

# CARTOGRAFÍA GEOTÉCNICA

## *Metodos Físicos*

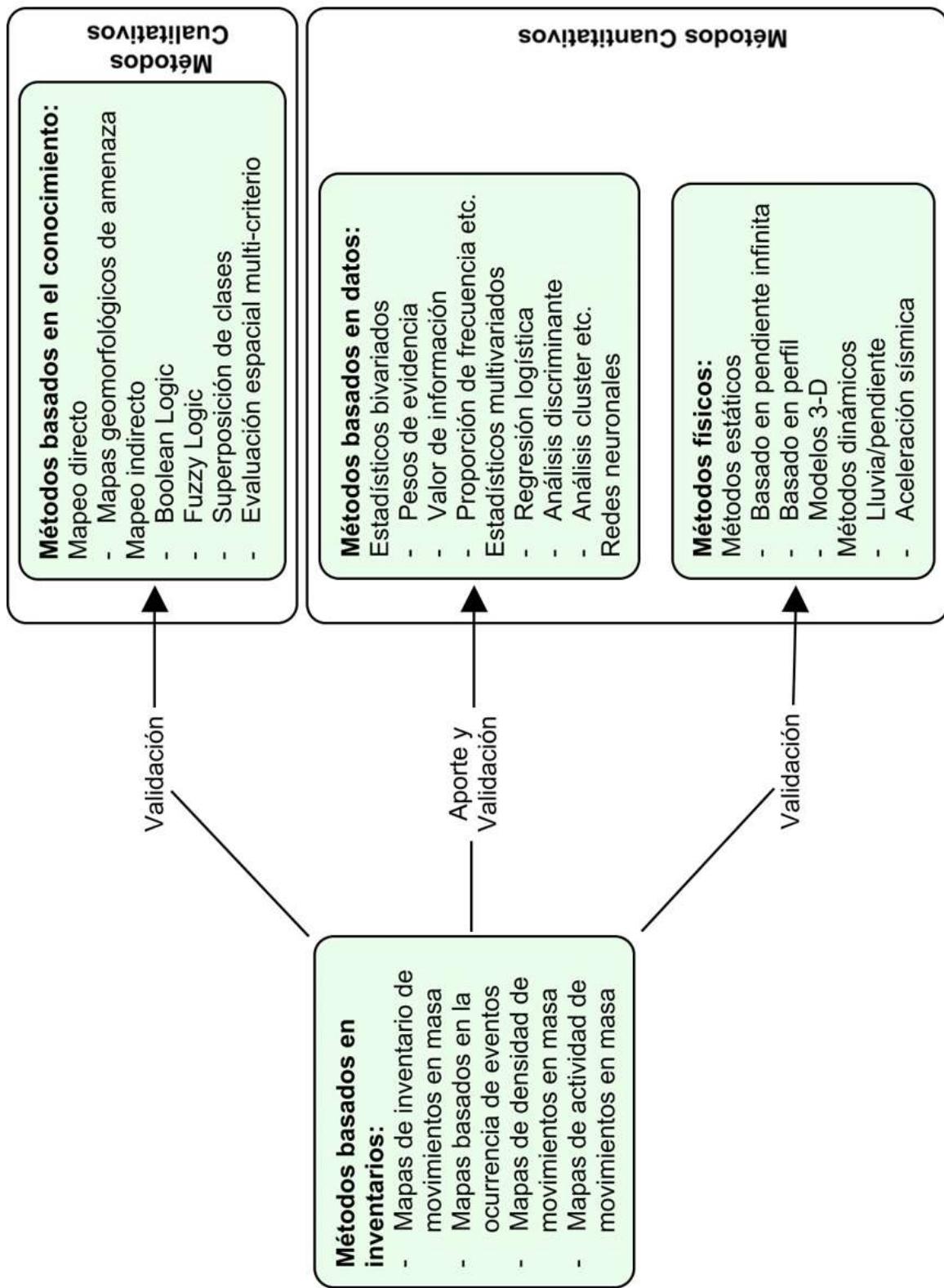
Prof. Edier Aristizábal



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

Nov, 3 / 2020



# Metodos Físicos

- Son basados en modelar los procesos que dan lugar a los deslizamientos utilizando modelos de estabilidad de laderas (base física).
- La mayoría de modelos con base física utilizan el modelo de talud infinito, por lo que son aplicables para modelar deslizamientos planares superficiales.
- Pueden ser subdivididos en modelos estáticos, que no incluyen el componente del tiempo, y modelos dinámicos, los cuales utilizan la entrada de un intervalo de tiempo como la entrada del próximo intervalo. Estos modelos consideran la respuesta transitoria del agua en el suelo de la ladera a la lluvia.
- Los modelos hidrológicos son incorporados asumiendo un flujo paralelo a la ladera en un estado estático como función de la pendiente y el área de drenaje, o de forma dinámica evaluando el proceso completo desde la lluvia a la respuesta transitoria del agua en el suelo.
- Los modelos dinámicos de susceptibilidad a deslizamientos señalan la variación espacial y temporal de los deslizamientos, por lo que son aplicables a la evaluación de la amenaza.

## Ventajas

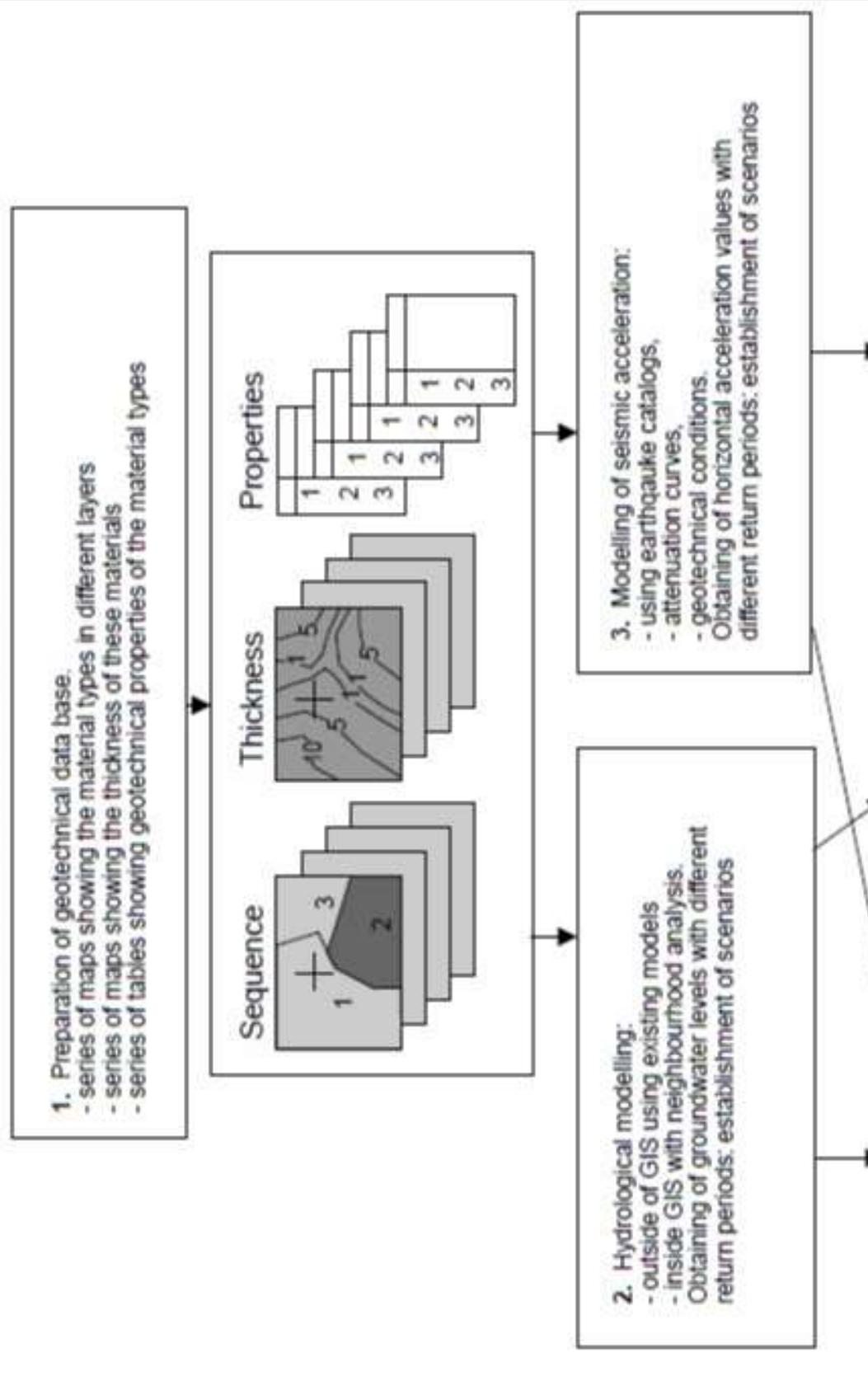
- En general se pueden obtener mapas de amenaza de forma cuantitativa a través del factor de seguridad y probabilidades de falla.
- Existen diferentes aproximaciones a la física del problema.

## Desventajas

- Requieren una gran cantidad de información de entrada de detalle, a partir de ensayos de laboratorio o mediciones en campo.
- Solamente recomendables para pequeñas áreas a escalas detalladas.
- Consumen mas tiempo y recursos para obtener la información necesaria.
- La parametrización de los modelos puede ser complicada, en especial la distribución espacial de la profundidad del suelo, la cual juega un papel fundamental.
- El grado de simplificación del problema

Fuente: AGS (2007) Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk assessment

## Deterministic landslide hazard analysis

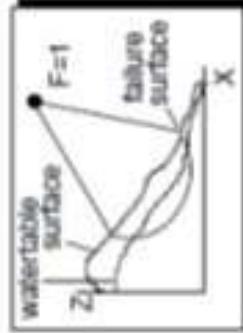


Fuente: van Westen et al. (1997)

- 3a. Slope stability calculation outside GIS on profiles  
3a1. Selecting profiles and export results



- 3a2. Run slope stability calculations using different scenarios of groundwater and seismic acceleration

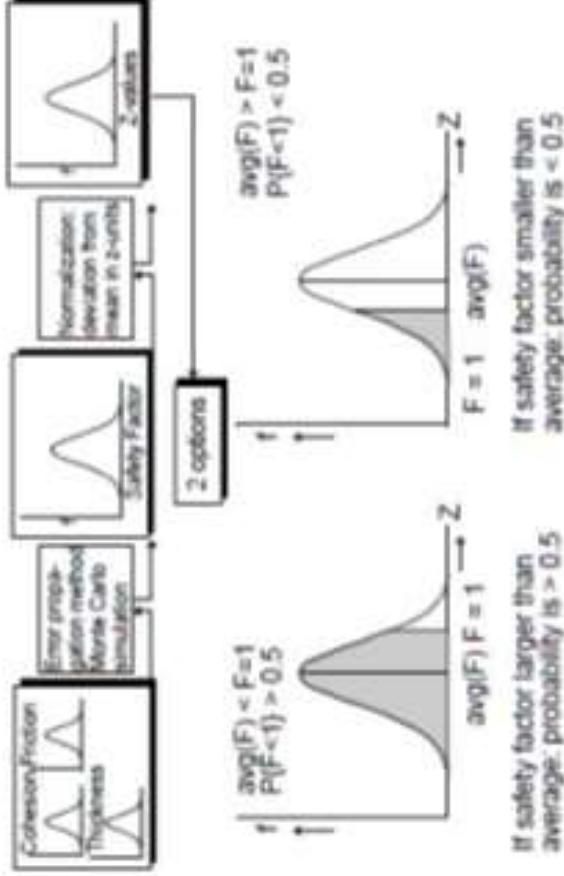


- 3a3. Import results in GIS and convert to maps

- 3b. Slope stability calculation inside GIS on maps  
3b1. Calculating average safety factors for different scenarios of groundwater and seismic acceleration



- 3b2. Calculating of failure probability by using the distribution functions of the input parameters and the probabilities of different scenarios



Fuente: van Westen et al. (1997)

# Los hechos ocurrren por destino (causa – efecto) o por suerte (aleatoriamente)?

Laplace (1814) “Given for one instant an intelligence which could comprehend all the forces by which nature is animated and the respective situation of the beings who compose it -an intelligence sufficiently vast to submit these data to analysis - it would embrace in the same formula the movement of the greatest bodies of the universe and those of the lightest atom; for it, nothing would be uncertain and the future, as the past, would be present to its ayes”

Henri Poincaré “...even if it were the case that the natural laws had no longer any secret for us, we could still only know the initial situation approximately. If that enabled us to predict the succeeding situation with the same approximation, that is all we require, and we should say that the phenomenon had been predicted, that it is governed by laws. But it is not always so - it may happen that small differences in the initial conditions produce very great ones in the final phenomena. A small error in the former will produce an enormous error in the latter...”

Baecher & Christian (2003) “*Las probabilidades es una reconciliación de dichos puntos de vista extremos. Y se soporta en que el mundo es de hecho impredecible, pero principalmente por nuestro desconocimiento inadecuado de su funcionamiento. El mundo puede o no comportarse por necesidad (causa – efecto), pero en cualquier evento nosotros somos ignorantes del estado inicial y de los detalles de las leyes naturales, por lo tanto el mundo solo puede describirse como si fuera aleatorio.*”

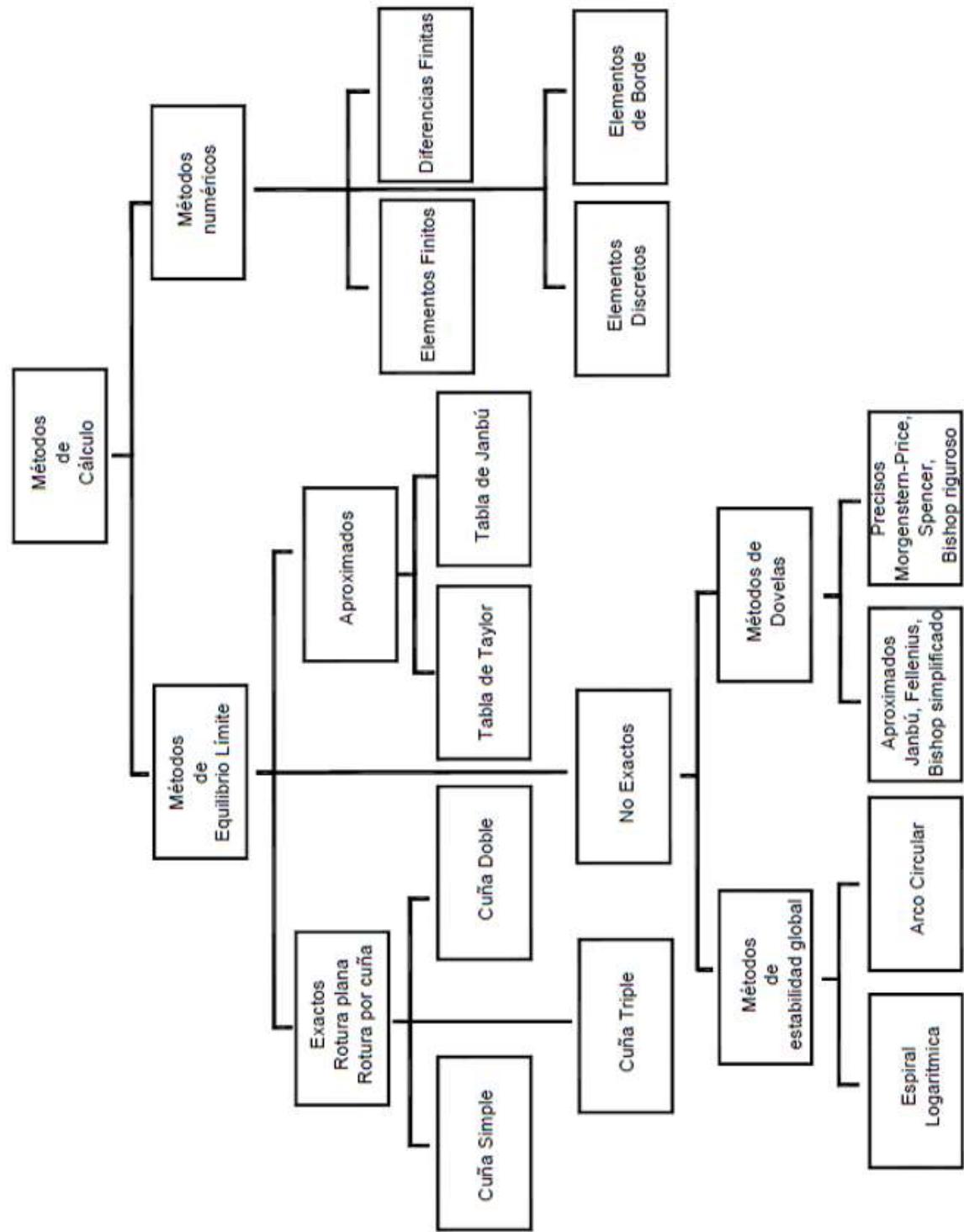
**Enfoque determinístico**

- ✓ Los parámetros de diseño se suponen constantes
- ✓ Resultado calculado es único
- ✓ Factor de seguridad como índice de estabilidad

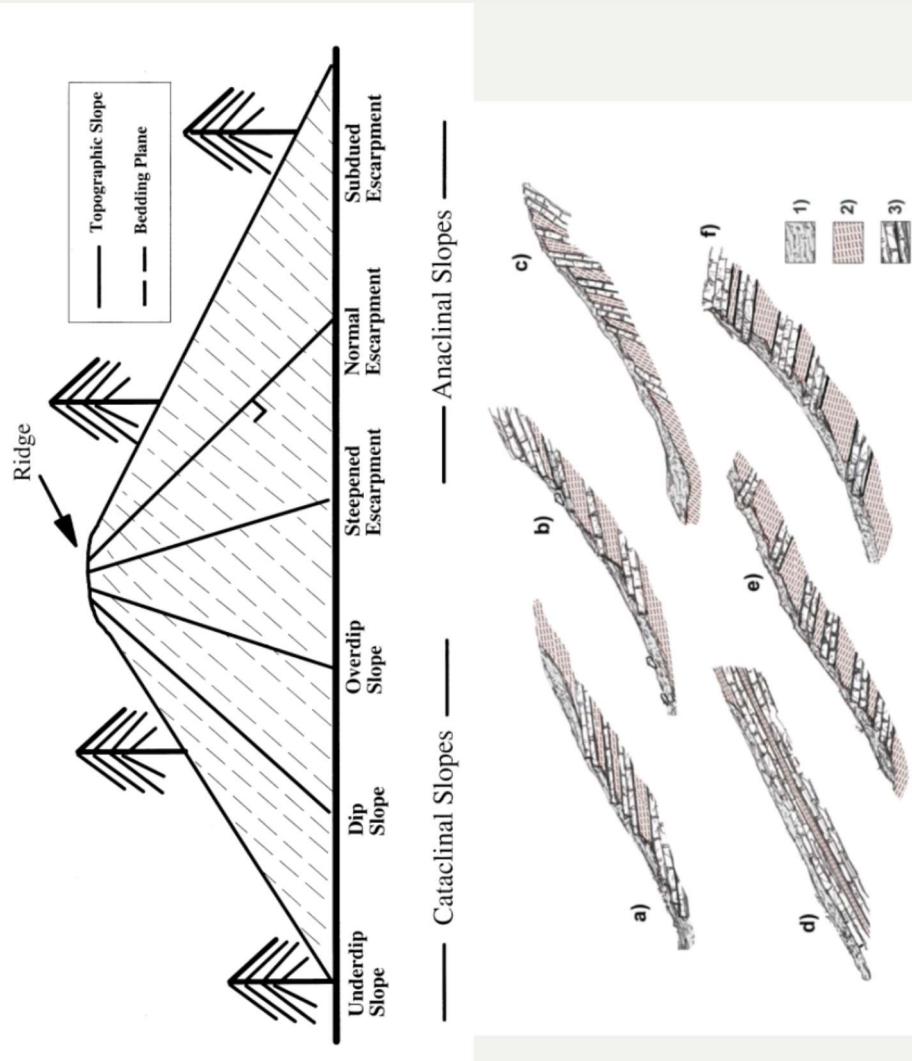
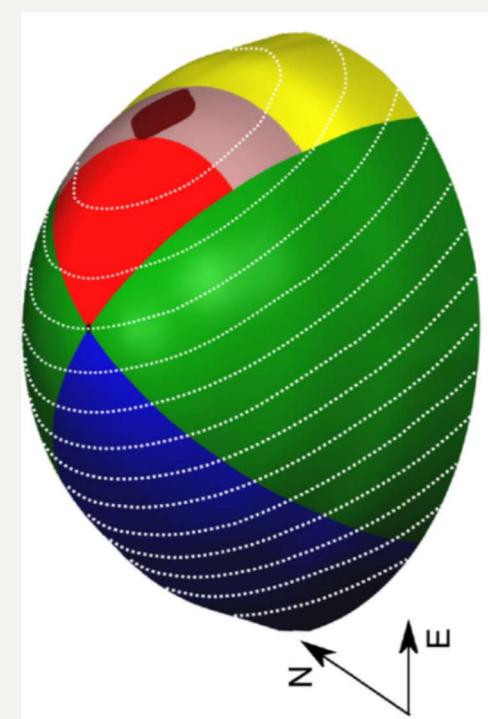
**Enfoque probabilístico**

- ✓ Los parámetros de diseño son variables
- ✓ Resultado calculado es una distribución de probabilidad
- ✓ Parámetros adicionales: la **probabilidad de ruptura, Índice de confiabilidad**

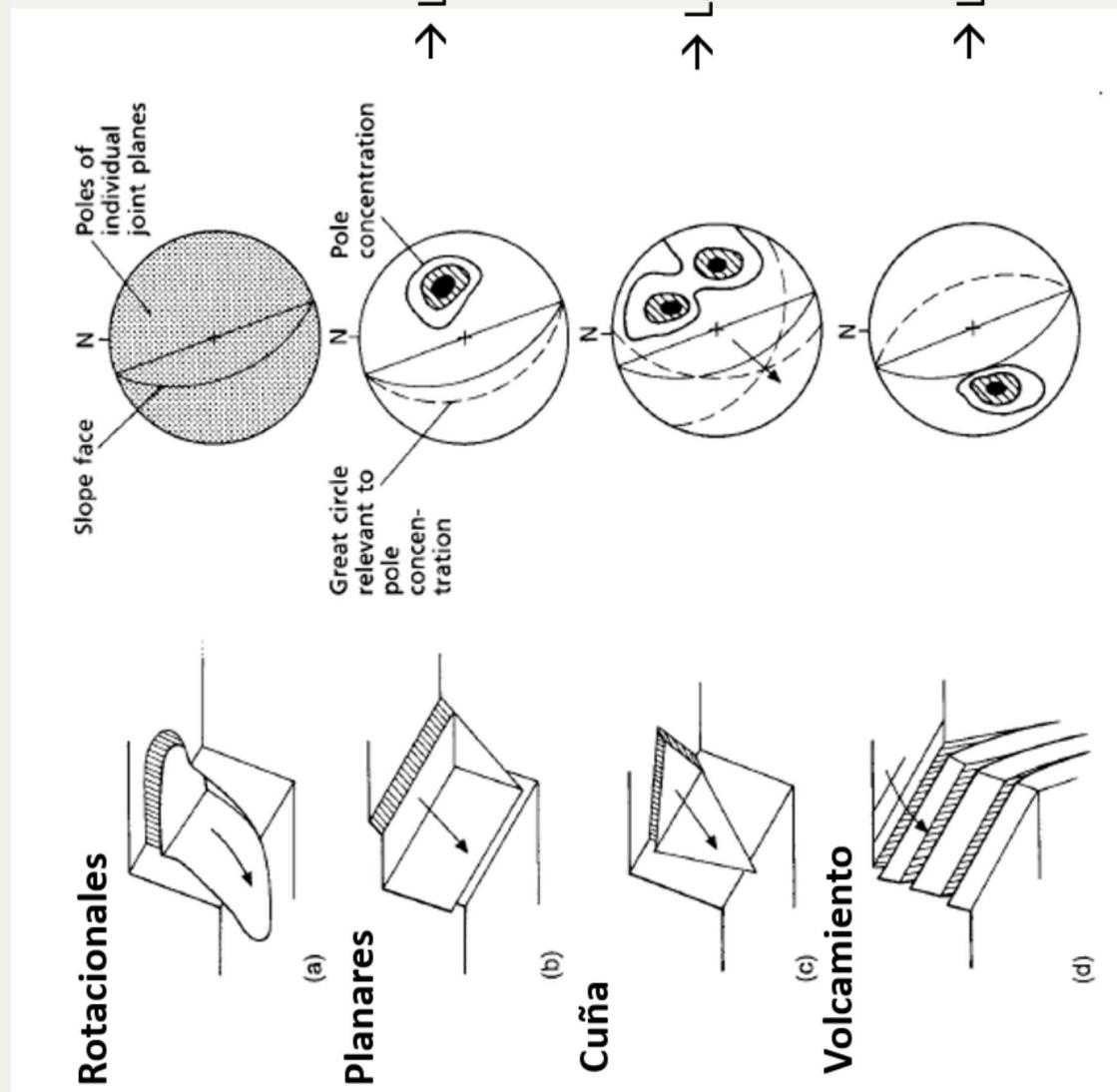
# Métodos de estabilidad



# Análisis Cinemático



Fuente: Santangelo et al. (2014); Meentemeyer & Moody (2000); Grelle et al (2011)

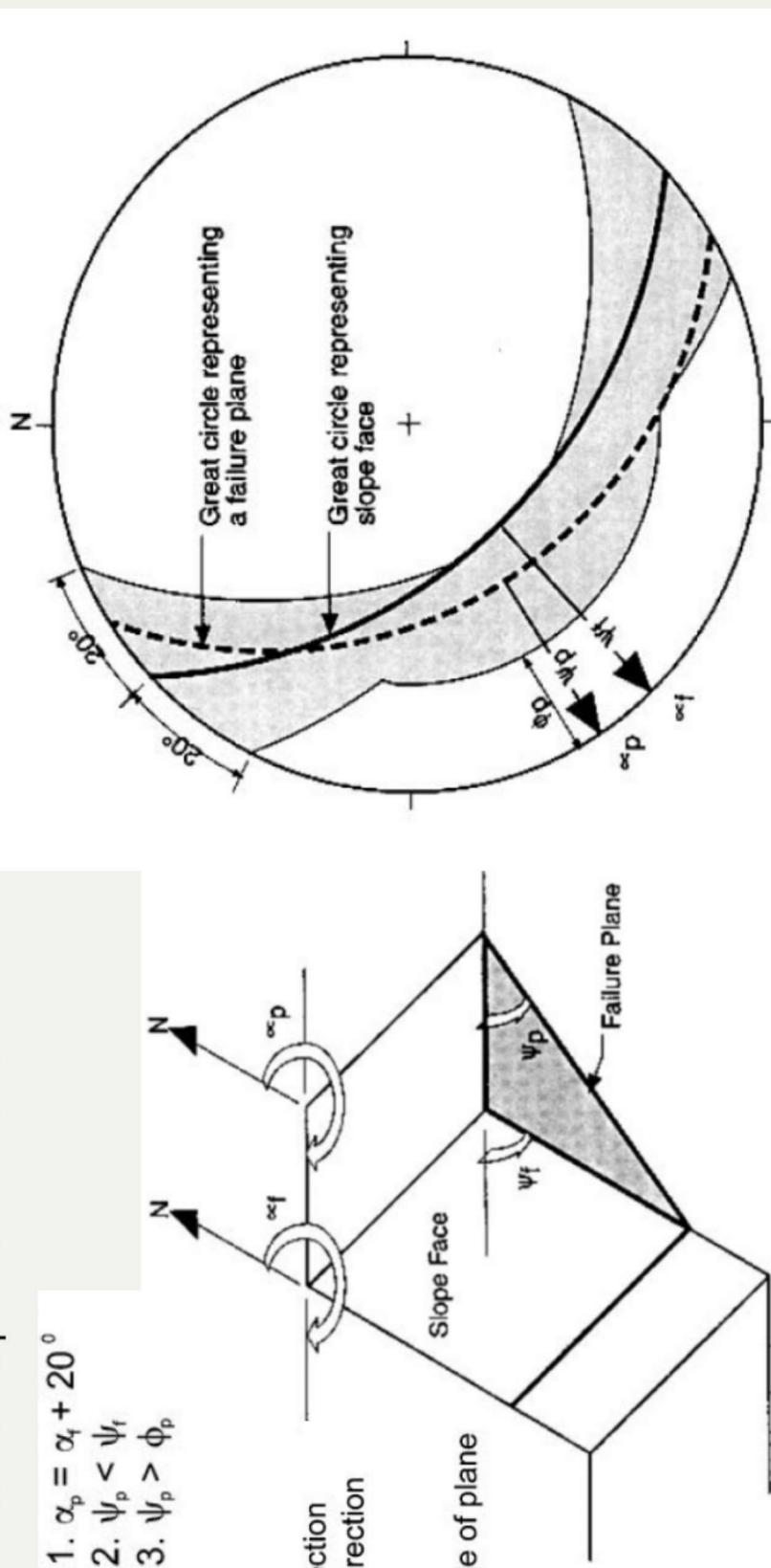


Fuente: Chica (1989); Herrera (2000) – Análisis de estabilidad de taludes

Criterios cinemáticos para definir la falla:

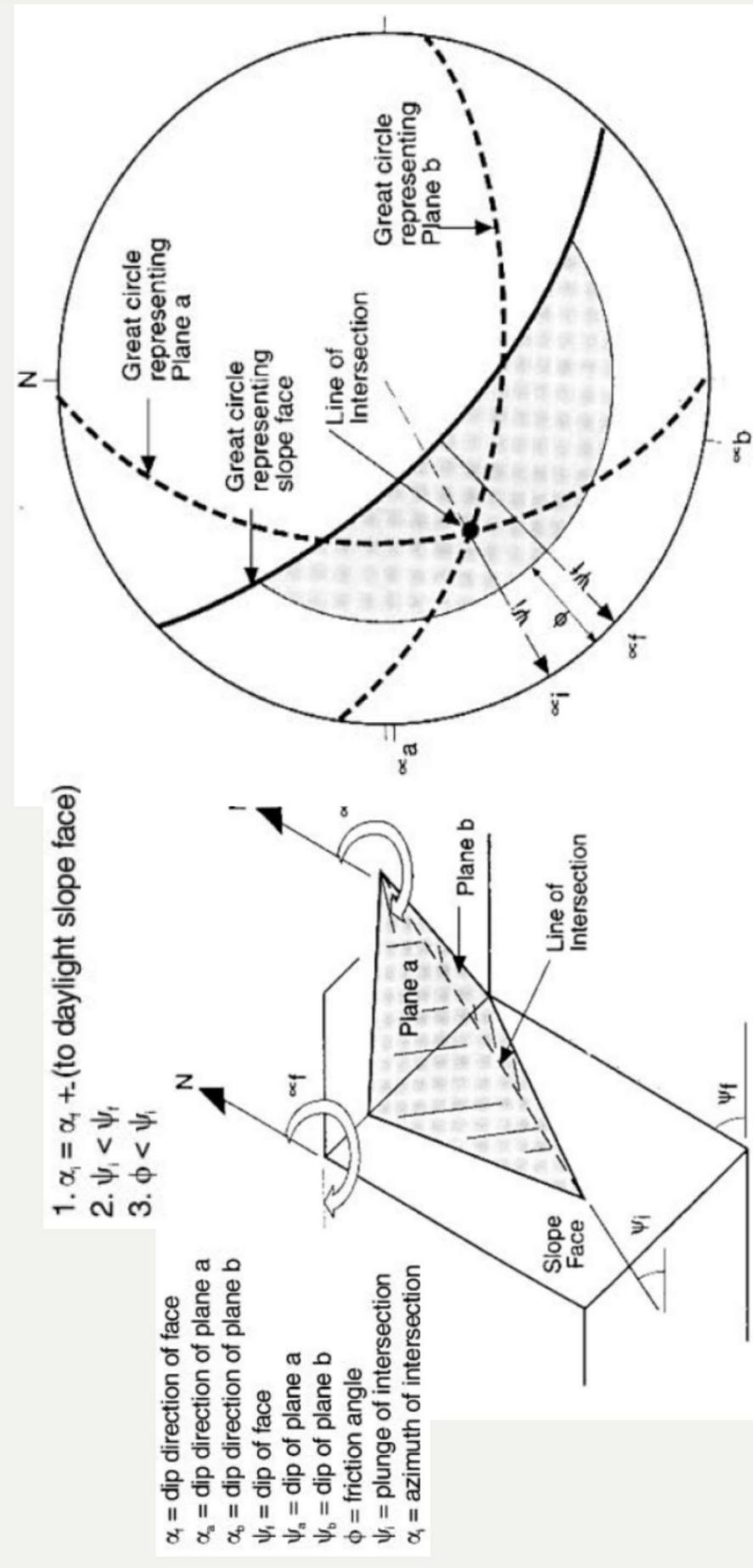
1.  $\alpha_p = \alpha_i + 20^\circ$
2.  $\psi_p < \psi_i$
3.  $\psi_p > \phi_p$

$\alpha_i$  = face dip direction  
 $\alpha_p$  = plane dip direction  
 $\psi_i$  = face dip  
 $\psi_p$  = plane dip angle of plane  
 $\phi_p$  = friction angle of plane



Fuente: Gokceoglu et al. (2000)

## Criterios cinemáticos para definir la falla:



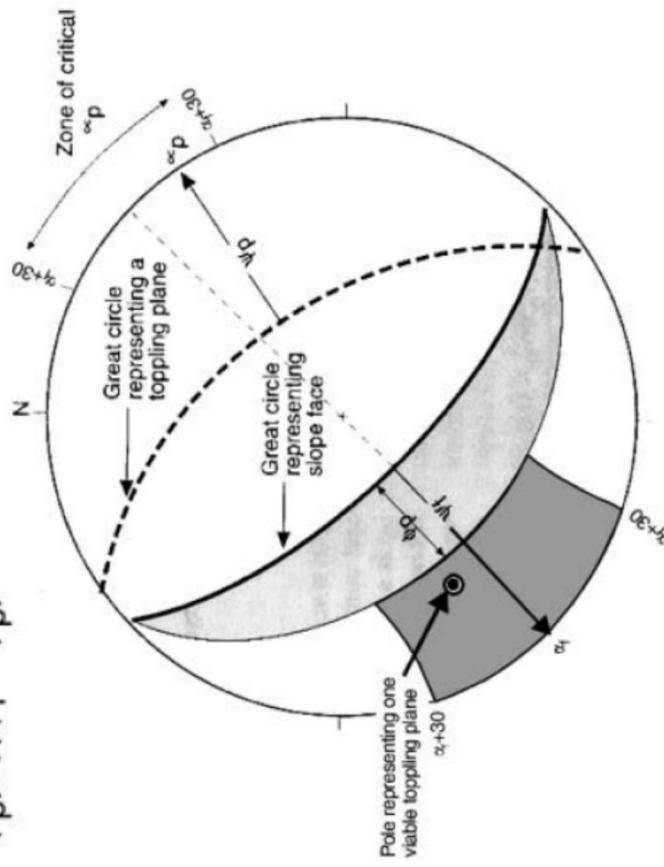
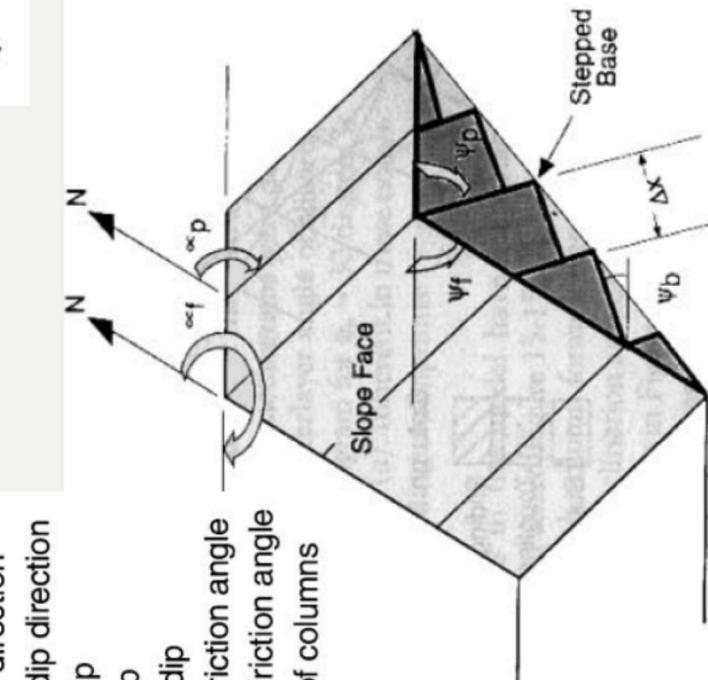
Fuente: Gokceoglu et al. (2000)

Criterios cinemáticos para definir la falla:

$$1. \alpha_p = (\alpha_f \pm 180^\circ) \pm 30^\circ$$

$$2. (90^\circ - \psi_p) \leq (\psi_f - \phi_p)$$

$\alpha_f$ =face dip direction  
 $\alpha_p$ =plane dip direction  
 $\psi_b$ =base dip  
 $\psi_f$ = face dip  
 $\psi_p$ = plane dip angle  
 $\phi_b$ = base friction angle  
 $\phi_p$ = plane friction angle  
 $\Delta x$ =width of columns

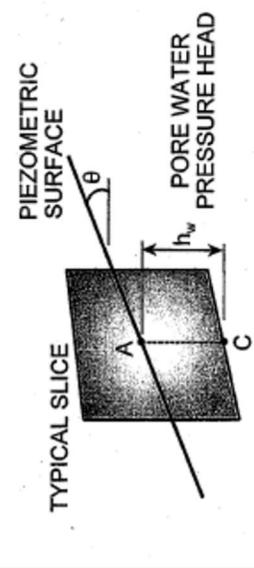
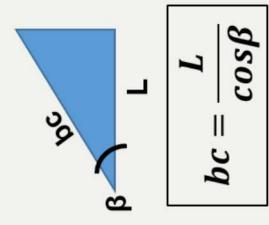
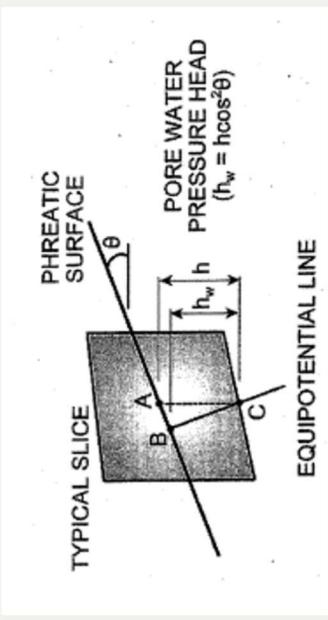


Fuente: Gokceoglu et al. (2000)

# Deslizamientos planares

## Nivel Freático

### Superficie Piezométrica



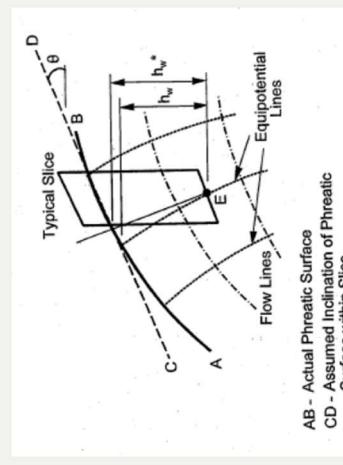
$$h_w = h$$

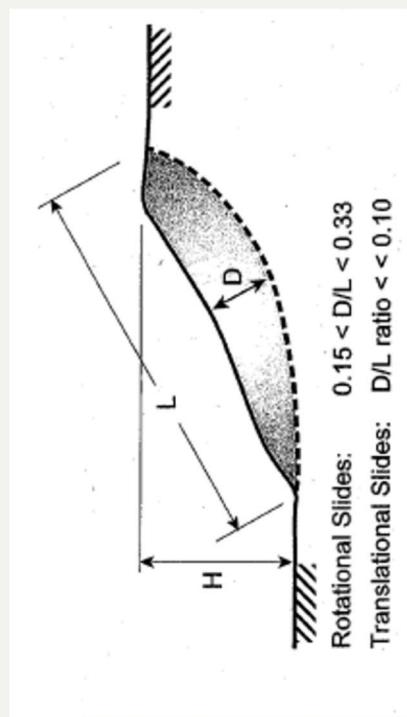
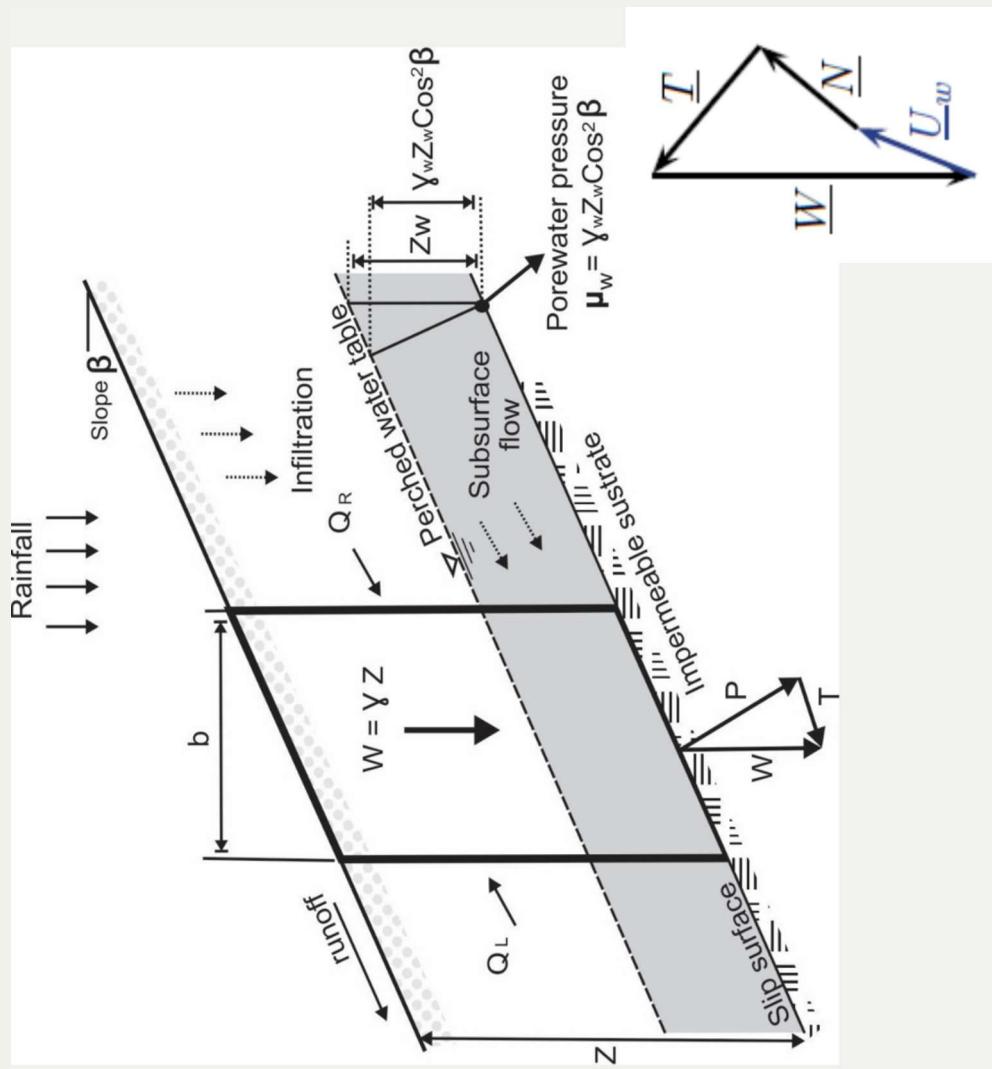
$$u = \gamma_w h_w$$

$$\cos \theta = \frac{h_w}{BC} \rightarrow h_w = BC \cos \theta$$

$$\cos \theta = \frac{BC}{h} \rightarrow BC = h \cos \theta$$

$$h_w = h \cos^2 \theta \rightarrow u = \gamma_w h \cos^2 \theta$$





# Sin infiltración (en términos de esfuerzos efectivos)

Esfuerzos normales:

$$\sigma' = \frac{N_a}{\text{área de la base}} = \frac{\gamma L H \cos \beta}{\left(\frac{L}{\cos \beta}\right)} = \gamma H \cos^2 \beta$$

Esfuerzos cortantes:

$$\tau = \frac{T_a}{\text{área de la base}} = \frac{\gamma L H \sin \beta}{\left(\frac{L}{\cos \beta}\right)} = \gamma H \cos \beta \sin \beta$$

$$t_d = c_d + \sigma' \tan \phi_d \quad \longrightarrow$$

$$\gamma H \sin \beta \cos \beta = c_d + \gamma H \cos^2 \beta \tan \phi_d$$

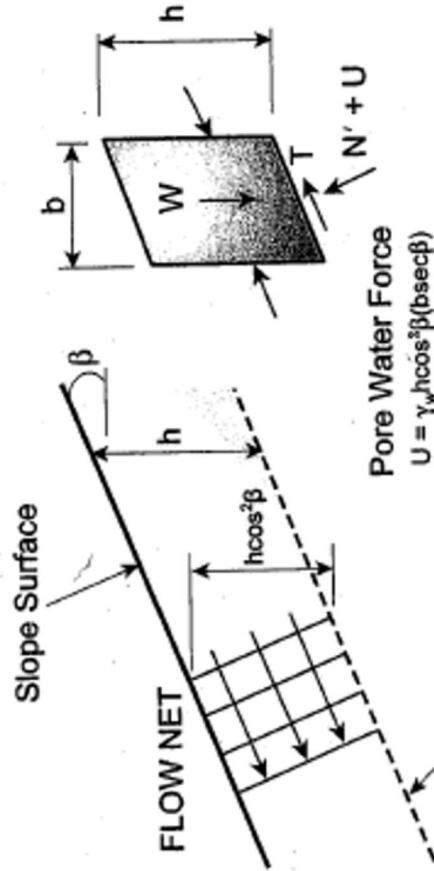
$$F_s = \frac{c'}{\gamma H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$$

$$H_{cr} = \frac{c'}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \quad \longrightarrow$$

$$\text{Si } C = 0 \quad \longrightarrow \quad FS = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$$

$$\text{Si } C_u(\emptyset = 0) \quad \longrightarrow \quad H_{cr} = \frac{C_u}{\gamma \cos \beta \sin \beta}$$

## Con infiltración (en términos de fuerzas)



$$N = W \cos \beta \quad \text{and} \quad T = W \sin \beta$$

$$S = c'b \sec \beta + (N - U) \tan \phi'$$

$$F = \frac{cb \sec \beta + (N - U) \tan \phi'}{W \sin \beta}$$

$$W = \gamma_{\text{sat}} b h$$

$$F = \frac{c' + h(\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) \cos^2(\beta) \tan \phi'}{\gamma_{\text{sat}} h \sin \beta \cos \beta}$$

Si  $C' = 0$

$$F = \frac{\gamma'}{\gamma_{\text{sat}}} \times \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$$

$$U = (\gamma_w h \cos^2 \beta) \frac{b}{\cos \beta} = \gamma_w b h \cos \beta.$$

Este análisis se puede generalizar si el flujo es asumido a una altura de  $m \times h$  sobre la superficie de falla:

$$F = \frac{c' + h \cos^2 \beta [(1-m)\gamma_m + m\gamma']}{h \sin \beta \cos \beta [(1-m)\gamma_m + m\gamma_{\text{sat}}]}$$

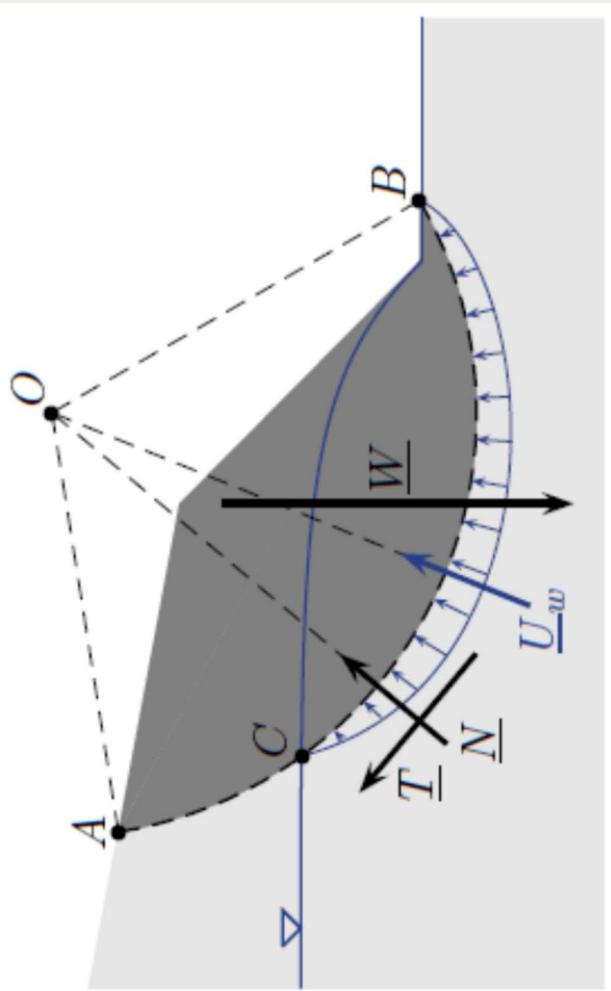
# Deslizamientos circulares

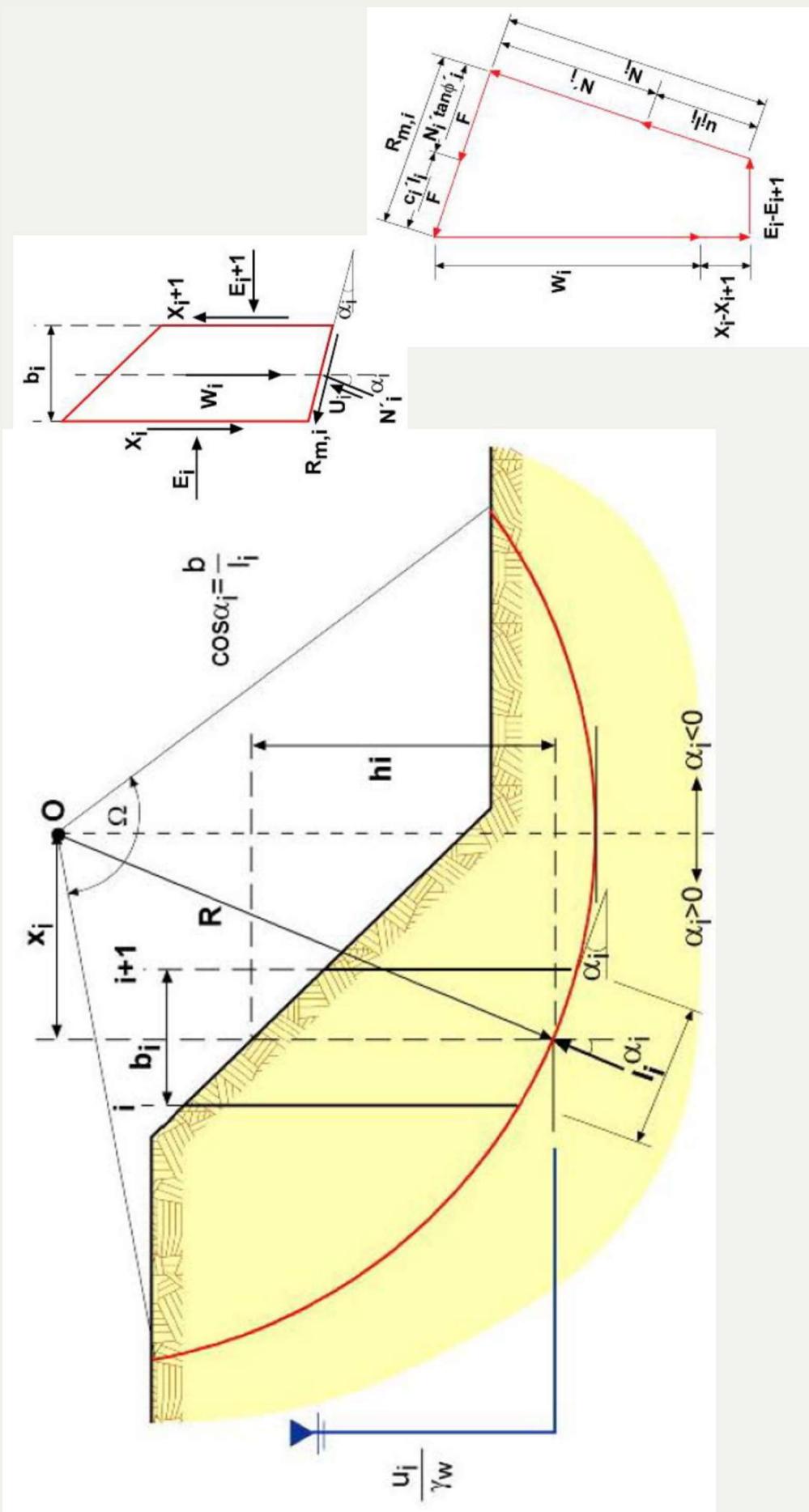
$$F_s = \frac{\text{Momentos resistentes}}{\text{Momentos motrices}} = \frac{M_O^r}{M_O^m}$$

$$\tau_{max} = c' + \sigma'_n \tan \phi'$$

$$F_s = \frac{R \int_A^B (c' + \sigma'_n \tan \phi') ds}{W l}$$

$$W l = R \int_A^B \tau ds$$

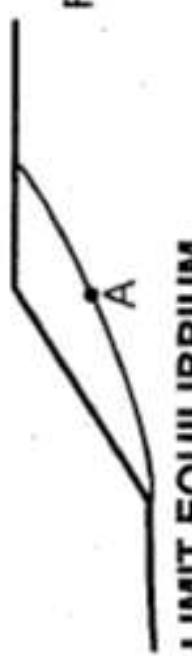




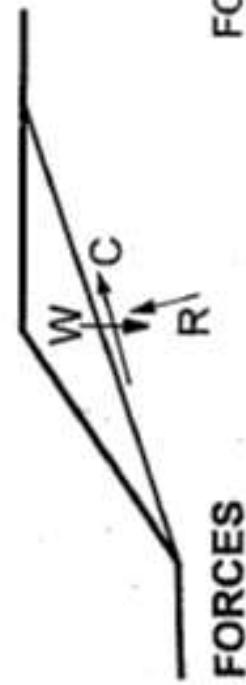
**LIMIT EQUILIBRIUM**

$$\text{FOS} = \frac{s_u}{\tau_{\text{required}}} \quad (\text{Total Stress})$$

$$\text{FOS} = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{\tau_{\text{required}}} \quad (\text{Effective Stress})$$

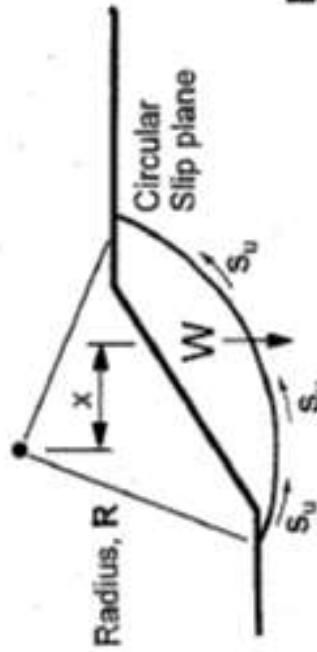


### LIMIT EQUILIBRIUM



### FORCES

$$\text{FOS} = \frac{\text{Summation of resisting force}}{\text{Summation of mobilized force}}$$



### MOMENTS

$$\text{FOS} = \frac{\text{Resisting moment}}{\text{Overturning moment}} = \frac{R \int s_u ds}{Wx}$$

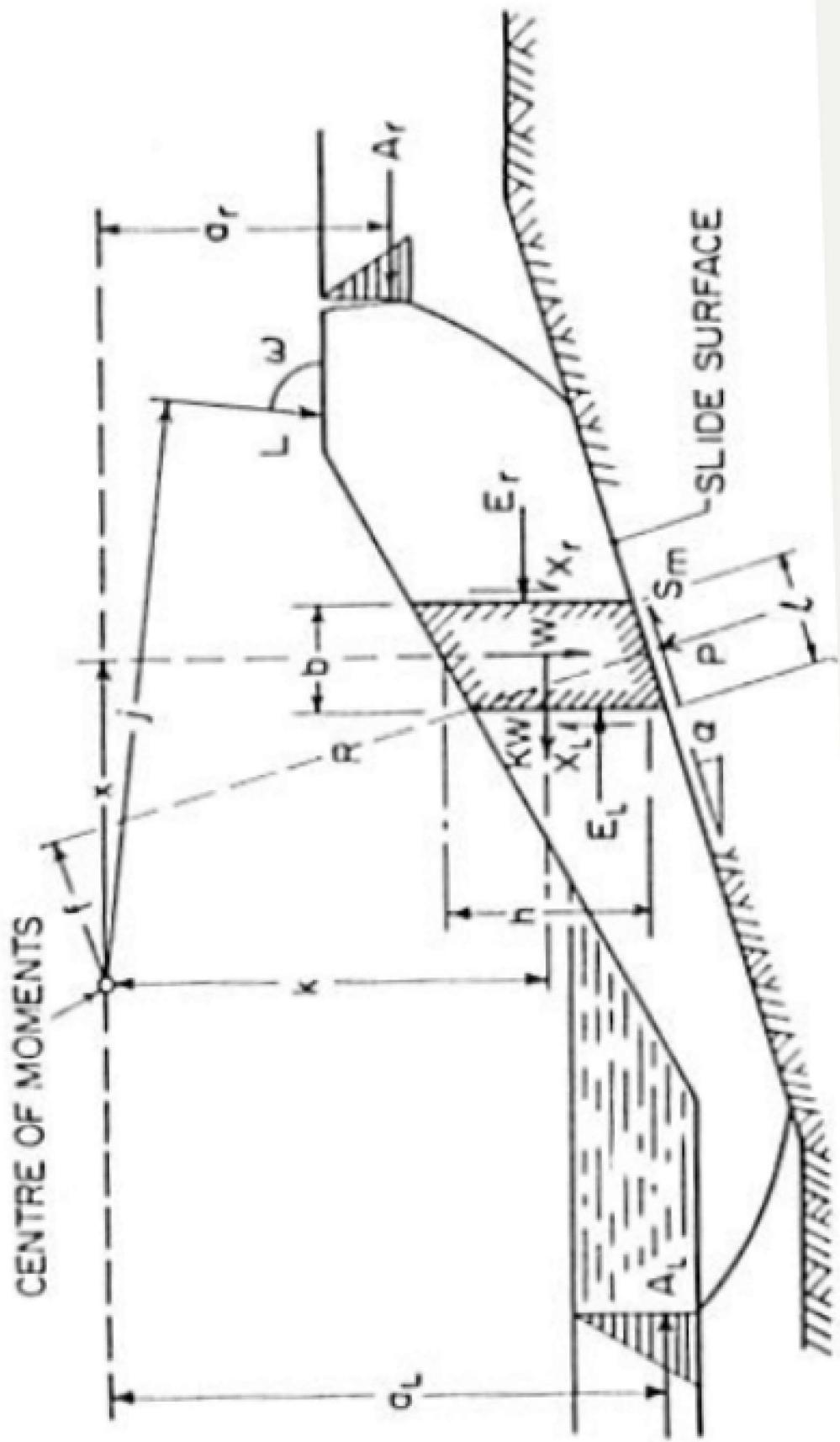
$2n - 2$  hipótesis adicionales



1. El punto de aplicación de las fuerzas normales se encuentra en el centro de la base de la dovela.
2. Consideración de las fuerzas verticales entre dovelas (diferencia entre métodos)

Parámetro	Nº de incógnitas existentes	Observaciones
Fuerzas $N'_i$	n	Una por rebanada
Punto de aplicación de $N'_i$	n	Una por rebanada
Resistencia al corte	n	Una por rebanada
Fuerzas tangenciales entre rebanadas $X_i$	n-1	En las rebanadas extremas sólo actúa una, interior al talud.
Fuerzas normales entre rebanadas ( $E_i$ )	n-1	En las rebanadas extremas sólo actúa una, interior al talud.
Punto de aplicación de fuerzas normales ( $E_i$ )	n-1	En las rebanadas extremas sólo actúa una, interior al talud
Coeficiente de seguridad ( $F$ )	1	Se supone constante a lo largo de toda la superficie de deslizamiento
<b>SUMA</b>	<b>6n-2</b>	

Relación básica	Nº de ecuaciones disponibles	Observaciones
Equilibrio de fuerzas horizontales	n	Una por rebanada
Equilibrio de fuerzas verticales	n	Una por rebanada
Equilibrio de momentos	n	Una por rebanada
Criterio de rotura	n	Una por rebanada
$R = c'1_i + N'_i \cdot \tan\phi'$		
<b>SUMA</b>	<b>4n</b>	



Resolviendo las fuerzas verticales para cada dovela:

$$(1) \quad W - S_m \sin \alpha - P \cos \alpha - (X_l - X_t) = 0$$

La fuerza de corte que se requiere para el equilibrio límite es una proporción de  $1/F$  de la resistencia al cortante disponible, función de la fuerza efectiva ( $P - ul$ ):

$$(2) \quad S_m = l * \tau_{req} = (c'l + (P - ul) \tan \varphi')/F$$

Sustituyendo  $S_m$  en la ecuación anterior:

$$(3) \quad P = \left[ W - \frac{c'l \sin \alpha}{F} + \frac{ul \tan \alpha \sin \alpha}{F} - (X_l - X_t) \right] / m_\alpha \quad \text{donde} \quad m_\alpha = \left( \cos \alpha + \frac{\tan \varphi' \sin \alpha}{F} \right)$$

Si toda la ladera es considerada. La suma de las fuerzas horizontales deben ser cero:

$$(4) \quad \sum P \sin \alpha - \sum S_m \cos \alpha + \sum KW + \sum (E_r - E_l) + (A_r - A_l) + L \cos \omega = 0 \quad \longrightarrow \quad \sum (E_r - E_l) = 0$$

Sustituyendo  $S_m$  de (2) obtenemos el factor de seguridad basado en el equilibrio de fuerzas:

$$(5) \quad F_f = \frac{\sum [c'l \cos \alpha + (P - ul) \tan \phi' \cos \alpha]}{\sum P \sin \alpha + \sum KW + (A_r - A_l) + L \cos \omega} \longrightarrow P = f(FS)$$

De forma similar en el equilibrio límite la suma de los momentos de todas las fuerzas actuando en la ladera sobre el centro de momentos debe ser cero:

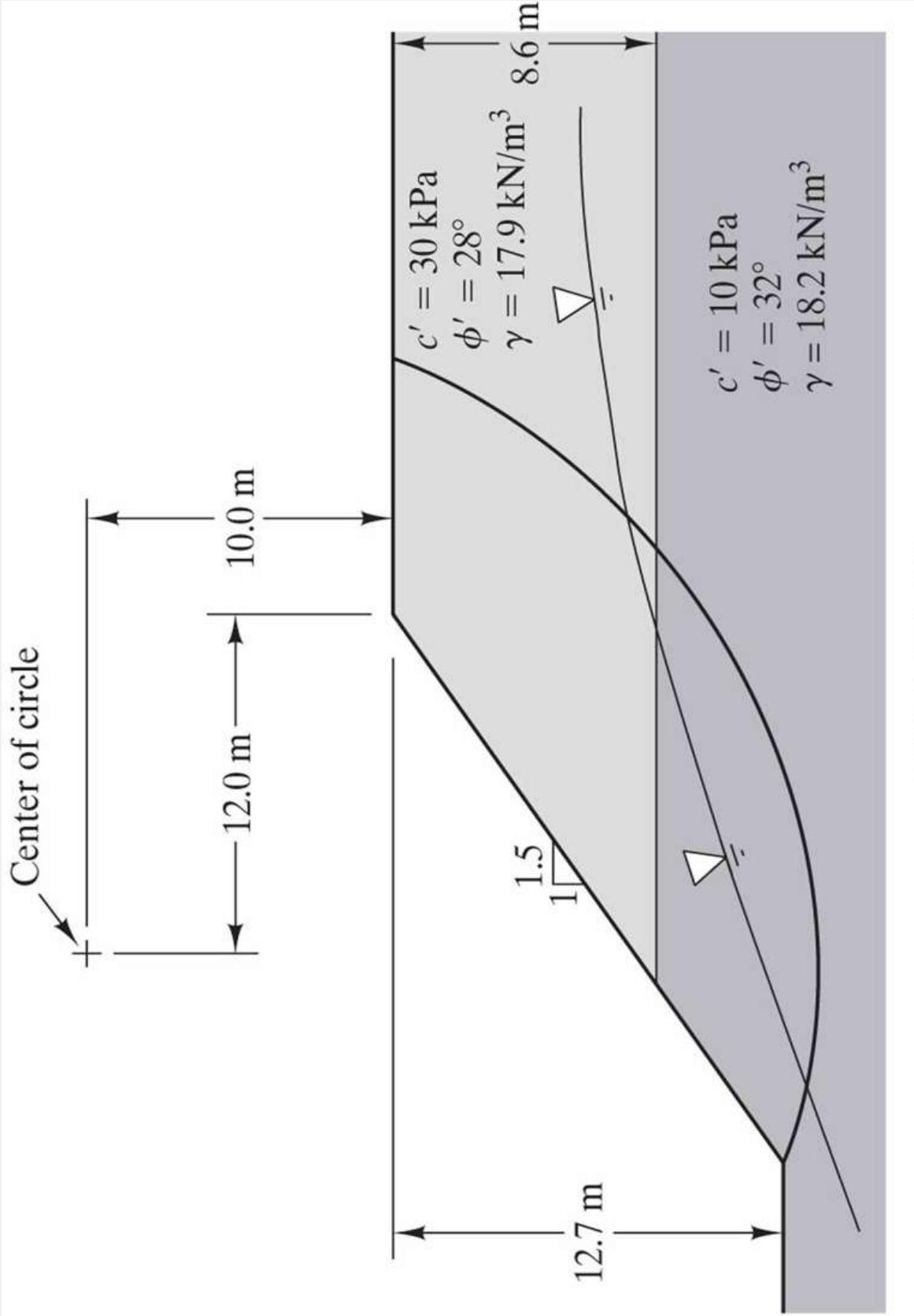
$$(6) \quad \sum Wx + \sum KWk - (A_l a_l - A_r a_r) + Lj - \sum Pf - \sum S_m R = 0$$

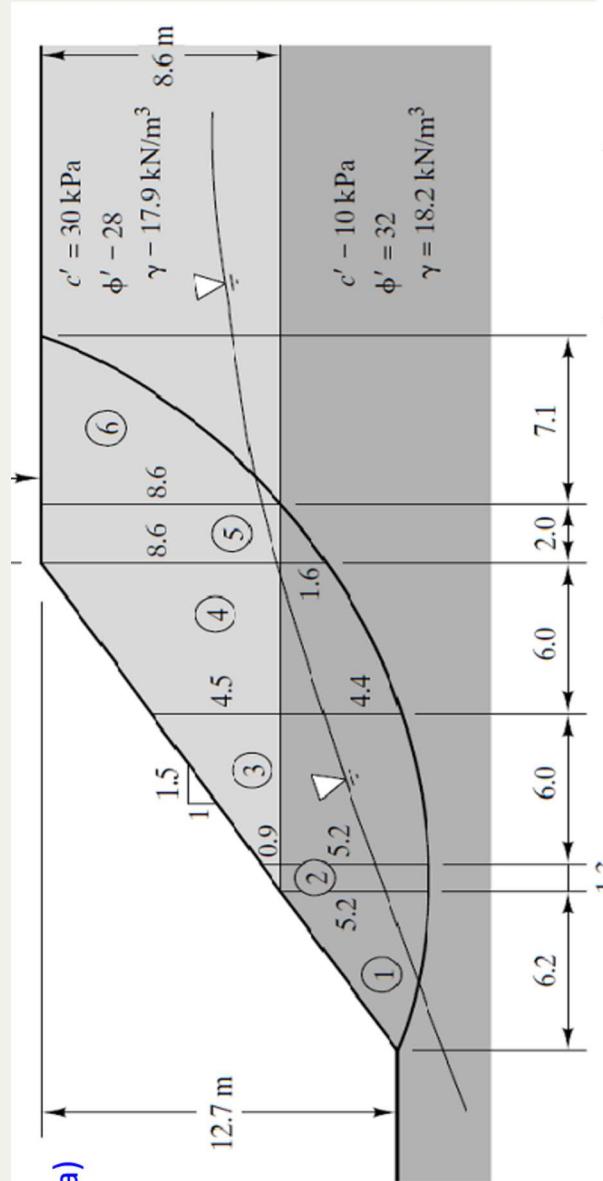
Sustituyendo otra vez  $S_m$ , el factor de seguridad basado en el equilibrio de momentos es:

$$(7) \quad F_m = \frac{\sum [c'lr + (P - ul)R \tan \phi']}{\sum Wx + \sum KWk - [A_l a_l - A_r a_r] + Lj - \sum Pf}$$

De donde  $P$  es función de  $F$ , por lo que se requiere interacciones utilizando  $\mathbf{F}_f = \mathbf{F}_m$  hasta que converge a una solución suficientemente precisa.

Todos los métodos (excepto el método ordinario) utilizan diferentes combinaciones de las ecuaciones (3), (5) y (7). Solamente difieren en la hipótesis que asumen de  $(X_L - X_r)$  en la ecuación (3), donde  $F_m$  es menos sensible a estas hipótesis. Para fallas circulares  $f = 0$ , y  $x = R \sin \alpha$  y  $R$  es constante (Método ordinario).

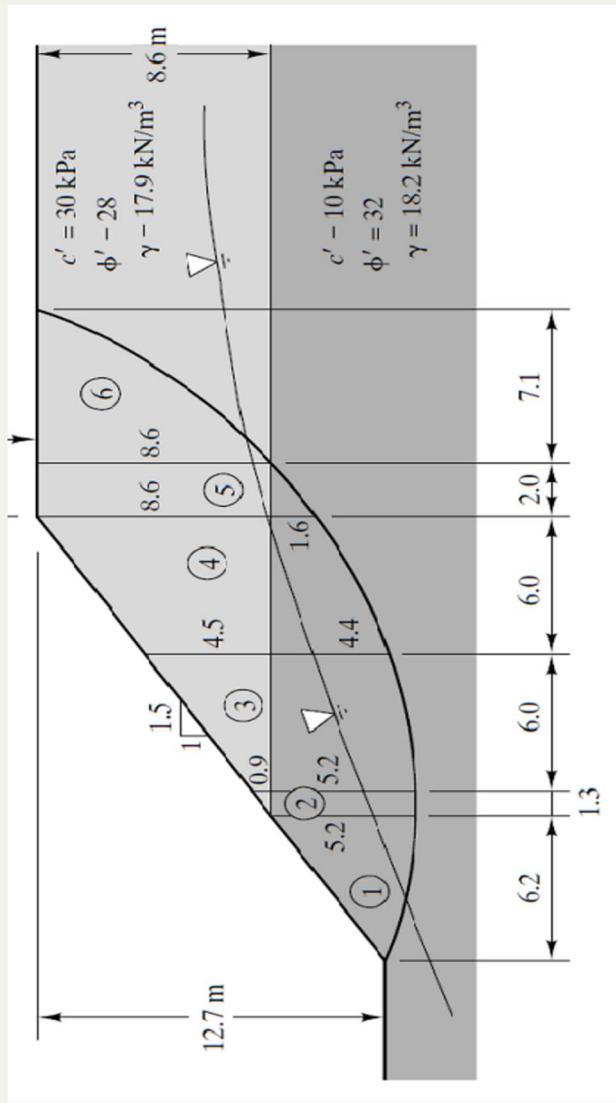




1) Dividir en dovelas (dibujo a escala)

2) Calcule los pesos

3) Calcule las presiones de poros promedio en la base de cada dovela.



$$u_1 = (0.5 \text{ m})(9.8 \text{ kN/m}^3) = 5 \text{ kPa}$$

$$u_2 = (1.8 \text{ m})(9.8 \text{ kN/m}^3) = 18 \text{ kPa}$$

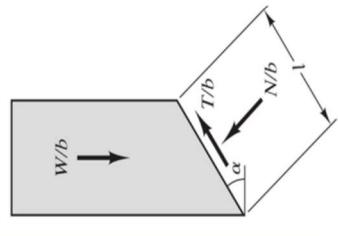
$$u_3 = (2.3 \text{ m})(9.8 \text{ kN/m}^3) = 22 \text{ kPa}$$

$$u_4 = (2.3 \text{ m})(9.8 \text{ kN/m}^3) = 22 \text{ kPa}$$

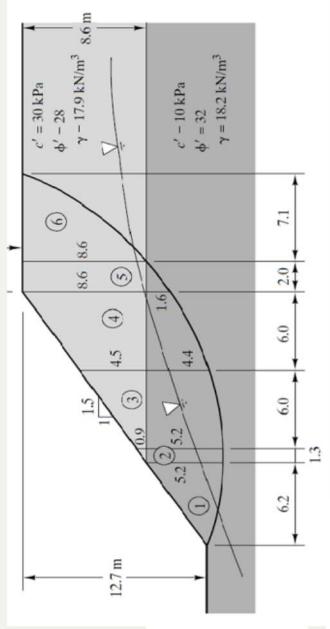
$$u_5 = (1.2 \text{ m})(9.8 \text{ kN/m}^3) = 12 \text{ kPa}$$

$$u_6 = 0$$

**4) Estime el factor de seguridad**



$$FS = \frac{\sum\{c'l + [(W/b)\cos\alpha - u l] \tan\phi'\}}{\sum[(W/b)\sin\alpha]}$$



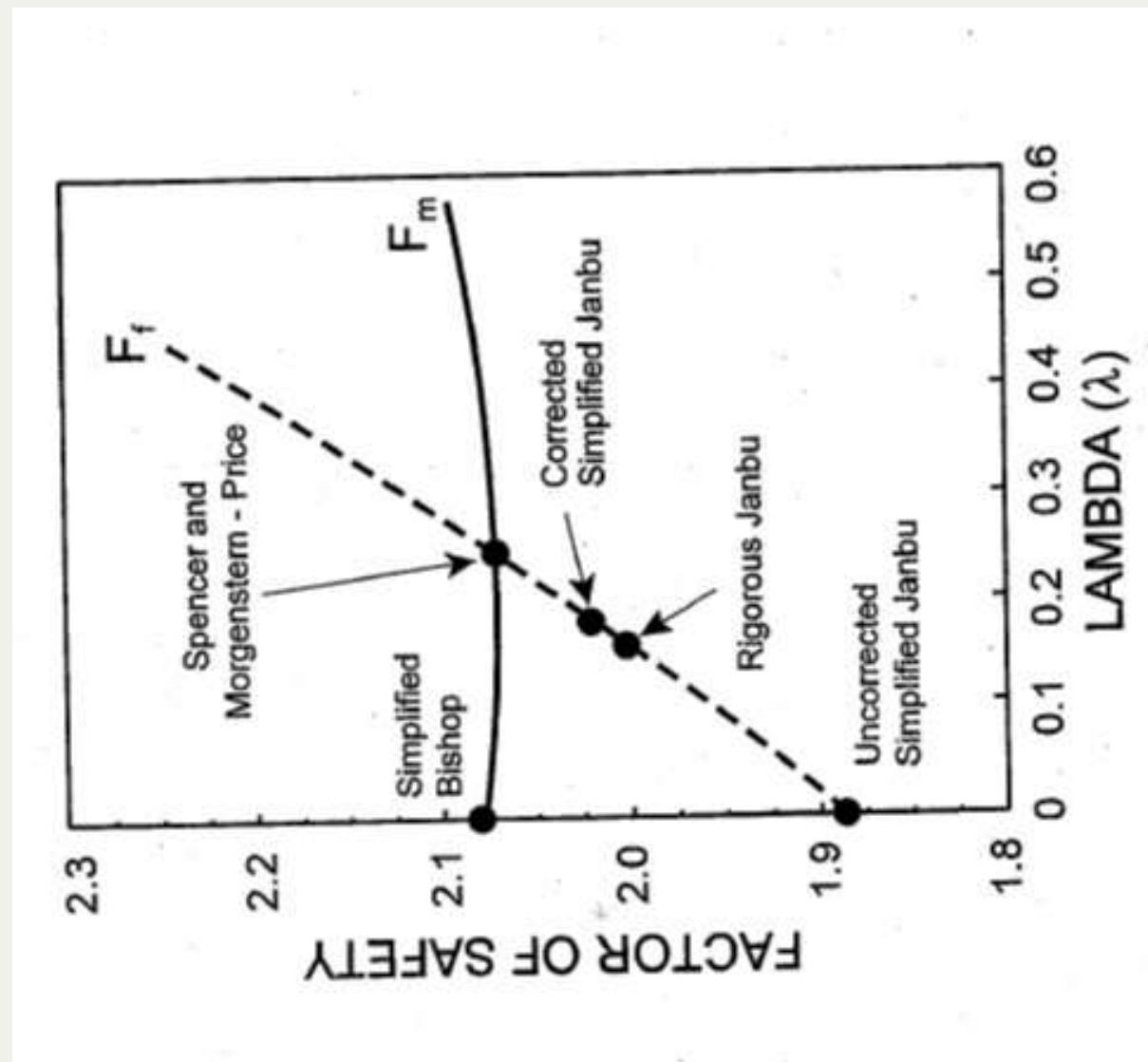
Slice	$W/b$ (kN/m)	$\alpha$ (Deg)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (Deg)	$u$ (kPa)	$l$ (m)	$c' l + [(W/b)\cos\alpha - u l] \tan\phi'$	$(W/b) \sin\alpha$
1	293	-12	10	32	5	6.3	222	-61
2	133	-1	10	32	18	1.3	81	-2
3	814	8	10	32	22	6.0	481	113
4	1031	22	10	32	22	6.5	573	386
5	337	35	10	32	12	2.4	178	193
6	546	54	30	28	0	12.1	534	442
							$\Sigma = 2069$	1071

$$F = 2069/1071 = 1.93$$

**5) Repita para otra superficie de falla hasta encontrar un valor mínimo del FS.**

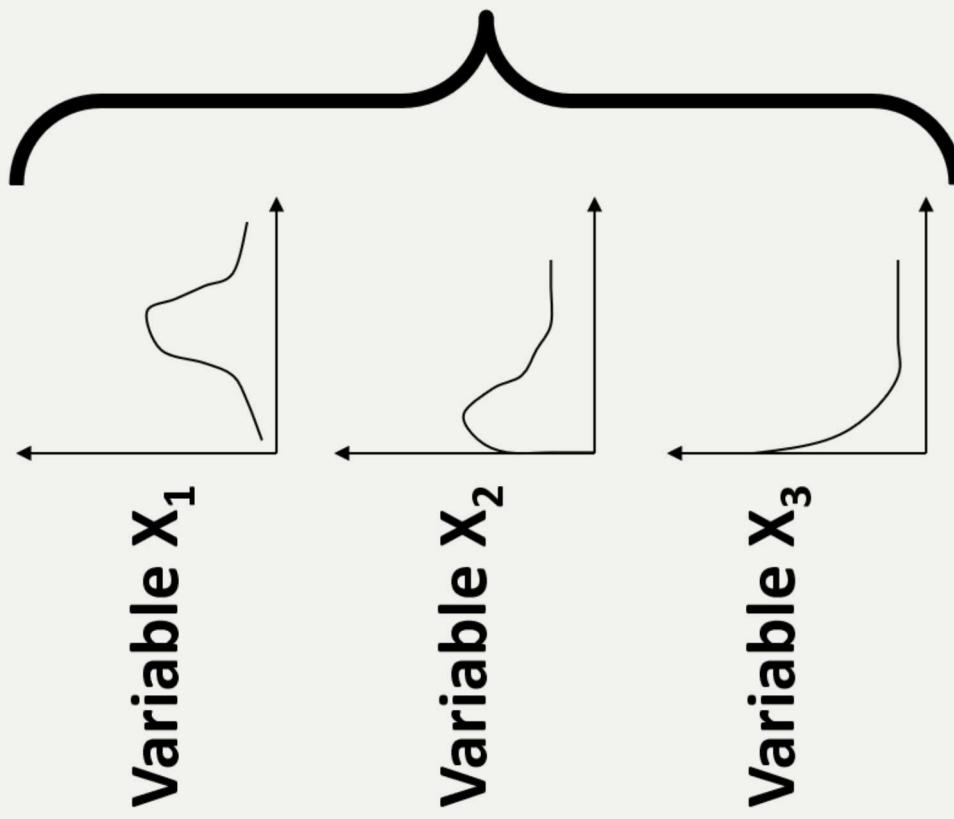
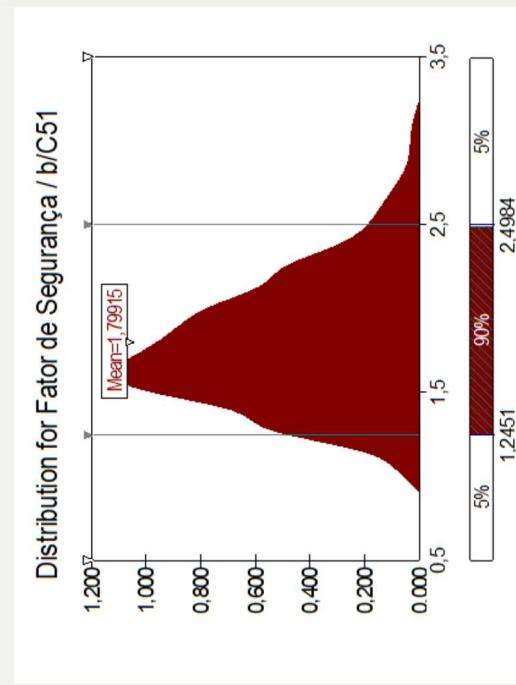
Method	Force Equilibrium		Moment Equilibrium	
	<i>x</i>	<i>y</i>	No	Yes
Ordinary method of slices (OMS)	No	No	No	Yes
Bishop's simplified	Yes	No	Yes	Yes
Janbu's simplified	Yes	Yes	No	No
Lowe and Karafiat's	Yes	Yes	Yes	No
Corps of Engineers	Yes	Yes	No	No
Spencer's	Yes	Yes	Yes	Yes
Bishop's rigorous	Yes	Yes	Yes	Yes
Janbu's generalized	Yes	Yes	No	No
Sarma's	Yes	Yes	Yes	Yes
Morgenstern-Price	Yes	Yes	Yes	Yes

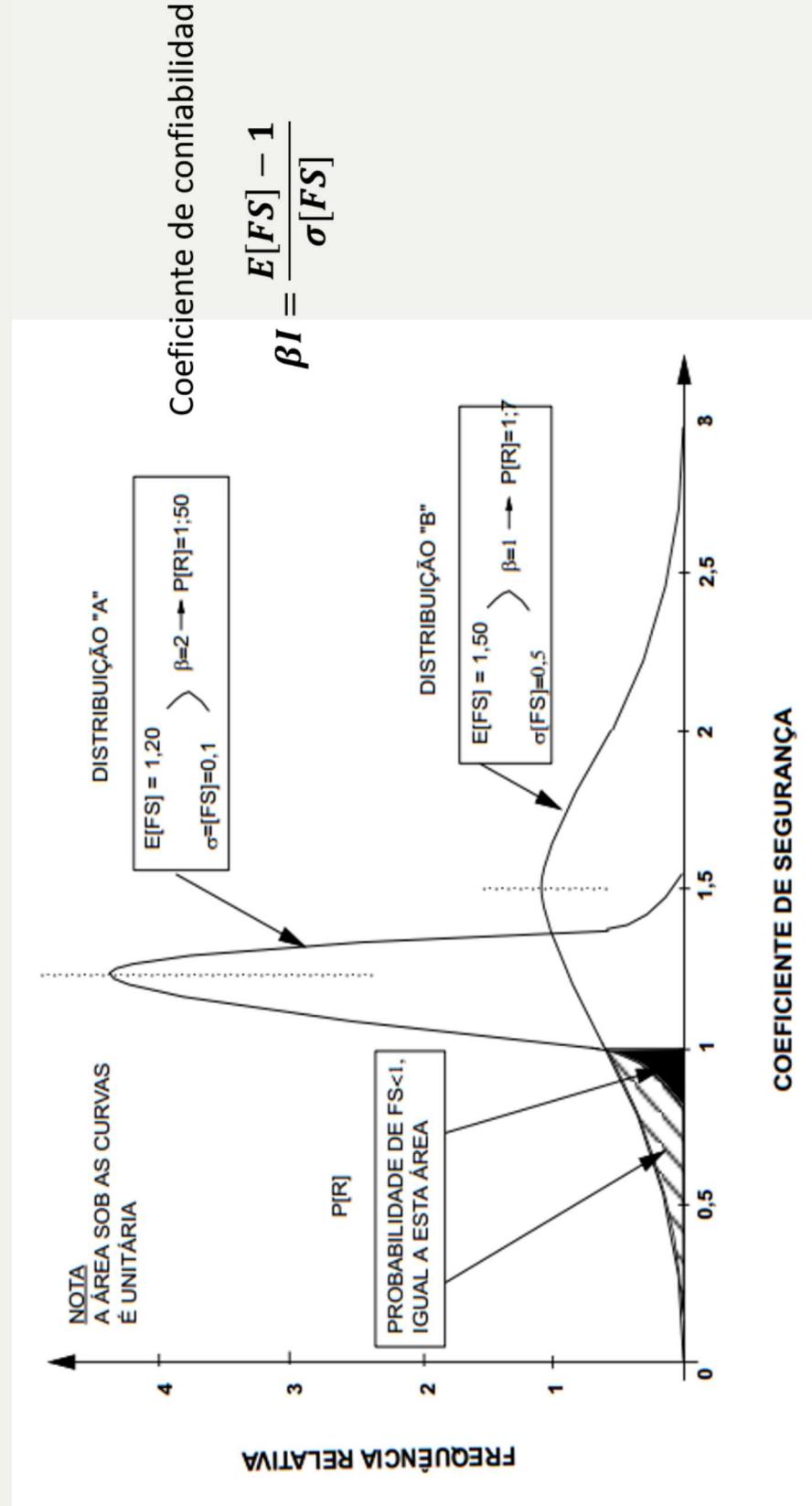
Methods	Equilibrium conditions satisfied	Slip surface	Use
Ordinary Method of Slices (Fellenius, 1927)	Moment equilibrium about center of circle	Circulaire slip surface	Applicable to non-homogeneous slopes and $c-\phi$ soils where slip surface can be approximated by a circle. Very convenient for hand calculations. Inaccurate for effective stress analyses with high pore water pressures.
Bishop's Modified Method (Bishop, 1955)	Vertical equilibrium and overall moment equilibrium	Circular	Applicable to non-homogeneous slopes and $c-\phi$ soils where slip surface can be approximated by a circle. More accurate than Ordinary Method of slices, especially for analyses with high pore water pressures. Calculations feasible by hand or spreadsheet.
Janbu's Generalized Procedure of Slices (Janbu, 1968)	Force equilibrium (vertical and horizontal)	Any shape	Applicable to non-circular slip surfaces. Also for shallow, long planar failure surfaces that are not parallel to the ground surface.
Morgenstern & Price's Method (Morgenstern & Price's, 1965)	All conditions of equilibrium	Any shape	An accurate procedure applicable to virtually all slope geometries and soil profiles. Rigorous, well established complete equilibrium procedure.
Spencer's Method (Spencer, 1967)	All conditions of equilibrium	Any shape	An accurate procedure applicable to virtually all slope geometries and soil profiles. The simplest complete equilibrium procedure for computing factor of safety.



# Análisis probabilístico

$$y = f(x_1, x_2 \dots x_n)$$





Performance Level	Reliability Index, $\beta$	Probability, $p_F = P(F < F_c)$
High	5.0	$2.871 \times 10^{-7}$
Good	4.0	$3.169 \times 10^{-5}$
Above average	3.0	0.00135
Below average	2.5	0.00621
Poor	2.0	0.02275
Unsatisfactory	1.5	0.06681
Hazardous	1.0	0.15866

Source: Based on Corps of Engineers (1997).

# Método FOSM (first order second moment)

- Basado en el truncamiento de la serie de Taylor para la variable dependiente haciendo uso únicamente de la primera derivada (Primer Orden).
- Las salidas y las entradas se expresan como medias y desviaciones estándar para las variables involucradas (Segundo Momento).

## Ventajas

- Formulación matemática simple
- No requiere gran esfuerzo computacional
- Para cuantificar la influencia de cada variable independiente en la varianza de la variable dependiente.

## Desventajas

- No sigue una distribución completa de la variable dependiente (correr riesgos en esta distribución).

$$FS = \frac{c'}{\gamma H \cos \beta \cdot \sin \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$$

Variables independientes	Valores medios	Coefficiente de variación
Cohesión	10 kPa	40%
Ángulo de fricción	20°	10%
Peso específico	26,5 kN/m³	3%
Pendiente	18°	-
Altura	0,5 m	-

Variables Aleatorias

1. Cálculo del coeficiente de variación, desviación estándar y varianza.

$$COV = \frac{\sigma}{\bar{X}}$$

Variables independientes	Valores medios	Coeficiente de variación	Desviación estandar	Varianza
$c'$	10 kPa	40%	4 kPa	16 kPa
$\tan(\Phi')$	$\tan(20^\circ) = 0,3639$	10%	0,03639	0,0013
$\gamma$	26,5 kN/m³	3%	0,795 kN/m³	0,632 kN/m³

2. Cálculo del factor de seguridad medio.

$$FS = \frac{c'}{\gamma H \cos \beta \cdot \sin \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \longrightarrow E[FS] = FS(\bar{c'}, \bar{\gamma}, \bar{H}, \bar{\beta}, \bar{\phi'})$$

$$E[FS] = \frac{10}{26,5 \cdot 0,5 \cdot \cos 18^\circ \cdot \sin 18^\circ} + \frac{\tan 20^\circ}{\tan 18^\circ} = 3,69$$

3. Calcular los incrementos del Factor de Seguridad (dFS) de acuerdo con las variaciones aleatorias en las variables independientes ( $dx_i$ ) :

Cada variable es incrementada separadamente

$$dx_i = 0,1 \cdot \bar{x}_i$$



$x_i$	$dx_i$	$x_i + dx_i$	$FS_{incr} = FS(x_i + dx_i)$	$dFS = FS_{incr} - E[FS]$
$c' = + 10$	+1	+11	3,9468	+0,2568
$tg \Phi' = + 0,3639$	+0,03639	+0,4003	3,802	+0,112
$\gamma = + 26,5$	+2,65	+29,15	3,4545	-0,2335

En cada iteración, las otras variables se mantienen fijas e iguales a los valores medios

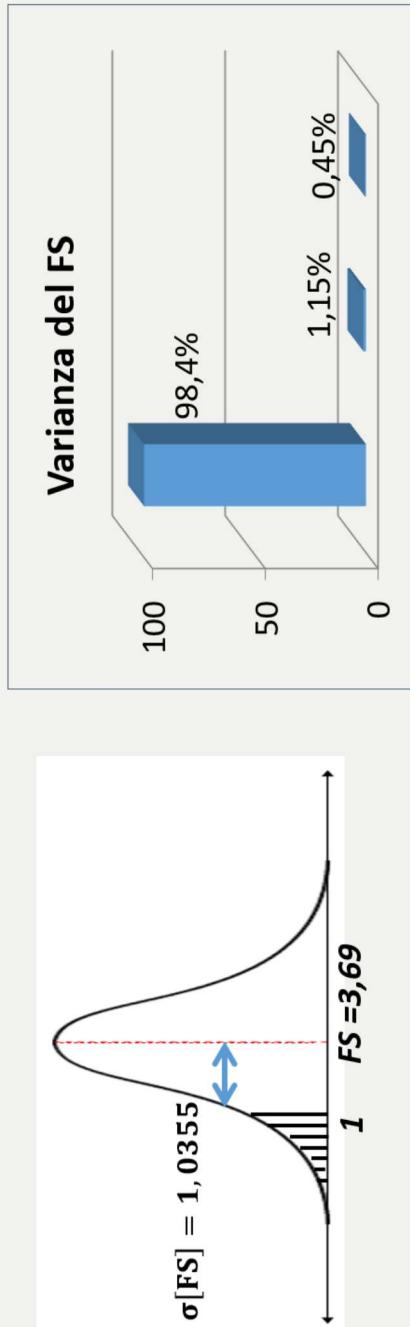
4. Calcular la varianza total del factor de seguridad a partir del aporte en la varianza de cada variable

$$V[F] = \sum_{i=1}^N \left( \frac{dFS}{dx_i} \right)^2 V(x_i)$$

$x_i$	$dxi$	$dFS$	$\frac{dFS}{dxi}$	$V[x_i]$	$\left( \frac{dFS}{dxi} \right)^2 V[x_i]$
$c' = + 10$	+1	+0,2568	+0,2568	16	1,055 (98,4%)
$\text{tg } \Phi' = +0,3639$	+0,03639	+0,112	+3,078	0,0013	0,0123 (1,15%)
$\gamma = + 26,5$	+2,65	-0,2335	-0,088	0,632	$4,89 \times 10^{-3}$ (0,45%)
<b>Total <math>V[FS]</math></b>					<b>1,0722 (100%)</b>

5. Determinar la desviación estándar para el FS y el Índice de Confiability

$$\sigma[FS] = \sqrt{V[FS]} = 1,0355 \quad \rightarrow \quad \beta I = \frac{E[FS] - 1}{\sigma[FS]} = \frac{3,69 - 1}{1,0355} = 2,597$$



# Métodos Acoplados

MODEL	HIDROLÓGICO	GEOTÉCNICO	D
<b>SHASITAB</b>	Static state – TOPOG (O'Loughlin, 1986)	Infinite slope model in saturated conditions	3D
<b>dSLAM</b>	Kinematic Wave Groundwater (Takasao & Shiiba, 1988)	Infinite slope model in saturated conditions	3D
<b>CHASM</b>	Finite different scheme using the Richards's equation for vertical infiltration & Darcy equations for lateral flow.	Bishop's simplified circular method in unsaturated conditions	2D
<b>Pradel &amp; Raad</b>	Transient vertical infiltration – Green & Ampt	Infinite slope model in unsaturated conditions	1D
<b>GEOtop-FS</b>	Finite different scheme using the Richards's equation for vertical infiltration & Darcy equations for lateral flow.	Infinite slope model in saturated conditions	3D
<b>TRIGRS</b>	Transient vertical infiltration – Iverson (2000) & simple runoff-routing scheme	Infinite slope model in saturated conditions	3D

## Componente hidrológico

## Componente geotécnico

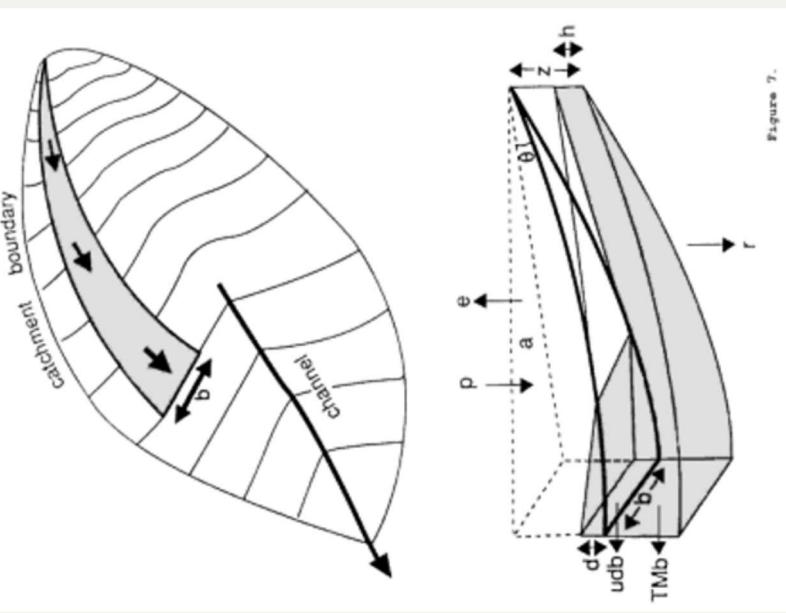


Figure 7.

$$Q_c = \frac{T \sin \theta}{(a/b)} \left[ \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right]$$

$$F = \frac{c' + (\gamma z - \gamma_w z_w) \cos^2 \beta \tan \varphi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta}$$

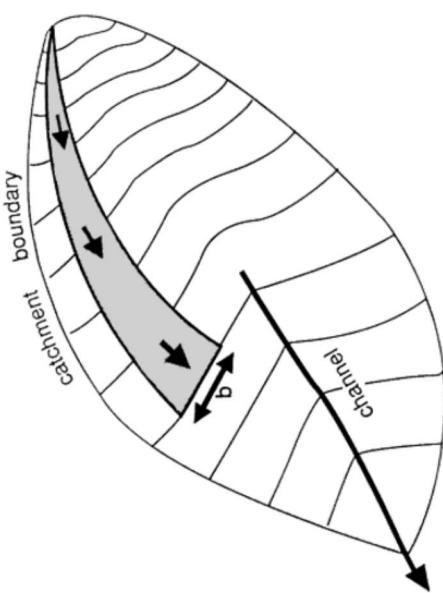
Fuente: Dietrich & Montgomery (1998); Crosta (1998)

El componente hidrológico explica el aumento del nivel freático como :

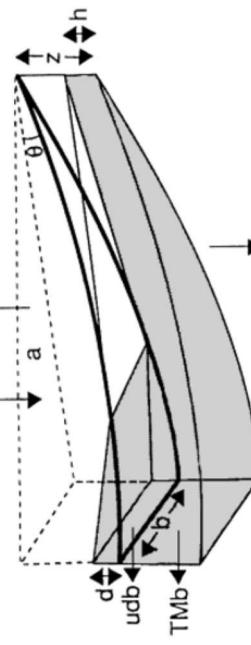
### • Flujo estático horizontal:

TOPOG (O'Loughlin, 1986)  
 TAPES (Moore et al., 1988)  
 TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979)  
 GEOTop (Lanni et al, 1998)

$$h/z = \frac{Q_a}{bT \sin \theta}$$

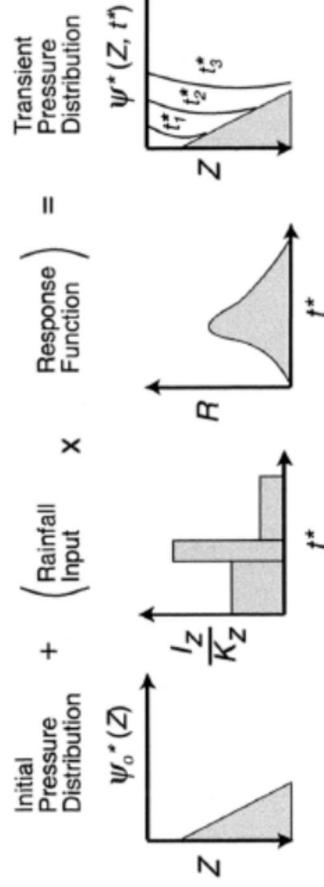


$$\lambda = \log A_c / \tan \alpha$$



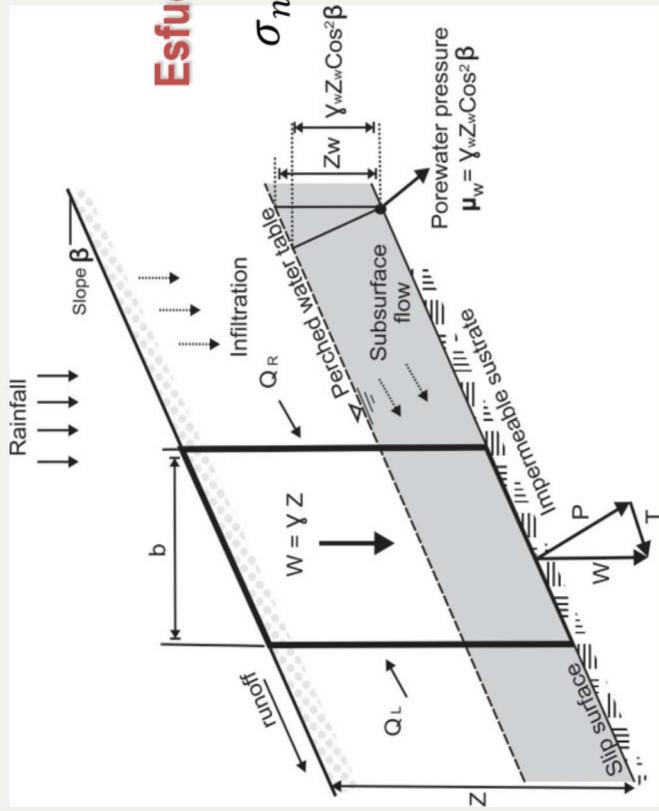
### • Flujo transitorio vertical:

Iverson (2000)  
 Green & Ampt (1911)



Tomado de: Dietrich & Montgomery (1998); Crosta (1998); Iverson (2000)

## Método de equilibrio límite y criterio de falla de Mohr - Coulomb



### Esfuerzos cortantes

$$\text{Esfuerzos normales} \quad \sigma_n = \gamma Z \cos^2 \beta$$

$$\tau = \gamma Z \sin \beta \cos \beta$$

### Resistencia al corte

$$\tau_f = C + \sigma_n \tan \phi$$

### Factor de Seguridad en términos de esfuerzos efectivos

$$FS = \frac{C' + (\gamma Z - \gamma_w z_w) \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta}$$

# SHALSTAB

El modelo SHALSTAB (Montgomery & Dietrich 1994) emplea el modelo hidrológico (O'Loughlin 1986), de estado estático para construir el mapa del patrón especial de la humedad basado en el análisis del área acumulada, la transmisividad del suelo, y la pendiente. La humedad local está dada entonces por:

$$W = \frac{Qa}{bT\sin\theta} \quad \longrightarrow \quad \frac{h}{z} = \frac{Qa}{bT\sin\theta}$$

El componente geotécnico de SHALSTAB está basado en el método de Talud Infinito con el criterio de falla de Mohr-Coulomb:

$$\rho_s g z \sin\theta \cos\theta = C' + \left[ \rho_s - \rho_w \frac{h}{z} \right] g z \cos^2\theta \tan\theta$$

Finalmente combinando el modelo hidrológico con el modelo geotécnico se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{a}{b} = \frac{T}{Q} \sin\theta \left[ \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) + \frac{C'}{\rho_w g z \cos^2\theta \tan\phi} \right]$$

> inestable  
< estable

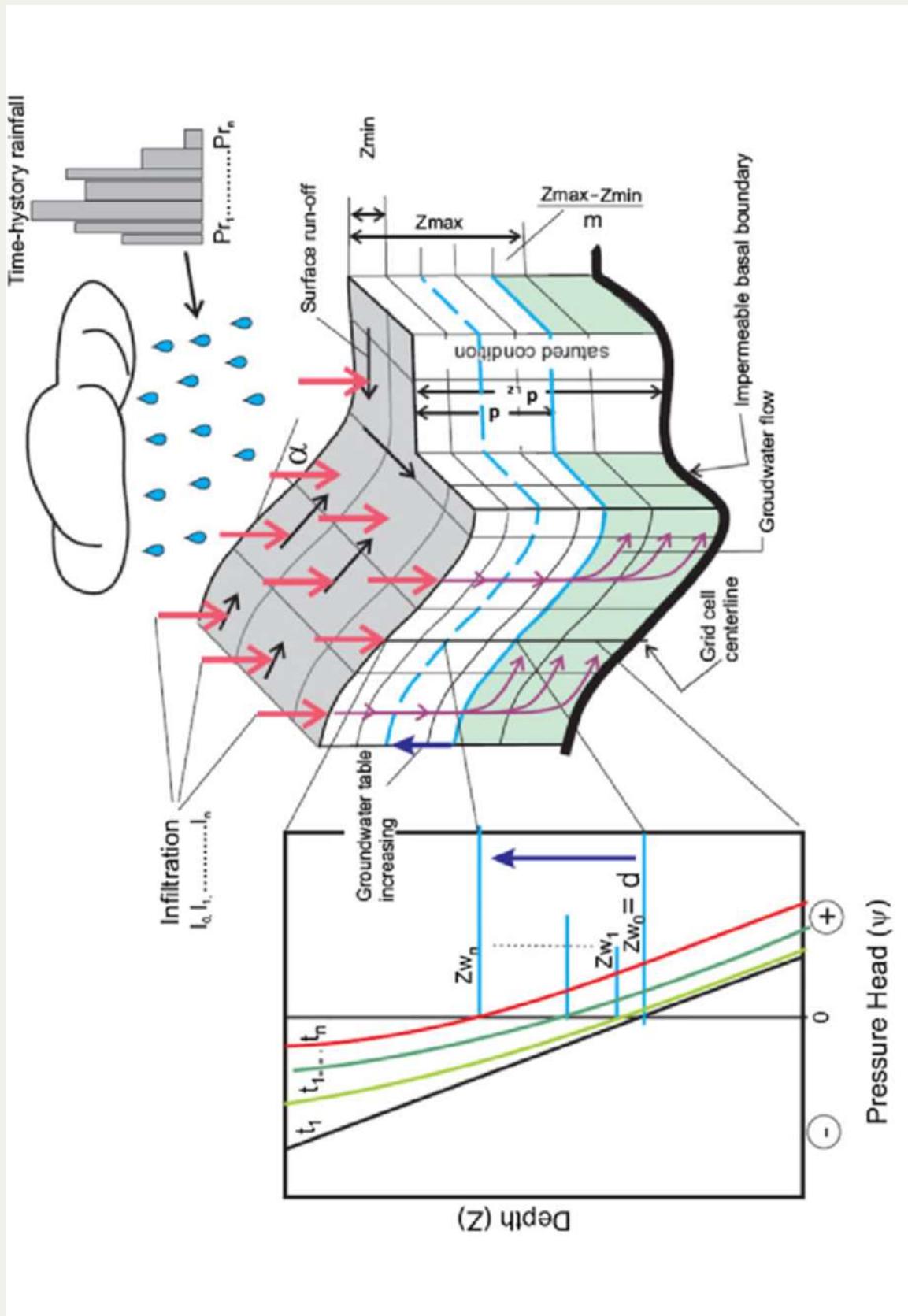
$$\tan\theta < \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) \tan\phi + \frac{C'}{\rho_s g z \cos^2\theta} \quad \longrightarrow \quad \text{Incondicionalmente estable}$$

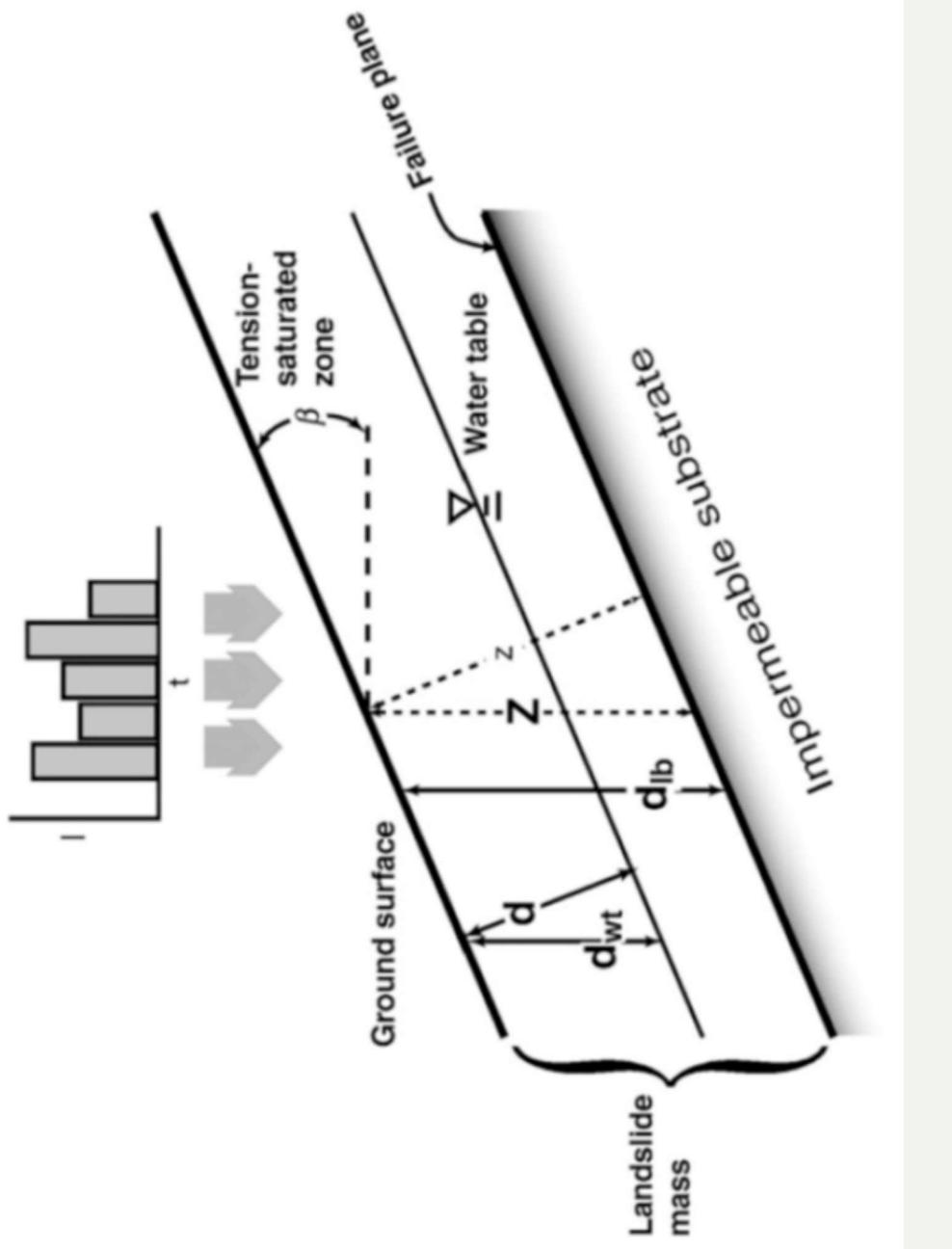
$$\tan\theta \geq \tan\phi + \frac{C'}{\rho_s g z \cos^2\theta} \quad \longrightarrow \quad \text{Incondicionalmente inestable}$$



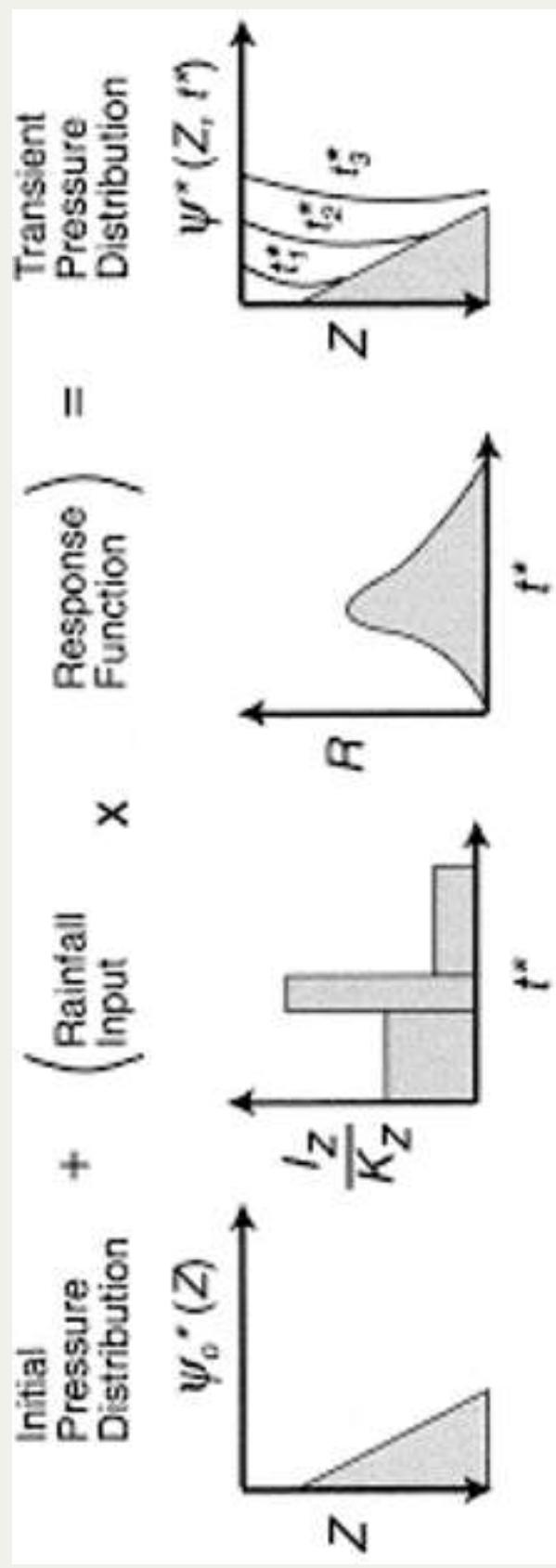
# TRIGRS

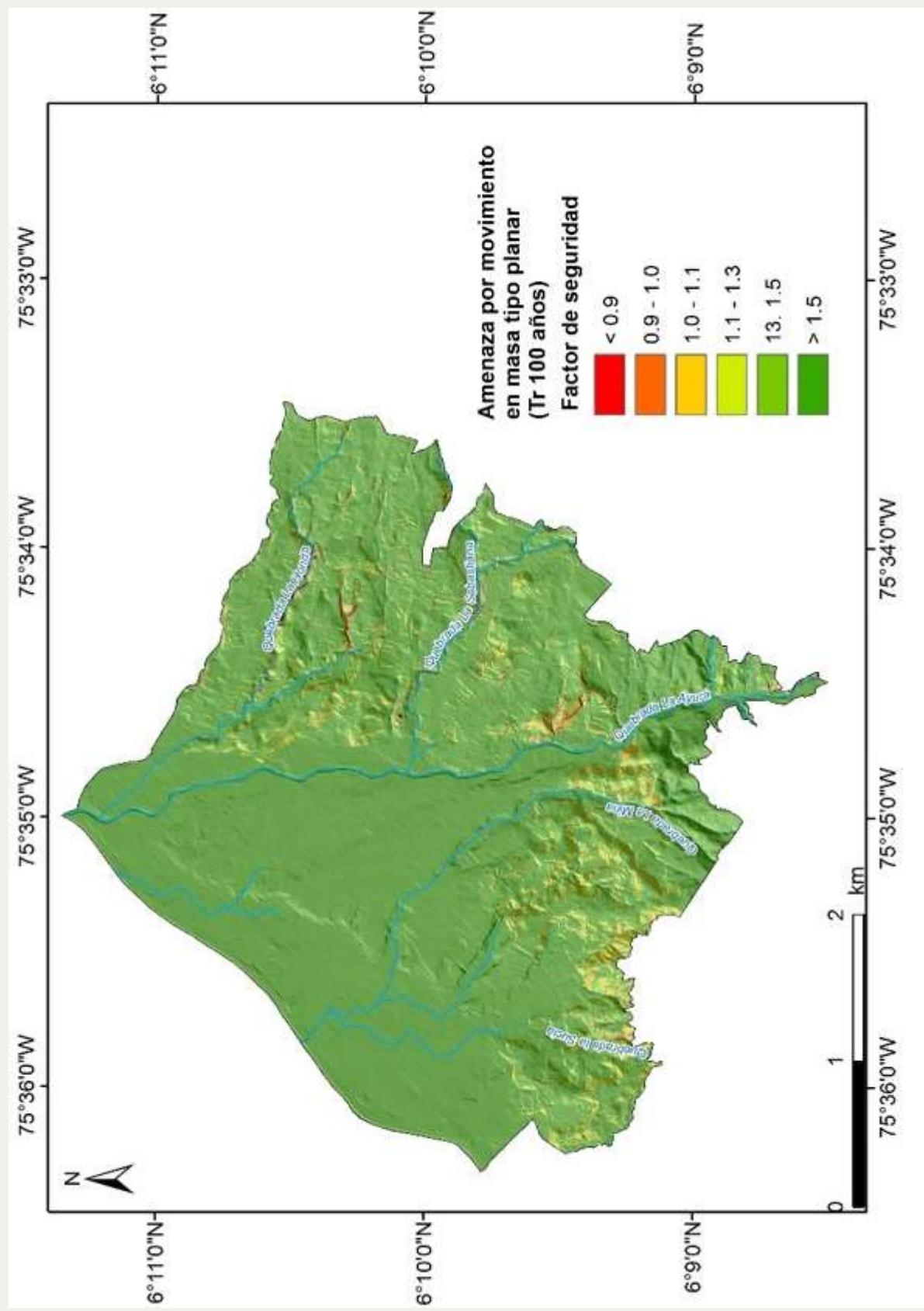
12.1

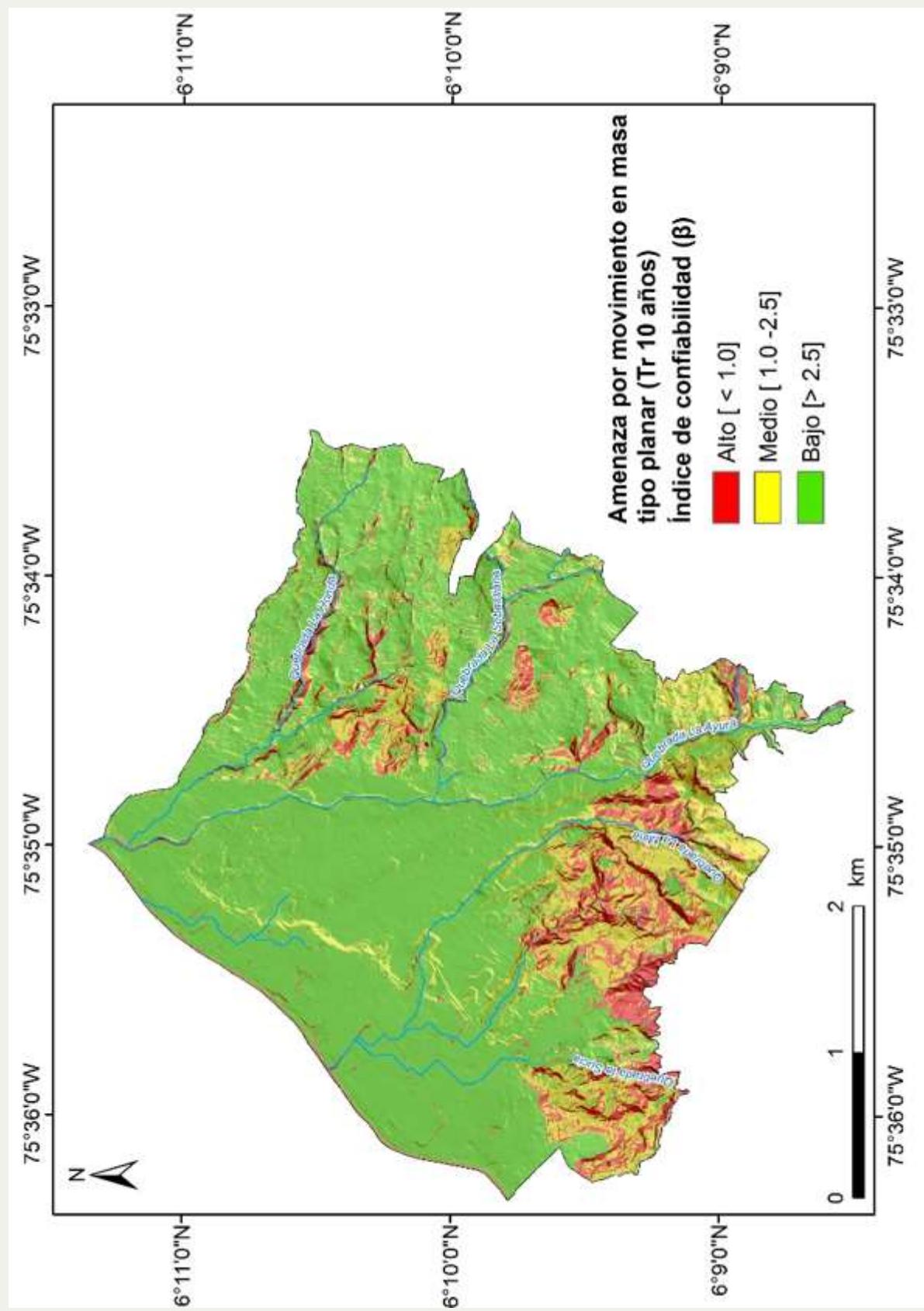




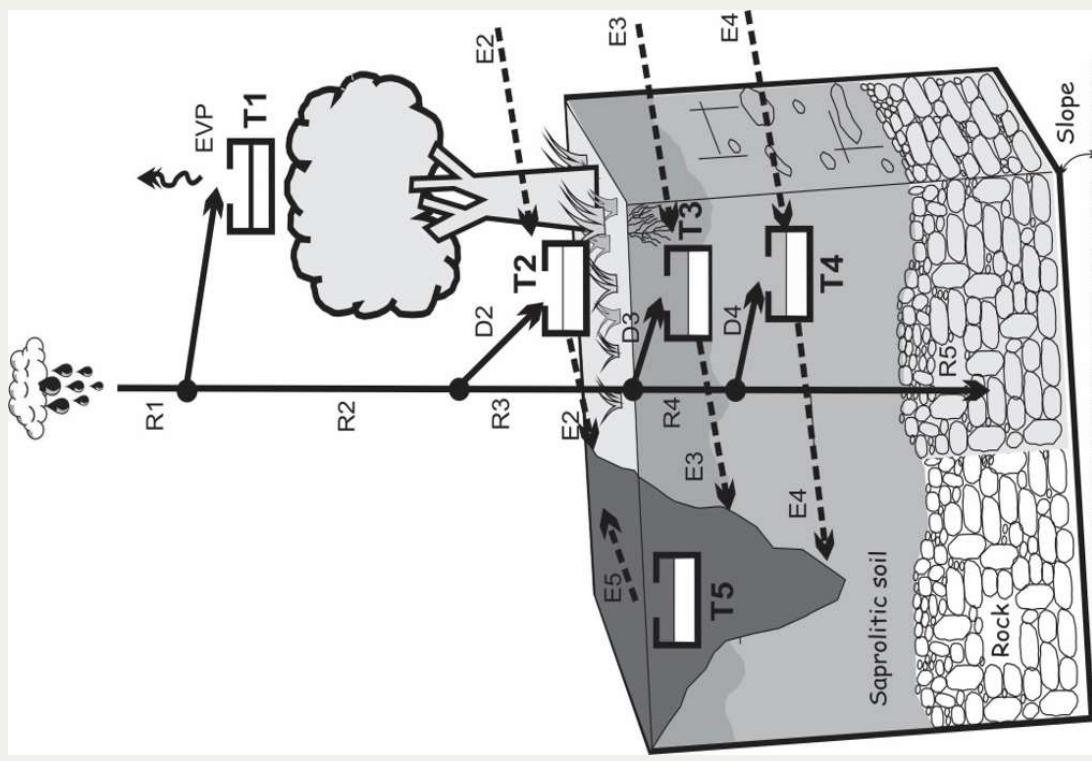
$$FS(Z, t) = \frac{\tan \phi'}{\tan \delta} + \frac{c' - \psi(Z, t)\gamma_w \tan \phi'}{\gamma_s Z \sin \delta \cos \delta}$$



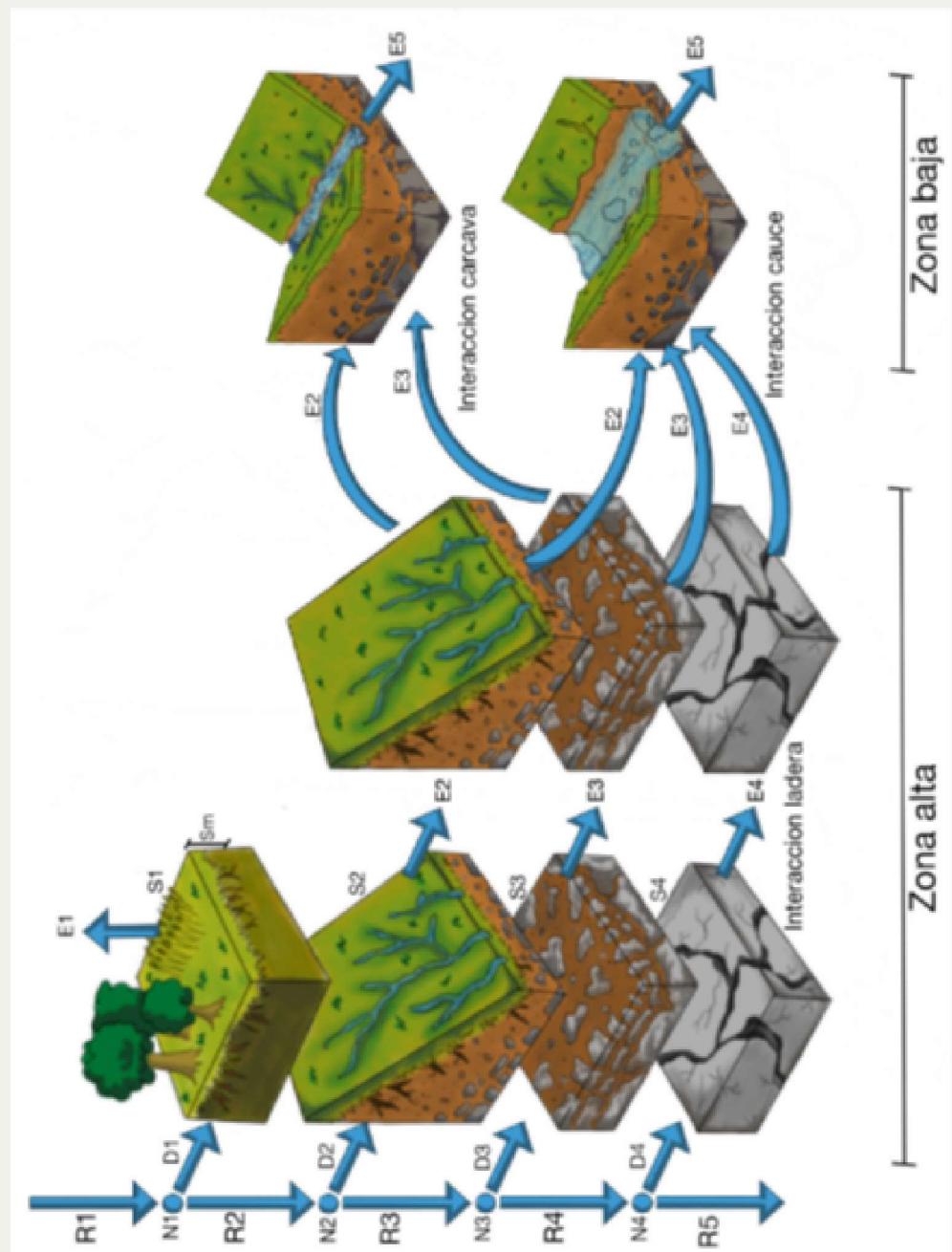




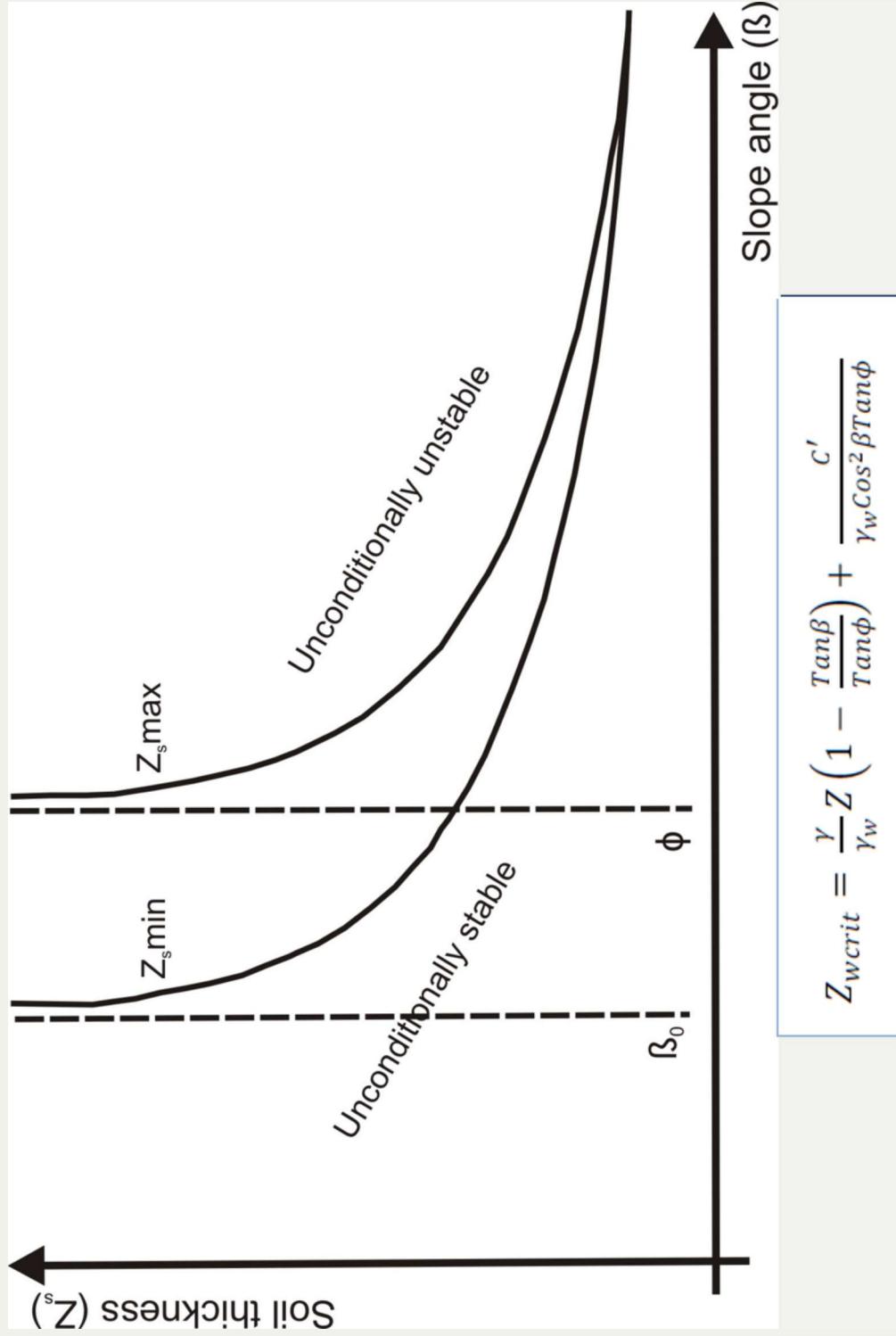
# SHIA-Landslide



Aristizábal et al (2015)

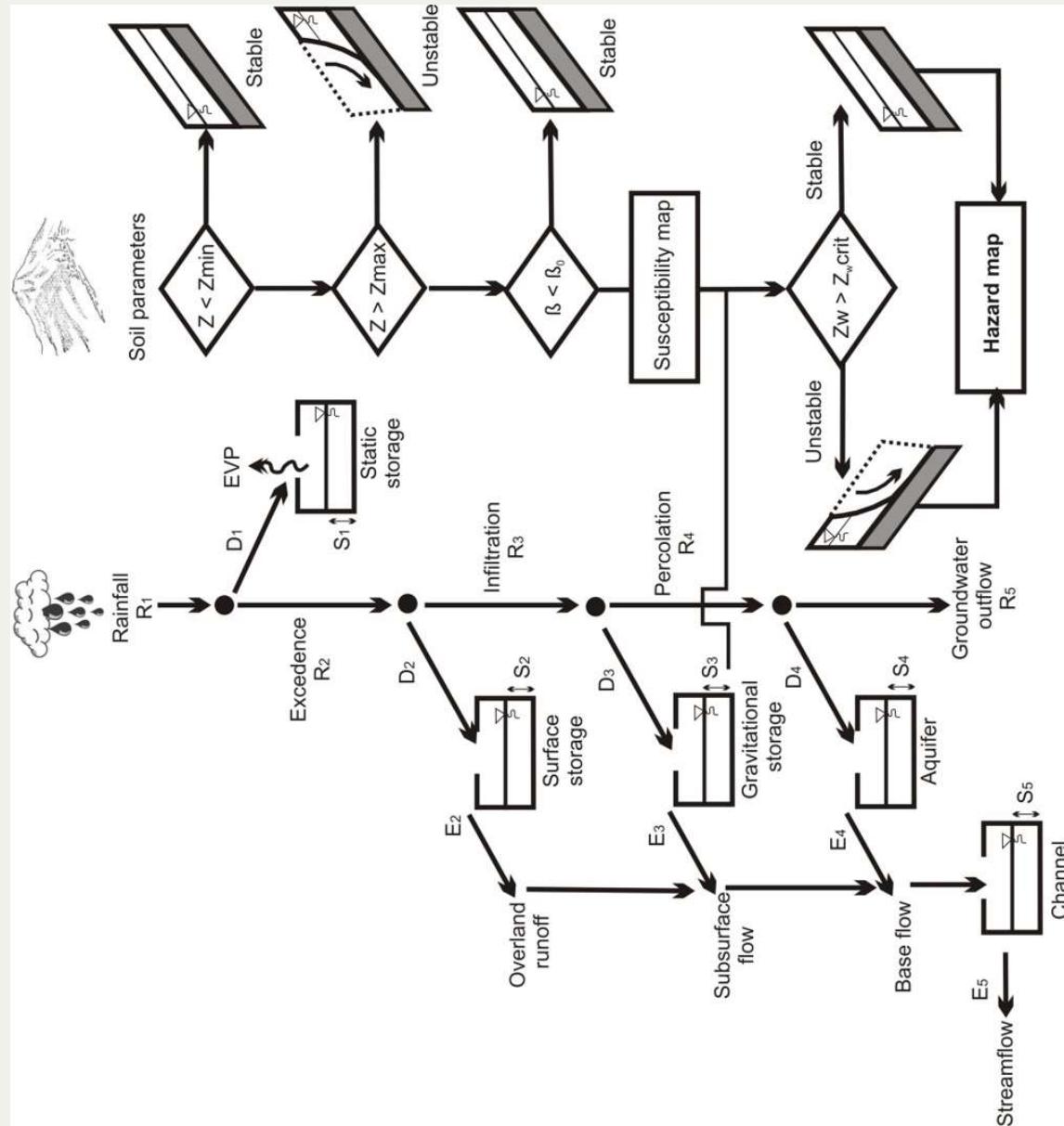


Tomado de Zapata (2016)

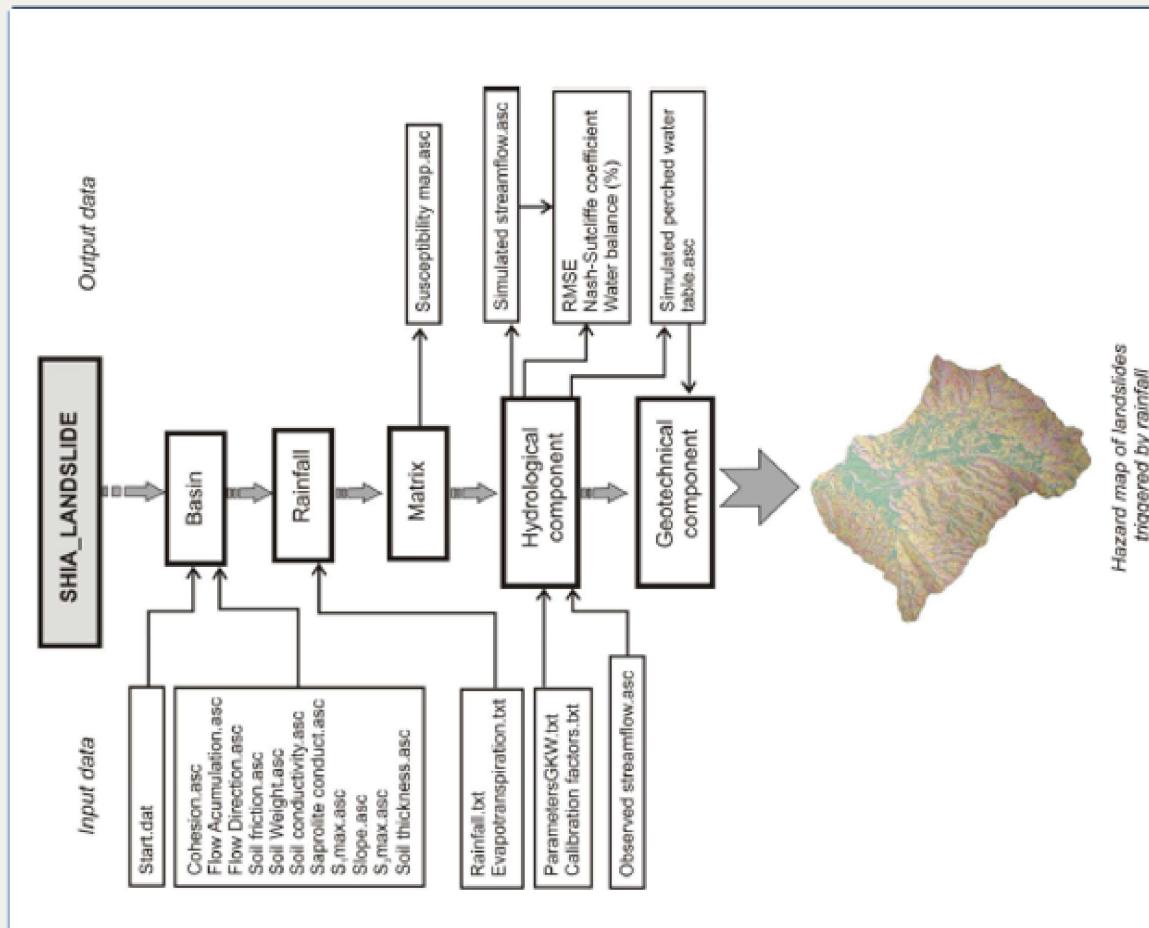


$$Z_{w\text{crit}} = \frac{\gamma}{\gamma_w} Z \left( 1 - \frac{\tan\beta}{\tan\phi} \right) + \frac{c'}{\gamma_w \cos^2 \beta \tan\phi}$$

Aristizábal et al (2015)



Aristizábal et al (2015)

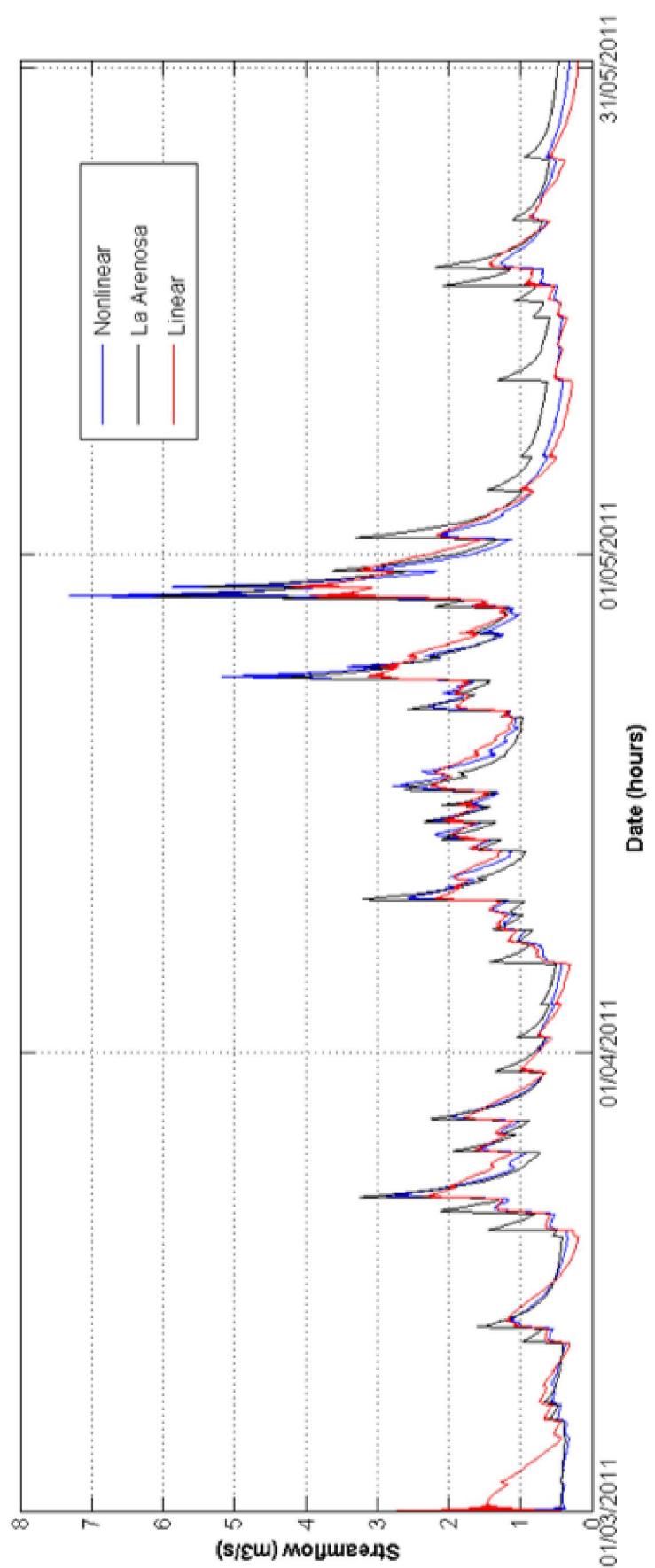


Aristizábal et al (2015)

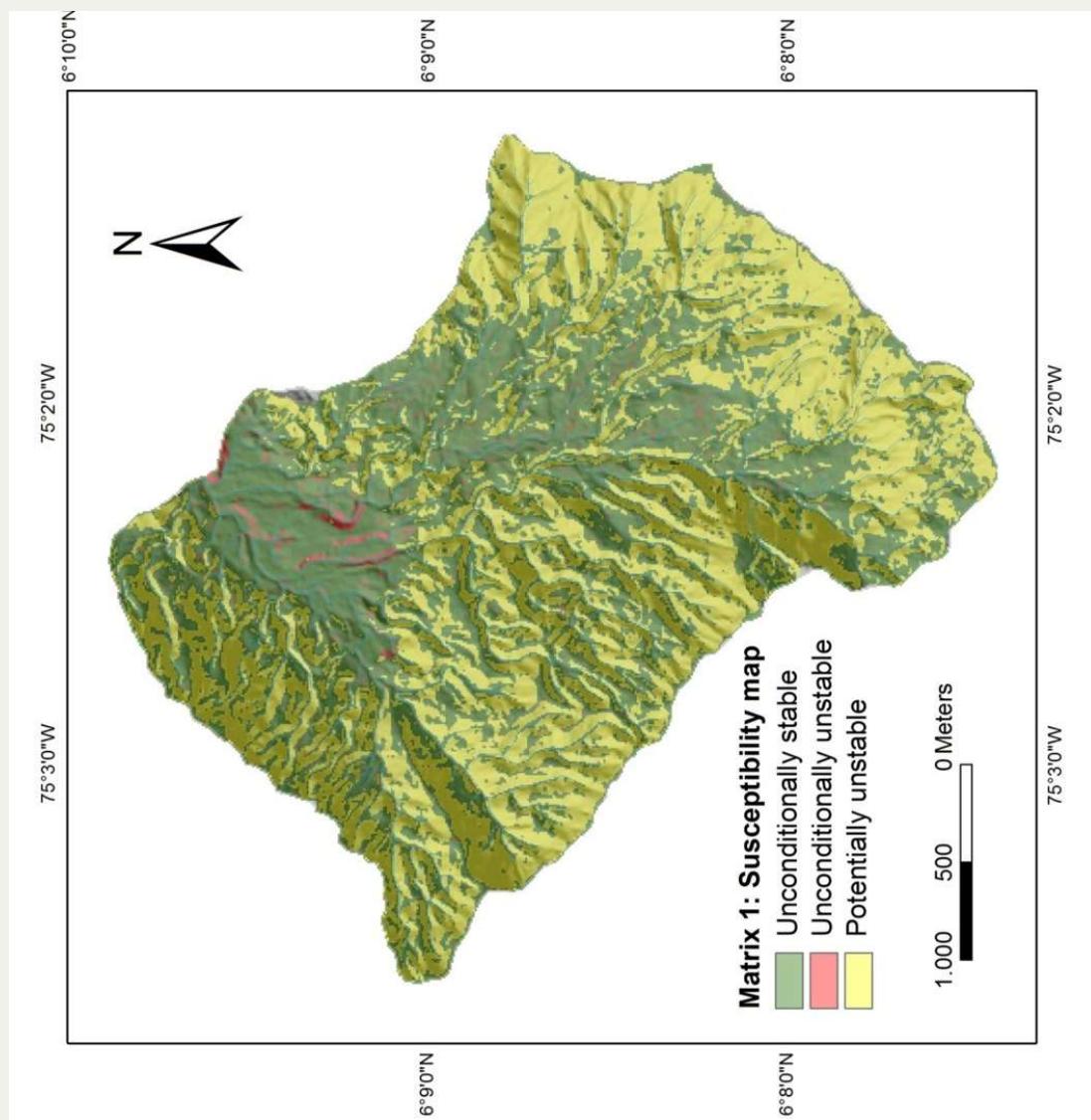
SHIA LANDSLIDE

SHIA LANDSLIDE by Aristizábal E., Vélez J.I., Martínez, H. (2013)

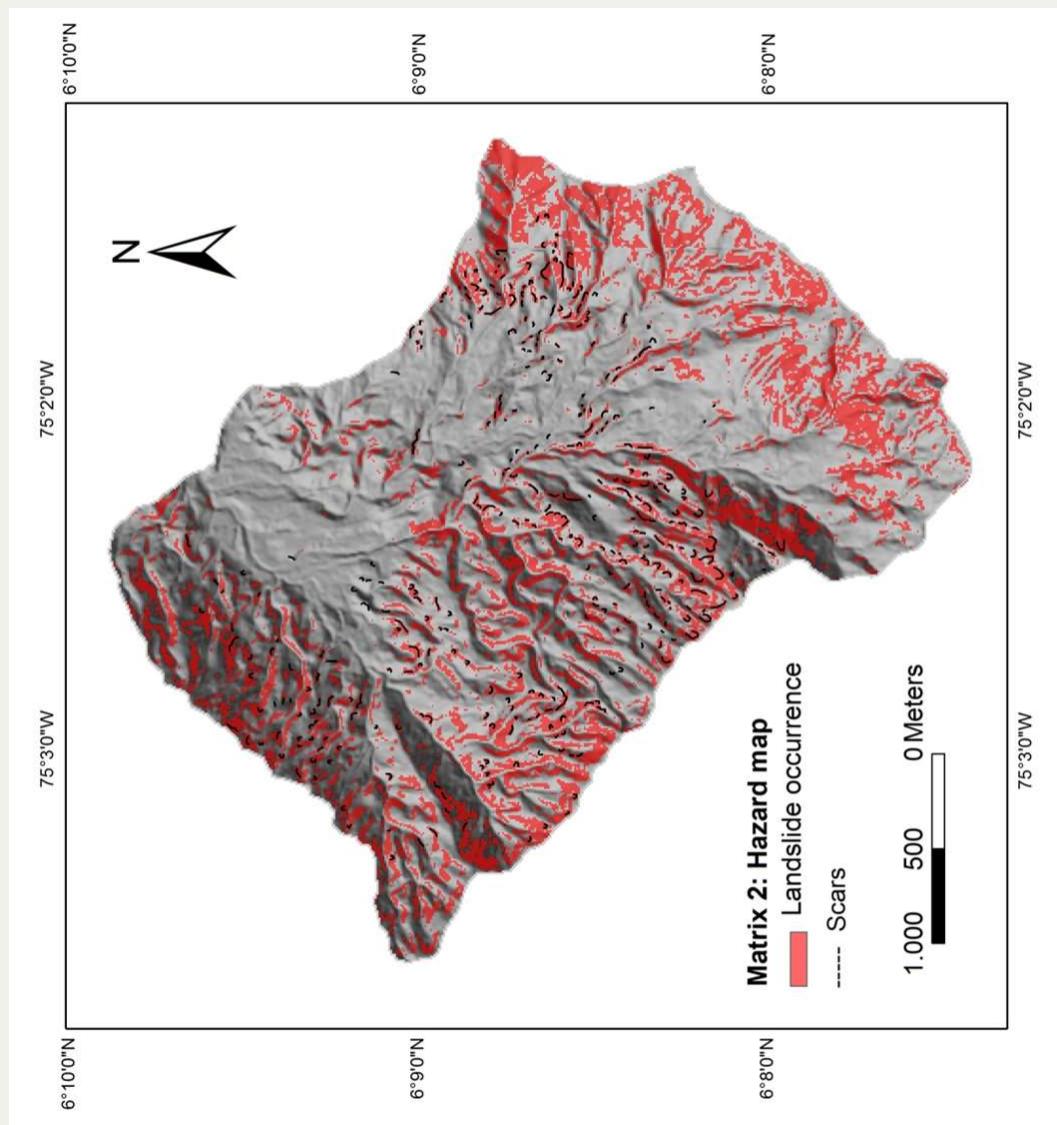
Aristizábal et al (2015)



Aristizábal et al (2015)



Aristizábal et al (2015)



Aristizábal et al (2015)