

# Zonificación determinística de peligros de deslizamiento

Por:

C.J. van Westen

International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC),

P.O. Box 6, 7500 AA Enschede, The Netherlands.

Tel: +31 53 4874263, Fax: +31 53 4874336, e-mail: [westen@itc.nl](mailto:westen@itc.nl)

## Resumen

En este ejercicio un modelo simple de estabilidad en pendientes (Modelo de pendientes infinitas) es utilizado para calcular mapas de factores de seguridad para diferentes condiciones. El efecto de la profundidad del agua subterránea y aceleración sísmica es evaluado utilizando mapas de estos factores para diferentes períodos de retorno de lluvia (relacionado al nivel de agua subterránea) y terremotos (relacionado a la aceleración sísmica), el modelo es generado como una función del ILWIS. Las diferentes situaciones son calculadas cambiando las variables de la función. El modelo es aplicado a un conjunto de datos de la ciudad de Manizales, parte central de Colombia.

## Iniciando



- Situado en Windows explorer cree un directorio de trabajo en el disco duro
- Extraiga los datos del archivo *Datos analisis deterministico.ZIP* desde el directorio: \Casos de estudios SIG\03 Amenazas por deslizamientos\Análisis deterministico\Datos SIG ILWISA el nuevo directorio
- Haga doble-click en el icono del programa ILWIS y vaya al directorio de trabajo que creo.

## 1 Introducción

El objetivo final del análisis del peligro de deslizamiento de tierras (escala mayores de 1:10,000) es crear mapas cuantitativos de peligro. El grado del peligro puede ser expresado por un *Factor de Seguridad*, que es la relación entre las fuerzas que causan la falla de pendiente y los que previene la falla de pendiente. F-valores mayores que 1 indica las condiciones fijas, y F-valores menores que 1 es inestable. En  $F = 1$  la pendiente está en una falla. Existen muchos modelos diferentes para el cálculo de Factores de Seguridad. Aquí usaremos uno de los modelos más sencillos, se llama *modelo de pendientes infinitas*. Este modelo dimensional describe la estabilidad de la pendiente con un infinito número de posibilidades de fallas en un plano. Se puede usar

en un SIG, cuando el cálculo se puede hacer en base a píxeles. Los píxeles de los mapas de parámetro pueden ser considerados como unidades homogéneas. El efecto de los píxeles de (vecino cercano) no se considera, y el modelo se puede usar para calcular la estabilidad de cada píxel en forma individual, teniendo como resultado un mapa del peligro de factores de seguridad. El factor de seguridad se calcula según la fórmula siguiente (Brunsden y Previo, 1979) :

$$F = \frac{c' + (\gamma - m\gamma_w) z \cos^2\beta \tan\phi'}{\gamma z \sin\beta \cos\beta} \quad [1]$$

en la cual:

- $c'$  = Cohesión efectiva (Pa= N/m<sup>2</sup>).
- $\gamma$  = Peso unitario del suelo (N/m<sup>3</sup>).
- $m$  =  $z_w/z$  (adimensional).
- $\gamma_w$  = Peso unitario del agua (N/m<sup>3</sup>).
- $z$  = Profundidad de la falla bajo la superficie (m).
- $z_w$  = Altura del nivel freático sobre la falla (m).
- $\beta$  = Inclinación de la pendiente (°).
- $\phi'$  = Angulo efectivo de la resistencia a la fricción (°).

El modelo de pendientes infinitas se puede usar en perfiles, así como también en píxeles, como se muestra en la figura 1. Todo el análisis requiere primero la preparación de la base de datos. Esto se verá en el capítulo 7. Las partes del modelo de agua subterránea y el modelo de aceleración sísmica no se muestran aquí. Para más información ver Westen (1993). En este ejercicio sólo la parte 3b1 se demostrará: El cálculo de factores promedios de seguridad para diferentes escenarios. Estos promedios de factores de seguridad se podrían usar en la creación de mapas de probabilidades de fallas.

## 2 Visualización de datos de entrada

En este ejercicio el análisis de la estabilidad de la pendiente esta hecho utilizando sólo dos mapas de parámetro: *Cenizesp* (el espesor de cenizas volcánicas) y la *Pendient* (los ángulos de la pendiente en grados).



- Haga doble-click en el mapa *Cenizesp*. Click OK en el cuadro de dialogo *Display Options* del. El mapa será desplegado.
- Mueva el puntero dentro del mapa presionando la tecla izquierda del mouse para ver la información. Como usted puede ver el área externa muestra el signo ?. Estos píxeles se llaman *no-definidos*. Esto significa que ninguna información se almacena en ellos.
- También muestre el mapa *Pendient* este contiene ángulos de pendiente en grados.

## Deterministic landslide hazard analysis

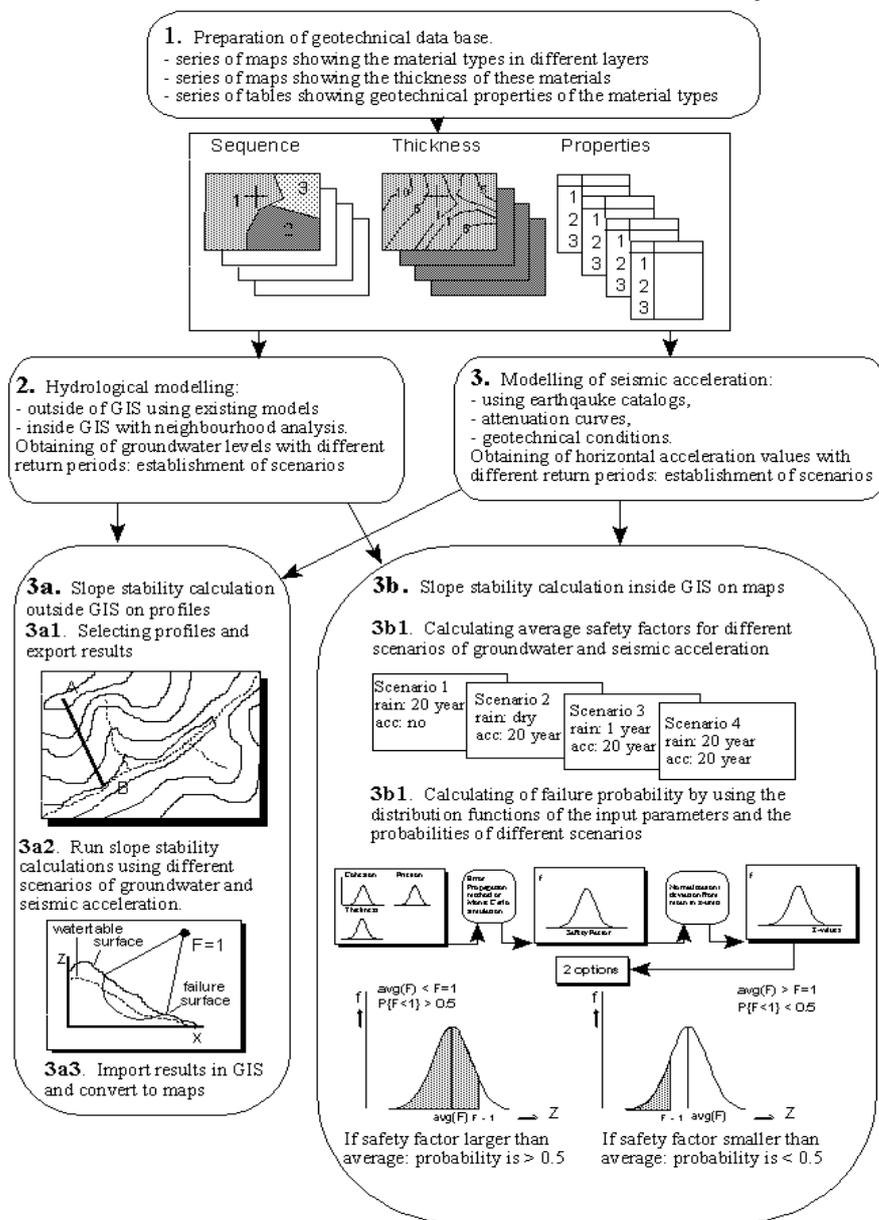


Figura 1: Organigrama determinístico para el análisis del peligro de deslizamiento de tierras

Prácticamente toda el área de estudio de Manizales está cubierta por un manto de cenizas volcánicas. En este ejercicio usted calculará la estabilidad de la cubierta de ceniza volcánica. Esto significa que la profundidad de la posible falla está en contacto con las cenizas volcánicas y el material que esta debajo. La consecuencia de este factor de seguridad no se calculará para toda el área, tan sólo para las áreas donde hay ceniza volcánica en la superficie.

Además del espesor de las cenizas, que es la profundidad de la superficie de la falla, y de la pendiente del terreno, nosotros necesitamos también saber los otros parámetros de la fórmula 1. Del análisis del laboratorio los valores promedios son conocidos:

$c'$	= cohesión efectiva (Pa= N/m <sup>2</sup> )	= 10000 Pa
$\gamma_w$	= peso unitario del agua (N/m <sup>3</sup> )	= 10000 N/m <sup>3</sup>
$z$	= profundidad de la falla bajo la superficie (m)	= mapa Cenizesp
$\beta$	= pendiente de la superficie (°)	= mapa Pendient
$\phi'$	= ángulo efectivo de la resistencia al corte (°)	= 30 °
$\tan(\phi')$	= tangente del ángulo efectivo de la resistencia al corte	= 0.58

El único parámetro desconocido es la profundidad del agua subterránea. En la fórmula 1 esto se expresa como el valor  $m$ , que es la relación entre la profundidad del agua subterránea y la profundidad de la falla.

### 3 Preparación de los datos

Antes de comenzar con el análisis, usted necesita reorganizar el mapa de las pendientes (Pendient). En el cálculo nosotros necesitamos tres parámetros que se derivan de la Pendiente:

$\sin(\text{pendiente}) = \text{seno de la pendiente}$

$\cos(\text{pendiente}) = \text{coseno de la pendiente}$

$\cos^2(\text{pendiente}) = \cos(\text{pendiente}) * \cos(\text{pendiente})$

En ILWIS las funciones seno y coseno solo trabajan con valores de entrada en radianes, mientras que nuestra pendiente está en grados. Por lo tanto nosotros necesitamos primero convertir los grados a radianes. ILWIS tiene la función Degrad para eso:

Degrad (pendiente) la función de grados a radianes:  $\text{pendiente} * 2\pi / 360$



- Escriba la siguiente fórmula en la línea de comando:  
`Pendrad:=degrad(Pendient) ↵`  
 Acepte el mínimo, el máximo y la precisión por defecto.
- Abra el resultado y compare los valores del mapa Pendrad con la pendiente del mapa. Calcule con calculadora del ILWIS o la calculadora de Windows para algunos pixeles, usando la fórmula anterior.

Ahora usted tiene la pendiente en radianes, y puede calcular el seno y el coseno. Usted calculará los mapas individuales, puesto que la fórmula del factor de Seguridad (fórmula 1) podrá ser calculado fácilmente.



- Escriba la siguiente fórmula en la línea de comando:  
`Seno:=sin(Pendrad) ↵`  
 (con esta fórmula usted calcula el seno de la pendiente).  
 Acepte el mínimo por defecto (-1), máximo (+1) y de una precisión de

0.001.

- Abra el resultado del mapa y compare los valores del mapa *Seno* con los del mapa *Pendrad*. Calcule con calculadora de ILWIS o con la calculadora de Windows algunos pixeles, usando la fórmula dada anteriormente.

- Escriba la siguiente fórmula en la línea de comando:

`Coseno:=cos(Pendrad)` ↵

(con esta fórmula usted calcula el coseno de la pendiente).

Acepte el mínimo por defecto (-1), máximo (+1) y de una precisión de 0.001.

- Abra el resultado del mapa y compare los valores del mapa *Coseno* con los del mapa *Pendrad*. Calcule con calculadora de ILWIS o con la calculadora de Windows algunos pixeles, usando la fórmula dada anteriormente.

- Escriba la siguiente fórmula en la línea de comando:

`Coseno2=sq(Coseno)` ↵

(con esta fórmula usted calcula el cuadrado del coseno, usando la función del ILWIS `Sq()`).

Acepte el mínimo, máximo y la precisión por defecto

- Verifique sus resultados otra vez

Ahora todos los parámetros necesarios para la fórmula 1 son conocidos, con excepción del parámetro *m* relacionado a la profundidad del agua subterránea.

## 4 Creando una función para la fórmula de pendiente infinita

En la siguiente sección usted usará la fórmula 1 extensamente para diferentes escenarios, y diferentes datos de entrada. Para evitar que usted tenga que repetir la fórmula cada vez es mejor crear una función definida para esto.

Además muchas funciones están pre-programadas, ILWIS da al usuario la oportunidad de crear nuevas funciones, especialmente cuando necesite ejecutar ciertos cálculos repetidamente, las funciones definidas por el usuario pueden ahorrar tiempo. Una función definida es una expresión que puede contener alguna combinación de operaciones, funciones, mapas y tablas.



- Doble-click en **New Function** de la lista de operaciones. El cuadro de dialogo **Create function** es abierto.

Para el nombre de la función: *Fs* escriba la siguiente expresión:

$$\frac{(\text{Cohesion} + (\text{Gamma} - M * \text{Gammaw}) * Z * \text{Coseno2} * \text{Tanphi})}{(\text{Gamma} * Z * \text{Seno} * \text{Coseno})}$$

Escriba la descripción: *Factor de seguridad.*

- Click **OK**. El cuadro de dialogo **Edit Function** se abra. Click **OK**.

En este cuadro de dialogo usted puede editar la función, ahora la expresión es:

```
Function fs(Value Cohesion,Value Gamma,Value M,Value  
gammaw,Value Z,Value Coseno2,Value Tanphi,Value Seno,Value  
Coseno) : Value  
Begin  
Return (Cohesion +(Gamma-M*Gammaw)*Z*Coseno2*Tanphi)  
/ (Gamma*Z*Seno*Coseno);  
End;
```

Como puede ver la función contiene las siguientes variables (listado en la primera línea):

- Value Cohesion: valores para la cohesión efectiva.
- Value gamma: valores para el peso unitario de suelos.
- Value m: valor para la relación  $z_w/w$ .
- Value gammaw: valores para el peso unitario del agua.
- Value z: el valor para la profundidad de la falla bajo la superficie.
- Value coseno2: valores para el cuadrado del coseno de la pendiente.
- Value tanphi: valor para la tangente del ángulo efectivo de la resistencia al corte.
- Value seno: valor para el seno de la pendiente.
- Value coseno: valor para el coseno de la pendiente.

Por otra parte, un número de estas variables son fijos. Usted las usará luego para todos los cálculos: las variables fijas son: Value Cohesion (10000 Pa), Value Gammaw (10000 N/m<sup>3</sup>), Value Z (mapa raster Cenizesp), Value Coseno2 (mapa raster Coseno2), Value Tanphi (0.58), Value Seno (mapa raster Seno), and Value Coseno (mapa raster Coseno).

Así puede simplificar la función considerablemente, esto es parecido a:

```
Function fs(Value Gamma,Value M) : Value  
Begin  
Return(10000+((Gamma-m*10000)*Cenizesp*Coseno2*0.58))  
/ (Gamma*Cenizesp*Seno*Coseno)  
End;
```

Como usted puede ver hay solo dos variables: Value Gamma y Value M.



- Edite la Function hasta que esté de la forma anterior. Click OK.

## 5 Calculando el factor de seguridad para agua subterránea

Ahora que la función esta creada, usted puede empezar a calcular el factor de seguridad para diferentes situaciones. En la primera parte calculará el factor de seguridad para diferentes situaciones, donde solamente la lluvia es el factor incidente. Usted todavía no esta viendo la influencia de un terremoto.

### Condiciones secas

Primero calculará el factor de seguridad para la ceniza volcánica bajo el criterio que el suelo se encuentra completamente seco. En este caso el parámetro  $m$  es igual a cero. Recuerde los otros parámetros que fueron dados en la anterior página:

$c'$ =	Cohesión Efectiva (Pa= N/m <sup>2</sup> )	= 10000 Pa
$\gamma$ =	Peso unitario del suelo (N/m <sup>3</sup> )	= 11000 N/m <sup>3</sup>
$\gamma_w$ =	Peso unitario del agua (N/m <sup>3</sup> )	= 10000 N/m <sup>3</sup>
$z$ =	Profundidad de la falla bajo la superficie (m)	= mapa Cenizesp
$m$ =	Relación $z_w/z$ (sin dimensiones)	= 0
$\beta$ =	Pendiente de la superficie (°)	= mapa Pendient
$\phi'$ =	Ángulo efectivo de la resistencia al corte (°)	= 30 °
$\tan(\phi')$ =	Tangente del ángulo efectivo de la resistencia al corte	= 0.58
$\sin(\beta)$ =	Seno del ángulo de la pendiente	= mapa Seno
$\cos(\beta)$ =	Coseno del ángulo de la pendiente	= mapa Coseno
$\cos^2(\beta)$ =	Cuadrado del coseno del ángulo de la pendiente	= mapa Coseno2

Ahora puede empezar con el cálculo real del promedio del factor de seguridad del mapa representando una situación bajo condiciones secas. Las dos variables para la función  $f_s$  son 11000 (Value Gamma) y 0 (Value M).



- Escriba la siguiente fórmula en la línea de comando:

```
Fseco:=fs(11000,0) ↵
```

- Use un mínimo de 0, un máximo de 100, y una precisión de 0.1. Use la georeferencia Manizal.
- Despliegue los resultados y compare los valores del mapa  $F_{seco}$  con los del mapa de entrada. Calcule el factor de seguridad manualmente para algunos pixeles con calculadora, utilizando la fórmula 1.

Como puede imaginarse una situación completamente seca no puede ocurrir en regiones tropicales tal como Manizales, la cual recibe bastante lluvia cada año. De todos modos el mapa  $F_{seco}$  da una situación mas estable, veamos cuanto por ciento del área es inestable bajo estas condiciones. Para saberlo, clasificaremos primero el mapa  $F_{seco}$  en tres clases:

No estable	= Factor de seguridad menor que 1
Crítico	= Factor de seguridad entre 1 y 1.5
Estable	= Factor de seguridad por encima de 1.5

☞

- Cree un nuevo dominio Estable (tipo class, group) con las siguientes tres clases:

Límite	Nombre
1	No estable
1.5	Crítico
100	Estable

- Use la operación Slicing para clasificar el mapa Fseco con el dominio Estable al mapa Fsecoc.
- Calcule un histograma del mapa Fseco y anote los porcentajes de las tres clases en una tabla en hoja de papel con el nombre de la columna Seco. Luego calcularemos los valores para otras situaciones.

El porcentaje de los pixeles clasificados como inestables le da a usted una indicación del error, desde que la ocurrencia de pixeles inestables bajo condiciones completamente secas no sea posible.

### Condiciones completamente saturadas

La próxima situación que usted evaluará es una condición en la cual las pendientes están completamente saturadas. Esto tampoco es una situación muy realista, pero esto nos dará una estimación pesimista de la estabilidad de las pendientes, con solo un factor incidente involucrado (principalmente la lluvia para elevar el nivel freático).

Cuando nosotros tenemos un suelo saturado, el factor  $m$  de la fórmula 1 es igual a 1. Esto significa que el nivel freático esta en la superficie. Hay también otro factor que es diferente para condiciones saturadas  $\gamma$ :

$c' =$	Cohesión Efectiva (Pa= N/m <sup>2</sup> )	= 10000 Pa
$\gamma =$	Unidad de peso del suelo (N/m <sup>3</sup> )	= 16000 N/m <sup>3</sup>
$\gamma_w =$	Unidad de peso del agua (N/m <sup>3</sup> )	= 10000 N/m <sup>3</sup>
$z =$	Profundidad de la falla bajo la superficie (m)	= mapa Cenizesp
$m =$	Relación $z_w/z$ (adimensional)	= 1
$\beta =$	Pendiente de la superficie (°)	= mapa Pendient
$\phi' =$	Angulo de la resistencia efectiva de la resistencia a la fricción (°)	= 30 °
$\tan(\phi') =$	Tangente del ángulo efectivo de la resistencia a la fricción	= 0.58
$\sin(\beta) =$	Seno del ángulo de la pendiente	= mapa Seno
$\cos(\beta) =$	Coseno del ángulo de la pendiente	= mapa Coseno
$\cos^2(\beta) =$	Cuadrado del coseno del ángulo de la pendiente	= mapa Coseno2

Las dos variables para la función  $f_s$  son 16000 (value gamma) y 1 (value m).



- Escriba la siguiente fórmula en la línea de comando:

`Fsat:=fs(16000,1) ↵`

- Use un mínimo de 0, un máximo de 100, y una precisión de 0.1. Utilice la georeferencia `Manizal`.
- Abra el resultado de los valores del mapa `Fsat` y compárelos con el mapa `Fseco`. Calcule el factor de seguridad manualmente para algunos píxeles con la calculadora del ILWIS o la calculadora de Windows utilizando la fórmula dada anteriormente.
- Use la operación `Slicing` (bajo una imagen procesada) para clasificar el mapa `Fsat` con el dominio `Estable` al mapa `Fsatc`.
- Calcule un histograma del mapa `Fsatc` y anote los porcentajes de las tres clases en una tabla en hoja de papel con el nombre de la columna `Sat`. Después compare con la columna `Seco`. Luego calcularemos los valores para otras situaciones.

### Otras situaciones del agua subterránea

Utilizando estas fórmulas y los archivos creados en el anterior ejercicio, un número de situaciones puede ser calculado. Hemos escogido algunas situaciones, basado en las combinaciones siguientes:

- Cuando el agua subterránea alcanza el máximo, que puede ocurrir una vez durante dos meses del año (período de retorno: 0.164 año)

$m = \text{mapa } M016, \gamma = 14000$

- Cuando el agua subterránea alcanza el máximo, que puede ocurrir una vez durante un año (período de retorno: 1 año)

$m = \text{mapa } M1, \gamma = 14000$

- Cuando el agua subterránea alcanza el máximo, que puede ocurrir una vez cada 20 años (período de retorno: 20 años)

$m = \text{mapa } M20, \gamma = 14000$

- Cuando el agua subterránea alcanza el máximo, que puede ocurrir una vez cada 50 años (período de retorno: 50 años)

$m = \text{mapa } M50, \gamma = 14000$

Los mapas `M016`, `M1`, `M20` y `M50` fueron calculados con un modelo hidrológico, la explicación de como estos fueron calculados está más allá del alcance de este ejercicio.



- Muestre el mapa `M016`, `M1`, `M20` y `M50`.
- Compare los valores de estos mapas en el `Pixel information window`.
- Calcular el factor de seguridad del mapa para la primera situación, escriba la fórmula siguiente en la línea de comando:

`Fm016:=fs(14000,m016) ↵`

- Con esta fórmula usted calcula el factor de seguridad para una situación, donde hay un pico de agua subterránea que ocurre una vez cada dos meses. Para  $m$  usamos ahora el mapa: M016, cuando los valores de  $m$  son distintos para diferentes condiciones del terreno. Compare la fórmula con la 1 dada en el texto. Use un mínimo de 0, un máximo de 100, y una precisión de 0.1.
- Use la operación **Slicing** para clasificar el mapa Fm016 con el dominio **Estable** dentro del mapa Fm016c.
- Calcule un histograma del mapa Fm016 y anote los porcentajes de las tres clases en una tabla en hoja de papel con el nombre de la columna 2 meses/año. Compárelos con las columnas **Seco** y **Sat**.
- Luego calcule el factor de seguridad de los mapas para las otras tres condiciones:
  - (a) Fm1 para la condición donde el agua subterránea una vez al año, y usar el mapa M1.
  - (b) Fm20 para la condición donde el agua subterránea que ocurre una vez cada 20 años, y usar el mapa M20.
  - (c) Fm50 Para la condición de la tabla subterránea que ocurre una vez al año, y usar el mapa M50.
- Clasificar todos los mapas usando el dominio **Estable** y calcule los porcentajes de las tres clases (inestable, crítica, estable) escriba estos valores en su tabla, y compárelos.

Ahora que nosotros tenemos calculados todas las situaciones, nosotros podemos compararlas. Esto puede hacerse en una tabla.



- Cree una tabla con el dominio **Estable**.
- Ir a **Columns, Join** y seleccione **Table** histogram de **Fsecoc**; use la columna **Npixpct**. El nombre de salida es **Seco**. Acepte por defecto los valores.
- También una los histogramas de los mapas Fm016c, Fm1c, Fm20c, Fm50c y Fsatc. De luego el nombre M016, M1, M20, M50 y Sat.
- Seleccione **Options, Show Graph** y muestre cada una de las columnas.
- Muestre cada una de estas columnas con **Estable** value en gráficos de barra en diferentes colores.
- Haga las conclusiones del efecto del agua subterránea sobre la estabilidad de las cenizas volcánicas en el área.

## 6 Evaluación del efecto de la aceleración sísmica

También es posible incluir el efecto de la aceleración sísmica en el modelo de pendiente infinita. Cuando el efecto de la aceleración del terremoto es incluida la fórmula 1 se convierte a:

$$F = \frac{c' + (z\gamma \cos^2\beta - z\rho\alpha \cos\beta \sin\beta - \gamma_w z_w \cos^2\beta) \tan\phi'}{z\gamma \sin\beta \cos\beta + z\rho\alpha \cos^2\beta} \quad [2]$$

en el cual:

$c'$ =	Cohesion efectiva (Pa= N/m <sup>2</sup> ).
$\gamma$ =	Peso unitario del suelo (N/m <sup>3</sup> ).
$m$ =	$z_w/z$ (adimensional).
$\gamma_w$ =	Peso unitario del agua (N/m <sup>3</sup> ).
$z$ =	Profundidad de la falla bajo la superficie (m).
$z_w$ =	Altura del nivel freático sobre la superficie de la falla (m).
$\beta$ =	Pendiente de la superficie (°).
$\phi'$ =	Angulo efectivo de la resistencia al corte (°).
$\rho$ =	Densidad aparente en (kg/m <sup>3</sup> ).
$a$ =	Aceleración del terremoto (m/s <sup>2</sup> ).

La densidad aparente ( $\rho$ ) es igual a 1100 kg/m<sup>3</sup> para condiciones secas, 1600 kg/m<sup>3</sup> para condiciones saturadas y 1400 kg/m<sup>3</sup> para condiciones intermedias.

$a$  es la aceleración del terremoto, la cual depende de la magnitud del terremoto y la amplificación.

El pico de la aceleración es obtenido por la multiplicación del pico de aceleración en roca dura ( $A_h$ ) con la amplificación debido a los cambios en las propiedades del suelo y el agua subterránea (N)

$$a = A_h * N \quad [3]$$

La amplificación de mapas está relacionado a ciertos picos de agua subterránea, y algún período de retorno, como los utilizados en un mapa de agua subterránea: (N016, N1, N20, N50). La aceleración pico en rocas duras se obtiene de las siguientes fórmulas:

$$M_s = 8.2 - 2.9 \log(57 / RY) \quad [4]$$

y

$$A_h = 1320 e^{0.58M} (R + 25)^{-1.52} \quad [5]$$

En la tabla 1 estan dados algunos períodos de retorno, aceleración pico para magnitudes de 3 a 7, distancia al hipocentro de 112 km (100 km. verticalmente por 50 km. horizontal), de acuerdo a las fórmulas.

Tabla 1

Magnitud	Periodo de retorno (años)	Distancia Horizontal al epicentro (km.)	Distancia Vertical del hipocentro (km.)	Distancia al hipocentro (km.)	Aceleración pico en la cabeza de roca ( $A_h$ )	
					cm/s <sup>2</sup>	g
3	0.92	50	100	112	4.25	0.0043
4	2.03	50	100	112	7.59	0.0077
5	4.49	50	100	112	13.56	0.0138
6	9.94	50	100	112	24.21	0.0247
7	21.98	50	100	112	43.25	0.0440

Basado en esta información usted puede establecer varias situaciones. Seis serán presentadas aquí, pero usted puede crear más con los datos disponibles:

1. Condiciones secas, sin terremotos.
2. Agua subterránea con período de retorno de 20 años, sin terremotos.
3. Condiciones completamente saturados, sin terremotos.
4. Condición seca, y terremotos de magnitud 7.
5. Agua subterránea con período de retorno de 0.16 años, y terremotos de 7 M.
6. Agua subterránea con período de retorno de 20 años, y terremotos de 7 M.

Para los casos que incluyen aceleración del terremoto se tiene que utilizar un valor para la aceleración máxima ( $A_h$ ), como se muestra en la tabla y en los mapas amplificados relacionados a un cierto pico del agua subterránea, y el mismo período de retorno; como en los mapas de agua subterránea: (NO16, N1,N20,N50).



- Cree una función  $F_{snuevo}$  en base a la fórmula 2.
- Liste los parámetros necesarios para cada caso de los 6 listados anteriormente.
- Calcule el factor de seguridad para cada caso, utilizando la función  $F_{snuevo}$ .
- Clasifique el resultado del factor de seguridad con el dominio Estable.
- Calcule el porcentaje de las tres clases y muestre estos en un gráfico.
- Haga las conclusiones sobre los efectos del agua subterránea y la aceleración de terremotos sobre la estabilidad de la ceniza volcánica en el área.

## Referencias

- Soeters, R. and Van Westen, C.J. (1996). Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation. In: Turner, A.K. and Schuster, R.L. (eds), *Landslides, investigation and mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington D.C., U.S.A., p 129-177.
- Van Westen, C.J., Van Duren, I, Kruse, H.M.G., and Terlien, M.T.J. (1993). *GISSIZ: training package for Geographic Information Systems in Slope Instability Zonation*. ITC-Publication Number 15, ITC, Enschede, The Netherlands. Volume 1: Theory, 245 pp. Volume 2: Exercises, 359 pp. 10 diskettes.
- Van Westen, C.J. (1994). GIS in landslide hazard zonation: a review, with examples from the Andes of Colombia. In: Price, M. and Heywood, I. (eds), *Mountain Environments and Geographic Information Systems*. Taylor & Francis, Basingstoke, U.K. pp 135-165.
- Van Westen, C.J. and Terlien, M.T.J. (1996). An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS. A case study from Manizales (Colombia). *Earth Surface Processes and landforms*, 21: 853-868.