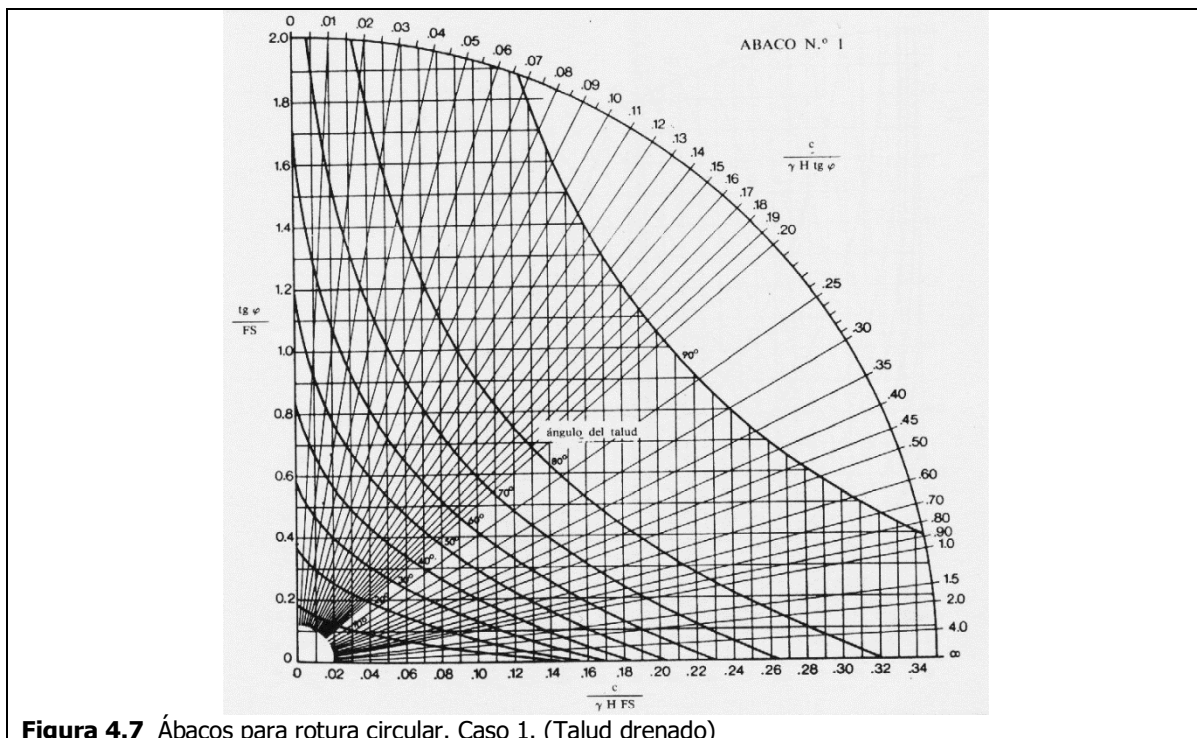


Figura 4.7 Ábacos para rotura circular. Caso 1. (Talud drenado)

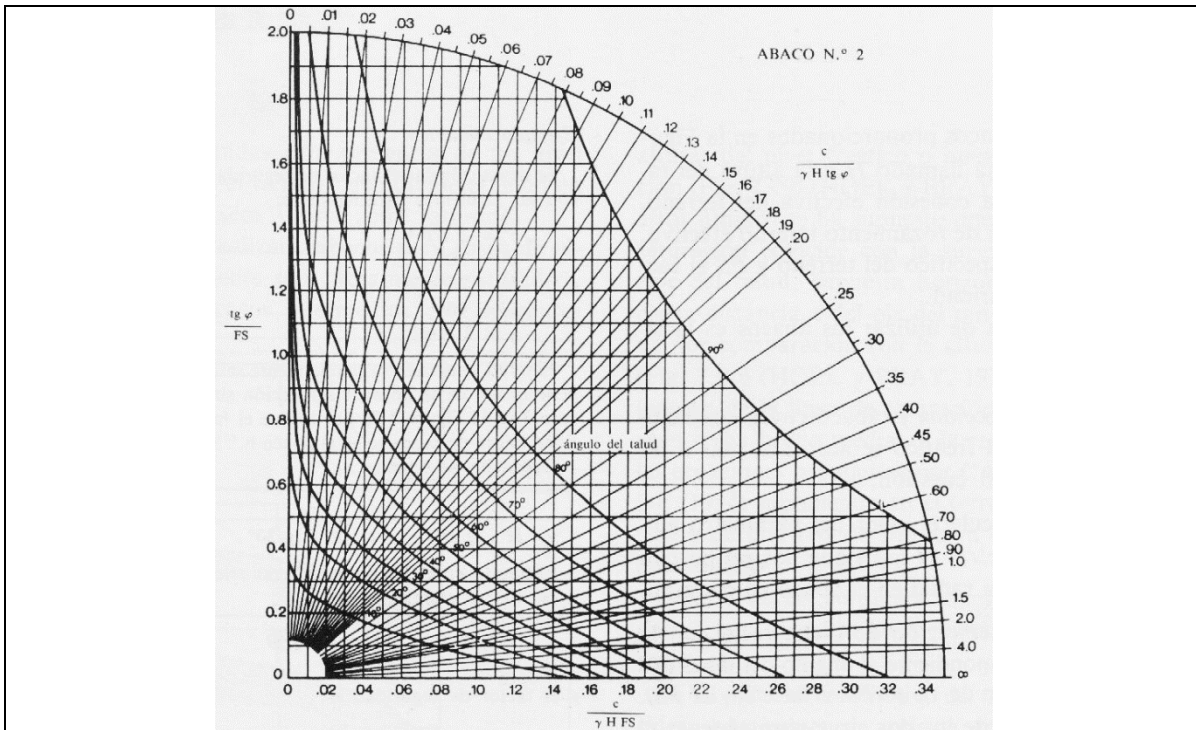


Figura 4.8 Ábacos para rotura circular. Caso 2. (Talud drenado cerca al pie)

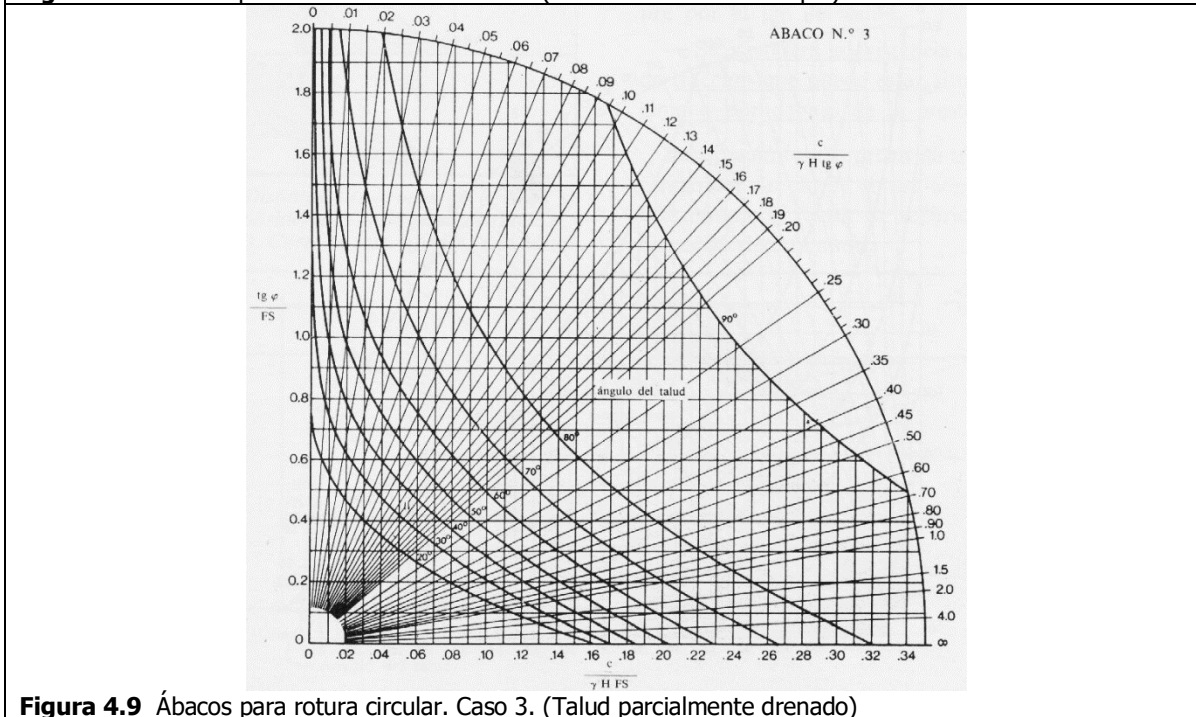


Figura 4.9 Ábacos para rotura circular. Caso 3. (Talud parcialmente drenado)

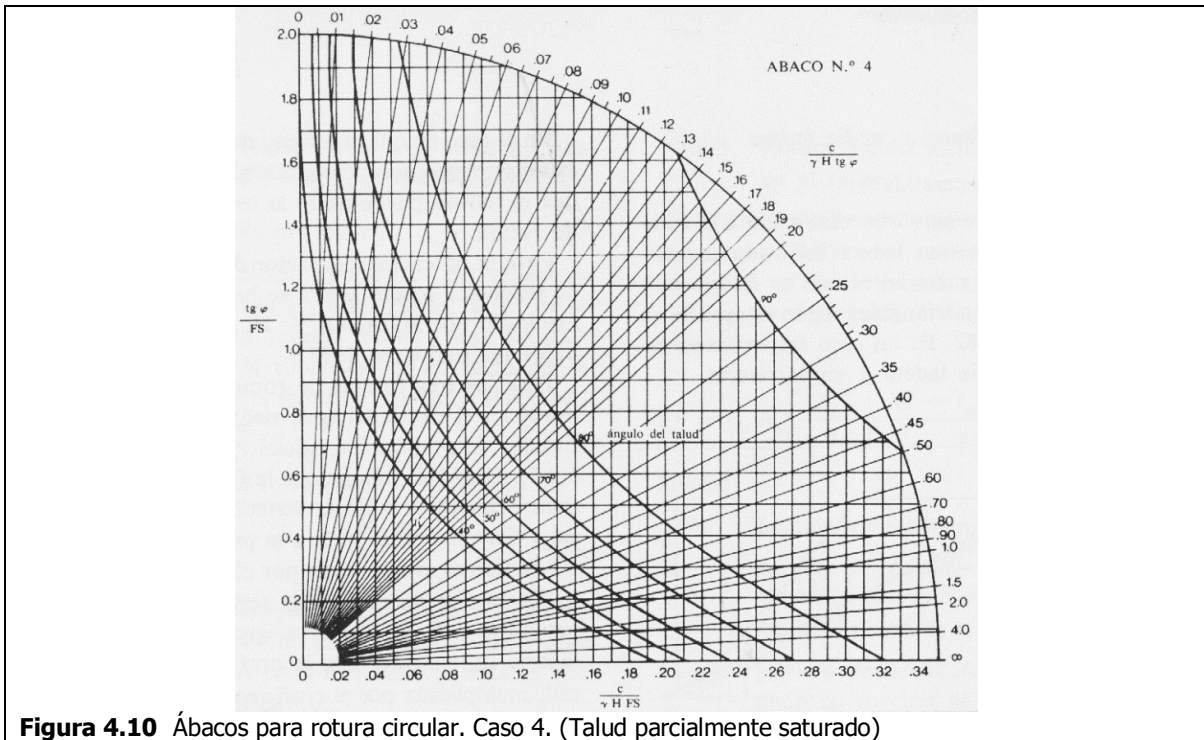


Figura 4.10 Ábacos para rotura circular. Caso 4. (Talud parcialmente saturado)

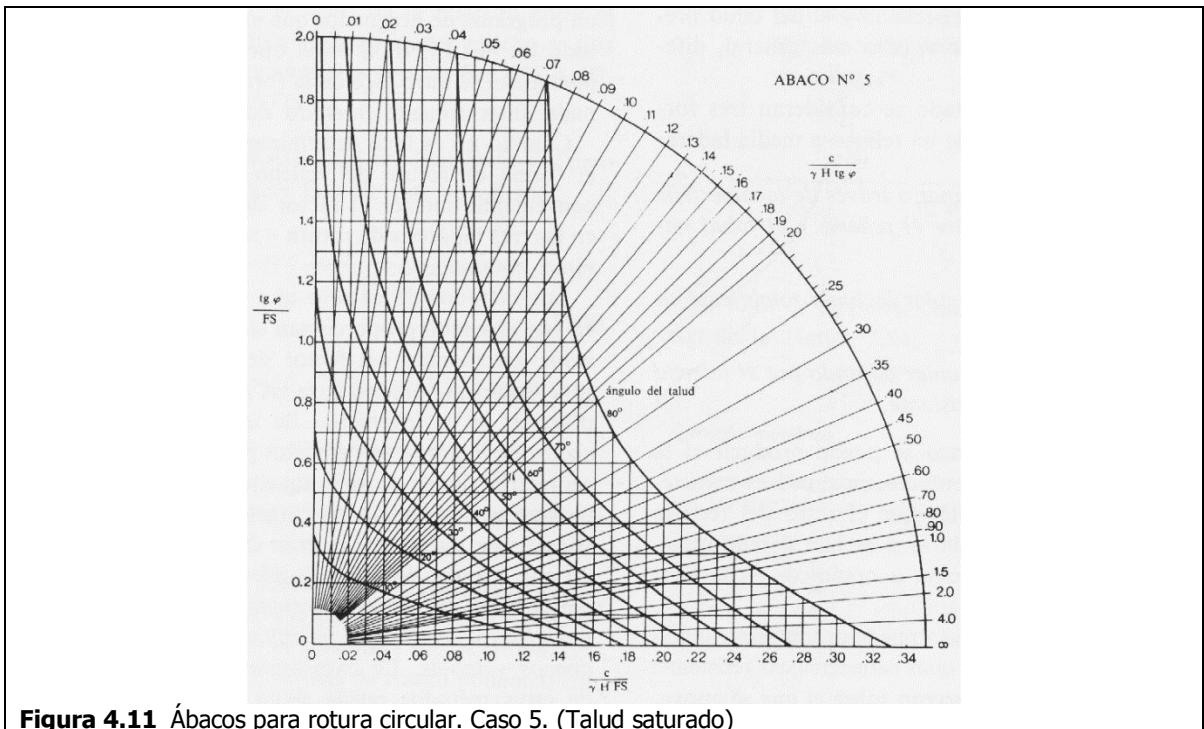


Figura 4.11 Ábacos para rotura circular. Caso 5. (Talud saturado)

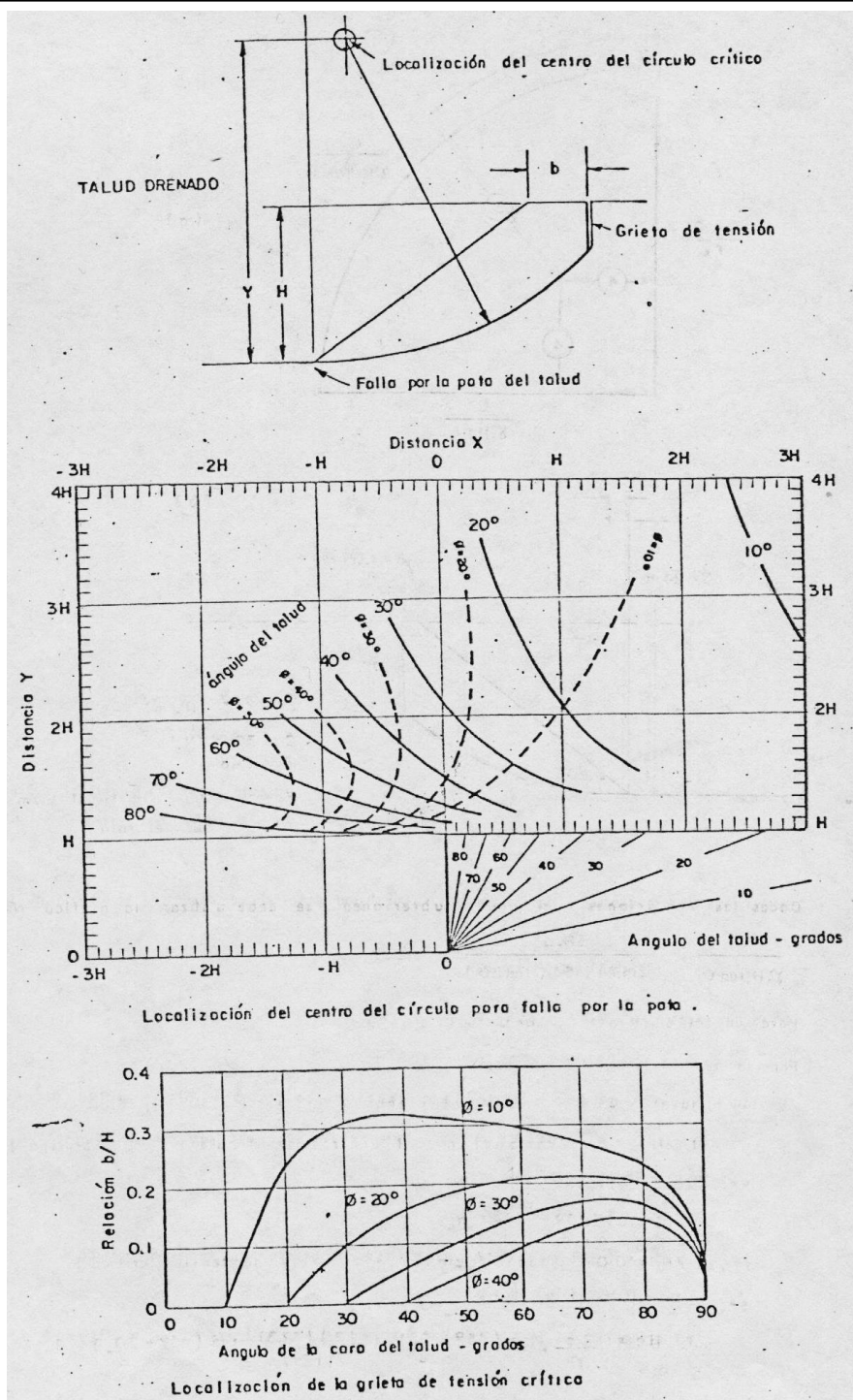
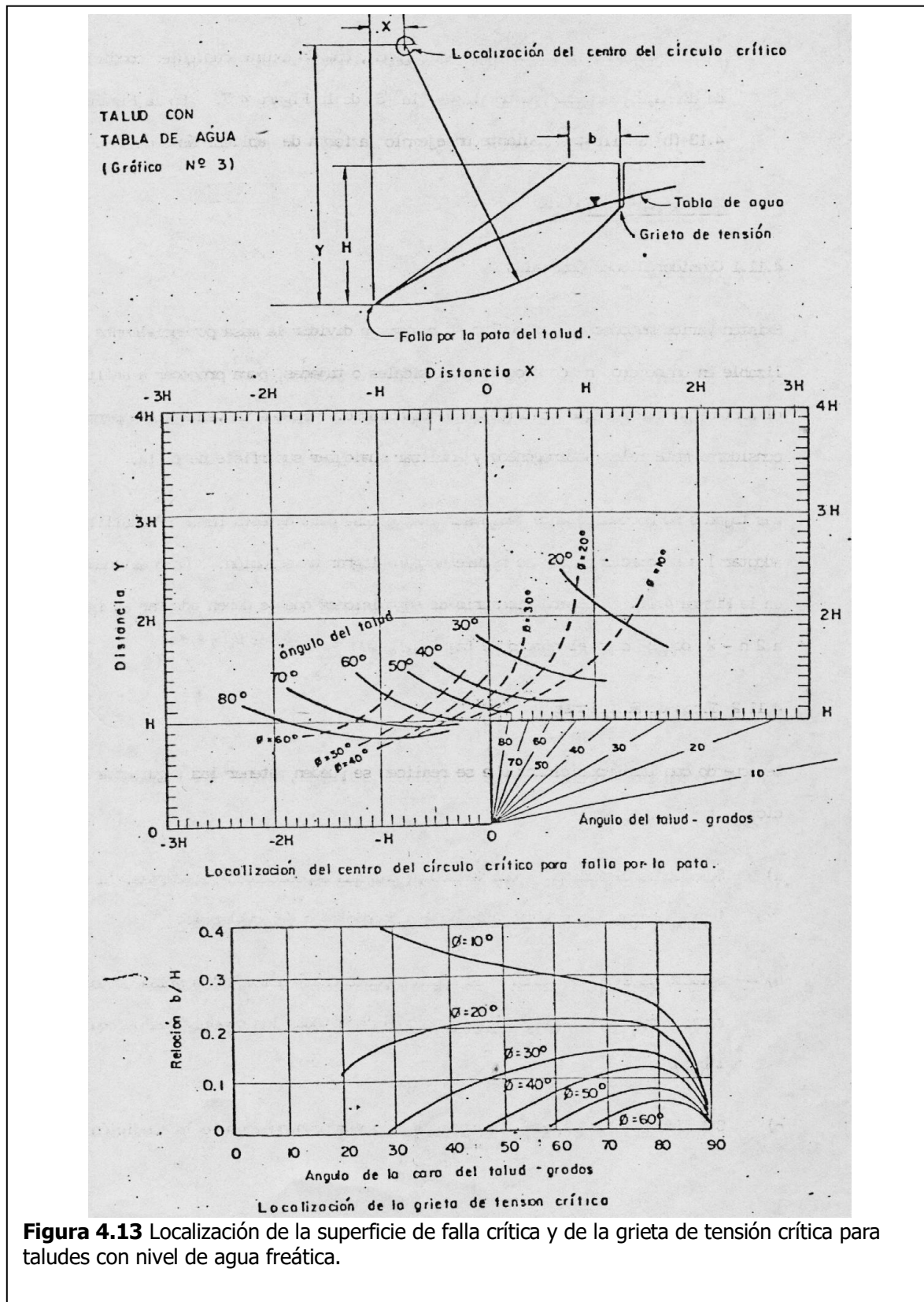


Figura 4.12 Localización de la superficie de falla crítica y de la grieta de tensión crítica para taludes drenados.



Ejemplo.

Se desea calcular el factor de seguridad de un talud de ceniza volcánica con las siguientes características.

$$\begin{aligned} C' &= 2,50 \text{ Ton/m}^2 \\ \phi' &= 30^\circ \\ H &= 6,00 \text{ m} \\ \gamma &= 1,45 \text{ Ton/m}^3 \\ \beta &= 60^\circ \end{aligned}$$

El talud se encuentra parcialmente saturado, siendo la situación de la línea de saturación similar a la del caso 3. El factor de seguridad se calcula utilizando el ábaco No 3.

$$\frac{C'}{\gamma \times H \times \tan \phi} = \frac{2,50}{1,45 \times 6 \times \tan 30^\circ} = 0.498$$

Entrando en el ábaco No 3 con este valor y con la inclinación del talud de 60°, se obtiene:

$$\frac{\tan \phi'}{FS} = 0,144$$

El factor de seguridad es:

$$FS = \frac{\tan 30}{0,144} = 4,00$$

4.8 MÉTODO DE LAS TAJADAS.

Cuando los deslizamientos se producen en terrenos homogéneos, ya sea suelos o rocas altamente fracturadas sin direcciones predominantes de fracturación, en los que además de darse la condición de que las partículas de suelo o roca tengan tamaño muy pequeño en comparación con las dimensiones del talud.

El estudio de la estabilidad de un talud mediante formas de rotura circulares ha sido y es altamente utilizado, pues se acerca razonablemente a la realidad en una gran parte de casos.

Los métodos de cálculo más empleados son los llamados métodos de las dovelas o tajadas, que requieren cálculos muy laboriosos por lo que son importantes programas de computadores.

Se describen el método simplificado de Bishop (plano de falla circular) y el método simplificado de Janbu (plano de falla irregular).

4.8.1 Condiciones Generales.

Existen varios métodos en los cuales se recurre a dividir la masa potencialmente deslizante en un número "n" de secciones verticales o tajadas, para proceder a analizar el sistema de fuerzas que contribuyen al equilibrio. Tienen la ventaja que permiten considerar materiales heterogéneos y analizar cualquier superficie de falla.

Las tajadas no necesariamente deben ser verticales, pero de esta forma se facilita adoptar las suposiciones que se requieren para lograr una solución. Como se muestra en la figura 4.14, el número necesario de suposiciones que se deben adoptar es igual a 2n-2, donde n es el número de tajadas, para 6n-2 incógnitas.

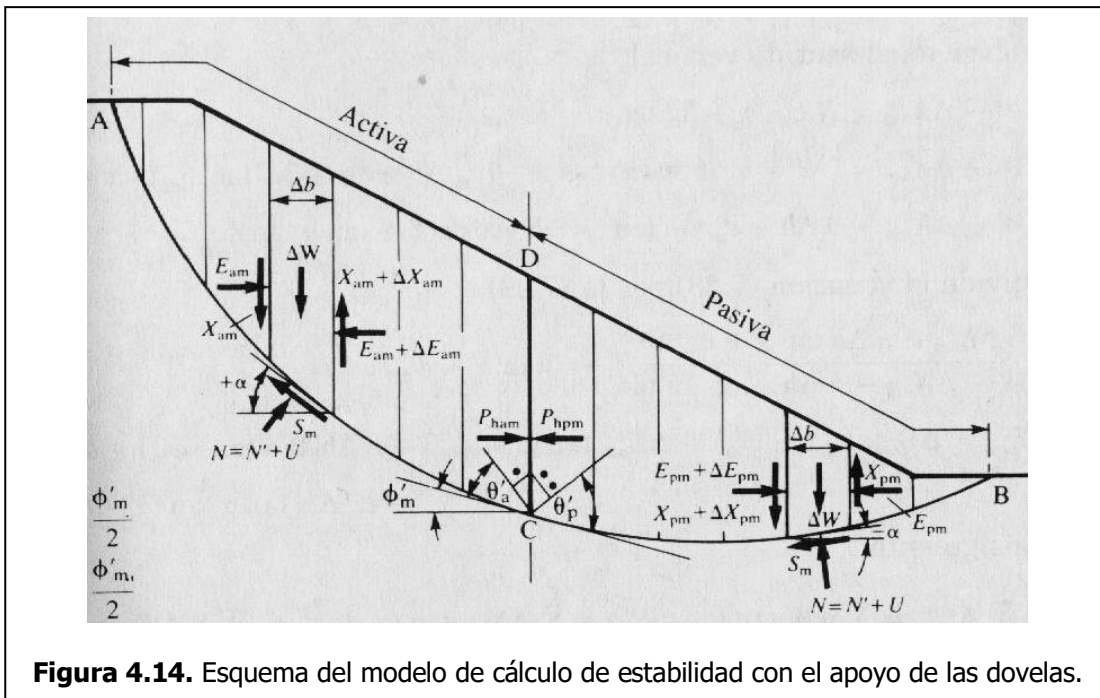
4.8.2 Tipos de soluciones.

De acuerdo con las suposiciones que se realicen se pueden obtener las siguientes soluciones:

- a. **Soluciones rigurosas.** Una vez adoptadas las suposiciones necesarias, la solución encontrada satisface todas las condiciones de equilibrio.
- b. **Soluciones simplificadas.** Se hacen suposiciones adicionales a las necesarias, y por lo tanto la solución no satisface todas las condiciones de equilibrio.
- c. **Soluciones aceptables.** Es una solución rigurosa que cumple la condición adicional de ser aceptable físicamente, es decir,

- Las fuerzas normales N_i , son de compresión.
- Las fuerzas tangenciales, T_i , tienen dirección correcta.
- Las fuerzas de masa de suelo cumplen el criterio de falla.
- Las fuerzas E_i , son de compresión y actúan dentro de la masa de suelo.

4.8.3 Algunas soluciones existentes



Entre las soluciones simplificadas se encuentran las siguientes:

- a. **Solución simplificada de Bishop.**

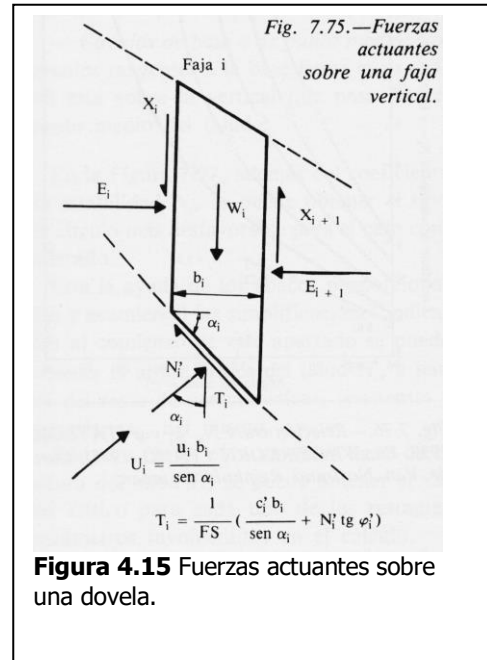
| | | |
|-------|--|---|
| Asume | L_i conocida X_i conocida ($X_i = 0$) Suposiciones totales | = n = $n - 1$ = $2n - 1$ ($> 2n - 2$) |
|-------|--|---|

Es decir, la solución adopta una suposición más de las necesarias, y por lo tanto no se utiliza una condición conocida. Consecuentemente, la última tajada no se encuentra en equilibrio y $E_{n+1} \neq 0$. Cuando la superficie circular de falla no es muy profunda, esta desigualdad no es muy grande y el método simplificado de Bishop proporciona resultados comparables a la solución rigurosa.

Este método supone la superficie de deslizamiento circular. Supone la masa deslizante dividida en "n" dovelas. En la figura 4.15 se presentan las fuerzas actuantes sobre la dovela i.

Establecido el equilibrio de momentos de toda la masa deslizante respecto al centro del círculo de deslizamiento y despejando FS se obtiene:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[c'_i \frac{b_i}{\text{sen} \alpha_i} + N'_i \times \tan \phi'_i \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \times \text{Sen} \alpha_i} \quad (4.21)$$



De las ecuaciones de equilibrio de fuerzas verticales de cada dovela se puede despejar N'_i y sustituyendo en 4.21 se obtiene:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c'_i b_i + \tan \phi'_i (W_i - u_i b_i + X_i - X_{i+1})] \frac{\text{sec} \alpha_i}{1 + \frac{\tan \phi'_i \tan \alpha_i}{FS}}}{\sum_{i=1}^n W_i \times \text{sen} \alpha_i} \quad (4.22)$$

En el método simplificado de Bishop se supone que se cumple:

$$\sum \frac{(X_i - X_{i+1}) \tan \phi'_i \text{sec} \alpha_i}{1 + \frac{\tan \phi'_i \tan \alpha_i}{FS}} = 0$$

Con esta simplificación la expresión 4.22 queda:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c'_i b_i + \tan \phi'_i (W_i - u_i b_i)] \frac{\text{sec} \alpha_i}{1 + \frac{\tan \phi'_i \tan \alpha_i}{FS}}}{\sum_{i=1}^n W_i \times \text{sen} \alpha_i} \quad (4.23)$$

Ecuación que se emplea para obtener el factor de seguridad por el método simplificado de Bishop. Como FS aparece de modo implícito ha de obtenerse mediante un proceso iterativo que suele converger rápidamente.

b. Método convencional, USBR o de Fellenius.

$$\text{Asume} \quad \left\{ \begin{array}{l} L_i \text{ conocida} \\ X_i \text{ conocida} \\ E_i \text{ conocido} \\ \text{Suposiciones totales} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} = n \\ = n - 1 \\ = n - 1 \\ = 3n - 2 \end{array} \right.$$

Es decir, el método hace demasiadas suposiciones (n más de las necesarias) y por lo tanto está lejos de ser una solución rigurosa. En algunos resultados suministra buenos resultados.

El talud sujeto a un flujo de agua que lo atraviesa y con una cabeza (tirante) de agua en su parte exterior. Se supone un círculo de falla como superficie de falla. Una de las dovelas aparece en la parte b de la figura 4.16, donde se dibujan las fuerzas que intervienen.

De acuerdo con la teoría de Fellenius, se acepta que las fuerzas entre las dovelas (E_1, E_2, S_1, S_2) no influyen en el estado de equilibrio de una de ellas, por lo que las fuerzas totales normal y tangencial en la base de la dovela pueden obtenerse a partir del esquema mostrado en el aparte c de la figura 4.16, de donde:

En donde W_i es el peso total de la dovela de ancho b , calculado considerando el peso unitario saturado por debajo del nivel freático y posiblemente no saturado sobre el mismo. En el caso de que la dovela esté cubierta por agua (talud sumergido), el peso del agua sobre la dovela deberá incluirse en W_i , puesto que este es el peso total (suelo y agua) arriba de la base de la dovela que se considere.

Con N_i , el esfuerzo normal total medio en la base de la dovela podrá calcularse como:

$$N_i = W_i \cos \alpha \quad (4.24)$$

$$\sigma_i = \frac{N_i}{\Delta L_i} = \frac{W_i}{\Delta L_i} \cos \alpha = \frac{W_i}{b} \cos^2 \alpha \quad (4.25)$$

donde $\frac{b}{\Delta L_i} = \cos \alpha$

Como se conoce la presión de agua "u" en la base de la dovela, el esfuerzo efectivo en esa zona podrá valorarse como:

$$\sigma'_i = \sigma_i - u = \frac{W_i}{b} \cos^2 \alpha - u \quad (4.26)$$

Con este valor de σ'_i se entra a la envolvente de resistencia en términos de esfuerzos efectivos (que ha de conocerse) y podrá obtenerse un valor de la resistencia disponible, S_i , en la base de la dovela.

$$M_R = R \sum S_i \Delta L_i \quad (4.27)$$

Donde S_i se obtiene a partir de la envolvente de resistencia en términos de los esfuerzos efectivos, a partir de σ'_i , en cada caso.

El momento motor se calcula a partir del peso total de las dovelas, incluyendo el suelo y el agua contenida en él.

$$M_M = R \sum W_i \text{sen} \alpha \quad (4.28)$$

El factor de seguridad es:

$$FS = \frac{M_R}{M_M} \quad (4.29)$$

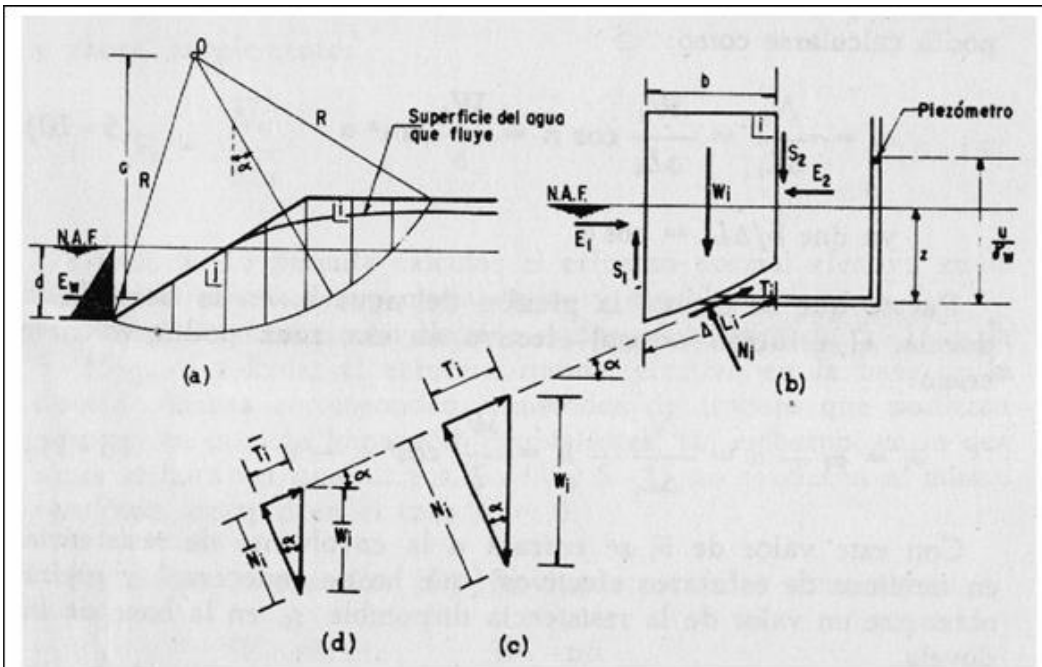


Figura 4.16. Aplicación del método de Fellenius al caso de un talud con flujo y parcialmente sumergido.

c. Método de Janbu.

| | | |
|-------|--|--|
| Asume | L_i conocida Z_i conocida Suposiciones totales | = n = $n - 1$ = $2n - 2 (>2n - 2)$ |
|-------|--|--|

En la solución no se satisface el equilibrio de momento para la última tajada ($M_n \neq 0$). Además introduce error al despreciar durante el análisis un término con diferencial de primer orden.

Similar a la solución de Bishop, la solución simplificada es muy conocida y se puede escribir:

$$FS = \frac{\sum [c'_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'_i] \frac{\sec^2 \alpha_i}{1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi'_i}{FS}}}{\sum W_i \tan \alpha_i} \quad (4.30)$$

Figura 4.17. Formato para el cálculo de la estabilidad de un talud por los métodos de Bishop, Janbu y Fellenius.

cálculo de estabilidad

γ_1 1,43 Ton/m²

Proyecto
Lugar
Perfil No
Condiciones

| Dovela | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------|------------------------------|--------------------|-----|------|-----|------|-----|------|----|------|
| 1 | C | Ton/m ² | | | | | | | | |
| 2 | Φ | ° | | | | | | | | |
| 3 | Tan Φ | | | | | | | | | |
| 4 | b | m | | | | | | | | |
| 5 | h | m | | | | | | | | |
| 6 | W | Ton | | | | | | | | |
| 7 | α | ° | | | | | | | | |
| 8 | U | Ton/m ² | | | | | | | | |
| 9 | Uxb | | | | | | | | | |
| 10 | W-Uxb | | | | | | | | | |
| 11 | 10xtan Φ | | | | | | | | | |
| 12 | cxb | | | | | | | | | |
| 13 | 11+12 | | | | | | | | | |
| 14 | Tan α | | | | | | | | | |
| 15 | Tan Φ xTan α | | | | | | | | | |
| BISHOP | | | | | | | | | | |
| | | | FSA | 1,05 | FSC | | | | | |
| 16 | Wxsena | | | | | | | | | 0,0 |
| 17 | 1+(15)/FSA | | | | | | | | | |
| 18 | (17)xcos α | | | | | | | | | 0,0 |
| 19 | (14)/(18) | | | | | | | | | |
| JANBU | | | | | | | | | | |
| | | | FSA | 1,24 | FSC | | | | | |
| 20 | Wxtan α | | | | | | | | | 0,0 |
| 21 | 1+(15)/FSA | | | | | | | | | |
| 22 | 21xcos ² α | | | | | | | | | 0,0 |
| 24 | (13)/(23) | | | | | | | | | |
| FELLENIUS | | | | | | | | | | |
| | | | | | FSC | | | | | |
| 25 | l | | | | | | | | | |
| 26 | cxl | | | | | | | | | |
| 27 | Wxcos α -uxl | | | | | | | | | |
| 28 | cxl+(27)xtan Φ | | | | | | | | | 0,0 |
| | | | FSB | 0,00 | FSJ | 0,00 | FSF | 0,00 | FS | 0,00 |

4.9 Evaluación de la estabilidad en macizos rocosos¹.

La ley de Mohr-Coulomb para evaluar la resistencia al corte del plano de deslizamiento se considera válida en las discontinuidades de macizos rocosos. En este caso los parámetros resistentes corresponden a la superficie de discontinuidad y no coinciden con los de la masa de la roca.

4.9.1 Proyección semiesférica equiareal de Schmidt.

En taludes sobre macizos rocosos con una o varias familias predominantes de discontinuidades es muy útil representar el plano del talud y de las familias de discontinuidades utilizando una proyección astrográfica o semiesférica. En el estudio se emplea la proyección semiesférica equiareal de Schmidt.

Observando la orientación y la inclinación de las discontinuidades y su posición relativa respecto al plano del talud, se puede deducir cual es el tipo de rotura más probable en el talud. A continuación se describen los principios y aplicaciones, siguiendo lo expuesto en HOEK y BRAY, 1977.

¹ Adaptado de Manual de Ingeniería de Taludes, Instituto Tecnológico Geominero de España.

Para trabajar con la proyección de Schmid es necesario conocer la definición de los siguientes términos geométricos.

- **Buzamiento.** Ángulo que forma con la horizontal la línea de máxima pendiente de un plano.
- **Rumbo.** Recta de intersección del plano con el plano horizontal de referencia.
- **Dirección de buzamiento.** Ángulo, medido en sentido de las agujas del reloj, entre la dirección norte y la proyección horizontal de la línea de máxima pendiente considerada siempre en el sentido hacia el que desciende el plano.

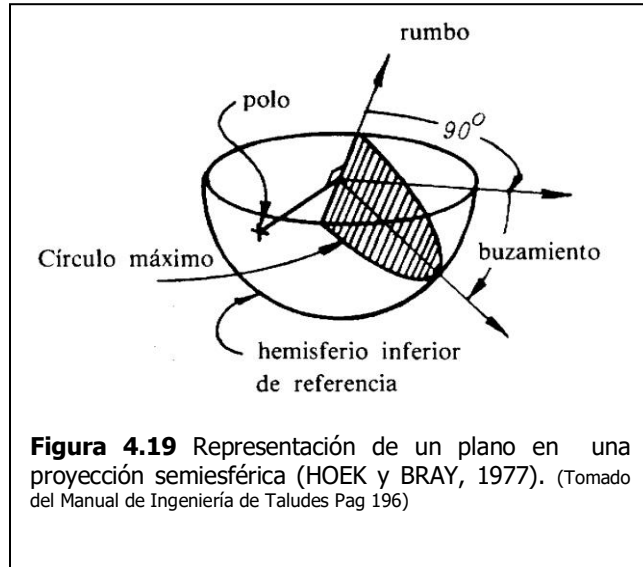


Figura 4.19 Representación de un plano en una proyección semiesférica (HOEK y BRAY, 1977). (Tomado del Manual de Ingeniería de Taludes Pag 196)

□

Un plano queda definido por su buzamiento y su orientación. Esta última se determina mediante la dirección de buzamiento o el ángulo que forma el rumbo con la dirección determinada (generalmente el norte), aunque en este caso es preciso especificar el sentido hacia el que buza el plano. (Figura 4.18)

Para representar un plano en una proyección semiesférica se la supone pasando por el centro de una esfera de la que se considera únicamente el hemisferio inferior Figura 4.19 El plano queda definido por el círculo máximo y también se puede definir mediante el polo que es el punto de intersección de la semiesfera con una recta perpendicular al plano desde el centro de la misma, según se aprecia en la figura 4.19

La superficie semiesférica puede proyectarse sobre un plano tangente a la misma. En la figura 4.20 (HOEK y BRAY, 1977) se muestra el método de proyección equiareal, el aquí utilizado. La proyección del polo o del círculo máximo del plano constituye la representación en proyección equiareal del mismo.

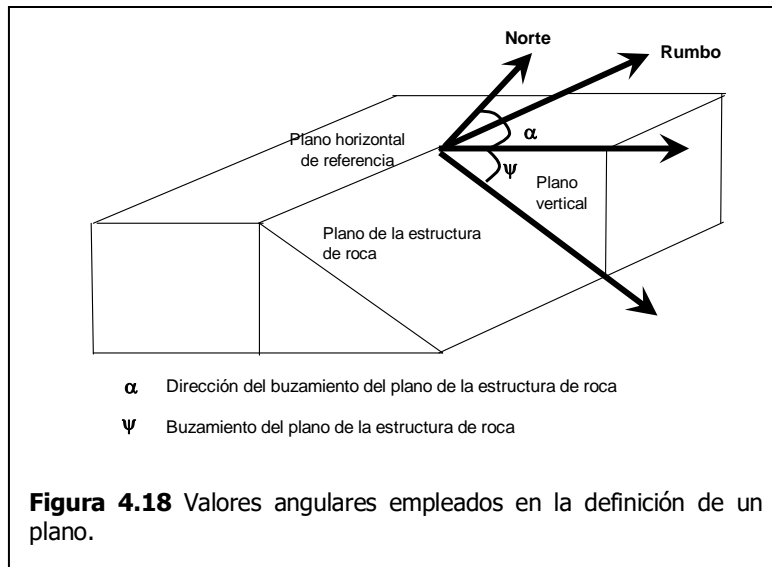


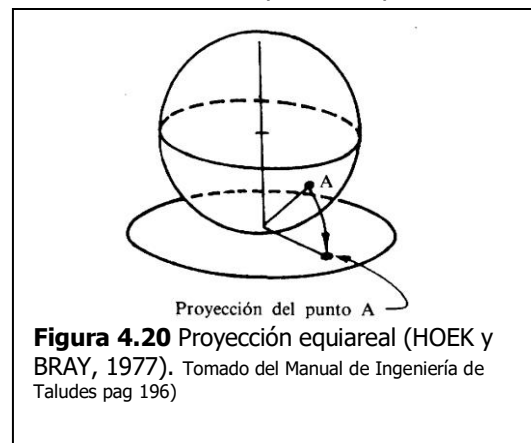
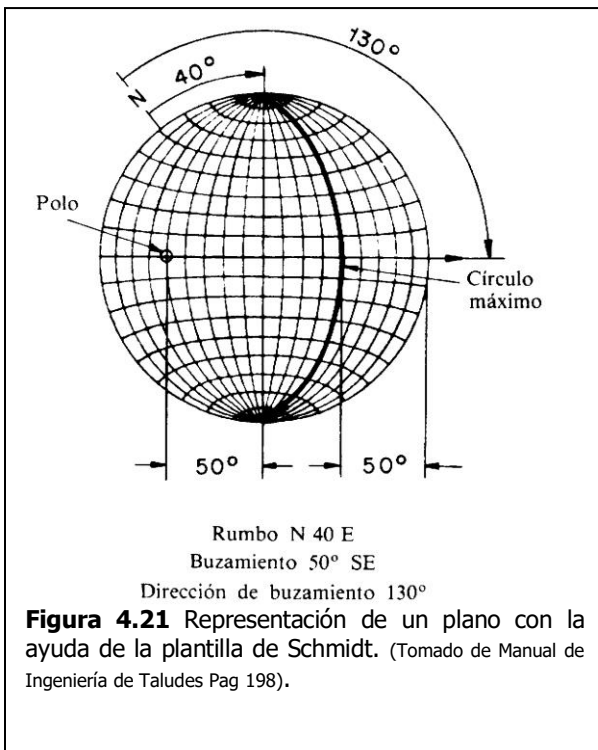
Figura 4.18 Valores angulares empleados en la definición de un plano.

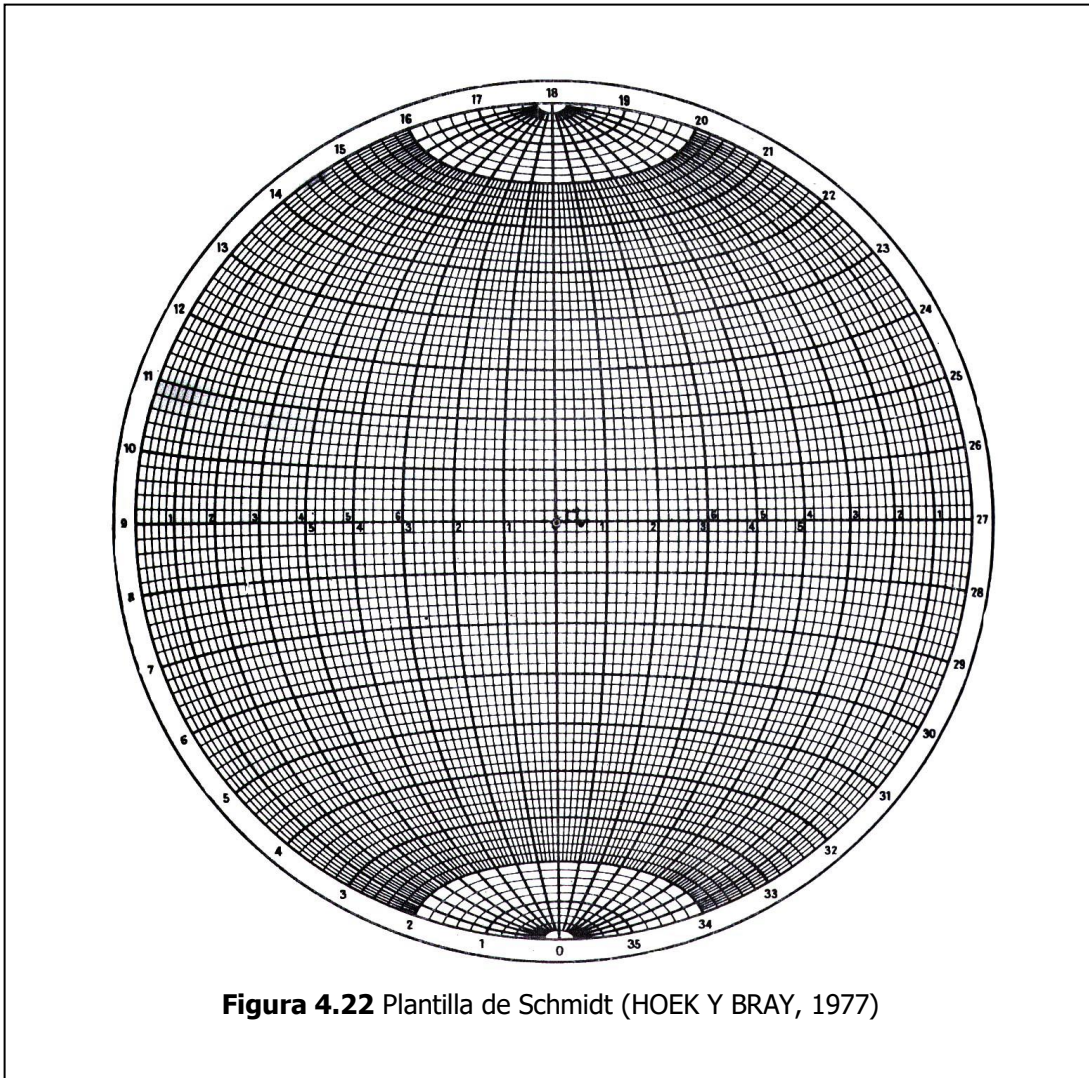
La representación de una recta es la proyección del punto de intersección de la misma con la semiesfera de referencia.

La representación de planos y rectas se hace con la ayuda de la plantilla de Schmidt, la cual se obtienen trazando los meridianos y paralelos de una esfera con una cierta equidistancia angular y proyectándolos desde un punto del ecuador de la misma. En la figura 4.22 se muestra una plantilla de Schmidt construida con una equidistancia angular de 2°.

Para trabajar con la plantilla se debe dibujar en un papel transparente un círculo de igual radio que el de la plantilla y definir en él la dirección norte cuya situación es, en principio, arbitraria. Haciendo coincidir los centros de la plantilla y del papel, y orientando ambos de forma que el rumbo del plano a representar coincida con el eje N-S de la plantilla (Figura 4.21), el círculo máximo del plano coincidirá con uno de los meridianos de la plantilla que quedará a uno u otro lado del eje N-S de la misma, dependiendo del sentido en que buza el plano. Para encontrar el meridiano buscado se debe medir en el eje E-O de la plantilla plano y desde la circunferencia exterior de la misma un número de grados igual al buzamiento del plano en cuestión. El ángulo entre el norte (Definido previamente en el papel) y el extremo del eje E-O de la plantilla desde el que se mide el buzamiento del plano, es el buzamiento del plano representado.

El polo del plano se encuentra en el eje E-O de la plantilla y para situarlo deben medirse desde el centro de la misma y alejándose del círculo máximo un número de grados igual al buzamiento. En la figura 4.21 se representa el polo y el círculo máximo de un plano cuyo rumbo forma 40° con el norte, medidos hacia el este (N40°E) y tiene un buzamiento 50° SE. El plano se puede definir también por su buzamiento y su dirección del buzamiento (50/130)





4.9.2 Cálculo de la estabilidad de un talud infinito.

Se define talud infinito aquel de espesor constante y la masa involucrada en la falla de poco espesor respecto a la altura del talud. El plano de falla es paralelo al talud y la falla es común en materiales con baja o nula cohesión. La falla se puede presentar en suelos cohesivos, cuando el estrato descansa sobre materiales más resistentes, de escaso espesor y plano paralelo a la cara del talud. El talud se supone con suelos homogéneos, con la cohesión, el ángulo de fricción y el peso unitario constantes en toda la extensión de las masas.

a. Talud drenado.

La figura 4.23 presenta el esquema de las fuerzas que actúan sobre un elemento de dimensiones conocidas. El peso de la masa es:

$$W = ah\gamma \quad (4.31)$$

En donde

a, h : Dimensiones del elemento.
 γ : Peso unitario natural del suelo.

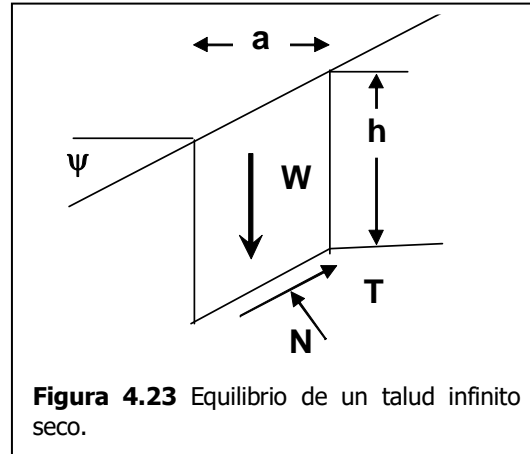


Figura 4.23 Equilibrio de un talud infinito seco.

Del equilibrio de fuerzas se obtiene:

$$W - T \sin \psi - N \cos \psi = 0$$

$$T \cos \psi - N \sin \psi = 0$$

En donde

N: Esfuerzo normal efectivo sobre una superficie paralela al talud a una profundidad h.

T: Esfuerzo tangencial sobre el plano paralelo.

ψ : Ángulo del talud.

Despejando N y T y definiendo el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte del terreno y la necesaria para mantener el equilibrio, se tiene:

$$FS = \frac{\frac{c}{\gamma \times h \cos^2 \psi} + \tan \phi}{\tan \psi} \quad (4.32)$$

En materiales no cohesivos el factor de seguridad (FS) es independiente de h. En este caso, para talud drenado, se tiene:

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \psi} \quad (4.33)$$

El talud es estable si $\phi > \psi$, e inestable en caso contrario.

b. Talud con flujo de agua paralelo al mismo.

En este se presenta una filtración en régimen estacionario con el nivel freático paralelo a la superficie del talud. La red de flujo presenta las líneas de corriente paralelas al talud y las equipotenciales perpendiculares. Se supone el plano de falla situado a una profundidad h . La altura del nivel freático es mh , con valores del parámetro m entre 0 y 1.

La presión piezométrica a la profundidad h , se puede deducir de la figura 4,24. La altura piezométrica ($z+p/\gamma_w$) es constante según la equipotencial AB. Al igualar las alturas piezométricas en A y B y teniendo en cuenta que $P_A=0$ (a está a Presión atmosférica), se obtiene la presión intersticial u_h , a la profundidad h es:

$$u_h = P_B = h_p \gamma_w = mh \gamma_w \cos^2 \psi \quad (4.34)$$

Siendo h_p la diferencia de cota ente A y B.

Las presiones hidrostáticas sobre las caras laterales del bloque se anulan y la resultante de la presión de poro en la base del elemento, vale:

$$U = mh \gamma_w \cos^2 \psi \times \frac{a}{\cos \psi} = amh \gamma_w \cos \psi$$

Del equilibrio de fuerzas en el bloque se obtiene:

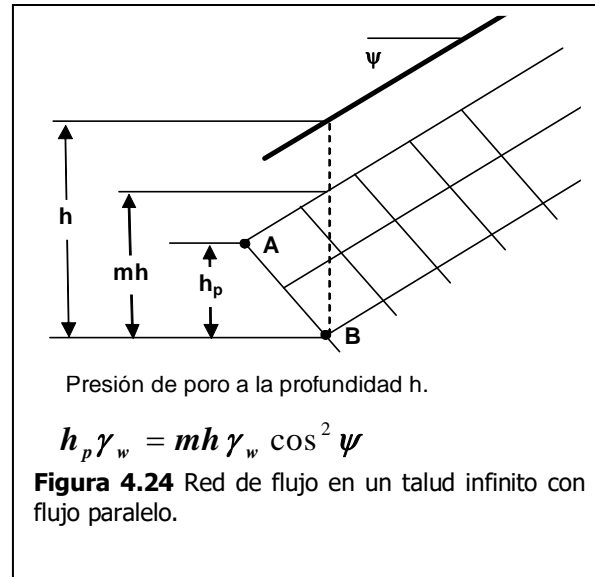
$$T = \gamma a h \sin \psi$$

$$N = \gamma a h \cos \psi - U = (\gamma - m \gamma_w) a h \cos \psi$$

El peso unitario no es constante en toda la masa deslizante, dado que se encuentra parcialmente saturada. El valor del peso unitario γ que se emplea es un valor intermedio.

$$FS = \frac{\frac{c}{h \cos^2 \psi} + \tan \phi (\gamma - m \gamma_w)}{\gamma \tan \psi} \quad (4.35)$$

Si el terreno presenta saturación total, $m=1$ y $\gamma=\gamma_{sat}$



$$\gamma - m\gamma_w = \gamma_{sat} - \gamma_w = \gamma'$$

Para el caso de un terreno saturado con suelo no cohesivo la ecuación 4.35 queda:

$$FS = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \frac{\tan \phi}{\tan \psi} \quad (4.36)$$

b. Falla plana.

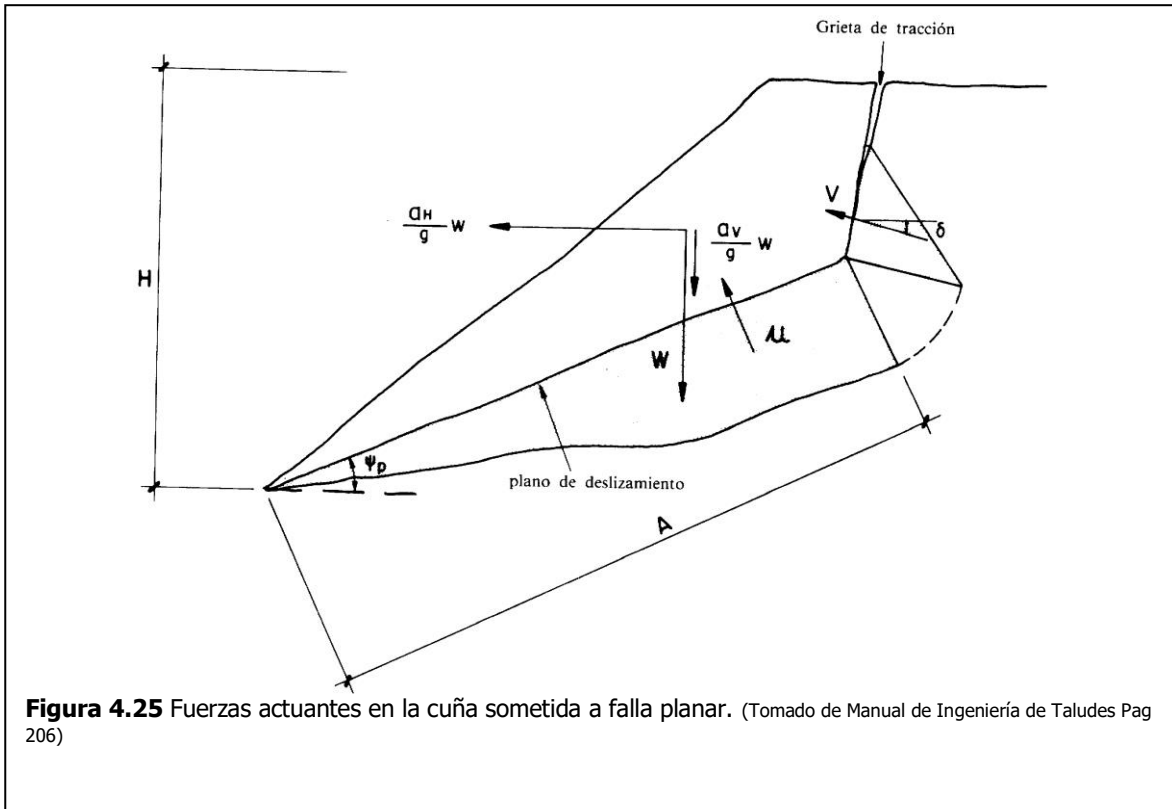
Se presenta cuando el deslizamiento se presenta a través de una superficie plana. Esta falla se presenta cuando la fracturación dominante del macizo rocoso se orienta concordante con el talud e intercepta el pie del talud. En taludes conformados por suelos granulares de buena resistencia, limitados por un estrato de menor espesor y menor resistencia.

Para que se presente la falla planar y el modelo físico se pueda analizar por este método, se deben presentar dos condiciones:

Los rumbos del plano del talud y del plano de falla deben ser paralelos o casi paralelos, formando entre sí ángulos menores de 20°.

Los límites laterales de la masa deslizante han de producir una resistencia al deslizamiento despreciable.

Estas condiciones simplifican el problema de análisis, porque permiten analizarlo en dos dimensiones, considerando un bloque de ancho unitario, limitada por dos planos verticales.



La geometría del plano del talud y de las discontinuidades, en una proyección semiesférica de Schmidt, presentan rumbos similares y el buzamiento de la discontinuidad menor que aquel.

El factor de seguridad se logra al determinar el cociente entre las fuerzas que tienden a producir el deslizamiento y las resistentes que aporta el terreno y se oponen a las primeras. Las fuerzas se suponen constantes en todo el plano y no se consideran los momentos que se puedan presentar sobre el plano de rotura. El plano de falla se encuentra limitado, en su parte superior, por una grieta de tensión, plana y puede o no estar llena de agua. En el plano de falla aparecen presiones intersticiales que dependen de la posición del nivel freático y de las características del terreno. El cálculo considera el sismo cuyo efecto se asimila con una aceleración horizontal a_h y otra vertical a_v .

El cálculo del factor de seguridad se logra con la siguiente expresión:

$$FS = \frac{c'A + \left\{ W \left[\left(1 + \frac{a_v}{g} \right) \cos \psi_p - \frac{a_h}{g} \operatorname{sen} \psi_p \right] - U - V \operatorname{sen}(\psi_p + \delta) \right\} \tan \phi}{W \left[\left(1 + \frac{a_v}{g} \right) \operatorname{sen} \psi_p + \frac{a_h}{g} \cos \psi_p \right] + V \cos(\psi_p + \delta)} \quad (4.37)$$

En donde:

| | | | |
|----------|--|----------|--|
| c | Cohesión efectiva en el plano de falla | U | Resultante de las presiones de poro que actúan en el plano de falla |
| ϕ | Ángulo de rozamiento efectivo en el plano de falla. | δ | Ángulo que forma la grieta de tracción con la vertical |
| A | Área de la superficie del deslizamiento, de ancho unidad | V | Resultante de las presiones de poro que actúan en la grieta de tracción. |
| W | Peso de la masa deslizante, de ancho unidad | g | Aceleración de la gravedad |
| ψ_p | Ángulo que forma el plano de falla con la horizontal | | |

La fórmula se puede aplicar al caso de no sismo, haciendo $a_v = a_h = 0$, y al caso de terreno totalmente drenado, haciendo $U = V = 0$. Si no se considera grieta de tracción, el plano de falla se prolonga hasta la superficie del terreno y $V = 0$.

4.10. MÉTODOS DE LAS DOVELAS.

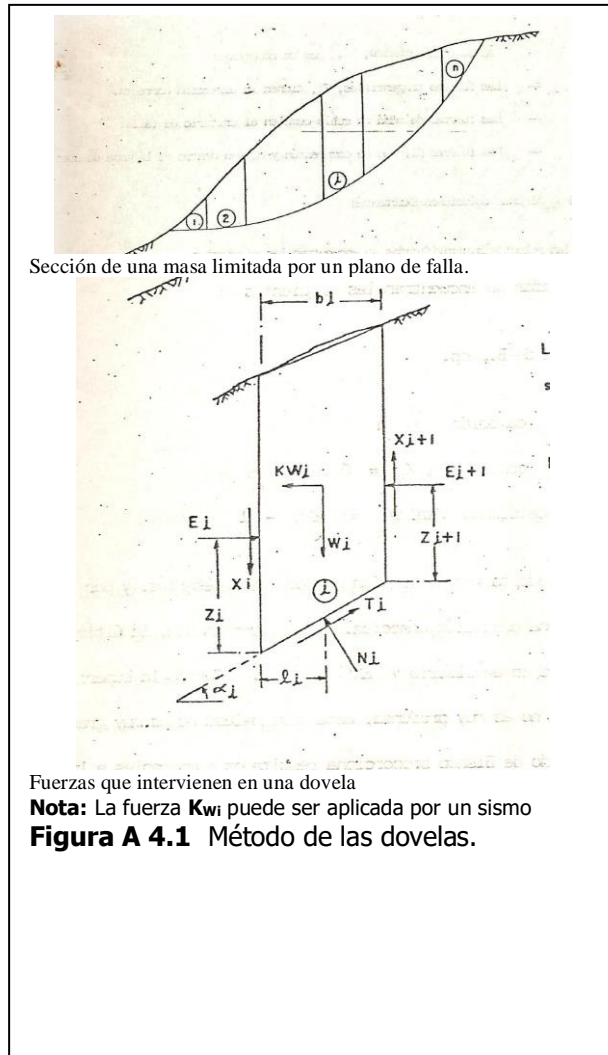
1.1 Consideraciones generales

Existen varios métodos en los cuales se recurre a dividir la masa potencialmente inestable en un número "n" de secciones verticales o dovelas, para proceder a analizar el sistema de fuerzas que contribuyen al equilibrio. Tiene la ventaja que permiten considerar materiales heterogéneos y analizar cualquier superficie de falla.

Las dovelas no necesariamente deben ser verticales, pero esta forma facilita adoptar las suposiciones que se requieren para lograr la solución. Como se muestra en la figura A-4.1, el

número necesario de suposiciones que se deben adoptar es igual a $2n-2$, donde n es el número de dovelas, para $6n-2$ incógnitas.

En las dovelas se tienen las siguientes incógnitas:



Incógnitas totales para n dovelas

| | Cada dovela |
|-------|----------------------------|
| N_i | n |
| T_i | n |
| x_i | $n - 1$ |
| E_i | $n - 1$ |
| l_i | n |
| z_i | $n - 1$ |
| | $6n - 3$ |

Además se desconoce el factor de seguridad "FS", igual para todas las dovelas. Esto permite ajustar el total de incógnitas a **6n - 2**

En cada dovela se puede establecer las siguientes ecuaciones:

$$\Sigma FV_i = 0$$

$$\Sigma FU_i = 0$$

$$\Sigma M_i = 0$$

$$T_i = f(N_i) \quad \text{de la ecuación de Mohr Coulomb}$$

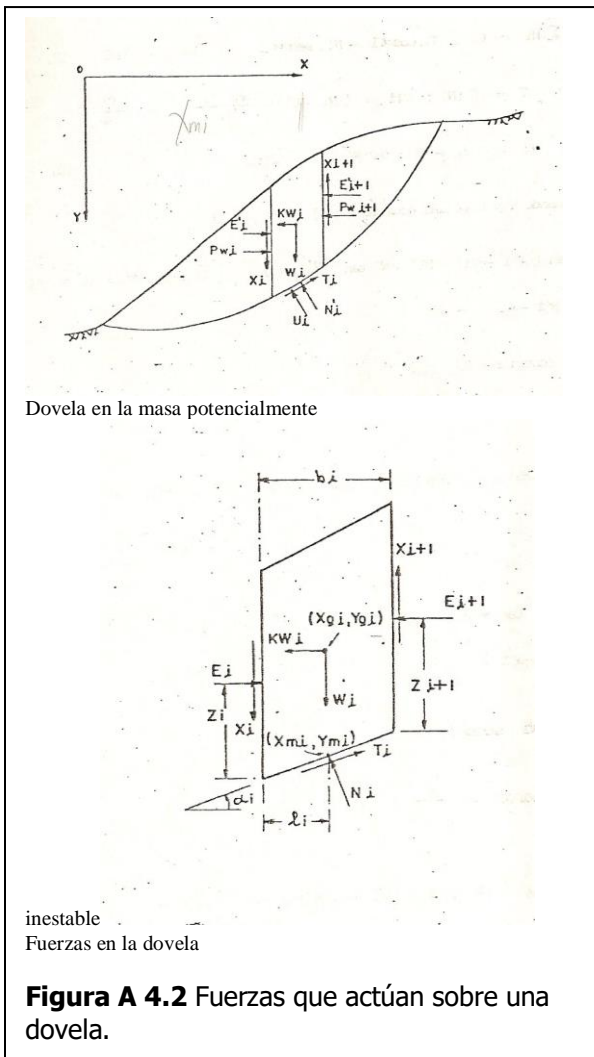
Por lo tanto el total de ecuaciones conocidas es **4n**

Esto conduce a que se debe realizar un total de suposiciones igual a **2n - 2** para obtener la solución.

4.10.1 Equilibrio de una dovela.

Equilibrio de fuerzas.

Independiente de la forma de la superficie de falla y considerando las fuerzas presentadas en la figura a 4.2, el equilibrio de una dovela se establece de la siguiente manera:



$$N_i = N'_i + U_i$$

$$E_i = E'_i + PW_i$$

$$E_{i+1} = E'_{i+1} + PW_{i+1}$$

$$X_{i+1} - X_i = DX_i$$

$$E_{i+1} - E_i = DE_i$$

$$L_i = b_i \times \sec \alpha_i \quad (L_i \neq l_i)$$

$$\tan \psi' = \frac{\tan \phi'}{FS}$$

$$\bar{C}' = \frac{C'}{FS}$$

(X_{gj}, Y_{gj}) : Coordenadas del centro de gravedad de la masa de suelo con respecto al origen de coordenadas, (O).

(X_{mj}, Y_{mj}) : Coordenadas del punto de aplicación de la fuerza N_j .

$$\Sigma V_i = 0; N_i \times \cos \alpha_i + T_i \times \operatorname{sen} \alpha_i = W_i - DX_i \quad (1)$$

$$\Sigma H_i = 0; T_i \times \cos \alpha_i - N_i \times \operatorname{sen} \alpha_i = KW_i + DE_i \quad (2)$$

$$\text{donde, } T = f(N); T_i = (N_i - U_i) \frac{\tan \phi'_i}{FS} + \frac{C'_i \times L_i}{FS}$$

$$T_i = (N_i - U_i) \operatorname{Tan} \psi'_i + C'_i \times L_i \quad (3)$$

Eliminando T y N de las ecuaciones (1), (2) y (3),

$$DX_i \cdot \operatorname{Tan}(\psi'_i - \alpha_i) + DE_i = W_i \cdot \operatorname{Tan}(\psi'_i - \alpha_i) + [\bar{C}'_i \cdot L_i \cdot \cos \psi'_i - U_i \cdot \operatorname{sen} \psi'_i] \operatorname{sec}(\psi'_i - \alpha_i) - KW_i \quad (4)$$

De las ecuaciones (1) y (3)

$$N_i = [-\bar{C}'_i \cdot b_i \cdot \tan \alpha_i + W_i + U_i \operatorname{sen} \alpha_i \cdot \tan \psi'_i] \cos \psi'_i \cdot \operatorname{sec}(\psi'_i - \alpha_i) - DX_i \cdot \cos \psi'_i \cdot \operatorname{sec}(\psi'_i - \alpha_i) \quad (5)$$

$$T_i = [\bar{C}'_i \cdot b_i + (W_i - U_i \cdot \cos \alpha_i) \tan \psi'_i] \cos \psi'_i \cdot \operatorname{sec}(\psi'_i - \alpha_i) - DX_i \cdot \operatorname{sen} \psi'_i \cdot \operatorname{sec}(\psi'_i - \alpha_i) \quad (6)$$

Remplazando en (6) $u_i = ru_i \cdot W_i \cdot \operatorname{sec} \alpha_i$, donde

$$ru_i = \text{parámetro de presión de poros} = \frac{u_i}{\gamma_i \cdot H_i}$$

$$T_i = \frac{1}{FS} [C'_i \cdot b_i + W_i \cdot (1 - ru_i) \tan \phi'_i - DX_i \cdot \tan \phi'_i] \frac{\operatorname{sec} \alpha_i}{1 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi'_i}{FS}} \quad (7)$$

Sumando todas las ecuaciones dadas por (4),

$$\Sigma DX_i \cdot \tan(\psi'_i - \alpha_i) + \Sigma DE_i = \Sigma D_i - K \Sigma W_i \quad (8)$$

$$\text{donde, } D_i = W_i \cdot \tan(\psi'_i - \alpha_i) + [\bar{C}'_i \cdot L_i \cdot \cos \psi'_i - U_i \cdot \operatorname{sen} \alpha_i] \operatorname{sec}(\psi'_i - \alpha_i) \quad (9)$$

Haciendo arreglos algebraicos e introduciendo, $u_i = ru_i \cdot W_i \cdot \operatorname{sec} \alpha_i$

$$D_i = W_i \cdot \tan \alpha_i + \frac{i}{FS} [C'_i \cdot b_i + W_i (1 - ru_i) \tan \phi'_i] \frac{\operatorname{sec}^2 \alpha_i}{1 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi'_i}{FS}} \quad (10)$$

La solución simplificada de Janbu se obtiene de la ecuación (8), asumiendo $DX_i = 0$, $K=0$ y $\Sigma DE_i = 0$ (No se consideran fuerzas horizontales externas). De esta manera $\Sigma D_i = 0$, y de la ecuación (10) se llega a la expresión de Janbu simplificado.

$$FS = \frac{\Sigma [c'_i \times b_i + W_i (1 - ru_i) \tan \phi'_i] \times \frac{\operatorname{sec}^2 \alpha_i}{1 + \frac{\tan \alpha_i \times \tan \phi'_i}{FS}}}{\Sigma W_i \times \tan \alpha_i} \quad (11)$$

Donde el valor de "FS" se modifica por aproximaciones sucesivas hasta obtener el valor que satisface la ecuación.

Con el fin de satisfacer el equilibrio estático también se debe cumplir la condición de equilibrio de momentos. Los momentos pueden tomarse alrededor de cualquier punto arbitrario; en el caso de una solución rigurosa el centro del momento no tiene importancia, mientras que para una solución simplificada, este puede influir notoriamente en el resultado.

1. Equilibrio de momento.

Si se considera la dovela mostrada en la figura A4.2, y se toman momentos alrededor del punto de aplicación de la fuerza N_i , se tiene:

$$W_i(X_{mi} - X_{gi}) + K.W_i(Y_{mi} - Y_{gi}) + X_i.l_i + X_{i+1}(b_i - l_i) + E_{i+1}[z_{i+1} + (b_i - l_i)\tan\alpha_i] - E_i(z_i - l_i \tan\alpha_i) = 0 \quad (12)$$

Y arreglando términos

$$W_i(X_{mi} - X_{gi}) + K.W_i(Y_{mi} - Y_{gi}) + X_i.b_i + DX_i(b_i - l_i) + E_i[b_i \tan\alpha_i + Z_{i+1} - Z_i] + DE_i[Z_{i+1} + (b_i - l_i \tan\alpha_i)] = 0 \quad (13)$$

El método riguroso de Janbu utiliza las ecuaciones (4) y (13) con $X_{mi} = Y_{mi}$ para satisfacer la ecuación (8), pero la ecuación (13) desprecia los dos términos subrayados. Consecuentemente en su equilibrio de momento hay un error desconocido, que depende del tamaño de la dovela. El procedimiento de Janbu consiste en asumir conjunto de valores de Z_i y X_i para resolver el FS de la ecuación (10); con este último se calcula E_i de la ecuación (4) para encontrar un nuevo conjunto de valores de X_i en la ecuación (19). El procedimiento se repite hasta hallar la convergencia.

4.10.2 Equilibrio de la masa total

1. Superficies circulares.

Como se puede apreciar en la figura A 4.2, para superficies de falla circulares el mejor punto para tomar momentos es el centro del círculo, dado que todas las fuerzas normales pasan por éste. Por otra parte, las fuerzas entre las dovelas, E_i y X_i no producen momento alguno para el equilibrio de la masa total. Suponiendo que KW_i actúa en el punto medio de la dovela,

$$\Sigma T_i.R = \Sigma W_i.R \sin\alpha_i + K \Sigma W_i \left(R \cos\alpha_i - \frac{h_i}{2} \right) \quad (14)$$

Y utilizando la ecuación (7) se llega a,

$$\frac{1}{FS} \Sigma (c_i.b_i + W_i(1 - ru_i) \tan\phi'_i - DX_i \tan\phi'_i) \frac{\sec\alpha_i}{1 + \frac{\tan\alpha_i \tan\phi'_i}{FS}} = \Sigma W_i \sin\alpha_i + K \Sigma W_i \left(\cos\alpha_i - \frac{h_i}{2R} \right) A$$

reagrupando términos se llega,

$$FS = \frac{\sum [c_i \cdot b_i + W_i(1 - ru_i) \tan \phi'_i - DX_i \cdot \tan \phi'_i] \frac{\sec \alpha_i}{1 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi'_i}{FS}}}{\sum W_i \cdot \text{sen} \alpha_i + K \sum W_i \cdot \left(\cos \alpha_i - \frac{h_i}{2R} \right)} \quad (15)$$

Con el fin de obtener una solución rigurosa se deben resolver simultáneamente las ecuaciones (8) y (15), para encontrar un conjunto de valores de X_i y FS.

De la forma mencionada se encuentra la solución rigurosa de Bishop, es decir, se asume un conjunto de valores de DX_i y se encuentra FS con la ecuación (15). Se verifica si satisface la ecuación (8), si esto no sucede, se modifican los valores de DX .

La solución simplificada de Bishop satisface únicamente la ecuación (15) con $DX_i=0$. De esta forma y para $K=0$, se obtiene

$$FS = \frac{\sum [c_i \cdot b_i + W_i(1 - ru_i) \tan \phi'_i] \frac{\sec \alpha_i}{1 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi'_i}{FS}}}{\sum W_i \cdot \text{sen} \alpha_i} \quad (16)$$

Dado que FS aparece en ambos términos de la ecuación, se debe iterar para lograr la solución.

2. Superficies generales.

Un punto conveniente para tomar momentos es el origen de los ejes de coordenadas, localizado de tal manera que el eje X pase por encima de la masa de suelo y el eje Y a la izquierda de la misma, como se muestra en la figura A 4.3 (b). Dado que las fuerzas internas no producen un momento neto, y si las coordenadas del centro de gravedad de la dovela i , g_i , son (Xg_i, Yg_i) , y las del punto de aplicación de N_i son (Xm_i, Ym_i) , la ecuación de equilibrio de momentos para todas las dovelas será:

$$\sum (N_i \cdot \cos \alpha_i + T_i \cdot \text{sen} \alpha_i) X m_i + \sum (T_i \cdot \cos \alpha_i - N_i \cdot \text{sen} \alpha_i) Y m_i = \sum W_i \cdot X g_i + \sum K \cdot W_i \cdot Y g_i$$

Con las ecuaciones (1), (2) y (4) se puede llegar a,

$$\sum (W_i - D x_i) X m_i + [D_i - D x_i \cdot \tan(\psi'_i - \alpha_i)] Y m_i = \sum W_i \cdot X g_i + \sum K \cdot W_i \cdot Y g_i \quad (17)$$

Otro punto conveniente para tomar momentos de la masa total es el centro de gravedad (Xg, Yg) de la masa total deslizante, definido con las coordenadas

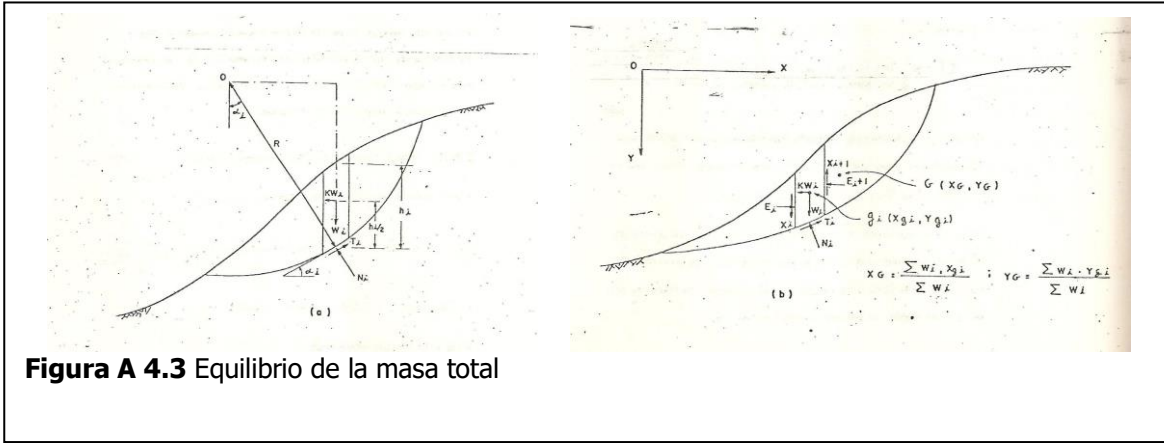
$$Xg = \frac{\sum W_i \cdot Xg_i}{\sum W_i} \quad \text{y} \quad Yg = \frac{\sum W_i \cdot Yg_i}{\sum W_i} \quad (18)$$

Puesto que W_i y KW_i no producen momento neto alrededor de (Xg, Yg) , la ecuación de momentos se convierte en,

$$\sum (N_i \cdot \cos \alpha_i + T_i \cdot \text{sen} \alpha_i) (Xg - X m_i) = \sum (T_i \cdot \cos \alpha_i - N_i \cdot \text{sen} \alpha_i) (Y m_i - Yg) \quad (19)$$

Con las ecuaciones (1) y (2),

$$\sum (W_i - DX_i)(Xg - Xm_i) = \sum (K.W_i + DE_i)(Ym_i - Yg)$$

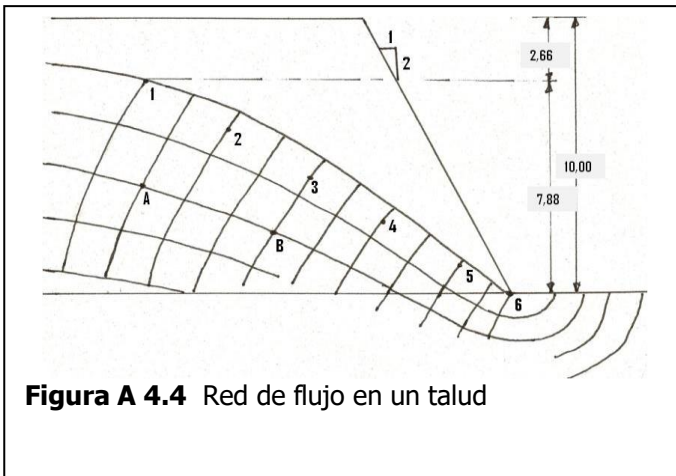


Y con la ecuación (4),

$$\sum (W_i - DX_i)(Xg - Xm_i) = \sum [D_i - DX_i \cdot \tan(\psi'_i - \alpha_i)(Ym_i - Yg)]$$

O de otra manera,

$$\sum DX_i [(Ym_i - Yg) \cdot \tan(\psi'_i - \alpha_i) + (Xm_i - Xg)] = \sum W_i \cdot (Xm_i - Xg) + \sum D_i \cdot (Ym_i - Yg) \quad (20)$$



EJERCICIO.

En la figura A 4.4 se presenta un talud conformado por suelo homogéneo, ($K_h=K_v$), de 10 m de altura, inclinación 1:2. Se establece una red de flujo definida a partir del nivel freático. Determinar las cabezas de elevación, presión y total. Calcular las presiones hidrostáticas en los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 6, A y B.

| Punto | Cabeza | | |
|-------|-----------|---------|-------|
| | Elevación | Presión | Total |
| 1 | 7,70 | 0,00 | 7,70 |
| 2 | 6,00 | 0,60 | 6,60 |
| 3 | 4,20 | 0,60 | 4,80 |
| 4 | 2,60 | 0,60 | 3,20 |
| 5 | 1,00 | 0,20 | 1,20 |

| | | | |
|---|------|------|------|
| 6 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
|---|------|------|------|

$$h_1 = \frac{u_1}{\gamma_w} + Z_1 = 7,70m \quad h_2 = \frac{u_2}{\gamma_w} + Z_2 = 6,60m$$

$$h_3 = \frac{u_3}{\gamma_w} + Z_3 = 4,80m \quad h_4 = \frac{u_4}{\gamma_w} + Z_4 = 3,20m$$

$$h_5 = \frac{u_5}{\gamma_w} + Z_5 = 1,20m \quad h_6 = \frac{u_6}{\gamma_w} + Z_6 = 0,00m$$

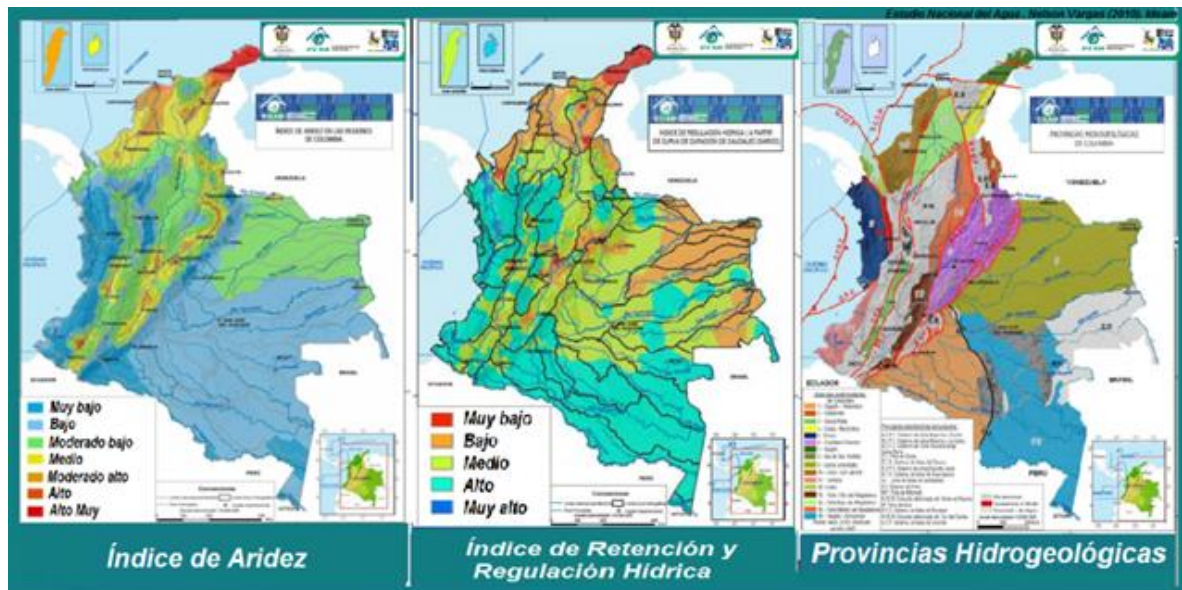
$$h_A = \frac{u_A}{\gamma_w} + Z_A = 7,25m \quad h_B = \frac{u_B}{\gamma_w} + Z_B = 4,80m$$

.....

4.11 LECTURAS COMPLEMENTARIAS

Nuestras aguas subterráneas

Mientras en grandes regiones como Australia y EE.UU. el 60% del agua utilizada proviene del subsuelo, en Colombia, donde el 31% del agua dulce está contenida en acuíferos y la Ley ha tenido que legislar para proteger los páramos, hace falta garantizar el carácter patrimonial y de bien público del agua subterránea. Si en el país lo técnico-administrativo está al día, falta para su gestión la dimensión socioambiental, lo que incluye problemáticas como la severa deforestación, la contaminación por efluentes mineros y lixiviados, el uso sin restricciones y la falta de incentivos para su preservación.



Aunque en el país las cuencas hidrogeológicas con posibilidades de aprovechamiento abarcan el 74% del territorio, según el estudio "Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia" del IDEAM (2005), mientras el 56% de dicha área corresponde a la Orinoquía, Amazonía y Costa Pacífica, y el 31,5% a la región Caribe e Insular, sólo el 12,5% está en la Región Andina, que es la más densamente poblada: al respecto, el citado documento advierte cómo por la Depresión Momposina pasa el agua de este 23% del territorio nacional, contaminada con efluentes de 30 millones de colombianos y 80 toneladas anuales de mercurio provenientes de 1200 minas de oro de aluvión.

Las cuencas hidrogeológicas más utilizadas, según el IDEAM, son las de los valles del Cauca, Magdalena Medio y Superior y la Cordillera Oriental; siguen en importancia, las de los golfos de Urabá y de Morrosquillo y de los departamentos de Bolívar, Magdalena, Cesar y La Guajira. No obstante, habrá que trazar estrategias a largo plazo, para prevenir desórdenes ambientales mayores que los del agua superficial, e incluso daños irreversibles en las aguas subterráneas. Posiblemente en la Sabana, tras el advenimiento de la floricultura, se están explotando los acuíferos, a tasas superiores a su reposición, situación que se agrava por: la eutrofización de sus lagunas, precaria precipitación del altiplano, vulnerabilidad a la erosión severa de sus suelos y bajos rendimientos medios de agua en sus cuencas altas.

En Caldas, sabemos que en el cañón del Cauca donde se sufre el impacto por escasez de agua, Corpocaldas traza estrategias con participación de actores sociales para mitigar el riesgo severo de sequías por baja precipitación, avanza en acuerdos con las CAR de los

departamentos vecinos que comparten nuestras cuencas para lograr su necesario ordenamiento, y pretende en el oriente caldense donde el patrimonio hídrico es abundante, velar por el manejo sostenible de los proyectos hidroenergéticos para que operen con responsabilidad social y ambiental, no como enclaves económicos.

En el Eje Cafetero, para trazar las políticas públicas relativas a la conservación, uso y manejo del patrimonio hídrico subterráneo, y para enfrentar la amenaza del cambio climático y la vulnerabilidad sísmica e hidrogeológica, deberá implementarse un programa de investigación y desarrollo integral y a nivel de detalle en el tema del agua, de carácter interinstitucional e interdepartamental con la concurrencia de las Gobernaciones, las CAR, la academia, Ingeominas y el MAVDT; las fortalezas institucionales, planes de ordenamiento y manejo ambiental de cuencas, niveles de información de base existente, entre otros elementos, facilitarían el programa.

Habría que reconocer y caracterizar las unidades hidrogeológicas, mediante geología directa de campo, prospección geofísica y perforaciones exploratorias; hacer una evaluación hidrodinámica de los acuíferos y flujos de aguas subterráneas, desde las zonas de recarga hasta los reservorios y de allí a los manantiales, además de conocer las condiciones hidrológicas del territorio, lo que significa dimensionar el ciclo hidrológico y entrar a corregir los conflictos severos entre uso y aptitud del suelo, relacionados con el estado de nuestras cuencas abatidas por el descontrol hídrico y pluviométrico, consecuencia de la deforestación y potrerización del territorio.

Según CORPOCALDAS, de una extensión de 744 mil Ha, en 2010, las coberturas verdes del departamento eran: 300 mil Ha en pastos y rastrojos (40%), 265 mil Ha en cultivos (36%) y 163 mil Ha en bosques (22%), tres cuantías que cubren el 98% de nuestro escarpado y deforestado territorio. Igualmente, según estudios emprendidos por nuestra CAR, en cuanto al sistema subterráneo sobresalen las zonas de recarga de páramo y bosques de la alta cordillera, el extenso valle magdalenense, además del oriente caldense donde la copiosa precipitación explica un patrimonio hídrico excedentario que debería llevar bienestar a estos pobladores y comunidades de pescadores.

* [Ref.: La Patria. Manizales, 2016.02.15] Imágenes, en: Estudio Nacional del Agua. IDEAM 2014.

Adaptación al cambio climático para Manizales



Los desastres vividos por los siniestros invernales que abaten a Manizales, obligan a superar el pesimismo y desconcierto ciudadano, para repensar la gestión integral del riesgo asociado al cambio climático: a modo de ejemplo, el colapso del gasoducto y del servicio de agua, se pueden interpretar mejor al recorrer la vía al Magdalena, para señalar que lo que muestra su corredor con los mega deslizamientos, es la destrucción antrópica del suelo, a diferencia de lo que muestra la montaña reforestada del otro lado del río, en la que los ocasionales deslizamientos son la expresión de un fenómeno natural llamado erosión, más limitado. De ahí que la solución debe empezar por entender que conceptualmente una carretera va más allá de su pavimento, muros y transversales, al extender su dominio hasta las micro cuencas del corredor vial.

Al igual que lo sucedido con el Terremoto del Eje Cafetero (1999), donde las consecuencias superaron en varios órdenes las que se derivan de los acontecimientos de Manizales, suele ocurrir que siempre los desastres desnudan los conflictos y contradicciones que padece la sociedad afectada, al tiempo que sus consecuencias terminan flagelando con mayor severidad a los más pobres en razón a su vulnerabilidad económica y ambiental.

En primer lugar, la investigación e instrumentación de la amenaza, porque podría sentarse como tesis que, de mantenerse la dinámica del último lustro, sus efectos desbordarían nuestro nivel de resiliencia, por la incapacidad de recuperar la base económica y ambiental de la ciudad: al comparar Las Niñas 2007/8 y 2010/11, ambas de nivel moderado y 10 meses de duración, mientras en la primera las cifras de damnificados no llegaba a 50 mil por cada invierno y los eventos eran puntuales, en la segunda superó 2 millones en cada una de sus dos temporadas de lluvias, y como eventos quedaron cerca de 30 municipios

para reasentar, caso Gramalote, para no hablar de Bogotá sumida en el agua de los humedales que le robó a la sabana.

En este asunto: ni conocemos debidamente la amenaza, ni hemos atendido el llamado que se ha hecho para implementar un centro de estudios que la atienda, como tampoco persistido con los estudios de la amenaza sísmica y volcánica, al haber dejado al Observatorio Vulcanológico de Manizales a su suerte.

En segundo lugar, la adaptación al cambio climático, lo que supone cambiar rumbos y corregir disfunciones en el modelo socioambiental, mediante una construcción social del territorio para establecer unas relaciones de simbiosis y parasitismo entre los habitantes y el medio natural, ecológicamente sólidas y compatibles con la cultura: para enfrentar la deforestación, la exposición a la amenaza y los conflictos entre uso y aptitud del suelo, surge como oportunidad el nuevo ciclo de ordenamiento territorial 2012-2023.

Al respecto quisiera señalar que la Ingeniería como tal, no solo diseña del lado de la falla, sino que su propuesta científico-tecnológica en sí misma resulta insuficiente, requiriendo para su adaptación de los saberes y haberes de la cultura local.

Y en tercer lugar, las políticas públicas para una planificación que incorpore la gestión del riesgo de forma integral, asunto para el cual el Estado Colombiano ha dado pasos fundamentales, al cambiar el perfil de la anterior oficina de Prevención y Atención de Desastres que surgió tras los sucesos de Armero, por la Dirección General del Riesgo con mayor capacidad y jerarquía, al tiempo que empieza a fortalecer el Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres SNPAD de Colombia, el sistema de información ambiental, la gestión del recurso hídrico y el inventario de asentamientos y aseguramiento de bienes en riesgo: Manizales y Caldas, deben ahora fortalecer sus instrumentos a nivel departamental y municipal, para emprender la rehabilitación, reconstrucción y prevención, sector por sector, sin perder de vista las acciones que van en curso desde Corpocaldas, la Oficina Municipal de Atención y Prevención de Desastres OMPAD de Manizales, y el Comité Regional para la Prevención y Atención de Desastres CREPAD de Caldas.

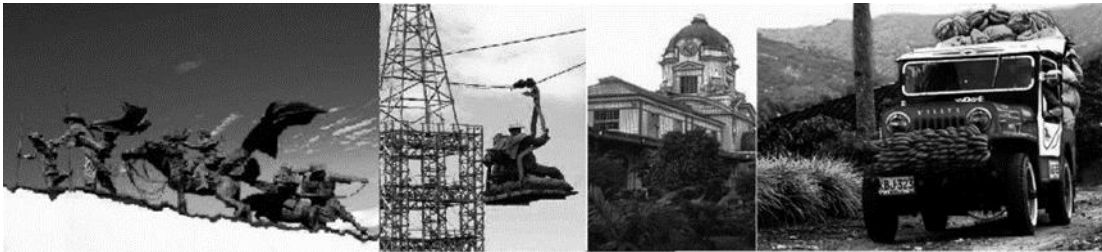
En relación con este tema, en Caldas urge resolver la carencia de instrumentos mínimos, como una cartografía temática y de detalle con mayor resolución para las zonas urbanas que las rurales e incluir en ella los mapas agrológicos.

Y para finalizar, sí de la prevención al desastre la diferencia es de un orden y del desastre a su recuperación de otro más, vale el dicho: "más vale prevenir que curar". Sólo que las acciones han de ser de extrema urgencia y largo plazo, y por lo tanto estructurales, para desarrollar una cultura de adaptación al cambio climático, dada la complejidad de la crisis socioambiental de Colombia.

[Ref: La Patria, Manizales, 2011-12-04] Imagen: Vía al Magdalena, en meridianoinformativo1390.com

Un diálogo con la dinámica urbana

RESUMEN: Si en algo ha influido el café, es en el desarrollo de la ecorregión cafetera: el pequeño tamaño de la propiedad con un efecto redistributivo del ingreso y la asociación de los cafeteros para irrigar sus beneficios, explican cuatro períodos históricos de Manizales, que parten de la arriería, pasan por cables y ferrocarriles, avanzan con el transporte rural y quiebran con la era del transporte urbano. Una lectura simple esta evolución que se lee en el transporte y sus consecuencias urbanas y económicas, parece útil para encontrar lecciones y establecer retos en materia de desarrollo.



Creo importante una mirada simple a la evolución del transporte y sus consecuencias urbanas y económicas, en el caso de Manizales desde su fundación hasta hoy, para encontrar lecciones y establecer retos en materia de desarrollo. Al respecto, señalaré cuatro períodos históricos que parten de la arriería, pasan por cables y ferrocarriles, avanzan con el transporte rural y quiebran con la era del transporte urbano.

El primer período que inicia en 1849, es el de la ocupación del territorio gracias a la colonización antioqueña, fenómeno que al lado de la revolución de los comuneros y la independencia, es uno de los procesos sociales más importantes de Colombia. En éste intervalo bajo una economía de subsistencia se dependerá primero de las guerras de 1860 y 1876, y luego de la portentosa arriería de miles de mulas y bueyes que transitaban trochas para salvar la Cordillera Central y otros puntos cardinales. Allí emerge Manizales como teatro de tales acontecimientos establecida sobre la tradicional retícula urbana, mostrando edificaciones de bahareque en tierra, con empañetado de limos y cagajón en mezcla.

Pero creado el departamento (1905) empezará a declinar ese motor que soporta la naciente aldea, para dar paso a un segundo período de crecimiento económico, que llegará hasta los albores del centenario, época en que se propone una Universidad Popular (1943) para el desarrollo de las fuerzas productivas. Sobresale desde ésta perspectiva la década de 1920, en la que se funda el periódico La Patria (1921), por los cables a Mariquita (1922 a 1962) y Aranzazu (1929 a 1943), y en especial por el Ferrocarril de

Caldas (1927-1959) apéndice del Ferrocarril del Pacífico cuyo impacto detona al inaugurarse el Canal de Panamá (1914).

A pesar de los incendios (1925 y 1926), gracias al efecto combinado de café, Ferrocarril y cables, el meridiano político y económico de Colombia pasa por Manizales, se da el poblamiento del occidente colombiano y se industrializa el país. La prosperidad de Manizales se expresa en esa arquitectura ecléctica de construcciones de cemento, metal y bahareque enriquecido que muestra hoy el Centro Histórico. Y como evidencia de un modo más adecuado de desarrollar el hábitat ciudadano fruto de la apertura cultural del momento, surge El Carretero, esa avenida que avanza siguiendo los contornos del terreno por la divisoria de aguas para hacer del conjunto urbano una estructura con cola de cometa por el naciente.

Y continúa un tercer período de verdadero desarrollo, que llega hasta el desmembramiento del departamento (1967). Gracias al efecto redistributivo del ingreso consecuencia del pequeño tamaño de la propiedad cafetera, tras las directrices surgidas de la crisis de 1929 que empiezan a priorizar el transporte carretero sobre el ferroviario, con los caminos cafeteros se logra llevar escuelas, puestos de salud, acueductos y redes de electrificación al campo. Son los tiempos del jeep Willys y "la chiva", testigos del apogeo de decenas de poblados que han palidecido.

En lo urbanístico, si bien se densificó la trama urbana con barrios para la clase media favorecida por el Estado solidario, la arquitectura cartesiana propia de la sociedad industrial es la "moderna", caracterizada por el particular estilo que muestra el Banco del Comercio de la Plaza de Bolívar.

Pero a partir de los 70, entramos a un cuarto período que nos abriga, con la migración del campesino, quien al no poder asimilar los paquetes tecnológicos y financieros de la nueva caficultura al no tener suficiente escolaridad, deja de ser propietario y emigra a la ciudad para intentar proletarizarse, sin alcanzarlo. A esa problemática social se añade la ambiental consecuencia de la reconversión del modelo de producción que introdujo el monocultivo a costa del sombrero y su biodiversidad, de la salud del suelo y el agua. Entramos a un deterioro de los términos de intercambio y destinamos las rentas del "grano de oro" a la importación de agroquímicos para concederlas a terceros, exterminar la biodiversidad y provocar plagas.

Y como razonablemente la trama urbana no debió expandirse con rapidez, menos para un uso y ocupación conflictivos del suelo, haciéndolo sin responder a criterios claros de planeación y responsabilidad ambiental, por no densificarse ahora Manizales ve agotados sus precarios remanentes de bosque andino y desprotegidas las frágiles laderas del medio rur-urbano, para obtener un hábitat que está dando paso a un modelo de urbanizaciones populares con estructura satelital, más vulnerables, desarticuladas y crecientemente alejadas de la oferta de servicios de "la cometa urbana" precedente. En este escenario los moradores en circunstancias más apremiantes, viven tras ese "muro" que separa a pobres

y ricos, para expresar los agudos conflictos y contradicciones, como también los retos de la época actual.

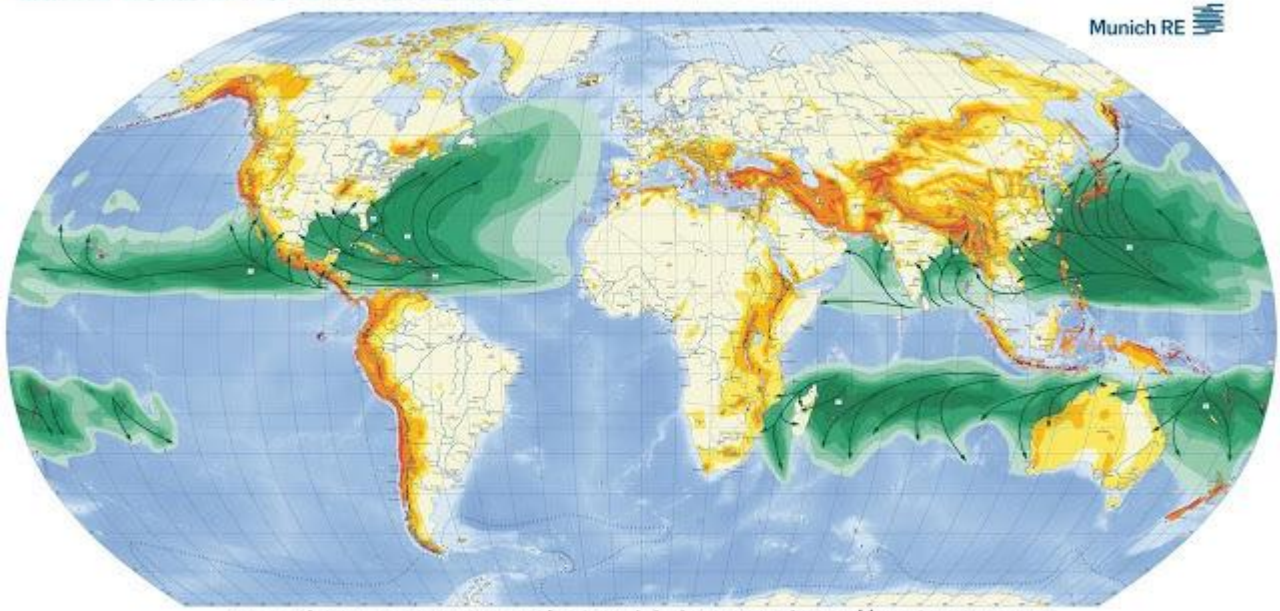
...

[Ref: La Patria, Manizales 2011.06.06] Imagen en: <http://cdi.ariadna.com.co>

...

Huracanes y terremotos: ¿y cómo está Colombia?

NATHAN WORLD MAP OF NATURAL HAZARDS



Rutas de Huracanes y Zonas Sísmicas del planeta, en <https://co.pinterest.com>

RESUMEN: Esta nota se ocupa de dos amenazas naturales de gran impacto que acechan en la región: los Huracanes y los Sismos. Primero, porque los fenómenos ciclónico del Atlántico que dejan destrucción a su paso por el Caribe, también puede impactar sobre el Archipiélago de San Andrés y Providencia, y generar lluvias intensas y fenómenos colaterales en el norte de Colombia. Y segundo, porque además de la amenaza por maremotos asociados a sismos originados en el fondo oceánico del entorno vecino, también nuestras fuentes sísmicas continentales pueden afectar los centros urbanos del país ubicados en zonas de riesgo sísmico alto y moderado.

Tras los desastres recientes en México, en el Caribe y en Estados Unidos es imperioso volver sobre las amenazas que afectan a Colombia y sobre las medidas que debemos adoptar para hacer frente a estos riesgos*

.

Dos graves amenazas ambientales

Tanto los planificadores urbanos como las autoridades colombianas deben reflexionar con urgencia sobre las dos amenazas ambientales que –también para nosotros- representan los huracanes y los grandes terremotos.

- La primera de estas amenazas, dado lo ocurrido con *Irma*, un huracán de categoría 5 que azotó el norte del Caribe y el sur de Estados Unidos entre el 30 de agosto y el 12 de septiembre pasados, con brazos de hasta 300 kilómetros de diámetro, y vientos máximos de 302 km/h, calificado como el más poderoso que ha sido registrado en el Atlántico. Irma cobró 37 vidas en el Caribe y 14 en Estados Unidos.
- La segunda amenaza, dado el sismo de magnitud 8,2 en la escala de Richter que sacudió México el viernes 8 de septiembre y al cual se sumaron cientos de réplicas debido al carácter superficial de este fenómeno telúrico, el cual cobró 98 vidas y afectó principalmente los estados de Oaxaca, Chiapas y Tabasco.

El estudio de los terremotos en áreas sismo-tectónicamente activas, que son vecinas a grandes urbes, y de las tormentas ciclónicas que surgen en los mares para llevar caos y destrucción a las ciudades costeras, es tan antiguo como la humanidad misma, aunque en principio contaron con una explicación mítica relacionada con la ira de los dioses.

Según la mitología griega, Tifón hijo de Gea, quien intentó destruir a Zeus en venganza por haber derrotado a los Titanes, además de erupcionar lava, creó los huracanes y los terremotos con el batir de sus enormes alas. Para los griegos -quienes fueron los primeros en dar una explicación natural a los terremotos-, dichos estremecimientos ocurrían cuando Poseidón, el dios de los mares, hacía tambalearse a Atlas, quien recibió como castigo de Zeus sostener al mundo en sus hombros.



Daños por Sismo en Oaxaca, México ; y por Huracán Irma en San Martin, Antillas Menores . Fuente: Nationalgeographic.com

Vientos enfurecidos y sacudidas de la tierra

La ocurrencia de eventos climáticos extremos como los que ya se advierten a nivel global, es resultado del calentamiento del planeta, calentamiento que en los próximos cincuenta años aumentará la temperatura entre 1,5°C y 2,5°C según las características de las distintas regiones de la Tierra.

Este calentamiento traerá desastres mayores: tormentas ciclónicas de mayor intensidad, lluvias inusuales, sequías severas, inundaciones, deslizamientos, incendios forestales, y degradación ambiental: pérdida de ecosistemas terrestres, elevación del nivel del mar y desaparición de los glaciares.

La intensidad de una tormenta ciclónica depende de la velocidad de sus vientos. Sus daños pueden variar de conformidad con la escala Saffir-Simpson -que califica el poder destructivo de los huracanes desde 1 a 5 cuando éste toca tierra-.

- Cuando la categoría es 1, hay inundaciones en zonas costeras y daños menores en zonas urbanas por vientos entre 119 y 153 kilómetros por hora y olas que pueden llegar a 1,5 metros de altura.
- Cuando la categoría es 5, hay destrucción masiva de viviendas e infraestructuras con vientos sostenidos por encima de 250 kilómetros por hora, o por olas que pueden superar los 6 metros de altura.

Adicionalmente, durante las últimas décadas hemos presenciado desastres sísmicos mayores que han afectado a países en desarrollo. Esto no se debe a que en el mundo se estén presentando más terremotos, sino al acelerado crecimiento de la población residente en zonas sísmicas, de manera que la magnitud de los daños ha venido en aumento.

Ejemplo de lo anterior son las urbes latinoamericanas de los Andes, Centro América y en el Caribe, aquellas de la línea Alpes-Himalaya, y algunas ubicadas en el Pacífico asiático; este margen oceánico y las costas occidentales de las américas conforman el "Cinturón de Fuego del Pacífico", caracterizado por su intensa actividad sísmica y volcánica.

Países tan lejanos entre sí como Irán, Chile, Japón y Nueva Zelanda son particularmente vulnerables a esta actividad sísmica. Asimismo, la lista de grandes ciudades azotadas por la pobreza incluye a Estambul en Turquía, Karachi en Pakistán, Teherán en Irán, Katmandú en Nepal y Lima en Perú.

No obstante, no podemos descartar a Bogotá como posible escenario a pesar de encontrarse en una zona de amenaza sísmica intermedia, ya que podría sufrir el embate de movimientos tectónicos superficiales de mediana magnitud, partiendo de fuentes sísmicas vecinas relacionadas con pequeñas fallas locales, e incluso de grandes eventos no muy lejanos provenientes de mega-fallas activas como las del frente llanero o la Falla Salinas.

Refugiados y víctimas

Entre 2003 y 2013, se registró una media de 388 desastres naturales al año que afectaron a 216 millones de personas y cobraron 106.654 vidas. Según el Consejo Noruego para los Refugiados, mientras las pérdidas económicas por los desastres naturales de los últimos 30 años tuvieron un valor medio anual de 130 mil millones de dólares, la posibilidad de tener desplazados ha aumentado en un 60 por ciento en cuarenta años.

Según el informe "*Estado de la población mundial 2015, un refugio en la tormenta*", en los últimos 20 años los damnificados por desastres naturales sumaron en promedio cerca de 200 millones por año, cifra que triplica los 65 millones anuales de víctimas de epidemias, adversidades tecnológicas y conflictos armados a nivel global.

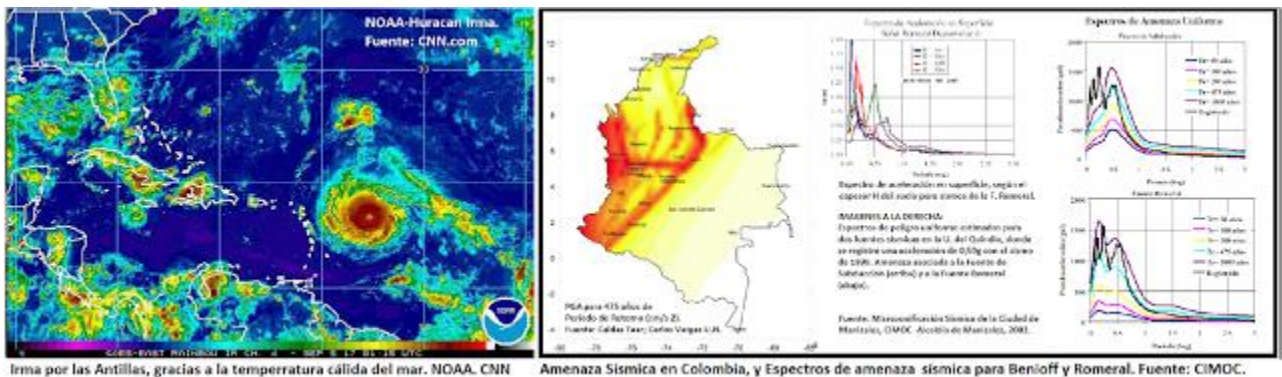
A pesar de que la mayoría de los desplazamientos por desastres de origen sísmico y climático son internos y en ocasiones pueden cruzar fronteras, no existen instituciones que puedan mitigar su sufrimiento.

El cambio climático ha ocasionado más de 4.000 millones de heridos o damnificados en el mundo durante los últimos veinte años, ya que ha contribuido al desplazamiento humano

acelerando sequías y la desertificación, al igual que la erosión costera y la salinización de aguas subterráneas y tierras de cultivo. Mientras las catástrofes de origen sísmico han cobrado la vida a más de un millón de personas desde principios del presente siglo.

La amenaza climática y sísmica en Colombia

Tras la erupción del Ruiz y la desaparición de Armero en 1985, el Gobierno instauró el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (SNPAD) que institucionaliza la gestión del riesgo, ya que esa falencia gravitó como causa fundamental del desastre.



Inicialmente se diseñó una dependencia del Ministerio de Gobierno para atender las fases de emergencias, luego a raíz del terremoto del Eje Cafetero de 1999 se implementó la fase de reconstrucción, y finalmente tras las Niñas 2007/8 y 2010/11, el SNPAD pasó a un plano de mayor desarrollo organizacional al ocuparse también de la prevención y mitigación de los desastres, al tiempo que se creó el Fondo Nacional de Calamidades.

La gestión del riesgo para enfrentar los huracanes tiene un manejo distinto del de los terremotos, puesto que estos eventos tectónicos se presentan de forma súbita. Los huracanes son fenómenos climáticos donde intervienen gran número de variables de comportamiento aleatorio como vientos, temperatura y humedad, y que igualmente se aborda con pronósticos.

En Colombia el desafío está en estudiar de forma integral la amenaza climática, a pesar de que dicha tarea está a cargo del IDEAM y de que las sequías son poco frecuentes y los ciclones tienen incidencia marginal. La Oficina de Pronósticos y Alertas suele elaborar los avisos y boletines ambientales sobre huracanes para advertir sobre la posibilidad de lluvias intensas y marejadas con sus peligros colaterales.

Si bien lo anterior procede para el archipiélago de San Andrés y Providencia por ser nuestro lugar más comprometido en virtud de su latitud, para el caso de la Guajira la ocurrencia de las tormentas significa el advenimiento de lluvias esperadas para calmar la sed de la tierra.

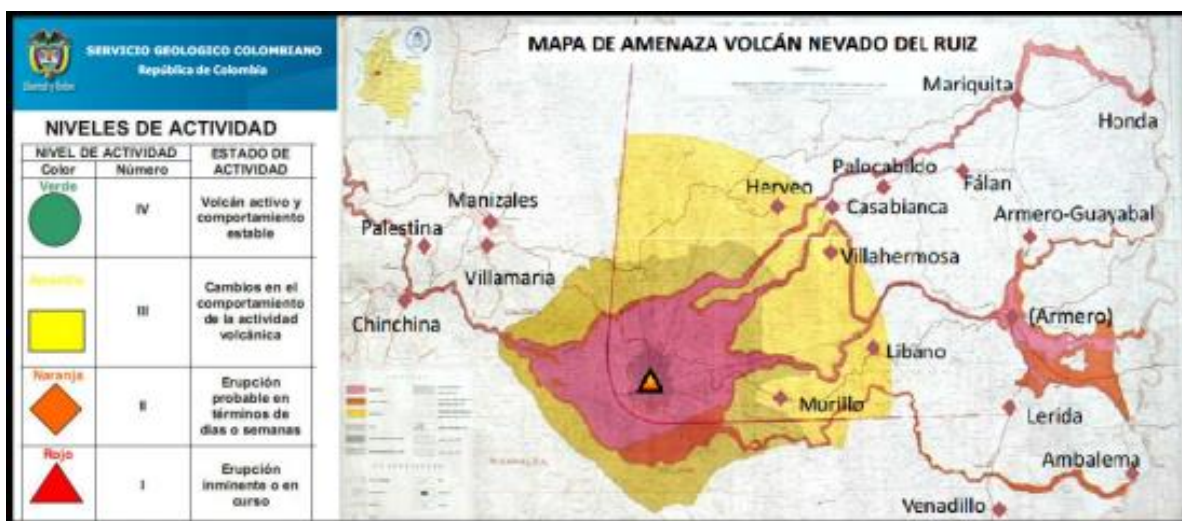
Para los terremotos los factores principales del riesgo son: la influencia de las fuentes sísmicas y la caracterización de las provincias sismo-tectónicamente homogéneas. Allí deben considerarse la frecuencia, naturaleza y magnitud de los eventos, además de la vulnerabilidad física de las construcciones, asentamientos humanos expuestos en cada contexto, y variaciones en la respuesta dinámica del terreno, ya que los suelos blandos al igual que el relieve agravan la intensidad local del desastre.

En Colombia, además del mapa de sismicidad elaborado por la Red Sismológica Nacional se ha expedido la norma sísmica NSR-10 sobre diseño y construcción sismo resistente, instrumento que para el efecto aplica un período de retorno de 475 años.

También ha habido esfuerzos específicos en materia de microzonificación sísmica en las grandes ciudades y estudios sobre la tipología constructiva. Sin embargo, en muchas zonas de amenaza sísmica alta, falta abordar dicha labor; tal es el caso de las poblaciones ubicadas en fallas del sistema Cauca-Romeral, el Margen Llanero y de la región del Pacífico.

[Razón Pública. Bogotá, 2017.09.18]

El Ruiz, amerita medidas de prevención y no pánico



El Nevado del Ruiz a pesar de persistir en estado de amenaza latente de erupción, tiene su propia historia geológica; al igual que Sancancio, es el Ruiz una estructura vulcanogénica contemporánea al cerro tutelar de la ciudad con una edad inferior a los dos millones de años, y por lo tanto de similar origen, aunque alcanzaron niveles de desarrollo opuestos: a diferencia de Sancancio, un domo volcánico fruto de una porción de magma que se extruye a la superficie a causa de las mismas fuerzas tectónicas que otrora levantaron la colina de Chipre formando el Escarpe de la Francia, la evolución del Ruiz ha sido en sumo

grado catastrófica y dinámica: los cráteres La Olleta y La Piraña, con ochenta mil a cien mil años de antigüedad revelan parte de esa historia.

De otro lado, habitamos el segmento volcánico más septentrional de los Andes, y aunque poco sabemos de las corrientes humanas migratorias asiáticas que hace 12 o 14 mil años entraron por el estrecho de Bering, pasaron por Colombia y bajaron hasta la Patagonia, sí conocemos de dicho período algo de la actividad del Ruiz, por las capas de cenizas volcánicas y otras evidencias geológicas que a modo de huellas dejaron las erupciones ocurridas en los últimos 11 mil años: según los investigadores del Ingeominas, el Ruiz en esa época tuvo cerca de 12 etapas eruptivas con múltiples eventos, como corrimientos de tierra, flujos piroclásticos y lahares, además de la destrucción parcial de los domos de la cima. Y en lo que más nos debe competir, sabemos también de las erupciones históricas de 1595, 1845 y 1985, repitiéndose donde se destruye Armero.

A diferencia de lo ocurrido hace más de tres décadas con Armero, el Estado Colombiano consciente de la necesidad de mitigar el riesgo por la amenaza volcánica, y de implementar la gestión del riesgo frente a otras amenazas como sismos y eventos hidrogeológicos y climáticos, además de crear el Observatorio Vulcanológico de Manizales, la Red Sismológica Nacional de Colombia y la Oficina Nacional para la Atención de Emergencias del Departamento Administrativo de la Presidencia de la República, a través de sus diferentes instituciones ha logrado consolidar a la fecha un Sistema Nacional de Atención y Prevención de Desastres de gran capacidad y proyección.

No obstante, tras la tragedia que dejó este año 669 víctimas mortales el terremoto en Ecuador, evento con de 7,8 grados de magnitud ocurrido el pasado 16 de Abril, y que fue sentido desde Perú hasta el sur occidente de Colombia; y luego, con las sacudidas de los pasados días consecuencia del sismo de origen volcánico del 9 de octubre sentido en Manizales, cuya ocurrencia se ha relacionado con las frecuentes emisiones de ceniza del Ruiz que llegan a la ciudad, a pesar de la seguridad que se ofrece tras generarse oportunamente la necesaria activación de los protocolos de asistencia sobre el área de influencia del volcán, y de conocerse el carácter sólo local de los sismos volcánicos, continúa la natural inquietud de la población por la incertidumbre de los acontecimientos.

Aunque sabemos de la imposibilidad de predecir eventos de comportamiento errático, no obstante sí se puede prever con algún acierto una erupción de importancia, tal cual lo hizo Ingeominas en el Volcán del Huila el año 2007 cuando logró anticipar la ocurrencia de flujos de lodo catastróficos asociados a la erupción de dicho volcán nevado, pese a las naturales limitaciones que imponen la ciencia y la tecnología, permitiendo dar alerta a varios miles de habitantes de las poblaciones rivereñas de Belalcázar, Inzá y Tesalia que se aseguraron en la parte alta de la montaña la madrugada del 18 de abril, poniéndose a salvo de avalanchas comparables a las del Páez causadas por el fatídico Sismo de 1994 que había dejado unos 1100 muertos.

Contrario a lo que ocurrió en 1985 con el Ruiz, cuando los flujos de lodo por el Gualí, Río Claro, Lagunillas y Azufrado alcanzaron poblados como Armero, Mariquita y Chinchiná causando la muerte a unos 25 mil habitantes, además de causar la pérdida de ganados y propiedades arrasadas por dichas riadas que igualmente destruyeron carreteras, puentes y anegaron tierras de cultivos, hoy por fortuna las zonas de amenaza severa no están ocupadas, la gestión del riesgo se ha institucionalizado, se tiene como garantía el eficiente servicio de monitoreo volcánico, y se sabe con relativa certeza del nivel de severidad, alcance y clase de las amenazas que podemos y debemos atender.

[REVISTA EJE 21. Manizales, 2016/410/17] Imagen: Mapa Amenaza del Volcán Nevado del Ruiz. Ingeominas, en <http://www2.sgc.gov.co/>

Medio ambiente, mercado y Estado



RESUMEN: Para el ordenamiento de las cuencas en la ecorregión y emprender una reconstrucción con las acciones más importantes asociadas a la gestión del riesgo, tras el desastre ambiental del 2010, se proponen dos acciones fundamentales: primero, una revolución educativa para la reconversión productiva rural, y segundo, el desarrollo de la identidad cultural para asegurar la sostenibilidad ambiental de la ecorregión cafetera.

Frente a la tesis del Congreso Nacional de Economía celebrado en Cúcuta (1979), de que los dos principales problemas de Colombia eran la concentración del poder y de la riqueza, el entonces Profesor de la Universidad Nacional de Colombia, Economista Jesús Antonio Bejarano, oponía a esa conclusión, un comentario opuesto señalando que ambos eran un mismo problema, puesto que la clase de propiedad que se establezca sobre los medios de producción es lo que define las relaciones de producción, y como tal el sistema político.

Permítanme ilustrar lo señalado con dos ejemplos antagónicos asociados al desarrollo de la Nación y al tema ambiental, cuando se enfrentan las contradicciones entre nuestra economía de mercado y el Estado: uno, el que importen más los micos que sirven a un fin trascendente como el del Instituto de Inmunología Colombiano, quien con limitaciones para sus investigaciones y mucho esfuerzo genera conocimiento con propósitos humanitarios, que los micos del Congreso para el asalto a la cosa pública; y dos, el de la autoridad ambiental que, además de desestimar el desierto de muerte en Casanare, desconoce responsabilidades a su cargo, para terminar también como en el caso anterior, favoreciendo al mercado.

Sobre Manuel Elkin Patarroyo, quien ayer había sido víctima del desfinanciamiento de sus investigaciones sobre la vacuna sintética contra la malaria por parte de Colciencias, hoy cuando la carrera por coronar la producción de este preciado bien donado con propósitos humanitarios, que se desarrolla conforme a principios éticos fundamentales, surge un fallo del Consejo de Estado de Colombia calificado por el subdirector del South Centre como una vergüenza, por condenar al científico tolimense a suspender durante años el uso de los monos del Amazonas, hasta no obtener una licencia.

Si bien la investigación que beneficiaría a 3500 millones de habitantes de naciones pobres del planeta, incluye extender esa tecnología innovadora para la producción de otras vacunas sintéticas, como esta que en un mercado controlado por las multinacionales farmacéuticas valdría diez veces más, el acto judicial que desconocer que dichos animales son capturados en Colombia sin poner en riesgo la especie ni su ecosistema trinacional, en lugar de reclamar el apoyo del Estado para Patarroyo, no le deja opciones para la producción oportuna de su vacuna, pues lo obliga a suspender labores hasta obtener los certificados, lo que pone en riesgo una actividad científica de Colombia que podría perder la carrera por la patente en pocos años.

Y sobre el ecocidio de los chigüiros, un espécimen de la fauna silvestre colombiana, que dada la presión antrópica en pocos años podría encontrarse en peligro de extinción, de la que sus dos especies conocidas en Colombia están aisladas geográficamente por nuestros Andes: la *Hydrochoerus isthmus* que habita la vertiente Caribe y valles interandinos, y la *Hydrochoerus hydrochaeris* ubicada en la Orinoquia y Amazonía, preocupa que la hoy Ministra del Medio Ambiente y ayer responsable de las licencias ambientales para las petroleras del país, hiciera esta absurda afirmación: "No fue la tragedia que los medios presentaron en Casanare; allí hay un millón de chigüiros [...] solo se murieron 6.000".

Difícilmente la sequía sola podría explicar la extensión local de sus impactos por la intensa ola de calor, ya que tras cada temporada húmeda ocurrida entre abril y noviembre, año por año siempre quedan reservorios de agua con sus babillas, peces y tortugas, para que en cada temporada seca, de diciembre a marzo, chigüiros, venados, ganado y aves encuentren el preciado líquido y su alimento, yendo a lagunas formadas por meandros

abandonados, a caños encharcados asociados a corrientes trenzadas, a esteros, morichales y cananguchales de las vagas y rondas del drenaje.

Entonces la hecatombe del Casanare aunque pueda asociarse a un evento climático extremo como factor contribuyente, obligaría a señalar factores estructurales como la imprevisión de la autoridad ambiental, quien contemplando los beneficios del crecimiento económico, nunca controló la causa real de una tragedia asociada al impacto de la prospección petrolera con sus perforaciones y cargas sísmicas profundas que destruyen acuíferos, al uso indebido del agua por arroceros y palmeros, y al descontrol hídrico y pluviométrico causado por la deforestación de la Cordillera Oriental con su piedemonte llanero y los bosques de galería.

[Ref. La Patria. Manizales, 2014.04.14] Imágenes de Angie Vanessita en <https://totumasymaracas.wordpress.com>

RELACIONADO:



Textos "verdes". Recopilación temática de documentos U.N., con autoría y coautoría de Gonzalo Duque Escobar.

Retos ambientales en el Eje Cafetero



Educación para consolidar un medio ambiente compatible con la cultura y ecológicamente sólido, es uno de los retos estratégicos para la ecorregión del Eje Cafetero, un territorio mediterráneo que comparten varias Corporaciones Regionales Autónomas. Allí aparecen Armenia, Manizales y Pereira como núcleos urbanos que generan una enorme proporción del producto interno bruto PIB regional de los departamentos de Caldas, Risaralda y Quindío, concentración que se explica por la baja productividad de su sector rural, donde tierra y algo de trabajo son los factores de producción dominantes, ya que capital y conocimiento no pesan para la producción rural. A modo de ilustración, mientras el potencial de productividad de una hectárea del valle del Magdalena Medio es 50 veces el de una hectárea promedio de los Llanos Orientales, la productividad efectiva de las fértiles tierras de La Dorada llega al 50%.

Y estando mal en el vasto territorio de la fértil ecorregión de la rubiácea porque el campesino trabaja el triple para percibir 1/3 del ingreso urbano, cada capital cafetera que en materia del PIB lo hace casi todo vive su propio drama buscando desarrollar sus fuerzas productivas, sin advertir que la estructura del empleo ha cambiado para exigir

competencias intelectuales y sociales a una población que requiere incrementar la formación a nivel profesional y tecnológico, y sin articular las ventajas naturales y culturales de su valioso patrimonio, ni complementar sus economías urbanas. Aunque Quindío algo ha logrado al integrar sus municipios en un proyecto turístico que lo convierte en el segundo destino del país, contrariamente Pereira que puede sacar mayores ventajas de su posición geoestratégica apuntándole al comercio y Manizales que debe recobrar su brújula industrial apoyada por la academia, como centros de poder mantienen desarticulados los territorios y no lo ordenan para funcionar como ciudad región frente a Cali y Medellín.

Tras la hecatombe invernal, una lección que queda es la de la falta de bosques para mitigar el impacto de un calentamiento global, donde se reconoce que este es el verdadero desastre que contribuye a alterar El Niño y La Niña como fenómeno natural dual que causa sequías e inundaciones, al exacerbar el clima bimodal de la región andina colombiana. Ahora, para adaptarnos a estas amenazas sin comprometer un desarrollo sostenible, entonces se tendrá que avanzar en el ordenamiento de las cuencas en la ecorregión y emprender una reconstrucción con las acciones más importantes asociadas a la gestión del riesgo, entendiendo que la viabilidad de semejante tarea supone dos acciones fundamentales: primero, una revolución educativa para la reconversión productiva rural, y segundo, el desarrollo de la identidad cultural para asegurar la sostenibilidad ambiental de la ecorregión cafetera.

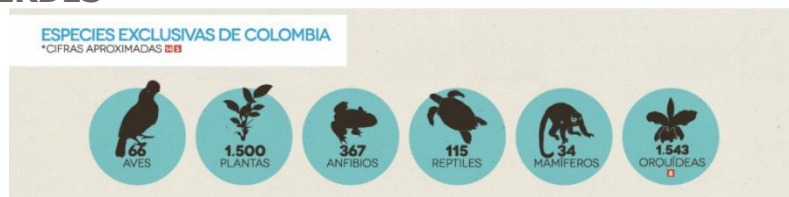
En cuanto a la revolución educativa, la problemática socioambiental de la ecorregión como territorio fundamentalmente rural exige un desarrollo educativo para cerrar la brecha de productividad del sector agropecuario, aplicando modelos de producción limpia. Sabemos que el modelo agrario colombiano ha sido un fracaso no propiamente por falta de apoyo del Estado, sino porque en vez de incorporar políticas e instrumentos de ciencia y tecnología para incrementar la productividad, siempre ha entrado a subsidiar la ineficiencia. Entonces, la solución del problema que ha de enfrentarse para la estabilización de las cuencas actuando con una reconversión apoyada en tecnologías verdes y saneamiento básico, empieza por elevar el nivel de escolaridad de nuestros campesinos que en promedio es de solo 4 años para que puedan asimilar los paquetes tecnológicos y financieros sin repetir la historia de una revolución verde que desruralizó la

patria.

Y en lo del desarrollo de la identidad cultural, la ecorregión debe incorporar saberes y tradiciones para generar bienes y servicios culturales, pues se trata de un territorio biodiverso y pluricultural que requiere resignificar y reelaborar el conjunto de símbolos y valores de su patrimonio natural y cultural para incluir a productores rurales y artesanos: en la Alta Cordillera entre San Félix y Roncesvalles, los símbolos de la identidad se relacionan con el pasillo, el páramo, el bahareque de tabla, el sombrero aguadeño, la ruana de Marulanda y la Palma de Cera; en el Magdalena Centro, con la navegación por el Magdalena, la Expedición Botánica, el rancho de hamacas y la subienda de nicuros, bagres y bocachicos; en Marmato, Quinchía, Supía y Riosucio, con la cultura indígena de las comunidades Embera y Umbra, y con la minería del oro enriquecida por el aporte de las comunidades afrodescendientes: existe más novela y poesía en el oro que en el café de esta zona cafetalera que va desde Neira hasta el sur del Quindío.

[Ref: La Patria, Manizales, 2011.03.01] Imagen: vulnerabilidad de laderas urbanas en Manizales, Augusto Ramírez López. Fuente: Unimedios.

ENLACES VERDES



Agua como bien público.

Aprendizajes en procesos participativos de reconversión productiva: cuenca del río San Francisco.

Aspectos geofísicos de los Andes de Colombia.

Calentamiento global en Colombia.

Ciencias Naturales & CTS.

Eje Cafetero: construcción social e histórica del territorio.

El futuro de la ciudad.

El Paisaje Cultural Cafetero.

Elementos para la construcción de una visión estructurada del desarrollo de Caldas.

Experiencias y Estrategias de los Planes de Acción Inmediata PAI.

Gestión del riesgo natural y el caso de Colombia.

Gestión y política pública ambiental, para el manejo sostenible y uso ecoeficiente del patrimonio natural en Colombia.

Guerra o Paz, y disfunciones socio-ambientales en Colombia.

Guía astronómica.


Manual de geología para ingenieros.

Procesos de Control y Vigilancia Forestal en la Región Pacífica y parte de la Región Andina de Colombia.

Riesgo en zonas de montaña por laderas inestables y amenaza volcánica.

UMBRA: la Ecorregión Cafetera en los Mundos de Samoga.

LOS AUTORES:

| | |
|--|--|
|  | <p>Carlos Enrique Escobar Potes: http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000068284</p> <p>Gonzalo Duque Escobar: https://godues.wordpress.com/2012/09/12/gonzalo-duque-escobar-cvlac-rg/</p> |
|--|--|

...

...

| | |
|---|--|
|  | <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA</p> |
| |  |
| | <p>Geotecnia para el trópico andino http://www.bdigital.unal.edu.co/53560/</p> |
| | <p><u>Carlos Enrique Escobar Potes</u> <u>Gonzalo Duque Escobar</u></p> |
| | <p>Manizales, 2017.</p> |
| <p>A la Universidad Nacional de Colombia en sus 150 años.</p> | |