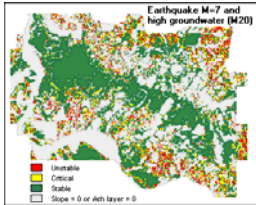


5. Análisis Determinístico para el mapeo de Amenaza por Deslizamientos. Estudio de caso: Manizales, Colombia



Cees van Westen

International Institute
Aerospace Survey and Earth
Sciences
(ITC), Enschede, The
Netherlands.
E-mail: westen@itc.nl

UNESCO RAPCA



Objetivos

- En este ejercicio, un modelo simple de la estabilidad de la pendiente (el *modelo pendiente infinita*) será utilizado para calcular mapas de un factor de seguridad para diferentes condiciones.
- El efecto del agua del suelo y la aceleración sísmica es evaluada por medio de la utilización de mapas de entrada de estos factores, para diferentes períodos de retorno tanto de la lluvia (relacionada con el nivel de agua del suelo), como de los terremotos (relacionados con la aceleración sísmica).
- En ILWIS, el modelo es representado por una *función definida por el usuario*. Se calcula diferentes escenarios por medio del cambio de las variables en esta función. El modelo es aplicado a un conjunto de datos de la ciudad de Manizales, en Colombia central.

UNESCO RAPCA



Esfuerzo o Stress de corte

Fuerza de corte = $W \sin \beta / A$

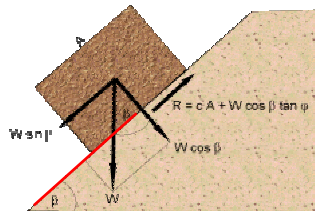
Fuerza de corte (Mohr-Coulomb criterion)

$$s = c + \sigma \tan \phi$$

σ = stress normal = $W \cos \beta / A$

c = cohesion (KPa)

ϕ = ángulo interno de fricción (grados)



ϕ y c son propiedades geo-técnicas, que son medidas en el laboratorio utilizando pruebas triaxiales o pruebas de cajas de corte (shearbox).

UNESCO RAPCA

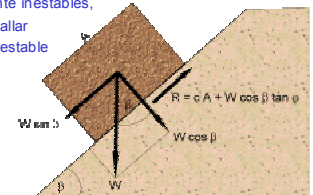


Factor de Seguridad

El grado de amenaza en la pendiente puede ser expresado por el Factor de Seguridad (F), que es la relación que entre las fuerzas que hacen que "falle" la pendiente y las fuerzas que la previenen de esto.

- $F < 1$ condiciones de pendiente inestables,
- $F = 1$ pendiente a punto de fallar
- $F > 1$ condiciones pendiente estable

$$F = \frac{cA + W \cos \beta \tan \phi}{W \sin \beta}$$



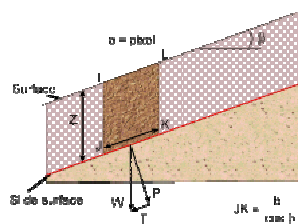
UNESCO RAPCA



Pendiente infinita

Pendiente Infinita:

- Condiciones en la parte más alta y baja de la pendiente son ignoradas.
- Las fuerzas resultantes de la izquierda y derecha son iguales.



Peso del Bloque (Weight of the block):

$$W = \gamma b Z$$

γ = unidad de peso del suelo (N/m^3).

Componente de corte del peso:

$$T = \gamma b Z \sin \beta$$

Componente Normal del peso:

$$P = \gamma b Z \cos \beta$$

UNESCO RAPCA



Pendiente Infinita

Stress = Fuerza / area

Componente de corte del peso: Stress de corte

$$T = \gamma b Z \sin \beta \quad \tau = \frac{T}{JK} = \frac{\gamma b Z \sin \beta}{b \cos \beta} = \gamma Z \sin \beta \cos \beta$$

Componente Normal del peso: Stress Normal:

$$P = \gamma b Z \cos \beta \quad \sigma_n = \frac{P}{JK} = \frac{\gamma b Z \cos \beta}{b \cos \beta} = \gamma Z \cos^2 \beta$$

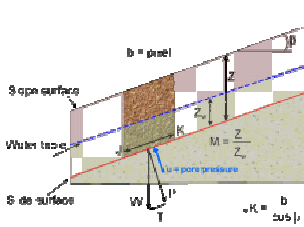
Factor de Seguridad:

$$F = \frac{c' + (\gamma Z \cos^2 \beta) \tan \phi}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta}$$

UNESCO RAPCA



Pendiente Infinita & presión de agua



Altura de la tabla de agua sobre la superficie de corte
 $Z_w = m Z$

Peso del Agua:

$$W_w = \gamma_w b z_w = \gamma_w m b m Z$$

Componente Normal del peso de agua:

$$P_w = \gamma_w b m Z \cos \beta$$

Presión de poros en JK:

$$u = \frac{\gamma_w b m Z \cos \beta}{\cos \beta} = \gamma_w m Z \cos^2 \beta$$

Factor de seguridad incluyendo la presión de poros:

$$F = \frac{c' + (\gamma Z \cos^2 \beta - u) \tan \phi}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta}$$

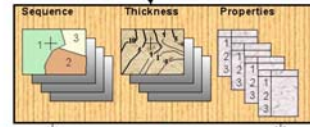
$$F = \frac{c' + (\gamma Z \cos^2 \beta - \gamma_w m Z \cos^2 \beta) \tan \phi}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta} = \frac{c' + (\gamma - m \gamma_w) Z \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta}$$

UNESCO RAPCA



Deterministic landslide hazard analysis

- Preparation of geotechnical data base
 - series of maps showing the material types in different layers
 - series of maps showing the thickness of these materials
 - series of tables showing geotechnical properties of the material types



- Hydrological modelling
 - outside of GIS using existing models
 - inside GIS with neighbourhood analysis
 Obtaining of groundwater levels with different return periods: establishment of scenarios

- Modelling of seismic acceleration
 - using earthquake catalogs
 - attenuation curves
 - geotechnical conditions
 Obtaining of horizontal acceleration values with different return periods: establishment of scenarios

- Slope stability calculation outside GIS on profiles
 - Selecting profiles and export results

- Slope stability calculation inside GIS on maps
 - Calculating average safety factors for different scenarios of groundwater and seismic acceleration
 - Calculating failure probability by using the distribution functions of the input parameters and the probabilities of different scenarios

UNESCO RAPCA



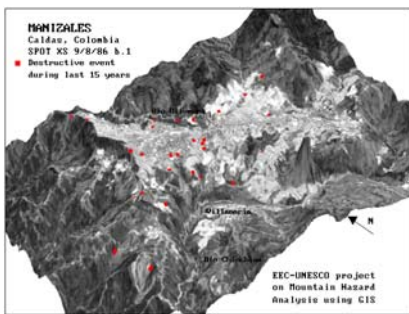
Estudio de Caso: Manizales



UNESCO RAPCA



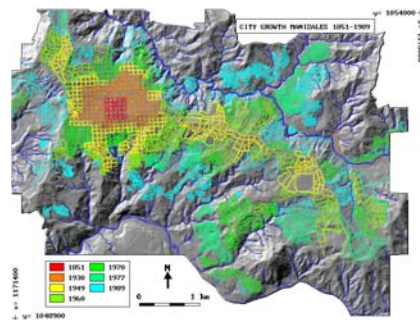
Manizales en vista 3D



UNESCO RAPCA



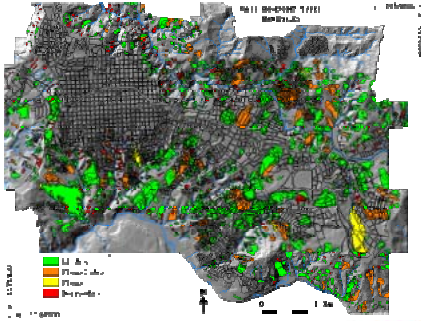
Crecimiento de la ciudad, Manizales



UNESCO RAPCA



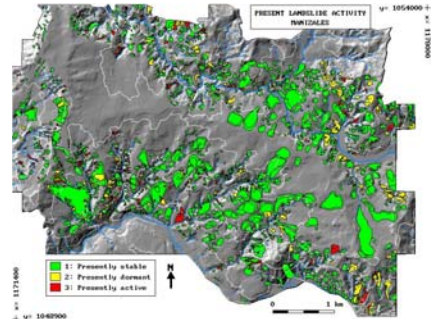
Tipos de movimiento de masas



UNESCO RAPCA



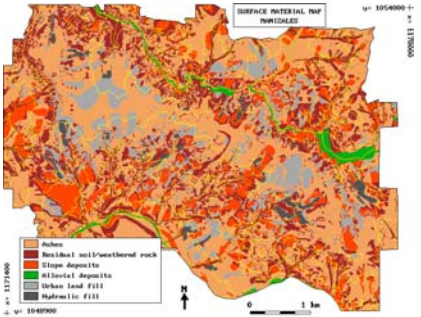
Actividad de deslizamientos



UNESCO RAPCA



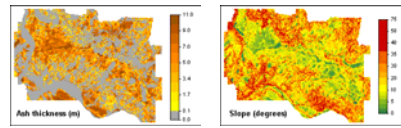
Materiales superficiales



UNESCO RAPCA



Datos de entrada



c' = effective cohesion ($\text{Pa} = \text{N/m}^2$).
 γ = unit weight of soil (N/m^3).
 m = z_w/z (dimensionless).
 γ_w = unit weight of water (N/m^3).
 z = depth of failure surface below the surface (m).
 z_w = height of watertable above failure surface (m).
 β = slope surface inclination ($^\circ$).
 ϕ' = effective angle of shearing resistance ($^\circ$).

10000
 variable Γ
 10000
 map ASHT
 map SLOPE
 30° , thus $\tan \phi' = 0.58$

UNESCO RAPCA



Información de la pendiente

- Las funciones cálculo de mapas de ILWIS (Mapcalc functions) trabajan con radianes y no con grados
 e.g. $360 \text{ degrees} = 2 * \pi \text{ radials} = 2 * 3.14 = 6.3832$
- Con algunos cálculos del Mapcalc en donde se utilizarán las funciones propias de ILWIS de: DEGRAD(), SIN(), COS(), and SQ(); se deben preparar algunos mapas que serán utilizados frecuentemente en esta aplicación
 - mapa SI, seno de la pendiente
 - mapa CO, coseno de la pendiente
 - mapa CO2, coseno cuadrado de la pendiente

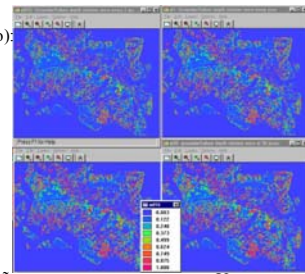
$$F' = \frac{c' + (\gamma - m\gamma_w)Z\cos^2\beta \tan\phi}{\gamma Z\sin\beta \cos\beta}$$

UNESCO RAPCA



Mapas mostrando la relación Z/Zw (m) para diferentes períodos de retorno

Durante dos meses al año (seco):
 $\Gamma = 14000$,
 $m = M016$



Una vez al año:
 $\Gamma = 14000$,
 $m = M1$

Una vez cada 20 años:
 $\Gamma = 14000$, $m = M20$

Una vez en 50 años:
 $\Gamma = 14000$, $m = M50$

UNESCO RAPCA



Función definida por el usuario

$$F = \frac{c' + (\gamma - m\gamma_w)Z \cos^2\beta \tan\phi}{\gamma Z \sin\beta \cos\beta}$$

- La fórmula del factor de seguridad que se presenta arriba será transformada en una función definida por el usuario FS. Esta función ya contiene los parámetros concedes (mapas ASHT, SI, CO, CO2 y las constantes concedes) pero también contiene las variables Γ y m .
- La función puede ser aplicada fácilmente para varias alturas de tablas de agua (z_w), por medio del llenado de las variables Γ y m . Como resultado se obtendrán un determinado número de mapas del Factor de Seguridad, para alturas específicas de tablas de agua.
- La función FS se lee:
 $(10000 + ((\Gamma - m * 10000) * ASHT * CO2 * 0.58)) / (\Gamma * ASHT * SI * CO)$

UNESCO RAPCA



Escenarios

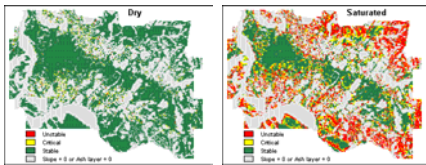
$$(10000 + ((\Gamma - m * 10000) * ASHT * CO2 * 0.58)) / (\Gamma * ASHT * SI * CO)$$

- Para el escenario seco, $\Gamma = 11000$, y sin agua $z_w = 0$ y por lo tanto también $m = 0$.
 Para obtener el mapa con el Factor de Seguridad para el escenario seco (FSDRY), la función FS se aplican los parámetros 11000 and 0.
 $F_{DRY} = FS(11000, 0)$
- Para el escenario saturado, $\Gamma = 16000$, y cuando todo el suelo sobre la superficie de falla está saturado con agua, $z_w = z$ por lo que $m = 1$.
 Un mapa con el Factor de Seguridad para el escenario saturado (FSAT) es calculado utilizando la función FS con los parámetros 16000 y 1. $F_{SAT} = FS(16000, 1)$
- Subsecuentemente, la función FS es aplicada repetidamente en la línea de comandos y los mapas del Factor de Seguridad son calculados para un determinado número de escenarios con diferentes alturas de la tabla de agua. Para cada escenario, se provee un valor para Γ y los valores para m se encuentran en un determinado número de mapas de agua subterránea (M016, M1, M20, M50).

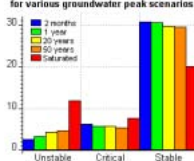
UNESCO RAPCA



Resultados



Areas (pct) of slope stability classes, for various groundwater peak scenarios



	fdry	fm016	fm1	fm20	fm50	fsat
Unstable	0.21	2.58	3.17	4.22	4.55	11.78
Critical	1.25	6.19	5.80	5.56	5.37	7.62
Stable	37.93	30.65	30.45	29.64	29.50	20.01

- Los Factores de Seguridad son calculados para cada escenario
- También la aceleración de un terremoto se puede incorporar

UNESCO RAPCA

