

**MANUAL PARA EL ANALISIS SISMICO DE ESTABILIDAD DE TALUDES
UTILIZANDO METODOS SEUDOESTATICOS Y METODOS DE
DESPLAZAMIENTO**

LAURA YARICK BARRAGAN RODRIGUEZ



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2008**

**MANUAL PARA EL ANALISIS SISMICO DE ESTABILIDAD DE TALUDES
UTILIZANDO METODOS SEUDOESTATICOS Y METODOS DE
DESPLAZAMIENTO**

LAURA YARICK BARRAGAN RODRIGUEZ

**Proyecto de Grado presentado como
requisito parcial para optar el titulo de
Ingeniera Civil**

Director: Ing. JAIME SUAREZ DIAZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2008**

DEDICATORIA

A DIOS

*Por estar conmigo y cuidarme en todo momento
dándome lo necesario para salir adelante*

A MI MAMITA

*Por su compañía, por su apoyo y sacrificio que me permitieron
en este momento cumplir una de mis metas.
Por que tuvo que hacer el papel de dos y lo hizo muy bien.*

A MIS HERMANOS

*Por su colaboración, y por que a pesar de todo
lo que pueda pasar los quiero mucho*

A MIS AMIGOS

*Por su apoyo y compañía en el arduo camino
para llegar a este punto. Sus buenos consejos
y por todos esos momentos que vivimos en esta etapa.*

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece la colaboración recibida de todos aquellos que hicieron posible la realización de este proyecto y en especial:

Al profesor Jaime Suarez Díaz, por brindarme la oportunidad de trabajar en este proyecto, siendo una guía y por compartir sus conocimientos.

A todos los profesores que aportaron en mi formación académica y personal.

A los compañeros que me colaboraron en el transcurso de la carrera y que aun siguen en la lucha.

A mis amigos en los buenos y en los malos ratos

A los que pertenecen al grupo de trabajo de Geotecnología Ltda. Por su colaboración en todo momento.

A mis compañeros de apartamento, por que entre todos hemos formado un segundo hogar.

RESUMEN

TITULO

MANUAL PARA EL ANALISIS SISMICO DE ESTABILIDAD DE TALUDES UTILIZANDO METODOS PSEUDOESTATICOS Y METODOS DE DESPLAZAMIENTO*

AUTOR

BARRAGAN RODRIGUEZ, Laura Yarick **

PALABRAS CLAVES

ANALISIS SISMICO
METODO SEUDOESTATICO
METODO DE NEWMARK

DESCRIPCION

Al encontrarnos en uno de los puntos con mayor sismicidad en Colombia como lo es Bucaramanga, es de importancia evaluar la estabilidad y los posibles desplazamientos que puede presentar un talud ante los movimientos sísmicos. Por esta razón es necesario contar con herramientas adecuadas que permitan evaluar su estabilidad y en caso crítico la magnitud del desplazamiento del talud que se llegara a presentar.

Este análisis se lleva a cabo con métodos y programas especializados. El Software Slope/W ya muy conocido y utilizado para hallar la estabilidad de las laderas; en tanto que el software del método de Newmark se utilizara como nuevo recurso para hallar los desplazamientos de la ladera al momento de deslizarse. El software fue implementado por *Southern California Earthquake Center* (SCEC). Este contiene un amplio registro de los mayores sismos que se han presentado en la historia.

* Grade Thesis

** Physical Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering. Eng. JAIME SUAREZ DIAZ

ABSTRAC

TITULO

MANUAL FOR THE SEISMIC ANALYSIS OF STABILITY OF SLOPES USING PSEUDOSTATIC METHODS AND METHODS OF DISPLACEMENT*

AUTOR

BARRAGAN RODRIGUEZ, Laura Yarick **

PALABRAS CLAVES

SEISMIC ANALYSIS
PSEUDOSTATIC METHOD
NEWMARK METHOD

DESCRIPCION

When finding us in one of the points with greater seismicity in Colombia like it is Bucaramanga, it is important to evaluate the stability and the possible displacements that can present/display a slope in before a seismic movements. Therefore it is necessary to cant have suitable tools that allow us to evaluate the slope stability and in a critic case of the magnitude of the displacement that was could present.

This analysis is carried out with methods and specialized programs. Software Slope/W already very well-known and used to find the stability of slopes; meanwhile the software of the method of Newmark were used like a new resource to find the displacements of the slope at the time of sliding. A Software was implemented by Californian Southern Earthquake Center (SCEC). Which contains an ample registry of the majors earthquakes through.

* Grade Thesis

** Physical Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering. Eng. JAIME SUAREZ DIAZ

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	20
JUSTIFICACION	22
OBJETIVOS	23
METODOLOGIA	24
1. ANALISIS SISMICO	26
1.1. SISMICIDAD	26
1.2. AMENAZA SISMICA	31
1.2.1. Amenaza Sísmica en Bucaramanga	34
1.2.1.1. Sismicidad Instrumental.	36
1.2.1.2. Amenaza Sísmica Regional	37
1.2.2. Señales de diseño compatibles con escenarios de Amenaza	38
1.2.3. Respuesta Sísmica Local	47
2. CALCULO DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD POR EL METODO SEUDOESTATICO	49
2.1. ANÁLISIS SEUDO-ESTÁTICO DE TALUDES	50
2.2. PROCEDIMIENTOS PARA EL ANÁLISIS SEUDO-ESTÁTICO	51
2.2.1. Análisis Seudo-estático de un talud infinito	54
2.2.2. Análisis para una superficie de falla finita plana y fuerzas sísmicas horizontal y vertical (Kramer 1996) ..	56
2.2.3. Análisis para falla curva	57
2.3. LIMITACIONES DEL MÉTODO SEUDO-ESTATICO	58
2.4. ANÁLISIS POST-SISMO	58

3. CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR MEDIO DE SLOPE/W	60
3.1. PRIMER PASO. DEFINIR EL PROBLEMA	60
3.1.1. Preliminares.	60
3.1.2. Dibujar el perfil	60
3.1.3. Definir parámetros para el Análisis	62
3.2. SEGUNDO PASO. RESOLVER EL PROBLEMA	70
3.3. TERCER PASO. CONTORNO DEL PROBLEMA	70
3.3.1. Análisis de las superficies de deslizamiento	70
3.3.2. Análisis grafico de las superficies de deslizamiento. ...	71
4. PREDICCIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE TIERRAS CAUSADOS POR UN TERREMOTO UTILIZANDO EL ANALISIS DE NEWMARK O BLOQUE DESLIZANTE	72
4.1. ANALISIS DE NEWMARK	73
4.1.1. Análisis de Bloque Rígido	73
4.1.2. Análisis Desacoplado	76
4.1.3. Análisis Acoplado	76
4.2. COMO SE HACE UN ANALISIS DE NEWMARK	78
4.2.1. Primer Paso: Estabilidad del talud	78
4.2.2. Segundo Paso: Historia de la aceleración-tiempo de un terremoto	82
4.2.3 Tercer Paso: Calculo del desplazamiento de Newmark	84
4.3. INTERPRETACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DE NEWMARK ...	86
4.4. DETERMINACIÓN DE UN FACTOR SEUDO-ESTÁTICO PERMANENTE	87
5. PROGRAMA PARA USAR EL METODO DE NEWMARK Y SIMPLIFICAR EL ANALISIS DEL MODELO DEL TALUD DURANTE UN TERREMOTO	88
5.1. GETTING STARTED (PRIMEROS PASOS).	89

5.2. RIGOROUS RIGID-BLOCK ANALYSIS (ANÁLISIS RIGUROSO DEL BLOQUE RÍGIDO)	89
5.2.1. Primer Paso: Select Records (Seleccionar Registros).	89
5.2.1.1. Search records by properties (buscar registros por propiedades).	89
5.2.1.2. Select individual records (Seleccionar registros individualmente).	91
5.2.2. Segundo Paso: Perform Rigid-Block Analysis (Realizar Análisis del Bloque-Rígido).	92
5.2.3. Tercer paso: View Results (Ver Resultados)	93
5.3. SIMPLIFIED ANALYSES (ANÁLISIS SIMPLIFICADOS).	93
5.3.1. Rigid-Block Analysis (Análisis del bloque rígido)	94
5.3.1.1. Ambraseys and Menú	94
5.3.1.2. Jibson y otros (1998-2001)	94
5.3.1.3. Probability of Failure (Probabilidad de Falla)	95
5.3.2. Análisis Desacoplado.	95
5.4. RECORD MANAGER (ADMINISTRADOS DE REGISTROS).	97
5.4.1. Manage Records (dirección de registros).	97
5.4.2. Add Records (añadir registros).	98
5.5. UTILITIES (UTILIDADES)	99
6. APLICACIÓN DE LOS DOS METODOS AL DESLIZAMIENTO DEL BARRIO COLORADOS	100
6.1. DESLIZAMIENTO DEL BARRIO COLORADOS.	100
6.1.1. Características del sitio (Norma NSR 98)	101
6.2. ANALISIS POR EL SOFTWARE SLOPE/W	103
6.2.1. Primer Paso. Definiendo el problema	103
6.2.1.1. Dibujando el Perfil	104
6.2.1.2. Definiendo Propiedades	109
6.2.2. Segundo Paso. Resolviendo el problema.	120
6.2.3. Tercer Paso. Contorno del Problema.	122

6.3. CALCULO DE LOS DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO EL METODO DE NEWMARK	126
6.3.1. Análisis riguroso del bloque rígido	127
6.3.1.1. Primer Paso	127
6.3.1.2. Segundo Paso	128
6.3.1.3. Tercer paso	129
6.3.2. Análisis Simplificados	132
6.3.2.1. Rigid-Block Analysis (Análisis del bloque rígido)	132
6.3.2.2. Análisis Desacoplado	134
6.3.3. Generalizando el método de Newmark para cualquier sismo	136
6.3.2.1. Análisis Riguroso del Bloque Rígido	136
6.3.2.2. Análisis Simplificado	136
6.3.2.3. Análisis Desacoplado	136
CONCLUSIONES	137
BIBLIOGRAFIA	140
ANEXOS	142

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Posibilidad de deslizamiento causada por Sismos (Keefer, 1984)	27
Tabla 2. Escala de Intensidad Mercalli Modificada	28
Tabla 3. Aceleración Máxima y duración de sismos (Housner, 1970)	30
Tabla 4. Sistema de clasificación de sitio para sismos Seed y Bray (1997).	33
Tabla 5. Amenaza sísmica del Área Metropolitana de Bucaramanga considerando fuentes sismogénicas individuales (INGEOMINAS, 2001)	40
Tabla 6. Amenaza Sísmica por escenario falla de Bucaramanga – Santa Marta para varios parámetros de movimiento fuerte (INGEOMINAS, 2001)	40
Tabla 7. Amenaza Sísmica por escenario falla Frontal para varios parámetros de movimiento fuerte (INGEOMINAS, 2001)	41
Tabla 8. Acelerógramas de diseño compatibles con el escenario sísmico de la Falla Bucaramanga – Santa Marta. Aceleraciones espectrales obtenidas con acelerógramas escalados a 0.16g (INGEOMINAS, 2001).	43
Tabla 9. Acelerógramas de diseño compatibles con el escenario sísmico de la Falla Frontal. Aceleraciones espectrales obtenidas con acelerógramas escalados a 0.21g (INGEOMINAS, 2001)	43
Tabla 10. Valores de PGA(g) a nivel superficial para las Unidades Geológicas Superficiales (UGS)	48
Tabla 11. Valores de coeficiente k recomendados en el análisis pseudo-estático (Abramson y otros, 2002)	50

Tabla 12. Ecuaciones de estática que se satisfacen	67
Tabla 13. Magnitud de la amenaza sísmica de acuerdo a la deformación calculada por el método de Newmark (Miles y Keefer, 2001; Yang, 2007)	75
Tabla 14. Relación de periodos par seleccionar entre el análisis de Bloque-Rigido y el Desacoplado	77
Tabla 15. Propiedades de los tipos de suelo del Perfil	112
Tabla16. Resultados obtenidos por los cuatro métodos de análisis para condiciones estáticas y dinámicas	121
Tabla 17. Calculo de la aceleración crítica para un factor de seguridad de 1.0	127

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Relación entre la velocidad de onda de cortante y el N de penetración estándar	31
Figura 2. Amplificación de la onda sísmica en dos suelos diferentes (Kramer, 1996)	32
Figura 3. Mapa Tectónico de Bucaramanga y alrededores (INGEOMINAS, 1997).	35
Figura 4. Combinaciones M-d para la sismicidad asociada a la Falla Bucaramanga –Santa Marta, P=0.9 (INGEOMINAS, 2001)	41
Figura 5. Combinaciones M-d para la sismicidad asociada a la Falla Frontal, P=1.3 (INGEOMINAS, 2001)	42
Figura 6. Acelerógramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga – Santa Marta. De izquierda a derecha y de arriba abajo se presentan los acelerógramas de Helena, Friuli, Mammoth, Coalinga, Whittier y Umbria (INGEOMINAS, 2001).	44
Figura 7. Acelerógramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Frontal. De izquierda a derecha y de arriba abajo se presentan los acelerógramas de Montenegro, Loma Prieta, Pretolia y Dulze (INGEOMINAS, 2001).	45
Figura 8. Espectros de acelerógramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga – Santa Marta (INGEOMINAS, 2001)	46
Figura 9. Espectros de acelerógramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Frontal (INGEOMINAS, 2001)	46

Figura 10. Acelerograma Falla Frontal (sismo de Montenegro-Yugoeslavia)	48
Figura 11. Aplicación de una fuerza pseudo-estática sísmica sobre un elemento de un talud infinito (Cornforth, 2005)	52
Figura 12. Variación del factor de seguridad con el coeficiente sísmico horizontal K_h	53
Figura 13. Esquema de la falla de talud infinito con carga sísmica	55
Figura 14. Análisis sísmico Seudoestático para una falla plana	57
Figura 15. Análisis sísmico Seudoestático de equilibrio límite para una falla curva	58
Figura 16. Discretización de una partición y las fuerzas que actúan en ella	62
Figura 17. Bloque deslizante para el análisis de desplazamientos en taludes sujetos a la carga sísmica	73
Figura 18. Modelo de un deslizamiento potencial con pendiente constante mostrando la interacción de la carga gravitacional (L), la fuerza resistente (R) y la aceleración sísmica del lugar ($a(t)$)	79
Figura 19. Modelo hipotético del talud: teniendo una superficie cortante en la base, factor de seguridad de 1.4 y un ángulo de empuje de 30°	82
Figura 20. Ilustración del algoritmo de Newmark, adaptado por Wilson y Keefer (1983)	85
Figura 21. Distancias para el estudio de ingeniería sísmica	91
Figura 22. Panorámica general del deslizamiento del Barrio Colorados	101
Figura 23. Espectros de Diseño. Área Metropolitana de Bucaramanga	102
Figura 24. Cuadro de selección de análisis para el proyecto	103
Figura 25. Ventana para definir el área de trabajo	104
Figura 26. Ventana para definir la escala del trabajo	105
Figura 27. Ventana para definir la grilla	105

Figura 28. Ventana para guardar el trabajo	106
Figura 29. Ventana para seleccionar los ejes para el trabajo	107
Figura 30. Ventana para seleccionar el grosor de la línea para dibujar el perfil	108
Figura 31. Perfil dibujado	108
Figura 32. Ventana donde se especifican las herramientas del Proyecto	109
Figura 33. Ventana para escoger el método de análisis	110
Figura 34. Ventana para seleccionar la presión de poros y la línea piezometrica	111
Figura 35. Ventana para seleccionar la superficie de deslizamiento	112
Figura 36. Ventana para añadir las propiedades de los tipos de suelos del perfil	113
Figura 37. Ventana para asignar propiedades a las regiones	114
Figura 38. Perfil con las regiones especificadas	114
Figura 39. Ventana para escoger la cantidad y dibujar la línea Piezometrica	115
Figura 40. Perfil con una línea piezometrica	116
Figura 41. Ventana para seleccionar el número de incrementos del radio para dibujar la superficie de deslizamiento	116
Figura 42. Ventana para seleccionar el número de divisiones de la rejilla para dibujar la superficie de deslizamiento	117
Figura 43. Perfil con la superficie de deslizamientos “Radio y Rejilla”.	117
Figura 44. Ventana para definir la presentación grafica del perfil	118
Figura 45. Ventana para verificar las propiedades del suelo por Regiones	119
Figura 46. Ventana para verificar que la información suministrada sobre el perfil	120
Figura 47. Resultados del análisis por los cuatro métodos	121

Figura 48. Perfil analizado y con su respectivo factor de seguridad y la superficie de falla	122
Figura 49. Superficie de deslizamiento con su respectivo Factor de Seguridad	123
Figura 50. Superficie de deslizamiento con su respectivo factor de Seguridad	124
Figura 51. Selección del método de análisis para ver su respectivo factor de seguridad	125
Figura 52. Seleccionar gráficos	125
Figura 53. Selección de opciones a graficar	125
Figura 54. Grafico fuerza vs. Distancia	126
Figura 55. Buscando registros por las propiedades suministradas del Sismo de Diseño	128
Figura 56. Cuadro para especificar la aceleración critica del deslizamiento	129
Figura 57. Desplazamientos de Newmark calculados por el software . . .	130
Figura 58. Histograma de los desplazamientos de Newmark	131
Figura 59. Grafico de Desplazamiento de Newmark vs. Tiempo	131
Figura 60. Análisis de ambraseys and Menu	132
Figura 61. Análisis de Jibson and Others	133
Figura 62. Calculo de la probabilidad de falla	134
Figura 63. Cálculos para el análisis decoupled	135

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Ecuaciones de Atenuación	

INTRODUCCION

Los movimientos sísmicos pueden activar deslizamientos de tierra ocasionando un triple efecto de aumento de esfuerzo cortante, disminución de resistencia por aumento de la presión de poros y deformación asociados con la onda sísmica.

Cuando se tiene un talud en riesgo se debe hacer un análisis detallado de su posible comportamiento ante un sismo. Este estudio incluye determinar la sección transversal y la cimentación del talud, a demás, la historia de las aceleraciones-tiempo anteriores en el suelo debajo del talud y también sus propiedades estáticas y dinámicas. Con análisis dinámicos se pueden obtener los esfuerzos y deformaciones antes de un sismo. Después se estimara una reducción en la resistencia al cortante y un aumento en la presión de poros, como resultado del sismo.

Ya con esto se calcula la estabilidad del talud utilizando el método Seudo-estático. El grado de amenaza se expresa por el factor de seguridad de la ladera. Es necesario tener en cuenta que un talud puede presentar diferentes escenarios que cambian sus condiciones al momento de asignar un factor de seguridad. Para hallar este factor de seguridad se utiliza el software Slope/W, que analiza varias superficies de falla.

Una vez hallada la estabilidad del talud se calculan los desplazamientos permanentes utilizando el método de Newmark.

Se implementara el análisis de Newmark, que es un método muy utilizado en el estado de california (EE.UU).

Ingeominas estima un Sismo de diseño, del cual se parte para seleccionar en el software de Newmark sismos con características similares, en base a los cuales hará el análisis.

El estudio se aplicara al deslizamiento ocurrido en al barrio colorados (1995) en la ciudad de Bucaramanga.

En este manual se muestra el proceso para realizar el análisis por los software Slope/W y Newmark, ofreciendo mayor facilidad para trabajar los estudios de análisis sísmico de estabilidad de taludes.

JUSTIFICACIÓN

Cuando los taludes son importantes y las consecuencias de una falla son significativas, se realiza un análisis detallado del comportamiento del talud durante el sismo.

Los sismos pueden aumentar los esfuerzos y reducir la resistencia de los suelos, generando la falla progresiva o instantánea del talud. Después de ocurrido el sismo se continúan presentando deslizamientos aislados de materiales que fallan en un proceso más lento.

El conocimiento de estos efectos y de las situaciones en las cuales se produjeron deslizamientos de tierra activados por eventos sísmicos, ha servido de guía un tanto empírica para poder predecir la ocurrencia de deslizamientos.

La finalidad de este proyecto es mostrar mediante un manual la correcta aplicación de los métodos ya mencionados y facilitar el análisis de la estabilidad del talud y el desplazamiento que pueda presentarse en el deslizamiento.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- ✓ Elaborar un manual para el Análisis Sísmico de estabilidad de taludes, utilizando los métodos pseudo-estático y de desplazamientos, enfocándonos en el software Slope/W y el software que utiliza el método de Newmark, para facilitar este procedimiento.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Entender el comportamiento sísmico de los taludes y los factores que se deben tener en cuenta para su análisis.
- ✓ Calcular la estabilidad del talud utilizando métodos convencionales de equilibrio como el método pseudo-estático.
- ✓ Manejar el software Slope/W, para el análisis y obtención del factor de seguridad del talud.
- ✓ Calcular los desplazamientos permanentes utilizando el método de Newmark.
- ✓ Manejar el software USGS, que modela el análisis de Newmark, para obtener los desplazamientos acumulativos.
- ✓ Realizar ejercicios aplicando estos métodos al deslizamiento del Barrio Colorados de la ciudad de Bucaramanga.

METODOLOGIA

Para alcanzar los objetivos planteados se propuso el siguiente plan de trabajo:

1. Recolección y análisis de la información general del tema

Esta información fue suministrada en gran parte por el profesor director del proyecto, Jaime Suarez Díaz.

El análisis de estabilidad se realiza con el software Slope/W.

Para el análisis de desplazamientos del método de Newmark, se descargo de la pagina USGS (Science for a changing world). Interpretación de un talud durante un terremoto.

http://earthquake.usgs.gov/resources/software/slope_perf.php

Para la información sísmica de Bucaramanga se recurrió al último informe suministrado por Ingeominas. Zonificación sismo geotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga.

Los ejercicios de aplicación de los análisis en mención, se hicieron en base al estudio hecho por Geotecnología Ltda. del deslizamiento del sector limoncito. Barrio los Colorados- Bucaramanga.

2. Revisión de la información existente

Inicialmente se realizo una revisión bibliográfica sobre los métodos Seudo-estático y Newmark. Seguido se revisaron los software Slope/W y Newmark

Ya que el software de Newmark no es muy conocido, se obtuvo información de este vía internet. Se estudiaron los tutoriales a fondo, los comandos y demás aplicaciones del programa realizando los ejemplos encontrados en la bibliografía.

Al estudiar el programa se pudo apreciar que las propiedades que se usan en EE.UU. para clasificar un sismo son mas completos y se evidencia un mayor análisis que en los estudios de sismos en Colombia.

Para el análisis con el sismo de diseño, se buscaron sismos con propiedades similares dentro de los registros del programa, ya que fueron insuficientes los datos para agregar el sismo Colombiano.

Una vez conocido el funcionamiento de los programas, se selecciono el deslizamiento del barrio colorados, para hacer el análisis de deformación y el análisis de estabilidad de este talud.

Primero se obtiene un factor de seguridad del talud, utilizando el software Slope/W Si el factor de seguridad resultante es inaceptable, se realiza un análisis de deformaciones sísmicas permanentes, de acuerdo al método de Newmark, aplicando el software.

1. Redacción del Aporte

Realizando los respectivos análisis, se procedió a elaborar el manual guía de manejo y aplicación de los programas, para uso de la Escuela Ingeniería civil y de la comunidad universitaria interesada en el tema de análisis sísmico de estabilidad de taludes.

1. ANALISIS SISMICO

1.1. SISMICIDAD

Un sismo es una sacudida del terreno que se produce por choque de las placas tectónicas y por la liberación de energía en el curso de una reorganización brusca de materiales de la corteza terrestre al superar el estado de equilibrio mecánico.

La fuente del movimiento o zona de liberación de energía no es generalmente un punto sino una línea o un área comúnmente alargada en la dirección de la falla. La profundidad del foco o hipocentro determina en buena parte la magnitud del sismo y sus efectos. Los sismos que generalmente producen un mayor daño son los sismos relativamente superficiales.

El área de superficie inmediatamente encima del área de liberación de energía se le denomina epicentro o área epicentral. La gran mayoría de los grandes deslizamientos y agrietamientos del suelo de gran magnitud corresponden al área epicentral y van disminuyendo a medida que el punto considerado se aleja del área epicentral y la intensidad del sismo disminuye.

Existen dos parámetros importantes para designar el tamaño y la fuerza de un sismo, la magnitud que mide la energía del sismo y la intensidad que valora los efectos en el sitio.

Magnitud

La magnitud es una cantidad física proporcional a las veces que por defecto una superficie se desliza o falla, y la energía total que se libera durante el sismo. La magnitud proporciona una estimación del tamaño del terremoto siendo una medida única e independiente del sitio de observación. Richter (1935) definió la magnitud de sismos locales como el algoritmo en base 10 de

la máxima amplitud de la onda sísmica, expresada en milésimas de milímetro (micrones), kilómetros del epicentro del evento.

$$M = \log A + f(d, h) + C_s + C_R$$

Donde:

A= amplitud de la onda

$f(d, h)$ = corrección por distancia focal y profundidad

C_s y C_R = corrección de la estación y corrección regional

La magnitud del sismo se relaciona con el tipo de desplazamiento producido, asignando valores desde 4.0 a 6.5 de la siguiente forma.

Magnitud del Sismo	Tipo de deslizamiento producido
4.0	Caídos de roca, deslizamientos de roca, caídos de suelos y alteraciones de masas de suelo.
4.5	Deslizamiento de traslación, rotación y bloques de suelo.
5.0	Flujos de suelo, esparcimientos laterales, deslizamientos subacuáticos
6.0	Avalancha de roca
6.5	Avalancha de suelo

Tabla 1. Posibilidad de deslizamiento causada por sismos (Keefer, 1984)

La Magnitud y la profundidad del epicentro en forma conjunta determinan la intensidad del sismo y la activación de deslizamientos. A mayor magnitud y menor profundidad del sismo, los deslizamientos son mas probables y de mayor tamaño.

Intensidad

La intensidad sísmica es un concepto que se aplica a la identificación del grado de destrucción o efectos locales de un terremoto. La intensidad se puede medir utilizando la escala propuesta por Mercalli (1902)

Grado	Descripción
I	No es sentido por las personas, registrado por instrumentos sismográficos.
II	Sentido solo por pocas personas en reposos, especialmente en pisos superiores, objetos suspendidos pueden oscilar.
III	Sentido en el interior de las edificaciones, especialmente en pisos superiores, vibración semejante a la producida por el paso de un vehículo liviano, objetos suspendidos oscilan.
IV	Objetos suspendidos oscilan visiblemente, vibración semejante a la producida por el paso de un vehículo pesado, vehículos estacionados se bambolean, cristalería y vidrios suenan, puertas y paredes de madera crujen.
V	Sentido aún en el exterior de los edificios, permite estimar la dirección de las ondas, personas dormidas se despiertan, el contenido líquido de recipientes y tanques es perturbado y se puede derramar, objetos inestables son desplazados, las puertas giran y se abren o cierran, relojes de péndulo se paran.
VI	Sentido por todas las personas, muchos sufren pánico y corren hacia el exterior, se tiene dificultad en caminar establemente, vidrios y vajillas se quiebran, libros y objetos son lanzados de los anaqueles y estantes, los muebles son desplazados o volcados, el revoque y enlucido de mortero de baja calidad y mampostería tipo D se fisura, campanas pequeñas tañen.
VII	Se tiene dificultad en mantenerse parado, percibido por conductores de vehículos en marcha, muebles se rompen, daños y colapso de mampostería tipo D, algunas grietas en mampostería tipo C, las chimeneas se fracturan a nivel de techo, caída del revoque de mortero, tejas, cornisas y parapetos sin anclajes, algunas grietas en mampostería de calidad media, campanas grandes tañen, ondas en embalses y depósitos de agua.
VIII	La conducción de vehículos se dificulta, daños de consideración y colapso parcial de mampostería tipo C, algún daño a mampostería tipo B, ningún daño en mampostería tipo A, caída del revoque de mortero y de algunas paredes de mampostería, caída de chimeneas de fábricas, monumentos y tanques elevados, algunas ramas de árboles se quiebran, cambio en el flujo o temperatura de pozos, grietas en terreno húmedo y en taludes inclinados.
IX	Pánico general, construcciones de mampostería tipo D totalmente destruidas, daño severo y aún colapso de mampostería tipo C, daño de consideración en mampostería tipo B, daño a fundaciones, daños y colapso de estructuras aporticadas, daños de embalses y depósitos de agua, ruptura de tubería enterrada, grietas significativas visibles en el terreno.
X	La mayoría de las construcciones de mampostería y a base de pórticos destruidos, algunas construcciones de madera de buena calidad dañada, puentes destruidos, daño severo a represas, diques y terraplenes, grandes deslizamientos de tierra, el agua se rebasa en los bordes de ríos, lagos y embalses, rieles de ferrocarril deformados ligeramente.
XI	Los rieles de ferrocarril deformados severamente, ruptura de tuberías enterradas que quedan fuera de servicio
XII	Destrucción total, grandes masas de roca desplazadas, las líneas de visión óptica distorsionadas, objetos lanzados al aire.

Tabla 2. Escala de Intensidad Mercalli Modificada

Intensidad de Arias

Es utilizada para analizar la amenaza de deslizamientos de tierra. Esta describe de mejor forma los daños causados por un sismo que la intensidad de Mercalli o la Aceleración máxima PGA.

Se presenta como la integral de la aceleración al cuadrado a través del tiempo.

$$I_a = \frac{\pi}{2g_0} \int_0^T [a(t)]^2 dt$$

Donde:

I_a = Intensidad de área [m/s]

g = Aceleración de la gravedad de la tierra

$a(t)$ = la aceleración del movimiento como función del tiempo

T = duración total del sismo

Se relacionan entre si la intensidad de área, la magnitud del terremoto y la distancia hasta la fuente de la siguiente forma:

$$\log I_a = M - 2 \log R - 4.1$$

Donde:

M = Magnitud del momento

R = distancia hasta la fuente del terremoto (Km)

El coeficiente de intensidad de Arias permite determinar el desplazamiento de la masa de un talud en el momento de un sismo, conocida como deformación de Newmark.

Aceleración Pico

La aceleración máxima (PGA) horizontal es el valor absoluto de la aceleración horizontal obtenida de un acelerograma tomando la suma de dos componentes ortogonales. Está relacionada con la intensidad del movimiento en un determinado sitio y es el más utilizado para determinar los parámetros necesarios en el análisis sísmico de taludes.

Las aceleraciones verticales tienen un efecto menor sobre los taludes. Generalmente, se asume que la aceleración pico vertical es los dos tercios de la aceleración pico horizontal; sin embargo, en sitios muy cercanos al área epicentral, las aceleraciones verticales adquieren valores mayores y en sitios muy alejados valores mucho menores. Usualmente se utiliza el parámetro PGA para la evaluación sísmica de taludes. Sin embargo, la capacidad de un sismo para activar deslizamientos depende no solamente de la amplitud de la onda, sino también de su contenido de frecuencias, y la duración del sismo.

Magnitud (M)	Duración (s)	Aceleración máxima (%g)
5.0	2	9
5.5	6	15
6.0	12	22
6.5	18	29
7.0	24	37
7.5	30	45
8.0	34	50
8.5	37	50

Tabla 3. Aceleración Máxima y duración de sismos (Housner, 1970)

En el capítulo VI hablaremos de otras propiedades sobre los sismos.

1.2. AMENAZA SISMICA

La amenaza sísmica es la predicción cuantitativa de la intensidad del sismo en un sitio.

Para analizar la amenaza sísmica se identifica y se evalúa las fuentes de sismos y para ello se utilizan las evidencias geológicas, la actividad de las fallas, las evidencias tectónicas y la sismicidad histórica e instrumental.

La teoría de placas tectónicas es la base de los análisis sísmico-geológicos o paleo-sismología. La actividad de las fallas es un elemento muy importante para determinar si una falla representa una amenaza sísmica.

La sismicidad histórica permite confirmar la ocurrencia de sismos en el pasado y estimar la distribución geográfica de intensidad.

La sismicidad instrumental es la herramienta más útil para el análisis de amenaza sísmica.

En un sismo se producen diferentes tipos de ondas, como las ondas de compresión, ondas Rayleigh, ondas love y las ondas de cortante. La velocidad de la onda de cortante es utilizada como parámetro para identificar las propiedades dinámicas de los suelos.

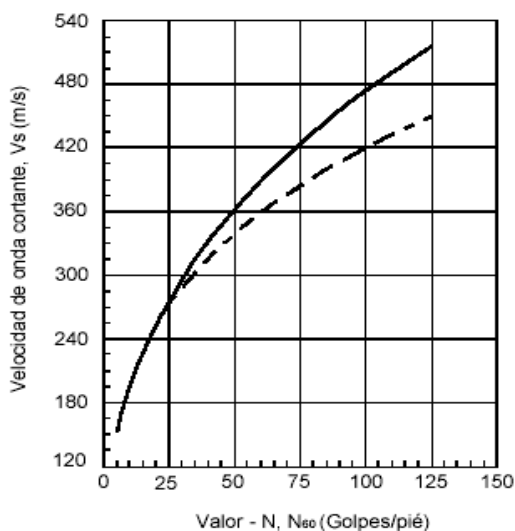


Figura 1. Relación entre la velocidad de onda de cortante y el N de penetración estándar

Esta velocidad puede obtenerse de ensayos de campo o de laboratorio o en forma empírica por correlación con otras propiedades de los suelos.

La amplificación está relacionada con la formación de ondas superficiales las cuales son de mayor amplitud en suelos blandos.

De la misma forma la presencia de niveles freáticos produce una amplificación de la onda sísmica, un aumento de la aceleración y la amplitud de las deformaciones. Seed y Bray (1997) sugieren evaluar el nivel de respuesta de diseño para un sitio determinado en 3 pasos:

1. Se determina la aceleración que ocurriría si el sitio fuera roca competente (sitio A), basándose en la sismicidad regional.
2. Se modifica la aceleración obtenida por un factor de amplificación que depende de las características del sitio
3. se determina el espectro de respuesta para este valor de aceleración. Al producirse la amplificación también se modifica la respuesta.

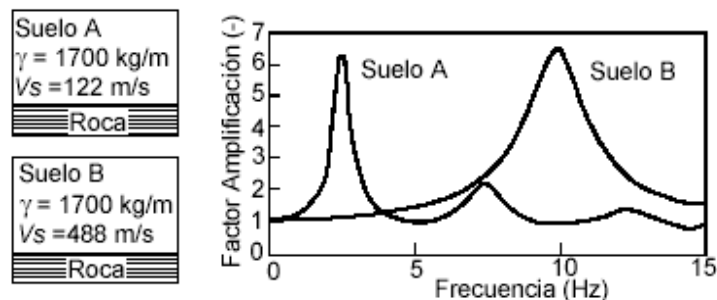


Figura 2. Amplificación de la onda sísmica en dos suelos diferentes (Kramer, 1996)

La onda también se amplifica por efectos topográficos en la superficie del talud, a mayor altura del talud la amplificación es mayor.

Boore (1972), concluyo que el movimiento en el talud consistía en tres fases: una onda directa, una onda reflejada y una onda difractada. El resultado mostró que

había una amplificación importante en la parte alta del talud y que a lo largo de los lados del talud podría ocurrir amplificación y atenuación dependiendo en la geometría del talud y la frecuencia del movimiento. La amplificación tenía un valor hasta del 100% y disminuía con el ángulo del talud y la longitud de onda.

Clase	Condición	Descripción	Características
Ao	Ao	Roca muy dura	Vs>5000 pies/seg
A	A1	Roca competente con muy poco o ningún suelo	2500 pies / seg. < Vs < 5000 pies / seg. Y espesor del suelo + roca meteorizada < 40 pies con Vs > 800 pies / seg.
AB	AB1	Roca blanda fracturada o meteorizada	Vs < 800 pies / seg. 40 pies <H suelo + roca meteorizada < 150 pies
	AB2	Suelo delgado duro sobre roca o roca meteorizada	
B	B1	Suelos principalmente no cohesivos profundos	No hay arcilla blanda H suelo cohesivo < 0.2H suelo no cohesivo
	B2	Suelos duros cohesivos poco profundos o mezclas de suelos no cohesivos con suelos duros cohesivos	Vs > 500 pies /seg. H de suelos \geq 200 pies
C	C1	Suelos duros cohesivos, poco profundos o mezclas de suelos no cohesivos con suelos duros cohesivos y pequeñas capas de arcilla blanda	Igual a B2 excepto 0 pies < H arcilla blanda \geq 10 pies
	C2	Suelos principalmente no cohesivos Muy profundos	Igual a B1 excepto Espesor de suelo > 300 pies
	C3	Suelos cohesivos duros profundos o mezclas de suelos no cohesivos con suelos duros cohesivos sin arcilla blanda	H suelo > 200 pies Vs > 500 pies /seg.
	C4	Suelos cohesivos blandos sometidos a niveles pequeños a moderados de vibración	10 pies < H arcilla blanda < 100 pies Amax.roca <0.25 g
D	D1	Suelos cohesivos blandos sometidos a niveles medios a fuertes de excitación	10 pies <H arcilla blanda <100 pies 0.25 g < Amax.roca < 0.45 g ó 0.25 g < Amax.roca <0.55 g y M < 7.25
E	E1	Suelos blandos cohesivos muy Profundos	H arcilla blanda > 100 pies
	E2	Suelos blandos cohesivos y excitaciones muy fuertes	H arcilla blanda > 10 pies y/o Amax.roca > 0.55 g o Amax.roca > 0.45 g y M > 7.25
	E3	Arcillas de muy alta plasticidad	H arcilla > 30 pies con IP > 75% y Vs < 800 pies / seg.
	F1	Suelos altamente orgánicos o turbas	H > 20 pies

Tabla 4. Sistema de clasificación de sitio para sismos Seed y Bray (1997)

La mayor amplificación ocurre en la cresta del talud cuando la frecuencia del sismo está cercana a la frecuencia natural de la topografía.

Fragilidad sísmica

Algunos materiales relativamente duros tienden a desmoronarse o agrietarse en un evento sísmico, debido generalmente a la fragilidad del sistema de discontinuidades.

Una situación similar ocurre en materiales cementados muy porosos donde la presencia de grandes poros facilita la deformación interna por acción de los esfuerzos sísmicos y se produce la falla de la cementación interna de las partículas. Estudios dinámicos realizados por Ashford y Sitar (1994) muestran que la fragilidad genera una disminución de la cohesión, representada por una reducción entre el 85 y el 90% de la resistencia a la compresión simple en el caso de carga cíclica.

Un caso muy común de falla en eventos sísmicos corresponde a los taludes de fuerte pendiente en suelos granulares no muy bien cementados.

Los rellenos son materiales muy susceptibles a sufrir daño en el caso de sismos, algunos de los rellenos más susceptibles son los rellenos de suelos residuales compactados, tales como el granito meteorizado

1.2.1. Amenaza Sísmica en Bucaramanga

El Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), según el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS et al, 1996), se ubica en una zona considerada de amenaza sísmica alta, actividad que se ha ratificado con los registros instrumentales de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) y la Red Nacional de Acelerógrafos (RNA) adscritas al INGEOMINAS.

Las fallas que más directamente están relacionadas con el Área Metropolitana y que mayor influencia sísmica podrían tener son el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta y la falla Suárez.

corresponder a un drenaje desplazado. A partir de la calidad buena a regular de los indicios, la falla se clasifica como potencialmente activa.

Falla de Suarez: Presenta una franja de 30 Km distribuidos a lado y lado de su traza principal, con aproximadamente 50 Km analizados equivalentes a un 28% de su extensión total de 180 km.

Se caracteriza por un marcado contraste topográfico en su lado oeste, resultado de un movimiento principalmente vertical que permite junto con la falla del Carmen, la conformación de la Serranía de los Cobardes; unido a este rasgo geomorfológico se destacan también el control del río Suárez, la disposición de un gran número de silletas, notorios escarpes, cambios bruscos de pendiente y un plano de falla que sirve de contacto entre unidades litológicas de edades jurásicas y cretáceas correspondiente a una amplia franja dispuesta en la parte central del departamento de Santander.

1.2.1.1. Sismicidad Instrumental

De la sismicidad registrada y localizada por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), por lo menos el 70% equivale a sismicidad localizada entre 120 y 180 Km, de la cual un 65% representa la ocurrida en la región de los Santanderes, sobre la parte nororiental del país, entre las latitudes de 5° y 8° de latitud norte, los hipocentros permiten o definen un plano con disposición NE y buzamiento de aproximadamente 50° al SE.

Esta observación sugiere que esta sismicidad está asociada a la geodinámica de la Paleoplaca del Caribe y que el punto de inflexión correspondería al denominado Nido de Bucaramanga.

Con los datos de la RSNC se tuvo un umbral mínimo de detección para la red de 2.3 ML y una magnitud máxima esperada de 6.7 ML, resaltando que esta es una fuente profunda de ocurrencia de sismos.

Durante el periodo de operación de la RSNC, se han presentado sismos importantes en esta región, con magnitud mayor o igual a 6.0 en la escala de Richter, para sismos con magnitud mayor a 3.0 se han localizado cerca de 8500 sismos desde 1993 hasta la fecha; lo cual corresponde a un porcentaje aproximado del 95% para los sismos con profundidades mayores a 110 Km.

La sismicidad superficial en la zona, es posible asociarla con las estructuras mayores presentes en el área, sobretodo del Sistema de Fallas Soapaga – Suárez, ubicadas al occidente del área metropolitana y los cuales han sido catalogados como estructuras activas y generadoras de este tipo de sismicidad superficial (0 a 35 Km) o de deformación cortical.

1.2.1.2. Amenaza Sísmica Regional

Colombia cuenta con el “Estudio General de Amenaza Sísmica” (1996), el cual presenta una zonificación de acuerdo con los valores de aceleración máxima horizontal a nivel de roca, definidos para todos los municipios del país. Este estudio, realizado por AIS, INGEOMINAS y Uniandes, es la base fundamental de las actuales Normas de Construcción Sismo Resistentes que rigen a nivel nacional (NSR98 - Ley 400 de 1997 - Decreto 33 de 1998), realizadas por la AIS.

El Mapa Nacional de Amenaza Sísmica se obtiene a partir de la zonificación por rangos de valor de aceleración, agrupándolas en zonas de amenaza sísmica baja, intermedia y alta (ver Figura 4).

Es importante anotar que la mayor parte del Departamento de Santander se localiza en zona de amenaza sísmica alta, en la cual se encuentran la ciudad de Bucaramanga y los municipios de Girón, Piedecuesta y Floridablanca, correspondiéndole una aceleración máxima horizontal (en roca) de 0.25g.



Figura 4. Mapa Nacional de Amenaza Sísmica (AIS et. al., 1996).

1.2.2. Señales de Diseño compatibles con Escenarios de Amenaza Sísmica

Para seleccionar acelerógramas apropiados para diseño es necesario definir escenarios sísmicos sobre la base del análisis de amenaza sísmica. Según el estudio de Zonificación Sismogeotécnica Indicativa (INGEOMINAS, 2001), la amenaza sísmica es determinada de acuerdo con AIS300. No resulta recomendable simplemente asumir el sismo de magnitud máxima asociado a cada zona o falla sismogénicas y asignarle la mínima distancia posible dentro de la

fuelle al sitio de estudio, ya que esto representaría un caso especial sin duda muy conservativo. Los escenarios sísmicos deben ser consistentes con las fuentes sísmicas que han sido definidas para el estudio de amenaza y de acuerdo con los parámetros de diseño del movimiento del terreno.

En dicho estudio se siguió la metodología de selección de registros de movimiento fuerte compatibles con la amenaza propuesta originalmente por McGuire (1978), y atendiendo las modificaciones del estudio reciente de Bommer *et al.* (2000).

El objetivo es encontrar escenarios sísmicos compatibles con la amenaza, que correspondan a eventos que puedan ocurrir dentro de las zonas sísmicas propuestas para el área de estudio. Por esta razón se consideró la amenaza asociada a cada fuente individual para diferentes parámetros de movimiento fuerte; como aceleración (A_m) y velocidad (V_m) máximas del terreno, duración de movimiento fuerte (D_u), intensidad de Arias (I_A) y aceleración espectral para diferentes periodos ($A_s[T]$). Se usaron las ecuaciones de atenuación que están adelante.

Se realizaron análisis de amenaza sísmica para determinar la contribución individual de cada una de las fuentes sismogénicas y así identificar cuales son los escenarios que dominan la amenaza sísmica regional alrededor de Bucaramanga. En todos los casos el nivel de amenaza corresponde a una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, es decir, un periodo de retorno de 475 años. La tabla 5 presenta el valor de aceleración máxima del terreno obtenida para los análisis de amenaza para fuentes individuales, que se encuentren dentro de un radio de 200 km de la zona de estudio. Se puede observar que la amenaza esta controlada por la posible ocurrencia de un sismo a lo largo de las Fallas Bucaramanga-Santa Marta, Suárez, Salinas y la Frontal de los Llanos Orientales. Sin embargo, el mencionado estudio sintetizó los escenarios sísmicos en 2 posibles: Falla Bucaramanga y Frontal de los Llanos Orientales, considerando que los posibles efectos generados por un sismo en las fallas Suárez y Salinas estarían cubiertos por dichos escenarios escogidos.

Fuente Sísmica	Am (g)
Todas las fuentes (200 km)	0.247
Frontal de los Llanos Orientales	0.214
Bucaramanga – Santa Marta	0.166
Salinas	0.118
Suárez	0.106
Benioff Profunda	0.078
Uribante Caparo	0.044
Boconó	0.025
Cimitarra	0.024
Palestina	0.023
Puerto Rondón	0.018

Tabla 5. Amenaza sísmica del Área Metropolitana de Bucaramanga considerando fuentes sismogénicas individuales (INGEOMINAS, 2001).

Una vez identificado los escenarios sísmicos que controlan la actividad del sitio en cuestión se calcula la amenaza sísmica correspondiente a diferentes parámetros de movimiento fuerte. Las tablas 6 y 7 presentan los resultados para amenaza proveniente de las fallas Bucaramanga - Santa Marta y frontal de los Llanos, respectivamente.

Parámetro de Movimiento Fuerte	Unidad	Amenaza
Am	g	0.166
Vm	cm/s	8.56
As(T=0.1s)	g	0.282
As(T=0.5s)	g	0.192
As(T=1.0s)	g	0.078
As(T=2.0s)	g	0.026
IA	m/s	0.0116
Du	s	6.09

Tabla 6. Amenaza Sísmica por escenario falla de Bucaramanga – Santa Marta para varios parámetros de movimiento fuerte (INGEOMINAS, 2001).

Parámetro de Movimiento Fuerte	Unidad	Amenaza
Am	g	0.214
Vm	cm/s	10.63
As(T=0.1s)	g	0.228
As(T=0.5s)	g	0.331
As(T=1.0s)	g	0.186
As(T=2.0s)	g	0.081
IA	m/s	0.0215
Du	s	12.88

Tabla 7. Amenaza Sísmica por escenario falla Frontal para varios parámetros de movimiento fuerte (INGEOMINAS, 2001).

Los valores de amenaza de cada parámetro son luego usados para invertir las curvas de atenuación usadas para encontrar pares $M-d$ compatibles con el nivel de amenaza, para un valor determinado de P . Estas inversiones se muestran en las Figuras 4 y 5, para las dos fuentes escogidas, junto con los límites físicos de las fuentes sísmicas, en términos de distancia y magnitud máxima. El punto de menor dispersión en términos de magnitud corresponde al escenario sísmico más probable.

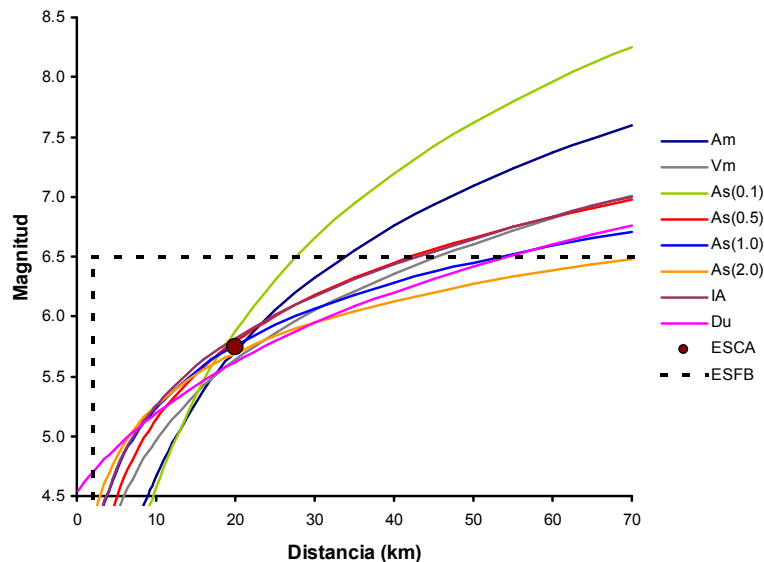


Figura 4. Combinaciones $M-d$ para la sismicidad asociada a la Falla Bucaramanga –Santa Marta, $P=0.9$ (INGEOMINAS, 2001).

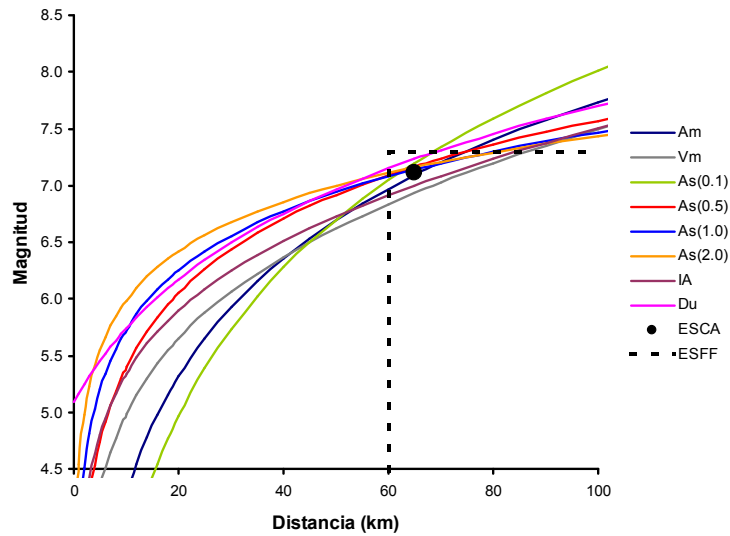


Figura 5. Combinaciones M-d para la sismicidad asociada a la Falla Frontal, $P=1.3$ (INGEOMINAS, 2001).

De estas figuras se pudo observar que el escenario sísmico compatible para la falla de Bucaramanga – Santa Marta sería un evento con magnitudes entre 5.6-6.0 y distancia de la fuente al sitio entre 13-25 km. De igual manera para la falla Frontal de los Llanos Orientales se pudo determinar, con mayor grado de dispersión, que eventos con magnitudes entre 6.9-7.3 y distancias al sitio de 60-80 km son compatibles con el nivel de amenaza.

Una vez escogidos los escenarios sísmicos compatibles con las fuentes que afectan la región, se procede a buscar acelerógramas en una base de datos de registros reales obtenidos en roca, para lo cual se usaron los bancos de acelerógramas reportados en Martínez-Pereira (1999) y Ambraseys et al. (2000).

Los acelerógramas compatibles con la Falla de Bucaramanga (Tabla 8 y Figura 6) son escalados a una aceleración de 0.16g y de igual forma los acelerógramas que simulan un evento de la Falla Frontal de los Llanos Orientales (Tabla 9 y Figura 7) son escalados a 0.21g, que son valores consistentes con los valores de amenaza mostrados en las Tablas 6 y 7 respectivamente.

Fecha	Hora	Nombre Sismo	Ms	Mw	MI	mb	h	Mec	Estación	g	De Km	Df km	Am G	Vm cm/s	Du s	IA m/s	As(0.1) G	As(0.5) g	As(1.0) g	As(2.0) g
935/10/31	18:37:49	Helena	6.0				16	N	Carr. Coll.	Rk	8	15	0.142	6.8	1.8	0.075	0.42	0.37	0.29	0.07
1976/09/15	15:09:19	Friuli	6.0	6.0	6.1	5.4	12	T	Robic	Rk	39	13	0.086	2.7	0.2	0.043	0.49	0.14	0.04	0.01
1980/05/27	14:50:57	Mam. Lak. (As)	6.0	6.0	6.2	5.7	14	S	Long Val.D.	Rk	14	3	0.178	18.4	3.7	0.205	0.38	0.53	0.15	0.04
1983/07/22	02:39:54	Coalinga As)	5.8	4.4	6.0	6.0	7	T	Oil Fie.	Rk	13	9	0.188	14.0	8.3	0.227	0.65	0.29	0.38	0.06
1987/10/01	14:42:20	Whittier Nairr.	6.0	6.0	5.9	5.7	9	T	Wilson	Rk	18	1	0.164	4.6	6.0	0.248	0.49	0.08	0.05	0.01
1997/09/26	09:40:30	Umbria-Marche	5.9	6.0	5.8	5.7	6	N	Nocera Umbra	Rk	13	4	0.79	21.2	7.5	0.31	0.26	0.17	0.03	0.01

Tabla 8. Acelerogramas de diseño compatibles con el escenario sísmico de la Falla Bucaramanga – Santa Marta. Aceleraciones espectrales obtenidas con acelerogramas escalados a 0.16g (INGEOMINAS, 2001)

Fecha	Hora	Nombre Sismo	Ms	Mw	MI	mb	h	Mec	Estación	g	De Km	Df km	Am G	Vm cm/s	Du s	IA M/s	As(0.1) G	As(0.5) g	As(1.0) g	As(2.0) g
1979/04/15	06:19:41	Montenegro	7.0			6.1	12	T	Herceg Nov.	Rk	65	30	0.218	15.05	10.7	0.709	0.32	0.41	0.12	0.03
1989/10/18	00:04:02	Loma Prieta	7.1	6.9	7.1	6.2	11	ST	Gilroy 1	Rk	60	15	0.452	35.2	9.7	1.644	0.33	0.40	0.10	0.04
1992/04/25	18:06:04	C. Mendocino	7.1	7.1			15	T	Butler Val. 2	Rk	60		0.152	13.2	8.3	0.352	0.16	0.45	0.26	0.09
1999/11/12	16:57:20	Duzee	7.3	7.1		6.5	14	ST	Mud.-Kaym. Bin.	Rk	60	34	0.12	15.1	14.2	0.73	0.19	0.16	0.06	0.05

Tabla 9. Acelerogramas de diseño compatibles con el escenario sísmico de la Falla Frontal. Aceleraciones espectrales obtenidas con acelerogramas escalados a 0.21g (INGEOMINAS, 2001)

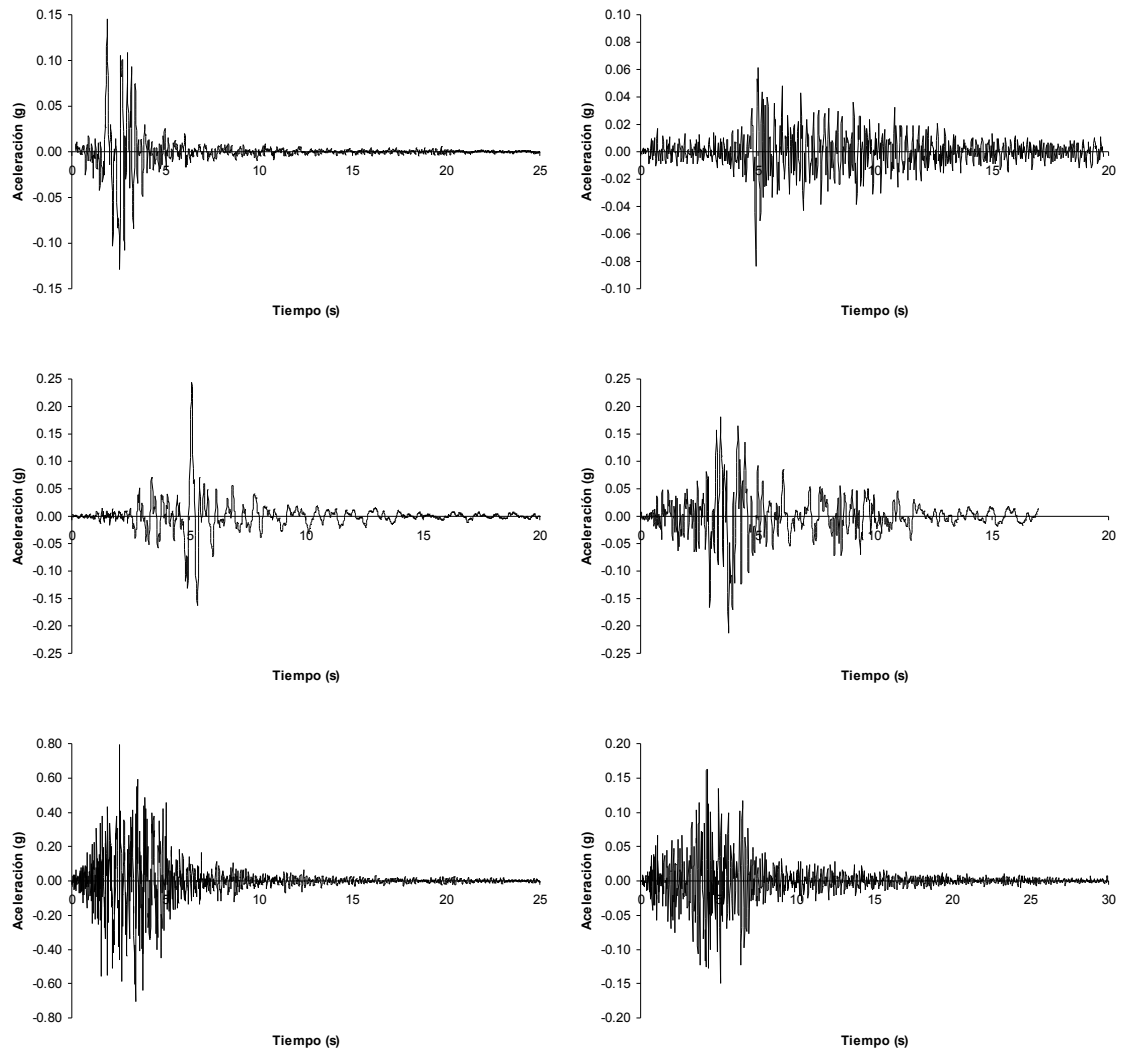


Figura 6. Acelerógramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga – Santa Marta. De izquierda a derecha y de arriba abajo se presentan los acelerógramas de Helena, Friuli, Mammoth, Coalinga, Whittier y Umbria (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

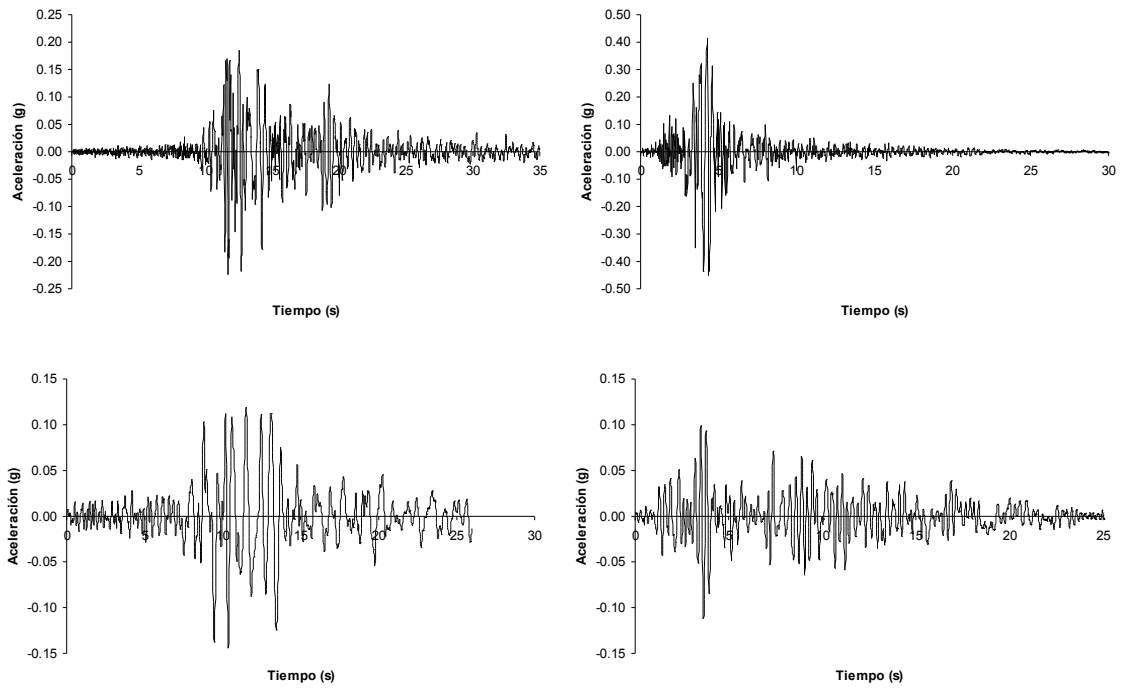


Figura 7. Acelerógramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Frontal. De izquierda a derecha y de arriba abajo se presentan los acelerógramas de Montenegro, Loma Prieta, Pretolia y Dulze (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

Cabe anotar que el escalamiento de los acelerógramas en amplitud resulta adecuado bajo estas circunstancias, comoquiera que los registros son compatibles con el contenido frecuencial, duración y energía de eventos producidos por estas fallas.

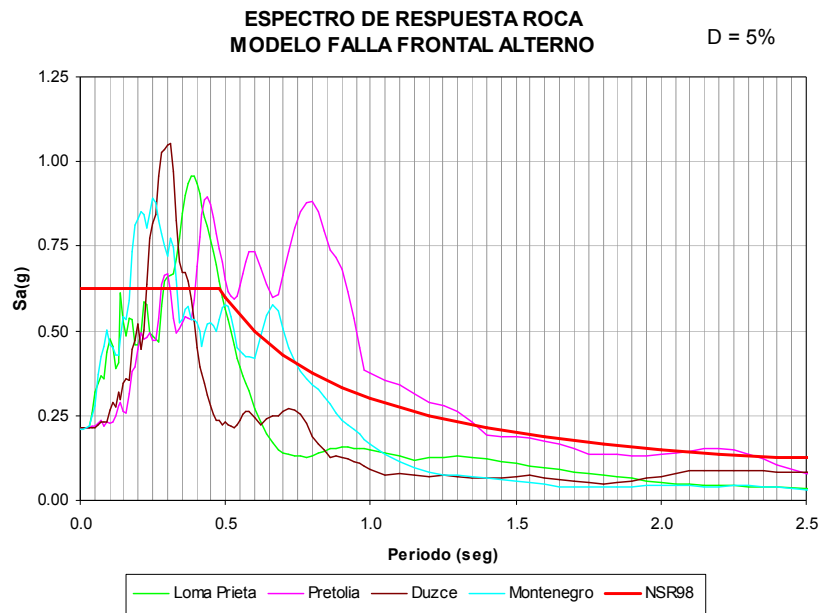


Figura 8. Espectros de acelerógramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga – Santa Marta (INGEOMINAS, 2001).

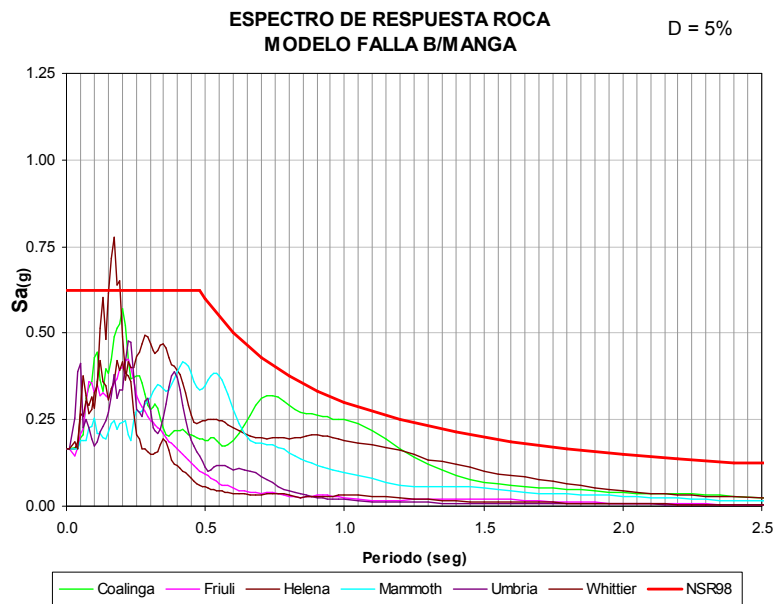


Figura 9. Espectros de acelerógramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Frontal (INGEOMINAS, 2001).

1.2.3. RESPUESTA SISMICA LOCAL

De acuerdo con los escenarios sísmicos regionales posibles y la estimación de la respuesta sísmica local del subsuelo realizados para la Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del AMB (INGEOMINAS, 2001), se definieron seis (6) zonas dentro del área de estudio de acuerdo con la aceleración máxima del terreno (PGA) a nivel superficial, así:

Zona 1: Esta zona comprende a los materiales rocosos duros, intermedios y blandos, suelos residuales de poco espesor sobre manto rocoso y suelos muy duros correspondientes al miembro Órganos.

Zona 2: Esta zona corresponde a depósitos de suelo duro correspondientes a los miembros Gravoso, Finos y Limos Rojos, así como a depósitos y terrazas aluviales moderadamente compactas de poco a moderado espesor.

Zona 3: Corresponde a los principales llenos de origen antrópico identificados, conformados principalmente por material de excavación, escombros de construcción y basuras. Es pertinente mencionar que los datos geotécnicos para caracterizar estas zonas fueron muy pobres.

Zona 4: Esta zona comprende a los suelos coluviales y de flujos de escombros antiguos de moderada a alta compacidad y mediano espesor.

Zona 5: Esta zona comprende los suelos coluviales y de flujos de escombros recientes de baja a moderada compacidad y poco espesor.

Zona 6: Corresponde a los depósitos aluviales localizados en las rondas de los ríos, de baja compacidad y poco espesor.

Finalmente la Tabla 10 muestra la correspondencia de dichas zonas con las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) presentes en el área de estudio, para cada una de las cuales se asigna un valor de PGA a nivel superficial. Tales valores constituyen la cobertura de aceleración a utilizar, la cual entra como detonante sísmico dentro del modelo de zonificación de amenaza por movimientos en masa, así como en las modelaciones detalladas de estabilidad de taludes en los sitios más críticos y representativos del área de estudio.

Zona No.	Nombre	UGS	PGA (g)
1	Roca	Rd, Ri, Rb, Sr, Sft3, Sft4, Sfl3	0.30
2	Suelo Rígido	Sal, Sat, Sft2, Sfl1, Sfl2	0.40
3	Llenos	Sla	0.65
4	Depósitos Antiguos	Sfe1, Sco2	0.45
5	Depósitos Recientes	Sfe2, Sco1	0.50
6	Ronda de Río	Sft1, Sft5	0.35

Tabla 10. Valores de PGA(g) a nivel superficial para las Unidades Geológicas Superficiales (UGS).

Para el análisis de estabilidad que se presenta a continuación se utilizó como señal de diseño la correspondiente al sismo de Montenegro (Yugoeslavia), el cual representa un escenario de la falla Frontal (el acelerograma de entrada fue escalado a 0.21g). En la figura 10. se ilustra el acelerograma de Montenegro.

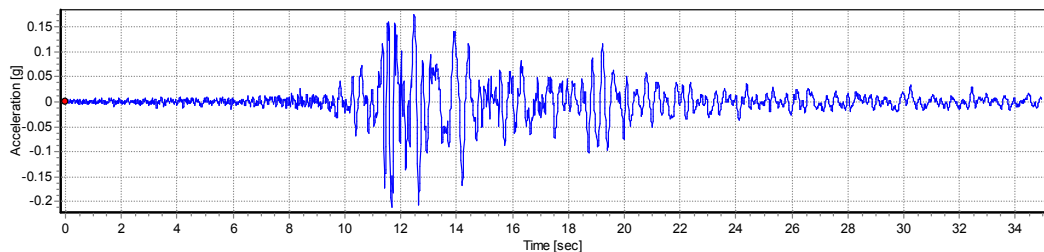


Figura 10. Acelerograma Falla Frontal (sismo de Montenegro-Yugoeslavia).

2. CALCULO DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD POR EL METODO SEUDOESTATICO.

Los sismos pueden activar deslizamientos de tierra al aumentar el efecto cortante, disminuir la resistencia por aumento de la presión de poros y por deformaciones asociadas con la onda sísmica; pudiéndose llegar a la falla al cortante y hasta la licuación en el caso de suelos granulares saturados.

Los factores que deben tenerse en cuenta para los análisis de taludes expuestos a eventos sísmicos son los siguientes:

1. El valor de las fuerzas sísmicas aplicadas sobre las masas de suelo potencialmente deslizables.
2. La disminución de la resistencia debida a las cargas vibratorias, las cuales inducen deformaciones cíclicas, esta resistencia puede disminuirse en más del 50% en suelos sensitivos y en la mayoría de los casos, la disminución de resistencia puede llegar a un 20% durante el sismo (Makdisi y Seed, 1978).
3. El aumento de presión de poros especialmente en suelos limosos y arenas finas, en los cuales se puede producir una disminución de resistencia tal que produzca el fenómeno de licuación
4. El aumento de fuerza sísmica generado por la amplificación en los mantos de suelos blandos.
5. La posibilidad de ocurrencia de fenómenos de resonancia relacionados con la similitud entre la frecuencia natural de vibración del talud y la del evento sísmico.
6. La magnitud de las deformaciones en la masa de suelo.
7. La licuación. Los mantos de arenas saturadas sueltas son muy vulnerables a licuación durante los sismos. Los rellenos o capas de materiales que se

encuentran sobre estos suelos licuables pueden deslizarse durante los terremotos como ha ocurrido en Chile, en Alaska y en el Japón (Seed, 1970).

Las situaciones adquieren alto grado de criticidad cuando se combinan altas susceptibilidades, debidas a factores topográficos, geológicos, climáticos y sísmicos.

2.1. ANÁLISIS SEUDO-ESTÁTICO DE TALUDES

La fuerza que recibe el suelo del talud durante el sismo es modelada con una fuerza horizontal la cual se aplica sobre todos los elementos analizados del talud y se puede obtener utilizando un coeficiente sísmico (k), multiplicado por el peso del elemento. Este sistema de análisis se le denomina análisis de estabilidad pseudo-estático.

Generalmente el coeficiente sísmico pseudo-estático corresponde a una aceleración horizontal y usualmente no se tienen en cuenta las aceleraciones verticales.

Los coeficientes sísmicos utilizados en la práctica para el análisis pseudo-estático son los siguientes:

Coeficiente sísmico k	Observaciones
0.10	Sismo importante, $FS > 1.0$ (cuerpo de ingenieros, 1982)
0.15	Sismo de gran magnitud, $FS > 1.0$ (cuerpo de ingenieros, 1982)
0.15 a 0.25	Japón $FS > 1.0$
0.05 a 0.15	Estado de California
0.15	(Seed, 1979) con $FS > 1.15$ y un 20% de reducción de resistencia
1/3 a 1/2 de la aceleración pico superficial	(Marcuson y Franklin, 1983) $FS > 1.0$
1/2 de la aceleración pico superficial	(Hynes, Griffin y Franklin, 1984) $FS > 1.0$ y un 20% de reducción de resistencia

Tabla 11. Valores de coeficiente k recomendados en el análisis pseudo-estático (Abramson y otros, 2002).

La resistencia al cortante apropiada para su uso en el análisis pseudo-estático depende de si el análisis es a corto plazo o a largo plazo.

Como los sismos ocurren en períodos cortos es razonable asumir que con excepción de gravas muy gruesas, cantos o guijarros el suelo no drena apreciablemente durante el sismo. Por lo tanto, en la mayoría de los casos deben utilizarse resistencias no drenadas para el análisis pseudo-estático.

Generalmente se recomienda la utilización de los resultados del ensayo triaxial consolidado-no drenado, debido a que generalmente los sismos actúan cuando el talud ya ha alcanzado su equilibrio de consolidación (Duncan y Wright, 2005).

2.2. PROCEDIMIENTOS PARA EL ANÁLISIS SEUDO-ESTÁTICO

El método utiliza el mismo procedimiento general de cualquiera de los métodos de equilibrio límite, con la diferencia de que se incluyen fuerzas pseudo-estáticas horizontales y verticales debidas al evento sísmico. Estas fuerzas sísmicas se asumen que son proporcionales al peso de la masa de deslizamiento potencial y de los coeficientes sísmicos k_h y k_v , expresada en términos de veces la aceleración g producida por el sismo.

En el análisis pseudo-estático se coloca sobre todos los elementos analizados del talud, en su centro de gravedad o arriba de este, una fuerza horizontal correspondiente a un coeficiente k multiplicado por el peso del elemento.

Por ejemplo, para un talud infinito como el indicado en la figura 11, el factor de seguridad que se obtiene está dado por la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{c + (\gamma z \cos^2 \beta - k \gamma z \cos \beta \sin \beta) \tan \phi}{\gamma z \cos \beta \sin \beta + k \gamma z \cos^2 \beta}$$

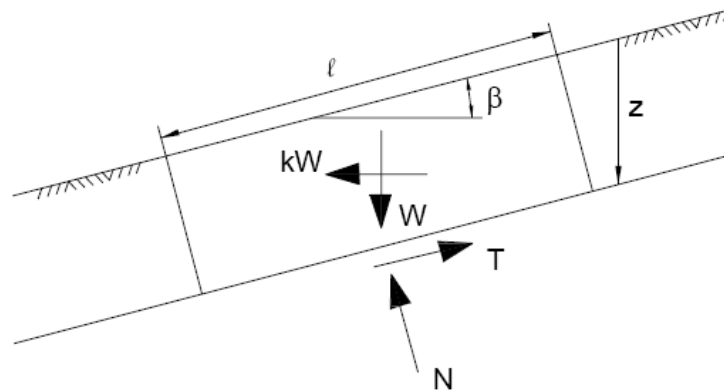


Figura 11. Aplicación de una fuerza pseudo-estática sísmica sobre un elemento de un talud infinito (Cornforth, 2005).

Generalmente, se recomienda analizar con carga sísmica pseudo-estática solamente la superficie más crítica identificada en el análisis estático. La mayoría de los análisis solamente tienen en cuenta la fuerza sísmica horizontal y k_v se asume igual a cero, la cual no es representativa para deslizamientos en el área epicentral donde k_v es significativa.

La magnitud del coeficiente sísmico debe simular la naturaleza de la fuerza del evento que depende de la intensidad o aceleración del sismo, duración del movimiento y frecuencia. Para un análisis muy conservador se puede asumir que el coeficiente sísmico k_h es igual a la máxima aceleración pico esperada de un evento sísmico en el sitio. Sin embargo, este análisis conservador puede producir dificultades numéricas para k_h mayor que 0.4.

En los suelos que no pierden resistencia significativa durante un sismo, la inestabilidad puede ocurrir debida a la fuerza de inercia generada por el sismo la cual puede modelarse con una fuerza horizontal, utilizando un coeficiente sísmico (k).

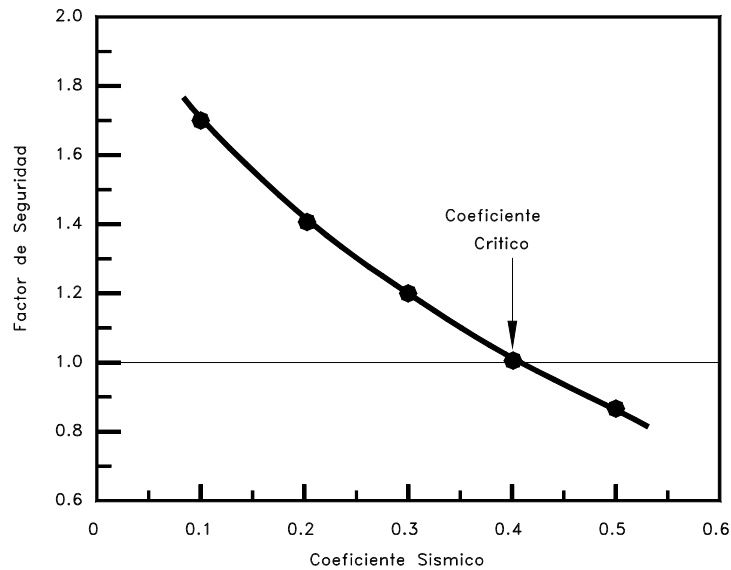


Figura 12. Variación del factor de seguridad con el coeficiente sísmico horizontal K_h .

Un procedimiento es utilizar los coeficientes indicados en la tabla 11; Sin embargo, en ocasiones se realiza el análisis a la inversa haciendo una gráfica de coeficiente sísmico contra factor de seguridad, el cual permite determinar la magnitud de la amenaza para diversas aceleraciones de sismo. En éste se utiliza el método estático de análisis de estabilidad colocando una fuerza sísmica pseudoestática adicional.

La cuantificación de un valor de aceleración máxima para estabilidad de taludes debe tener en cuenta los siguientes criterios empíricos:

- Si la masa considerada para deslizamiento es rígida, la aceleración inducida sobre la masa debe ser igual a la aceleración máxima esperada con sus respectivas amplificaciones por sitio y topografía.
- Si la masa de suelo no es rígida, como es el caso de la mayoría de situaciones y si se tiene en cuenta que la aceleración pico solo se presenta en períodos de

tiempo muy pequeños, no suficientes para producir una falla; se pueden utilizar valores entre 0.1 y 0.2g, dependiendo de la intensidad del sismo esperado.

Marcuson (1981) recomienda utilizar valores entre 1/3 y 1/2 de la aceleración máxima esperada con las respectivas amplificaciones.

La razón para utilizar el valor de K inferior a la aceleración PGA es que las fuerzas sísmicas son de corta duración y cambian de dirección muchas veces en un segundo. Aunque el factor de seguridad puede estar por debajo de 1.0 en un período corto de tiempo mientras la fuerza reversa, estos milisegundos no son suficientes para producir la falla (FHWA, 1997).

Existen varias formas de plantear el problema de acuerdo al tipo de falla analizado y a los parámetros sísmicos utilizados.

2.2.1. Análisis pseudo-estático de un talud infinito

Aunque ningún talud cumple con las suposiciones del talud infinito, la mayoría de los movimientos sub-superficiales tienden a ser de traslación. La idealización del talud infinito no es confiable como herramienta de diseño, pero puede ayudar a identificar las amenazas a un nivel preliminar de reconocimiento.

Para un talud infinito como el indicado en la figura 13 el factor de seguridad que se obtiene está dado por la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{c + \{[(1 + K_v)\cos\beta - K_h\sin\beta]\gamma\} - \{(1 + K_v)\gamma_w m \cos\beta\}z \cos\beta \tan\phi'}{[(1 + K_v)\sin\beta + K_h \cos\beta]\gamma z \cos\beta}$$

Donde:

m = Parámetro del nivel de agua.

Para talud seco m= 0

Para talud saturado m = 1.0

K_h = Coeficiente sísmico horizontal

K_v = Coeficiente sísmico vertical

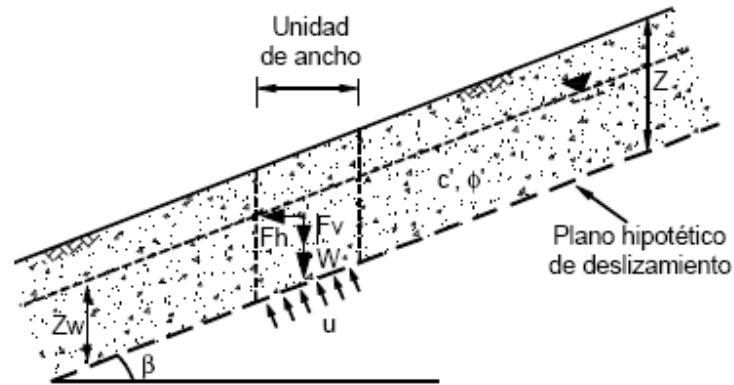


Figura 13. Esquema de la falla de talud infinito con carga sísmica

Para calcular la aceleración máxima que produce una falla en un talud infinito se utiliza solamente un valor de aceleración máxima, sin diferenciar los valores de aceleración horizontal y vertical.

Un procedimiento Seudoestático consiste en determinar la aceleración máxima necesaria para causar un deslizamiento durante un sismo (a_{max}), la cual está dada por la siguiente expresión para el caso de un talud infinito:

$$\frac{a_{max}}{g} = \left[\frac{c_d}{c} \left(F_s - \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \right) + \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} - 1 \right] \div \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \tan \phi \right)$$

Donde:

α = Angulo de inclinación del talud

ϕ = Angulo de fricción

c = Cohesión estática

c_d = Cohesión dinámica

g = Aceleración de la gravedad

$$F_s = \left(\frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \right) + \frac{c}{\gamma H \cos \alpha \sin \alpha} \quad \text{Para el talud seco}$$

$$F_s = \frac{\gamma_b}{\gamma} \times \left(\frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \right) + \frac{c}{\gamma H \cos \alpha \sin \alpha} \quad \text{Para talud saturado}$$

Donde:

H = profundidad de la falla

γ = Peso unitario del suelo

γ_b = Peso unitario sumergido

2.2.2. Análisis para una superficie de falla finita plana y fuerzas sísmicas horizontal y vertical (Kramer 1996).

Las magnitudes de las fuerzas pseudoestáticas son:

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W$$

Donde:

F_h y F_v = Fuerzas pseudoestáticas horizontales y verticales

a_h y a_v = Aceleraciones máximas horizontales y verticales

k_h y k_v = Coeficientes pseudoestáticos

El factor de seguridad para una falla plana de longitud L es igual a:

$$F_s = \frac{\text{Fuerza resistente}}{\text{fuerza actuante}} = \frac{cl + [(W - F_v) \cos \alpha - F_h \sin \alpha] \tan \phi}{(W - F_v) \sin \alpha + F_h \cos \alpha}$$

Donde:

c = Cohesión

L = Longitud del plano de falla

α = Angulo de inclinación del talud

ϕ = Angulo de fricción

W = Peso de la masa deslizada.

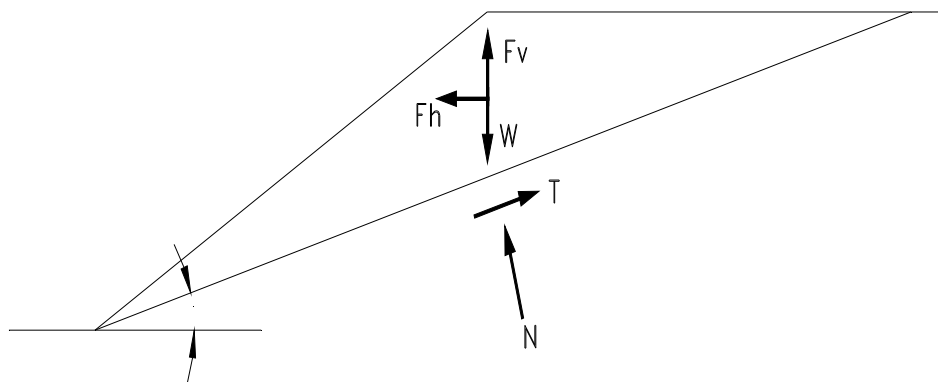


Figura 14. Análisis sísmico Seudoestático para una falla plana.

2.2.3. Análisis para falla curva

El factor de seguridad es calculado para diferentes valores de la aceleración máxima, de acuerdo a una fórmula modificada utilizando el procedimiento original de Janbú (1955), se divide la masa deslizada en dovelas y se realiza las respectivas sumatorias.

$$Fsd = \frac{\sum [wtan\phi + c_d l \cos\alpha] \div [\cos^2 \alpha (1 + tan\alpha \times tan\phi \div F_d)]}{\sum \left[wtan\alpha + \frac{a_{max}}{g} w \right]}$$

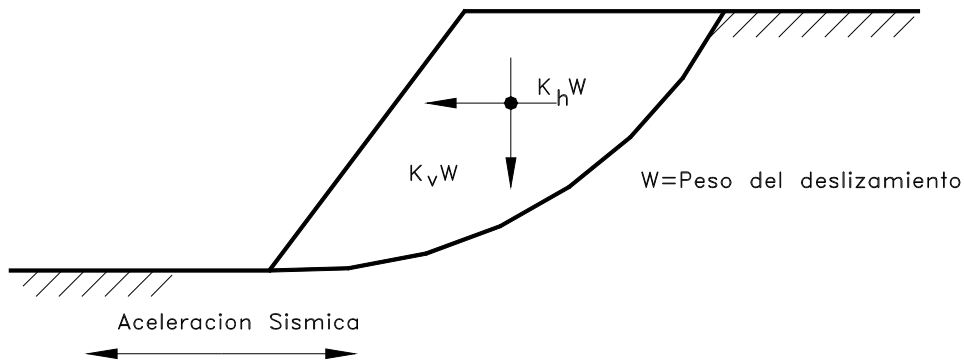


Figura 15. Análisis sísmico Seudoestático de equilibrio límite para una falla curva.

2.3. LIMITACIONES DEL MÉTODO SEUDOESTÁTICO

El método Seudoestático presenta algunas inconsistencias para modelar el efecto real de un sismo sobre un talud. Algunas de estas limitaciones son las siguientes:

- No es confiable en suelos que generan presiones de poros altas
- No tiene en cuenta que algunos suelos presentan degradación de la resistencia hasta en un 15% debido a la onda sísmica.

2.4. ANÁLISIS POST-SISMO

Después de un sismo la estabilidad del talud puede disminuir debido a que los esfuerzos cíclicos han reducido la resistencia al cortante del suelo. Esta reducción en resistencia se maneja de forma diferente dependiendo de si ha ocurrido o no licuación.

La evaluación de la estabilidad después de un sismo se analiza en tres etapas así:

1. Determinar si ocurre licuación. La resistencia cíclica del suelo se compara con el esfuerzo sísmico (CSR) para determinar si ocurre licuación.
2. Estimar la reducción en la resistencia no drenada. Si el suelo se licua los valores de resistencia no drenada se pueden obtener de acuerdo a la correlación de Seed y Harder, (1999).
Sin embargo, si el suelo no se licua se puede estimar un exceso en presión de poros residual como lo muestra Marcuson y otros (1990). Para determinar la pérdida de resistencia se puede realizar un ensayo simulando la carga sísmica antes de realizar el ensayo estático de resistencia.
3. Calcular el factor de seguridad. Una vez determinada la pérdida de resistencia y/o la presión de poros remanente se puede calcular la estabilidad del talud después del sismo. Debe tenerse en cuenta que algunos suelos dilatan al cortarse y la resistencia al cortante puede disminuir con el tiempo después del sismo a medida que el suelo drena.

3. CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR MEDIO DE SLOPE/W.

El objetivo de este análisis es calcular un factor mínimo de seguridad y poder localizar la superficie crítica de falla. Para esto se hace un perfil del talud, que va a representar el problema de la estabilidad.

El programa se presenta en tres pasos; definir el problema, resolverlo y el contorno.

Para abrir el programa se define el análisis en el que se va a trabajar el proyecto.

3.1. PRIMER PASO. DEFINIR EL PROBLEMA.

3.1.1. Preliminares.

Con un estudio previo de la zona, en donde se tendrá en cuenta su localización, topografía, clima, vegetación, drenaje e infiltración, niveles freáticos del talud, y la tectónica y sismicidad de la zona; se busca analizar los factores que afectan el comportamiento del deslizamiento, sus causas y mecanismos; que se determinan mediante la observación de los afloramientos y levantamientos de campo y sondeos de las laderas y taludes, espesores de los mantos, propiedades de los materiales; que permitirán describir el perfil geotécnico típico del lote, donde se especifican profundidades, tipos de suelo, limitaciones geotécnicas y la marcación del nivel freático.

3.1.2. Dibujar el perfil.

1. Se define el área de trabajo que es el espacio necesario para definir el problema, su magnitud puede estar entre el tamaño de una hoja de

2. impresión o puede abarcar varias hojas según la dimensión real del talud; y las unidades en que se va a trabajar pueden ser milímetros o pulgadas.
3. La geometría del problema se puede definir en pies o en metros; la escala del dibujo se elige de acuerdo a la extensión del talud que se este analizando; se ajusta el valor de la escala manualmente o el software aproxima la escala; y según las unidades que se elijan, se asigna el valor del peso específico del agua.
4. Una rejilla de puntos al fondo del área de trabajo se utiliza de ayuda para hacer el dibujo del perfil, esto facilita que los puntos y las líneas sean creadas con coordenadas exactas. El espacio entre estos puntos se puede modificar, dependiendo de la magnitud del talud en el que se este trabajando.
5. Se debe guardar el archivo, esto permite resolver el contorno de las funciones para obtener la definición y solución del problema y los resultados más favorables.
6. Se hace un boceto de los ejes que facilitan el dibujo del problema, así como la visualización e interpretación de los resultados.
7. Una vez lista el área de trabajo se procede a dibujar el perfil. Se elige la apariencia de las líneas, ya sean gruesas o delgadas. Las líneas tienen la opción de ir indicadas con una flecha en uno o en los dos extremos.

3.1.3. Definir parámetros para el Análisis

Ya teniendo el bosquejo del perfil, ahora se define el método del análisis que se va a utilizar.

1. Slope/W realiza un análisis de equilibrio límite ofreciendo varios posibles métodos de análisis de los cuales el Bishop, Ordinary y Janbu siempre se añaden al método que se elija.

Básicamente todos los métodos son similares, la diferencia entre ellos son las ecuaciones estáticas que se incluyen con las fuerzas entre particiones, que se asumen como las fuerzas cortantes y las fuerzas normales.

La figura ilustra un deslizamiento típico de la masa discretizada de las particiones y las posibles fuerzas entre ellas. Las fuerzas normal y cortante actúan en la base y al lado de la partición.

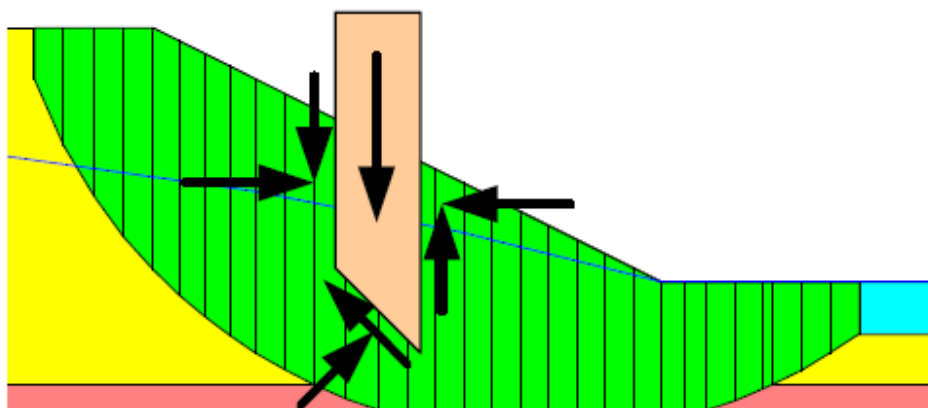


Figura 16. Discretización de una partición y las fuerzas que actúan en ella

Método Ordinario o de Fellenius

Fue de los primeros en desarrollarse; este método ignoraba todas las fuerzas entre particiones y solo satisfacía el momento de equilibrio. Asumiendo esta

simplificación se supuso un factor de seguridad que permitía hacerse por cálculos de mano.

Después Bishop (1955) ideó un método que incluía fuerzas normales entre particiones, pero ignora las fuerzas cortantes. Bishop también simplificó el método satisfaciendo solo el momento de equilibrio. Lo interesante del método es el factor que incluye las fuerzas normales entre particiones, la ecuación del factor de seguridad se vuelve no lineal y requiere un procedimiento iterativo para ser calculado.

El método de Janbu simplificado se asemeja al método de Bishop simplificado en que incluyen las fuerzas normales e ignoran las fuerzas cortantes entre particiones, pero la diferencia es que el método de Janbu satisface solo fuerzas horizontales de equilibrio como opuestas al momento de equilibrio.

Al seleccionar el cuarto método de análisis se debe especificar sus funciones. Si selecciona el método de Morgenstern-Price o GLE, se debe especificar una función de la ladera; para el método de Sarma se especifica la cohesión y el valor de ϕ entre las particiones; para el método de elementos finitos, se especifican datos del elemento y del tiempo con que se obtiene la información de la tensión.

Método de Morgenstern-Price

Este método satisface fuerzas y momentos de equilibrio entre particiones. Slope/W usa una solución rápida, para calcular un valor de λ y el resultado es el mismo factor de seguridad para momentos y fuerzas de equilibrio. Se selecciona un tipo apropiado de fuerzas entre particiones para una función de la ladera en la lista que se despliega. Si se selecciona la función del Acortarseno, trapezoidal o Llano-especificado, oprima encendido en el botón de los valores del F_n para especificar los puntos de referencias laterales de la función.

Si se selecciona este método con una fuerza constante entre particiones, es igual a seleccionar el método de Spencer.

Método Spencer

Este método satisface fuerzas y momentos de equilibrio y se limita a una función constante de fuerzas entre las particiones. Calcula el valor de lambda y halla el mismo factor de seguridad para el momento y la fuerza de equilibrio.

Los métodos de Morgenstern-Price y Spencer, con ayuda de computadoras hicieron posible los procedimientos iterativos en el método del límite de equilibrio y esto permite involucrar fórmulas matemáticas más rigurosas que incluyen todas las fuerzas entre particiones y satisfacen también las ecuaciones estáticas.

Método General de equilibrio límite (GLE)

El método GLE se asemeja al método de Morgenstern-Price, a excepción que este puede ser usado para calcular el momento y los factores de seguridad para un rango definido por los valores de lambda. Este método satisface las fuerzas y los momentos de equilibrio y usa una función de fuerzas entre particiones. Para cada valor de lambda $Slope/W$ calcula un factor de seguridad para momentos y fuerzas de equilibrio. Un dibujo del factor de seguridad vs. Lambda puede ser creado en el contorno. El programa encuentra el punto de intersección de dos líneas para determinar la convergencia del factor de seguridad y del valor de lambda. En los casos que no se encuentre punto de convergencia, el método GLE es considerado inconvergente.

Se selecciona un tipo apropiado de fuerzas entre particiones para una función de la ladera en la lista que se despliega. Si usted seleccionó la función del Acortar-seno, trapezoidal o Llano-especificado, oprima encendido en el

botón de los valores del F_n para especificar los puntos de referencias laterales de la función. Oprima encendido en el botón de λ para especificar los valores que se utilizarán con el método de GLE.

Por defecto los valores de λ cubren un rango de valores positivos y negativos. En un problema de izquierda a derecha, el valor de λ del cruce es positivo, mientras que en un problema de derecha a izquierda este valor es negativo. Se puede determinar el rango óptimo de valores de λ primero realizando un análisis usando el método del Morgenstern-Price, que utiliza un cálculo rápido para conseguir el valor correcto de λ . Con este valor se fija un rango apropiado de valores de λ para el método de GLE.

Método Corps of Engineers #1

Este método satisface solo fuerzas de equilibrio. La función de fuerzas especiales entre particiones es calculada por Slope/W. La dirección de la fuerza para cada partición es igual a la superficie media del talud. λ es siempre igual a 1.0

Metodo Corps of Engineers #2

Este método satisface solo fuerzas de equilibrio. La dirección de la fuerza de cada partición es igual a la superficie de la tierra del talud en la cima de cada partición. λ es siempre igual a 1.0

Metodo Lowe-Karafiath

Este método solo satisface la fuerza de equilibrio. La función de fuerzas especiales entre particiones es calculada por Slope/W. La dirección de la fuerza entre particiones es igual a la superficie de tierra media en la cima de la partición y

en la superficie deslizante del talud, en la parte inferior. Lambda es siempre igual a 1.0

Metodo Janbu Generalized

Este método también satisface solo fuerzas de equilibrio. Impone una distribución de velocidades en el deslizamiento potencial de la masa para definir una línea de hundimiento. La dirección de la fuerza entre particiones se asume que actúa a lo largo de la línea de hundimiento y se aplica a 1/3 del punto mas bajo de los dos lados de las particiones. Lambda es siempre igual a 1.0

Método de Sarma (Vertical Slice Only)

Sarma desarrolla un método de análisis de estabilidad para particiones o bloques generales no verticales, pero solo las particiones verticales son asumidas en la implementación de este método.

El método satisface momentos y fuerzas de equilibrio. Sarma adopta una ecuación similar a la de Mohr-coulomb para fuerzas de cortantes relacionadas con las fuerzas normales entre particiones. Este método se relaciona mas con los eventos sísmicos

Se debe definir el valor de cohesión y phi entre particiones para usar este método.

Método de Finite Element Stress

Este método calcula el factor de estabilidad usando tensiones. Las tensiones son usadas, para calcular la tensión normal y la tensión de cortante calculadas para cada partición.

En la siguiente tabla se enlistan los métodos disponibles por Slope/W y se indica las ecuaciones de estática que se satisfacen por cada uno de los métodos.

Método	Momento de equilibrio	Fuerzas de equilibrio
Ordinary o Fellenius	SI	NO
Bishop simplificado	SI	NO
Janbu simplificado	NO	SI
Spencer	SI	SI
Morgenstern-Price	SI	SI
Corps de Engineers – 1	NO	SI
Corps de Engineers - 2	NO	SI
Lowe-Karafiath	NO	SI
Janbu Generalizado	SI (para partición)	SI
Sarma - partición vertical	SI	SI

Tabla 12. Ecuaciones de estática que se satisfacen

Se especifica en la opción que se vaya a usar para el análisis, la presión de poros, si no se va a usar presión de poros, entonces no se tiene en cuenta cuando se calcule el factor de seguridad. Un valor de R_u se especifica para cada tipo de suelo.

Si la opción de presión de poros se selecciona, se especifica la línea piezométrica. Slope/W calcula la presión de poros en la base de la partición como la distancia vertical del centro de la base de la partición a la línea piezométrica multiplicada por el peso de la unidad de agua. Si el R_u o la B -bar también se especifican, la presión de poros total se incluirá en la presión de la línea piezométrica y ejercerá más presión debido al R_u o a la B -barra.

Se puede utilizar más de una línea piezométrica, este caso extremo se daría con una línea piezométrica para cada material.

En el análisis de las herramientas, además de escoger el método de análisis; también contamos con la opción de dar un nombre al proyecto y agregar comentarios.

La dirección del movimiento se da dependiendo de la ubicación del talud ya sea de izquierda a derecha o viceversa.

2. Para escoger la superficie de deslizamiento, primero se analiza una lista de factores de seguridad para cada superficie, por medio de la cual se puede escoger la superficie de deslizamiento que mas convenga, buscando el menor factor de seguridad.

Grilla y radio

Define los centros de rotación y radios del círculo que compone la superficie de deslizamiento. Se representa por los puntos de una grilla los cuales serán un punto central para los círculos que rotaran dentro del perfil. Los radios de las superficies circulares deslizantes se definen por las líneas tangentes a dichos círculos. la rejilla se ubica fuera del perfil y los giros se hacen en un radio hacia adentro.

Bloque

Esta superficie de deslizamiento consiste en varios segmentos de líneas definidas para el punto de intersección de dos grillas. Son creadas por la conexión de cada punto del bloque izquierdo con cada punto del bloque derecho y entonces cada punto se proyecta como una serie de determinados ángulos de proyección. Cada bloque consiste en una rejilla de puntos de intersección usada para generar una pieza lineal de la superficie de deslizamiento.

Plenamente especificado

Son usadas par definir las superficies de deslizamientos como piezas seguras para un segmento lineal. Son superficies de deslizamiento producidas por una serie de líneas de segmentos. Cada una se especifica individualmente para definir los puntos que marca arriba la línea de la superficie de deslizamiento.

Entrar y salir

Una serie de superficies circulares son analizadas cuando entran al perfil de tierra y cuando salen de él. Hay un rango de entrada por la parte izquierda y un rango de salida por la parte derecha

3. Definir las propiedades del suelo

Cada tipo de suelo se enumera, y el modelo fuerte por defecto siempre será Mohr-Coulomb. Se describe el nombre del suelo y se le asigna un color y como parámetros básicos, el peso unitario, la cohesión y el ϕ . En caso de que sean varios tipos, se copia y se da insertar para introducir los valores de otra capa.

4. Dibujar las regiones

Se dibujan las regiones que ya están definidas según su geometría y estratigrafía.

Las regiones se delimitan en el bosquejo del perfil, y se le asignan las propiedades que ya definimos.

5. Presión de Poros y Línea Piezométrica

Las condiciones de presión de poros para los diferentes tipos de suelos se definen por una línea piezométrica. Se especifica las líneas piezométrica que se vaya a aplicar y en cuales tipos de suelo actúa.

Se presentan casos donde se especifica más de una línea piezométrica, esto es cuando a cada tipo de suelo se le asigna una línea piezométrica diferente.

6. Se dibuja la superficie de deslizamiento.

7. Preferencias

La opción preferencias permite mostrar en el dibujo la información que se desea sobre el perfil, cambiando tamaños y fuentes

8. Antes de resolver el problema, se revisa las propiedades del suelo por regiones, y Slope/W verifica que todos los datos hayan sido suministrados correctamente.

3.2. SEGUNDO PASO. RESOLVER EL PROBLEMA.

En esta parte del análisis, el software halla el mínimo factor de seguridad. Automáticamente se carga el SLOPE TUTORIAL.GSZ, en donde se inicia al cálculo; mientras va calculando, se muestran los factores de seguridad y la superficie de deslizamiento que se analizada en el momento, hasta encontrar la más crítica.

Estos resultados son almacenados en un archivo. Cuando se este trabajando en la opción de contorno se puede leer este archivo, que muestra los resultados de los análisis en orden.

3.3. TERCER PASO. CONTORNO DEL PROBLEMA.

Esta función permite ver los resultados del problema y un análisis grafico.

3.3.1. Análisis de las superficies de deslizamiento

Se muestra un resumen de todas las superficies de deslizamiento que se analizaron con su respectivo factor de seguridad. Este resumen arrojará resultados del factor de seguridad por el método escogido y a demás los resultados por los tres métodos que se añaden en el análisis (Ordinary, Bishop y Janbu).

Genera un dibujo del contorno, la superficie de deslizamiento y su respectivo factor de seguridad.

3.3.2. Análisis gráfico de las superficies de deslizamiento

Muestra un diagrama de cuerpo libre con las fuerzas por el método seleccionado; la magnitud de cada vector de fuerza es mostrado junto a la flecha y la dirección de esta representa la dirección del vector. Un polígono de fuerzas muestra la sumatoria de todas las fuerzas actuando en la partición mas critica de las superficies de deslizamiento. El cierre grafico del polígono de fuerzas representa el balance de las fuerzas en cada partición.

Ofrece graficas de las fuerzas mostradas en el diagrama de cuerpo libre, esto con el fin de poder visualizar la distribución de la fuerza a lo largo de la superficie de deslizamiento.

Después de que se haya hecho el análisis de la rigidez para el talud, procedemos a calcular los desplazamientos permanentes si se necesita, utilizando el método de Newmark.

4. PREDICCIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE TIERRAS CAUSADOS POR UN TERREMOTO UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE NEWMARK O BLOQUE DESLIZANTE

Los terremotos causan gran cantidad de daños, sobre todo cuando ocasionan deslizamientos, por esto es muy importante el análisis de riesgo sísmico ya que permite contra restar la amenaza que un sismo representa a las laderas o taludes y el estar preparados para estos eventos.

Hay que recordar que la acción introducida por un terremoto, así sea de magnitud moderada, se produce instantáneamente y es más severa que en el caso de movimientos inducidos por lluvias que son más graduales y con aceleraciones y velocidades menores.

Las deformaciones dependen en buena parte de la magnitud del sismo y de la distancia al epicentro. Es así como terremotos con magnitudes mayores a 4 pueden ocasionar deslizamientos en taludes cerca al epicentro y otros con magnitudes mayores a 6 generan deslizamientos con mayor extensión.

En este análisis se tienen en cuenta las deformaciones inducidas por el evento sísmico. Si las fuerzas de inercia debidas al sismo y a la situación del talud (Estáticas + Dinámicas), superan las fuerzas resistentes disponibles, el factor de seguridad alcanza valores por debajo de 1.0 y la masa de suelo no está más en equilibrio y se produce una aceleración por el desbalance de fuerzas. Esta aceleración corresponde a una deformación a lo largo de la superficie de falla considerada.

4.1. ANALISIS DE NEWMARK

4.1.1. Análisis de Bloque Rígido

Es el método general del análisis de Newmark, se propuso en 1965 como un método para calcular el desplazamiento de presas de tierra y taludes en el momento de un sismo.

Newmark es un análisis que modela el deslizamiento de un talud como un bloque rígido-plástico que se desliza sobre un plano inclinado el cual es sujeto a una onda sinusoidal.

Para calcular las aceleraciones críticas de uso en el análisis de bloque deslizante, se realiza el análisis de equilibrio límite. El coeficiente a utilizar es el que produce un factor de seguridad 1.0 en un análisis seudo-estático.

Cuando las aceleraciones de la onda sísmica exceden el valor de k_y , el bloque se mueve y el resto del tiempo el bloque no se mueve. En esta forma se calcula la deformación acumulada durante todo el sismo.

Así se proporciona un método más útil para predecir aproximadamente los desplazamientos.

Propone la idea de un deslizamiento como la aceleración que necesita un bloque rígido-plástico para vencer la resistencia que ejerce la superficie inclinada sobre el y así iniciar el movimiento.

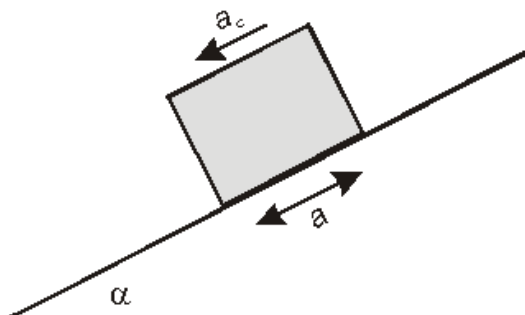


Figura 17. Bloque deslizante para el análisis de desplazamientos en taludes sujetos a la carga sísmica

Este método proporciona más información que el método pseudo-estático y es más práctico que el modelamiento de elementos finitos.

Para aplicar el método de Newmark se requiere conocer la aceleración crítica del deslizamiento, que puede ser determinada por el factor estático de seguridad y también por la geometría del deslizamiento.

Los historiales de aceleración-tiempo de un terremoto se pueden seleccionar para hacer una representación del temblor y de los registros de la aceleración crítica. Este acelerograma se selecciona en tal forma que represente un modelo realístico de los movimientos del terreno esperados en el sitio y luego se compara con la aceleración límite para determinar los desplazamientos permanentes.

El análisis calcula el desplazamiento permanente acumulado del bloque sujeto a los efectos de la aceleración del terremoto con respecto al tiempo; proporcionando una predicción cuantitativa del desplazamiento inercial.

Para aproximar los resultados se usa una simplificación del método estimando los desplazamientos como función de la aceleración crítica y la intensidad del terremoto.

Los desplazamientos permanentes representan el movimiento del centro de gravedad de la masa deslizada. Existen criterios encontrados sobre desplazamiento permanente tolerable, mientras algunos Autores como Wieczorek (1985), Keefer (1989) y Jibson (1993) utilizan límites permitidos entre 5 y 10 centímetros; Hynes-Griffin y Franklin (1984) sugieren que se pueden permitir desplazamientos hasta de 100 (cien) centímetros para una presa de tierra bien construida. Debe tenerse en cuenta que los taludes conformados por materiales dúctiles y plásticos, pueden permitir desplazamientos mucho mayores que los taludes de materiales frágiles y sensitivos.

Para la simplificación del análisis se hicieron variaciones en el método, pero para esto fue necesario hacer suposiciones que en algunos casos pueden limitar los resultados. La principal suposición que se hizo fue la de asumir el bloque perfectamente rígido y perfectamente plástico, una pérdida de resistencia despreciable durante el sismo y la ocurrencia de deformaciones permanentes, solamente si el esfuerzo dinámico supera la resistencia al cortante. Adicionalmente, se supone que el talud solo se deforma hacia abajo.

Esta suposición es razonable para deslizamientos relativamente pequeños en materiales rígidos o frágiles pero puede introducir errores considerables en deslizamientos más grandes con materiales suaves.

Este método no se aplica cuando el suelo se licúa o cuando pierde una parte importante de su resistencia estática por acción del sismo.

Nivel de amenaza	Desplazamiento normalizado de Newmark
Baja (L)	0.00 a 0.02
Moderadamente Baja (ML)	0.02 a 0.05
Moderada (M)	0.05 a 0.10
Moderadamente Alta (MH)	0.10 a 0.20
Alta (H)	0.20 a 0.50
Muy Alta (VH)	0.50 a 1.00

Tabla 13. Magnitud de la amenaza sísmica de acuerdo a la deformación calculada por el método de Newmark (Miles y Keefer, 2001; Yang, 2007)

El método de Newmark ha sido aplicado en varios problemas de estabilidad de taludes en el estado de California, con predicciones acertadas sobre los desplazamientos.

Existen métodos más sofisticados que modelan mejor el deslizamiento dinámico-elástico del material del talud, haciendo estimaciones más precisas de los desplazamientos, pero son complejos al momento de hacer el análisis y los parámetros de entrada son más difíciles de conseguir.

Existen otros dos tipos de análisis que actualmente se usan, el análisis desacoplado y el acoplado.

4.1.2. Análisis Desacoplado

Es un análisis mas sofisticado que muestra el hecho de que el deslizamiento potencial de la masa no es un cuerpo rígido y que este si se deforma internamente cuando está expuesto a un movimiento sísmico. Fue desarrollado por Makdisi y Seed (1978), y estima el efecto de la respuesta dinámica sobre el deslizamiento en dos pasos:

1. Realiza un análisis dinámico del talud sin asumir alguna superficie de falla, se estima la aceleración en cada instante en varios puntos de la ladera y se hace un promedio de las aceleraciones que actúan sobre una superficie de falla potencial.
2. Se usa este promedio como un dato de entrada en el análisis del bloque-rígido y se estima el desplazamiento permanente. Los cálculos de la respuesta dinámica y el deslizamiento plástico se hacen de forma independiente. Así este análisis no toma en cuenta los efectos del movimiento de tierra en el deslizamiento.

4.1.3. Análisis Acoplado

En este análisis la respuesta dinámica del deslizamiento y el desplazamiento permanente son modelados juntos, tanto que los efectos de los movimientos de tierra son tenidos en cuenta en el deslizamiento plástico. Lin y Whitman (1983) hicieron comparaciones entre estos dos análisis (Desacoplado y Acoplado) y concluyeron que el primero introducía errores debido a las suposiciones que hacia y el segundo daba resultados mas exactos.

Para escoger que tipo de análisis utilizar, se tiene en cuenta una relación entre el periodo fundamental del sitio, T_s y el periodo que tiene el terremoto T_m ;

$$T_s/T_m$$

El periodo fundamental del sitio se estima como $T_s = 4h/V_s$

Donde:

h =distancia máxima vertical entre la superficie de tierra y la superficie de deslizamiento usada para estimar la aceleración producida.

V_s =velocidad cortante de los materiales sobre la superficie deslizante

El periodo del terremoto fue definido por Rathje y otros (1998) como el inverso de la frecuente ponderada sobre un rango de frecuencia de 0.25 a 20Hz. Este periodo es estimado para sitios con condiciones rocosas como función de la magnitud del terremoto (M) y la distancia de la fuente (r) en (Km)

$$\ln(T_m) = \ln(0.411 + 0.0837(M - 6) + 0.00208r) \quad \text{para } M \leq 7.25$$

$$\ln(T_m) = \ln(0.516 + 0.00208r) \quad \text{para } 7.25 \leq M \leq 8.0$$

Como regla general, el análisis acoplado da buenos resultados para todas las condiciones pero es el más complejo de utilizar, por esto no se tiene en cuenta.

La tabla 14, proporciona una guía general para seleccionar entre el bloque rígido y el análisis desacoplado en términos de la relación de los periodos.

	T_s/T_m	Bloque -Rígido	Desacoplado
Rígido	0 a 0.2	correcto	Correcto
Deslizamiento fino	0.2 a 1	No es apropiado	Apropiado
blando	1 a 2	Apropiado	Apropiado
Deslizamiento grueso	>2	Muy apropiado	Apropiado o No

Tabla 14. Relación de periodos par seleccionar entre el análisis de Bloque-Rigido y el Desacoplado.

Así el análisis de bloque rígido es apropiado para analizar deslizamientos delgados de materiales duros que tienen una proporción de periodos menores a 0.2. Entre 0.2 y 1 el análisis no da resultados convincentes y por esto es mejor no usarlo. Para periodos ente 1 y 2 da resultados más convincentes, pero el análisis desacoplado da resultados mas cercanos a los del análisis acoplado, que como ya se menciona da resultados más exactos. Para relaciones de periodos mayores que 2, el análisis de bloque rígido podría sobreestimar los deslizamientos.

4.2. COMO SE HACE UN ANALISIS DE NEWMARK

A demás de las suposiciones que ya se mencionaron para utilizar el método de Newmark, las siguientes suposiciones también se usan comúnmente para simplificar, pero no son requeridas en el análisis:

1. La resistencia al cortante estática y dinámica de la tierra se toman como iguales.
2. Se descartan los efectos dinámicos en la presión de poros. Esta suposición generalmente es valida para compactar o sobre consolidar las arcillas y arenas muy densas o secas.
3. La aceleración crítica no depende de la tensión y por esto es constante durante todo el análisis.
4. La resistencia al deslizamiento en la cima del talud se toma infinita tal que ahí no hay desplazamiento.

4.2.1. Primer Paso: Estabilidad del talud

El análisis se inicia con una evaluación estática de la estabilidad del talud en condiciones asísmicas. En la figura 18 se describe un hipotético deslizamiento de

un típico bloque deslizante. Dos fuerzas actúan en el centro de la masa, una fuerza gravitacional L , a la que se opone una fuerza R , que es la resistencia del talud. La máxima resistencia R_{max} , está en función de la resistencia del suelo del talud y puede expresarse como la integral del esfuerzo cortante por el área de la superficie deslizante.

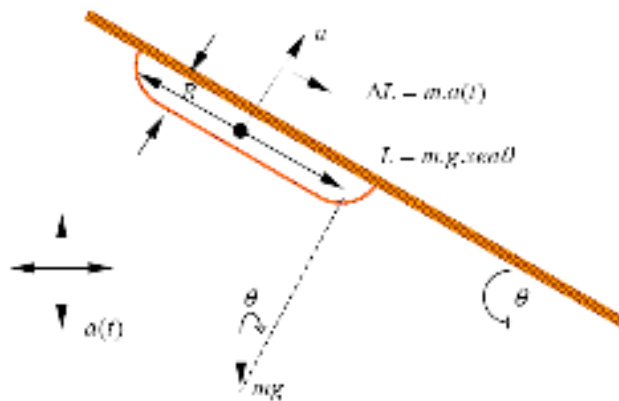


Figura 18. Modelo de un deslizamiento potencial con pendiente constante mostrando la interacción de la carga gravitacional (L), la fuerza resistente (R) y la aceleración sísmica del lugar ($a(t)$).

Factor de Seguridad:

La estabilidad de la ladera está condicionada por la acción simultánea de una serie de factores. Desde el punto de vista físico los deslizamientos se producen como consecuencia de los desequilibrios existentes entre las fuerzas que actúan sobre un volumen de terreno.

En general se puede expresar la estabilidad estática del talud (factor de seguridad, FS) como la relación entre la máxima resistencia del material del talud (R_{max}) y la carga (L).

$$FS = R_{max} / L$$

Si $L < R_{max}$, el talud se encuentra en equilibrio (estable); si $L > R_{max}$, el talud se encuentra fuera de equilibrio (inestable) y el desplazamiento puede ocurrir. Si

$L = R \max$, el talud se encuentra en un estado crítico en el cual un pequeño incremento en L o decremento de R hace que el talud esté sometido a un desplazamiento permanente.

Jibson, (1994), propuso la siguiente formulación para calcularlo:

$$FS = \frac{c'}{\gamma t \sin \theta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \theta} - \frac{m \gamma_w \tan \phi'}{\gamma \tan \theta}$$

Dónde,

ϕ' = el ángulo de fricción efectivo

c' = cohesión efectiva

θ = ángulo del talud

γ = peso unitario del material

γ_w = peso unitario del agua

t = espesor normal a la superficie de falla plana

m = proporción de la superficie de falla plana que esta saturada

En la ecuación el primer término corresponde al componente cohesivo, el segundo al componente friccionante y el tercer término es una reducción del esfuerzo debido a la presión de poros. En las condiciones de calibración del modelo realizada por Jibson (1998), la presión de poros no se incluye porque durante un sismo, el comportamiento de los materiales del talud es no drenado ya que el exceso de presión de poros inducido por la deformación dinámica de la columna de suelo no puede disiparse por la corta duración del movimiento.

Aceleración crítica

Para considerar una condición dinámica (sísmica) en este análisis debe considerarse un paso más. Durante un sismo las ondas pasan a través del talud generando un campo de aceleraciones $a(t)$, que impone una fuerza adicional sobre la masa m del deslizamiento potencial. Durante el tiempo del movimiento se

induce una fuerza cambiante y esporádicamente incrementa la carga hacia abajo del talud. Si esta fuerza sísmica es bastante grande, la carga total hacia abajo sería $L + m.a(t)$ que puede exceder la máxima resistencia y el talud sufrirá un desplazamiento. Se expresa este nivel de movimiento del suelo en términos de una aceleración crítica a_c , que es la aceleración sísmica que multiplicada por la masa es igual a la diferencia entre la máxima resistencia y la carga gravitacional. Introduciendo el factor de seguridad se obtiene la siguiente expresión para el cálculo de la aceleración crítica:

$$a_c = (FS - 1)g \operatorname{sen} \alpha$$

Donde

a_c = aceleración crítica en términos de g, (fuerza de gravedad de la tierra)

FS = factor de seguridad estático

α = el ángulo de inclinación entre la horizontal y el centro del bloque deslizante (también llamado ángulo de empuje)

La aceleración crítica es pues la mínima aceleración del suelo requerida para superar la máxima resistencia del talud deslizante ($FS=1$). Para que se produzca un deslizamiento en una pendiente particular, la aceleración del suelo debe exceder la aceleración crítica a_c , para un intervalo de tiempo finito. De aquí en adelante se usará la aceleración crítica como una medida numérica de la estabilidad del talud y por tanto de la susceptibilidad a que se produzca un deslizamiento inducido por un sismo.

En la figura 19 se ilustra una hipótesis del talud y de la superficie de falla crítica teniendo un factor de seguridad lo mas bajo posible en condiciones no drenadas.

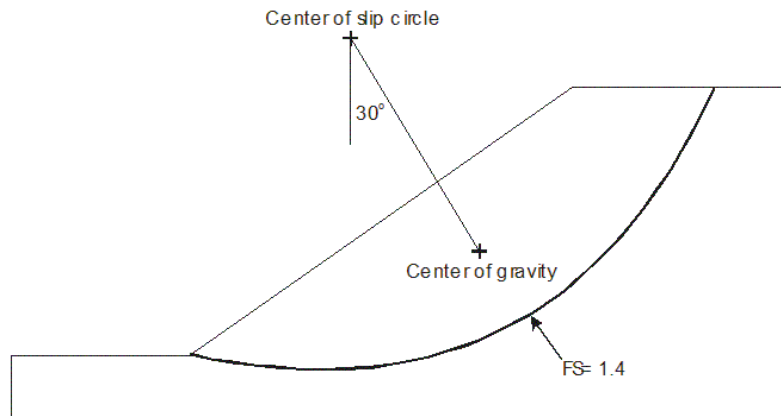


Figura 19. Modelo hipotético del talud: teniendo una superficie cortante en la base, factor de seguridad de 1.4 y un ángulo de empuje de 30°

4.2.2. Segundo paso: Historia de la aceleración-tiempo de un terremoto

Para seleccionar los datos de entrada de un movimiento de tierra se usa una combinación de dos acercamientos mencionados por Newmark: el primero es escalar la historia aceleración-tiempo de terremotos actuales para obtener el nivel de PGA (Franklin y chang, 1977; Makdisi y seed 1978); ofrece un resultado aproximado pero la escala no representa exactamente el movimiento de tierra de terremotos de diversas magnitudes, ya que la magnitud y la distancia de la fuente también afecta la duración y los periodos del temblor; y el segundo usa uno o varios círculos de aceleración artificial, teniendo un sencillo triángulo, rectángulo o una sencilla forma sinusoidal (Lin y Whitman, 1986; Yegian y otros, 1991). Este modo simplifica demasiado una historia de aceleración-tiempo.

Para escoger bien se necesita conocer las características o los requisitos de diseño del temblor en relación con la situación de interés. Entre los criterios esta un nivel específico del temblor, un terremoto modelo con magnitud y localización específicas y la cantidad aceptable del diseño de dislocación terremoto-accionada.

1. Seleccionar una historia de tiempo para un nivel específico del movimiento de la tierra.

Se localiza un muestreo de la historias aceleraciones-tiempo teniendo la medida de intensidad del terremoto cerca al nivel especificado. PGA es comúnmente la medida de intensidad del movimiento de la tierra. Esta medida es solo un punto en la historia aceleración-tiempo y es así mas difícil la medida de intensidad del movimiento; por eso esta medida se hace por áreas y se conoce como intensidad de áreas.

2. Seleccionar una historia de tiempo para especificar la magnitud del terremoto y su localización.

Puede ser un poco más difícil, no es muy común que se cumplan los dos requisitos, sin embargo puede ser necesario estimar características del temblor como del sitio de interés usando relaciones empíricas o teorías publicadas que predicen el PGA, la duración, la intensidad de las áreas en función de la magnitud del terremoto y la distancia de la fuente.

3. Seleccionar una historia de tiempo para especificar el desplazamiento.

Este limita el nivel de daño ocasionado por el nivel del temblor, representado en el desplazamiento del deslizamiento.

Las magnitudes y distancias a la fuente, profundidad, PGA's, intensidad de areas, y duración de estos registros pueden ser examinados para distinguir el rango aproximado de las condiciones que el talud puede soportar.

Igualmente debe determinarse la amplificación debida a la presencia de suelos blandos y al efecto topográfico.

4.2.3. Tercer paso: Calculo del desplazamiento de Newmark

El análisis de Newmark calcula el desplazamiento de un deslizamiento (representado por un bloque rígido) bajo la acción de un movimiento sísmico. El desplazamiento, u , está calculado para dos entradas: La aceleración crítica A_c , que se ha calculado previamente y la historia de aceleración-tiempo de un movimiento fuerte, donde está registrada la aceleración del suelo en función del tiempo $a(t)$. Si la $a(t) < A_c$, el bloque deslizante es estacionario relativo a la pendiente, cuando la amplitud del movimiento supera la aceleración crítica, el bloque se ve afectado por el desplazamiento inducido por la pulsación de toda la fracción que supera la aceleración crítica. Se llama desplazamiento de Newmark (D_n) a la doble integración de la parte del acelerograma que supera el límite de la aceleración crítica. Con este cálculo se cuantifica el exceso de energía acumulada respecto a la condición de equilibrio.

El método mas usado para resolver la doble integral por partes es el de Wilson y Keefer (1983), muestra un registro de un movimiento fuerte teniendo una aceleración hipotética sobrepuesta de $0.2g$ a la izquierda del punto X, (figura 20A); donde las aceleraciones son menores a la a_c y no ha ocurrido desplazamiento. A la derecha de este punto las partes del registro del movimiento de tierra están sobre la aceleración crítica y se integran con respecto al tiempo para obtener el perfil de velocidad del bloque, (figura 20B). La velocidad llega a un punto máximo del movimiento, en el punto Y, después de este punto la aceleración crítica decrece, pero el bloque sigue en movimiento por la inercia. La fricción y el movimiento de la tierra están en dirección contraria causando que el bloque desacelere hasta que se detenga, en el punto Z. Todos los puntos que exceden la aceleración crítica son integrados para proporcionar un perfil de velocidades (figura 20B) que volviéndose a integrar proporciona el perfil de desplazamiento acumulativo del bloque deslizante. (figura 20C).

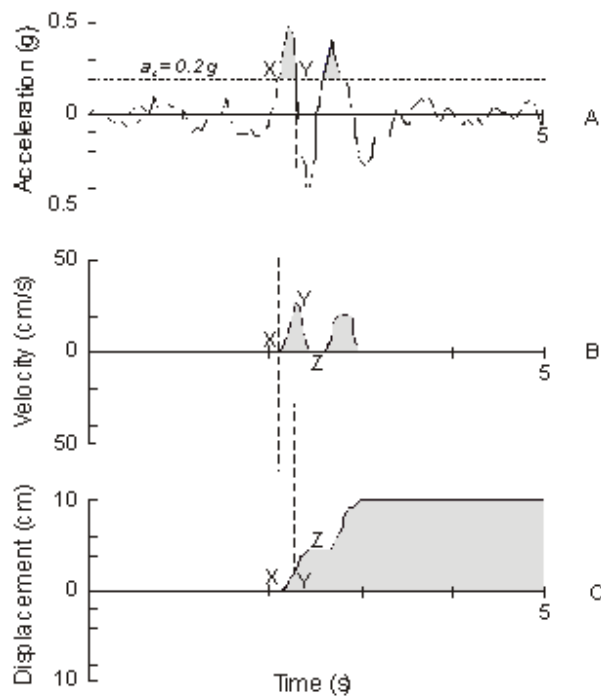


Figura 20. Ilustración del algoritmo de Newmark, adaptado por Wilson y Keefer (1983)

El criterio de rotura o inicio del movimiento se establece con un límite de D_n que puede acumular la masa como máximo hasta salir de la condición de equilibrio en reposo. El valor crítico de desplazamiento puede variar extensamente, dependiendo del mecanismo de falla del talud (caída de roca, hundimiento, deslizamiento de bloque, etc.), la litología, la geometría del talud y la historia previa del movimiento del talud. Para cuantificar este parámetro para aplicación regional, se puede asignar un valor de 10 cm como desplazamiento crítico de deslizamientos coherentes; las caídas de roca y otros desprendimientos, involucran un componente significativo de falla tensional, un mecanismo más quebradizo, por lo cual el desplazamiento crítico es bajo. Así se ha asumido un desplazamiento crítico de 2 cm para deslizamientos por desprendimientos.

Este algoritmo permite a ambas pendientes, de la cima y de la base del talud, usar el ángulo de empuje para describir la resistencia asimétrica. Si el ángulo de

empuje no se obtiene fácilmente el programa se puede simplificar para no utilizar el desplazamiento en la cima del talud. Esta prohibición fue justificada por Newmark porque la a_c en la cima del talud es mucho mayor que en la parte baja del talud y puede ser asumida como una longitud infinita.

4.3. INTERPRETACIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE NEWMARK

El significado del desplazamiento de Newmark se juzga por su efecto probable sobre el deslizamiento potencial. En la mayoría de los suelos los desplazamientos en un rango de 5 a 10 cm, causan agrietamientos y los suelos que no se deforman pueden perder parte de su fuerza máxima a cortante y debilitarse en la cima o en condiciones de fuerza residual. En este caso un análisis de estabilidad para las condiciones de fuerzas residuales se puede hacer para determinar la estabilidad del talud después del temblor.

Cualquier nivel de desplazamiento crítico se puede utilizar de acuerdo a los parámetros del problema en estudio y las características del material del deslizamiento.

Los materiales altamente dúctiles permiten mayores desplazamientos sin generar falla, a diferencia de los materiales frágiles, que fallan en menores desplazamientos.

Predecir los desplazamientos de Newmark no necesariamente corresponde a las medidas directas del movimiento del talud, mas bien proporciona un índice de correlación con la representación del talud.

4.4. DETERMINACIÓN DE UN FACTOR SEUDO-ESTÁTICO PERMANENTE

El valor del coeficiente sísmico pseudo-estático se puede obtener suponiendo una deformación límite y realizando un análisis a la inversa de Newmark.

Con la deformación se calcula el coeficiente f_{eq} y con este se calcula el coeficiente “k”

$$K = F_{equiv} * (PGA_r/g)$$

Donde:

F_{equiv} = Factor equivalente

PGA_r/g = Aceleración pico esperada

r = distancia al área epicentral

M = magnitud del sismo

k = coeficiente para análisis pseudo-estático correspondiente a la deformación de Newmark (0 a 15 cm) de acuerdo al criterio utilizado.

5. PROGRAMA PARA USAR EL METODO DE NEWMARK Y SIMPLIFICAR EL ANALISIS DEL MODELO DEL TALUD DURANTE UN TERREMOTO

El análisis de Newmark también conocido como el bloque deslizante o el análisis de la deformación permanente, es una estimación del comportamiento del talud durante un sismo.

El programa permite una selección entre más de 2100 registros de movimientos fuertes a partir de 29 terremotos, pero también permite que el usuario añada sus propios registros a la colección, y seleccionar un movimiento sobre la base de registros con las propiedades deseadas.

Entonces el análisis se lleva a cabo con estos registros y los resultados son compilados y analizados estadísticamente de forma gráfica y tabular.

El programa se presenta por pestañas que están ubicadas secuencialmente a medida que avanza el análisis.

Las pestañas se representan como:

- Getting Started
- Rigorous Rigid-Block Analysis
- Simplified Analyses
- Record Manager
- Utilities
- Help

5.1. ETTING STARTED (PRIMEROS PASOS)

Contiene el título del programa con una breve reseña de este y sus diversas páginas

5.2. RIGOROUS RIGID-BLOCK ANALYSIS (ANÁLISIS RIGUROSO DEL BLOQUE RÍGIDO)

Contiene tres pasos que se trabajan de forma secuencial para hacer el análisis riguroso del bloque rígido. Se enumeran de la siguiente manera:

5.2.1. Primer Paso: Select Records (Seleccionar registros)

Este espacio permite seleccionar los terremotos de los registros que se tienen disponibles para el análisis. Estos registros se seleccionan de dos maneras; la primera es buscar registros por algunas propiedades específicas y la segunda es ya teniendo el nombre específico del sismo.

5.2.1.1. Search records by properties (buscar registros por propiedades)

Para buscar en la base de registros por sus propiedades, basta simplemente con entrar los valores en cualquiera de los espacios vacíos. Se puede buscar por varias propiedades al mismo tiempo y dar un valor específico o por un rango. Para obtener todos los registros por encima o por debajo de un determinado valor, se utiliza solo un campo. Para buscar un valor único, se pone el mismo valor en los dos campos.

Las propiedades que se tienen en cuenta para esta búsqueda son las siguientes:

- *Moment magnitude (Magnitud de momento)*
- *Arias Intensity (m/s) (Intensidad de área)*
- *Peak Acceleration (g) (Aceleración máxima)*

Mencionadas en el capítulo I de análisis sísmico.

- *Duration (5-95%) (s)*: La duración Dobry es el tiempo requerido para aumentar el 90 por ciento central de la intensidad de Arias. Para usar este método se requiere una estimación de la duración del terremoto, por lo que se propuso una relación empírica:

$$\log D_{(5-95\%)} = 0.432M - 1.83$$

Donde:

$D_{(5-95\%)}$ = Duración Dubry (s)

M= Magnitud del momento

- *Mean period (s) (periodo medio)*: El período medio es una medida de la frecuencia con que se registra un terremoto y es definido por Rathje y otros (1998) como el inverso de la frecuencia ponderada media sobre un rango de frecuencias de 0.25 a 20 Hz.
- *Epicentral distance (Km)*: Es la distancia del epicentro del terremoto al sitio de grabación de un registro de movimiento. El epicentro es el punto sobre la superficie de la Tierra directamente encima del foco de terremoto.
- *Focal distance (Km)*: Es la distancia del foco de terremoto o el hipocentro al sitio de grabación de un registro de movimiento. Es el punto bajo la superficie de la Tierra donde inició ruptura el terremoto. La distancia focal es calculada usando la distancia epicentral y la profundidad focal en el teorema de pitagoras.
- *Rupture distance (Km)*: Es la distancia del sitio de grabación de un registro de movimiento al punto más cercano sobre la superficie de ruptura o falla. Sólo puede ser determinado si una superficie de ruptura ha sido definida sismológicamente. Esta distancia no se relaciona

estrechamente con la distancia epicentral o la distancia focal, pero si con la sacudida fuerte y el daño.

Cuando se añade nuevos registros a la base de datos debe cerciorarse de que el movimiento cumpla con las propiedades mencionadas.

La siguiente figura trae especificadas las propiedades de las que se ha hablado.

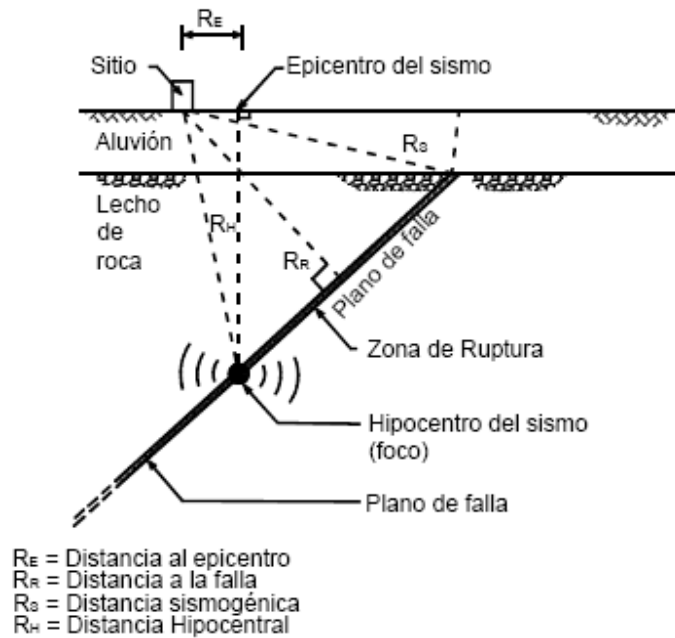


Figura 21. Distancias para el estudio de ingeniería sísmica

5.2.1.2. **Select individual records (Seleccionar registros individualmente)**

Para buscar los registros directamente por su nombre, se selecciona de la lista que se despliega debajo del título terremoto y de la del nombre del registro, este se añadirá inmediatamente a la lista de registros seleccionados.

En esta lista se muestran las propiedades de los registros de movimientos que están seleccionados.

5.2.2. Segundo paso: Perform Rigid-Block Analysis (Realizar análisis del bloque Rígido)

En esta pestaña se especifica alguna información básica necesaria del deslizamiento, para realizar el análisis de bloque rígido, como la aceleración crítica y un valor del registro del movimiento.

La aceleración crítica es el punto donde se inicia el deslizamiento y se especifica en términos de la gravedad.

Hay tres opciones posibles para especificar una aceleración:

1. Si la aceleración constante crítica, es seleccionada como un valor único, la aceleración crítica en el deslizamiento permanecerá constante a lo largo del análisis.
2. Si la aceleración crítica varía con el desplazamiento. El usuario introduce valores de desplazamientos contra aceleración crítica para definir una curva de variabilidad de la aceleración en función del desplazamiento. Los datos para el análisis comienzan con un valor de cero en la casilla del desplazamiento y en la otra casilla el valor de la aceleración crítica inicial. Se sigue añadiendo valores y a su vez añadimos las filas.
3. Si la aceleración crítica varía con el tiempo. El usuario introduce parejas de tiempo contra aceleración crítica para definir otra curva de variabilidad. Cada valor de tiempo debe ser sucesivamente mayor al anterior.

Para trabajar en escala hay dos opciones disponibles:

- No escala en los registros de los terremotos y analiza cada registro sin alterar los valores de las aceleraciones originales.
- Escala todos los registros de los terremotos para hacer una Aceleración máxima uniforme, PGA y esta la compara con la de cada registro calculando un factor de escala. El PGA debe introducirse en el campo de datos.

Ahora se procede a hacer el análisis, el tiempo del proceso depende de la cantidad de registros seleccionados y el tamaño de los valores.

5.2.3. Tercer paso: View Results (Ver Resultados)

En este paso, todos los registros son analizados y los resultados empiezan a ser mostrados en la tabla.

La tabla muestra el nombre del terremoto, el nombre del registro y el desplazamiento de Newmark. Dos desplazamientos de Newmark son mostrados para cada registro analizado: uno que es el de la cima o aceleración positiva y el inferior o de aceleración negativa. El promedio de estos dos desplazamientos son mostrados en la columna Average Disp. Todos los desplazamientos son dados en cm. En la esquina inferior derecha se muestra la media, la mediana y la desviación estándar.

El programa permite hacer un histograma de los desplazamientos de Newmark y un grafico entre la historia de tiempo y los desplazamientos de Newmark.

5.3. SIMPLIFIED ANALYSES (ANÁLISIS SIMPLIFICADOS)

Esta pestaña permite seleccionar entre dos tipos de análisis simplificados: el bloque rígido y el desacoplado.

El análisis simplificado no involucra una integración actual de los registros de los movimientos fuertes, pero requiere un aporte de varios parámetros de

entrada para las ecuaciones empíricas que estiman el desplazamiento del talud.

5.3.1. Rigid-Block Analysis (Análisis del bloque rígido)

Existen dos tipos de análisis del bloque rígido:

5.3.1.1. Ambraseys and Menú (1988)

Para realizar este análisis se requiere el valor de la aceleración crítica y la aceleración en el punto máximo horizontal.

Este análisis hace una estimación del desplazamiento de Newmark como una función de la aceleración crítica y la aceleración en el punto máximo usando la siguiente ecuación:

$$\log D_n = 0.90 + \log \left[\left(1 - \frac{a_c}{a_{\max}} \right)^{2.53} \left(\frac{a_c}{a_{\max}} \right)^{-1.09} \right]$$

Donde:

D_n = desplazamiento de Newmark (cm)

a_c = aceleración crítica (g's), del deslizamiento.

a_{\max} = aceleración en el punto máximo (g's), del sismo.

5.3.1.2. Jibson y otros (1998-2001)

Este análisis también requiere el valor de la aceleración crítica pero relacionada con la intensidad de área.

Estima el desplazamiento de Newmark como función de la intensidad de las áreas que son sacudidas y la aceleración crítica usando la siguiente ecuación de regresión:

$$\log D_n = 1.521 \log I_a - 1.993 \log a_c - 1.546$$

Donde:

D_n = desplazamiento de Newmark (cm)

I_a = Intensidad de área (m/s)

a_c = aceleración crítica (g's)

5.3.1.3. Probability of Failure (Probabilidad de Falla)

Un tercer análisis en esta pestaña permite estimar la probabilidad de la falla como función del desplazamiento de Newmark. Al introducir el valor de la deformación de Newmark calculada en los análisis anteriores, la probabilidad de la falla será mostrada. Este análisis es válido para deslizamientos poco profundos o interrumpidos, caídas en rocas y escombros.

La probabilidad se estima utilizando la siguiente ecuación:

$$P(f) = 0.335 \left(1 - \exp \left(- 0.048 D_n^{1.565} \right) \right)$$

Donde:

P_f = probabilidad de falla

D_n = desplazamiento de Newmark (cm)

Esta ecuación se ajustó usando datos del terremoto de Northridge (1994) y ahora es aplicada en California del sur.

5.3.2. Análisis Desacoplado

Es una modificación del análisis tradicional de Newmark que no requiere la masa potencial deslizante para comportarse como un bloque rígido pero si obtiene una respuesta dinámica elástica.

Requiere los siguientes parámetros de entrada:

- *Aceleración crítica*: obtenida del factor de seguridad que se halló en el análisis de estabilidad.
- *Espesor vertical, $h(m)$* : es el máximo espesor vertical entre la superficie del suelo y la superficie que se desliza, usada para determinar la aceleración crítica a_c .
- *Shear-wave velocity, V_s , (m/s)*: Esta velocidad puede obtenerse de ensayos de campo o de laboratorio o en forma empírica por correlación con otras propiedades de los suelos
- *Earthquake magnitude, M* : Es el modo de la magnitud basado en el riesgo sísmico.
- *Peak bedrock acceleration MHA (g)*: Es la máxima aceleración horizontal sobre la base de la roca, esperada en el sitio, análogamente a la PGA o a_{max} .
- *Earthquake distance, r (Km)*: La distancia desde la fuente del terremoto, basada sobre el riesgo sísmico.

Se computan estos parámetros y obtenemos los siguientes cálculos:

- *Slide period, T_s (s)*: es el periodo fundamental de la masa potencial del deslizamiento, se estima como $4h/V_s$
- *Mean shaking period, $T_m(s)$* : Es el periodo medio en el movimiento de la roca.
- *Period ratio*: Es la relación entre los dos periodos anteriores T_s/T_m

- Duration, $D_{(5-95\%)}(s)$, es la duración estimada del temblor, se define como el tiempo requerido para aumentar el 90% central de la intensidad de áreas.
- *Non-linear Response factor, NRF*: Es un factor que cuenta con la respuesta no lineal de los materiales involucrados en el deslizamiento.
- *Max. Hor. Equiv. Acc. (MHEA), a_{max} (g)*: Es la aceleración máxima horizontal equivalente.
- $\frac{a_c}{a_{max}}$: es una proporción de la aceleración crítica
- *Normalized displacement (cm/s)*: Es una definición por Bray and Rathje (1988) y Blake y otros (2002).

Debajo de estos cálculos se presenta unas estimaciones de los desplazamientos en (cm), y a la derecha dos valores usados para la selección del procedimiento son: la media f_{eq} , un factor relacionado con la sismicidad del sitio, y el coeficiente sísmico.

5.4. RECORD MANAGER (ADMINISTRADOS DE REGISTROS)

Esta pestaña permite leer los datos sobre todos los registros de los terremotos, permite usarlos y adicionarlos para los análisis, a su vez se divide en dos pestañas:

5.4.1. Manage Records (dirección de registros)

Se muestran los registros de todos los terremotos, al seleccionar alguno. Se muestran las propiedades tanto de los registros como de la estación,

describiendo la ubicación de la estación, su dueño, la latitud, longitud y el lugar de la clasificación

5.4.2. Add Records (añadir registros)

Se pueden añadir nuevos registros a la base de datos y usarlos para el análisis.

La tabla de importación contiene varias columnas, unas son datos necesarios y las otras son opcionales.

- *Import:* contiene una casilla que verifica la selección o no de los registros que van a ser importados.
- *File:* Contiene la ruta de acceso y nombre de archivo de cada registro.
- *Earthquake:* Contiene el nombre del terremoto. Al momento de añadir un registro cerciőrese de que este tenga un nombre őrnico y cada vez que ańada algőr registro debe ser guardado con el mismo nombre, para evitar confusiones.
- *Record:* contiene el nombre del registro
- *Dig. Int.:* contiene el intervalo de digitaciőn de los registros ańadidos. Es un tiempo espaciado en segundos entre los valores de aceleraciőn del archivo.

Las columnas que siguen son opcionales:

- Magnitude (magnitud)
- Epicentral distance (distancia epicentral)
- Focal Distance (distancia focal)

- Rupture distance (distancia de ruptura)
- Focal Mechanism (mecanismo focal)
- Location (ubicación)
- Owner (propietario)
- Latitude (latitud)
- Longitude (longitud)
- Site Class (clasificación del sitio)

5.5. UTILITIES (UTILIDADES)

Esta página contiene cuatro opciones diseñados para convertir los registros existentes en formas diferentes.

- Convert cm/s/s a g's
- Convert g's a cm/s/s
- Multiplicar por una constante
- Redigitalizar

6. APLICACIÓN DE LOS DOS METODOS AL DESLIZAMIENTO DEL BARRIO COLORADOS

Antes de aplicar el análisis con Slope/W se hará un breve resumen del deslizamiento ocurrido en el barrio Colorados.

6.1. DESLIZAMIENTO DEL BARRIO COLORADOS

El barrio Colorados se encuentra localizado sobre unas colinas y laderas ubicadas al Norte de la Ciudad de Bucaramanga, aproximadamente en el Km 6 de la vía al mar.

Topográficamente el barrio corresponde a una colina alargada en dirección norte que presenta una ladera con pendiente fuerte hacia el oriente hasta llegar a la quebrada Las Monas, donde ya se habían presentado deslizamientos.

El deslizamiento ocurrió en una ladera de pendiente fuerte localizada en el escarpe nororiental del barrio. En un momento inicial del movimiento se presentaron agrietamientos dentro de las viviendas localizadas frente a la carrera 28 situadas en el borde del talud.

El perfil de suelo se considera relativamente mal drenado, se encuentra generalmente en estado húmedo y el nivel freático apareció en el sondeo No. 7 a una profundidad de 13.80 metros. Este nivel se encuentra colgado sobre un manto arcilloso dentro de la formación Órganos.



Figura 22. Panorámica general del deslizamiento del Barrio Colorados

El deslizamiento se encuentra en la mayor parte de su área sobre el *Miembro Órganos (Qbo)*, desde la punta del movimiento hasta 15 a 30 metros ladera abajo. La zona del Área Metropolitana de Bucaramanga presenta una sismicidad fuerte con la mayoría de los movimientos provenientes del nido sísmico de Bucaramanga.

Existe realmente en la práctica dos fuentes sismogénicas que determinan el diseño, una de fuente cercana proveniente de la falla de Bucaramanga y la otra fuente lejana proveniente de la falla del Piedemonte Llanero.

6.1.1. Características del sitio (Norma NSR 98)

De acuerdo a los requerimientos de la Norma NSR-98 se indican las características sísmicas principales del lote:

- ✓ Amenaza sísmica: Alta
- ✓ Aa: 0.25
- ✓ Ad: 0.04
- ✓ Perfil de suelo: S2
- ✓ Tipo de perfil de suelo para efectos locales: D
- ✓ Coeficiente de sitio: 1.2

De acuerdo al estudio de Zonificación Sismo geotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga para el lote estudiado se recomienda un espectro de diseño correspondiente a la zona 2 del Área Metropolitana, el cual presenta aceleraciones superiores a las recomendadas para Bucaramanga en el NSR-98.

Se hicieron sondeos hasta encontrar el contacto entre el suelo natural y el deslizado y se identificó la profundidad del nivel freático, con las muestras obtenidas se hacen ensayos de laboratorio y después se describen los perfiles de los sondeos de forma grafica

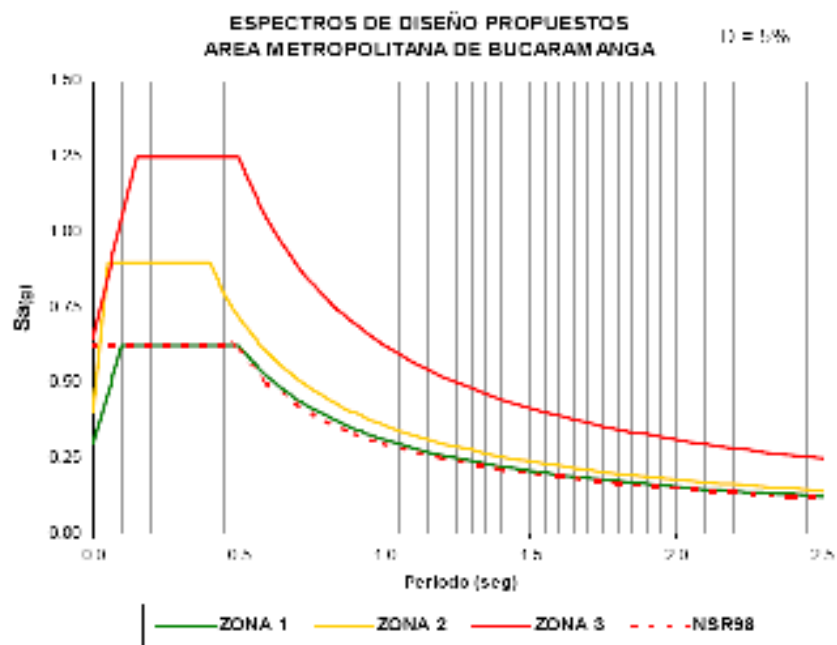


Figura 23. Espectros de Diseño. Área Metropolitana de Bucaramanga

6.2. ANALISIS POR EL SOFTWARE SLOPE/W

El modelo geotécnico se trabajó con dos tipos de material de suelo identificados en los sondeos realizados. Las propiedades de los suelos fueron obtenidas en el laboratorio y los espesores de los estratos fueron determinados a partir de los sondeos geotécnicos realizados.

Definimos el análisis de Slope/W para trabajar el proyecto.

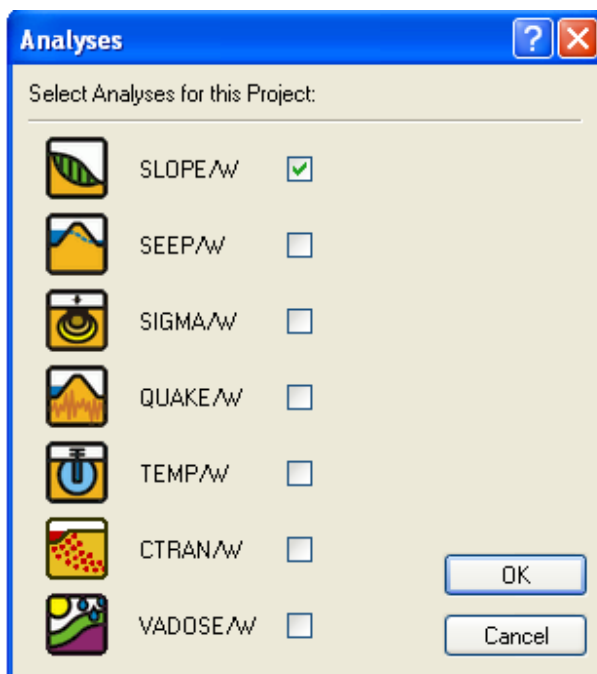


Figura 24. Ventana de selección de análisis para el proyecto

6.2.1. Primer Paso. Definiendo el problema.

El modelo geotécnico se trabajó con los tipos de material de suelo identificados en los sondeos realizados. Las propiedades de los suelos fueron obtenidas en el

laboratorio y los espesores de los estratos fueron determinados a partir de los sondeos geotécnicos realizados.

6.2.1.1. Dibujando el perfil

1. Para dibujar el perfil se define el área de trabajo en mm, del menú set, se escoge la opción page, y aparecerá el siguiente cuadro. Se escogen las unidades en mm.

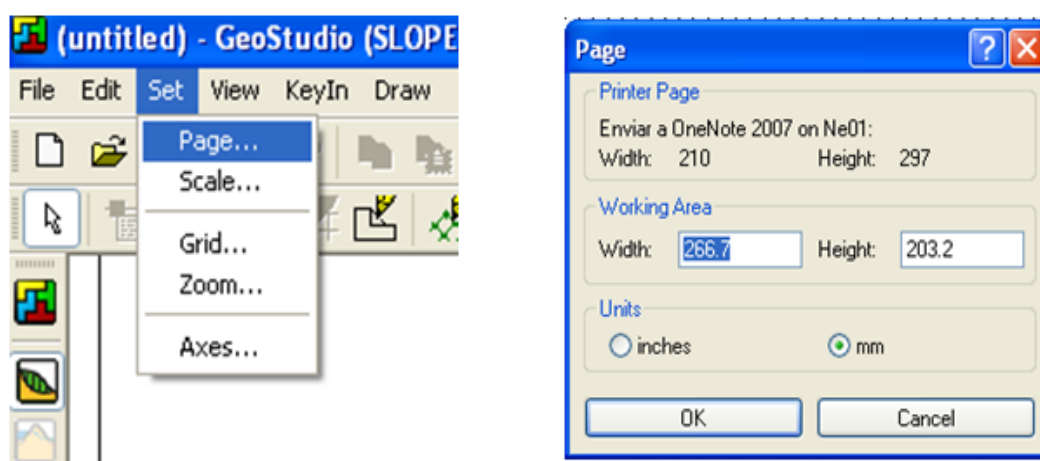


Figura 25. Ventana para definir el área de trabajo

2. Para ajustar la escala del dibujo, se tiene en cuenta la extensión del talud que se va a analizar, la longitud total es aproximadamente 80 metros (de corona a pie de falla) y el espesor del flujo debajo de la corona es variable entre 3 a 15 metros y otro suelo se encuentra desde esta profundidad hasta profundidades no determinadas. Para definir la escala, en el menú set la opción scale.

Las escalas tomadas serian las siguientes:

Horizontal 1:400

Vertical 1:400

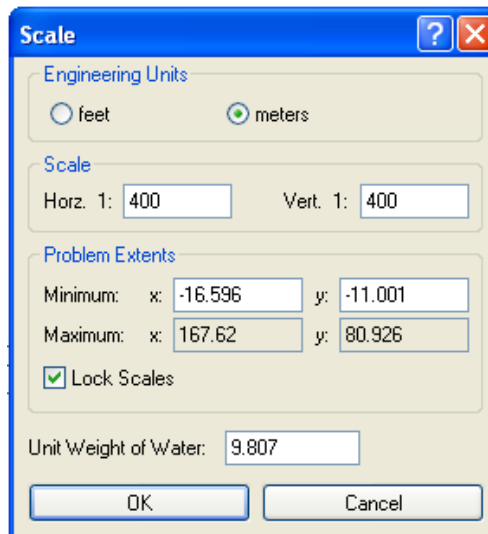


Figura 26. Ventana para definir la escala del trabajo

Como el problema se va a definir en metros las unidades del peso de agua serán KN/m^3 .

Se toma el valor del peso del agua como 9.807KN/m^3 .

3. La rejilla se ajusta a una distancia entre puntos de 1 en dirección X y Y.
Se va al menú set la opción grid.

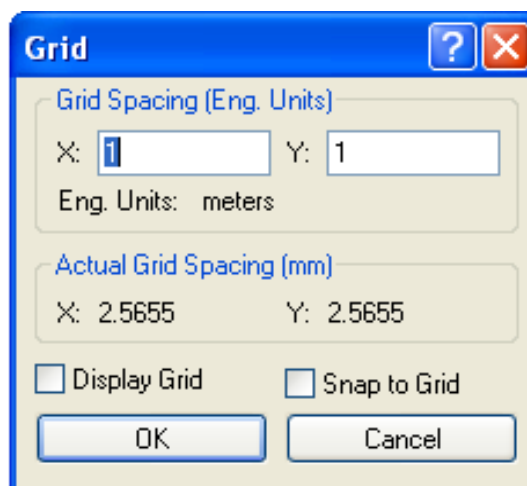


Figura 27. Ventana para definir la grilla

4. En este momento se recomienda guardar el archivo. En el menú File, la opción Save As (guardar como).

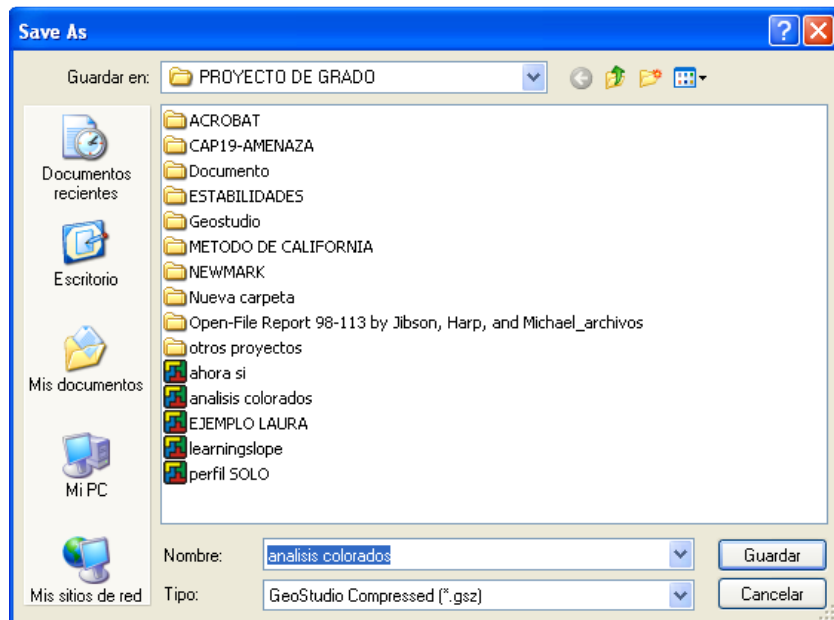


Figura 28. Ventana para guardar el trabajo

5. Se asigna un respectivo nombre al eje X y Y, el eje izquierdo y el inferior. Ya en el área de trabajo se ubica el cursor cerca a la posición (0,0) y sosteniendo el botón del mouse se arrastra hasta que aparezca un rectángulo con las dimensiones necesarias para el perfil. En el menú sketch, la opción Axes.

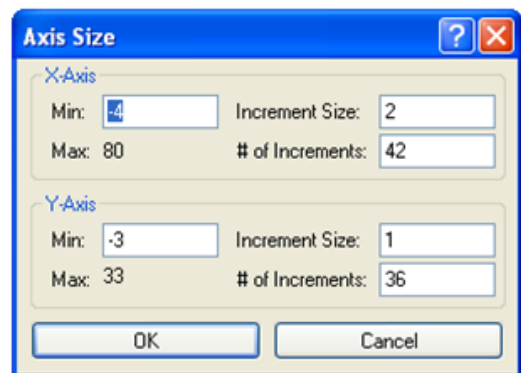
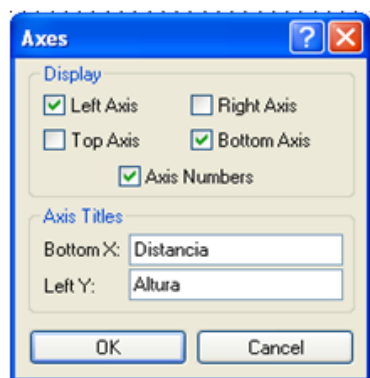
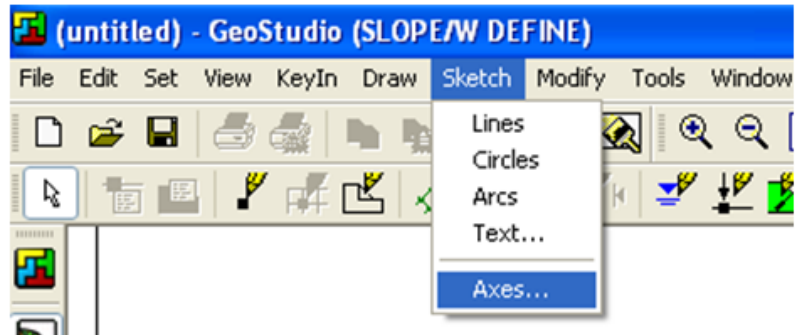


Figura 29. Ventana para seleccionar los ejes para el trabajo

6. Para definir la estabilidad del problema es conveniente como primer paso preparar el bosquejo con las dimensiones del problema. Este bosquejo es una guía útil para dibujar la geometría de los elementos del problema.

Para dibujar el perfil se escoge la apariencia de las líneas con que se va a dibujar el perfil. Esto se hace en el menú Sketch, en la opción line. Se selecciona la línea delgada para dibujar el perfil.



Figura 30. Ventana para seleccionar el grosor de la línea para dibujar el perfil

Y así se obtiene el siguiente perfil.

Los espesores se obtienen de los sondeos que se hicieron en campo.

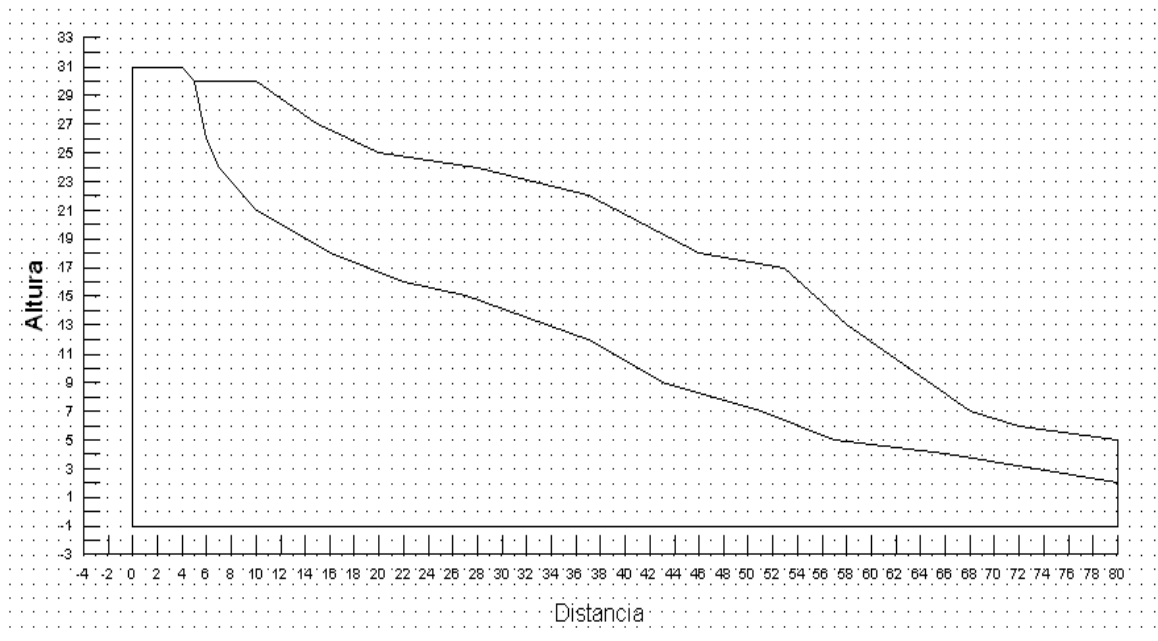


Figura 31. Perfil dibujado

6.2.1.2. Definiendo propiedades

Para especificar las propiedades del análisis, en el menú Keyin en la opción Analysis Settings, aparece un cuadro con las siguientes opciones:

1. Nombre del proyecto

Se especifica el nombre del proyecto, si se desea se hace un comentario, y especifica las herramientas que se están utilizando actualmente.

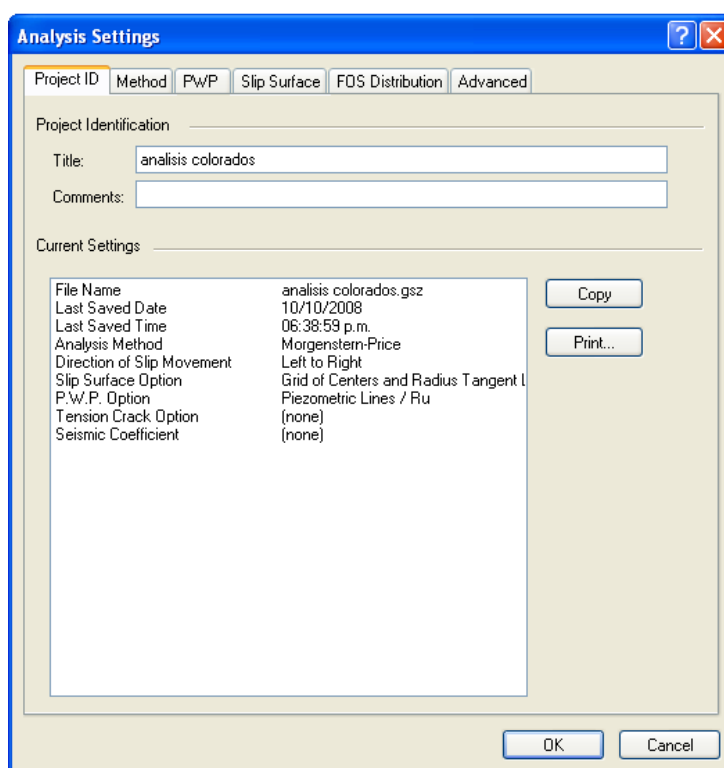


Figura 32. Ventana donde se especifican las herramientas del proyecto

2. Método del análisis

Aunque el programa permite trabajar diferentes métodos de análisis, para objeto del presente estudio se trabajó conjuntamente con los siguientes cuatro métodos:

Método ordinario o de Fellenius

Método Bishop simplificado

Método de Janbú simplificado

Y se escoge el método de Sarma, que para este estudio es el más opcional ya que se enfoca en los efectos sísmicos.

Se introduce la cohesión y el valor de phi, del suelo movido.

3. Se especifica la línea piezométrica, con $R_u/B\text{-bar}$ como la opción de presión de poros.

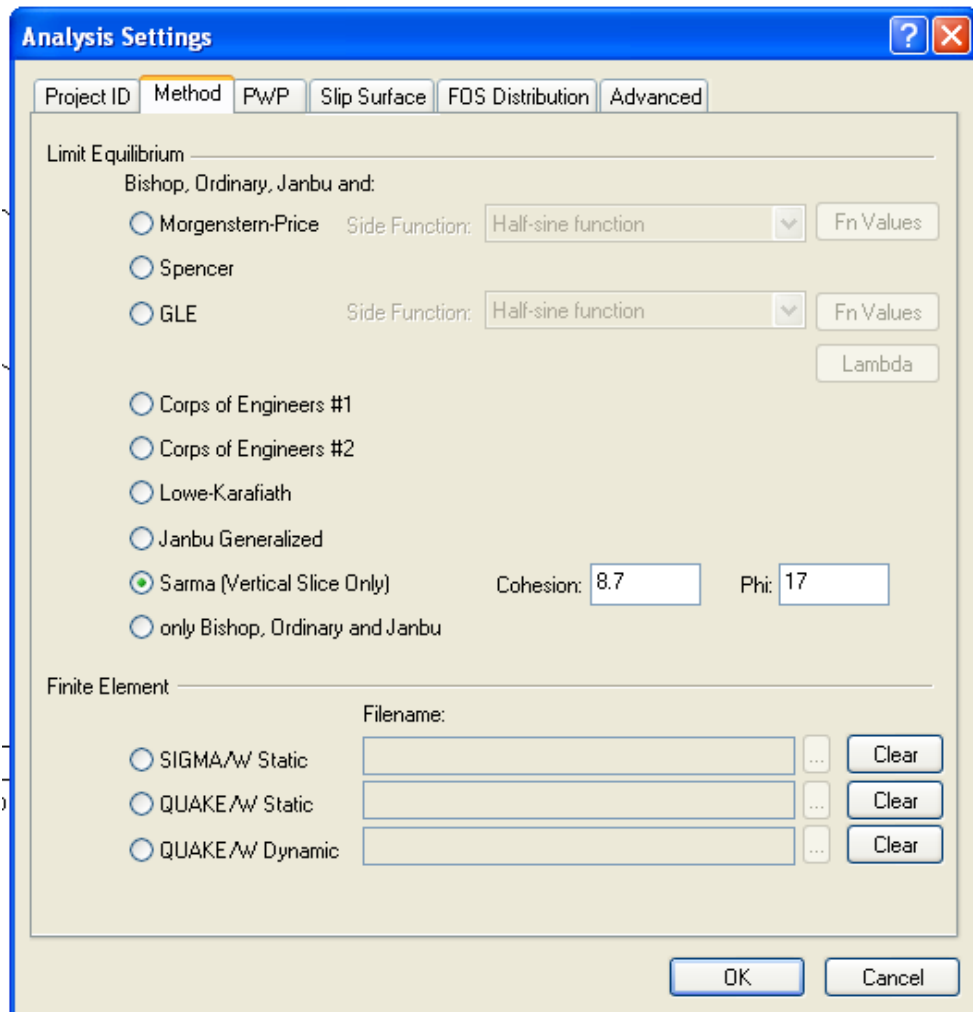


Figura 33. Ventana para escoger el método de análisis

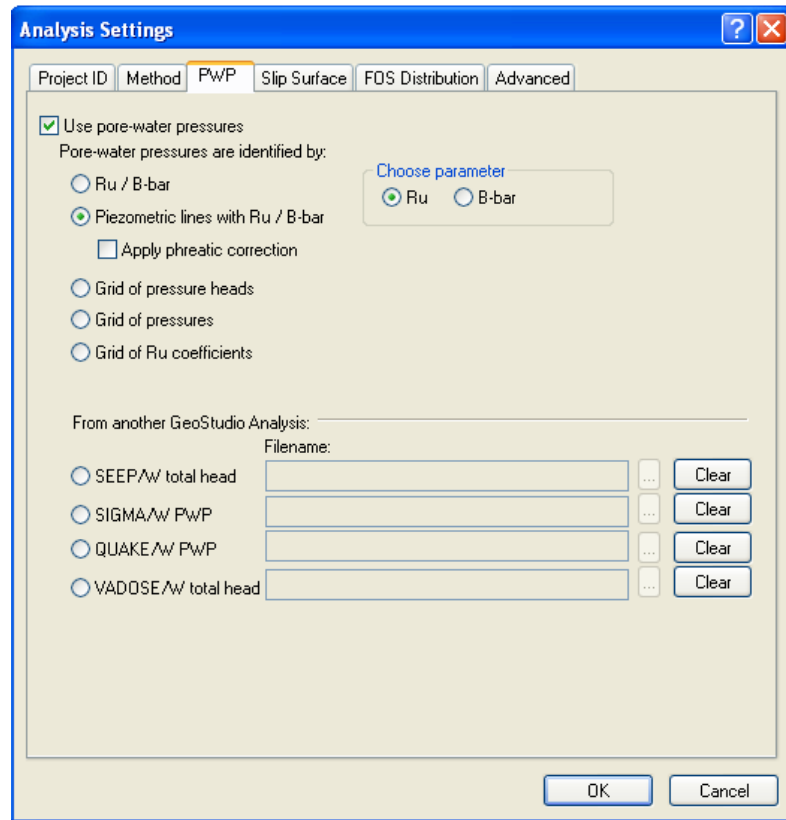


Figura 34. Ventana para seleccionar la presión de poros y la línea piezométrica

4. la dirección del movimiento, se selecciona de acuerdo a la ubicación del talud, como tiene una ubicación de su parte mas alta a la izquierda, se espera que el deslizamiento se dé de izquierda a derecha.
Por defecto la opción de superficie de deslizamiento más usada es la de rejillas y radios, y se especifica el número de superficies de deslizamiento crítico que quieran guardar.

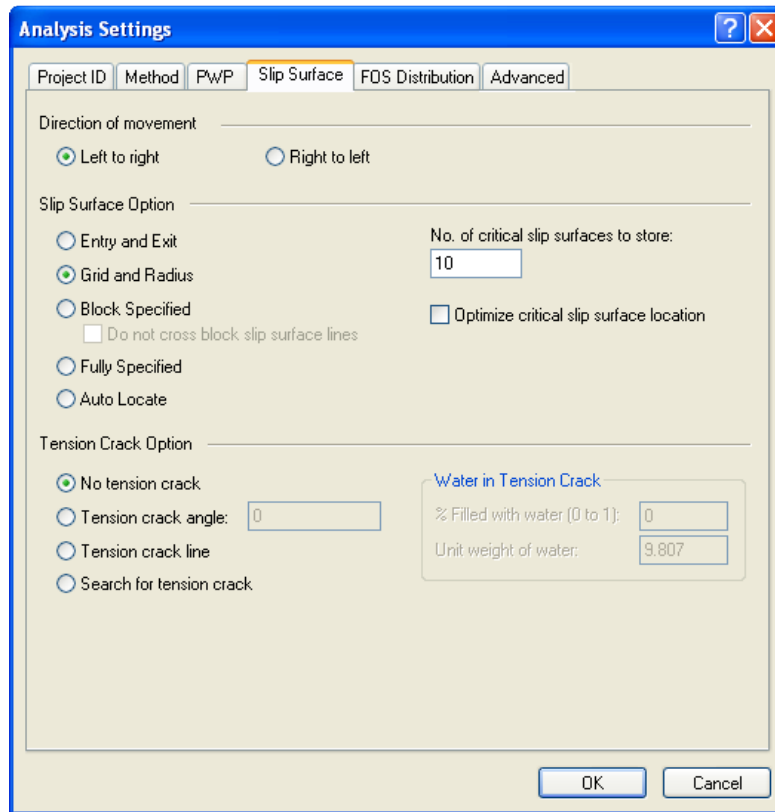


Figura 35. Ventana para seleccionar la superficie de deslizamiento

5. definiendo las propiedades del suelo

Se utilizó el sistema de parámetros totales de resistencia, de acuerdo al sistema de Mohr-Coulomb obtenidos en los ensayos de Corte Directo Drenado.

Para este perfil se presentan dos tipos de suelos.

	Suelo	Peso Unitario (KN/m³)	Friccion (°)	Cohesion (KN/m²)
1	Suelo Movido	18.3	17	8.7
2	Miembro Órganos	19.1	20.92	17

Tabla 15. Propiedades de los tipos de suelo del Perfil

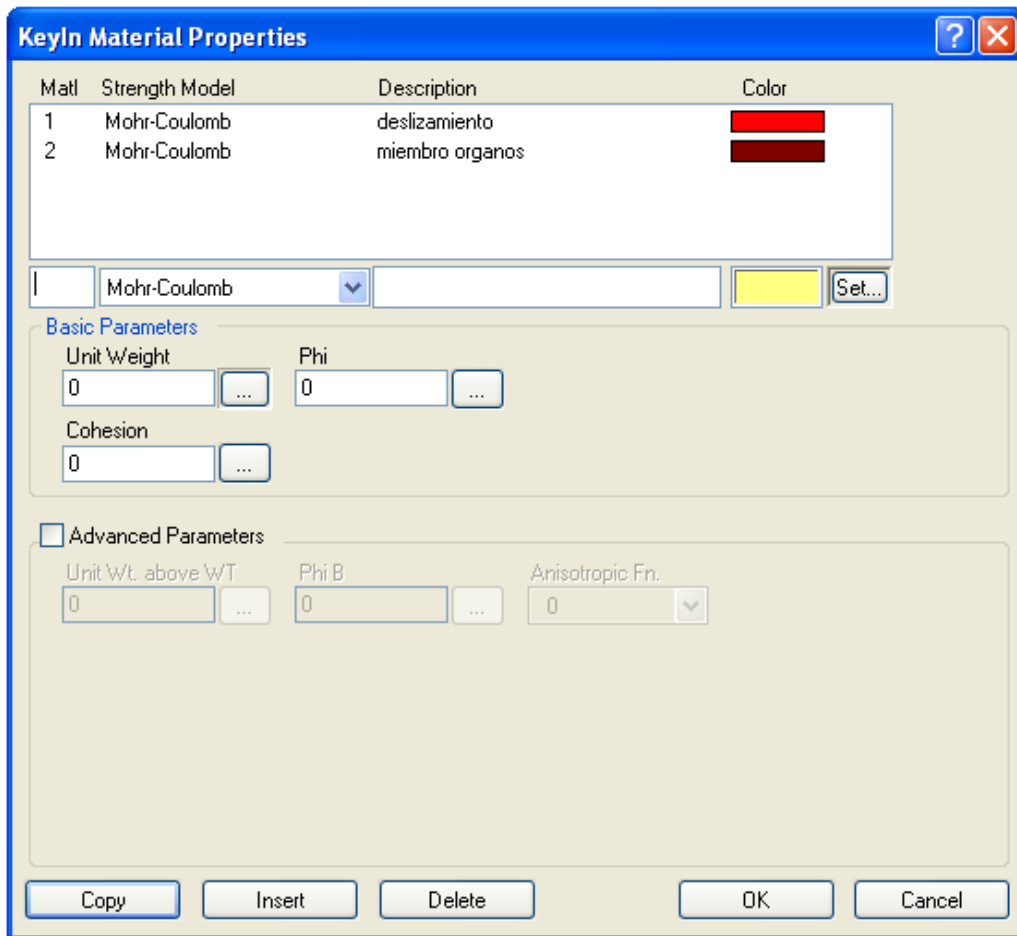


Figura 36. Ventana para añadir las propiedades de los tipos de suelos del perfil

6. Se dibujan las regiones

En el bosquejo del perfil se delimitan las regiones. En el menú Draw, la opción regiones y automáticamente el cursor cambia a una forma de cruz con la que se delimita sobre el perfil la región y al terminar esta toma un color y aparece un cuadro donde se asigna la región a la que pertenece.

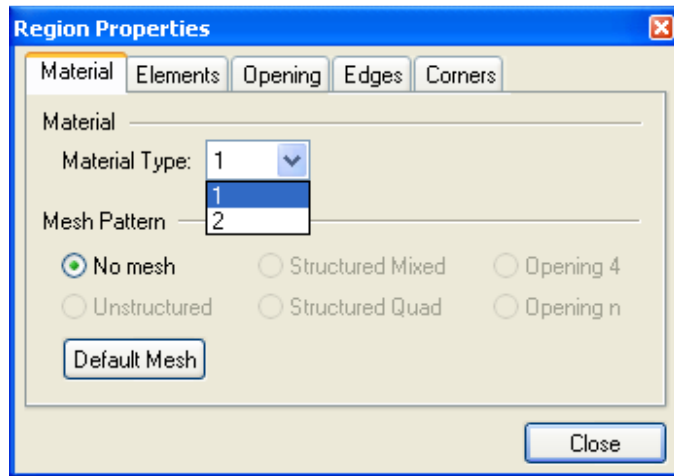


Figura 37. Ventana para asignar propiedades a las regiones

En la siguiente figura se observa el perfil con todas las regiones especificadas.

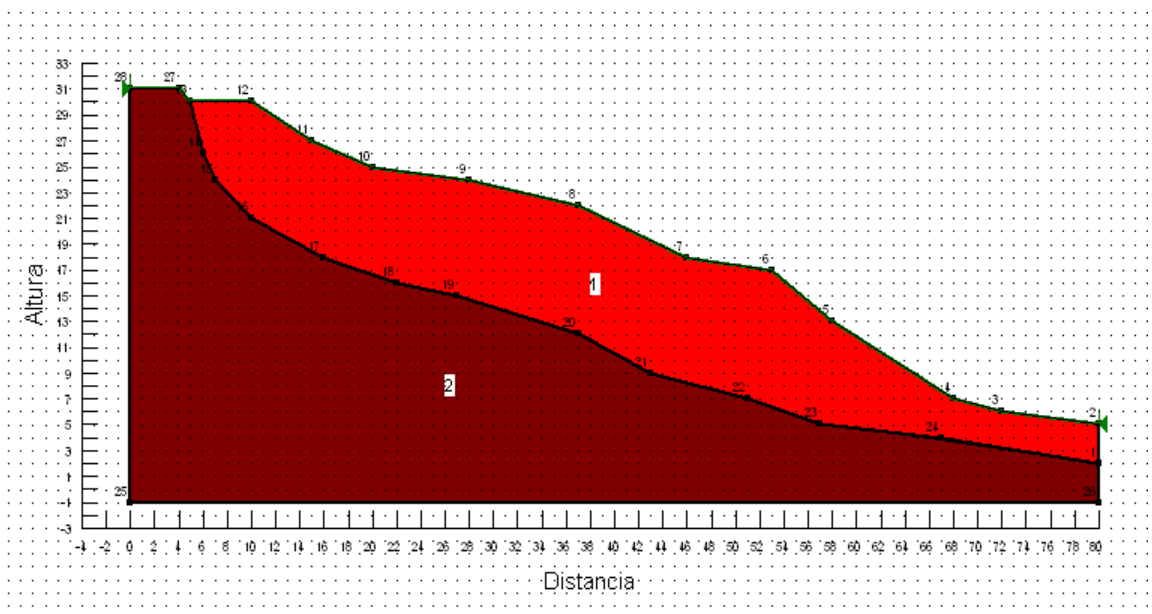


Figura 38. Perfil con las regiones especificadas

7. Se dibuja la línea piezometrica.

En el menú Draw, la opción Pore-wáter pressure. Aparecerá un cuadro, en donde se selecciona una línea piezometrica que se aplicara a todos los suelos que tenga el perfil. Para modelar las presiones de poro se supone la línea de nivel freático dependiendo de la información obtenida en los sondeos.

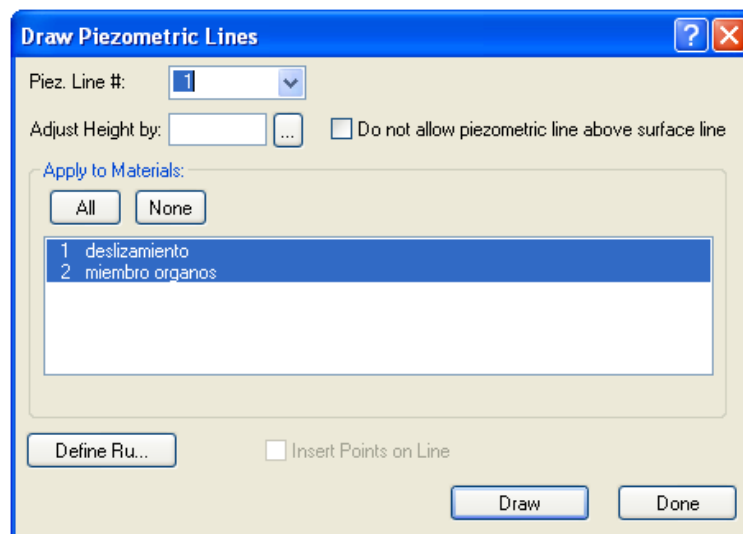


Figura 39. Ventana para escoger la cantidad y dibujar la línea piezometrica

La línea piezometrica se dibuja en el perfil como una línea azul.

Se puede especificar una línea piezometrica para cada tipo de suelo, pero para el ejercicio y por defecto también se trabaja así, agregar una línea piezometrica por todos los tipos de suelo que se presenten en el perfil.

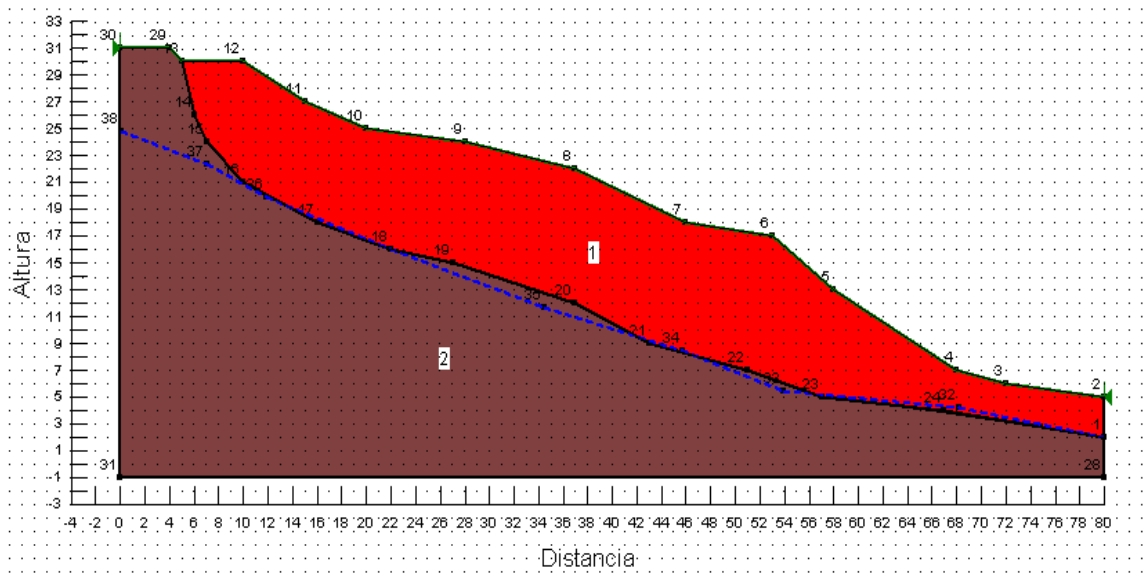


Figura 40. Perfil con una línea piezométrica

8. Dibujando la superficie de deslizamiento.

Se selecciona la superficie grilla y radio, entonces se va al menú Draw, en la opción Slupe Surface, y se escoge la opción radio.

Asigno un incremento de radios de 10. Al aumentar el número de radios se aumenta las superficies analizadas y así se buscara más superficies críticas.

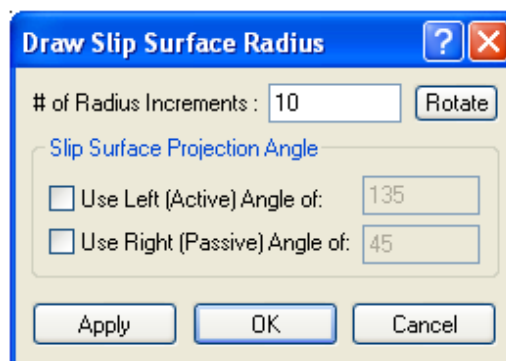


Figura 41. Ventana para seleccionar el número de incrementos del radio para dibujar la superficie de deslizamiento

Igual se hace con la opción Grid y en el bosquejo la rejilla se ubica fuera del perfil. Cuando se dibuje aparecerá el siguiente cuadro y OK.

Entre mayor sea el número de incrementos, más serán las opciones que analice.

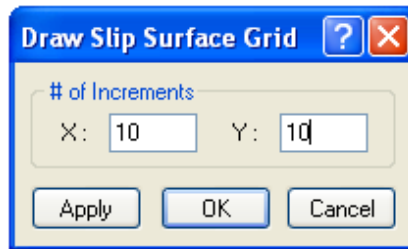


Figura 42. Ventana para seleccionar el número de divisiones de la rejilla para dibujar la superficie de deslizamiento

Esta superficie de deslizamiento trabaja trazando desde cada punto de la rejilla, un círculo cuya tangente será la línea que se trazo dentro del perfil, de esta forma se generan los radios.

Dada la ubicación del talud, el movimiento se toma de izquierda a derecha.

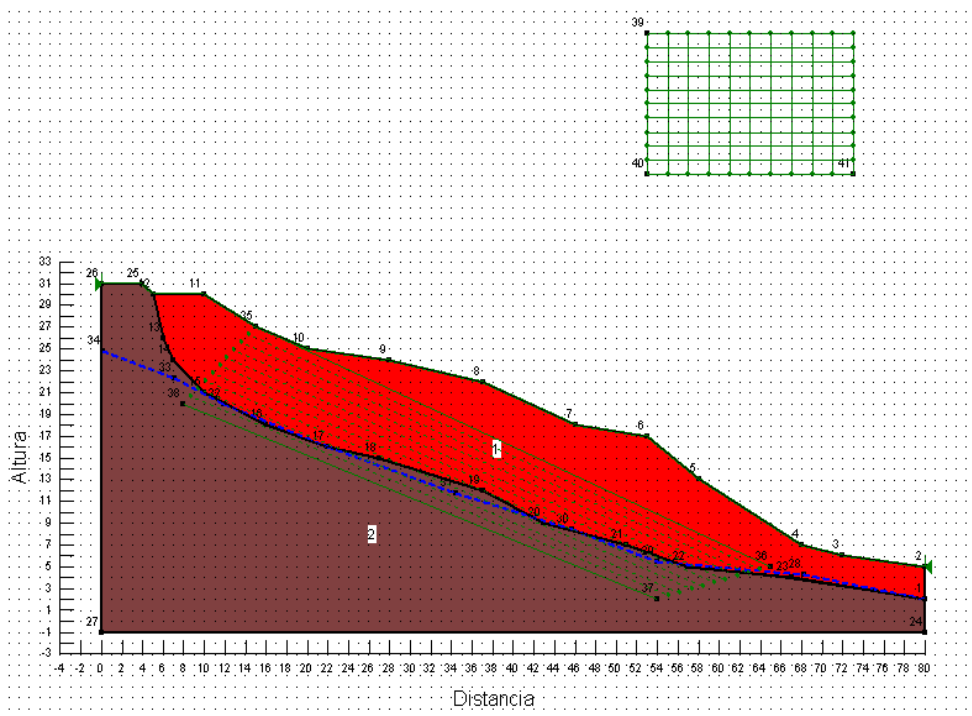


Figura 43. Perfil con la superficie de deslizamientos "Radio y Rejilla"

9. En el menú View, opción preferencias, se hacen especificaciones de cómo se quiera que aparezcan los datos en el dibujo del perfil, tamaño y fuente de los textos.

Y se obtiene el dibujo.

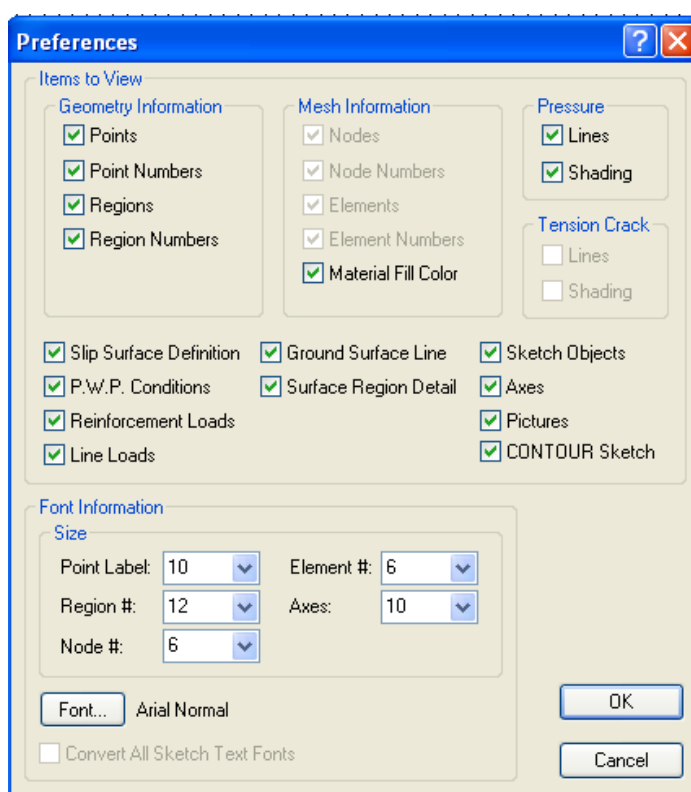


Figura 44. Ventana para definir la presentación grafica del perfil

10. Se revisa las propiedades del suelo por regiones. En el menú View en la opción propiedades de los materiales, y en el perfil, seleccionando alguna región, aparecerá un cuadro con las propiedades de esta región. De la misma forma se hace con todas las regiones.

La región que esta delimitada con una línea blanca es a la que se le muestra las propiedades. Si se quiere ver las propiedades de todas las regiones al mismo tiempo, en el cuadro se selecciona All Mats.

11. Se verifica que todos los datos se hayan introducido correctamente. En el menú Tools, opción verify.

Al completar la verificación debe salir 0 errores encontrados, de lo contrario mostrara en donde esta el error.

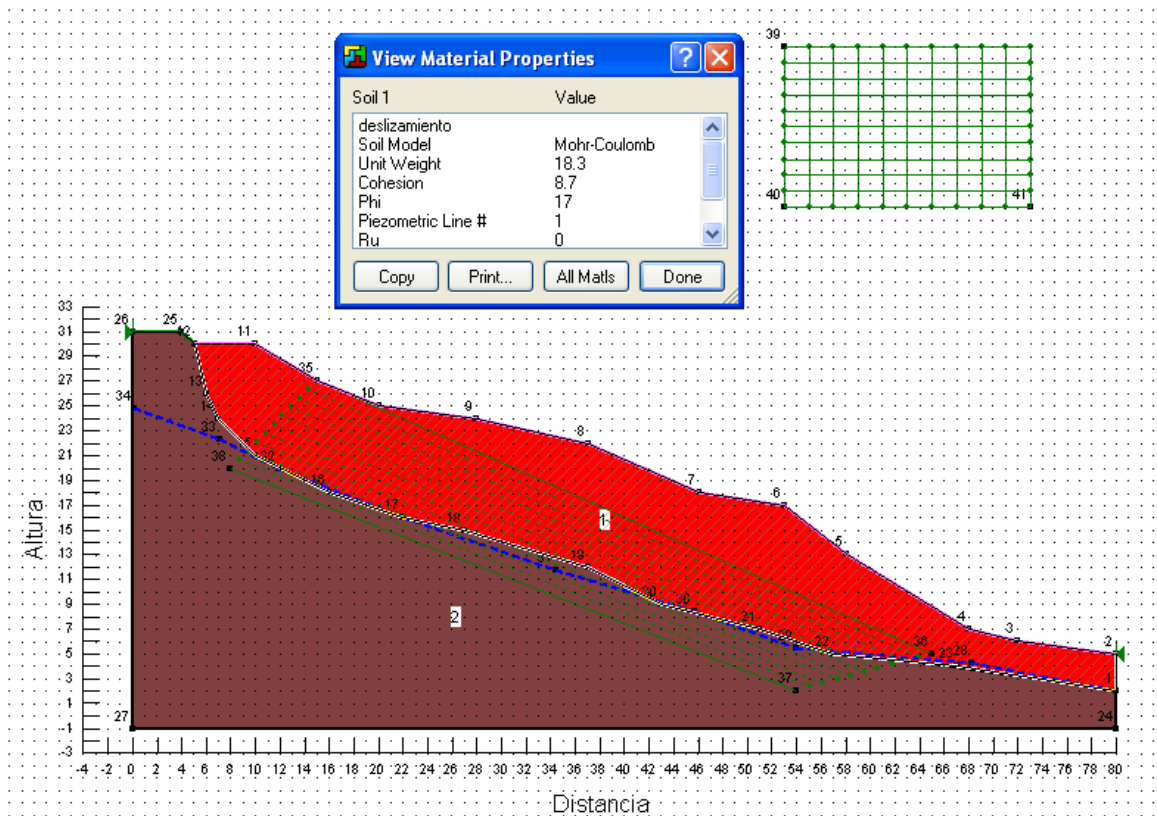


Figura 45. Ventana para verificar las propiedades del suelo por regiones

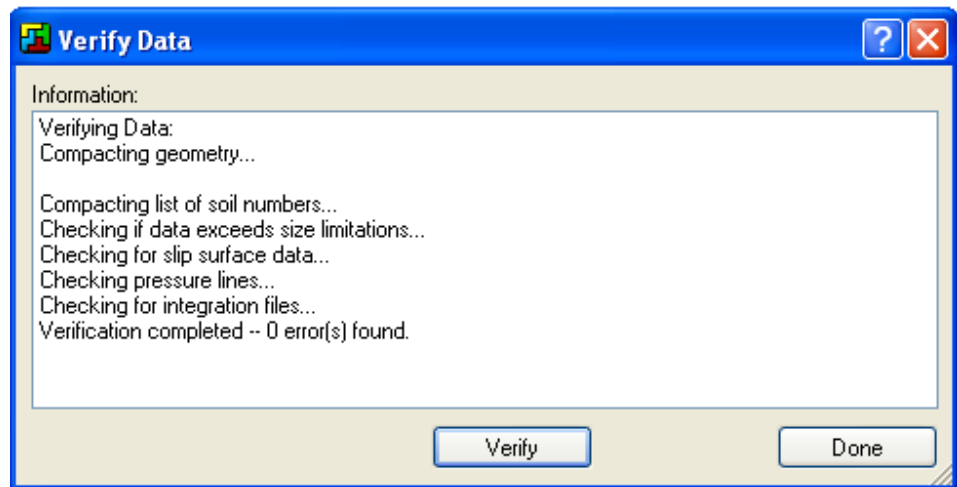


Figura 46. Ventana para verificar que la información suministrada sobre el perfil

6.2.2. Segundo Paso. Resolviendo el problema.

Para resolver el problema, se va al menú Tools y se escoge la opción SOLVE. Aparecerá un cuadro donde se muestra los métodos de análisis con su respectivo factor de seguridad.

Automáticamente se carga el SLOPE TUTORIAL.GSZ, en donde se le da iniciar al cálculo.

Al mismo tiempo que se efectúa el cálculo, se va mostrando los factores de seguridad mínimos y la superficie de deslizamiento que en el momento es analizada, hasta encontrar la más crítica.

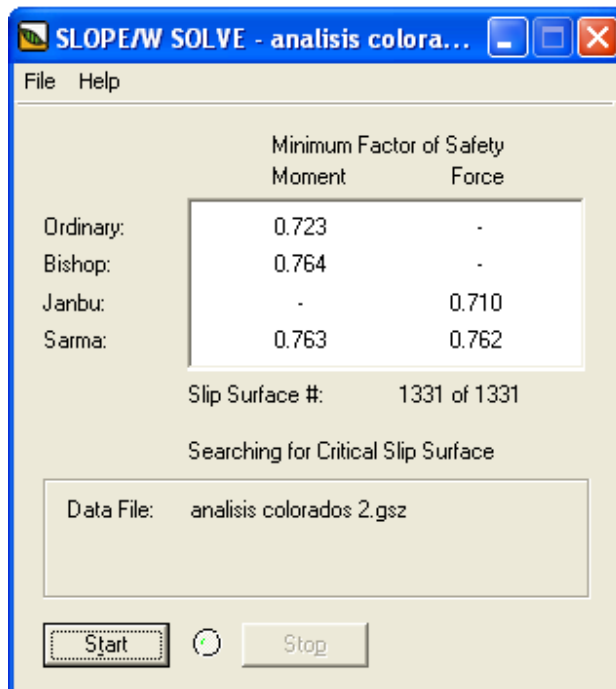


Figura 47. Resultados del análisis por los cuatro métodos

Para este talud se analizaron 1331 superficies de deslizamiento y la superficie crítica fue encontrada con un factor de seguridad de 0.763.

Para un análisis estático, es decir con fuerza sísmica igual a 0 el factor de seguridad es de 1.053

Ya teniendo el factor de seguridad, salimos de la opción SOLVE

Análisis	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.
	Fellenius	Bishop	Janbú	Sarma
Análisis estático	1.004	1.055	-	1.053
Análisis dinámico con aceleración de 0.15g	0.723	0.764	-	0.763

Tabla 16. Resultados obtenidos por los cuatro métodos de análisis para condiciones estáticas y dinámicas.

6.2.3. Tercer Paso. Contorno del Problema.

En el menú window, se selecciona la opción CONTOUR. Esta muestra el punto dentro de la grilla desde donde se marca el radio que define la superficie mas critica del análisis, con su respectivo valor de factor de seguridad. También muestra la superficie mas propicia a fallar.

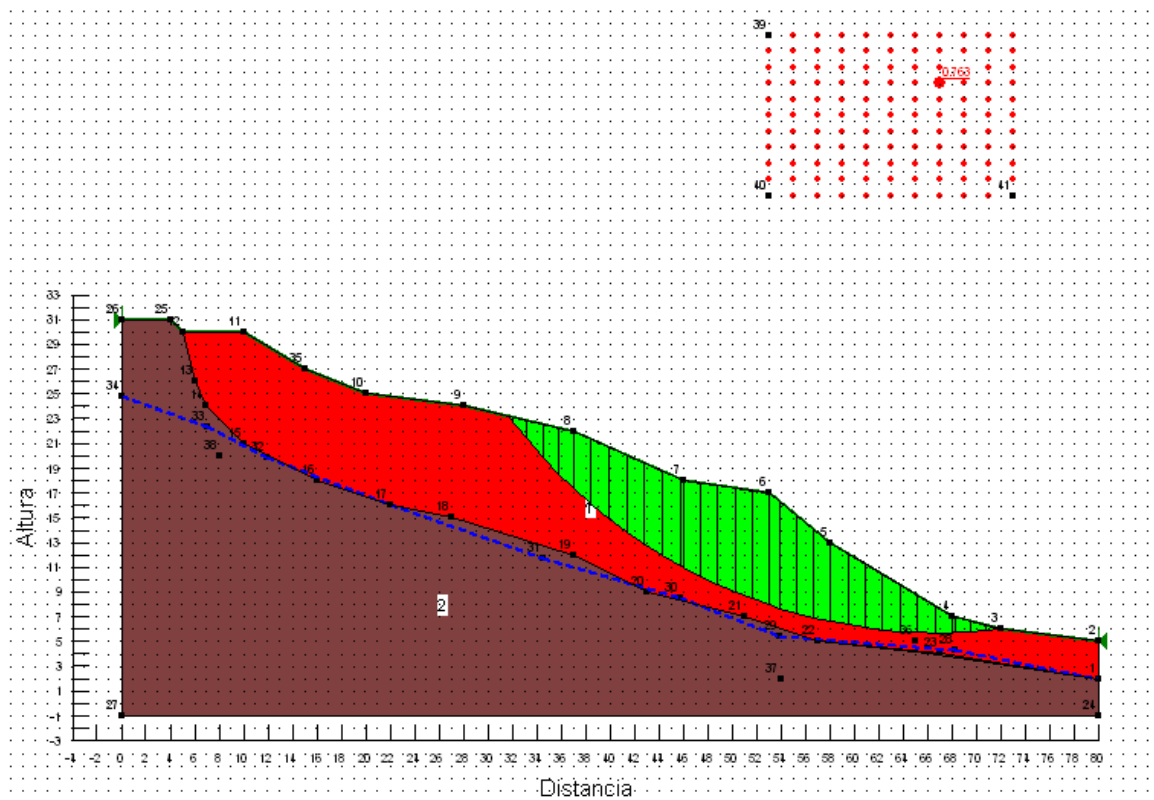


Figura 48. Perfil analizado y con su respectivo factor de seguridad y la superficie de falla

1. Superficies de deslizamiento

Se elige superficie de deslizamiento del menú Draw, y el cuadro que aparece muestra todas las superficies analizadas con su respectivo factor de seguridad.

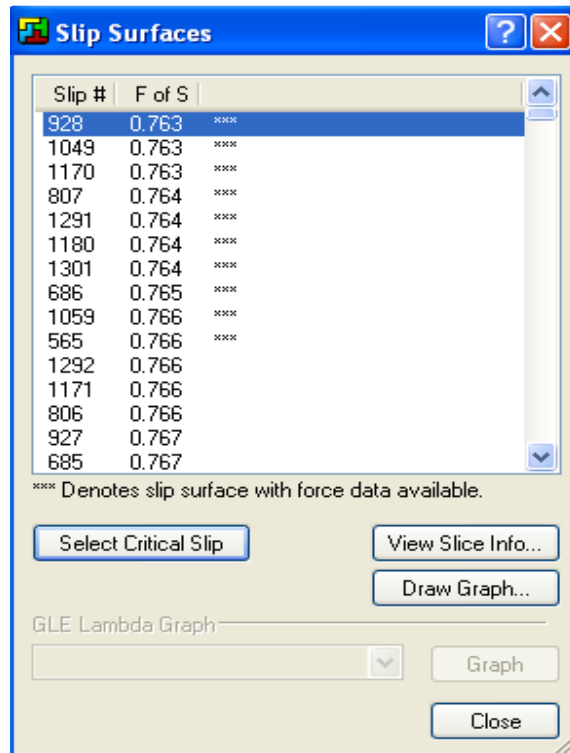


Figura 49. Superficie de deslizamiento con su respectivo factor de seguridad

La superficie crítica en este caso es la 928. Las superficies marcadas con asteriscos, tienen información adicional sobre las fuerzas.

Cuando se selecciona alguna superficie de deslizamiento, esta se mostrara en el perfil.

2. Mostrar información de cada partición.

Las fuerzas calculadas para la mínima y la óptima superficie de deslizamiento se muestran en un diagrama de cuerpo libre y un polígono de fuerzas de una partición seleccionada.

Del cuadro de superficies de deslizamiento del el menú Draw ya abierto, se localiza la superficie de deslizamiento critica, y se va al botón View slice info.

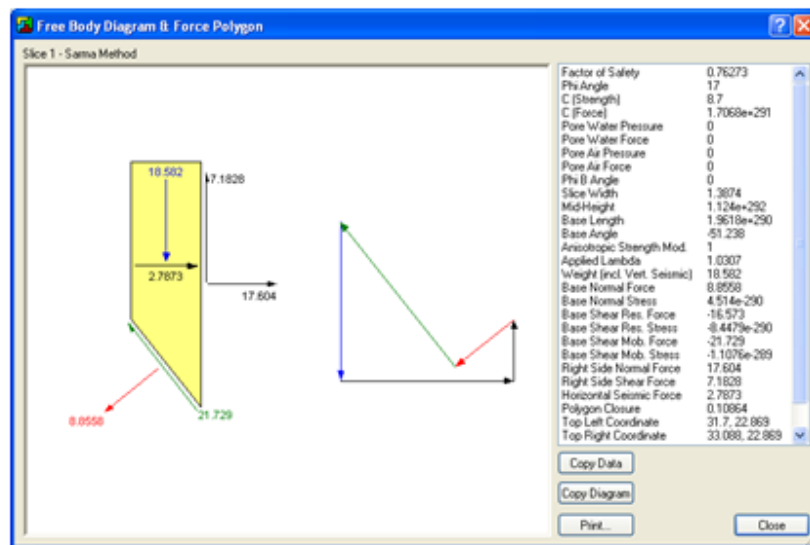
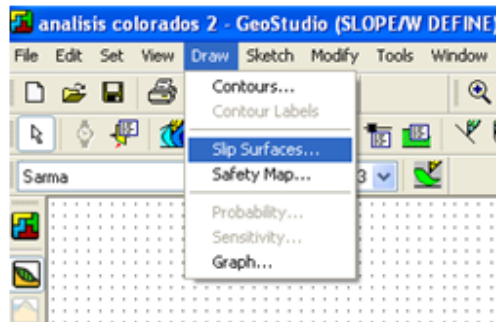


Figura 50. Superficie de deslizamiento con su respectivo factor de seguridad

Este diagrama de cuerpo libre muestra las fuerzas sobre la partición, calculadas por el método de Sarma.

3. Ver los factores de seguridad analizados por cada método

En el menú View, la opción Method; aparecerá un cuadro, donde se puede seleccionar los otros métodos de análisis y arroja su factor de seguridad, y en el perfil mostrara también su superficie de deslizamiento.

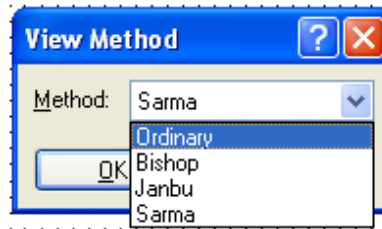


Figura 51. Selección del método de análisis para ver su respectivo factor de seguridad

4. Dibujar las graficas de los resultados

El procedimiento se presenta para las fuerzas distribuidas desde la cima hasta pie del talud a lo largo de toda la superficie deslizante.

En el menú Draw, la opción Graph, aparece el siguiente cuadro.

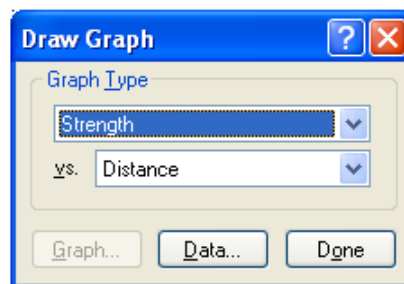


Figura 52. Seleccionar gráficos

Donde se seleccionan las opciones que se deseen graficar.

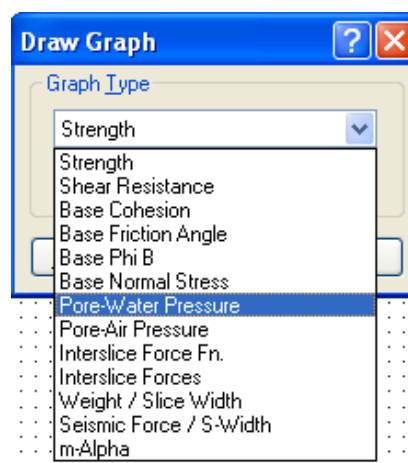


Figura 53. Selección de opciones a graficar

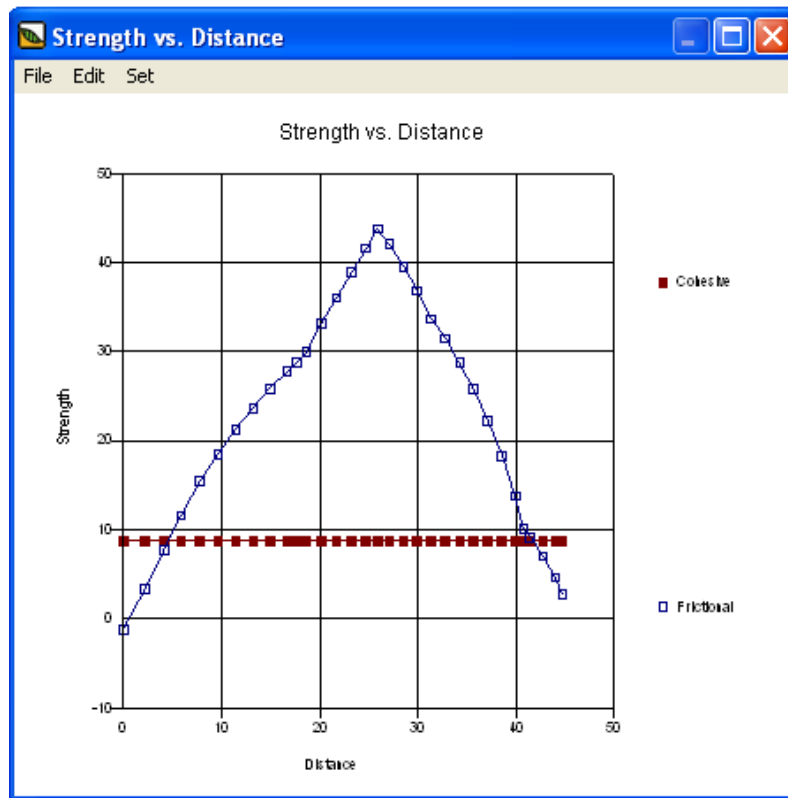


Figura 54. Grafico fuerza vs. distancia

Ya terminado el análisis de estabilidad del talud, y habiendo obtenido un factor de seguridad menor que 1.0; se procede a calcular los desplazamientos permanentes utilizando el método de Newmark.

6.3. CALCULO DE LOS DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO EL METODO DE NEWMARK

Ya habiendo hecho el análisis de estabilidad, y obtenido un valor del factor de seguridad de 0.763; se procede a calcular la aceleración (K_y) requerida para que el factor de seguridad sea 1.0

Con la formula:

$$K_y = (FS - 1)g \operatorname{sen} \alpha$$

Se procede a hacer la siguiente iteración para obtener la aceleración crítica con el F.S igual a 1.0.

FS	Ky
0,763	2,297
0,813	1,813
0,863	1,328
0,913	0,843
0,963	0,359
0,999	0,010

Tabla 17. Calculo de la aceleración crítica para un factor de seguridad de 1.0

La aceleración crítica para un factor de seguridad de 1.0 es de $a_c = 0.01$

6.3.1. Análisis riguroso del bloque rígido

6.3.1.1. Primer paso:

Teniendo en cuenta las propiedades del sismo de diseño especificado por el Ingeominas; sismo de Montenegro-Yugoeslavia.

Se introducen los datos que se tenga del sismo en los campos disponibles de la pestaña *Select records* y dentro de esta la opción *Search records by properties*.

Las propiedades conocidas son:

- Magnitud de momento: 6
- Duración: 34s
- Aceleración máxima (PGA): 0.21g
- Distancia epicentral: 20km

Trabajándolo para todos los mecanismos focales y para una clasificación del sitio de suelo rígido.

Se da click en el botón *Search for records*.

El software buscara registros de sismos con propiedades similares a las del sismo de diseño con el que se va a trabajar.

Para este ejercicio el software arroja dos registros del terremoto Imperial Valley en 1979, en el estado de california.

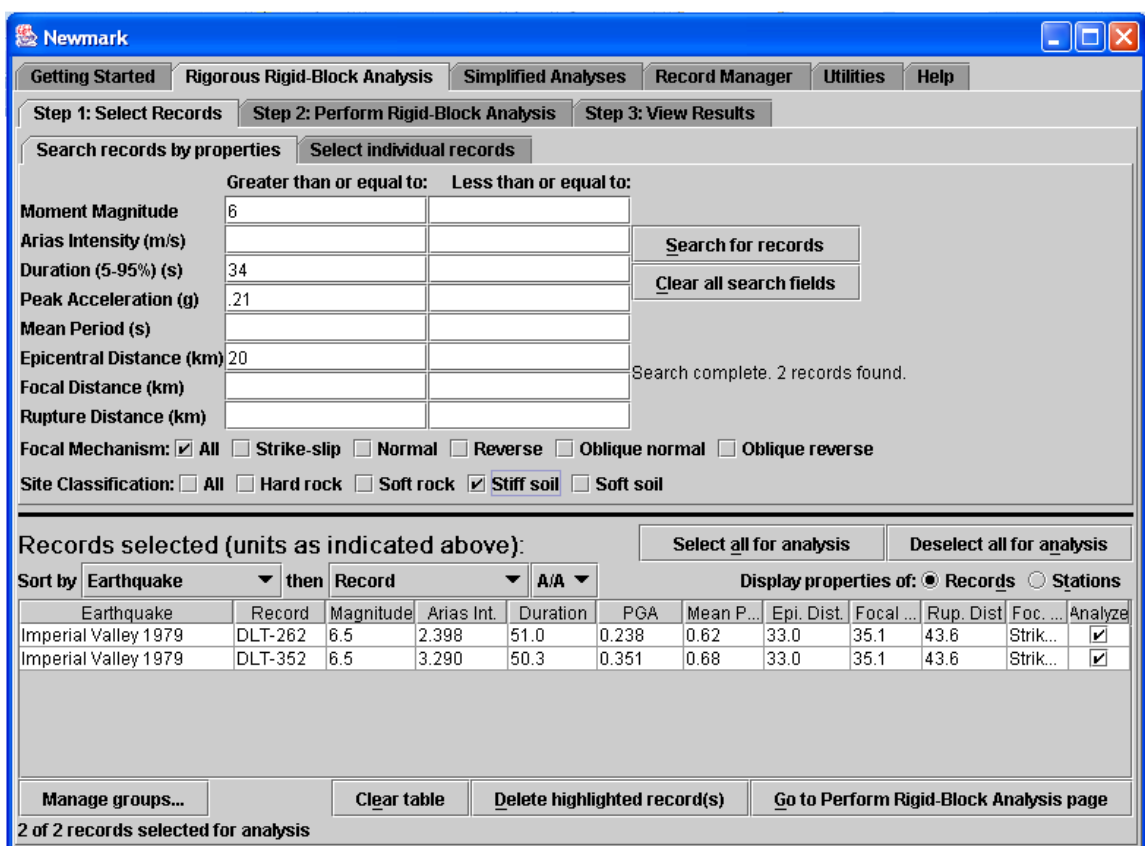


Figura 55. Buscando registros por las propiedades suministradas del sino de Diseño

6.3.1.2. Segundo paso:

Se va a la opción *go to perform Rigid-Block Analysis page*.

En esta casilla se especifica la aceleración crítica del deslizamiento, (que se calculo al inicio), y se especifica para este análisis como constante.

0.10

Displacement (cm)	Crit. Accel. (g)	Time (s)	Crit. Accel. (g)
0		0	

Scaling:
 Do not scale earthquake records
 Scale all earthquake records to a uniform PGA (in g's) of

Perform Analysis

Figura 56. Cuadro para especificar la aceleración crítica del deslizamiento.

6.3.1.3. Tercer paso

Se va a la opción *Perform analysis*, donde se realizara el análisis.

Cuando se termine de hacer el análisis, el software ira inmediatamente a la pestaña *View Results*

En la tabla de los resultados, el software muestra dos desplazamientos de Newmark, uno es el de la cima del talud y el otro el del pie del talud, y en otra casilla da un valor promedio de los dos.

También arroja valores de la media, la mediana y la desviación estándar.

Media: 8.2 cm

Mediana: 11.5 cm

Desviación estándar: 4.7cm

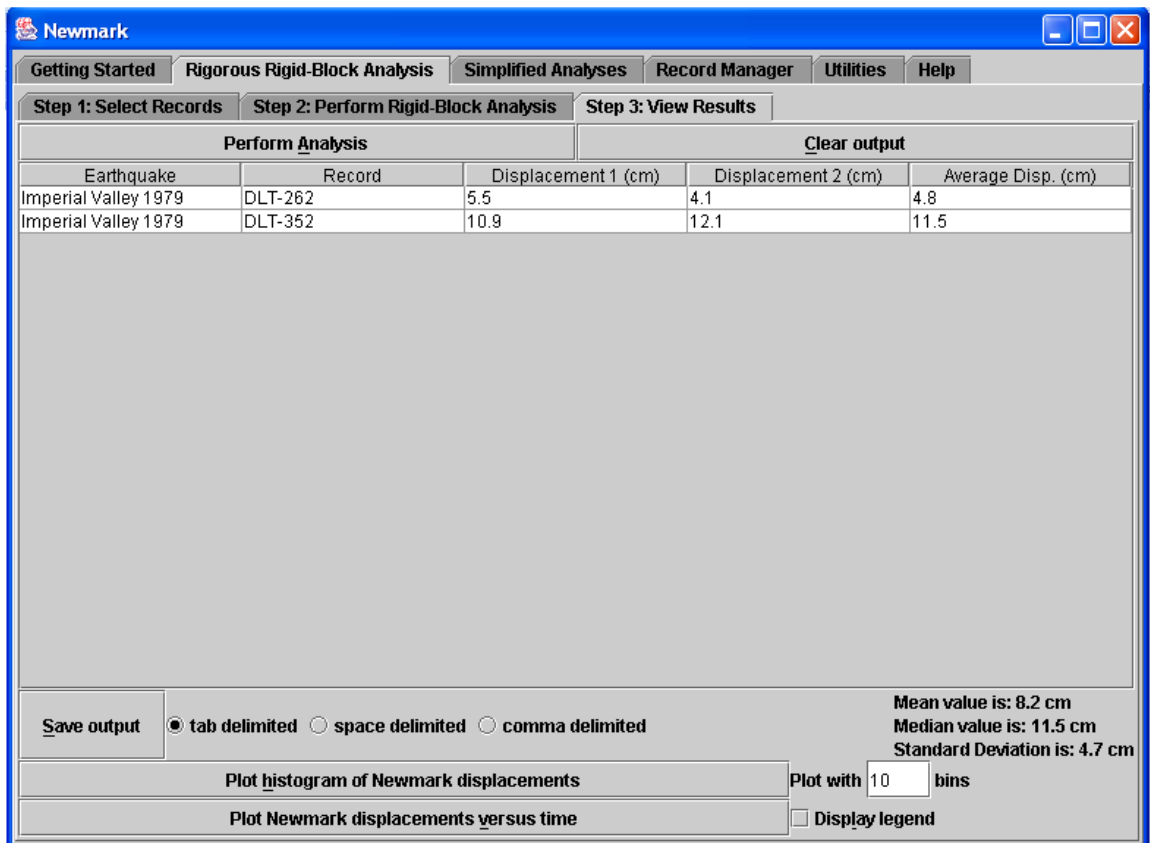


Figura 57. Desplazamientos de Newmark calculados por el software

El programa permite hacer un histograma de los desplazamientos de Newmark y un grafico entre la historia de tiempo y los desplazamientos de Newmark.

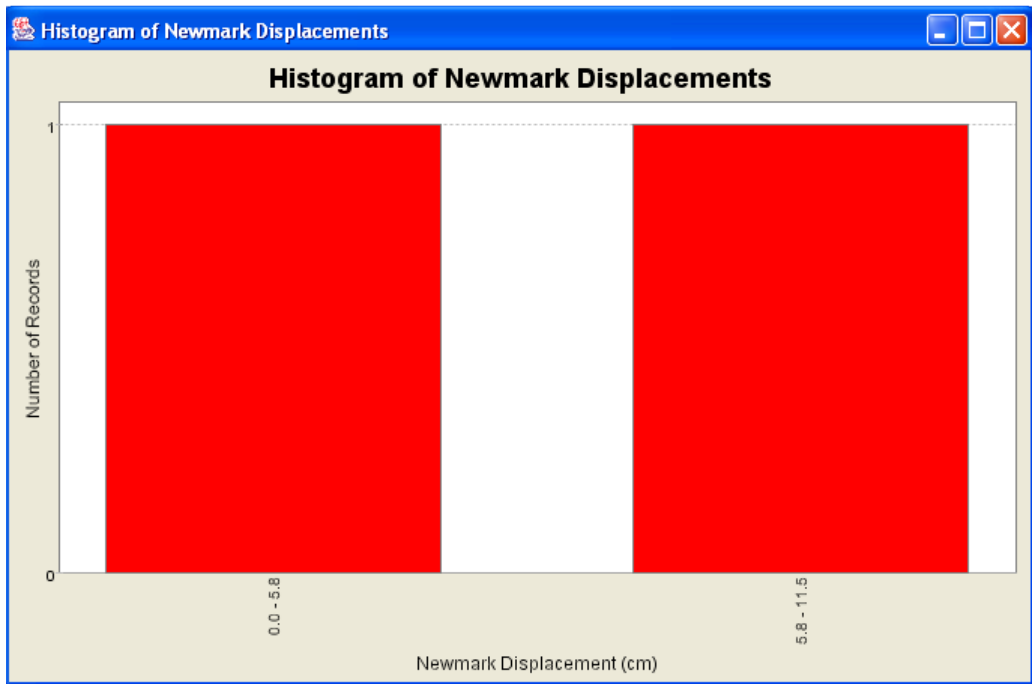


Figura 58. Histograma de los desplazamientos de Newmark

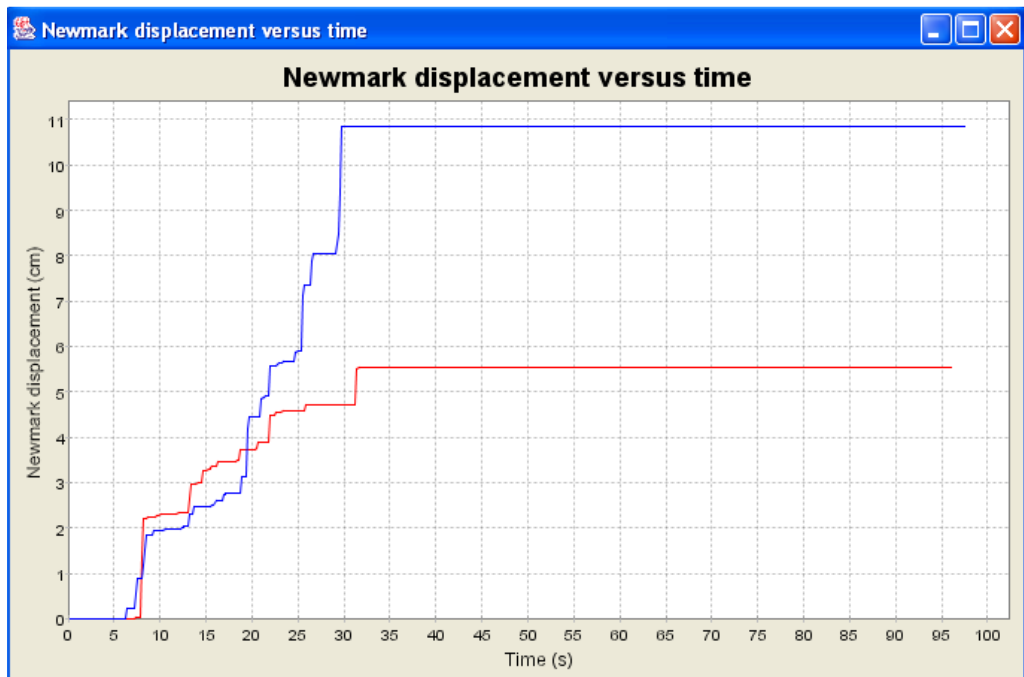


Figura 59. Grafico de Desplazamiento de Newmark vs. tiempo

6.3.2. Análisis Simplificados

En esta pestaña se puede hacer el análisis por dos métodos simplificados: el método del bloque rígido simplificado y el método desacoplado.

6.3.2.4. Rigid-Block Analysis (Análisis del bloque rígido)

- Con la opción de Ambraseys and Menú (1988), se realiza el análisis con los valores de la aceleración crítica y la aceleración en el punto máximo horizontal.

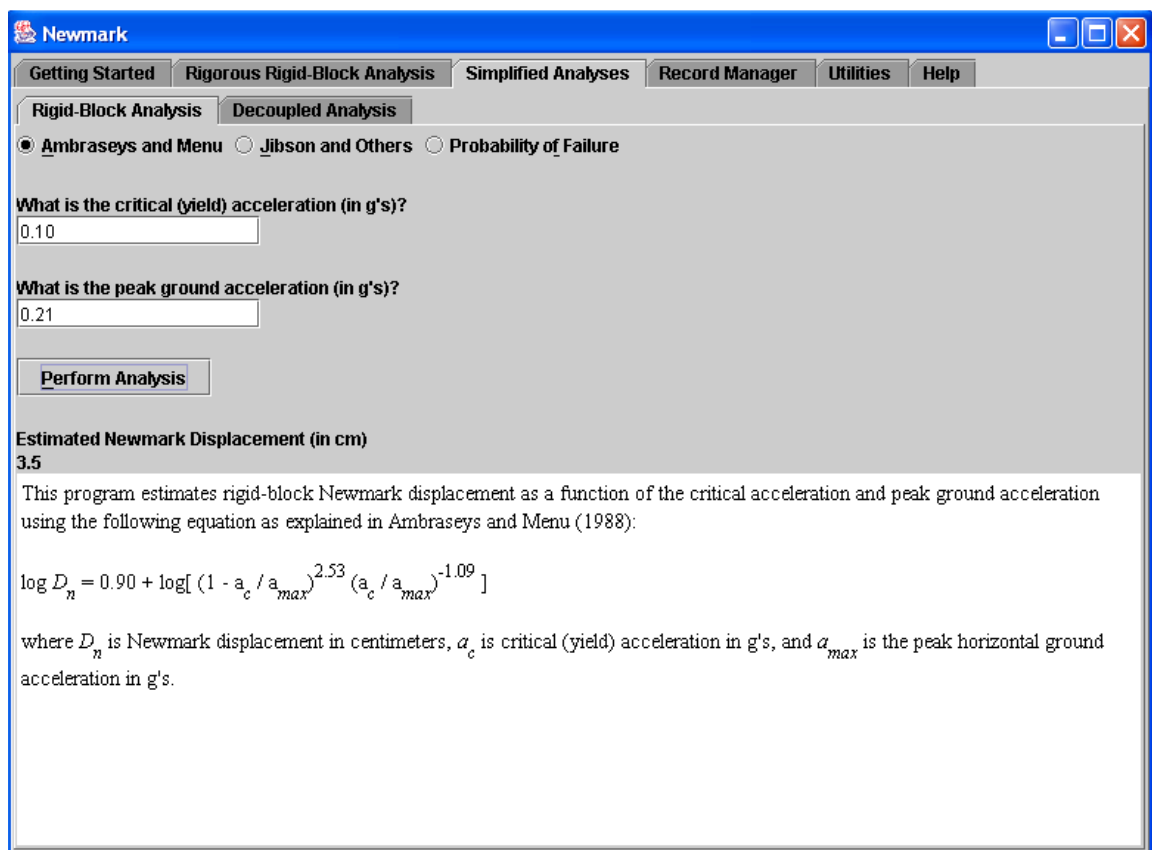


Figura 60. Análisis de ambraseys and Menu

Al realizar el análisis se obtiene un desplazamiento estimado de Newmark $D_n = 3.5\text{cm}$

- Con la opción Jibson and Others. se realiza el análisis con los valores de la aceleración crítica del deslizamiento y la Intensidad de Arias.

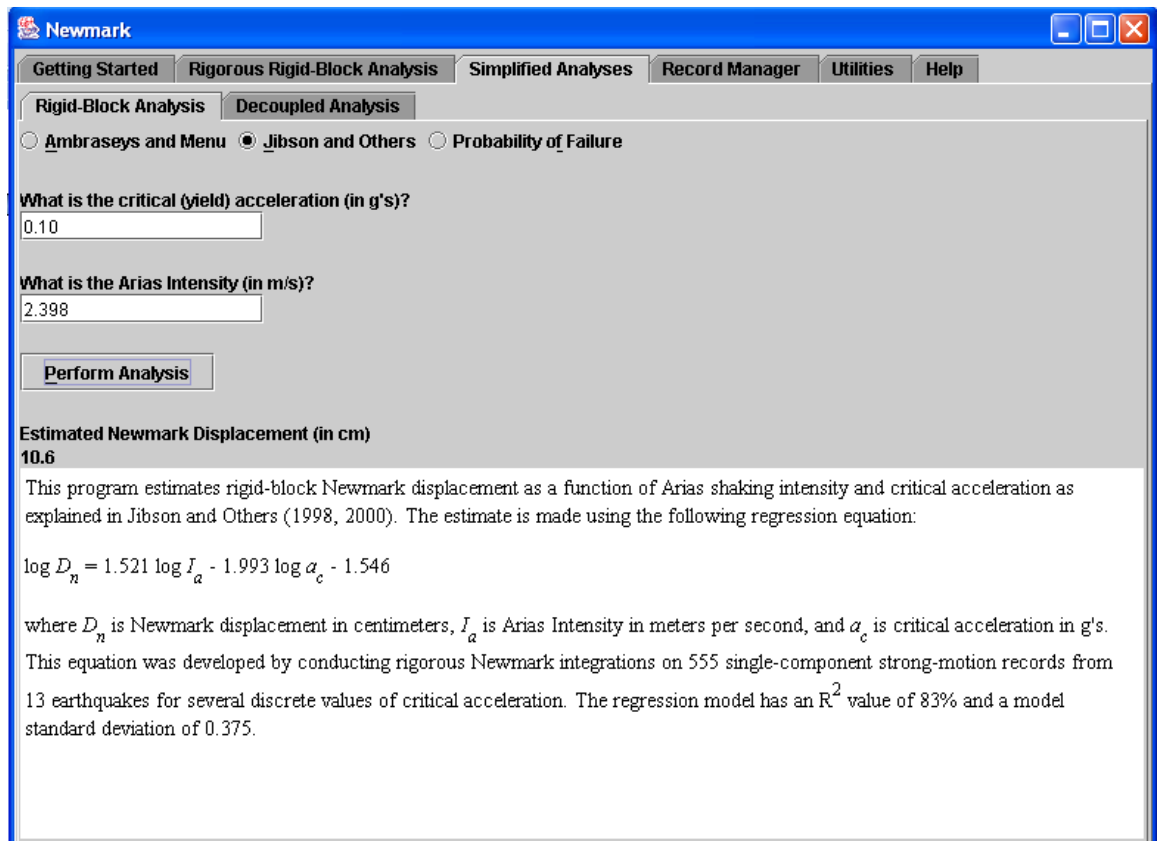


Figura 61. Análisis de Jibson and Others

Al realizar el análisis se obtuvo un desplazamiento estimado de Newmark $D_n = 10.6\text{cm}$

- El análisis del bloque rígido da la opción de calcular la probabilidad de falla.
Para este cálculo pide como dato de entrada el desplazamiento de Newmark que se calculo anteriormente.

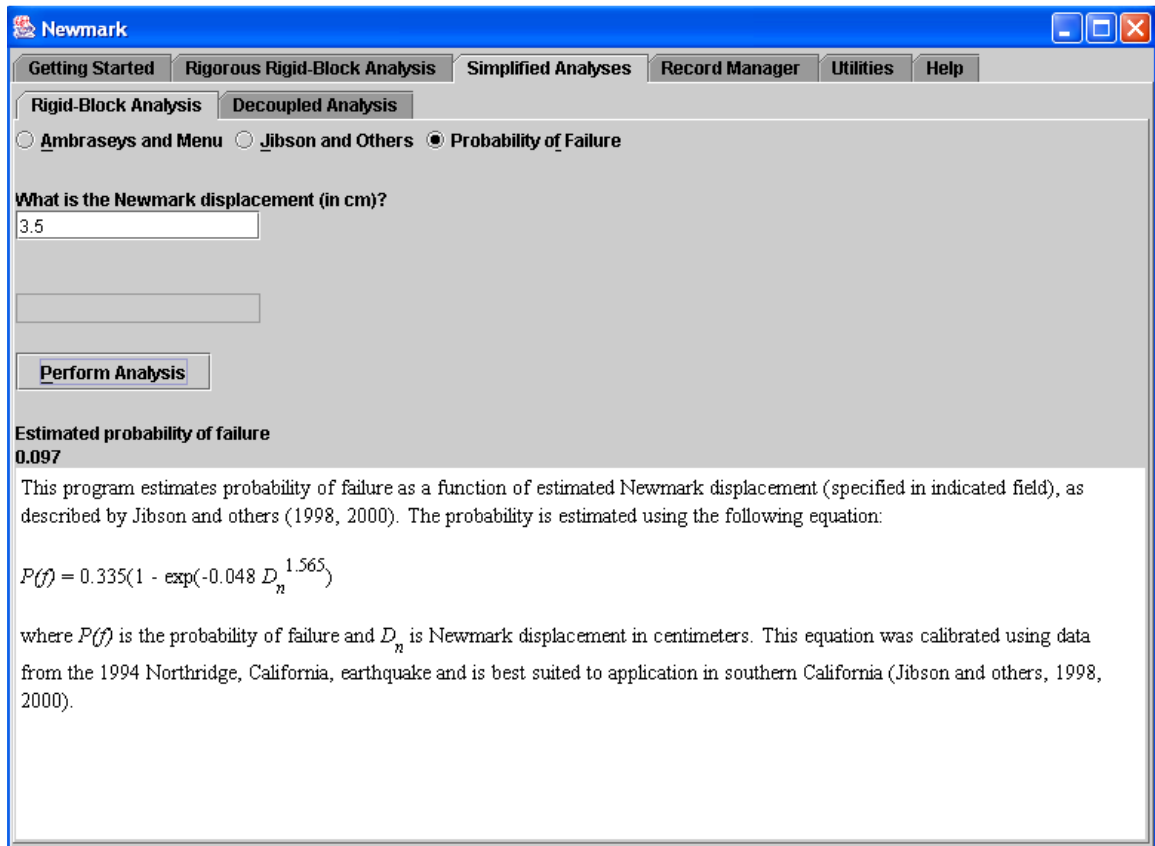


Figura 62. Calculo de la probabilidad de falla

Al introducir el desplazamiento obtenido en el análisis riguroso del bloque-rígido, se obtiene una probabilidad mayor de falla, ya que este desplazamiento fue mayor.

6.3.2.5. Análisis Desacoplado

Es una modificación del análisis tradicional de Newmark que no requiere la masa potencial deslizante para comportarse como un bloque rígido pero si obtiene una respuesta dinámica elástica.

Para este análisis se introducen los siguientes parámetros de entrada:

- *Aceleración crítica:* $A_c = 0.10g$
- *Espesor del tipo de suelo:* $h = 11m$

- Mayor distancia vertical en el tipo de suelo superior
- *Velocidad de cortante de la onda sísmica:* $V_s=426\text{m/s}$
Este valor se obtuvo de la grafica de N vs V_s ; el valor de N es un promedio de los N que se dieron en los sondeos hechos en campo.
 $N=76$ golpes/pie
- Magnitud del terremoto: $M=6$
- Aceleración máxima= $0.21g$
- Distancia: $r=20\text{km}$

The screenshot shows the Newmark software interface with the following data:

Input parameters:		Standard deviations (sigma), if known:	
Critical (yield) acceleration, A_c (g):	1.0	Normalized MHEA:	0
Vertical thickness, h (m):	11	Mean Period:	0
Shear-wave velocity, V_s (m/s):	426	Significant duration:	0
Earthquake magnitude, M :	6	Normalized displacement:	0
Peak bedrock acceleration, MHA (g):	.21		
Earthquake distance, r (km):	20		

Buttons:

Calculations:		Site screening procedure (optional):	
Site period, T_s (s):	0.103	Allowable displacement (cm):	
Mean shaking period, T_m (s):	0.453		
Period ratio, T_s/T_m :	0.228		
Duration, $D(5-95\%)$ (s):	7.329		
Non-linear response factor (NRF):	1.196		
Max. hor. equiv. acc. (MHEA), A_{max} (g):	0.251		
MHEA/(MHA * NRF):	1.000		
A_c/A_{max} :	0.398		
Normalized displacement (cm/s):	3.060		

Results:		Site screening procedure (optional):	
Estimated displacement (cm):	5.6	Median Freq for screen procedure:	
Estimated displacement (in):	2.2	Seismic coefficient for screen procedure:	

Figura 63. Cálculos para el análisis decoupled

El desplazamiento de Newmark estimado es: $D_n=5.6\text{cm}$

6.3.3. Generalizando el método de Newmark para cualquier sismo.

Haciendo un análisis general, variando las características del sismo se puede concluir para cada análisis lo siguiente:

6.3.3.1. Análisis riguroso del bloque rígido:

1. Al aumentar el valor de la A_c constante los desplazamientos (D_n) disminuyen.

6.3.3.2. Análisis simplificado:

1. Si la aceleración máxima del sismo (PGA) disminuye, el desplazamiento de Newmark también disminuye
2. Si es la aceleración crítica, a_c la que disminuye, el desplazamiento de Newmark aumentara.

6.3.3.3. Análisis Desacoplado:

1. Si aumentamos las propiedades del sismo, como la magnitud del momento, la distancia y la aceleración máxima (PGA), el desplazamiento de Newmark aumentara; aunque lo hace en mayor proporción cuando lo que aumenta es la magnitud del momento.
2. Cuando aumentamos la aceleración crítica a_c , el desplazamiento de Newmark disminuirá.

CONCLUSIONES

- ✓ La variable SISMO está dada por los valores de aceleración o respuesta sísmica evaluados previamente para la zona y dadas para cada unidad geológica superficial. La aceleración sísmica está asociada con la ocurrencia de deslizamientos de acuerdo a su intensidad y magnitud, y se representa como una carga dinámica horizontal aplicada al terreno.
- ✓ Desde la perspectiva de la amenaza sísmica se concluye que la falla de Bucaramanga es la estructura que ofrece mayor peligro, no solo por atravesar la ciudad sino por las evidencias morfotectónicas de su actividad en el Cuaternario. Por esto se localiza en zona de amenaza sísmica alta correspondiéndole una aceleración máxima horizontal (a nivel de roca) de 0.25g. El escenario sísmico se presenta en la Falla Bucaramanga y Falla Frontal de los Llanos Orientales, considerando que los posibles efectos generados por un sismo en las fallas Suárez y Salinas estarían cubiertos por dichos escenarios respectivamente.
- ✓ El escenario sísmico compatible para la falla de Bucaramanga – Santa Marta sería un evento con magnitudes entre 5.6-6.0 y distancia de la fuente al sitio entre 13-25 Km. De igual manera, el escenario sísmico compatible para la falla Frontal de los Llanos Orientales sería un evento con magnitudes entre 6.9-7.3 y distancias al sitio de 60-80 Km.
- ✓ El método pseudo-estático es un método convencional de equilibrio límite que involucra una fuerza horizontal que asemeja la fuerza producida por un sismo sobre el talud. Se recomienda que este valor sea inferior a la aceleración PGA, ya que las fuerzas sísmicas son de corta duración y por

- ✓ esto mismo en la mayoría de los casos se utilizan resistencias no drenadas para el análisis. El método presenta unas limitaciones ante suelos con presiones altas y en la degradación alta de las resistencias en algunos suelos después del sismo.
- ✓ Para el análisis del Slope/W se hace el análisis con el método de Sarma, ya que es el que tiene mayor relación con los eventos sísmicos y solo tiene en cuenta la partición vertical. Este análisis se hace asumiendo una fuerza sísmica horizontal igual a 0.15g y la componente vertical se toma como 0.0.
- ✓ Bajo condiciones de ascenso del nivel freático los factores de seguridad son menores de 1.0. Por lo tanto, en temporada de lluvias se tienen factores de seguridad menores a 1.0. En el caso de ocurrencia de un sismo de gran magnitud existe una amenaza real de que se acelere el movimiento y se produzca un efecto remontante afectando otras viviendas.
- ✓ El método de Newmark es útil para caracterizar la respuesta sísmica de un talud, teniendo en cuenta las deformaciones inducidas por eventos sísmicos. Es una solución viable entre el análisis simplista del método pseudo-estático y el sofisticado modelo de elementos finitos y puede ser aplicado a una variedad de problemas en estabilidad sísmica de taludes.
- ✓ Los métodos simplificados como el Bloque-Rígido y el desacoplado, proporcionan un camino más fácil para estimar rangos de posibles desplazamientos en casos donde la intensidad del movimiento sísmico puede ser estimada. La probabilidad de falla puede ser estimada también en situaciones seguras.
- ✓ El software USGS, modela el análisis de Newmark, para obtener los desplazamientos acumulativos del deslizamiento del talud. El análisis se

hizo con los registros de sismos que ofrece el programa que tienen propiedades similares al sismo de diseño ofrecido por Ingeominas.

- ✓ Se aplicaron los dos métodos de análisis al deslizamiento ocurrido en el barrio los colorados de Bucaramanga, presentando un talud inestable con un F.S. = 0.763. En cuanto a los desplazamientos se presentó una divergencia entre los resultados obtenidos por cada método.

BIBLIOGRAFIA

- Suarez Díaz, J. Deslizamientos. Vol. I. Cap. 7, Comportamiento sísmico de los taludes.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería. Ingeominas. Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de la zona metropolitana de Bucaramanga. 2005
- https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/1/GL62C/1/material_docente/previsualizar.php?id_material=128346
- http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0129103-133444/04CAPITULO6.pdf
- http://www.icc.es/web/gcontent/pdf/pubtec/2005_2006/2005_figueras_et_al_aplicacion.pdf
- Cornforth, D.H. (2005). "Landslides in practice" Investigation, analysis, and remedial/preventative options in soils. John Wiley & Sons Inc. Hoboken New Jersey. Pp. 596.
- Gutenberg, B., Richter, C.F. (1954) " Seismicity of the Earth" Associated Phenomena, Princeton University Press.
- Housner, G. W. (1970) "Strong ground motion en Earthquake engineering", R. Wiegel, editor, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

- Hynes, M.E. y Olsen R.S. (1999). “Influence of Confining Stress on Liquefaction Resistance.” Proceedings International Workshop on Physics and Mechanics of Soil Liquefaction. Balkema Publishers, Rotterdam, pp. 145-152.
- Ingeominas-Carder (1994) “Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial complejo de Domos Santa Isabel, cordillera central de Colombia”. Revista de Ingeominas No. 3. pp. 1-28.
- Irikura, K (1996) “Strong ground motion of the Hyogoken-Nanbu earthquake and the fault model. The Great Hanshin – Awaji Earthquake Disaster – for the Disaster Prevention Research”. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, pp81-98.
- Ishihara K.,(1985) “Stability of natural deposits during earthquakes”. Proceedings of the eleventh international conference on soil mechanics and foundation engineering. San Francisco, pp.321-376.

ANEXOS

ANEXO 1. ECUACIONES DE ATENUACION.

Ecuaciones para la atenuación de aceleración máxima del terreno (Donovan, 1973 y Ambraseys *et al.*, 1996), en donde la primera de las ecuaciones se usó para determinar los niveles de amenaza consistentes con AIS300 y la segunda curva para la determinación de los escenarios sísmicos:

$$\log(A_m) = -3.39 + 0.252M - 1.52\log(R) + 0.30P \quad \text{Donovan (1973)}$$

$$\log(A_m) = -1.39 + 0.266M - 0.922\log(R) + 0.25P \quad \text{Ambraseys et al. (1996)}$$

Ecuación para la atenuación de velocidad máxima del terreno (Joyner & Boore, 1981):

$$\log(V_m) = -0.67 + 0.489M - 0.00256R - \log(R) + 0.22P$$

Ecuaciones para la atenuación de ordenadas espectrales de aceleración (Ambraseys *et al.*, 1996):

$$\log(A_s[0.1]) = -0.84 + 0.219M - 0.954\log(R) + 0.27P$$

$$\log(A_s[0.5]) = -2.25 + 0.420M - 0.913\log(R) + 0.32P$$

$$\log(A_s[1.0]) = -3.17 + 0.508M - 0.885\log(R) + 0.32P$$

$$\log(A_s[2.0]) = -3.79 + 0.503M - 0.728\log(R) + 0.32P$$

Ecuación para la atenuación de intensidad de Arias (Sarma & Srbulov, 1998):

$$\log(IA/g^2) = -4.93 + 0.715M - 0.0038R - 1.205\log(R) + 0.53P$$

Ecuación para la atenuación de duración de movimiento fuerte (Papazachos *et al.*, 1992):

$$\log(Du) = 0.115 + 0.352M - 1.04\log(R+15) + 0.33P$$

En todas las ecuaciones M es magnitud de ondas de superficie, R es distancia horizontal a la proyección de la falla, excepto por la curva de duración y aceleración máxima (Donovan, 1973), donde se usa la distancia epicentral. P es el término para tener en cuenta la dispersión.