



DETERMINACIÓN DE FACTORES DE SEGURIDAD RELATIVOS AL
DESLIZAMIENTO UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE TALUDES NATURALES
(MTN) EN LA ZONA SUB-URBANA Y URBANA DEL MUNICIPIO DEL CARMEN
DE ATRATO CHOCÓ

FRANCYS YADILSON WALDO QUINTO

Trabajo de grado

Asesor, profesor

Jorge Alonso Prieto Salazar, PhD

AREA DE TERRITORIOS Y CIUDADES
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA (PROFUNDIZACIÓN)
UNIVERSIDAD EAFIT
MEDELLÍN
2023

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	7
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3	JUSTIFICACIÓN	13
4	OBJETIVOS	14
4.1	GENERAL	14
4.2	ESPECÍFICOS	14
5	ESTADO DEL ARTE	15
6	DESARROLLO DEL TRABAJO	21
6.1	INFORMACIÓN REQUERIDA POR LA MTN.....	21
6.1.1	TOPOGRAFÍA	21
6.1.2	GEOLOGÍA.....	22
6.2	MEDICIONES DE LAS FAMILIAS (TALUDES NATURALES)	23
6.2.1	NIVELES OPERACIONALES DE LA MTN	23
6.2.2	SECUENCIAL CUMULATIVO DE INTERVALOS DE CURVAS DE NIVEL (SCICN)	24
6.2.3	CUBRIMIENTO DE LAS MEDICIONES	29
6.3	PATRÓN TRIANGULAR	30
6.3.1	PATRÓN TRIANGULAR A NIVEL DE FAMILIA	30
6.4	PATRÓN TRIANGULAR A NIVEL DE POBLACIÓN.....	37
6.4.1	LÍMITE SUPERIOR ACTUAL E INICIAL DEL PATRÓN TRIANGULAR 38	
6.4.2	ÁNGULO BÁSICO DE FRICCIÓN.....	40
6.4.3	ÁNGULO DE FRICCIÓN ENTRE MINERALES.....	43
6.4.4	LÍMITE INFERIOR DEL PATRÓN TRIANGULAR	45

6.4.5	MATERIALES DEGRADADOS Y DESAGREGADOS	46
6.4.6	VÉRTICE DEL PATRÓN TRIANGULAR	47
6.4.7	TENDENCIA DE PENDIENTES PROMEDIAS.....	48
6.5	SISTEMA ANALÍTICO DE LA MTN (SAMTN).....	49
6.5.1	ENVOLUTA TRANSFORMADA DE ESFUERZOS DE CORTE (ETEC) 50	
6.5.2	ENVOLUTAS HIPOTÉTICAS	57
6.5.3	CONDICIONES DE PRESURIZACIÓN	63
6.5.4	PARÁMETROS GEOMECÁNICOS	67
6.6	FACTOR DE SEGURIDAD RELATIVO (FSr)	75
6.6.1	TALUD DE DISEÑO	77
6.6.2	ESTUDIOS REGIONALES	77
6.7	HOJAS ELECTRÓNICAS PARA LA MTN.....	78
6.7.1	HOJA ELECTRÓNICA “EVALUACIÓN DE FAMILIAS DE TALUDES NATURALES”	78
6.7.2	HOJA DE CÁLCULO DE “PROPIEDADES GEOMECÁNICAS”	80
6.7.3	HOJA DE CÁLCULO DE “FACTORES DE SEGURIDAD– ESTUDIOS REGIONALES”.....	82
7	RESULTADOS.....	84
8	CONCLUSIONES	93
9	REFERENCIAS.....	96
10	ANEXOS	99
10.1	Anexo 1 Geología local.....	100
10.2	Anexo 2 Topografía del área de estudio	101
10.3	Anexo 3 Mediciones de las familias de taludes.....	102
10.4	Anexo 4 Anexos digitales.....	102

Anexo A.....	102
Anexo B.....	102
Anexo C.	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Sistema SCICN de medición de Familia de Taludes Naturales. -Formación Guayabetal. (Peq-3, Paleozóico); Carretera Bogotá - Villavicencio. (Tomado de: Shuk 1995)	25
Figura 2 Delimitación de polígono y extracción de coordenadas. Elaboración propia (MOD QGis)	26
Figura 3 Posibles rotaciones de los polígonos según su orientación (Elaboración propia)	28
Figura 4 Rasgos del Patrón Triangular (Determinístico). (Tomado de: Shuk, 1995)	38
Figura 5 Mediciones de LLD vs HLD de todas las familias de taludes naturales (Elaboración propia)	40
Figura 6 Relación entre la Tangente del Ángulo de Fricción entre minerales ($\tan\phi_m$) y la Tangente del Ángulo Básico de Fricción ($\tan\phi_b$) (Tomado de: Shuk 1996b)	44
Figura 7 Patrón Triangular de la Población. Zona de estudio El Carmen de Atrato (Elaboración propia)	49
Figura 8 Envoluta ETEC y unas Envolutas Hipotéticas del SAMTN (Tomado de: Shuk 1999)	56
Figura 9 Arreglo Matricial de las Envolutas ETEC e Hipotéticas del SAMTN (Tomado de: Shuk, 1999)	58
Figura 10 Ensayo de cizallamiento de discontinuidades (Hoek 2006)	70
Figura 11 Relaciones Geométricas entre los Parámetros Geomecánicas de Resistencia-Condición de la Masa y Condición de Laboratorio Shuk (1999)	71
Figura 12 Relación de triángulos para estimar la cohesión traccional	72
Figura 13 Curvas de Factor de seguridad igual 1. Tomado de: Shuk 1999	76
Figura 14 Factor de seguridad relativo (Fsr) para las cuatro categorías de tiempo talud de diseño. Tomado de: Shuk 1999	77
Figura 15 Factor de seguridad relativo (Fsr) para las cuatro categorías de tiempo estudio regional. Tomado de: Shuk 1999	77
Figura 16 Familia hoja electrónica evaluación de familias de taludes naturales	79
Figura 17 Solución de envolutas Hoja cálculo de propiedades geotécnicos (Elaboración propia)	80

Figura 18 Condiciones de presurización Hoja cálculo de propiedades geotécnicos (Elaboración propia)	81
Figura 19 Resultados Hoja cálculo de propiedades geotécnicos (Elaboración propia)	81
Figura 20 Hoja electrónica Fator de seguridad relativos al deslizamiento estudio regional taludes de 1 al 30	83
Figura 21 Resultados del Patrón triangular a nivel de población (Elaboración propia)	84
Figura 22 Mapa de isovalores factores de seguridad relativo al deslizamiento a corto plazo zona urbana y alrededores municipio el Carmen de Atrato (Elaboración propia)	87
Figura 23 Mapa de isovalores factores de seguridad relativo al deslizamiento a corto plazo zona sub-urbana y alrededores municipio el Carmen de Atrato (Elaboración propia)	88
Figura 24 Mapa de isovalores factores de seguridad relativo al deslizamiento a mediano plazo zona urbana y alrededores municipio el Carmen de Atrato (Elaboración propia)	89
Figura 25 Mapa de isovalores factores de seguridad relativo al deslizamiento a mediano plazo zona sub-urbana y alrededores municipio el Carmen de Atrato (Elaboración propia)	90
Figura 26 Mapa de isovalores factores de seguridad relativo al deslizamiento a largo plazo zona urbana y alrededores municipio el Carmen de Atrato (Elaboración propia)	91
Figura 27 Mapa de isovalores factores de seguridad relativo al deslizamiento a largo plazo zona sub-urbana y alrededores municipio el Carmen de Atrato (Elaboración propia)	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Puntos del polígono a calcular (Elaboración propia).....	27
Tabla 2 Valores L, H de la medición del polígono (Elaboración propia)	29
Tabla 3 Cálculo logarítmico de las mediciones obtenidas (Elaboración propia)	31
Tabla 4 Correlación lineal para estimación de los parámetros a y b (Elaboración propia)	31
Tabla 5 Parámetros función potencial simple.....	32
Tabla 6 Resumen de la evaluación de la familia	36
Tabla 7 Resumen de los datos y cálculo de las iteraciones (Elaboración propia).....	42
Tabla 8 Resumen de parámetros funcionales de las tendencias de pendientes del Patrón Triangular	48
Tabla 9 características paramétricas y cálculos iniciales de las envolutas hipotéticas de la primera fila (conjunto inicial) del arreglo matricial del SAMTN. Tomado de: shuk (1999).	59
Tabla 10 Relaciones lineales entre envolutas para el cálculo de densidades.	68
Tabla 11 Resultados Hoja electrónica evaluación de familias de taludes naturales de la 1 a la 30 (Elaboración propia).....	79
Tabla 12 Parámetros de la función potencial de la pendiente promedio del Patrón triangular - Población (Elaboración propia).....	85

LISTA DE ANEXOS

10.1	Anexo 1 Geología local	100
10.2	Anexo 2 Topografía del área de estudio.....	101
10.3	Anexo 3 Mediciones de las familias de taludes	102
10.4	Anexo 4 Anexos digitales	102

1 INTRODUCCIÓN

La Metodología de taludes naturales (MTN) propuesta por Tomas Shuk parte del principio fundamental que la naturaleza es el mejor ensayo in-situ. Este concepto radica la importancia del comportamiento de los taludes naturales y su relación con los parámetros de resistencia de geomateriales del sitio. A su vez, con la información de topografía y geología plantean el cálculo para una serie de parámetros geomecánicos de importancia para análisis como la estabilidad de taludes a nivel regional de un área determinada sin la necesidad de realizar sondeos exploratorios ni ensayos de laboratorios, reduciendo los costos asociados a la cuantificación del riesgo y la amenaza.

El Carmen de Atrato es un municipio que se encuentra en el departamento del Chocó en el occidente colombiano, se considera uno de los corredores más importantes de conexión del departamento con el resto del país. A través de los años se ha convertido en un foco principal de observación debido a los desastres ocurridos en materia de estabilidad de taludes, provocando así interrupción del transporte terrestre con el resto del país.

Los taludes naturales representan un desafío geotécnico significativo en muchas zonas del país, incluido el municipio del Carmen de Atrato, ubicado en el departamento del Chocó. La estabilidad de estos taludes es de suma importancia debido a su influencia directa en la seguridad de las comunidades y las infraestructuras en la zona. Los deslizamientos de taludes pueden tener consecuencias devastadoras, causando daños materiales, interrupciones en las vías de comunicación y, lo que es más importante, poniendo en peligro la vida de las personas.

Con el fin de identificar factores de riesgos y realizar un ordenamiento sostenible de los territorios se han invertido esfuerzos por parte de las autoridades someter a los territorios en el Plan de Ordenamiento territorial POT, el cual es un instrumento técnico y normativo de planificación; es el conjunto de acciones políticas, administrativas y de planeación física que orientan el desarrollo del territorio Municipal y regulan la utilización, ocupación y formación del espacio físico, urbano

y rural. Para dicho ordenamiento se debe realizar la delimitación de las zonas de amenaza mediante la cuantificación del riesgo del área a delimitar.

Debido a que la información detallada sobre eventos es limitada en la zona de estudio, en la mayoría de las zonas se suele usar la geomorfología (que se encarga del estudio de las formas de la superficie terrestre, sus orígenes y su evolución), apoyado en la geomorfometría (la cual se ocupa del análisis cuantitativo y modelación de las superficies de la tierra) y la topografía (que estudia las herramientas y procedimientos para la representación detallada de las formas de la tierra) para determinar los posibles riesgos de la zona de estudio, considerando la relación entre la geomorfología y los parámetros de resistencia de materiales (Shuk Erdos T. , 1995; 1999).

La MTN proporciona una serie de parámetros geomecánicos y de estabilidad para la determinación de zonas mediante el factor de seguridad relativo al deslizamiento que en el presente denominamos índice de susceptibilidad al deslizamiento con el fin de ofrecer una herramienta práctica en la generación de información preliminar en relación a los parámetros geomecánicos del área de estudio para proyectos ingenieriles relacionados con el campo de la geotecnia.

El presente trabajo presenta una aplicación de la metodología de taludes naturales en el área urbana y sub-urbana del municipio del Carmen de Atrato Chocó; útil para zonificación del terreno teniendo como datos de entrada la geología y la topografía del terreno.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia está constituida por una amplia diversidad geológica, geomorfológica, hidrológica y climática, la cual se expresa en un conjunto de fenómenos que representan una potencial amenaza para el desarrollo social y económico del país (Campos G., y otros, 2012, pág. 13). Los deslizamientos de laderas representan el tercer riesgo natural más importante en el mundo, después de los sismos e inundaciones (Evaluación Riesgos Naturales ERN, 2004). El conocimiento del riesgo y los desastres ha evolucionado de forma radical en poco tiempo, el cambio de énfasis de una visión bajo el predominio del fenómeno físico como causante de los desastres a una basada en la construcción social del riesgo (Naciones Unidas para la reducción del riesgos de desastres, 2021)

Los fenómenos naturales han producido miles de muertes en Colombia. Un estudio realizado por la Evaluación de Riesgos Naturales, por sus siglas ERN; Colombia en 2004 demostró que las pérdidas de vidas entre los años 1970-2000 producto de acumulación de deslizamientos, inundaciones y otros fenómenos de baja y mediana intensidad fueron hasta de 9954 muertes y cuyos daños estimados ascendía hasta los 2226.7 millones USD (Cuadros Veloza & Zambrano Moreno, 2012). Un estudio realizado por la Oficina de Naciones Unidas para la reducción del riesgo de desastres (UNDRR) y el CRED pone en manifiesto que, entre 1998 y 2017, se registraron 800.000 muertes por eventos de origen geológico (principalmente sismos) (Naciones Unidas para la reducción del riesgos de desastres, 2021). La tendencia alta de pérdidas humanas por deslizamiento se ve reflejada a través del tiempo; por ejemplo, Mocoa capital del departamento del Putumayo en marzo de 2017 se presentó un evento por movimiento y transporte de masa ocasionado por el desbordamiento de los ríos Mulato, Sangoyaco y Taruca; lo cual producto de fuertes precipitaciones generó una avalancha de lodo, rocas y materia orgánica. Como efecto el desastre ocasionó la muerte de más 333 personas y dejó a 71 personas desaparecidas, cerca de 400 heridos y más de 22.000 personas damnificadas (Juagibioy Revelo, 2021) pese a haber un estudio que alertaba sobre la zona y su susceptibilidad de deslizamiento. En esta línea, también se destacan los eventos ocurridos en enero del 2023 en Rosas en el departamento del Cauca,

un deslizamiento de tierra, dejando un saldo de hasta 1150 familias damnificadas, casas destruidas, y 15 veredas incomunicadas; a su vez 4 veredas destruidas y 920 personas afectadas directamente por el deslizamiento (Instituto Nacional de vías, 2023).

Otro estudio de recopilación de información de eventos por movimientos en masa realizado por INGEOMINAS en año 2002, muestra el impacto de las comunidades por deslizamientos ocurridos entre los años 1980-2002 en Colombia (Instituto colombiano de Geología y Minería, 2002), en el cual se obtiene que el departamento del Chocó está entre los departamentos con mayor promedio de población afectada por número de eventos $(\text{Muertos (M)} + \text{Heridos (H)})/\text{Eventos}$, dejando un saldo de hasta 100 muertes en este período donde el mayor porcentaje se evidencia en el municipio del Carmen de Atrato con un saldo de hasta 70 muertes y damnificados debido al impacto que representa la vía Quibdó-Medellín para todo el departamento.

A la condición de los fenómenos por movimientos en masa, se suman las condiciones de precipitación, ambientales, y antropogénicos que alteran la condición de amenaza y riesgo en las comunidades. Una valoración de los daños y pérdidas de la ola invernal en Colombia desarrollada entre 2010-2011 adelantada por el BID (Banco interamericano de desarrollo) y la CEPAL (Comisión Económica para América latina y el Caribe) estableció que la ola invernal como evento desencadenante a eventos de movimientos en masa e importantes deslizamientos que agravaron las consecuencias, con considerables daños en infraestructura (vial, acueductos) (Banco Interamericano de Desarrollo & Comisión Económica Para América latina y el Caribe, 2012) reportando para el departamento del Chocó hasta 2672 deslizamientos. Los daños estimados en millones de pesos para el departamento del Chocó ascienden hasta 242.452 millones de pesos y un porcentaje del 8.2% del PIB departamental. Un reporte del diario La república sitúa al departamento del Chocó entre las regiones más afectadas por las lluvias en la ola invernal en enero del 2023 (Rudas, 2023).

El departamento del Chocó cuenta con dos vías de acceso terrestre: Quibdó-Medellín, Quibdó-Pereira; en los últimos años se han presentado eventos por movimientos en masa que han afectado el desarrollo de la región presentándose pérdidas humanas y económicas. En diciembre del 2022, en la vía Pereira-Quibdó producto de las condiciones climáticas y condiciones de inestabilidad del terreno, se presentó un deslizamiento que sepultó un bus provocando así la muerte de 34 personas y 9 heridos (Oquendo, 2022). En la vía Quibdó-Medellín en jurisdicción del municipio del Carmen se han presentado eventos que han causado cierre de esta importante vía si bien no se han generado pérdidas humanas las pérdidas económicas son elevadas causando en muchos casos desabastecimiento y encarecimiento de los productos, como lo ocurrido en diciembre del 2021, debido a un gran deslizamiento de tierra a la altura del sector seis (km 94 de la vía) dejó incomunicado este importante corredor vial con el resto del país afectando así a comunidades y transportadores de carga y pasajeros (Caracol, 2021). En agosto de 2022 en el sector “El 16” ocurre un deslizamiento de tierra en la vía Medellín-Quibdó dejando como saldo un muerto y dos heridos (La FM, 2022) todo esto en el marco de previos deslizamientos ocurridos en la zona y como consecuencia de deslizamientos subsecuentes debido a las fuertes lluvias que continuaron impactando esta zona con deslizamientos y emergencias hasta concluir con el cierre total de la vía en septiembre del mismo año (Correa, 2022). En síntesis, el departamento del Chocó y más concretamente el sector comprendido en jurisdicción correspondiente al municipio del Carmen de Atrato, y el tramo vial de la carretera nacional que comunica al departamento del Chocó con el resto del país se ha visto fuertemente afectada por los deslizamientos afectando el desarrollo de la región y ocasionando pérdidas humanas importantes.

A este complejo panorama se le suma el hecho de que no contar con una correcta zonificación por amenazas del territorio y/o hacer caso omiso de la misma se ha convertido en uno de los detonantes para el riesgo de las comunidades que en su necesidad de expandirse a la par del crecimiento demográfico han visto la necesidad de construir en zonas que se consideran riesgosas como en el caso de

Mocoa cuya tragedia se pudo evitar debido a que se contaba con alertas sobre la ocupación del territorio.

Es un aspecto importante zonificar por deslizamiento mediante la cuantificación de la amenaza y riesgo por movimiento en masa, con el fin de reducir los impactos en las comunidades mediante la toma de decisiones oportunas por parte de las autoridades.

Los estudios del riesgo realizados a escala regional presentan el limitante de requerir información de las condiciones del terreno mediante exploración geotécnica integrada (muestreo del terreno) que, debido a la gran extensión de tierra a cubrir, representa un alto costo, así como la cantidad de tiempo invertido. A este aspecto se le suma el número de datos para alimentar de forma adecuada los modelos de análisis. Por esta razón sería de gran ayuda para la evaluación del riesgo a escala regional implementar modelos que utilicen la geomorfología y la topografía del terreno como entrada principal de análisis reduciendo sustancialmente costos y tiempos estimados del estudio considerando los avances tecnológicos.

Los diferentes modelos para la evaluación del amenaza y riesgo utilizan principalmente parámetros de resistencia obtenidos de la exploración y de los ensayos de laboratorio realizados a los geomateriales. (Shuk Erdos T. , 1995; 1999) propone una metodología para la zonificación geotécnica que ha resultado ser óptima como una herramienta complementaria para este tipo de análisis que de manera preliminar permite de forma ágil establecer factores de estabilidad y/o susceptibilidad al deslizamiento que deben ser analizadas. Por la extensión del área, en el municipio del Carmen de Atrato no se ha realizado un estudio de zonificación geotécnica utilizando la cuantificación de la estabilidad utilizando la geomorfología del terreno y la topografía. Por esta razón resulta importante evaluar los factores de seguridad relativos al deslizamiento en el área urbana y suburbana del municipio del Carmen de Atrato considerando las categorías de tiempo: corto, mediano, y largo plazo.

3 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de la metodología de los taludes naturales planteada por Tomas Shuk (Shuk Erdos T. , 1995) se fundamenta en la premisa “la naturaleza es el mejor ensayo”. Este concepto radica la importancia del comportamiento de los taludes naturales y su relación con los parámetros de resistencia de geomateriales del sitio. A su vez, con la información de topografía y geología plantean el cálculo para una serie de parámetros geomecánicos de importancia para análisis como la estabilidad de taludes a nivel regional de un área determinada sin la necesidad de realizar sondeos exploratorios ni ensayos de laboratorios, reduciendo los costos asociados a la cuantificación del riesgo y la amenaza.

El Carmen de Atrato es conocido como uno de los corredores de acceso al departamento del chocó vía terrestre, junto con la vía Pereira-Quibdó. En las vías que comunican al departamento con el resto del país vía terrestre se han presentado eventos por movimientos en masa producto de la inestabilidad del terreno, condiciones climáticas, y antropogénicas. Estas han causado desastre en pérdidas humanas y en gran medida pérdidas económicas incluyendo desabastecimiento y encarecimiento de los productos que se importan en el departamento afectando por tanto a los habitantes de esa región.

Los fenómenos naturales, más específicamente los movimientos en masa han costado miles de vidas en Colombia, el departamento del Chocó no ha sido la excepción a esa realidad. Los impactos económicos asociados a dichos eventos son notables.

Este trabajo contribuirá en la zonificación de un área del municipio del Carmen de Atrato mediante factores de seguridad relativos al deslizamiento considerando las categorías de tiempo: largo, mediano y corto plazo, facilitando el análisis y zonificación del riesgo y amenaza para la toma de decisiones de las autoridades competentes.

El presente trabajo, a su vez, contribuirá en la generación de información preliminar en relación a los parámetros geomecánicos del área de estudio para proyectos ingenieriles relacionados con el campo de la geotecnia.

4 OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Evaluar los factores de seguridad relativos frente al deslizamientos en el del área urbana y suburbana del municipio del Carmen de Atrato Chocó, mediante la metodología de taludes naturales (MTN) para las categorías de tiempo: largo, mediano y corto plazo.

4.2 ESPECÍFICOS

- Definir las propiedades geomecánicas de los materiales geológicos encontrados en la zona de estudio con el fin de compararlos con datos conocidos según el tipo de material encontrado en la zona de estudio.
- Realizar un análisis de los parámetros de estabilidad que permita delimitar de una manera óptima los factores de seguridad relativos mediante la elaboración de planos escala máxima 1:25.000 de isovalores según factores de seguridad relativos al deslizamiento.
- Establecer la relación entre los deslizamientos históricos y las zonas delimitadas mediante los factores de seguridad relativos.

5 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describen las investigaciones realizadas con relación a la metodología de taludes naturales, considerando los elementos claves y aplicaciones de la metodología de taludes naturales, así como algunos casos de aplicación enfocados en la cuantificación del riesgo y amenazas para zonificación de un área determinada.

En línea con lo anterior, se presenta la siguiente tabla resumen con las investigaciones y documentación encontrada en torno a la metodología de taludes naturales:

Autor	Año	Título	Resumen
Álvaro Gonzales-García	J. 1992	Evaluación del riesgo de una avalancha Utica (Cundinamarca)	<p>Álvaro Gonzales en 1992 realizó un estudio de evaluación del riesgo en la zona de desastre en Útica (Cundinamarca). En este se relacionan problemas previos y eventos catastróficos en el área como preliminares al análisis de la amenaza y probabilidad de falla haciendo uso de herramientas estadísticas que toma uso de la vulnerabilidad y la amenaza, conceptos que nos permiten realizar una evaluación integral al incluir la lluvia y el sismo como parámetros detonantes. En este se explican las actividades a realizar en un estudio a nivel regional que se complementaría con la aplicación directa con la MTN en otro documento. Se obtiene así una evaluación holística de la avalancha en la zona identificando zonas críticas, factores detonantes para la toma de decisiones.</p>
Thomas Shuk	1994	Elementos claves y aplicaciones de la metodología de taludes naturales (MTN) con cierto énfasis en los aspectos de estabilidad de taludes	<p>En este documento de tipología conceptual T. Shuk expone fundamentos en la determinación de los parámetros de estabilidad de taludes mediante la MTN. Se explican conceptos de la MTN en la aplicación directa en la estabilidad de taludes para estudios regionales, ecuaciones para el cálculo de factores de seguridad relativos en las diferentes categorías de tiempo: muy largo, largo, mediano, corto tiempo; con el propósito de determinar la probabilidad de falla, análisis de riesgos y el análisis de decisión económica. Se expone entonces, la MTN como una herramienta versátil en diversos proyectos.</p>
Thomas Shuk	1994	Diferenciación y caracterización geomecánica cuantitativa de materiales geológicos derivados de una única roca parental mediante la metodología de taludes naturales (MTN)	<p>Dadas las limitaciones para el proyecto multipropósito Urra-1 de utilizar las técnicas de la microgeotécnica convencional, para un gran corte a la altura de la casa de máquinas de dicho proyecto se utiliza para ese entonces la novedosa metodología de taludes naturales en la diferenciación y caracterización geomecánica cuantitativa de materiales geológicos derivados de una misma roca parental de edad cretácica que consiste en estratos alterados de areniscas y lutitas de espesores variables. Se analizan 80 familias, se establecen las parejas L vs H a nivel de población y subpoblación y se determinan los parámetros geomecánicos cuantitativos a través del sistema analítico de la MTN (SAMTN). Finalmente se construyen las curvas del Factor de seguridad y se verifica el máximo corte permitido en el material.</p>

Autor	Año	Título	Resumen
Thomas Shuk	1995	Estado actual de la MTN y de sus aplicaciones y resultados	Se presenta un balance general del estado actual de la Metodología (MTN) con algunas referencias de las conclusiones obtenidas del paper desarrollado por Mc Mahon 1976 para taludes con aplicación especial en minería a tajo abierto. Así como también se presenta las nociones de operación, información requerida, y sistema de mediciones de la MTN. Se explica, además, el sistema analítico de la MTN expresado en un sistema de envolutas hipotéticas para el cálculo de los parámetros geomecánicas necesario para las diferentes aplicaciones y asimismo los parámetros de estabilidad, representado en lo correspondiente al Factor de seguridad y la probabilidad de falla.
T. Shuk - Álvaro Gonzales	1996	Cuantificación del riesgo de inestabilidad de taludes y parámetros de costo para aplicaciones geotécnicas en un proyecto vial y en un estudio regional	Este documento se abordan dos casos de aplicación: un proyecto vial correspondiente a la vía Bogotá - Villavicencio y un estudio regional en la zona de desastre de Útica. Se determinan parámetros de estabilidad a partir de los parámetros geomecánicos para diferentes categorías de tiempo (corto, mediano y largo plazo); a su vez se determina la probabilidad de falla: incondicional, condicional y total; con la cual se determina el análisis de decisión económica que se presenta en el documento para la aplicación en los casos ya mencionados. Se presentan 3 decisiones donde se termina eligiendo la decisión 2 que consiste en la construcción y adecuación de la vía existente que a su vez resulta más rentable. Para el segundo caso también se analizan la inestabilidad de taludes y decisión económica donde es más factible la reubicación del pueblo que las adecuaciones de obras para mitigar amenazas.
T. Shuk - E.E. Hernández	1996	Mapeo cuantitativo del factor de seguridad mediante la metodología de taludes naturales	En 1996 T. Shuk y Hernández desarrollan un mapeo cuantitativo del factor de seguridad para zonificación por amenaza en la localidad de Yumbo mediante la MTN. Con las mediciones de planos topográficos sobre planos geológicos de la zona con las formaciones geológicas se construye el patrón triangular a nivel de población y luego a nivel de universo con las parejas L y H de cada una de las 205 familias. De igual forma, se determina el factor de seguridad para cada familia y se construyes curvas de isovalores en función del FS calculado. El factor de seguridad calculado corresponde al FS relativo (al promedio del universo) y de naturaleza temporal muy larga. Dando como

Autor	Año	Título	Resumen
Thomas Shuk	1998	Caracterización del sitio por medio de la MTN	<p>resultado favorable al cotejar el mapeo con las áreas donde existen materiales desagregados y zonas consideradas con riesgo importante.</p> <p>En este documento se presentan las bases del análisis para la caracterización de los materiales en el Túnel Los Rosales - Bogotá. Donde aplicando los conceptos de la metodología se determinan las características de los materiales y se mapean para delimitar los diferentes materiales presentes en el área.</p>
Thomas Shuk	1999	Zonificación geotécnica cuantitativa por medio de la metodología de taludes naturales (MTN)	<p>En este documento T. Shuk presenta de una manera descriptiva y detallada los aspectos fundamentales de la zonificación geotécnica cuantitativa mediante la MTN. Se amplían y detallan conceptos explicados en documentos anteriores correspondiente a fundamentos y aplicación de la metodología en un proyecto hidroeléctrico del río Tunjita y otras formaciones ilustradas con el fin de revelar los diferentes comportamientos del patrón triangular en diversas formaciones y materiales. Se construye el SAMTN para la determinación de los parámetros geomecánicos y así desembocar en las bases del cálculo del FS relativo para taludes de diseño y estudios regionales en las diferentes categorías de tiempo: largo plazo, mediano plazo, y corto plazo. Se explica la forma de presentación de los FS relativos mediante mapa de curvas de isovalores. Para la probabilidad de falla en función de factores como la lluvia y el sismo de manera incondicional, condicional y finalmente la que se determina es la probabilidad de falla total. Se plantea la determinación del riesgo mediante la vulnerabilidad y la amenaza; para así mediante el análisis de decisión económica mapear la zona de estudio como zonificación geotécnica cuantitativa.</p>

Autor	Año	Título	Resumen
Luis Felipe Prada Sarmiento – Alfonso Mariano Ramos Cañón	2000	Desarrollo de un algoritmo basado en la metodología de taludes naturales (MTN) para determinar la profundidad del suelo	<p>Este trabajo se centra en verificar la validez de un algoritmo existente basado en la MTN para estimar el espesor de los suelos que yacen sobre la roca. Tomando como referencia datos de espesores reales del proyecto La Regadera II, y de dos tramos de la carretera Cali-Medellín. Se analizaron 21 familias, donde se determinaron los parámetros de resistencia del suelo mediante el sistema analítico de la MTN, a su vez utilizando el algoritmo establecido por el creador de la MTN se verifican con los espesores obtenidos mediante exploración indirecta (refracción sísmica), y perforación; obteniendo como resultado que El algoritmo es consistente en el sentido que los rangos de variación de los espesores obtenidos con el procedimiento de la MTN son proporcionales a los que tienen los espesores reales obtenidos por medio de los estudios de campo</p>
María Carolina Marín Duque	2006	Verificación de la metodología de taludes naturales a partir de investigaciones geotécnicas existentes	<p>En este trabajo se busca encontrar la viabilidad de la MTN en la aplicación en un área de la ciudad de Medellín y corregimiento de Guadalupe; mediante la verificación analítica de los parámetros geomecánicos de la MTN para la condición de laboratorio y los resultados obtenidos mediante la geotecnia convencional; es decir, ensayos in-situ y de laboratorio con muestras de taludes previamente estudiadas. Para lo cual se obtuvieron parámetros geomecánicos mediante la MTN. Finalmente se confirma que la MTN presenta un grado de confiabilidad muy alto dado que los resultados promedio para la masa y para el suelo derivado son similares a los resultados de laboratorio. Concluye entonces que la MTN en su estado actual no puede ser utilizada como herramienta para determinar resultados a nivel puntual, sin embargo; con correlaciones usadas aquí vale la aplicación a nivel más general; para lo cual se podría emplear en la etapa de factibilidad de un proyecto.</p>

Autor	Año	Título	Resumen
<p>Álvaro J. Gonzales-García</p>	<p>2016</p>	<p>MTN, una herramienta eficiente para estimar los parámetros de amenaza relativa de deslizamientos</p>	<p>Este paper del profesor Álvaro Gonzales se enfoca en viabilizar la MTN como una herramienta que permite la zonificación por amenaza de un área a estudiar. Partiendo del cálculo de los parámetros la MTN permite determinar parámetros de estabilidad como lo son el Factor de seguridad relativo y probabilidad de falla; lo que a su vez permite el análisis de decisión económica y determinar así la zonificación por amenaza. Este Factor de seguridad relativo utilizado para este análisis corresponde a varias categorías de tiempo y la probabilidad de falla analizada se realiza teniendo las consideraciones de sismo, lluvia, y lluvia y sismo (combinado) y la probabilidad de falla total que es la que se utiliza como producto final. Finalmente se aplica la MTN para la zonificación en la ciudad de Bogotá y se contrasta con la zonificación realizada al momento por IGEOCIM en 1998.</p>
<p>Duván A. Rueda - Elías Correa Villa</p>	<p>2018</p>	<p>Caracterización Geológico-Geotécnica en proyectos lineales mediante la MTN</p>	<p>En este trabajo se realiza un planteamiento de una metodología de diseño para proyectos viales para lo cual se realiza una zonificación y recomendaciones de diseño a partir de la obtención de los parámetros geomecánicos y el parámetro R_u con la MTN. A su vez se plantea la exploración del subsuelo para realizar una comparación entre estos parámetros donde se realiza clasificación del GSI en la zona.</p>

6 DESARROLLO DEL TRABAJO

La MTN, como se ha mencionado anteriormente, surge como una herramienta que permite la determinación y cuantificación de diferentes características de los materiales geológicos de forma ágil. Partiendo del supuesto que “la naturaleza es el mejor ensayo in-situ” y sin la realización de sondeos previos o ensayos de laboratorios, a través de la MTN se pueden determinar resultados cuantitativos de parámetros geomecánicos de cuatro tipos (de presurización, de densidad y fase, de resistencia, y de deformabilidad) y parámetros de estabilidad (factor de seguridad, probabilidad de falla, etc.).

El desarrollo de este trabajo se centra en la determinación del factor de seguridad relativo para tres categorías de tiempo (largo, mediano y corto plazo). Este factor de seguridad corresponde a la relación entre dos alturas: una considerada como altura de la familia o talud a evaluar y una altura relacionada a una función potencial del total de las familias a considerar: sea una población o universo. A continuación, se presenta la metodología de cálculo para la determinación del factor de seguridad relativo utilizada en el presente trabajo.

Nota: Se toma como referencia e ilustración los datos obtenidos en el análisis del talud enumerado como Familia 169. El resumen y el total de los cálculos se presentan en los anexos

6.1 INFORMACIÓN REQUERIDA POR LA MTN

Para el desarrollo de la MTN se necesitan información topográfica e información geológica de la zona de estudio. Como se menciona anteriormente la zona de estudio corresponde al área urbana y suburbana del municipio del Carmen de Atrato para lo cual se realizó la búsqueda de información.

6.1.1 TOPOGRAFÍA

La información topográfica de la zona se recopiló mediante rastreo satelital con apoyo ALOSPALSAR un programa realizado por la NASA que permite imágenes satelitales (DEM's) con una resolución de 12.5m; lo cual con programas de información geográfica (en este caso se utiliza QGIS) se extraen las curvas de nivel con una separación cada 12.5m de acuerdo a la resolución de la imagen. De esta

manera se obtiene la información de la topografía de la zona. Además, se permite información adicional relacionada con las fallas, discontinuidades, y fuentes hidrográficas (útil para establecer la cuenca hidrográfica).

6.1.2 GEOLOGÍA

En la información geológica se pretende delimitar y describir: grupos o unidades geológicas, formaciones geológicas, entre otros. La información geológica para la zona de estudio se encontró con apoyo de la plancha 165 (geología Carmen de Atrato). La información geológica contenida en esta plancha para una escala de trabajo de 1:100.000 corresponde a formaciones que van desde el cretácico superior hasta depósitos cuaternarios y flujos de lodos. Dentro de las rocas ígneas se encuentran formaciones como: *Kvb* (Formación barroso del cretáceo), *Kvsc* (Formación santa Cecilia del cretáceo), *Tvx* (rocas volcánicas de la Equis de edad del pre Eoceno), *Tcmm* (Batolito de Mandé de 34 a 37 m.a. Eoceno) compuesta de rocas de grano grueso, *Tmcf* (Batolito de Farallones del Mioceno), y *Tdp* (Stock de cerro plateado). Dentro de las rocas sedimentarias encontrada en la zona: *Ksaau* (Formación Penderisco. Miembro Urrao del cretáceo superior) compuesta por lulitas, limolitas, lodolitas, areniscas, cherts; *Kcln* (Formación Penderisco. Miembro Nutibara del Coniaciano. Turoniano), *Tmu* (Formación Uva del Oligoceno) compuesta de calizas claras con estratificación media; *Taans* (Formaciones Napipi y Sierra del mioceno), y *Qal* (Depósitos cuaternarios. Aluviones y terrazas), *Qfl* (Flujo de lodos).

Obtenida la información correspondiente a la plancha se limita la información al área de estudio, dando como resultado un mayor detalle de la geología encontrada. De esta forma, la geología se decanta en seis (6) grandes grupos: Formación santa Cecilia – complejo la Equis (*Kvcs-Tvx* ó *E1E2-VCm*). Batolito de Mandé (*Tcmm* ó *E2-Pi*). Formación Penderisco (*Ksaau-Kcln* ó *K2K6-Sm7*). Batolito de Farallones (*Tmcf* ó *N1-VCc*). Stock de cerro plateado (*Tdp* ó *n4n5-Pi*). Depósitos cuaternarios: Aluviones y terrazas (*Q-al*).

Nota: El primer nombre corresponde a la plancha y el segundo a la ilustración de las formaciones obtenidas mediante QGIS.

6.2 MEDICIONES DE LAS FAMILIAS (TALUDES NATURALES)

6.2.1 NIVELES OPERACIONALES DE LA MTN

Los niveles operacionales de la MTN son: universo, población, subpoblación, y familia.

6.2.1.1 *Universo*

Este nivel operacional corresponde a todos los taludes naturales localizados y medidos en una zona delimitada de trabajo.

6.2.1.2 *Población*

Se define como taludes naturales medidos dentro de una sola categoría o unidad geológica de igual composición litológica edad y origen, y corresponde a una categoría geológica no mayor a la de una formación o miembro.

6.2.1.3 *Subpoblación*

Son taludes naturales medidos dentro de una formación geológica (o miembro) de gran extensión que puede tener zonas geomorfológicas claramente diferenciadas.

6.2.1.4 *Familia*

Conjunto de taludes naturales individuales ubicado dentro de un área delimitada por mediciones de una misma direccionalidad

Teniendo como información base la topografía del sitio y la geología se procede a realizar las mediciones de los taludes naturales denominadas familias. A nivel de familia, estas mediciones de L vs H desembocan en resultados con tres tipos de funciones de correlación:

$$H = a L^b \quad (1)$$

$$H = a(L_0 + L)^b \quad (2)$$

$$H = a + bL \quad (3)$$

Donde a y b son parámetros funcionales cuyos valores son diferentes en cada tipo de función.

De las tres funciones presentadas para la correlación la utilizada en este trabajo corresponde a la función potencial simple(16), en cuyo caso se obtienen valores del coeficiente de correlación (L vs H) “casi perfectos” Además los perfiles tipo convexos se ajustan mejor a este tipo de función.

Los sistemas de medición de taludes naturales corresponden a cuatro (4) tipos:

- Taludes enteros (TE)
- Faceta de taludes (FT)
- Taludes enteros de pendientes máximas (TEPX)
- Secuencia Cumulativo de Intervalos de Curvas de Nivel (SCICN)

De estos sistemas se destaca el SCICN el cual es el utilizado en las mediciones efectuadas en el presente trabajo.

6.2.2 SECUENCIAL CUMULATIVO DE INTERVALOS DE CURVAS DE NIVEL (SCICN)

Este sistema de medición es solo aplicable a nivel de familia. Se parte de la curva de nivel inferior o mínima dentro de la delimitación para una familia dada, y se mide todo el intervalo entre esta y la curva de nivel inmediatamente superior obteniendo así las distancias perpendiculares entre las dos curvas de nivel: la máxima y la mínima; posteriormente se calcula un promedio de estas dos.

De esta forma se continúa con la siguiente curva de nivel esta vez cubriendo dos intervalos entre curvas de nivel, se obtienen los tres valores de L correspondiente a un H que para los dos intervalos es el doble de la primera medición: de esta manera reiteradamente hasta cubrir todos los intervalos entre la curva de nivel mínima y la última superior dentro de la delimitación de la familia.

Finalmente se determina la altura límite superior o máxima (HLD) que se encuentra sobre la curva de nivel superior de la familia delimitada; así como, la longitud límite

superior o máxima medida entre la curva de nivel mínima o inferior y la curva de nivel máxima o superior.

El valor de la altura límite superior de la familia (HLD), -que es fundamental para la determinación y el enmarcamiento del Patrón triangular y el cálculo de parámetros geomecánicos y de estabilidad de la MTN,- está dado en algunos casos por esa última medición (ver) o, en otros, por la altura resultante de la diferencia entre el punto superior de la delimitación de la familia y la curva de nivel inferior o mínima.

(Shuk Erdos T. , 1999)

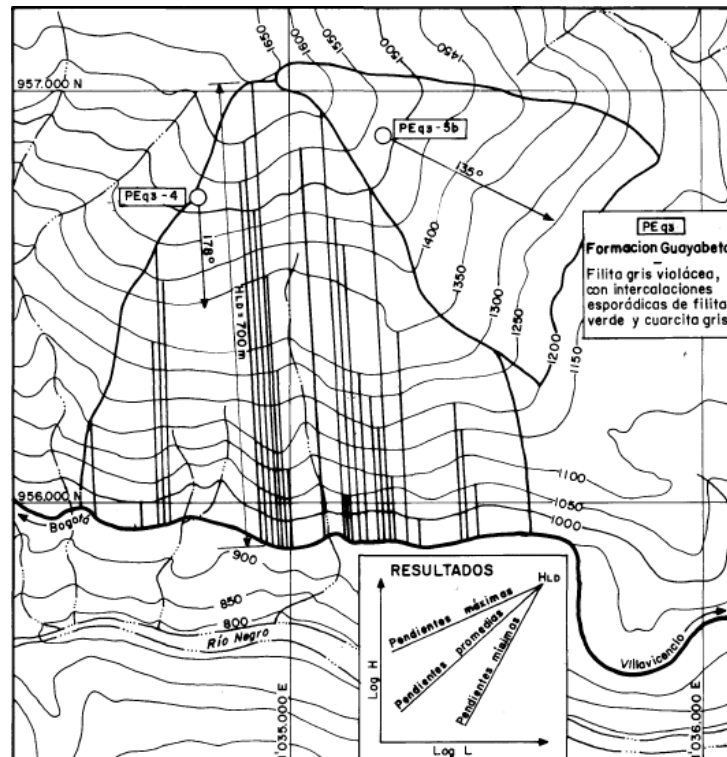


Figura 1 Sistema SCICN de medición de Familia de Taludes Naturales. -Formación Guayabetal. (Peq-3, Paleozóico); Carretera Bogotá - Villavicencio. (Tomado de: Shuk 1995)

Este procedimiento general es aplicable a perfiles de tipo convexo. Para el caso de familias con perfil cóncavo se debe realizar el procedimiento anterior comenzando desde la curva de nivel máxima o superior.

A continuación, se presentan las nociones básicas que se tienen en cuenta para las mediciones de taludes naturales utilizando el SCICN:

Con la información de la topografía y la geología y con apoyo de un programa SIG (QGIS) se miden las familias cumpliendo teniendo en cuenta que:

- El área delimitada (por familia) presenta un relativo paralelismo entre curvas de nivel, y su gradiente topográfico no varía bruscamente; la direccionalidad o azimut de medida es perpendicular a la dirección predominante del paralelismo.

Se desarrolló un código Python con el objetivo de realizar las mediciones del área delimitada (familia) o polígono previamente obtenido de un SIG - para este caso QGIS. – como se muestra en la Figura 2

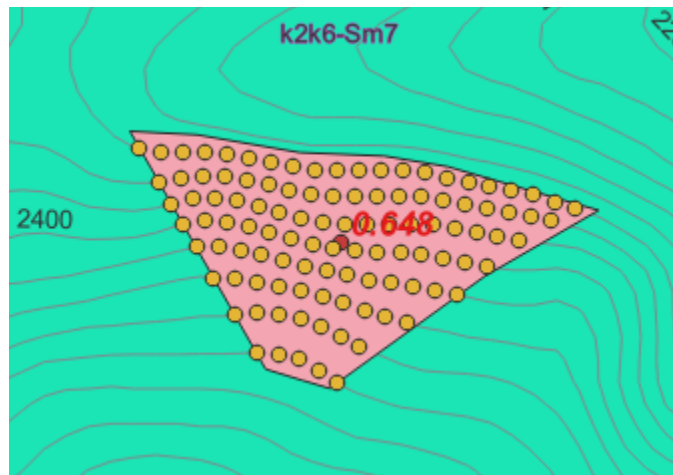


Figura 2 Delimitación de polígono y extracción de coordenadas. Elaboración propia (MOD QGis)

La delimitación del área debe tener que las curvas de nivel de las cotas menores siempre tienen mayor longitud que las superiores cuya área se muestra como un polígono o triángulo truncado, para que puedan efectuarse los cálculos.

Para ingresar al código los puntos que definen las curvas de nivel dentro del polígono se debe generar un archivo de Excel con una estructura como se muestra en la Tabla 1

Z	X	Y
2825	-8475731,942	667282,4443
2825	-8475744,281	667284,4143
2825	-8475756,611	667286,4697
2812,5	-8475729,182	667261,7321

Z	X	Y
2812,5	-8475741,682	667261,7321
2812,5	-8475754,139	667262,6028
2812,5	-8475766,522	667264,2824
2812,5	-8475778,435	667267,8669
2800	-8475727,523	667242,0356
2800	-8475740,023	667242,0356
2800	-8475752,488	667242,737
2800	-8475764,882	667244,3314
2800	-8475776,954	667247,3836
2800	-8475788,317	667252,4544
2787,5	-8475726,183	667226,1352
2787,5	-8475738,683	667226,1352
2787,5	-8475751,183	667226,0546
2787,5	-8475763,682	667225,9633
2787,5	-8475776,071	667227,0815
2787,5	-8475787,837	667231,0186
2787,5	-8475799,016	667236,6097
2775	-8475724,995	667212,097
2775	-8475737,494	667211,9874
2775	-8475749,973	667211,3834
2775	-8475762,425	667210,297
2775	-8475774,872	667210,1338
2775	-8475787,232	667211,9108
2775	-8475799,305	667215,0295
2775	-8475810,92	667219,6016
2775	-8475822,988	667222,8258
2762,5	-8475722,337	667197,7404
2762,5	-8475734,824	667197,5014
2762,5	-8475747,247	667196,1207
2762,5	-8475759,665	667194,691
2762,5	-8475772,058	667193,0898
2762,5	-8475784,525	667192,5806
2762,5	-8475796,917	667194,2067
2762,5	-8475809,183	667196,5947
2762,5	-8475821,21	667199,9867
2762,5	-8475833,585	667201,7549
2762,5	-8475845,959	667203,523
2750	-8475718,456	667176,7858
2750	-8475730,749	667178,7664
2750	-8475743,233	667178,8602
2750	-8475755,669	667177,6768
2750	-8475768,052	667175,9775
2750	-8475780,47	667174,5599
2750	-8475792,955	667174,2797
2750	-8475805,399	667175,3205
2750	-8475817,883	667175,6304
2750	-8475830,287	667176,9726
2750	-8475842,662	667178,7408
2750	-8475855,127	667179,232
2750	-8475867,537	667180,4943

Tabla 1 Puntos del polígono a calcular (Elaboración propia)

La cota de cada punto no tiene que estar necesariamente redondeada a un número entero, puesto que el código posteriormente en base a los parámetros suministrados agrupa los puntos en cotas enteras.

Al ejecutar el código se genera un cuadro de diálogo para introducir los parámetros necesarios como se muestra en la Ilustración 1

Ilustración 1 Cuadro de diálogo código Python

```
Ingrese la ruta del archivo: D:\Maestría\Zona de estudio\2022-07-22\Ejemplo\P116.xlsx
Ingrese cota de curva de nivel mas baja: 2750
Ingrese diferencias entre curvas de nivel: 13
Ingrese azimut de la línea que define la dirección de medida en grados: 30
Ingrese nombre del archivo de salida con la extensión .xlsx: Resultados_P116.xlsx
```

El azimut o dirección de medida se determina en base a la orientación del polígono ingresado. A continuación, en la Figura 3 se explican las cuatro (4) orientaciones posibles:

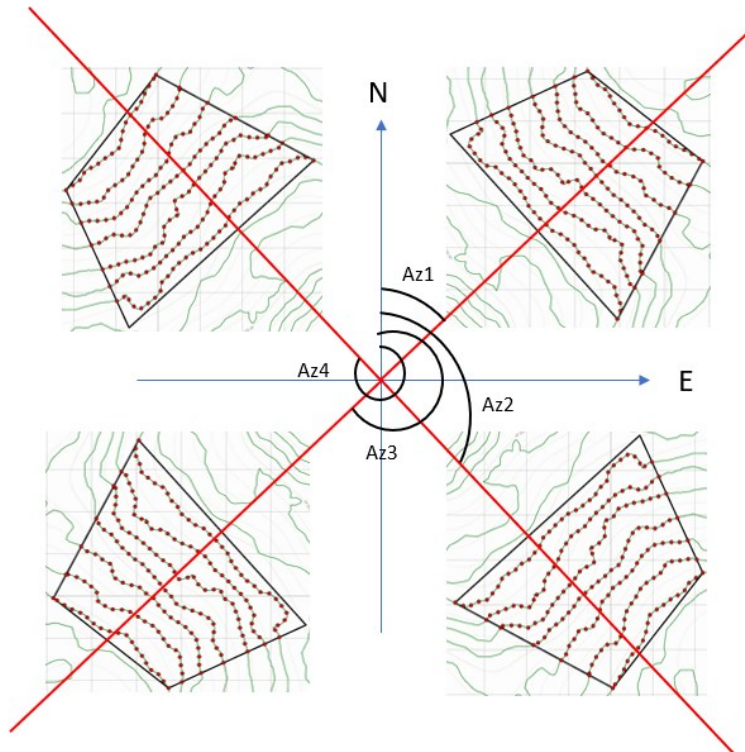


Figura 3 Posibles rotaciones de los polígonos según su orientación (Elaboración propia)

De acuerdo a lo anterior, y según el cuadrante de la orientación de cada polígono se le asigna el valor del azimut (ángulo medido desde el norte). De acuerdo a los datos introducidos en la Ilustración 1 este polígono se encuentra entre 0 y 90° con

un ángulo de 30° este principio se toma en cuenta para cada una de los polígonos a medir.

AZ1: Azimut entre 0 y 90 grados.

AZ2: Azimut entre 90 y 180 grados.

AZ3: Azimut entre 180 y 270 grados.

AZ4: Azimut entre 270 y 360 grados.

Luego de realizar la rotación la dirección de medida coincide con el eje Y de coordenadas permitiendo así que el cálculo de las distancias sea mucho más fácil.

Finalmente, se exporta el archivo de los resultados de las mediciones en un formato **.xlsx** con el nombre asignado como se muestra en la Ilustración 1. Este archivo obtenido permite visualizar parámetros entre otros, las mediciones de las distancias con su respectivo intervalo como se observa en la Tabla 2 para cálculos posteriores.

DELTA H	LONGITUD MAX	LONGITUD MIN	LONGITUD PROM TOTAL	LONGITUD PROM ARITMETICO
12,5	27,51005	16,30452	20,87060739	21,9072835
25	50,64787	34,14561	40,5112068	42,39674148
37,5	68,38126	53,98417	59,94307376	61,18271782
50	86,91365	75,86593	80,60274941	81,38978891
62,5	104,8603	100,5223	102,6836051	102,691296
75	127,6662	124,7653	126,1164611	126,2157647
Todos	127,6662	16,30452	48,35976386	71,98535603

Tabla 2 Valores L, H de la medición del polígono (Elaboración propia)

6.2.3 CUBRIMIENTO DE LAS MEDICIONES

En cuanto al tipo de medición de las familias de taludes la metodología presenta dos formas de realizarlo: un tipo de cubrimiento sesgado, es decir; tomando solo los taludes de mi área específica de estudio como los de un proyecto en particular, tomando un muestreo del área de estudio; el segundo es un tipo de cubrimiento total que consiste en la medición de todas las familias de taludes naturales medibles dentro de un área de estudio. Este tipo de cubrimiento permite el mayor conocimiento posible del área de estudio. En el presente trabajo se considera las mediciones con un cubrimiento total de los taludes naturales del área urbana y

suburbana del municipio del Carmen de Atrato – Chocó, priorizando así taludes en proximidades a la cuenca hidrográfica del río Atrato, así como en la vía que conecta con el departamento de Antioquia y con el interior del país como se menciona anteriormente. Se realiza, por tanto, las mediciones sobre esta extensión del municipio con un total de 431 familia de taludes naturales como se muestra en los anexos. Las mediciones se hicieron sobre una misma formación geológica. La formación geológica de estudio es la Formación Penderisco conformada por Lutitas, areniscas lodosas y líticas, calizas de esquistos, tobas y aglomerados.

6.3 PATRÓN TRIANGULAR

6.3.1 PATRÓN TRIANGULAR A NIVEL DE FAMILIA

En la Figura 1 (recuadro inferior derecho) se observa que los datos medidos desembocan en tres tipos de tendencia de pendientes, las dos tendencias externas (superior e inferior) delimitan lo de que denomina “Patrón triangular”. De igual manera, este Patrón también se evidencia en los niveles de medición superiores al de familia.

Una vez obtenidas las mediciones de las familias de taludes naturales y teniendo como resultado los datos de las longitudes (L) -máximas, mínimas y promedio-, y los intervalos de altura (H) denominados parámetros geométricos; se procede a determinar los parámetros funcionales a través de la ecuación de la función potencial simple que como se mencionó antes presenta un coeficiente de correlación “casi perfecto”, por lo cual es esta la ecuación utilizada en el cálculo de los parámetros funcionales *a* y *b*.

6.3.1.1 PARÁMETROS FUNCIONALES *a* y *b*

Los datos obtenidos según la Tabla 2 corresponden a los parámetros geométricos de cada familia. Dada la forma de la relación de causalidad entre longitud (L) y altura (H), la cual se expresa:

$$H = a L^b \quad (16)$$

Esta se transforma a:

$$\log H = \log a + b \log L \quad (4)$$

De la ecuación (4) se tiene que $\log a$ es el término constante para la regresión lineal de la pareja de datos $\log H$ y $\log L$ y que b es la pendiente de la regresión. Ver Tabla 3

Log H	Log L Máx	Log L Mín
1,09691001	1,43949133	1,21230802
1,39794001	1,70456122	1,53333487
1,57403127	1,83493711	1,73226646
1,69897	1,93908798	1,88004679
1,79588002	2,02061093	2,00226255
1,87506126	2,1060759	2,09609395

Tabla 3 Cálculo logarítmico de las mediciones obtenidas (Elaboración propia)

La Tabla 3 corresponde al cálculo logarítmico de los datos geométricos medidos de cada familia -Longitud (L máx y L mín), y la altura (H). – Posteriormente, se procede a realizar correlación lineal y así determinar a y b los parámetros funcionales. Ver Tabla 4

	Min	Max	Prom
a:	1,103227821	0,241313713	0,515969
b:	0,878206464	1,190002792	1,0341046
r:	0,998968979	0,998968979	

Tabla 4 Correlación lineal para estimación de los parámetros a y b (Elaboración propia)

En la Tabla 4 los parámetros a y b corresponden a los datos promedios de las correlaciones lineales. Para el caso de a se estima mediante un promedio logarítmico; y b se estima con el promedio aritmético de los datos. r denominado coeficiente de correlación presenta un valor cercano a 1 por lo que se evidencia buena correlación de los datos.

6.3.1.2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

Como se mencionó anteriormente, los parámetros de la función potencial simple los parámetros geométricos de esta función corresponden a los mostrados en la Tabla 5 que son las parejas de Longitud (L) y Altura (H) de cada familia. Para cada familia

se deben determinar la Longitud límite superior de la familia (LLD) y altura límite superior de la familia (HLD), que corresponden a la longitud máxima en la cresta y la altura máxima de los datos medidos respectivamente. Los valores de *a*, *b*, *HLD* y *LLD* para esta familia se presentan en la Tabla 5.

a	b
0,515968993	1,034104628
LLD	HLD
127,7	75,0

Tabla 5 Parámetros función potencial simple

Según la forma básica de la familia de taludes naturales el parámetro funcional *b* tiene los siguientes valores: perfil convexo $b < 1$. Perfil cóncavo $b > 1$. Dado que la fundamentación empírico-teórica de la MTN requiere que el valor de *b* sea inferior a 1 ($b < 1$), y tal como se mencionó previamente para el caso de familias con una forma básica cóncava, se debe ejecutar el proceso de medición SCICN de manera inversa a la empleada para la forma convexa, o sea, de arriba abajo (Shuk Erdos T. , 1995)

De esta forma y según la Tabla 5 la familia presenta un perfil cóncavo por lo cual se corrige el parámetro *b* de forma que:

$$b_{\text{corregido}} = 1/b \quad (5)$$

El valor de *b_{corregido}* así como el valor de *a* son utilizados en los cálculos correspondientes de la ETEC presentados más adelante.

6.3.1.3 EVALUACIÓN DE LA FAMILIA DE TALUDES NATURALES

Una vez obtenidos los parámetros de la función potencial simple de la Tabla 5 y verificado el tipo de perfil se evalúa la familia delimitada con fin de determinar las familias que son aceptadas, -así como las familias que son rocas o las que son rocas degradadas- y las que son rechazadas según el criterio de aplicación de la MTN.

De acuerdo a (Shuk Erdos T. , 1995) la MTN es aplicable a familias de taludes naturales medidas cuyo tangente límite (inferior) de la función de correlación entre

L y H ($\tan \beta Lf$) sea menor a 1; es decir, taludes que tengan ángulo de inclinación entre 10° y 45° . Además, el parámetro adimensional de presurización Pa debe ser menor al parámetro adimensional de presurización máxima $Pa_{m\acute{a}x}$. De igual forma, se calcula el valor de X_{LH} que determina la característica del material; si este valor es $X_{LH} < 1.0$ es considerado roca degradada, en su efecto si es $X_{LH} > 1.0$ se considera roca. Todos estos aspectos y parámetros se abordan más detalladamente en el capítulo de la ETEC; sin embargo, aquí se evalúan para determinar qué familias son aceptadas para los cálculos posteriores.

Se calculan los parámetros funcionales (de la función potencial simple) para la familia con perfil cóncavo

De la ecuación (5) se tiene:

$$b_{\text{corregido}} = \frac{1}{1.034104628} = 0,967020138$$

Para calcular la longitud y altura límite (superior) para una función potencial simple dada que relaciona L y H (L_{LF} y H_{LF} ; respectivamente) Según (Shuk Erdos T. , 1995, pág. 47) se sigue el siguiente procedimiento:

Primero se calcula L_{LF}

$$L_{LF} = \left[\frac{H_{LD}}{a \left(L_{LD}^{\left(\frac{1}{b} \right)} \right)} \right]^{\frac{b}{b^2+1}} \quad (6)$$

$$L_{LF} = \left[\frac{75m}{0.516 * \left(127.7m^{\left(\frac{1}{1.034} \right)} \right)} \right]^{\frac{1.034}{1.034^2+1}}$$

$$L_{LF} = 125.414m$$

Se calcula H_{LF} con la ecuación de potencial simple con la altura y longitud límite (superior).

$$H_{LF} = a (L_{LF}^b) \quad (7)$$

$$H_{LF} = 0.516 * (125.414m)^{1.034}$$

$$H_{LF} = 76.3018m$$

Se calcula el a en función de H_{LF} y L_{LF} y $b_{correctado}$. De la función potencial simple se obtiene:

$$a = \frac{H_{LF}}{(L_{LF})^{b_{correctado}}} \quad (8)$$

$$a = \frac{76.3018m}{(125.414m)^{0.967}}$$

$$a = 0.7135$$

Como se mencionó anteriormente, la medición de los taludes debe cumplir dos (2) condiciones para ser aceptada: el tangente límite (inferior) de la función de correlación L y H debe ser menor a 1 ($\tan \beta_{LF} < 1$), y el parámetro adimensional de presurización (Pa) debe ser menor al parámetro adimensional de presurización máxima ($Pa_{m\acute{a}x}$).

6.3.1.3.1 Condición 1

Se calcula el tangente límite (inferior) de la función de correlación L y H $\tan \beta_{LF}$

$$\tan \beta_{LF} = \frac{H_{LF}}{L_{LF}} \quad (9)$$

$$\tan \beta_{LF} = \frac{76.3018m}{125.414m}$$

$$\tan \beta_{LF} = 0.6084$$

Para la condición 1 el criterio se considera aceptado dado que inclinación de la medición de la familia es menor a 45° .

6.3.1.3.2 Condición 2

Para el cálculo del parámetro adimensional de presurización Pa primero se plantean en secuencias tres factores adimensionales así:

$$F_1 = \frac{a}{(H_{LF})^{1-b}} \quad (10)$$

$$F_1 = \frac{0.7135}{(76.3018)^{1-0.967}}$$

$$F_1 = 0.6184$$

$$F_2 = \frac{F_1^{F_1}}{b^b} \quad (11)$$

$$F_2 = \frac{0.6184^{0.6184}}{0.967^{0.967}}$$

$$F_2 = 0.7674$$

$$F_3 = (F_2)^{1-b} \quad (12)$$

$$F_3 = (0.7674)^{1-0.967}$$

$$F_3 = 0.9913$$

Se calcula el parámetro adimensional de resistencia máxima al corte S_a

$$S_a = \frac{F_1(b^b)}{F_3} \quad (13)$$

$$S_a = \frac{0.6184 * (0.967)^{0.967}}{0.9913}$$

$$S_a = 0.6039$$

Para calcular el parámetro adimensional de presurización Pa

$$Pa = b - S_a \quad (14)$$

$$Pa = 0.967 - 0.6039$$

$$Pa = 0.3631$$

Se determina el parámetro adimensional de presurización máxima $Pa_{máx}$

$$Pa_{máx} = \frac{b + 1}{b + 2} \quad (15)$$

$$Pa_{máx} = \frac{0.967 + 1}{0.967 + 2}$$

$$Pa_{máx} = 0.6629$$

Para la condición 2 el criterio se considera aceptado dado que $Pa_{máx} > Pa$.

6.3.1.3.3 Límite entre roca y roca degradada

Finalmente, en la evaluación de la familia se determina el parámetro X_{LH} que es el límite de la condición de roca y roca degradada; este parámetro se detalla más adelante en el capítulo de la ETEC.

$$X_{LH} = a^{\frac{1}{1-b}} \quad (16)$$

$$X_{LH} = (0.7135)^{\frac{1}{1-0.967}}$$

$$X_{LH} = 0.000035856$$

Como X_{LH} es menor a 1 la familia corresponde a roca degradada. El resumen de la evaluación de la familia se presenta en Tabla 6.

Evaluación de la familia							
Talud	a	b	HLD	LLD	a corregido	b corregido	HLF
169	0,515968993	1,03410463	75	127,666192	0,7134938	0,9670201	76,301773
LLF	TanβLF	F1	Sa	Pa	Pa máx	XLH	
125,414474	0,608396869	0,6184498	0,6039659	0,3630542	0,6629615	0,00003586	R. degradada
Condición 1 TanβLF<1		Condición 2 Pa<Pa Máx					
Acepto		Acepto					

Tabla 6 Resumen de la evaluación de la familia

En el anexo se presenta el resumen de la evaluación realizada para todas las familias delimitadas. El resumen presentado incluye por lo demás, las familias aceptadas para realizar la construcción del patrón triangular a un nivel superior al de familia (subpoblación, población y/o universo)

6.4 PATRÓN TRIANGULAR A NIVEL DE POBLACIÓN

Como se hace mención en el numeral 6.2.3 en la zona de estudio se delimitan 431 familias, correspondiente a la Formación Penderisco área compuesta mayormente por rocas sedimentarias como: lutitas, areniscas lodosas, entre otras; de las cuales mediante la evaluación familia a familia mostrada en el numeral 6.3.1.3 se aceptan 409 familias.

De acuerdo a lo anterior se realiza el patrón triangular para las familias que cumplen con el criterio de aceptación.

Según (Shuk Erdos T. , 1999, pág. 18), el Patrón Triangular se presenta en todas las posibilidades de la amplia gama de composiciones litológicas, edades, orígenes y texturas de los materiales geológicos, desde las rocas duras y resistentes, hasta los suelos más blandos tales como arcillas marinas. Esta forma triangular solo se aprecia si los resultados de dichas mediciones se grafican en escala log-log (papel logarítmico).

De acuerdo a lo anterior, se tomaron todas las mediciones correspondientes a las parejas de L vs H de las familias que cumplen con el criterio, es decir, los H_{LD} y L_{LD} medidos de la forma presentada en la Tabla 5 de las 409 familias dibujadas en escala logarítmica y así determinar el patrón triangular a nivel de la población estudio.

El Patrón triangular conformado de esta manera corresponde a un modelo determinístico dado por las relaciones de causalidad físico – geomecánicas, y gobernadas por las siguientes propiedades físicas de la masa de materiales rocosos, algunas de las cuales se muestran en la Figura 4 (Shuk Erdos T. , 1999)

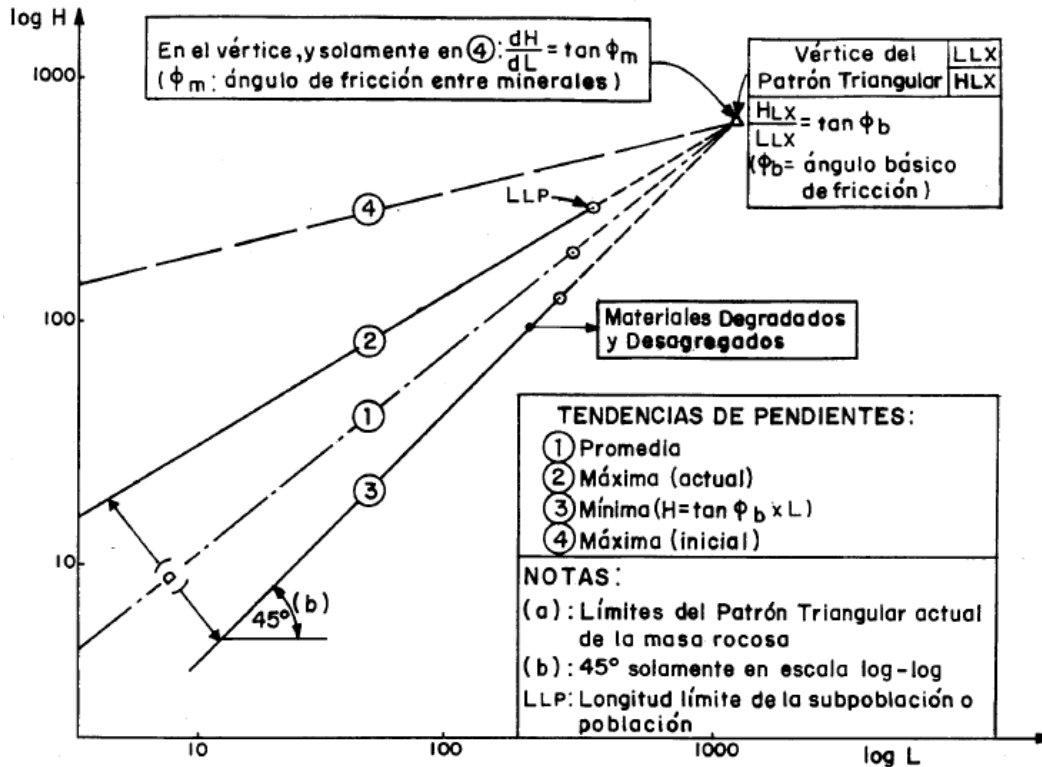


Figura 4 Rasgos del Patrón Triangular (Determinístico). (Tomado de: Shuk, 1995)

Para la construcción del Patrón Triangular de la población estudio se deben determinar las tendencias de pendientes en función de las parejas de las mediciones realizadas.

6.4.1 LÍMITE SUPERIOR ACTUAL E INICIAL DEL PATRÓN TRIANGULAR

Este límite superior está dado por los siguientes resultados para los dos tipos de tendencias de pendientes máximas (2 y 4) de la Figura 4.

- Tendencia Actual de pendientes máximas: en el caso de esta tendencia su función potencial (a nivel de subpoblación, población o universo) se obtiene mediante la correlación de los puntos de mayor valor de H_{LD} que, a su vez represente la tendencia de la mayoría de los puntos graficados -parejas H_{LD}, L_{LD} - en escala logarítmica. Usualmente se escoge un número no menor de tres puntos y su expresión potencial simple es:

$$H = a_a(L^{b_a}) \tag{17}$$

Donde: Usualmente $b_a: (0.5 - 0.9)$, y $a_a: > 1.0$

- Tendencia inicial (o de origen) de Pendientes máximas: Los parámetros de caracterización de la masa, -cuyos estimativos parten de esta tendencia inicial (o de origen) de las pendientes máximas -, solo se pueden estimar con base en sus resultados. La expresión matemática que representa esta tendencia de pendientes es:

$$H = a_x(L^{b_x}) \quad (18)$$

Donde: $b_x < 0.5$ (usualmente) = $\frac{\tan \varphi_m}{\tan \varphi_b}$

, y $a_x = \frac{H_{LX}}{L_{LX}^{b_x}}$ (significativamente > 1.0).

De la Tendencia Actual de Pendientes Máximas se obtiene -como resultado de las mediciones- la función potencial simple los parámetros geométricos H y L y funcionales a_a y b_a . Según se muestra en la Figura 4 para esta tendencia se tiene una longitud correspondiente a la longitud límite (superior) de la subpoblación o población (L_{LP}), y en muchos casos (pero no en todos), corresponde al punto de máxima altura (H_{LP}) dentro del patrón como sí es este caso.

Como se observa en la Figura 5 y de las mediciones se obtiene que H_{LP} y L_{LP} ; respectivamente equivalen a 165.5 m y 288.77 m . Con este punto y otro H vs L , -en escala log-log- 112.5 m y 115.74 m ; respectivamente, que representa la tendencia de la mayoría de los puntos graficados (ver Figura 5) se traza una pendiente cuya regresión potencial en escala logarítmica representa la función potencial de la cual se pueden obtener los parámetros funcionales a y b . De la Figura 5 se obtiene que:

$$a_a = 16.644 \text{ y } b_a = 0.402$$

Estos datos son parámetros de entrada para el cálculo del ángulo básico de fricción

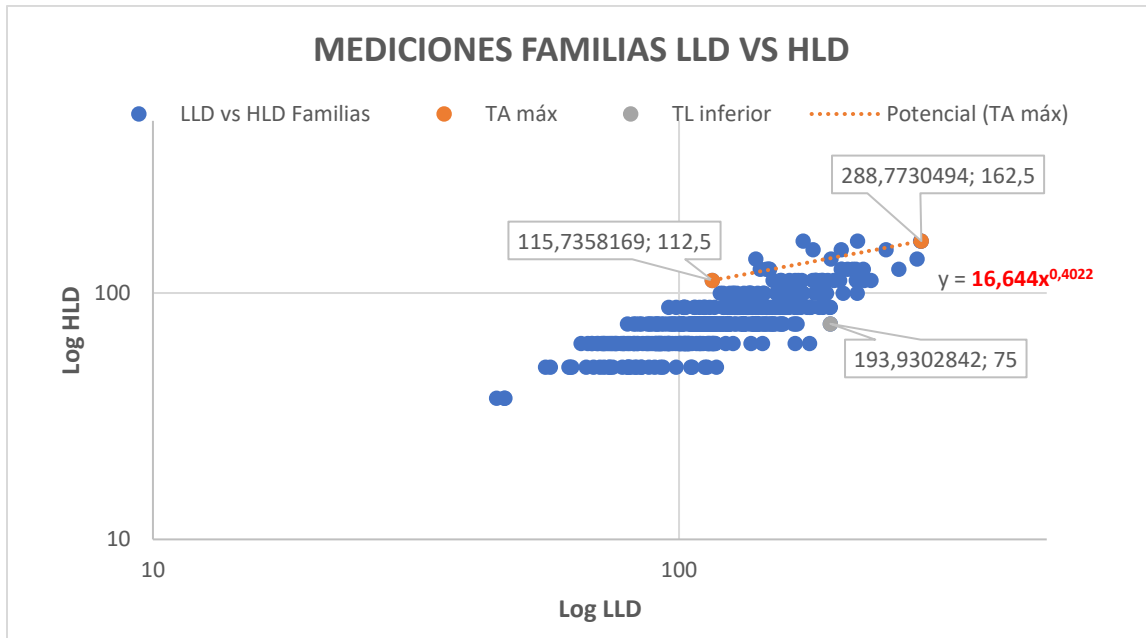


Figura 5 Mediciones de LLD vs HLD de todas las familias de taludes naturales (Elaboración propia)

6.4.2 ÁNGULO BÁSICO DE FRICCIÓN

Según Tomas Shuk (Shuk Erdos T. , 1999), El valor del ángulo básico de fricción (φ_b) es el mismo para cualquiera de las muchas posibles tendencias del Patrón triangular -incluyendo la máxima, promedio y mínima- y que es igual al ángulo de fricción residual efectivo (para la condición de masa). En rocas, φ_b evidencia un rango de variación entre 25° (Lutitas) y 37° (Granitos, areniscas duras). A su vez, dicho valor puede ser un poco superior o inferior (3 a 5%) del ángulo de fricción residual que se puede determinar por medio de ensayos de corte directo tipo Hoek y Bray (1977).

El ángulo básico de fricción, determina la ubicación del límite inferior del Patrón triangular, este se estima con base a la convergencia de un proceso iterativo como se detalla a continuación.

Se comienza con un valor asumido de el $\tan \varphi_b$. Se asume un valor de $\tan \varphi_b = 0.6$ dado el posible rango de valores de un φ entre 25° y 37° en rocas.

Para cualquier ciclo de iteración ($n = 1, 2, \dots$), y con base a los parámetros funcionales obtenidos en el numeral 6.4.1 se estiman los parámetros $(L_{LX})_n$ y $(H_{LX})_n$ del vértice, así:

$$(L_{LX})_n = \left[\frac{a}{\tan \varphi_b} \right]^{\left[\frac{1}{1-b} \right]} \quad (19)$$

$$(H_{LX})_n = a(L_{LX})_n^b \quad (20)$$

Posterior a la estimación del vértice se sigue el procedimiento de cálculo para el resto de un ciclo dado (n) de iteración:

$$(\tan \varphi_b)_n = \frac{(H_{LX})_n}{(L_{LX})_n} \quad (21)$$

$$(b)_n = (\tan \varphi_b)_n \quad (22)$$

$$(a)_n = \frac{(H_{LX})_n}{(L_{LX})_n^{(\tan \varphi_b)_n}} \quad (23)$$

$$(L_{LF})_n = L_{LP} \quad (24)$$

El valor de $(L_{LF})_n$ corresponde a la longitud límite (superior) de la población previamente obtenido de las mediciones y tendencia actual pendientes máximas. Y el valor de $(H_{LF})_n$ corresponde a la potencial en base a los parámetros funcionales de un ciclo dado (n) de iteración:

$$(H_{LF})_n = (a)_n (L_{LP})_n^{(b)_n} \quad (25)$$

$$(\tan \beta_{LF})_n = \frac{(H_{LF})_n}{(L_{LF})_n} \quad (26)$$

Y si $(\tan \beta_{LF})_n^{(b)_n}$ se representa por "T" entonces:

$$(S_a)_n = (T^{(1-T+((b)_n T))}) (b_n^{2b_n - b_n^2}) \quad (27)$$

Y si: $(S_a)_n \neq (\tan \varphi_b)_n$, se procede al siguiente ciclo de iteración (n+1), utilizando el $(\tan \varphi_b)_n$ obtenido; y así sucesivamente.

A continuación, se resumen los cálculos iterativos para determinar el $(\tan \varphi_b)$ correspondiente a la población:

En la Tabla 7 se presentan los parámetros de entrada provenientes de la Tendencia Actual de pendientes máximas como se explica en el numeral 6.4.1; Figura 4. En la Tabla 7 se muestran los ciclos de iteraciones realizadas para determinar el $(\tan \varphi_b)$.

Finalmente, en la Tabla 7 se presenta el resumen de los cálculos realizados. También se tiene el valor del vértice ($H_{LX} = 177,708m$, $L_{LX} = 360,718m$), y el $(\tan \varphi_b = 0.49265)$ que son necesarios para la delimitación del Límite Inferior del Patrón Triangular.

Resumen de los parámetros	
LLP	288,773049
HLP	162,5
(LLX)n	360,717891
(HLX)n	177,70854
tan φ_b	0,49265241
bn	0,49265241
an	9,77042521
(LLf)n	288,773049
(HLf)n	159,262176
Tan BLf	0,55151329
T	0,74589369
Sa n	0,49265241

Tabla 7 Resumen de los datos y cálculo de las iteraciones (Elaboración propia)

Finalmente, al calcular el $\tan \varphi_b$ se obtiene que el ángulo básico de fricción para la población es de $\varphi_b = 26^\circ$. Como se explicó previamente las rocas presentan un ángulo básico de fricción que va de 25° (lutitas) a 37° (granitos, areniscas duras).

Las familias de taludes medidas no solamente corresponden a rocas, sino que también y en gran medida de rocas degradadas como se muestra en el anexo (resumen de los parámetros de las familias).

La población de la zona de estudio corresponde a la Formación Penderisco; en su mayoría compuesta de rocas sedimentarias como lutitas, areniscas lodosas, esquistos, entre otras de edad cretácico superior como se menciona en el numeral 6.2.3. Las lutitas cuyo ángulo básico de fricción se acerca a $\varphi_b = 25^\circ$ se puede decir, que el valor obtenido para la población se acerca sustancialmente a los valores esperados para este tipo de rocas. Además, el valor del ángulo básico de fricción se espera que se acerque (3 a 5%) al valor del ángulo de fricción residual que se puede determinar por medio de ensayos de corte directo tipo Hoek y Bray (1977).

6.4.3 ÁNGULO DE FRICCIÓN ENTRE MINERALES

La tangente de este ángulo, -en combinación con el valor de $\tan \varphi_b$ -, define el parámetro funcional b de la tendencia de pendientes máximas inicial (o de origen) ver numeral 6.4.1.

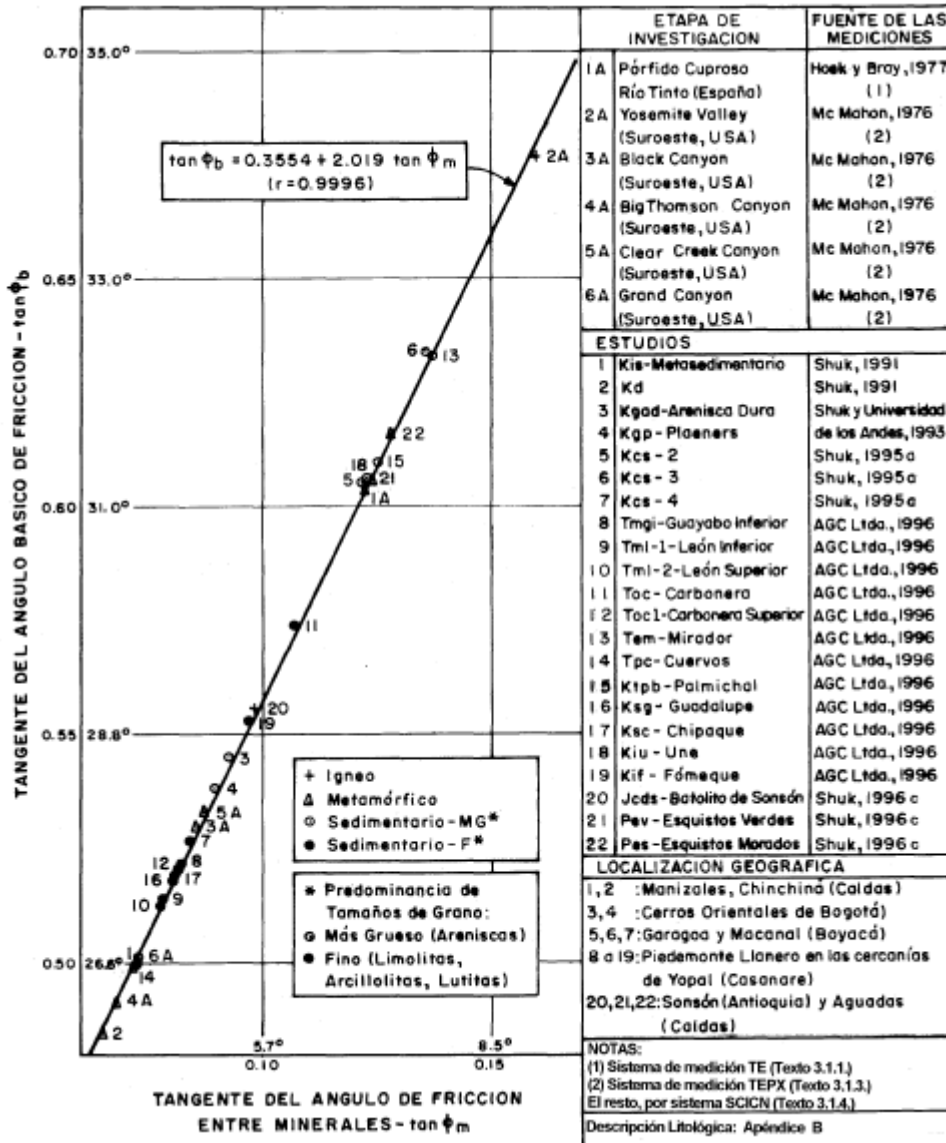


Figura 6 Relación entre la Tangente del Ángulo de Fricción entre minerales ($\tan \phi_m$) y la Tangente del Ángulo Básico de Fricción ($\tan \phi_b$) (Tomado de: Shuk 1996b)

En la Figura 6 se observa que la relación entre $\tan \phi_m$ y $\tan \phi_b$ es única y funciona para cualquier tipo de roca independientemente de su litología, edad, origen, textura, o su localización geográfica (Shuk Erdos T. , 1999); y además evidencia un grado de correlación (r) “casi perfecto”.

Siguiendo el procedimiento mostrado en el 6.4.1 en la Figura 7 se obtiene la Tendencia de pendientes límite superior inicial (o de origen) del Patrón Triangular.

6.4.4 LÍMITE INFERIOR DEL PATRÓN TRIANGULAR

En el caso de rocas, este límite, que corresponde a la tendencia de pendientes mínimas en los niveles de subpoblación y población, casi siempre representada por una recta de 45° en escala log-log; y su expresión matemática determinada por:

$$H = (\tan \varphi_b)(L) \quad (28)$$

Si el muestreo de taludes fue del tipo de “cubrimiento total”, la función potencial simple del límite inferior y sus parámetros funcionales se obtienen por medio de la correlación de aquellos de sus puntos que están ubicados más hacia la derecha del promedio, esta tendencia también debe interceptar el Patrón triangular. Si existe presencia significativa de materiales degradados o desagregados se puede determinar la ecuación para dicha función, que presenta la siguiente forma:

$$H = a_i L^{b_i} \quad (29)$$

$$a_i < 1.0 \text{ y } b_i > 1.0$$

Según se muestra en la Ilustración 2, el Límite Inferior del Patrón Triangular separa la roca de los materiales degradados y desagregados. A nivel de familia, los materiales desagregados se pueden identificar por medio del parámetro $X_{LH} < 1.0$ como se muestra en la ecuación (16) y que representa la intersección de una recta ($L = H$) de 45° con la tendencia potencial simple de las pendientes promedias de una familia.

A nivel de una subpoblación o población realmente constituidas por rocas el valor de X_{LH} siempre es mayor que 1.0. Pero, en ciertos casos, puede ocurrir que una o varias familias, -ubicadas dentro del Patrón Triangular de una roca dada-, evidencian un valor de X_{LH} menor de 1.0, lo cual se debe al control morfológico ejercido por la roca subyacente al material desagregado y lo hace adoptar la misma geoforma de ésta (Shuk Erdos T. , 1999).

En la Figura 5 se observa el punto en el extremo derecho de los resultados (L_{LD}, H_{LD}) $H_{LD} = 75m$, $L_{LD} = 193,93m$. Este punto intercepta el vértice, de donde se tienen los

parámetros funcionales de la función potencial simple de este límite inferior. Los parámetros funcionales de la función son:

$a_i = 0.0495$; y $b_i = 1.39$ cuyo comportamiento se asemeja a la tendencia del límite inferior obtenidos para el nivel de universo como se explica en la ecuación (29).

De acuerdo con la ecuación (28) y considerando que a nivel de población el límite de rocas se considera en la tendencia de pendientes mínimas, los parámetros funcionales (a y b) en este caso están determinados de la siguiente manera:

$$a_i = \tan \varphi_b; b_i = 1.0$$

6.4.5 MATERIALES DEGRADADOS Y DESAGREGADOS

Los materiales que son considerados como degradados y desagregados corresponden a rocas fracturadas, o materiales conglomeráticos y mezclas de fragmentos de roca y suelo, por secuencias de materiales derivados de una misma roca paterna, o por materiales transportados o foráneos a la población analizada.

La Ilustración 2 muestra los tres (3) factores causales (desagregación, degradación y variabilidad) de naturaleza compuesta y relacionados con su edad, con los procesos evolutivos a los que han estado sujetos y con su variabilidad, determinan la posición relativa y la amplitud de su Patrón Triangular Actual, con respecto al espacio total de su Patrón Triangular Inicial (o de origen). De la Ilustración 2 A ha girado hacia abajo en forma mínima la tendencia actual de pendientes máximas con respecto a su tendencia inicial (o de origen) de pendientes máximas; representa un grado casi insignificante de degradación y de variabilidad y con una desagregación nula. La Ilustración 2B muestra baja degradación y nula desagregación y una variabilidad mayor que la Ilustración 2^a. Las gráficas (C, D, y E) la tendencia actual de pendientes máxima inicial se aleja de la tendencia de pendientes máxima inicial, situación que marca menor o mayor degradación. Hasta la Ilustración 2 E que ejemplifica un grado casi total de degradación y desagregación y una variabilidad mínima.

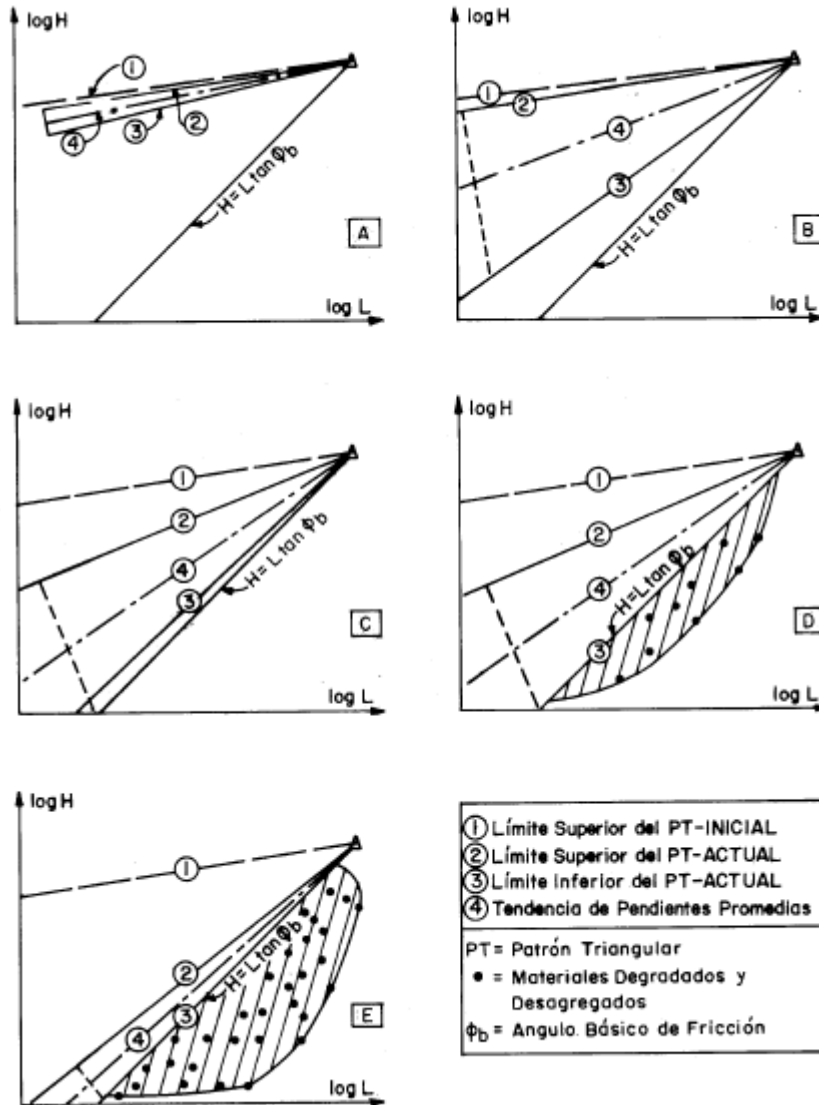


Ilustración 2 Evaluación del Patrón Triangular de una Subpoblación o Población - Características de Degradación, Desagregación y Variabilidad (Tomado de: Shuk, 1999)

6.4.6 VÉRTICE DEL PATRÓN TRIANGULAR

Es considerado como el punto de intersección de los límites superior e inferior del Patrón Triangular. En la Tabla 7 se observa que el vértice (H_{LX}, L_{LX}) es $H_{LX} = 177.708m$ y $L_{LX} = 360.718m$. El parámetro que define la altura del vértice de su Patrón Triangular H_{LX} generalmente corresponde al espesor estratigráfico de esa formación.

6.4.7 TENDENCIA DE PENDIENTES PROMEDIAS

Esta tendencia es la más importante del Patrón Triangular para los estimativos geomecánicos y de estabilidad. En el caso de cubrimiento total, la correspondiente función potencial simple debe interceptar el vértice (H_{LX}, L_{LX}) del Patrón Triangular y pasar por el punto H_{LD}, L_{LD} que representa el promedio (logarítmico) para todas las familias, este solamente para las de la parte del Patrón Triangular que corresponde a la roca. Ver Figura 7

Para obtener la función promedio que sirve de base para el estimativo del Factor de Seguridad Relativo (Se explica en el 6.6), las expresiones son:

$$a_p = \log^{-1} \frac{(\log a_i) + (\log a_a)}{2} \quad (30)$$

$$b_p = \frac{b_i + b_a}{2} \quad (31)$$

Los parámetros funcionales corresponden a:

$$a_p = 2.863$$

$$b_p = 0.701$$

En la tabla se presenta el resumen de los parámetros funcionales de las tendencias de pendientes máxima (superior), mínima (inferior), y promedio del Patrón Triangular como se observa en la Tabla 8.

POBLACIÓN	
aa Pendientes máximas actuales	16,6444301
ba pendientes máximas actuales	0,40217909
ai pendientes mínimas	0,492652
bi pendientes mínimas	1,00
ap	2,863
bp	0,701

Tabla 8 Resumen de parámetros funcionales de las tendencias de pendientes del Patrón Triangular

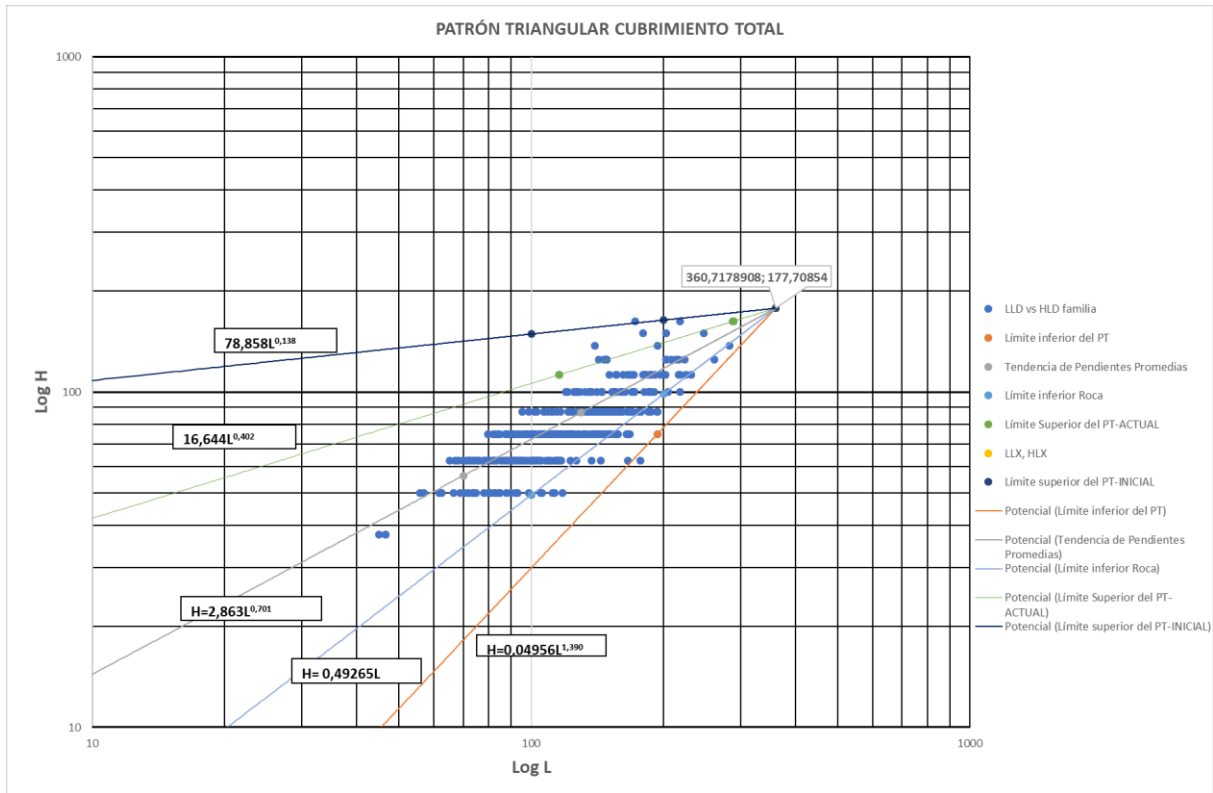


Figura 7 Patrón Triangular de la Población. Zona de estudio El Carmen de Atrato (Elaboración propia)

La tendencia de pendiente promedio del Patrón Triangular de la población es importante en el estimativo del factor de seguridad relativo que se menciona en el numeral no solo relaciona la función potencial simple (para la categoría de tiempo a largo plazo) sino también parámetros geomecánicos (que se detalla en el numeral 6.5.4 de factores de seguridad relativos sobre categorías de tiempo mediano y corto plazo).

Los parámetros geomecánicos necesarios para la estimación de los Factores de Seguridad relativos son obtenidos a partir del Sistema Analítico de la MTN (SAMTN).

6.5 SISTEMA ANALÍTICO DE LA MTN (SAMTN)

Denominado SAMTN, está conformado por el análisis combinado de la ETEC (Envoluta Transformada de Esfuerzos de Corte) y de unas envolutas denominadas “hipotéticas”, surge del conjunto de unas relaciones matemáticas “de una

manipulación sistemática, consistente pero arbitraria y que de por sí solo tiene una relación indeterminada con las propiedades reales de los materiales geológicos. A dichas propiedades reales solo se llega gradualmente por medio de las herramientas que se basan en la utilización de unas envolutas (Shuk Erdos T. , 1999, pág. 40).

6.5.1 ENVOLUTA TRANSFORMADA DE ESFUERZOS DE CORTE (ETEC)

La función potencial simple, se puede transformar en una función potencial simple en términos de esfuerzos que se denomina Envoluta Transformada de Esfuerzos de Corte (ETEC); la transformación se logra a través de un factor dimensional (Fd) cuyo valor es siempre de 1.0 (en el sistema MKS); la expresión matemática de la ETEC es:

$$\tau = a \cdot \sigma_v^b \cdot (Fd) \quad (32)$$

Donde:

$a, y b$ son los parámetros funcionales obtenidos de las mediciones sobre planos topográficos.

Fd : factor de $\left[\frac{M}{L^3}\right]^{1-b}$

σ_v : Esfuerzo vertical.

τ : Esfuerzo de corte.

A su vez, la expresión del factor dimensional (Fd) es:

$$(Fd) = (\gamma_b)^{1-b} \cdot b^b \quad (33)$$

Donde:

γ_b : peso unitario subíndice b, para $Fd = 1$

b^b : expresión adimensional doble potencial del parámetro funcional b.

6.5.1.1 **Desarrollo Matemático de la ETEC**

Para el desarrollo matemático de la ETEC, primero se plantean en secuencias tres factores adimensionales como se muestra en las ecuaciones (10), (11), y (12); presentadas a continuación

$$F_1 = \frac{a}{(H_{LF})^{1-b}}$$

$$F_2 = \frac{F_1^{F_1}}{b^b}$$

$$F_3 = (F_2)^{1-b}$$

Los tres factores adimensionales de la ETEC han sido establecidos en una formata que permita su cálculo sólo con los resultados de los primeros parámetros funcionales y de un parámetro de caracterización de la función (H_{LF}), todos obtenibles directamente de datos de mediciones de taludes y que en realidad son factores que relacionan cuatro pesos unitarios diferentes de los cuales sólo se utilizan dos (γ_a, γ_b). (Shuk Erdos T. , 1995).

Una vez obtenidas las mediciones de los taludes se determina otros parámetros para el cálculo de la ETEC, como ya se detalla en el paso de evaluación de cada familia en el numeral 6.3.1.3 que se presentan los parámetros de entrada para la ETEC obtenido de las mediciones y parámetros funcionales. Ver ecuación (6) para el cálculo de L_{LF} .

$$L_{LF} = \left[\frac{H_{LD}}{a \left(L_{LD}^{\left(\frac{1}{b} \right)} \right)} \right]^{\frac{b}{b^2+1}}$$

Se calcula los valores correspondientes a los parámetros ETEC

$$H_{LF} = a(L_{LF})^b \quad \text{Ver (7)}$$

$$\tan \beta_{LF} = \frac{H_{LF}}{L_{LF}} \quad \text{Ver (9)}$$

$$S_a = \frac{\tau_L}{\sigma_{VL}} \quad (34)$$

$$S_a = \frac{F_1(b^b)}{F_3} \quad \text{Ver (13)}$$

$$S_{ab} = \frac{\tau_{LB}}{\sigma_{VLB}} \quad (35)$$

$$S_{ab} = F_1(b^b) \quad (36)$$

$$P_a = b - S_a \quad \text{Ver (14)}$$

$$\sigma_{VL} = \gamma_a \cdot H_{LF} \quad (37)$$

$$\sigma_{VL} = \left(\frac{a}{S_a} \right)^{\frac{1}{1-b}} \cdot \gamma_w \quad (38)$$

$$\sigma_{VLB} = \gamma_b \cdot H_{LF} \quad (39)$$

$$\sigma_{VLB} = \left(\frac{a}{S_{ab}} \right)^{\frac{1}{1-b}} \cdot \gamma_w \quad (40)$$

$$\tau_L = S_a \cdot \sigma_{VL} \quad (41)$$

$$\tau_{LB} = S_{ab} \cdot \sigma_{VLB} \quad (42)$$

$$\gamma_a = \frac{\sigma_{VL}}{H_{LF}} \quad (43)$$

$$\gamma_b = \frac{\sigma_{VLB}}{H_{LF}} \quad (44)$$

$$X_{LH} = (a)^{\frac{1}{1-b}} \quad \text{Ver (16)}$$

Donde:

L_{LF} : Longitud límite (superior) de la función de correlación entre L y H

H_{LF} : Altura límite (superior) de la función de correlación entre L y H.

$\tan \beta_{LF}$: Tangente límite (inferior) de la función de correlación entre L y H.
S_a	: Parámetro adimensional de resistencia máxima al corte
S_{ab}	: Parámetro adimensional de resistencia máxima al corte, tipo b.
P_a	: Parámetro adimensional de presurización
σ_{VL}	: Esfuerzo vertical límite (superior)
σ_{VLB}	: Esfuerzo vertical límite (superior), tipo b.
τ_{VL}	: Esfuerzo de corte límite (superior)
τ_{VLB}	: Esfuerzo de corte límite (superior), tipo b.
γ_a	: Peso unitario, subíndice a
γ_b	: Peso unitario, subíndice b
X_{LH}	: Distancia desde cualquiera de los dos ejes (L o H) hasta la intersección de una línea de 45° que parte del origen (0,0), con la función de correlación (ver Figura 8)

Las ecuaciones previamente descritas para el desarrollo matemático de la ETEC se tomaron de (Shuk Erdos T. , 1995, págs. 47, 48).

6.5.1.2 Propiedades de la ETEC

Dado que la ETEC es la envoluta inicial del SAMTN es la más relevante dado que es el punto de partida para los parámetros de las envolutas “hipotéticas” que se abordan más adelante.

Según (Shuk Erdos T. , 1995) en toda ETEC existen puntos específicos que determinan las siguientes propiedades (ver Figura 8):

1. El punto A, será la intersección de la envoluta, en el punto de esfuerzo de corte límite máximo τ_L y la recta formada por el producto del esfuerzo vertical límite superior σ_{VL} y el parámetro adimensional de resistencia máxima al corte S_a .
2. El punto T, de coordenadas (τ_T, σ_{VT}) , siempre existe en toda envoluta potencial transformada de la función L vs H; y tendrá exactamente las

mismas coordenadas de los parámetros de caracterización (H_{LF}, L_{LF}) multiplicadas por el peso unitario del agua γ_w . El punto T, representa físicamente el esfuerzo máximo normal y el de corte tangencial que actúan en la ETEC sobre un plano con una inclinación igual al de la tangente límite inferior de la función ($\tan \beta_{LF}$) y una longitud igual al de la altura límite superior (H_{LF}).

3. La intersección de la envoluta inicial, con cualquier otra envoluta potencial de esfuerzos cortantes que se origina de la misma pareja de datos L_{LF} y H_{LF} ; será en el punto T.
4. La recta de 45° con origen de coordenadas (0,0), siempre intercepta la envoluta en el punto indicado en la Figura 8, el valor de las distancias desde este punto hacia los dos ejes está dado por la expresión para X_{LH} y corresponde a las mismas distancias en la función potencial L vs H. Además, esta recta involucra un peso unitario igual al del agua ($1.0 \text{ Ton} / \text{M}^3$) en toda su longitud.
5. El valor de γ_b , es el valor de peso unitario para cualquier punto de la ETEC.

6.5.2 ENVOLUTAS HIPOTÉTICAS

Estas envolutas denominadas hipotéticas creadas artificialmente con base en situaciones o condiciones hipotéticas parten de un arreglo matemático a partir de algunos parámetros de la ETEC (especialmente aquellos relacionados con la presurización, los pesos unitarios, y la resistencia); y que generalmente pretenden simular situaciones o condiciones que corresponden a las de algunos ensayos de laboratorio de la geotecnia convencional.

Según (Shuk Erdos T. , 1999, pág. 31) Casi todas las envolutas hipotéticas corresponden a una expresión potencial simple generalizada, así:

$$H_n = a_n L_n^{b_n} \quad (45)$$

6.5.2.1 *Arreglo matricial de las envolutas hipotéticas*

Este arreglo se ilustra en la Figura 9 y se puede apreciar que su esquina origen corresponde a la ETEC, de la cual se desprende en sentido horizontal la fila superior y en el sentido vertical su primera columna. En otras palabras, los resultados de las envolutas hipotéticas de la primera fila superior, y los de las envolutas hipotéticas de la primera columna de la izquierda, parten todos de los parámetros funcionales (a, b) y de uno de los parámetros de caracterización (LLF) de la función de la ETEC. A su vez, de dichos parámetros de cada envoluta de la columna inicial A, se desprenden los resultados del resto de las envolutas hipotéticas de una fila dada. La nomenclatura de las columnas está en orden alfabético partiendo de la letra A, y la nomenclatura de las filas está en función operacional de las condiciones de presurización designadas para la envoluta hipotética inicial (columna A de cada fila); y, en concordancia con lo anterior, en los cálculos la nomenclatura de los parámetros y las envolutas empleadas se designan por medio de un subíndice de

dos letras, la primera de las cuales corresponde a la fila, y la segunda a la columna. (Prada & Ramos, 2000)

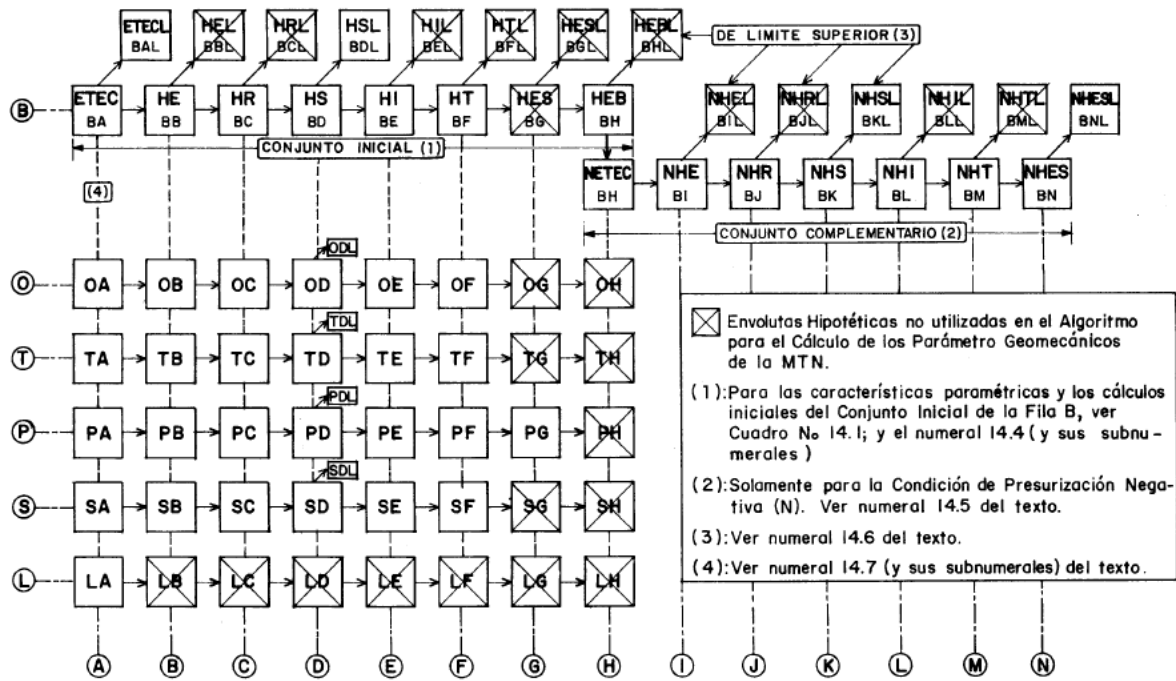


Figura 9 Arreglo Matricial de las Envolturas ETEC e Hipotéticas del SAMTN (Tomado de: Shuk, 1999)

El proceso matemático consiste en encontrar los valores de los parámetros a_n , b_n , L_{LNn} , H_{LNn} , γ_{an} , γ_{bn} ajustados a las condiciones de esfuerzos y presurización hipotéticas mediante el uso de la función potencial simple (ver ecuación (45) y las condiciones establecidas en la Tabla 9.

SUBINDICE ⁽¹⁾	DESIGNACION	PARAMETRO	BASICOS	CALCULOS INICIALES ⁽²⁾
B \bar{a}	E $\bar{T}E\bar{C}$ (Capitulo 13)	a, b	L_{LF}, H_{LF}	(Para el cálculo de todos los parámetros de la ETEC: Ecuaciones números 13.1 a 13.17 - numeral 13.3)
$\square BB$	$\square HE$ De Equilibrio por Aproximación Gradual de b y s_a (14.4.1*)	$(b)_{BB} = (s_a)_{BB}$ $(p_a)_{BB} = 0$	$(L_{LF})_{BB} = L_{LF}$ $(H_{LF})_{BB} = H_{LF}$	(B) (A) $(A): a = (H_{LF})_n / (L_{LF})_n^{(b)_n}$
$\square BC$	$\square HR$ De Referencia (14.4.2*)	$(b)_{BC} = p_a$	$(L_{LF})_{BC} = L_{LF}$ $(H_{LF})_{BC} = H_{LF}$	(A) (B): Iteraciones sucesivas de $(b)_n$ y $(F_1)_n$, hasta que: $\square f [(b)_n, (F_1)_n] =$ Ecuación No.13.23 (numeral 13.5) = 1.0, con base en $(F_1)_n = [(\tan\beta_{LF})_n]^{(b)_n}$
$\square BD$	$\square HS$ Con Base en s_a (14.4.3*)	$(b)_{BD} = s_a$	$(L_{LF})_{BD} = L_{LF}$ $(H_{LF})_{BD} = H_{LF}$	(A) (C): Iteraciones sucesivas de $(b)_{BD}$ y $\tan\beta_{LF}$ hasta que: $(b)_{BD}^{(b)_{BD}} = \tan\beta_{LF}$
BE	HI De igualdad de Pesos Unitarios (14.4.4*)	$(\gamma_a)_{BE} = \gamma$ b_{BE}	$(L_{LF})_{BE} = L_{LF}$ $(H_{LF})_{BE} = H_{LF}$	(C) (A) (D): Iteraciones sucesivas hasta que: \square Ecuación 13.23 (numeral 13.5) = b , y: \square con el valor de $(F_1)_{BH}$ conocido:
BF	HT Con Base en $\tan\beta_{LF}$ (14.4.5*)	$(b)_{BF} = \tan\beta_{LF}$	$(L_{LF})_{BF} = L_{LF}$ $(H_{LF})_{BF} = H_{LF}$	(A) $(a)_{BH} = [(F_1)_{BH}(L_{LF})^{1-b_1/b}]^{1/b}$ y: $(H_{LF})_{BH} = (a)_{BH} L_{LF}^b$
$\square BG$	$\square HES$ De Equilibrio por Aproximación Gradual de b y s_a (14.4.6*)	$(b)_{BG} = (s_a)_{BG}$ $(p_a)_{BG} = 0$	$(L_{LF})_{BG} = \sigma$ $(H_{LF})_{BG} = \tau$	(B) (A) Notas: n: subíndice generalizado para designar el subíndice de cualquier envoluta hipotética pertinente (Columna 1).
BH	HEB De equilibrio en b (14.4.7*)	$(b)_{BH} = (s_a)_{BH}$ $= b$ $(p_a)_{BH} = 0$	$(L_{LF})_{BH} = L_{LF}$ $(H_{LF})_{BH} \neq H_{LF}$	(D) F_1 : Factor adimensional (Ecuación No.13.2, numeral 13.3).

Tabla 9 características paramétricas y cálculos iniciales de las envolutas hipotéticas de la primera fila (conjunto inicial) del arreglo matricial del SAMTN. Tomado de: shuk (1999).

6.5.2.2 Envoluta HE (Hipotética de equilibrio de aproximación gradual) – BB

Esta envoluta pretende simular una condición en la cual por medio de un proceso de aproximación gradual de los parámetros b y S_a de la ETEC se han disipado en su totalidad la presencia de presión de poros. Por lo cual el desarrollo de esta envoluta es el siguiente:

$$(P_a)_{BB} = 0$$

$$(L_{LF})_{BB} = (L_{LF})_{BA}$$

$$(H_{LF})_{BB} = (H_{LF})_{BA}$$

$$(b)_{BB} = (S_a)_{BB}$$

La ETEC corresponde al subíndice BA como se indica en la Tabla 9. Por medio de la convergencia de un proceso de iteración y con la manipulación algebraica se llega a:

$$1 = \left(T^{1-T^b+b.T^b} \right) \cdot (b^{2b-b^2-1}) \quad (46)$$

Donde $T = (\tan \beta_{LF})_{BB}$ este valor es conocido. De esta igualdad se halla $(b)_{BB}$ por iteraciones sucesivas. A partir de la ecuación (7) se despeja el valor de $(a)_{BB}$:

$$(a)_{BB} = \frac{(H_{LF})_{BB}}{[(L_{LF})_{BB}]^{(b)_{BB}}} \quad (47)$$

6.5.2.3 **Envoluta HR (Hipotética de referencia) – BC**

Esta envoluta corresponde a una situación en la cual el parámetro que define la forma y relieve de la familia está dada exclusivamente por la presurización sin la intervención de su resistencia. Los parámetros básicos de esta envoluta hipotética de referencia son los siguientes:

$$(L_{LF})_{BC} = (L_{LF})_{BA}$$

$$(H_{LF})_{BC} = (H_{LF})_{BA}$$

$$(b)_{BC} = (p_a)_{BA}$$

Por medio de la ecuación (7) se despeja el valor de $(a)_{BC}$:

$$(a)_{BC} = \frac{(H_{LF})_{BC}}{[(L_{LF})_{BC}]^{(b)_{BC}}} \quad (48)$$

6.5.2.4 **Envoluta HS (Hipotética con base en S_a) – BD**

Esta envoluta contrario a la descrita anteriormente (Hipotética de referencia) y similar a la condición de la envoluta HE, pretende simular que el parámetro funcional $(b)_{BD}$ es igual al parámetro $(S_a)_{BA}$. Esta envoluta representa una condición en la cual el parámetro que define la forma del relieve está definido por su resistencia.

$$(L_{LF})_{BD} = (L_{LF})_{BA}$$

$$(H_{LF})_{BD} = (H_{LF})_{BA}$$

$$(b)_{BD} = (S_a)_{BA}$$

Por medio de la ecuación (7) se despeja el valor de $(a)_{BD}$:

$$(a)_{BD} = \frac{(H_{LF})_{BD}}{[(L_{LF})_{BD}]^{(b)_{BD}}} \quad (49)$$

6.5.2.5 **Envoluta HI (Hipotética de igualdad de pesos unitarios) – BE**

El rasgo que distingue esta envoluta es la igualdad de sus dos pesos unitarios en función de las variables a y b de la función potencial simple. El significado físico de esta propiedad se encuentra en investigación.

$$(L_{LF})_{BE} = (L_{LF})_{BA}$$

$$(H_{LF})_{BE} = (H_{LF})_{BA}$$

$$\gamma_a = \gamma_b$$

Por medio de la convergencia de un proceso de iteración y con la manipulación algebraica se llega a:

$$0 = b^{\frac{1}{b} - T}$$

Donde: $T = \tan \beta_{LF}$ (valor que depende de los parámetros iniciales H_{LF} y L_{LF} . De esta igualdad se halla $(b)_{BE}$ por iteraciones sucesivas. A partir de la ecuación (7) se despeja el valor de $(a)_{BE}$:

$$(a)_{BE} = \frac{(H_{LF})_{BE}}{[(L_{LF})_{BE}]^{(b)_{BE}}} \quad (50)$$

6.5.2.6 **Envoluta HT (Hipotética con base en $\tan \beta$) – BF**

Esta envoluta hipotética supone una condición por medio de la cual su parámetro funcional “b” es igual al parámetro $\tan \beta_{LF}$ de la ETEC. La $\tan \beta_{LF}$ es un indicador directo de la tangente del ángulo de fricción pico, o de la suma vectorial de la tangente del ángulo básico de fricción y del término adimensional de cohesión, esta

envoluta simula otra forma en la cual el relieve de la familia está determinado por su resistencia sin la incidencia de la presurización.

$$(L_{LF})_{BF} = (L_{LF})_{BA}$$

$$(H_{LF})_{BF} = (H_{LF})_{BA}$$

$$(b)_{BF} = \tan \beta_{LF}$$

A partir de la ecuación (7) se despeja el valor de $(a)_{BF}$:

$$(a)_{BF} = \frac{(H_{LF})_{BF}}{[(L_{LF})_{BF}]^{(b)_{BF}}} \quad (51)$$

6.5.2.7 Envoluta HES (Hipotética de equilibrio de aproximación gradual en S_a) – BG

Esta envoluta representa la misma condición detallada en HE (hipotética de equilibrio) con la diferencia que:

$$(L_{LF})_{BG} = (\sigma_{VL})_{BA}$$

$$(H_{LF})_{BG} = (\tau_{LF})_{BA}$$

$$(b)_{BG} = (S_a)_{BG}$$

$$(P_a)_{BD} = 0$$

Por medio de la convergencia de un proceso de iteración y con la manipulación algebraica se llega a:

$$1 = \left(T^{1-T^b + b.T^b} \right) \cdot (b^{2b-b^2-1}) \quad (\text{ver (46)})$$

Donde $T = (\tan \beta_{LF})_{BG}$ este valor es conocido. De esta igualdad se halla $(b)_{BG}$ por iteraciones sucesivas. A partir de la ecuación (7) se despeja el valor de $(a)_{BG}$:

$$(a)_{BG} = \frac{(H_{LF})_{BG}}{[(L_{LF})_{BG}]^{(b)_{BG}}} \quad (52)$$

6.5.2.8 **Envoluta HEB (Hipotética de equilibrio b) – BH**

Con esta envoluta se pretende simular un proceso gradual de adaptación que llega a un punto de equilibrio por medio de la aproximación del parámetro S_a y el valor de b de la ETEC. Estas condiciones representan una disminución gradual de la presurización (hasta que esta llega a un valor de cero). Esta condición representa un ensayo de corte saturado que permite drenado del agua.

$$(b)_{BH} = (b)_{BA}$$

$$(S_a)_{BH} = (b)_{BA}$$

$$(L_{LF})_{BH} = (L_{LF})_{BA}$$

El valor de $\tan \beta_{LF}$ se aproxima a 1.0 Por medio de la convergencia de un proceso de iteración y con la manipulación algebraica se llega a:

$$1 = \left(T^{1-T^b+b.T^b}\right) \cdot (b^{2b-b^2-1}) \quad (\text{ver (46)})$$

Donde $T = (\tan \beta_{LF})_{BH}$. De esta igualdad se halla $(\tan \beta_{LF})_{BH}$ por iteraciones sucesivas. A partir de la ecuación (7) se despeja el valor de $(a)_{BH}$:

$$(a)_{BH} = \frac{(H_{LF})_{BH}}{[(L_{LF})_{BH}]^{(b)_{BH}}} \quad (53)$$

6.5.3 **CONDICIONES DE PRESURIZACIÓN**

La presurización y despresurización hacen referencia a todos los efectos de la presión del agua sobre la masa de materiales geológicos. Esta presión puede ser causada directamente por el agua, o el agua puede sólo ser un medio de transmisión.

La presurización positiva incluye las siguientes condiciones desfavorables para la masa: presiones de filtración, excesos de presión (por encima de la tabla de agua o

de la superficie del terreno) producidos por uno o la combinación de los siguientes fenómenos: eventos catastróficos del pasado, condición artesiana, bloqueo del alivio de presiones, deformaciones imperceptibles de índole tectónica, bolsas de gas a presión y otros.

La presurización negativa origina la condición favorable de presiones de succión. Sin embargo, y bajo ciertas condiciones esta favorabilidad puede ser engañosa.

Las condiciones de presurización se presentan los siguientes casos:

Casi equilibrio CE, presurización negativa N, presurización positiva P, presurización positiva en exceso disipada PED, y presurización positiva en exceso disipada activa PEX. Para las 4 condiciones de presurización se cumplen es necesario realizar los siguientes cálculos de los parámetros geomecánicas de presurización:

$$HN: -X_{LH} \text{ ETEC}$$

$$HP: \left(\frac{-HN}{a} \right)^{\left(\frac{1}{b} \right)}$$

$$HNT: HN + HP$$

$$\%HP: \left(\frac{HP}{H_{LF}} \right) * 100$$

$$\%HNT: \left(\frac{HNT}{H_{LF}} \right) * 100$$

Donde:

HN: Cabeza neta negativa

HP: Cabeza neta positiva

%HP: Cabeza neta positiva al 100%

%HPT: Cabeza neta al 100%

HNT: Cabeza neta

6.5.3.1 Presurización negativa N

Este tipo de presurización indica el mayor valor de cohesión traccional en relación con las demás condiciones de presurización. Esta Cohesión disminuye de acuerdo con el siguiente orden secuencial de presurizaciones: N, CE-P y PE.

Esta condición de presurización indica que la familia está ubicada sobre un área con presencia de procesos geotécnicos asociados a solevantamientos.

Las condiciones para que sea posible la presencia de este tipo de presurización son:

$$b < S_a$$

$$S_a < \tan \beta_{LF}$$

$$(P_a)_r < 0$$

6.5.3.2 Presurización positiva P

Este tipo de presurización indica la presencia de presiones de filtración.

Las condiciones para que sea posible la presencia de este tipo de presurización son:

$$b > S_a$$

$$S_a < \tan \beta_{LF}$$

$$(P_a)_r < 0$$

6.5.3.3 Presurización positiva Cuasi – Equilibrio CE

Esta condición indica un equilibrio entre las fuerzas de presurización y resistencia, es el tipo de presurización menos probable a presentarse en la naturaleza. Esta se presenta en el momento puntual de la transición entre una condición de presurización negativa a positiva o viceversa.

$$b \approx S_a$$

$$S_a < \tan \beta_{LF} < 1.0$$

$$(P_a)_r \approx 0$$

6.5.3.4 Presurización positiva en Exceso (PE)

Esta condición de presurización indica que la familia analizada se encuentra ubicada sobre una zona con presencia de eventos catastróficos y de artesianismo. Cuenta con dos posibles casos, el primero una para condición de exceso y el segundo para una condición disipada. Esta presurización cuenta con las siguientes etapas.

- 1) Previa a la acumulación de presurización: Representa un estado de equilibrio en la cual se acumulan los efectos de la presurización
- 2) Acumulación de presurizaciones positivas: En esta etapa se evidencia un incremento de la presurización positiva en el material, y esta no es disipada. A este fenómeno se le conoce como bloqueo del alivio de la presurización positiva.

La acumulación de presurizaciones positivas, acompañada de una disminución de la resistencia, conduce eventualmente a una presurización positiva máxima, la cual sobrepasa la resistencia efectiva del material produciendo así el evento catastrófico.

- 3) Disipación de Presurizaciones positivas: posterior al evento catastrófico se inicia un proceso de disipación de la presurización máxima inducida, dicho evento suele tener una duración que va desde relativamente larga a muy larga, y uno de cuyos momentos es el que se detecta por el análisis de los resultados de la medición de taludes naturales. Estos procesos pueden ser inducidos por la presencia de sismos, represamiento súbito de cauces, erosión socavación en la pata del talud, presencia de una capa de debilidad, cambio de niveles freáticos entre otros.

6.5.3.4.1 Presurización en exceso disipada (PED)

Para este tipo de presurización se cumple con las condiciones 1, 2 y 3 de presurización presentados en el numeral 6.5.3.4.

$$b > S_a$$

$$S_a > \tan \beta_{LF}$$

$$(P_a)_r < 0$$

6.5.3.4.2 Presurización en exceso activa (PEX)

Para este tipo de presurización se cumple con las condiciones 1, y 2 de presurización presentados en el numeral 6.5.3.4. La PEX se diferencia de la PED este marcado con el resultado del valor de P_a en la envoluta HR y cumple las siguientes condiciones:

$$b > S_a$$

$$S_a > \tan \beta_{LF}$$

$$(P_a)_r > 0$$

6.5.3.5 **Límite máximo del valor de parámetro adimensional de presurización**

De acuerdo con (Shuk Erdos T. , 1995, pág. 66) el valor máximo que puede tomar P_a en la ETEC no debe exceder el valor calculado por la ecuación

$$(P_a)_1 = \frac{(b + 1)}{(b + 2)} \quad (\text{ver (15)})$$

El valor de esta presurización corresponde al máximo valor de la presurización que indica el valor límite permitido para que la familia de taludes sea aceptada como se evidencia en el numeral 6.3.1.3

6.5.4 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS

Las condiciones hipotéticas de las envolutas y la ETEC son la base para el cálculo de los parámetros geomecánicos de densidad y fase, y parámetros de resistencia según (Shuk Erdos T. , 1999, pág. 34).

6.5.4.1 **Parámetros de densidad y fase**

De acuerdo a la condición de presurización sobre la familia del talud, los cálculos de los valores de las densidades sólidos, total y seca, para las condiciones de masa y laboratorio, se determina por medio de las relaciones lineales entre las envolutas y sus respectivas variables indicadas en la

PEX POSITIVA EN EXESO ACTIVA				
DENSIDAD	ELEMENTO		MASA	
	ENVOLUTAS	VARIABLES	ENVOLUTAS	VARIABLES
γ Especifico Solidos	ETEC-HE-HR-HS-HI-HT	$P_a-\gamma_b$	ETEC-HE-HR-HS-HI-HT	$P_a-\gamma_b$
γ TOTAL (T/M ³)	ETEC-HE-HR-HS-HI-HT	$P_a-\gamma_a$	ETEC-HE-HR-HS-HI-HT	$P_a-\gamma_a$
γ SECO (T/M ³)	ETEC-HE-HR-HS-HI-HT	$P_a-\gamma_a$	Sa "HI", Tan(β LF) HI, b ETEC	
PED POSITIVA EN EXESES DICIPADA				
DENSIDAD	ELEMENTO		MASA	
	ENVOLUTAS	VARIABLES	ENVOLUTAS	VARIABLES
γ Especifico Solidos	ETEC-HE-HR-HS-HI-HT	$P_a-\gamma_b$	ETEC-HE-HR-HS-HI-HT	$P_a-\gamma_b$
γ TOTAL (T/M ³)	ETEC-HE-HR-HS-HI-HT	$P_a-\gamma_a$	ETEC-HE-HR-HS-HI-HT	$P_a-\gamma_a$
γ SECO (T/M ³)	ETEC-HE-HR-HS-HI-HT	$P_a-\gamma_a$	ETEC-HE-HR-HS	$P_a-\gamma_a$
P POSITIVA				
DENSIDAD	ELEMENTO		MASA	
	ENVOLUTAS	VARIABLES	ENVOLUTAS	VARIABLES
γ Especifico Solidos	γ_a "HEB"		γ_a "HEB"	
γ TOTAL (T/M ³)	ETEC-HI-HLS	$P_a-\gamma_a$	ETEC-HE-HR-HS	$P_a-\gamma_b$
γ SECO (T/M ³)	ETEC-HI-HLS	$P_a-\gamma_a$	ETEC-HE-HR-HS-HI-HT	$P_a-\gamma_b$
CE CASI EQUILIBRIO				
DENSIDAD	ELEMENTO		MASA	
	ENVOLUTAS	VARIABLES	ENVOLUTAS	VARIABLES
γ Especifico Solidos	σ_{VL} "HI"		σ_{VL} "HI"	
γ TOTAL (T/M ³)	ETEC-HI-HLS	$P_a-\gamma_a$	ETEC-HE-HR-HS	$P_a-\gamma_a$
γ SECO (T/M ³)	ETEC-HI-HLS	$P_a-\gamma_a$	ETEC-HE-HR-HS-HI-HT	$P_a-\gamma_b$
N NEGATIVA				
DENSIDAD	ELEMENTO		MASA	
	Valor		Valor	
γ Especifico Solidos	3		3	
γ TOTAL (T/M ³)	2.5		2.2	
γ SECO (T/M ³)	2.5		1.8	

Tabla 10 Relaciones lineales entre envolutas para el cálculo de densidades.

6.5.4.2 Cálculo de propiedades geomecánicas

Para el cálculo de los parámetros de resistencia parten del cálculo del origen de los esfuerzos verticales $Eoc\sigma$ y el esfuerzo libre $\tan \varphi_r$.

6.5.4.2.1 Esfuerzos verticales $Eoc\sigma$

Los esfuerzos verticales representan un cambio en el origen de coordenadas el cual es necesario para la determinación de los valores de los parámetros geotécnicos que se desarrollaran en esta sección, sus cálculos se realizan en base a los resultados obtenidos en la ETEC.

❖ Para la condición de masa su fórmula matemática es:

$$\sigma_{vom} = L_{LF} * \left(\frac{\gamma_{Tmasa} - \gamma_a}{\gamma_a} \right) \quad (54)$$

❖ Para la condición de elemento su fórmula matemática es:

$$\sigma_{voe} = L_{LF} * \left(\frac{\gamma_{Tmasa} - \gamma_a}{\gamma_a} \right) \quad (55)$$

6.5.4.2.2 Esfuerzo libre $\tan \varphi_r$

El esfuerzo libre $\tan \varphi_r$ se calculó con base a la relación lineal de los parámetros P_a y $\tan \varphi_r$ de las envolutas ETEC, HE, HR, HS, y HI.

6.5.4.2.3 Ángulo de fricción residual φ_r

La constante a representa el valor del ángulo de fricción residual ($\tan \varphi_{ra}$) para la condición de elemento. Este ángulo representa, para el caso de rocas, una condición en la cual la resistencia de la roca ha llegado a un estado residual causado por un ablandamiento de esta en el cual la suma de la resistencia a la tracción del material cementante, que une las dos caras de la roca y la resistencia a la tracción de la roca, presentan el estado máximo de esfuerzos como se puede ver en la Figura 10 (Hoek & Knappett, 2006) Este ángulo encuentra representado por un estado de cohesión igual 0.

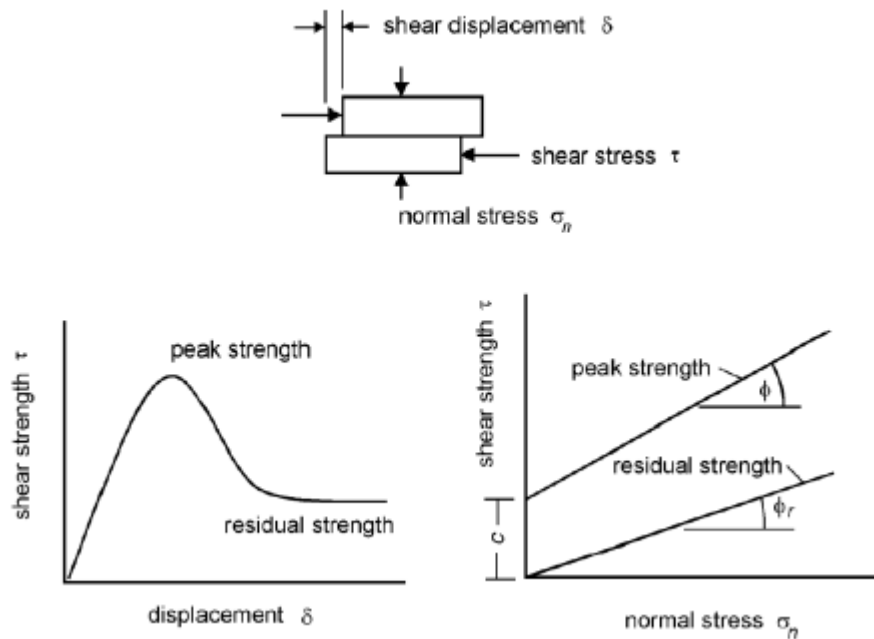


Figura 10 Ensayo de cizallamiento de discontinuidades (Hoek 2006)

❖ Para la condición de elemento su fórmula matemática es:

Su valor se deduce del valor de la constante de la relación lineal de los parámetros P_a y $\tan \varphi_r$ de las envolutas ETEC, HE, HR, HS, y HI.

❖ Para la condición de masa su fórmula matemática es:

$$\tan \varphi_{rm} = \frac{\tan \varphi_{re} (L_{LF} - \sigma_{voe})}{(\sigma_{VL} - \sigma_{vom})} \quad (56)$$

6.5.4.2.4 Cohesión traccional C_t

La cohesión traccional se reconoce como la fuerza que une las partículas en la estructura de la masa sin el aporte de ninguna presión que la comprima. De acuerdo a (Shuk Erdos T. , 1999, pág. 56) este tipo de cohesión, aún bajo las condiciones máximas posibles de presurización positiva, conserva un 10 a 20% de su valor en condiciones de presurización cero. Esto permite establecer cuatro categorías de tiempo las cuales serán tratadas en la siguiente sección del factor de seguridad.

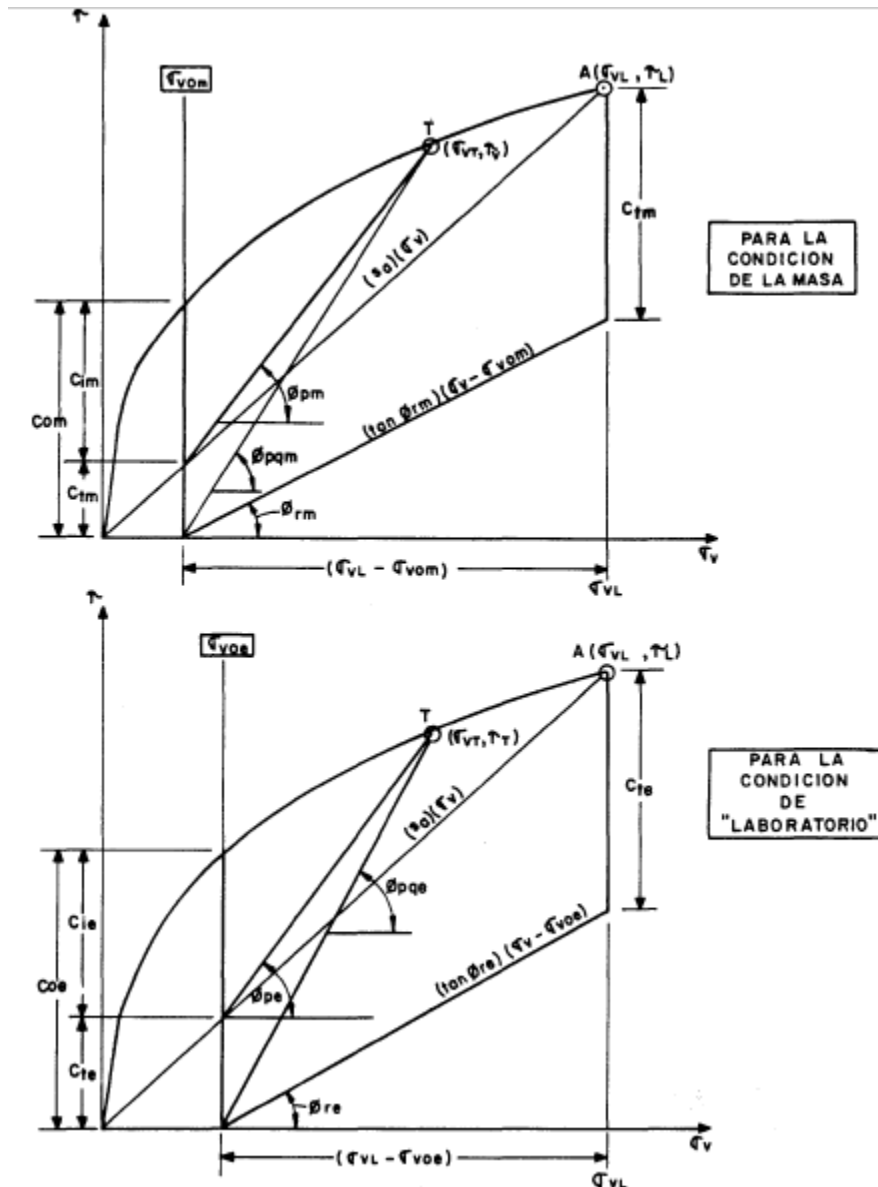


Figura 11 Relaciones Geométricas entre los Parámetros Geomecánicas de Resistencia-Condición de la Masa y Condición de Laboratorio Shuk (1999)

Para el cálculo de la cohesión traccional se relacionan las variables σ_{vo} , σ_{VL} , τ_L y S_a tal como se muestra en la Figura 11. Según (Shuk Erdos T. , 1999, pág. 38) la diferenciación entre las condiciones de masa y de laboratorio se efectúa por medio de un traslado del origen de coordenadas σ_{vo} .

La Figura 11 representa la situación más común de una masa con presurización positiva, que desemboca en parámetros de resistencia de laboratorio más altos que los de la masa. Cuando la masa está en condiciones de presurización negativa la

situación se invierte, y los resultados de resistencia de laboratorio son inferiores a los de la masa.

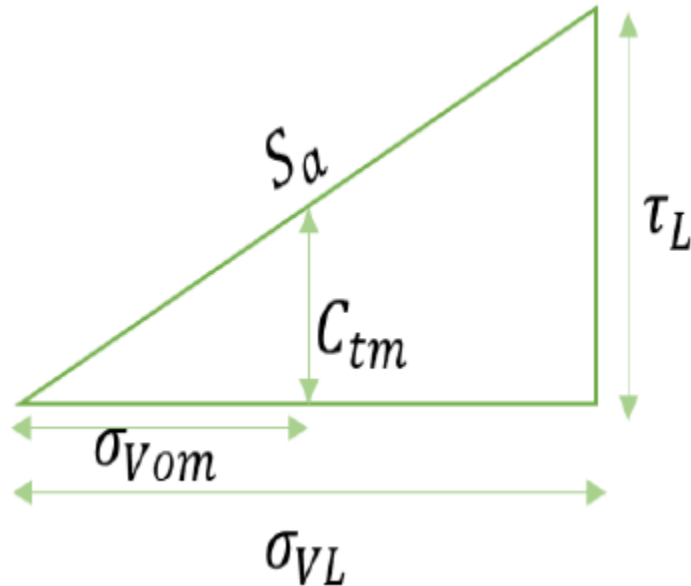


Figura 12 Relación de triángulos para estimar la cohesión traccional

Por medio de relaciones de triángulos se determinan la cohesión traccional C_t

❖ Para la condición de masa su fórmula matemática es:

$$\tau_L = S_a * \sigma_{VL} \text{ como: } C_{tm} = S_a * \sigma_{Vom} \quad (57)$$

❖ Para la condición de elemento su fórmula matemática es:

$$\tau_L = S_a * \sigma_{VL} \text{ como: } C_{te} = S_a * \sigma_{Voe} \quad (58)$$

6.5.4.2.5 Cohesión por imbricación estructural o entramamiento C_i

En este tipo de cohesión, bajo condiciones de presurización positivas su valor suele ser de valores medianos a bajos. La cohesión tiende a ser cero cuando el valor de presurización positiva es alto.

❖ Para la condición de masa su fórmula matemática es:

$$C_{im} = (a * \sigma_{Vom}^b) - C_{tm} \quad (59)$$

❖ Para la condición de elemento su fórmula matemática es:

$$C_{ie} = (a * \sigma_{Voe}^b) - C_{te} \quad (60)$$

6.5.4.2.6 Ángulo de fricción pico φ_p

La condición del ángulo de fricción pico representa el estado de la roca presenta una condición en la cual no llega a su estado de ablandamiento, por lo que aún conserva todos los rasgos estructurales.

❖ Para la condición de masa su fórmula matemática es:

$$\tan \varphi_{pm} = \frac{(H_{LF} - C_{tm})}{(L_{LF} - \sigma_{Vom})} \quad (61)$$

❖ Para la condición de elemento su fórmula matemática es:

$$\tan \varphi_{pe} = \frac{(H_{LF} - C_{te})}{(L_{LF} - \sigma_{Voe})} \quad (62)$$

6.5.4.2.7 Altura crítica H_o

La altura crítica representa la altura máxima vertical para un talud con un factor de seguridad igual a 1 (Shuk Erdos T. , 1999, pág. 56).

❖ Para la condición de masa su fórmula matemática es:

$$H_{om} = \frac{\sigma_{Vom}}{\gamma_{Tm}^{Pa}} \quad (63)$$

❖ Para la condición de elemento su fórmula matemática es:

$$H_{oe} = \frac{\sigma_{Voe}}{\gamma_{Te} P_a} \quad (64)$$

6.5.4.2.8 Porosidad Ru

La porosidad es el volumen de espacios vacíos en el volumen total de la roca

- ❖ La porosidad máxima se expresa de la siguiente forma:

$$Ru_{m\acute{a}x} = \frac{\%HPP}{\frac{\gamma_{seco}}{100}} \quad (65)$$

- ❖ La porosidad promedio se expresa de la siguiente forma:

$$Ru_{m\acute{a}x} = \frac{\%HNT}{\frac{\gamma_{seco}}{100}} \quad (66)$$

6.5.4.2.9 Parámetros efectivos

En la geotecnia convencional los parámetros efectivos se representan por medio de ensayo corte en condiciones drenadas. Esta condición es la más crítica para el diseño de obras civiles. Estos parámetros hacen referencia a los parámetros geomecánicos: ángulo de fricción residual, pico y cohesión, en los cuales su valor de esfuerzo vertical se le ha restado al valor de la porosidad.

- ❖ Para el ángulo de fricción pico efectivo su fórmula matemática es:

$$\frac{(\tan \varphi_{pm})}{(1 - Ru_{pr})} \quad (67)$$

- ❖ Para el ángulo de fricción residual efectivo su fórmula matemática es:

$$\frac{(\tan \varphi_{rm})}{(1 - Ru_{pr})} \quad (68)$$

6.6 FACTOR DE SEGURIDAD RELATIVO (FSr)

El alcance del presente informe prevé la determinación de los factores de seguridad relativos al desplazamiento para las categorías de tiempo: largo plazo (LP), mediano plazo (MP), y corto plazo (CP); correspondiente a la zona previamente delimitada del municipio del Carmen de Atrato del departamento del Chocó. Este parámetro de estabilidad es determinado únicamente por medio de la MTN.

Según (Shuk Erdos T. , 1999, pág. 50) el término "relativo" se refiere al hecho de que su estimativo se efectúa con base en el valor de la relación entre dos parámetros del mismo tipo, uno del nivel de familia, y el otro correspondiente al promedio de un nivel de referencia superior al de familia (subpoblación, población o universo); y sin considerar la geometría de la familia, ni su potencial plano crítico de falla.

Según (Shuk Erdos T. , 1995), los taludes que conforman familia de taludes naturales se encuentran en equilibrio entre el campo endógeno y exógeno de esfuerzos aplicados por la naturaleza.

Las relaciones entre dos alturas para la determinación del FSr corresponde en la que el numerador corresponde a la altura del objeto de análisis H_{LD} , y la altura dada por el denominador corresponde a la de la función potencial simple $H = aL^b$, generalmente correspondiente a la tendencia de pendientes promedias correspondiente a la tendencia de pendientes promedias de los niveles población o universo de referencia (Shuk Erdos T. , 1999, pág. 54) según se determinó en el numeral 6.4.7

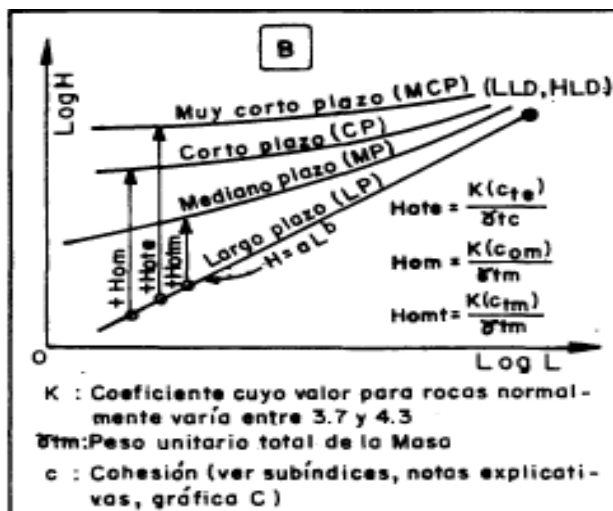


Figura 13 Curvas de Factor de seguridad igual 1. Tomado de: Shuk 1999

La Figura 13 hace referencia a 4 categorías de tiempo en función de los tres tipos de cohesión que corresponden a: La cohesión traccional de la masa (C_{tm}), para la categoría de mediano plazo (MP); la cohesión total de la masa (C_{om}), para la categoría de corto plazo (CP); y la cohesión traccional de la condición de laboratorio (C_{te}), para la categoría de tiempo de Muy Corto Plazo (MCP).

La duración de las tres categorías de tiempo (LP, MP y CP) de la figura 16, se puede estimar por medio de un análisis que involucra, - entre otros -, los períodos de retorno de las intensidades de lluvias e intensidades sísmicas y otros factores climáticos. De acuerdo con (Shuk Erdos T. , 1999) para la cordillera oriental en la cual hay una alta tasa de pluviosidad y actividad sísmica la duración de la estabilidad de taludes para cada categoría de tiempos es: largo plazo LP 40-50 años, mediano plazo MP 16 a 35 años y corto plazo CP de 4 a 8 años. Estos valores se deben ajustar para cada caso de acuerdo con las condiciones ambientales de la zona de estudio. Sin embargo, los factores de seguridad relativos al deslizamiento determinados en el presente informe se limitan a FSr por procesos gravitacionales, es decir; verificar taludes propensos al deslizamiento por acción netamente de la gravedad.

Los cálculos del factor de seguridad relativo (FSr) varían según las dos categorías: talud de diseño y estudios regionales.

6.6.1 TALUD DE DISEÑO

El análisis de los parámetros de estabilidad para esta categoría parte de la estimación de una altura conocida y por medio de las relaciones matemáticas presentadas en la Figura 14 establecer dicha altura para obtener un FS mayor a 1.0; este factor de seguridad es equiparable al encontrado con los métodos convencionales de análisis de estabilidad de taludes.

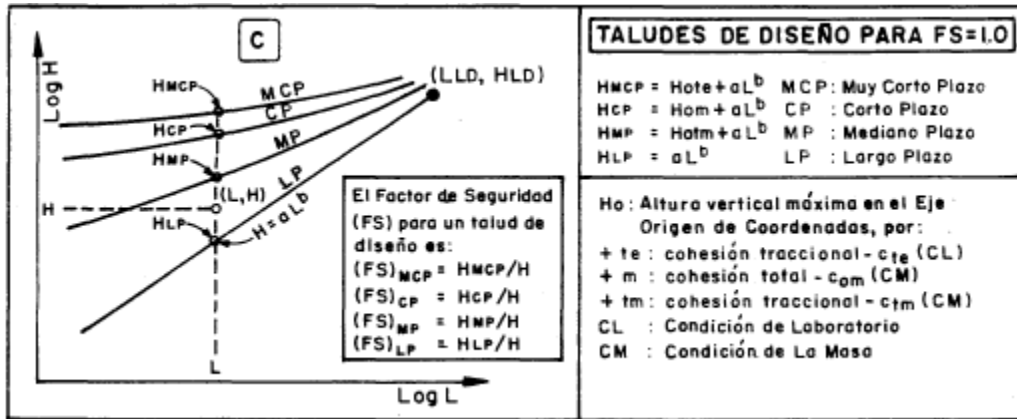


Figura 14 Factor de seguridad relativo (Fsr) para las cuatro categorías de tiempo talud de diseño. Tomado de: Shuk 1999

6.6.2 ESTUDIOS REGIONALES

Por medio de esta categoría se pretende determinar la ubicación geográfica de las zonas más propensas al deslizamiento. Para este tipo de estudio el criterio de estabilidad muestra que, en el caso de taludes naturales, a mayor altura, es mayor el factor de seguridad y, por ende, mayor es su resistencia. Ver Figura 15

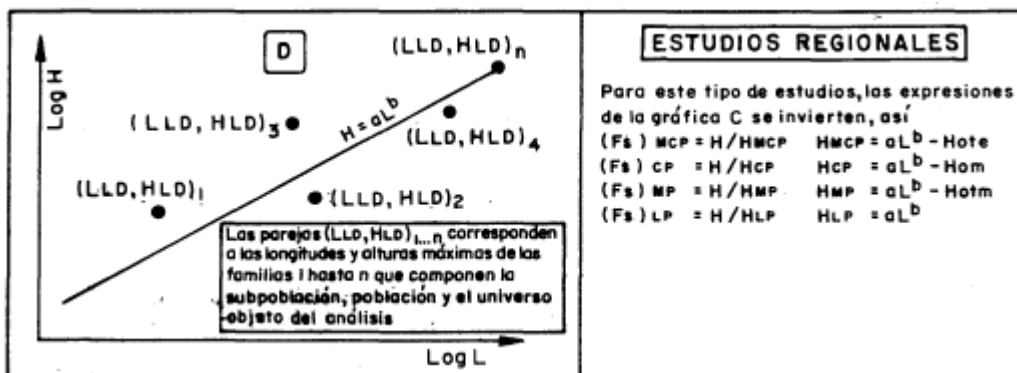


Figura 15 Factor de seguridad relativo (Fsr) para las cuatro categorías de tiempo estudio regional. Tomado de: Shuk 1999

Los factores de seguridad relativos al deslizamiento para su mejor comprensión y análisis se presentan mediante mapas de isovalores.

6.7 HOJAS ELECTRÓNICAS PARA LA MTN

Las hojas electrónicas para la implementación de la MTN que han servido de herramienta de apoyo para los cálculos; consta de 4 hojas en el software Excel, las cuales permiten determinar las propiedades geomecánicas de los materiales en base a la medición de los taludes naturales, elaboración de envolutas, cálculo del factor de seguridad relativo, y patrones triangulares para el nivel operacional de población.

6.7.1 HOJA ELECTRÓNICA “EVALUACIÓN DE FAMILIAS DE TALUDES NATURALES”

Como se explica en el numeral 6.2.2 las mediciones de los taludes se realiza por medio del sistema cumulativo de intervalos de curvas de nivel (SCICN), obteniendo las longitudes máximas, medias, y mínimas “L” para cada valor de “H” que son los datos de entrada para la hoja electrónica “evaluación de familias de taludes naturales”.

La hoja electrónica de la familia analizada, determinará los parámetros “a” y “b”, así como los valores de H_{LD} y L_{LD} para cada familia como se explicó en el numeral 6.3.1.

De manera de ejemplo se presenta la evaluación de la familia correspondiente al talud 169

PATRÓN TRIANGULAR- FAMILIA			
Longitudes medias [m]	Longitudes mínimas [m]	Longitudes máximas [m]	Altura [m]
21,90728	16,30452003	27,51004696	12,5
42,39674	34,14560951	50,64787345	25
61,18272	53,98417346	68,38126217	37,5
81,38979	75,8659303	86,91364752	50
102,69130	100,5223316	104,8602604	62,5
126,21576	124,7653374	127,666192	75

Log H	Log L Máx	Log L Mín
1,09691001	1,43949133	1,21230802
1,39794001	1,70456122	1,53333487
1,57403127	1,83493711	1,73226646
1,69897	1,93908798	1,88004679
1,79588002	2,02061093	2,00226255
1,87506126	2,1060759	2,09609395

Correlación lineal para estimación de parámetros a,b Log L vs Log H			
	Mín	Max	Prom
a:	1,103227821	0,241313713	0,515969
b:	0,878206464	1,190002792	1,0341046
r:	0,998968979	0,998968979	

Parámetros funcionales función potencial simple	
a	b
0,515968993	1,034104628
Lld	Hld
127,7	75,0

Figura 16 Familia hoja electrónica evaluación de familias de taludes naturales

Los datos son evaluados para cada familia según se explica en el numeral 6.3.1.3 y se presenta la hoja resumen de todas las familias en el cual se separan las familias de taludes pertenecientes a rocas, de rocas degradadas y desagregadas. Así mismo, se verifican los valores máximos de Pa y $\tan\beta_{LF}$ para estimar si esta familia debe ser tomada en cuenta para los cálculos de propiedades geotécnicas y estimación de factor de seguridad como se puede ver en la Tabla 11.

Talud	Familia de Taludes														Roca-Rdegradada	Criterio
	a	b	HLD	LLD	a-correcto	b-correcto	HLF	LLF	Tan BLF	F1	Se	Pa	Pa max	XLH		
1	0.45370355	1.08178214	62.5	100.341051	0.932661426	0.924400549	64.251903	97.3847137	0.65977401	0.63771254	0.67351447	0.40826766	0.65804958	0.3976664203141670	Rotgraciada	Aceptado
2	0.67811564	1.02197106	75	101.310433	0.828627837	0.978501288	75.5053953	100.617464	0.75042038	0.74570135	0.7584223	0.26354876	0.66426068	0.000159419	Rotgraciada	Aceptado
3	0.53367726	1.04629793	75	115.59725	0.819577511	0.955750719	75.8852601	114.186867	0.66457199	0.65211786	0.67349367	0.37280426	0.66167648	0.011148095	Rotgraciada	Aceptado
4	0.62329102	1.00846088	100	160.91109	0.678743185	0.99161011	102.303201	157.258121	0.6505432	0.64818099	0.6521123	0.35634857	0.66573184	0.72562E-21	Rotgraciada	Aceptado
5	0.60741512	1.02939707	62.5	92.7530617	0.789099116	0.971442441	63.3984832	91.4002063	0.69363611	0.68821693	0.70102654	0.32837053	0.66346311	0.000249952	Rotgraciada	Aceptado
6	0.6773289	1.00573945	62.5	91.8915975	0.713209961	0.994293301	63.1807385	90.8958634	0.69508926	0.69363976	0.69660553	0.30913392	0.66603138	1.90062E-26	Rotgraciada	Aceptado
7	0.6611003	0.9864113	62.5	102.417114	0.661100296	0.986411296	63.0451491	101.5435	0.62086839	0.62490272	0.61887856	0.36753274	0.66514994	5.93442E-14	Rotgraciada	Aceptado
8	0.44281382	1.1022658	75	107.951549	1.100509554	0.907222192	75.9666055	106.438483	0.71371372	0.68951634	0.73961174	0.36265406	0.65602904	2.807478547	Roca	Aceptado
9	0.59670011	1.06256432	87.5	111.636183	1.056489416	0.941119502	88.4201409	110.402165	0.80089137	0.78964298	0.82933444	0.23322987	0.65999341	2.542816531	Roca	Aceptado
10	0.5540265	1.01977148	75	124.544223	0.669083678	0.980611853	75.4432557	123.798058	0.60949581	0.60346749	0.61169693	0.40807455	0.66449842	9.96889E-10	Rotgraciada	Aceptado
11	0.54039134	1.07163552	62.5	90.2948443	1.002957227	0.933153093	64.721367	86.9778655	0.74411308	0.72852377	0.7676404	0.30399512	0.65906996	1.045163696	Roca	Aceptado
12	0.53790605	1.06415802	62.5	90.039205	0.939770011	0.939770067	63.4965621	88.5361298	0.71718272	0.70204881	0.73509308	0.32906494	0.65983304	0.356879839	Rotgraciada	Aceptado
13	0.62834022	1.04195567	87.5	124.704888	0.930849015	0.959733726	91.4510391	119.096248	0.78787506	0.75941269	0.78430954	0.25764613	0.66213177	0.188704237	Rotgraciada	Aceptado
14	0.60607307	1.02915731	62.5	92.5544001	0.785734197	0.97166875	63.229701	91.4553201	0.69137258	0.68397242	0.69858612	0.33057119	0.66348874	0.000201175	Rotgraciada	Aceptado
15	0.69315691	1.03147661	75	94.8765054	0.918843836	0.989483745	75.4332962	94.3144222	0.79908659	0.79420251	0.81447127	0.21700554	0.66324113	0.062438435	Rotgraciada	Aceptado
16	0.77288503	0.97895762	50	72.0142973	0.772885029	0.978957622	50.4416259	71.3970088	0.70649495	0.71167902	0.70026795	0.27868967	0.66431211	4.81801E-06	Rotgraciada	Aceptado
17	0.65691109	1.0276763	100	132.803988	0.857953028	0.973069047	99.9418225	132.883435	0.75210144	0.74619478	0.76220821	0.26546809	0.66384723	0.00383851	Rotgraciada	Aceptado
18	0.61951441	1.06058018	87.5	109.35536	1.074718309	0.942880154	88.683387	107.808355	0.82260218	0.81292792	0.85324177	0.20733841	0.66019683	3.530831209	Roca	Aceptado
19	0.31391831	1.1102636	100	181.263569	0.932555203	0.90068701	100.427523	180.407041	0.55667188	0.52185293	0.55740295	0.55286064	0.65525408	0.495048439	Rotgraciada	Aceptado
20	0.44968466	1.04702084	75	143.279814	0.707131071	0.955090831	77.9752647	137.560887	0.56684183	0.55191152	0.56896013	0.47806071	0.66160093	0.00044544	Rotgraciada	Aceptado
21	0.57423597	1.00696026	75	138.216232	0.6144484919	0.993087849	78.4635291	132.073598	0.59408944	0.59194012	0.59477367	0.41218659	0.66589688	2.53124E-31	Rotgraciada	Aceptado
22	0.61214829	1.04920075	100	135.429015	0.978537011	0.953106447	102.603629	131.825609	0.7783285	0.76879061	0.79854032	0.25066043	0.66137353	0.629994612	Rotgraciada	Aceptado
23	0.56600773	1.05358695	112.5	162.079714	0.959555782	0.949138558	116.219957	156.618617	0.7420571	0.73028849	0.75990227	0.29368468	0.66091793	0.444097246	Rotgraciada	Aceptado
24	0.79284709	0.98516482	75	106.768696	0.792847087	0.985164823	76.9961728	104.041188	0.74005473	0.74336709	0.73474057	0.25042425	0.66501012	1.60187E-07	Rotgraciada	Aceptado
25	0.68485961	1.0788931	62.5	68.3160844	1.29730646	0.926875884	63.7747621	66.8439855	0.95408378	0.95055232	1.02118888	0.05772425	0.65833878	35.14796144	Roca	Aceptado
26	0.98112364	0.98179176	62.5	71.6311289	0.981123636	0.981791763	63.7707355	66.8439855	0.95408378	0.95055232	1.02118888	0.05772425	0.65833878	35.14796144	Roca	Aceptado
27	0.101958293	0.93333324	75	101.541587	1.019582932	0.93333324	75.5770941	100.817738	0.74964084	0.76418124	0.72329738	0.21003586	0.65909099	1.3376367	Roca	Aceptado
28	0.61951441	1.06058018	87.5	109.35536	1.074718309	0.942880154	88.683387	170.680355	0.5315788	0.4800237	0.52464475	0.6367975	0.65047168	1.810805749	Roca	Aceptado
29	0.31391831	1.1102636	100	181.263569	0.932555203	0.90068701	100.427523	104.411886	0.73232377	0.71641764	0.73218227	0.29699772	0.66348631	0.001135786	Rotgraciada	Aceptado
30	0.57169112	1.11861084	50	56.9238485	1.409480658	0.893965944	51.1212194	55.5291069	0.92062023	0.91163308	1.0080211	0.11058975	0.65445343	25.45461132	Roca	Aceptado

Tabla 11 Resultados Hoja electrónica evaluación de familias de taludes naturales de la 1 a la 30 (Elaboración propia).

En la Tabla 11 se presentan las familias de taludes de la familia 1 hasta la 30, la totalidad de datos de presentan en los anexos.

6.7.2 HOJA DE CÁLCULO DE “PROPIEDADES GEOMECAÑICAS”

Para determinar las propiedades geomecánicas se utiliza esta hoja electrónica para lo cual se deberá habilitar la opción de programador, con el fin de ejecutar la macro que resuelve las condiciones de frontera de las envolutas de la Tabla 9. Esta hoja electrónica se compone de tres (3) hojas; la primera tiene como datos de entrada los parámetros funcionales a y b corregidos, y los parámetros geométricos H_{LF} y L_{LF} obtenidos en la hoja de cálculo mostrados en la Tabla 11. Con estos resultados se calculan los parámetros descritos para la ETEC y cada una de las envolutas como se puede ver en la Figura 17

Parametros de entrada										
Anue	Bnue	HLF	LLF							
0,713493772	0,967020138	76,30177324	125,4144739							

Parámetro	ENVOLUTAS FILA B									
	BA - ETEC	BB - HE	BC - HR	BD - HS	BE - HI	BF - HT	BG - HES	BH - HEB	HLS	
a	0,713493772	6,4061079039	13,2044619338	4,1229124125	2,5354217692	4,0355848625	7,1423544784	1,1726997559	6,7766824965	
b	0,967020138	0,5127560135	0,3630541956	0,6039659424	0,7045945931	0,6083968689	0,5111514651	0,9670201380	0,6039659424	
L_{LF}	125,41447390	125,4144738957	125,4144738957	125,4144738957	125,4144738957	125,4144738957	125,4144738957	125,4144738957	125,4144738957	
H_{LF}	76,3017732351	76,3017732351	76,3017732351	76,3017732351	76,3017732351	76,3017732351	76,3017732351	94,5401858836	125,4097433448	
F1	0,618449801	0,775069364	0,834926363	0,740723768	0,704594593	0,739094599	0,772794803	0,99996228066207	1	
F2	0,767390517	1,156049068	1,242613886	1,085706233	1	1,082073775	1,154707226	1,032922568	1,356004161	
F3	0,99130628	1,07321024	1,148383776	1,033102231	1	1,031371433	1,0728507	1,001068862	1,128183826	
Sa	0,6039659424	0,5127560135	0,5032768084	0,5287519213	0,5505517703	0,5296450999	0,5111514651	0,9670201380	0,6536708349	
Sab	0,598715232	0,550295004	0,577954922	0,546254789	0,55055177	0,546260826	0,548389207	0,5	0,737460864	
$\tan(\beta_{LF})$	0,6083968689	0,6083968689	0,6083968689	0,6083968689	0,6083968689	0,6083968689	0,6039659424	0,9999609943	1,0000000000	
$\tan \alpha$	0,588332024	0,311959153	0,220881036	0,367450988	0,428673144	0,37014675	0,308718076	0,966982419	0,603965942	
Pa	0,3630541956	0,0000000000	-0,1402226128	0,0752140211	0,1540428227	0,0787517690	0,0000000000	0,0000000000	-0,0497048926	
σ_{VLB}	156,5323129	178,1513708	168,9210247	178,7354592	175,8840721	178,6816123	220,2093131	346,2995987	366,9208926	
τ_{LB}	94,54018588	91,34818669	85,0140342	94,50671745	96,83328728	94,6378404	112,560313	334,8786857	239,8454862	
σ_{VL}	203,9799937	154,1036412	135,9400749	164,6259861	175,8840721	165,1288631	190,7057547	335,2619156	270,5897984	
τ_L	122,1259292	84,8024639	78,56723533	89,92773337	96,83328728	90,20342912	104,5809776	167,6309578	199,5493864	
γ_a	2,0514898447	2,3348260892	2,2138545092	2,3424810672	2,3051112007	2,3417753575	2,3292667666	2,7613452470	2,9256662428	
γ_b	2,6733322840	2,0196600246	1,7816109521	2,1575643541	2,3051112007	2,1641549875	2,0171925084	2,6733322840	2,1575643541	
X_{LH}	3,58563E-05	45,22948693	57,48080857	35,76120376	23,32287347	35,25707432	55,80048139	125,2711156	125,4144739	

Figura 17 Solución de envolutas Hoja cálculo de propiedades geotécnicas (Elaboración propia)

Según se explica en el numeral 6.5.3 la segunda hoja evaluará las condiciones de presurización presentes en la familia analizada como se puede ver en la Figura 18.

PEX POSITIVA EN EXESO ACTIVA	
b>sa	VERDADERO
sa>Tan(βLF)	FALSO
(Pa)>0	FALSO

PED POSITIVA EN EXESES DICIPADA	
b>sa	VERDADERO
sa>Tan(βLF)	FALSO
(Pa)<0	VERDADERO

CE CASI EQUILIBRIO	
b=sa	FALSO
sa<Tan(βLF)	VERDADERO
(Pa)<0	VERDADERO

P POSITIVA	
b>sa	VERDADERO
sa<Tan(βLF)	VERDADERO
(Pa)<0	VERDADERO

N NEGATIVA	
b<sa	FALSO
sa<Tan(βLF)	FALSO
(Pa)<0	VERDADERO

CONDICIONES DE PRESURIZACION						
	N	CE	P	PED	PEX	P POSITIVA
GSE	0	0	2,761345247	0	0	2,761345247
GSS	0	0	2,729924872	0	0	2,729924872
GATC	0	0	2,756776808	0	0	2,756776808
GATM	0	0	2,266464001	0	0	2,266464001
GATS	0	0	-0,861539462	0	0	-0,861539462
GADM	0	0	2,026062174	0	0	2,026062174
GADS	0	0	1,849065842	0	0	1,849065842

Figura 18 Condiciones de presurización Hoja cálculo de propiedades geotécnicas (Elaboración propia)

La tercer y última hoja presenta el resumen de los resultados de los parámetros geomecánicos como se puede ver en la Figura 19.

PARAMETROS GEOMECANICOS PARA FAMILIAS DE TALUDES NATURALES POR MEDIO DE LA -MTN		
Condición de presurización	P POSITIVA	
HN Cabeza Neta Negativa M	-45,22948693	
HP Cabeza Neta Positiva M	73,02794631	
HNT Cabeza Neta M	27,79845938	
PARAMETRO	LABORATORIO	MASA
γ Espesifico Solidos	2,761345247	2,761345247
γ TOTAL (T/M ³)	2,756776808	2,266464001
γ SECO (T/M ³)	2,756776808	2,026062174
σ Origen	43,11656411	13,14209318
Cohesion Traccional (T/M ²)	26,04093628	7,93737669
Cohesion Inbrica (T/M ²)	1,131213114	0,67575974
Cohesion Traccional Efectiva (T/M ²)		6,661483667
Angulo de friccion Pico φ _p	31,41317474	31,33788434
Angulo de friccion Residual φ _r	17,58697185	7,783584213
Angulo de friccion efectivo Pico φ _{epm}		35,96249431
Angulo de friccion efectivo residual φ _{epm}		9,250646308
Alura Critca Corto Plazo	29,83695466	
Alura Critca Mediano Plazo		9,764582072
Porocidad Maxima	0,422284977	
Porocidad Promedia		0,160744925

K	3,167395718
Homt	11,09252692
Hom	12,03690482

Figura 19 Resultados Hoja cálculo de propiedades geotécnicas (Elaboración propia)

En la Figura 13 se muestran las ecuaciones necesarias para el cálculo de la altura vertical máxima (o crítica) para el corto plazo y mediano plazo $-H_{om}$ y H_{omt} que, a su vez está determinada por una cohesión (según se explica en el numeral 6.6) y el

peso unitario; y por un factor K , del mismo tipo del que fue derivado en forma teórica por el pionero de la mecánica de suelos (Terzaghi, 1956). El parte inferior de la Figura 19 se calculan las alturas verticales de acuerdo a la categoría de tiempo.

6.7.3 HOJA DE CÁLCULO DE “FACTORES DE SEGURIDAD– ESTUDIOS REGIONALES”

La hoja electrónica correspondiente para el cálculo de factores de seguridad relativos al deslizamiento (FSr) presenta como datos de entrada los parámetros a y b de la tendencia de pendientes promedias del patrón triangular a nivel de población según se detalló en el numeral 6.4.7 así como el valor de H_{LD} calculado a partir de los parámetros funcionales a y b de la tendencia de pendientes promedias y el valor de la longitud límite de la población (L_{LP}) por medio de la ecuación (16) para la función potencial simple que representa el promedio de la población.

Los valores de la altura vertical máxima (o crítica) para el corto plazo y mediano plazo - H_{om} y H_{omt} -, calculados de los parámetros geomecánicos se utilizan para el cálculo de factores de seguridad relativos al deslizamiento (FSr) como se muestra en la Figura 20.

En la Figura 20 se presentan las familias de taludes de la familia 1 hasta la 30, la totalidad de datos de presentan en los anexos.

Coordenadas del centroide		PARÁMETROS GEOMÉTRICOS FAMILIAS			ALTURAS CRÍTICAS		Factor de seguridad Estudios Regionales		
X	Y	Familia	HLD	LLD	Mediano plazo	Corto plazo	Largo plazo	Mediano plazo	Corto plazo
-8477891.61	663969.5611	1	62.5	100.3410506	147.557475	146.2362897	0.411059507	0.422563767	0.427390493
-8477926.2	663864.2835	2	75	101.3104329	146.4719469	146.0165034	0.493271409	0.512043443	0.51364057
-8477484.73	663939.1015	3	75	115.59725	144.2072235	143.083362	0.493271409	0.520084904	0.52469959
-8478357.96	663917.5179	4	100	160.9110898	135.6793211	135.3294086	0.657695211	0.73703199	0.73897686
-8478127.65	664161.4734	5	62.5	92.75306172	145.4001043	144.7829089	0.411059507	0.429848385	0.431680787
-8478077.48	664273.8967	6	62.5	91.89159754	143.5306811	143.4110444	0.411059507	0.435286301	0.435810228
-8477953.41	664199.9794	7	62.5	102.4171141	140.3393752	139.9558602	0.411059507	0.445348997	0.446569368
-8477802.02	664158.7033	8	75	107.9515491	149.8733009	148.7525472	0.493271409	0.500422687	0.50483047
-8478187.82	661863.8989	9	87.5	111.636183	150.4986557	149.9389522	0.57548331	0.581400542	0.583570838
-8478339.71	661742.2393	10	75	124.5442229	139.7303722	139.1547008	0.493271409	0.536748015	0.538968497
-8477812.35	661829.0989	11	62.5	90.29484427	149.7671226	148.99347	0.411059507	0.417314554	0.419481471
-8477782.33	661701.7854	12	62.5	90.039205	148.5680458	147.6547743	0.411059507	0.420069814	0.423284654
-8478362.6	661508.0728	13	87.5	124.7048683	147.9289105	147.1649949	0.57548331	0.591516329	0.594570741
-8478061.85	659669.1074	14	62.5	92.55440007	145.3037521	144.6880263	0.411059507	0.430133421	0.431963871
-8477948.66	659815.0175	15	75	94.87650541	149.2819312	148.874115	0.493271409	0.502405076	0.503781332
-8477908.27	659726.912	16	50	72.01429732	146.7245812	146.360382	0.328847606	0.340774529	0.341622503
-8478634.58	659474.1001	17	100	132.8039881	145.3302121	144.6374423	0.657695211	0.687993492	0.691383907
-8478165.39	659418.1443	18	87.5	109.3553598	150.9558517	150.5372417	0.57548331	0.579647349	0.581251516
-8477977.7	659355.3585	19	100	181.2635695	143.6851177	140.9211332	0.657695211	0.69917869	0.709616775
-8479081.28	659182.4925	20	75	143.2798138	141.028996	139.7964562	0.493271409	0.5180553	0.536494286
-8478930.57	-8478930.57	21	75	138.2162323	137.5522186	137.3335019	0.493271409	0.545247476	0.546115834
-8479691.28	659076.6784	22	100	135.429015	148.5302619	147.6790883	0.657695211	0.673354142	0.677343942
-8479557.93	659315.4374	23	112.5	162.0797137	146.2470845	144.9320725	0.739907113	0.769246104	0.776225704
-8479373.61	659085.2241	24	75	106.7686961	145.2171197	144.8602035	0.493271409	0.516668032	0.51774054
-8479303.84	658740.4492	25	62.5	68.31608439	151.1033436	150.6065744	0.411059507	0.413624203	0.414988524
-8479184.77	658765.5767	26	62.5	71.6311289	150.6335733	150.4899789	0.411059507	0.414914143	0.415310045
-8478909.77	659051.0316	27	75	101.5415867	149.5697999	148.7120154	0.493271409	0.503438125	0.504330466
-8478390.1	658429.3605	28	87.5	178.0197917	147.4229736	144.7229407	0.57548331	0.593530288	0.604033524
-8477850.48	658514.4059	29	75	105.1472025	145.6363699	144.9830981	0.493271409	0.514981251	0.517301678
-8477898.66	658603.6379	30	50	56.92384849	152.0357868	152.0163684	0.328847606	0.328869939	0.328911949

PARÁMETROS PENDIENTES PROMEDIAS PT POBLACIÓN			
LLD (POBLACIÓN)	HLD (H de la Función Básica de tendencia promedios a nivel de población)	ap	bp
288,7730494	152,0461123	2,86355002	0,70108954

Figura 20 Hoja electrónica Fator de seguridad relativos al deslizamiento estudio regional taludes de 1 al 30

7 RESULTADOS

La construcción del patrón triangular permite la evaluación de las características de degradación, desagregación y variabilidad de los geomateriales de una misma formación, es decir; a nivel de población, esta construcción del patrón triangular, que es la base para la determinación de los valores funcionales a y b promedio de la población o universo, permiten el cálculo del ángulo básico de fricción y el ángulo entre minerales correspondientes a la población analizada.

Los valores para el ángulo básico de fricción como se explicó en el numeral 6.4.2 pueden variar entre 25° para lutitas y hasta 37° para granitos y areniscas duras.

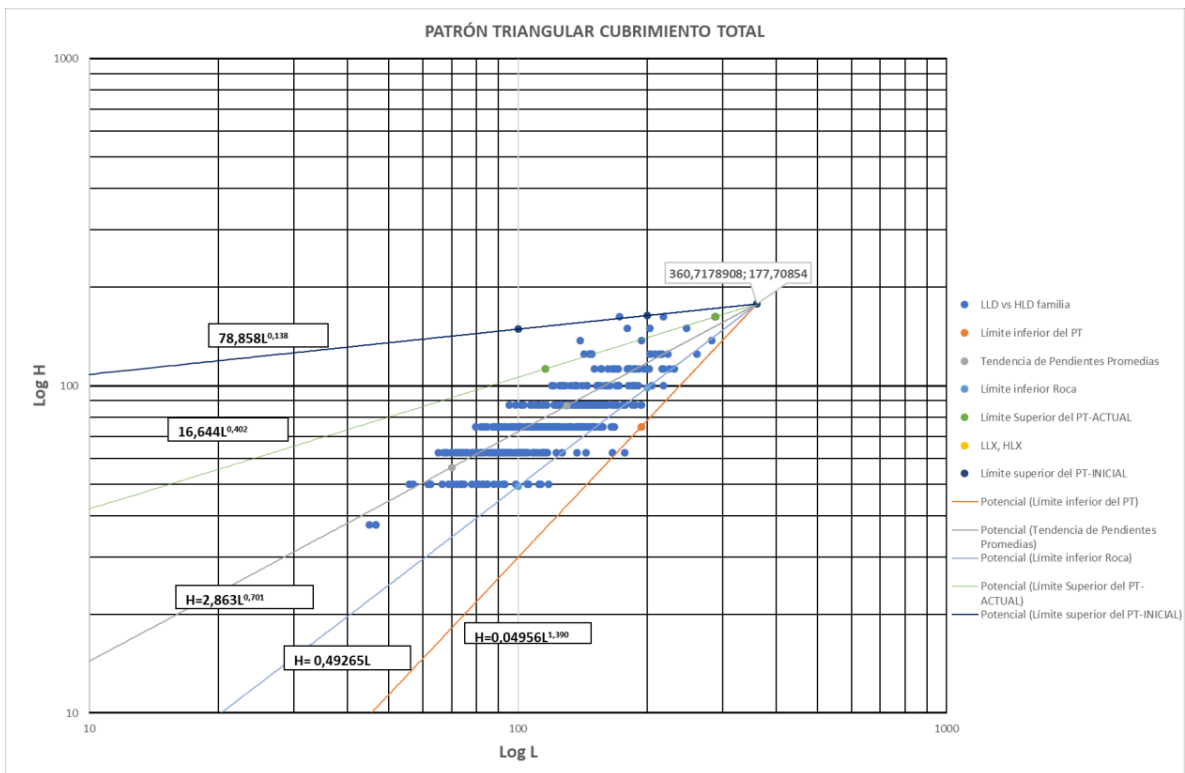


Figura 21 Resultados del Patrón triangular a nivel de población (Elaboración propia)

En la Figura 21 se observan las tendencias límite inferior, límite superior actual, límite superior inicial, límite inferior roca. De acuerdo a lo que se explicó en el 6.4.5 el material presenta un comportamiento tipo C lo cual corresponde a una variabilidad alta, sin embargo; a una desagregación y degradación del material intermedia. A su vez se presenta el límite entre rocas, que corresponde a la tangente del ángulo básico de fricción estimada en: $\tan \varphi_b = 0.49265$. Por consiguiente, el valor del

ángulo básico de fricción calculado es: $\varphi_b = 27^\circ$, valor que se relaciona con los valores esperados para el tipo de rocas sedimentarias encontradas en el área, dado que son lutitas cuyo valor tiende a ser $\varphi_b \geq 25^\circ$ el valor se considera satisfactorio.

De la tendencia de pendientes promedio se obtienen los valores a y b de la función potencial de donde a su vez se obtienen los valores de la pareja H vs L de la familia promedio como se explicó en el numeral 6.7.3 y cuyos valores se presentan en la Tabla 12.

PARÁMETROS PENDIENTES PROMEDIAS PT POBLACIÓN			
LLD (POBLACIÓN)	HLD (H de la Función Básica de tendencia promedios a nivel de población)	ap	bp
288,7730494	152,0461123	2,86355002	0,70108954

Tabla 12 Parámetros de la función potencial de la pendiente promedio del Patrón triangular - Población (Elaboración propia)

El parámetro $H_{LD} = 152.05 \text{ m}$ (H de la función Básica de tendencia promedio a nivel de población) se constituye en la base de cálculo de los factores de seguridad relativos para las diferentes categorías de tiempo.

Los datos obtenidos mediante la hoja de cálculo explicada en el numeral 6.7.3 se presentan por medio de mapas de isovalores, los cuales corresponden a los valores por zonas establecidas: la zona urbana (en los alrededores del casco urbano del Carmen de Atrato) y la zona comprendida entre las veredas del municipio y la vía que conecta el departamento del Chocó con el resto del país.

Las imágenes presentadas para las diferentes categorías de tiempo propuestas: corto, mediano, y largo plazo; se presentan en una escala de 1:25.000, escala apropiada para estudios regionales de zonificación geotécnica.

Los factores de seguridad presentados corresponden a factores de seguridad relativos al deslizamiento considerando sólo la condición gravitacional; es decir, considerando la geomorfología encontrada en el momento del estudio a través de la topografía y la geología del área de trabajo, no así la consideración del sismo o eventos futuros de precipitación.

En línea con lo anterior, la definición del factor de seguridad relativo al deslizamiento calculado plantea condiciones del terreno debido a eventos del pasado que modifican la topografía del terreno y que condiciona la geomorfología del terreno al momento de la realización de este trabajo.

El enfoque del presente trabajo contempló la determinación de zonas susceptibles al deslizamiento mediante la cuantificación del factor de seguridad relativo, que para efectos prácticos se reconoce como un índice de susceptibilidad al deslizamiento, el cual; relaciona dos alturas como se explicó en el numeral 6.6 para determinar la estabilidad de los taludes a nivel de estudios regionales.

Un estudio complementario para la pre zonificación en los parámetros de estabilidad mediante la probabilidad de falla con factores de seguridad relativos al deslizamiento, podría apuntar a ampliar la susceptibilidad de falla aquí determinada; para eventos futuros hasta 30 años mediante la inclusión de un modelo de precipitaciones y sismos.

FACTORES DE SEGURIDAD RELATIVOS CORTO PLAZO

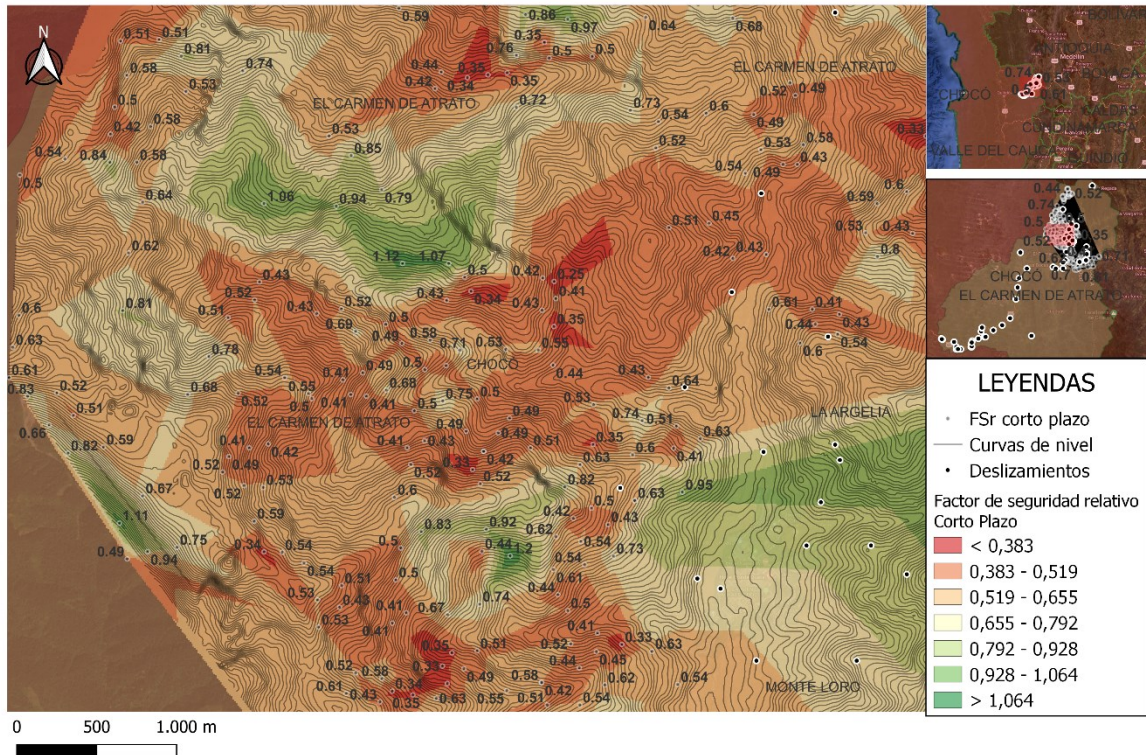


Figura 22 Mapa de isovalores factores de seguridad relativo al deslizamiento a corto plazo zona urbana y alrededores municipio el Carmen de Atrato (Elaboración propia)

FACTORES DE SEGURIDAD RELATIVOS CORTO PLAZO

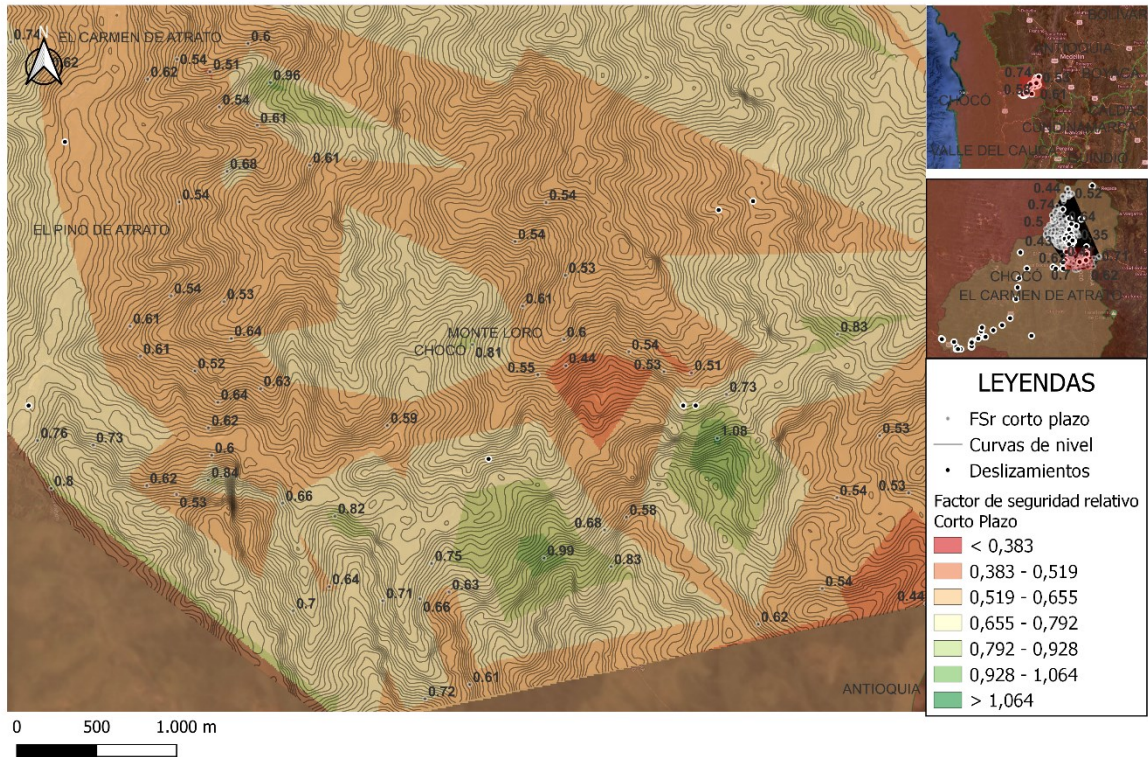


Figura 23 Mapa de isovalores factores de seguridad relativo al deslizamiento a corto plazo zona sub-urbana y alrededores municipio el Carmen de Atrato (Elaboración propia)

FACTORES DE SEGURIDAD RELATIVOS MEDIANO PLAZO

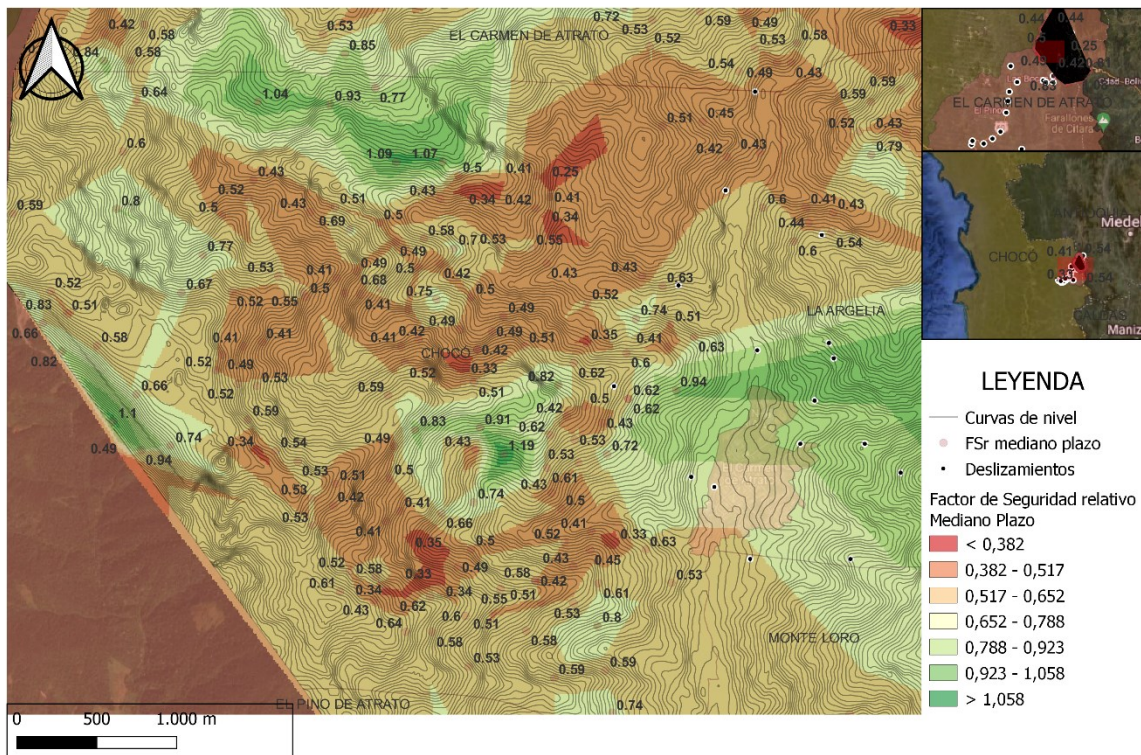


Figura 24 Mapa de isovalores factores de seguridad relativo al deslizamiento a mediano plazo zona urbana y alrededores municipio el Carmen de Atrato (Elaboración propia)

FACTORES DE SEGURIDAD RELATIVOS MEDIANO PLAZO

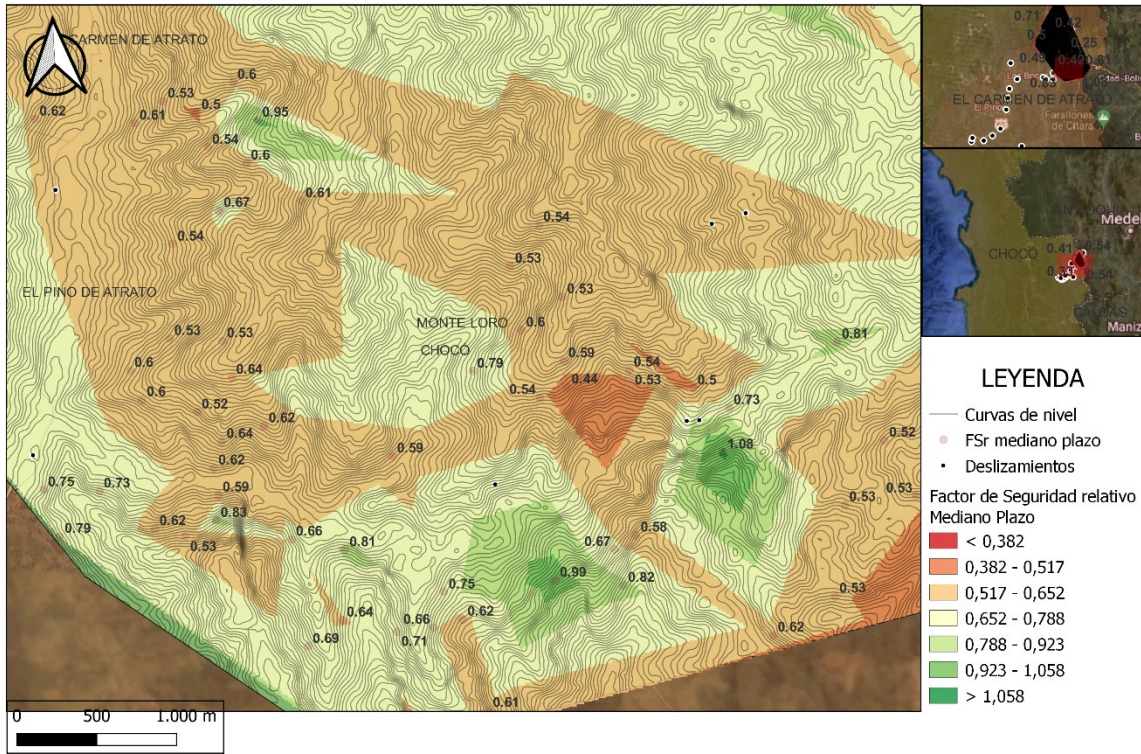


Figura 25 Mapa de isovalores factores de seguridad relativo al deslizamiento a mediano plazo zona sub-urbana y alrededores municipio el Carmen de Atrato (Elaboración propia)

FACTORES DE SEGURIDAD RELATIVOS LARGO PLAZO

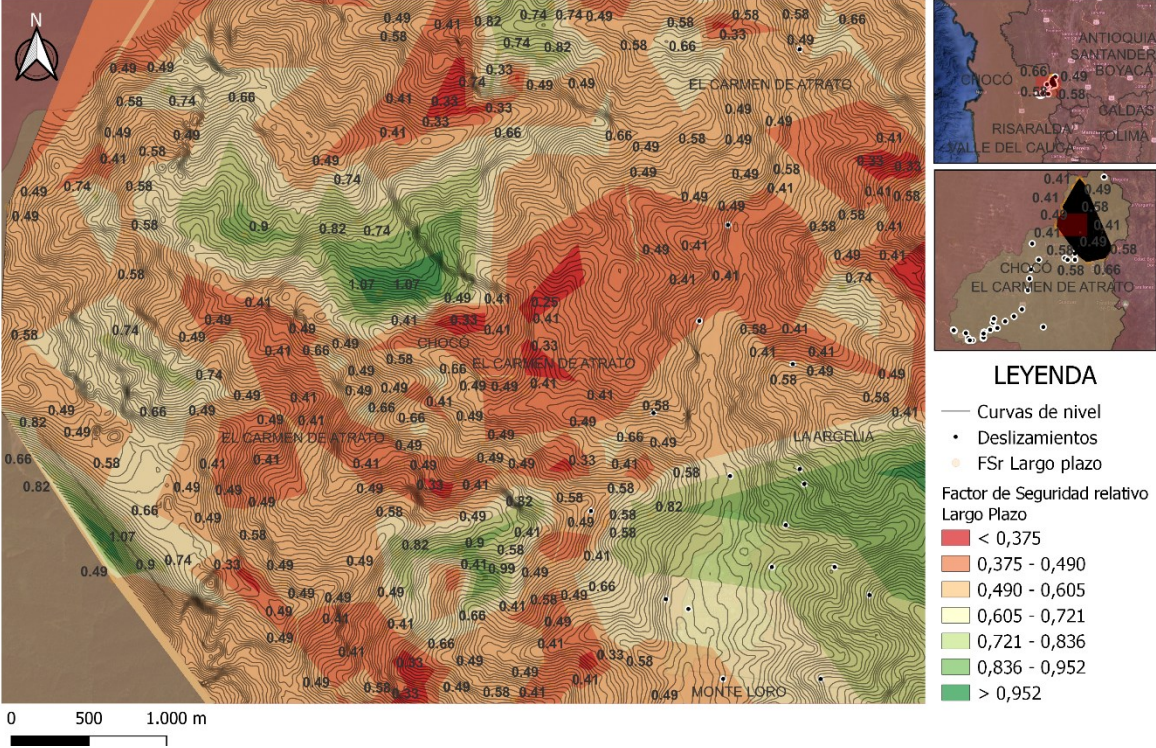


Figura 26 Mapa de isovalores factores de seguridad relativo al deslizamiento a largo plazo zona urbana y alrededores municipio el Carmen de Atrato (Elaboración propia)

FACTORES DE SEGURIDAD RELATIVOS LARGO PLAZO

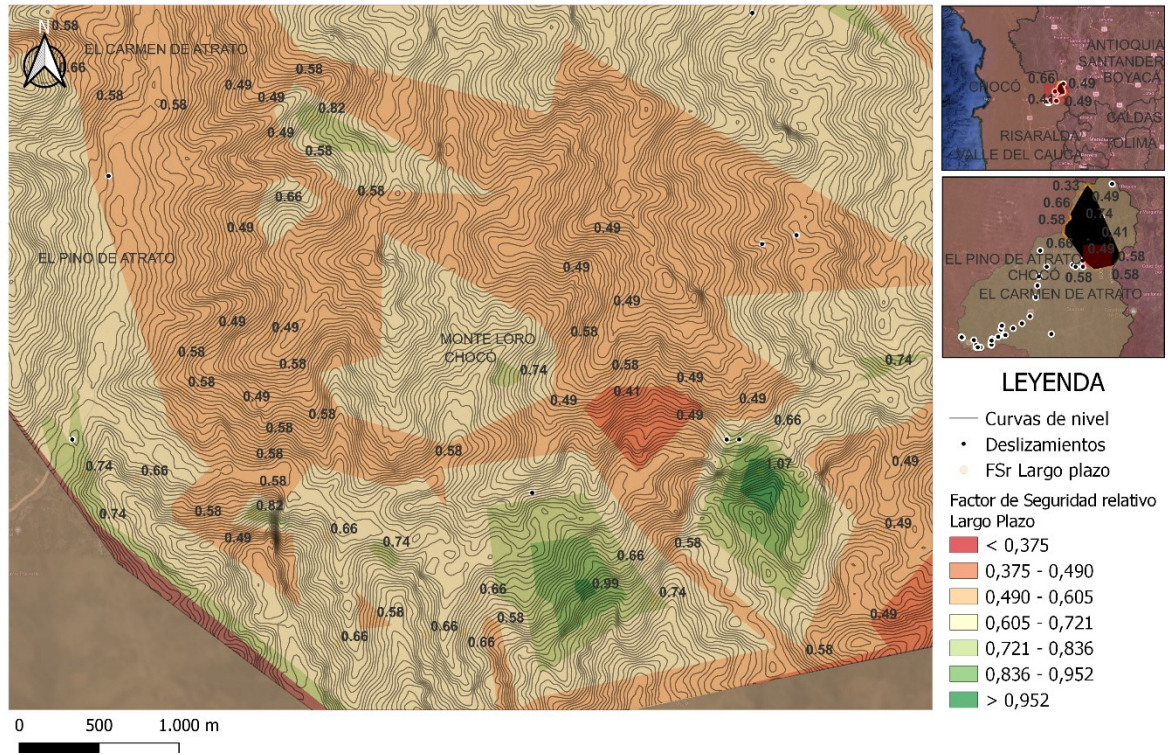


Figura 27 Mapa de isovalores factores de seguridad relativo al deslizamiento a largo plazo zona sub-urbana y alrededores municipio el Carmen de Atrato (Elaboración propia)

8 CONCLUSIONES

Los Factores de seguridad relativos al deslizamiento calculados, que para efectos prácticos se denominan, índices de susceptibilidad al deslizamiento, se conciben como una relación de la altura del talud o de la familia evaluada y el promedio de la familia o de la población. La metodología considera mayor resistencia en los taludes con alturas mayores dado que representan una condición de resistencia y estabilidad en el tiempo mayor. Taludes con alturas cortas, o cambios de direccionalidad del movimiento cortos, evidencian mayor susceptibilidad al deslizamiento, y por ende un menor factor de seguridad dado que las condiciones de eventos del pasado han modificado su geomorfología. Por tal motivo, como se evidencia en los resultados obtenidos para el área urbana y suburbana del municipio del Carmen de Atrato donde se zonifica en función de este factor de seguridad, se tiene que en el área se presentan zonas con menores factores de seguridad relativos y un mayor índice de susceptibilidad al deslizamiento, identificando así áreas a considerar para estudios más detallados. Estos análisis se realizan para corto (4 a 8 años aproximadamente), mediano (10 a 40 años aproximadamente) y largo plazo (más de 40 años). El caso más crítico presentado corresponde a la condición de largo plazo. Esta se calcula considerando la altura promedio calculada del patrón triangular y la altura correspondiente a la familia. Teniendo que en el largo plazo se esperarían que todos los taludes fallen, para análisis iniciales de decisiones se utiliza la categoría de corto plazo (4 a 8 años). Nótese que, para la categoría de corto plazo intervienen parámetros geomecánicos, mientras que para la categoría de largo parámetros geométricos (No mecánicos).

En la construcción del patrón triangular se obtuvo el valor del ángulo básico de fricción $\varphi_b = 26^\circ$ para la población de estudio, lo cual es consistente con el valor típico esperado para rocas sedimentarias tipo lutitas.

El mapa de isovalores para las diferentes categorías de tiempo: corto, mediano y largo plazo, presenta los factores de seguridad relativos al deslizamiento calculados para la zona urbana y suburbana del municipio del Carmen de Atrato a una escala

de 1:25.000. adicionalmente, se analizaron los deslizamientos históricos presentados en la zona y su convergencia con las zonas delimitadas.

Los puntos donde se registraron eventos por movimientos en masa se presentan mayormente en cercanías al casco urbano del municipio. Sin embargo, dado que la información suministrada en el servicio geológico colombiano (SGC) corresponde solamente a los eventos registrados oficialmente en el inventario, no se descarta la posibilidad de muchos más eventos registrados en la zona. Sin embargo, los eventos registrados en este caso, no presentan relación con los sitios de más alta susceptibilidad al deslizamiento. Ahora bien, los deslizamientos guardan relación con los cambios de pendiente presentados de acuerdo con la topografía del terreno, es decir, son un indicativo del cambio geomorfológico.

En el casco urbano, caracterizado principalmente por pendientes suaves, se estimaron valores de factores de seguridad relativos que van desde 0.82 en la condición de largo plazo hasta 0.95 en la condición de corto plazo. En la parte norte del casco urbano se presentan valores de 0.25, por lo cual se considera la zona con menor factor de seguridad relativo y mayor susceptibilidad al deslizamiento. En esta zona se muestran cambios de pendientes asociados a eventos del pasado, que podrían presentarse nuevamente bajo las condiciones climáticas, ambientales y antropogénicas, por lo que se sugiere que se realice mayor monitoreo. A su vez, en la parte noroccidente del caso urbano, como se muestra en la Figura 27 y la Figura 22, se alcanza a visualizar la parte más estable alcanzando valores hasta de 1.12 en la categoría de corto plazo y 1.07 en la categoría de largo plazo. Lo anterior sugiere que esta zona presenta una menor susceptibilidad al deslizamiento.

Los valores calculados para factores de seguridad relativos al deslizamiento bajos, si bien no implican su colapso inmediato si presentan una aproximación a la susceptibilidad al deslizamiento bajo condiciones naturales, por lo cual, podrían ser objeto de un sistema de alerta temprana. Como se explicó previamente, una mejor estimación de la posible ocurrencia de eventos futuros, podría ser implementar un modelo considerando precipitación hasta 30 años y sismos para distintos períodos de retornos. Es importante recordar, que los factores de seguridad relativos reflejan

la historia pasada, pero no tienen en cuenta eventos detonantes futuros. La inclusión de estos detonantes permite realizar una mejor estimación de la probabilidad futura de falla al deslizamiento. No obstante, el cálculo de los parámetros de estabilidad presentados en este trabajo, corresponden a un acercamiento preliminar a la susceptibilidad de deslizamiento en la zona analizada, así como los parámetros de resistencia de geomateriales los cuales son de utilidad en los proyectos de ingeniería civil.

9 REFERENCIAS

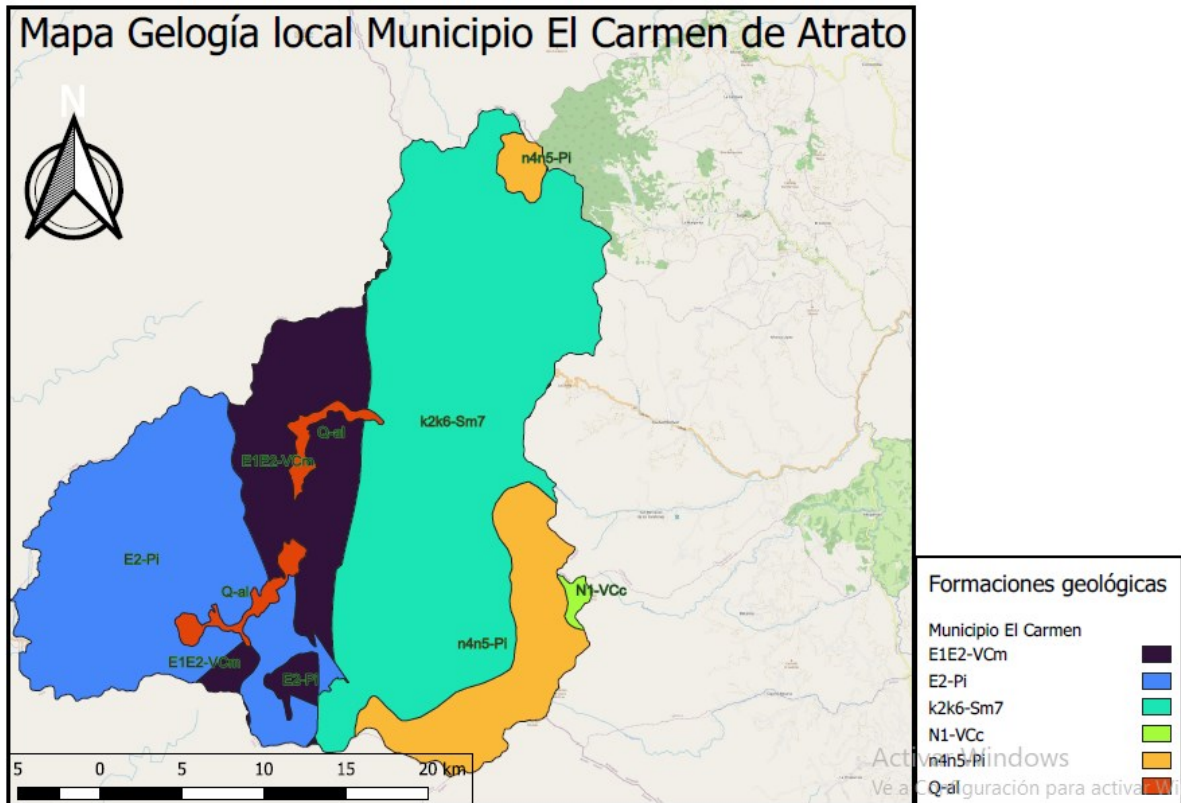
- Banco Interamericano de Desarrollo, & Comisión Económica Para América latina y el Caribe. (2012). *Valoración de daños y pérdidas Ola invernal en Colombia 2010-2011*. Bogotá.
- Campos G., A., Holms Nielsen, N., Díaz G., C., Rubiano V., D., Costa P., C., Ramirez C., F., & Dickson, E. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia Un aporte para la construcción de políticas públicas*. Bogotá .
- Caracol, r. (18 de diciembre de 2021). Un derrumbe mantiene la vía Medellín-Quibdó bloqueada. *Caracol radio*.
- Correa, Y. (3 de septiembre de 2022). Cierre total en la vía Medellín-Quibdó. *Radio nacional del Colombia RTVC*.
- Cuadros Veloza, A. Y., & Zambrano Moreno, S. A. (2012). *Metodología para la cuantificación de pérdidas económicas en corredores viales por deslizamientos y avalanchas "Caso piloto aplicado a tres tramos de la vía concesionada Bogotá-Villavicencio para deslizamiento superficiales"* . Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Evaluación Riesgos Naturales ERN. (2004). *Estudio sobre desastres ocurridos en Colombia: Estimación de pérdidas y cuantificación de costos*. Bogotá.
- Gonzales García, Á. J. (1992). *Evaluación del riesgo de una avalancha Utica (Cundinamarca)*. Bogotá.
- Hoek, E., & Knappett, J. (2006). *PRACTICAL ROCK ENGINEERING. NORTH VANCOUVER, BRITISH COLUMBIA: CANADA*. Vancouver.
- Instituto colombiano de Geología y Minería. (2002). *Catálogo nacional de movimientos en masa*. Bogotá.
- Instituto Nacional de vías. (23 de enero de 2023). Afectación por deslizamiento de tierra Cauca-Colombia. *FUNDACION ABBACOL*.

- Juagibioy Revelo, J. M. (2021). *Resiliencia después del desastre. La comunidad del barrio Los Pinos de Mocoa Putumayo tras el desastre Socio Natural de marzo de 2017*. Bogotá.
- La FM. (20 de agosto de 2022). Deslizamiento de tierra en vía Medellín-Quibdó: Un muerto y dos heridos . *Radio La FM*.
- Marín Duque, M. C. (2006). *Verificación de la metodología de taludes naturales a partir de investigaciones geotécnicas existentes*. Medellín.
- Naciones Unidas para la reducción del riesgos de desastres. (2021). *Informe de evaluación regional sobre el riesgo de desastres en América latina y el Caribe*.
- Oquendo, C. (5 de diciembre de 2022). Al menos 34 muertos y nueve heridos por un derrumbe en una vía de Risaralda. *El País*.
- Prada, L. F., & Ramos, A. (2000). *Desarrollo de un algoritmo basado en la metodología de taludes naturales (MTN) para determinar la profundidad del suelo*. Santafé de Bogotá.
- Rudas, C. E. (19 de enero de 2023). Chocó, Antioquia y Valle están entre las regiones más afectadas por las lluvias . *LR La República*.
- Sánchez Forna, J., & Vaunat, J. (2022). *Análisis de la estabilidad de laderas mediante macroelementos a escala regional*. Barcelona.
- Shuk Erdos, T. (1994). *Diferenciación y caracterización geomecánica cuantitativa de materiales geológicos derivados de una única roca parental mediante la metodología de taludes naturales (MTN)*. Santiago de Chile.
- Shuk Erdos, T. (1994). *Elementos claves y aplicaciones de la metodología de taludes naturales (MTN) con cierto énfasis en los aspectos de estabilidad de taludes*. Bogotá.
- Shuk Erdos, T. (1995). *Estado actual de la metodología de taludes naturales (MTN) y de sus resultados y aplicaciones*. Santafé de Bogotá.

- Shuk Erdos, T. (1998). Caracterización del sitio por medio de la MTN. *Balkema, Rotterdam*, 315-320.
- Shuk Erdos, T. (1999). *Zonificación geotecnica cuantitativa por medio de la MTN*. Bogotá.
- Shuk Erdos, T., & Gonzales, Á. J. (1996). *Cuantificación del riesgo de inestabilidad de taludes y parámetros de costo para aplicaciones geotécnicas en un proyecto vial y en un estudio regional*. Bogotá.
- Shuk Erdos, T., & Hernandez, E. E. (1996). Mapeo cuantitativo del factor de seguridad mediante la metodología de taludes naturales. *Landslide Senneset*, 387-392.
- Terzaghi, K. (1956). *Theoretical Soil Mechanics*. Nueva York: John Wiley and Sons, 8a. Editions.

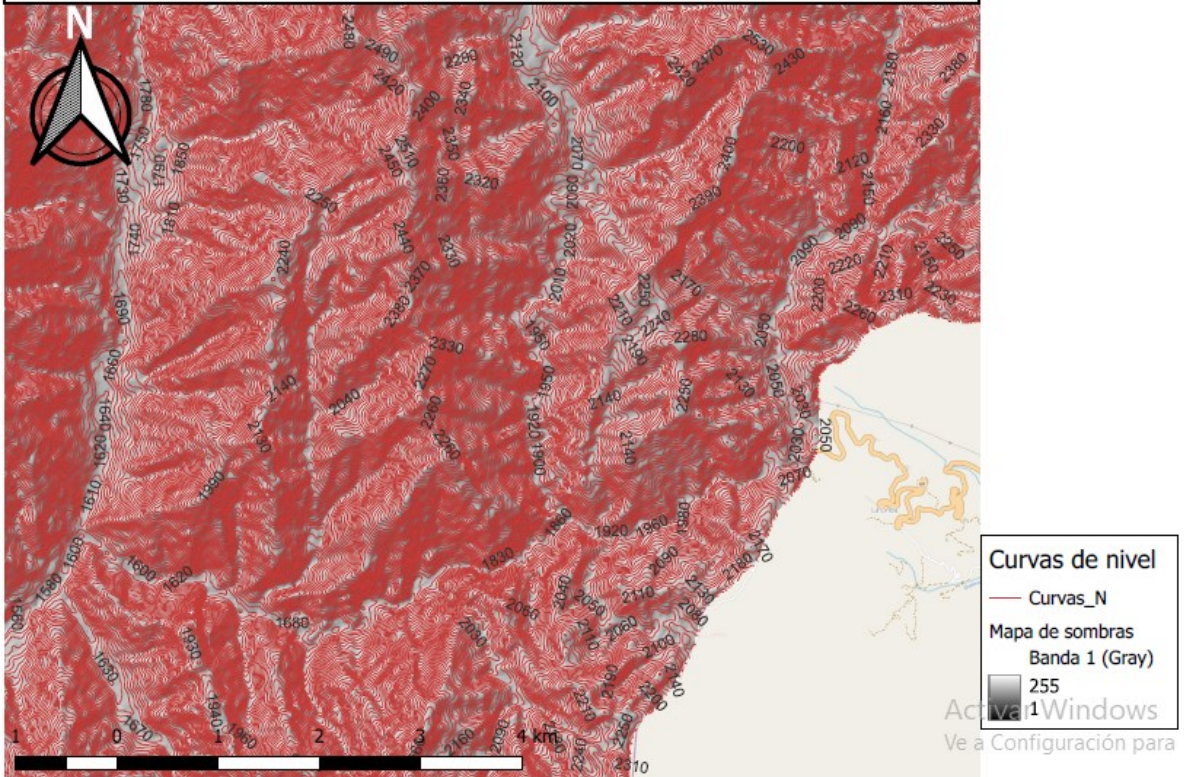
10 ANEXOS

10.1 Anexo 1 Geología local

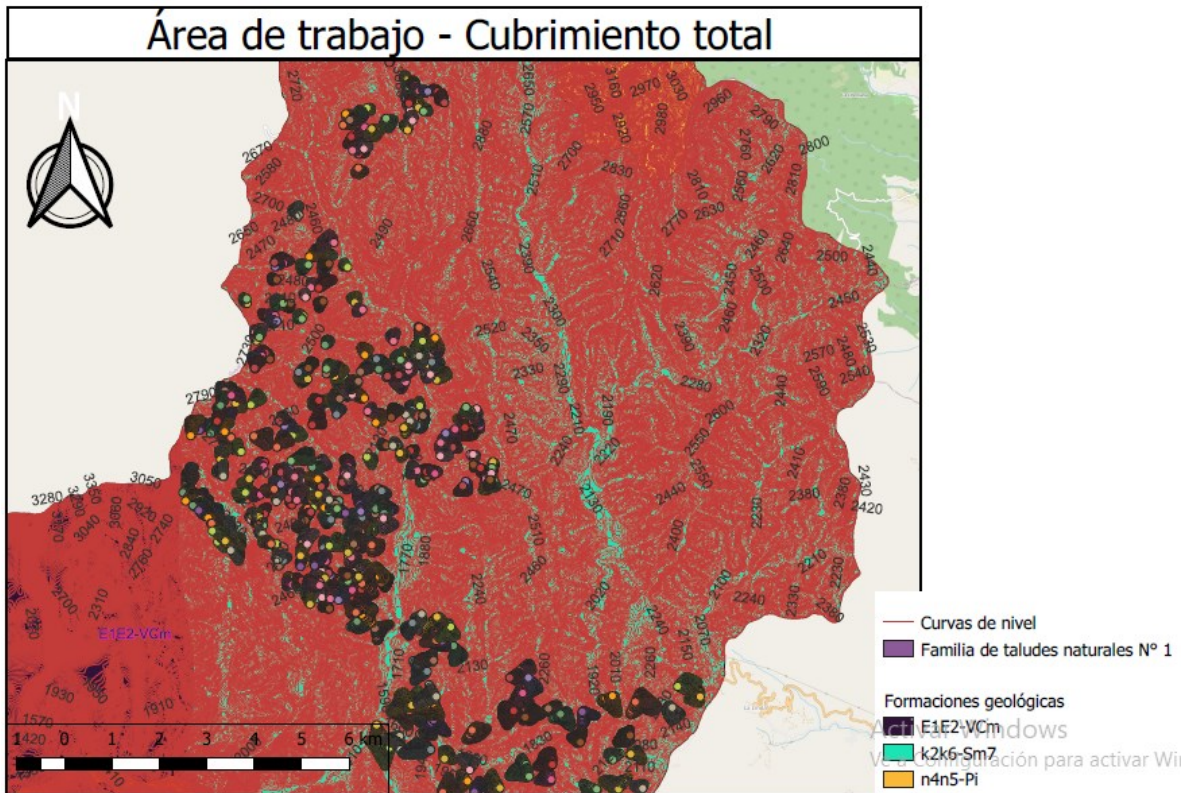


10.2 Anexo 2 Topografía del área de estudio

Topografía municipio del Carmen de Atrato



10.3 Anexo 3 Mediciones de las familias de taludes



10.4 Anexo 4 Anexos digitales

Los anexos presentados se complementan con información adicional de la evaluación de todas las familias que debido a su extensión no se incluyen en el presente documento; sin embargo, para mayor detalle remitirse a los anexos enunciados a continuación:

Anexo A. Evaluación de las familias de taludes – Patrón triangular familia

Anexo B. Sistema analítico de la MTN – Envolutas- y cálculo de parámetros geomecánicos de las familias de taludes.

Para la visualización del anexo B, remitirse al siguiente enlace:
<https://drive.google.com/file/d/1otmgswAl3rTiF8YKKh3b1fG70kePCh/view?usp=sharing>.

Anexo C. Cálculo de los factores de seguridad relativos de las familias de taludes.