

# CARTOGRAFÍA GEOTÉCNICA

## Métodos Heurísticos

Prof. Edier Aristizábal



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

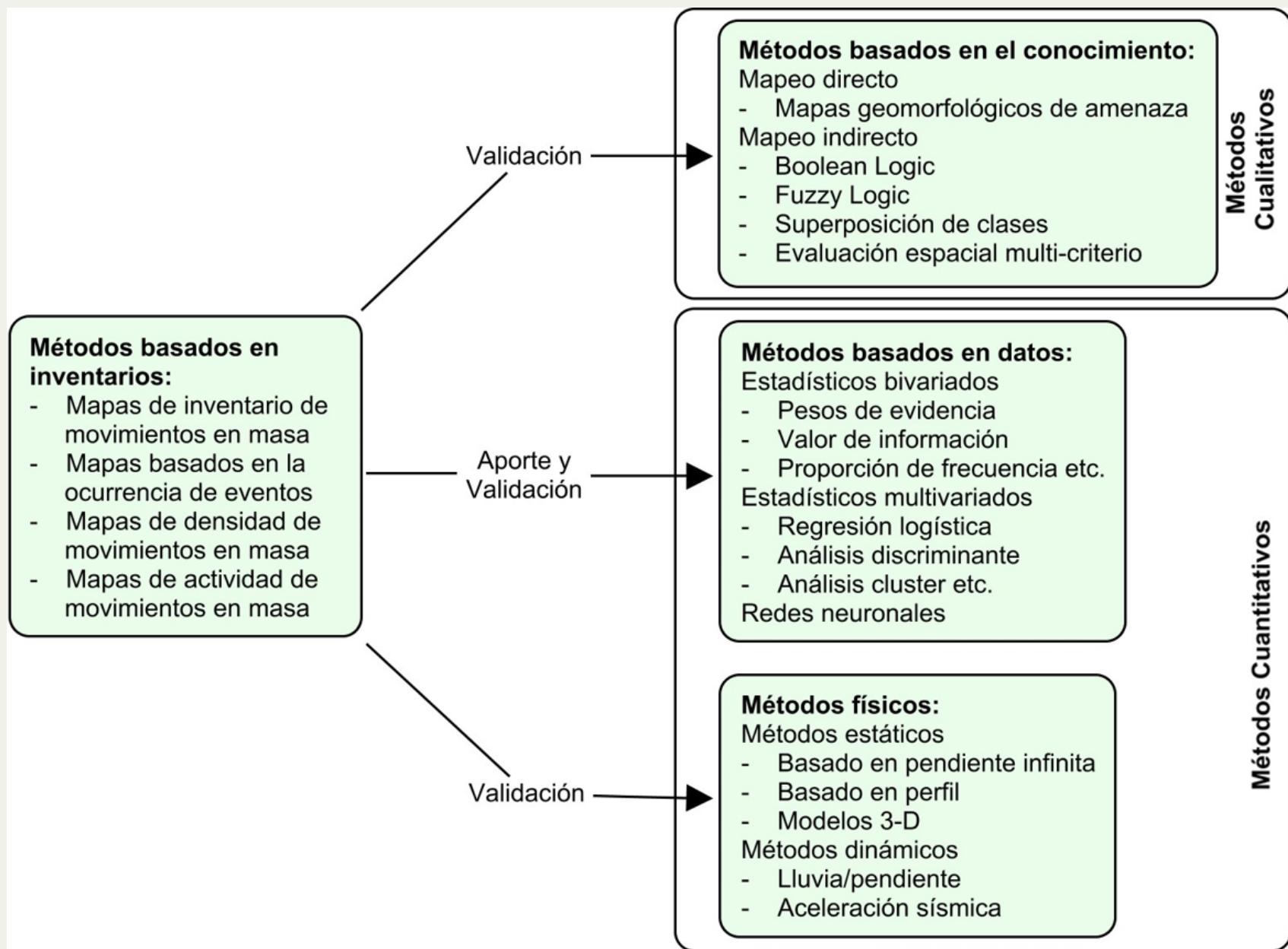
**SEDE MEDELLÍN**

Sept, 17 / 2020

# Contenido

- Métodos
- Métodos heurísticos
- Ejemplos
- Métodos de mapeo directo
- Zonificación geológico - geotécnica
- Algebra de mapas
- Análisis Jerarquico de Procesos (AHP)

# Métodos



# Método heurístico (knowledge-driven)

La susceptibilidad es determinada directamente o indirectamente por un experto en el fenómeno y en la región de estudio. El proceso esta basado en la experiencia individual y en el uso del razonamiento por lógica. Las reglas de decisión son por lo tanto difíciles de formular por que varían de lugar a lugar.

**El experto puede decidir:**

- Variables y clases a utilizar
- El peso de las clases
- El peso de las variables

**Criterios utilizados:**

- Evidencia de actividad reciente
- Ambiente geomorfológico de cada unidad identificada
- Tipo de material y sus condiciones
- Pendiente de las laderas
- Relación con las unidades adyacentes que pueden activar o afectar la unidad de análisis.
- etc., etc, ...

## Ventajas:

- Papel dominante de la opinión del experto en el análisis.
- Podrían ser utilizados a todas las escalas (pero no muy usado a escalas de detalle)
- Pueden permitir una rápida zonificación considerando una gran cantidad de variables
- Cada polígono individual puede ser evaluado separadamente de acuerdo con sus conjunto de condiciones únicas

## Desventajas:

- Altamente subjetiva, ya que depende de la habilidad y experiencia del experto
- No se puede generalizar
- No genera evaluación de la amenaza cuantitativa

En los métodos heurísticos la opinión de experto realizando la caracterización son utilizadas para clasificar la susceptibilidad. Estos métodos combinan el mapeo de los deslizamientos y las características geomorfológicas como el principal elemento de entrada para la evaluación de la susceptibilidad.

**Existen varios tipos de análisis heurísticos:**

- Análisis geomorfológico (métodos de mapeo directo)
- Análisis basado en índices (mapeo indirecto)
- Análisis de decisión multicriterio (mapeo indirecto)

# Cartografía Geomorfológica

## *Procedimiento multipropósito*

### Mapas geomorfológicos analíticos

- Dan información sobre formas del relieve y procesos con énfasis en la morfogénesis y la morfocronología.
- Estudios monodisciplinarios.
- Mapas básicos de la cartografía geomorfológica aplicada.

### Mapas geomorfológicos sintéticos

- Holísticos.
- Estudios multidisciplinarios
- Expresión del terreno y su relación con otros factores como clima, suelos, hidrología,, vegetación, etc.

---

## *Procedimiento de propósito específico*

### Mapas geomorfológicos pragmáticos

- Evaluación de amenazas
- Planificación territorial
- Levantamiento información relevante al objeto de estudio

Fuente: van Zuidam (1985)

## Análisis de terrenos

### 1 paso:

Reconocimiento de varios atributos de terreno basados en la detección de geoformas relacionados con procesos, tipos de roca, suelos, hidrología,, vegetación y coberturas

*Procedimiento multipropósito*

### 2 paso:

Delineación de sistemas de terrenos de acuerdo a unidades de relieve general

### 3 paso:

Delineación de unidades de terreno de acuerdo a unidades geomorfológica o geoformas

## Clasificación de terrenos

### 4 paso:

Selección y delineación mas detallada de varias unidades de terreno (sub unidades) de acuerdo con los atributos de terreno, los cuales son importantes para el alcance del estudio específico

*Procedimiento de propósito específico*

### 5 paso:

Dar valores y rangos a los sistemas de terreno y unidades de acuerdo con su aplicación para un alcance específico

### 6 paso:

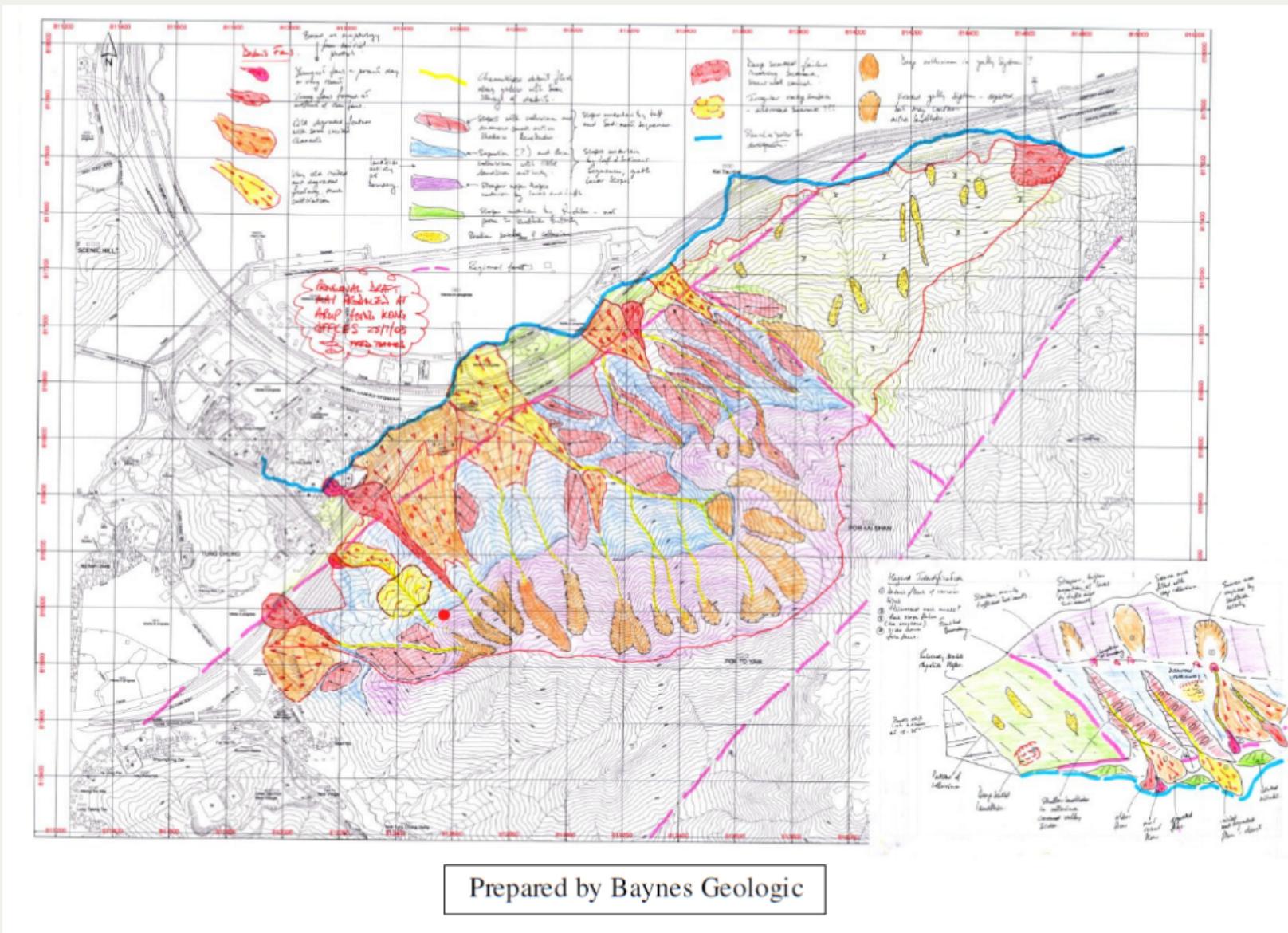
Evaluación final de los sistemas de terreno, unidades y subunidades, de acuerdo con el alcance de la evaluación de terrenos del estudio.

## Evaluación de terrenos

Fuente: van Zuidam (1985)

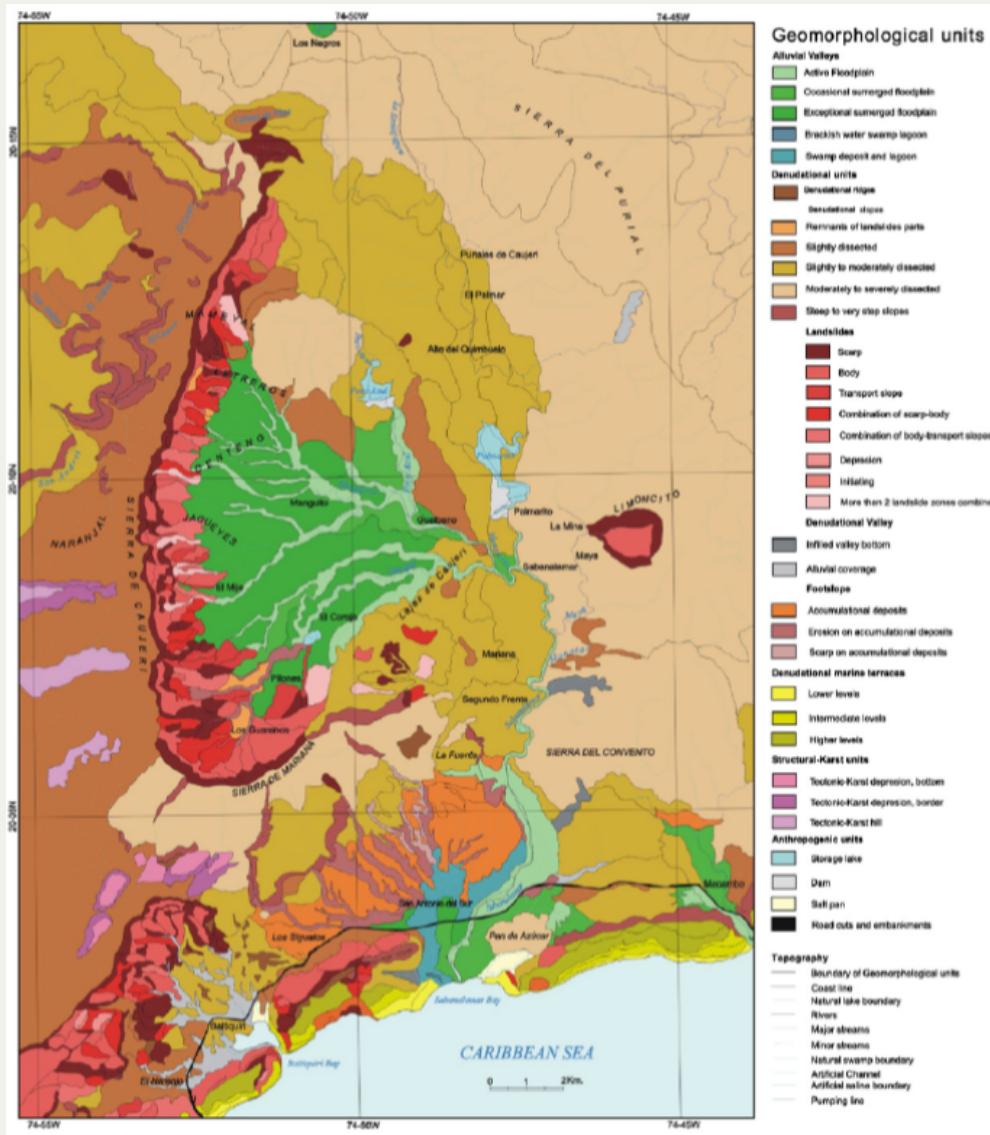
# Ejemplos

5 . 1

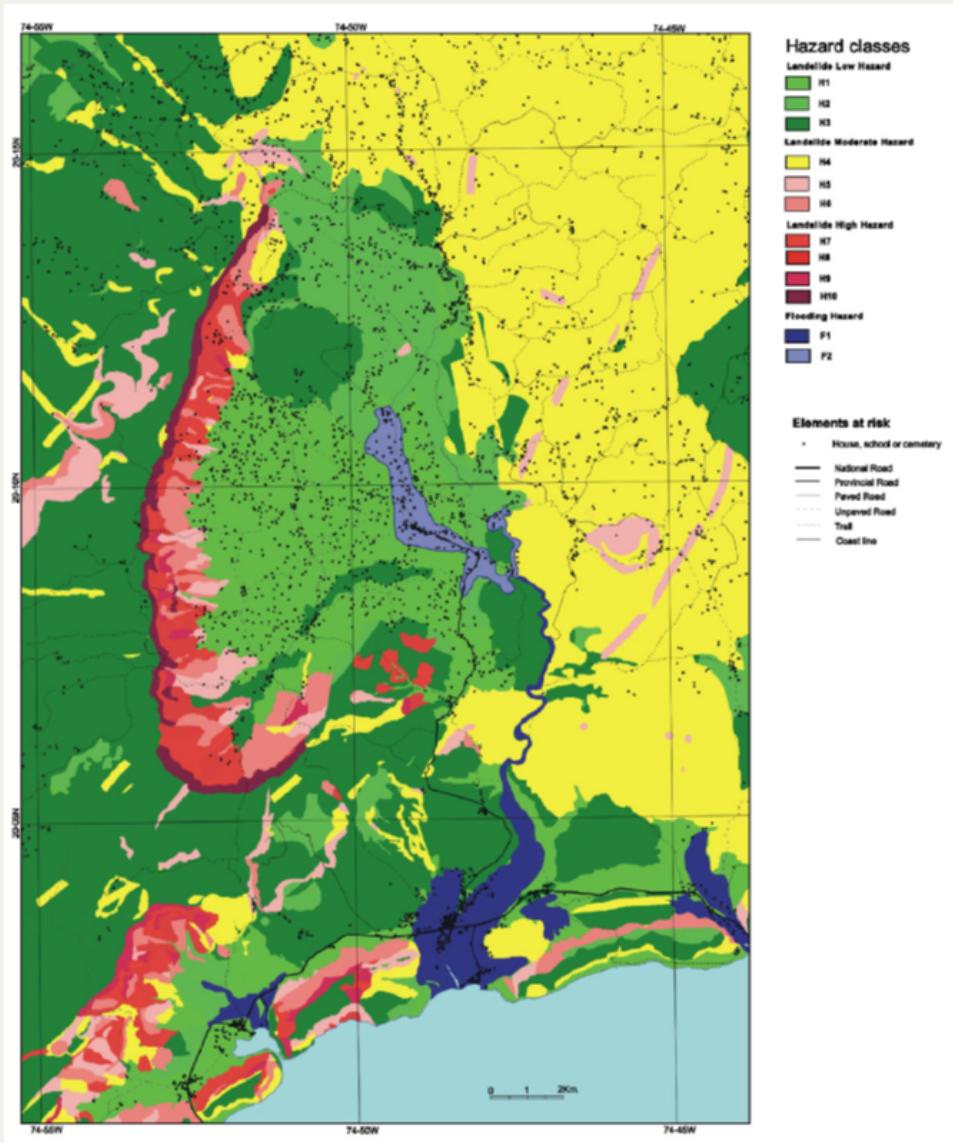


Fuente: GEO 22 (GCO, 2006)

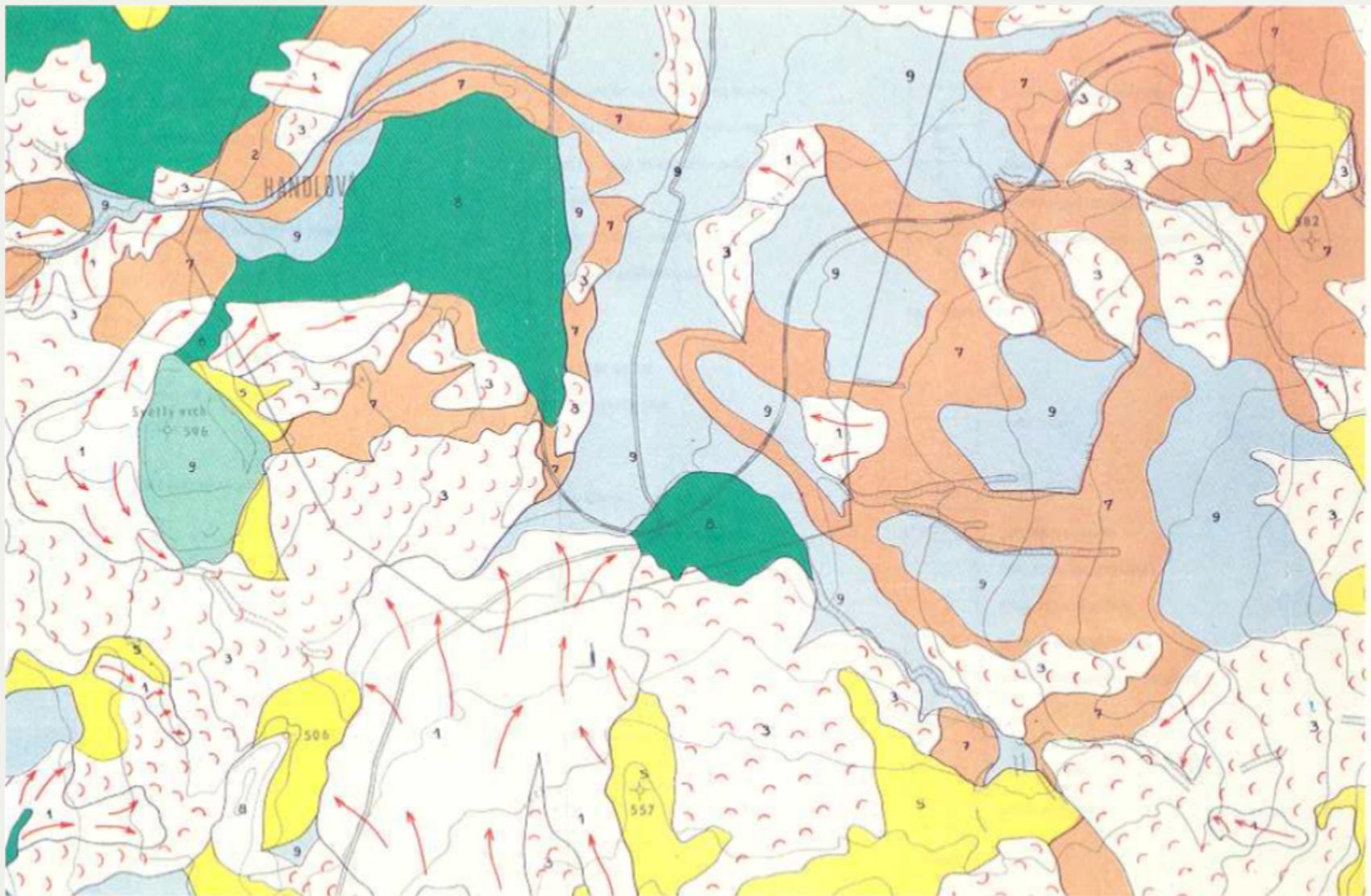
5 . 2



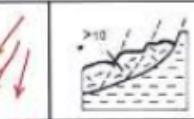
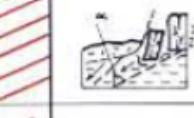
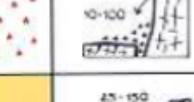
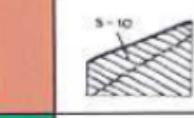
Fuente: Castellanos & van Westen (2007)



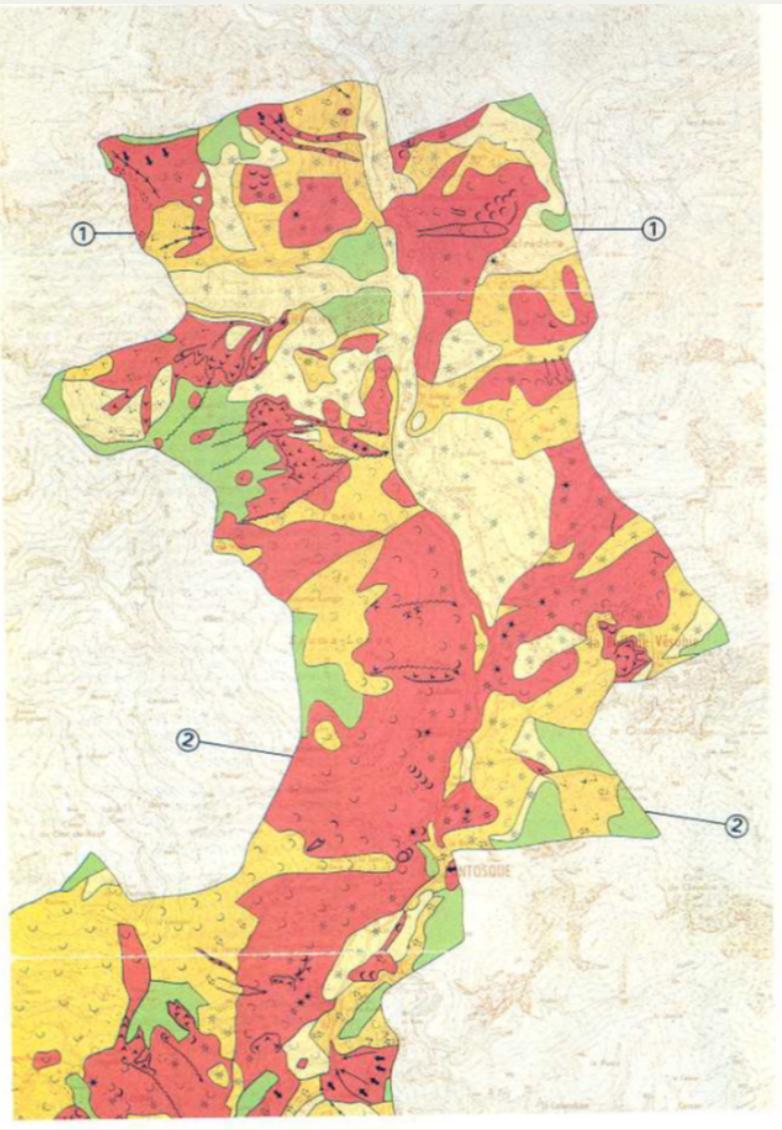
Fuente: Castellanos & van Westen (2007)



Mapa de zonificación geológica para ingeniería y estabilidad. Malgot et al, (1973) tomado de Varnes (1984).

Zones	District	Schematic section	Conditions of slope movements			Character and activity of movements	Conditions of construction
			Geologic	Morphologic	Hydrogeologic		
I Unstable areas	1. Recent active landslides and earth flows		Stony and clayey loams on tuffitic clays and claystones	Clear landslide relief; strong surface disturbance	Wet and marshy areas	Sliding on complex surfaces; velocity m/day; Slight natural impulse enough for activation	Unsuitable for construction; corrective measures would be too expensive
	2. Slopes affected by undermining		Andesites, tuffs, tuffitic clays and clayey loams with fragments (material of landslides)	Downthrusted blocks; rock steps; Fresh fissures; grabens	Local marshy areas	Relatively quick movements depending on advance of mining; reactivation of landslides; cm/month	Unsuitable for construction
	3. Older potential landslides		Stony and clayey loams on claystones and tuffitic clays	Gentle slopes (7-10°) undulating relief; no evident boundaries of landslides	Less-watered areas; small lakes; landslide springs	Landslides in creeping motion; velocity cm/year; possible activation due to anthropological factor	Areas conditionally suitable; requires investigation and corrective measures or adjustment of construction
	4. Areas threatened by rock fall		Andesites with columnar jointing and agglomerates	Rock walls; steep slopes	Dry	Rapid movements; velocity m/s; rock falls dependent on weathering and block movements	Construction always requires special corrective measures
II Relatively stable areas	5. Block field		Strongly fissured andesites, agglomerates and their debris on claystones and tuffitic clays	Steep slopes; back-tilted blocks; closed depressions	Blocks without water; wet depressions between blocks; spring lines below larger blocks	Creeping movements of individual blocks on plastic substratum; velocity cm-mm/year	Areas suitable for unpretentious construction (chalets etc.); corrective measures may be required
	6. Block rifts		Strongly fissured andesites and agglomeratic tuffs on claystones and tuffitic clays	Graded relief; deep open cracks; steep slopes with rock steps	Practically dry; fissure springs in places	Moderate dip and sinking of separated blocks into plastic underlying beds; velocity mm/year	Generally unsuitable area because of its articulate relief
	7. Slopes susceptible to landsliding		Colluvial and clayey loams on claystones with sandstone intercalations (Palaeogene), tuffitic clays (Neogene)	Lightly undulated slope with inclination 8-20°	Area mostly dry except at foot of slopes	Slow creeping movements in places dependent on dip and rainfall; velocity mm/year	Areas conditionally suitable for all types of construction; requires delicate approach; volume changes
III Stable areas	8. Steeper slopes with complex relief		Andosite, agglomeratic tuffs, dolomites, covered with their debris	Relatively steep slopes in solid rocks	Area mostly dry; fissure water	Movement within normal deluvial processes; negligible from geotechnical viewpoint	Areas suitable from slope-stability viewpoint; dependence on relief
	9. Flat slopes of alluvium and alluvial cones		Gravel, sand, sandy loams with fragments and gravel	Flood-plain; moderate plateaux	Groundwater table at slight depth apart from some dry alluvial cones; dry	Stable areas, practically without movement	Areas suitable from slope-stability viewpoint; dependence on hydrogeological conditions

Mapa de zonificación geológica para ingeniería y estabilidad. Malgot et al, (1973) tomado de Varnes (1984).



Mapa de la región de Moyenne Vesubie en Francia en esc. 1:25.000. Meneroud & Calvino (197) tomado de Varnes (1984).

### Zoning of terrain—hazard level

Area of uncertainty	Absence of all determining factors*	Zones in which the hazard level is low or non-existent. Little or no probability of the appearance of the active phenomenon or phenomena
	Absence of all determining factors, except one, at least, about which some doubt remains	
	Presence of all determining factors, except one, at least, about which some doubt remains	Zones in which the hazard level is high. High probability of the appearance of the active phenomenon or phenomena
	Presence of all determining factors	

\* Determining factors are those inducing the phenomenon or phenomena

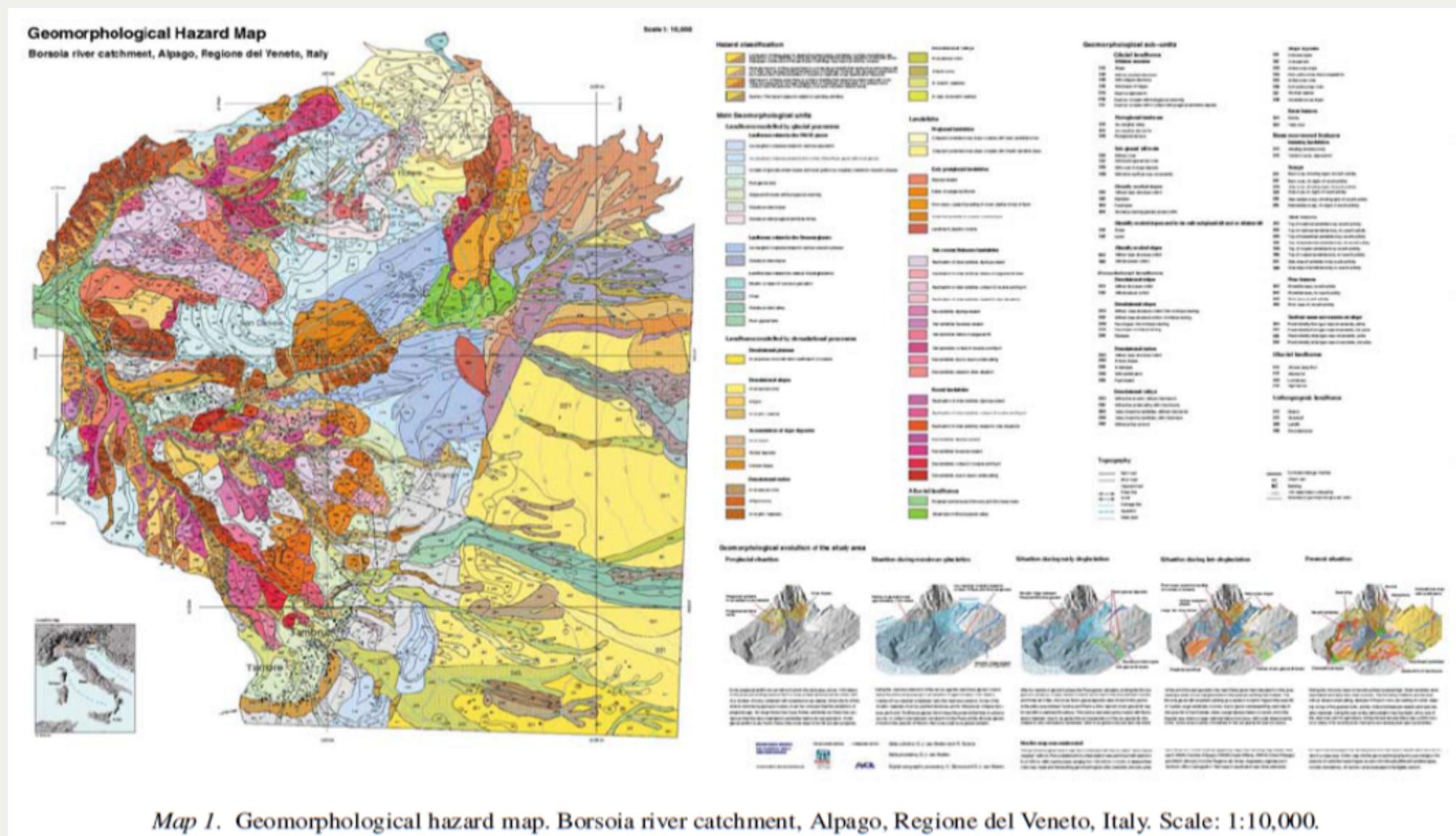
### Nature of the hazards and their symbols

- ↙ Active slide
- ↖ Reported old slide zone
- ↘ Potential slide zone
  
- ★ Active subsidence
- ☉ Reported old subsidence zone
- Potential subsidence zone

- ↗ Active erosion
- ↖ Potential erosion zone
  
- ↓ Active crumbling
- ↔ Potential rockfall zone
  
- Areas of rockfall
- Areas of moving scree
- Mudflows
- Line of break

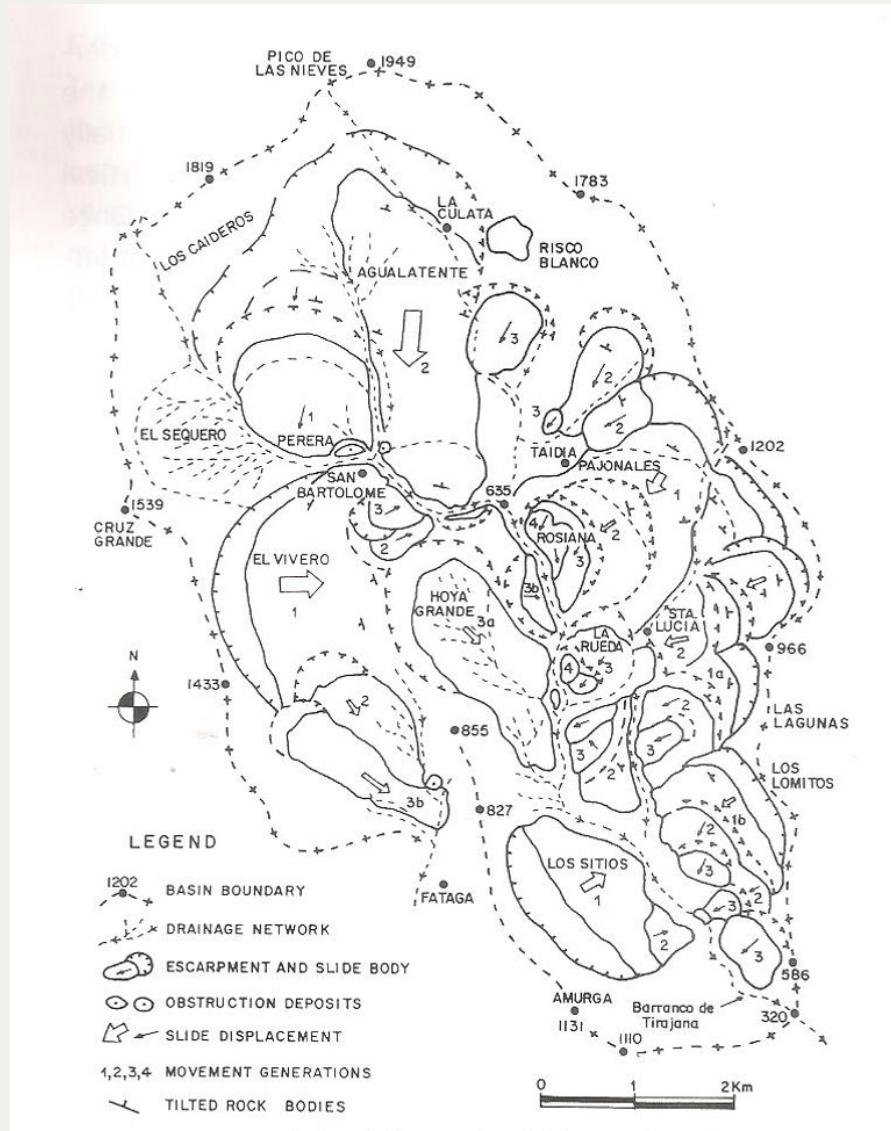
Leyenda del Mapa de la región de Moyenne Vesubie en Francia en esc. 1:25.000. Meneroud & Calvino (197) tomado de Varnes (1984).

# Mapa geomorfológico de amenaza

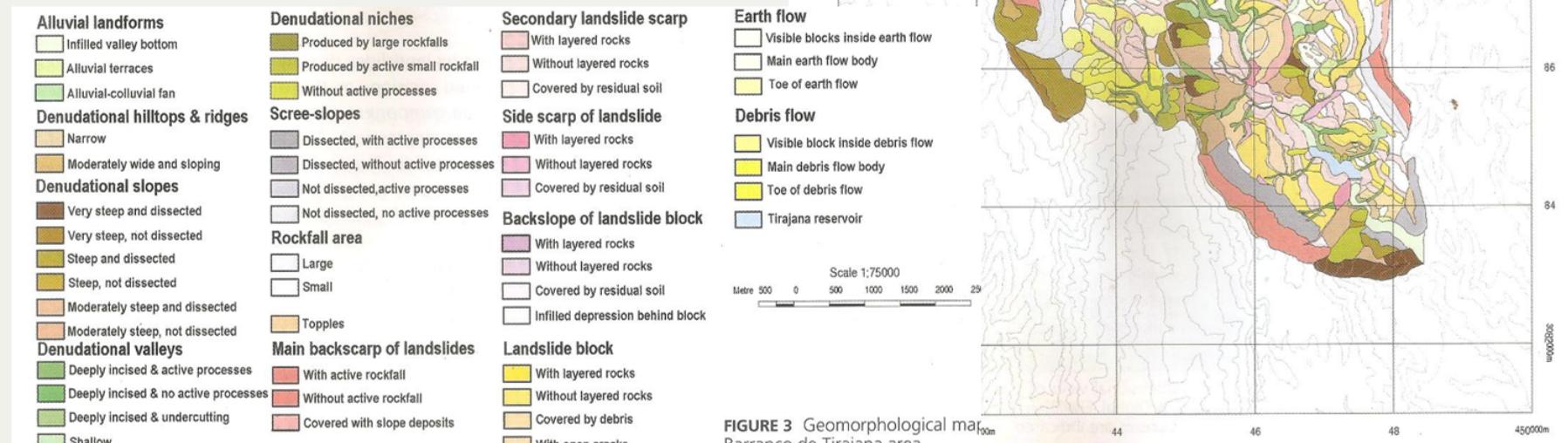


*Map 1.* Geomorphological hazard map. Borsoia river catchment, Alpago, Regione del Veneto, Italy. Scale: 1:10,000.

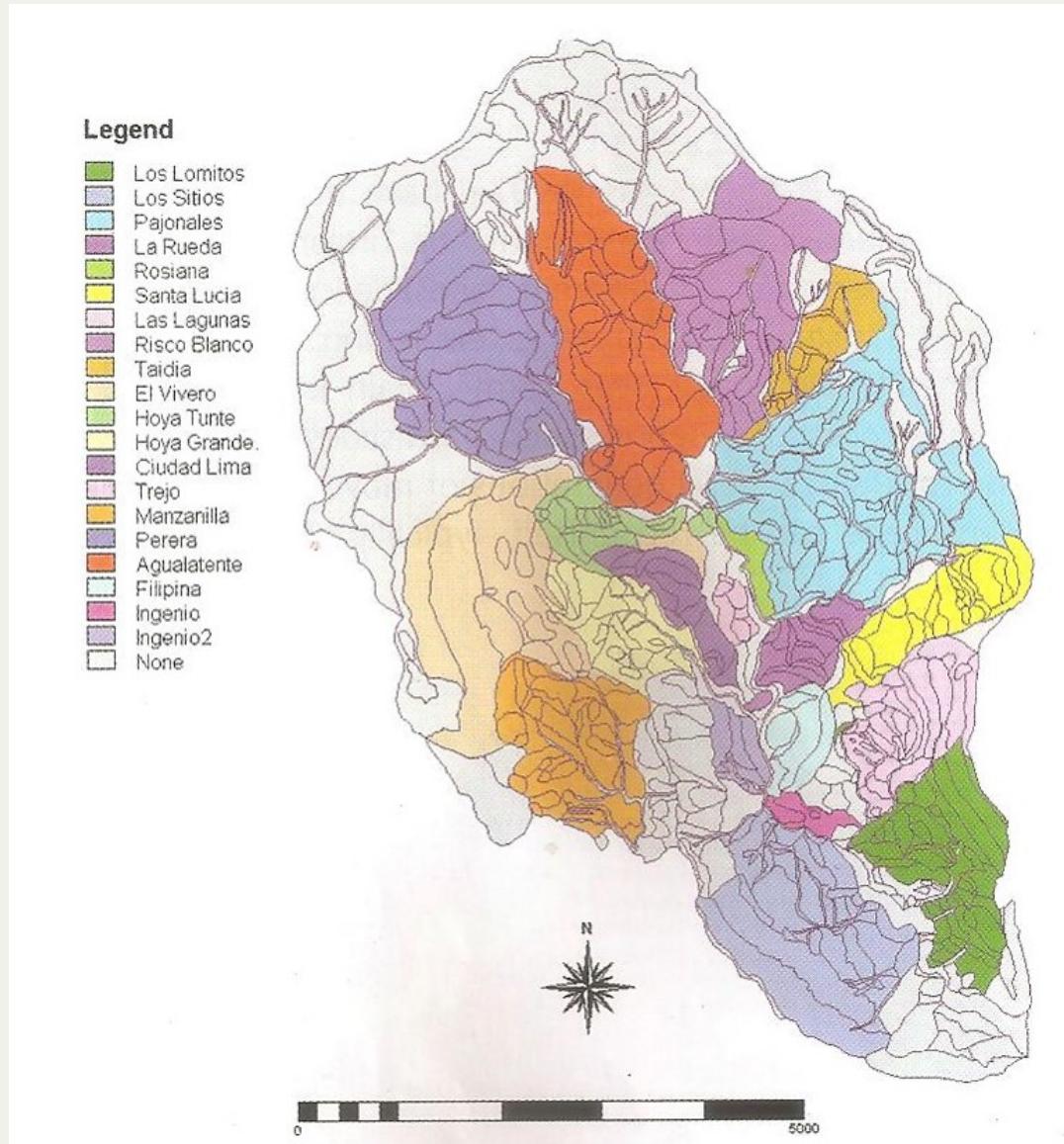
Fuente: van Westen et al. (2003)



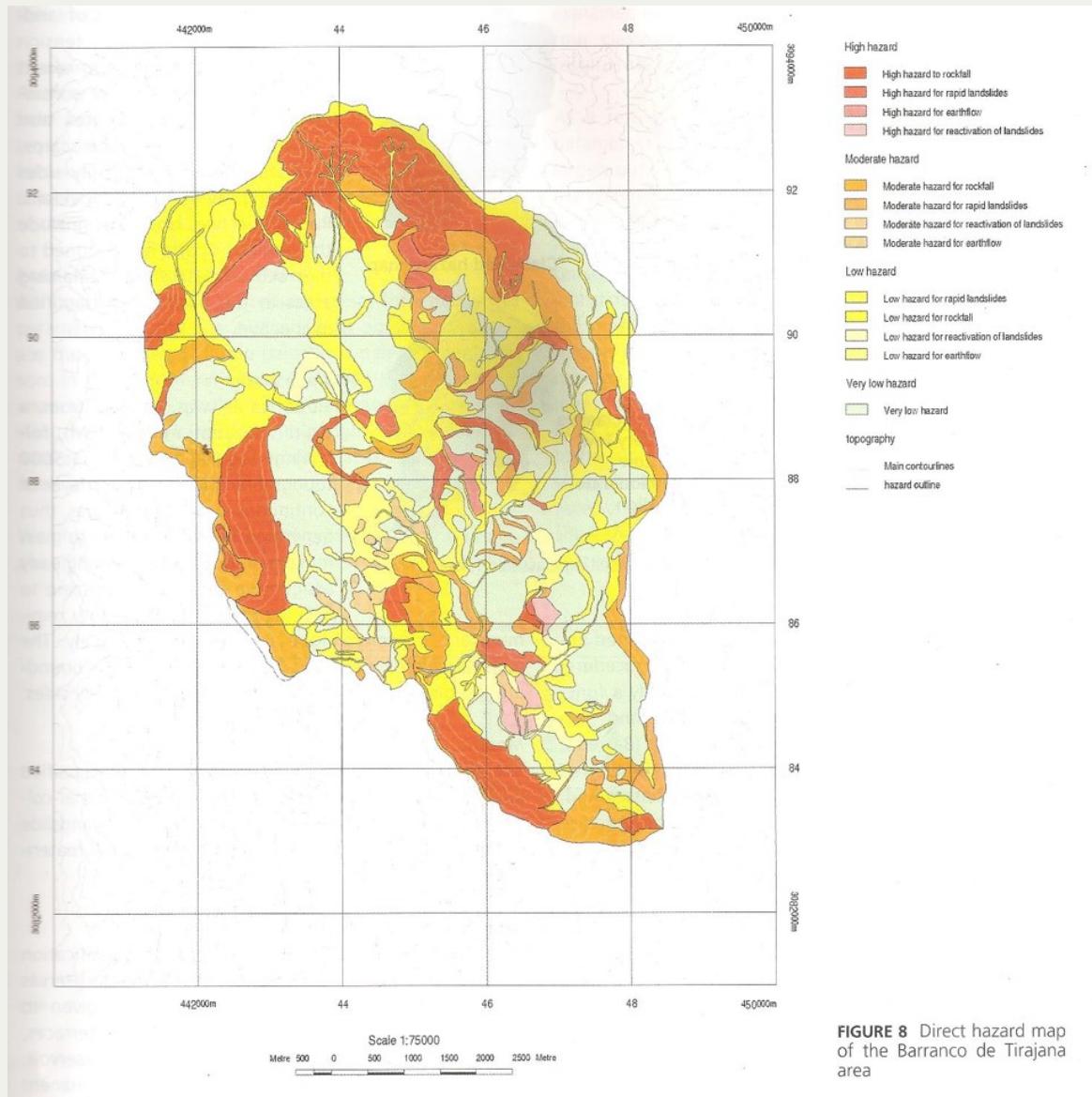
Fuente: Barredo et al. (2000)



Fuente: Barredo et al. (2000)



Fuente: Barredo et al. (2000)



**FIGURE 8** Direct hazard map of the Barranco de Tirajana area

Fuente: Barredo et al. (2000)

# Zonificación geológico - geotécnica

Los estudios geológicos y geomorfológicos se deben enmarcar dentro de un estudio de zonificación de la aptitud geológica del predio de interés, el cual se debe planear y elaborar en diferentes etapas que comprenden:

- Recopilación de información existente,
- Fotointerpretación y uso de sensores remotos disponibles,
- Análisis detallado de la base topográfica existente,
- Realización de visitas de campo para el reconocimiento de las unidades litológicas y geomorfológicas,
- Descripción detallada y sistemática de afloramientos,
- Medición y análisis de estructuras geológicas,
- Levantamiento cuidadoso del perfil de meteorización y los depósitos de vertiente o aluviales,
- Identificación de los procesos morfodinámicos presentes en la zona de influencia del proyecto.

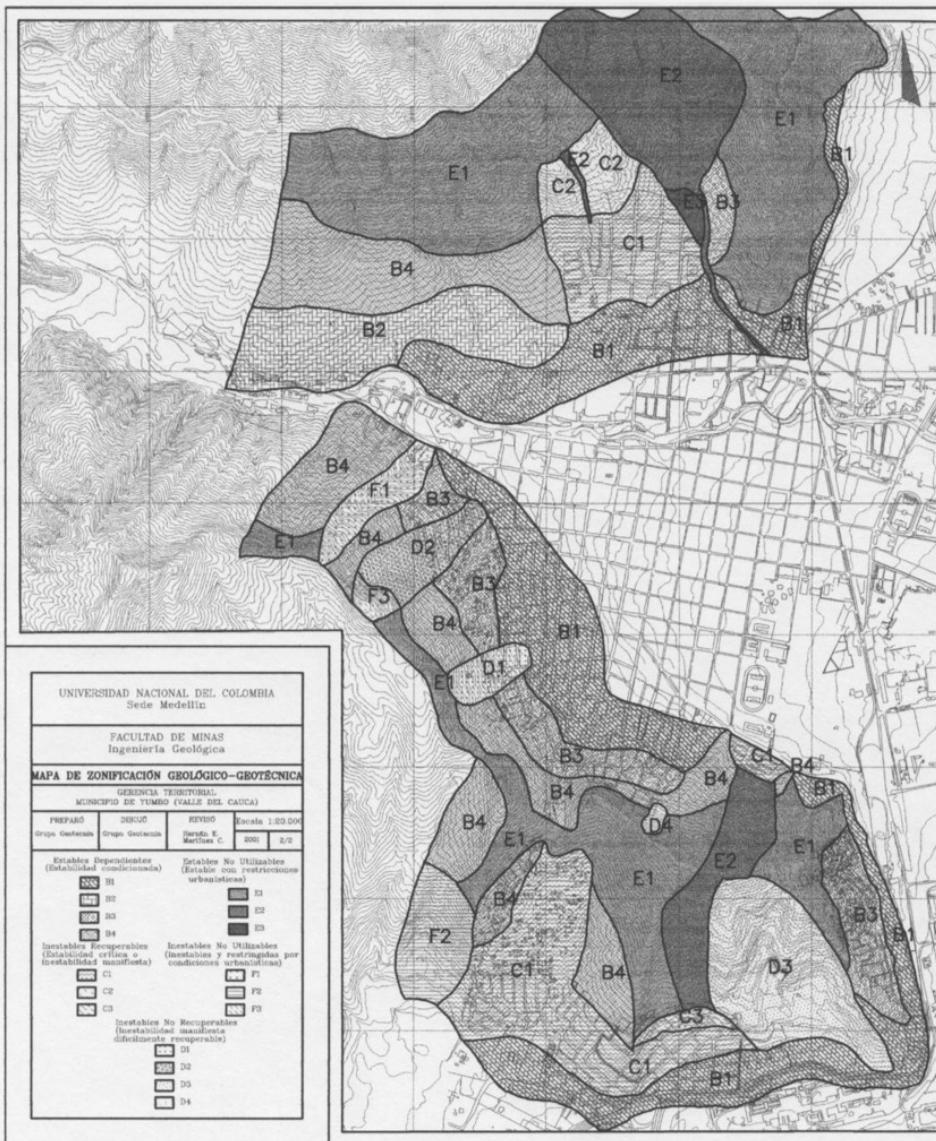
Fuente: Directrices y lineamientos AMVA (2012)

- **Subzonas tipo A – Estable independiente:** su estabilidad es de alto grado pues sus condiciones naturales son favorables. Posiblemente llegaría a depender del manejo mismo que se le dé al terreno.
- **Subzonas tipo B – Estable dependiente:** su estabilidad depende de factores externos, los cuales se deben corregir. También de factores internos que implican un manejo determinado del terreno y cierto tipo de obras civiles que garanticen el no deterioro de esta estabilidad natural inicial.
- **Subzonas tipo C – Inestable recuperable:** la estabilidad de estos terrenos es critica o presenta inestabilidad manifiesta; sin embargo, con algunos correctivos específicos se puede mejorar la estabilidad, y en consecuencia, adelantar ciertas obras civiles en si interior.

Fuente: Chica (1998)

- **Subzonas tipo D – Inestable no recuperable:** terrenos con inestabilidad manifiesta cuya recuperación no es posible o demasiado costosa comparada con las inversiones y tipo de obras proyectadas.
- **Subzonas tipo E – Estable no utilizable:** terrenos estables pero restringidos por condiciones urbanísticas u otras como estar ubicadas en vegas potenciales de inundación o cerca de frentes libres de taludes desprotegidos.
- **Subzonas tipo F – Inestables no utilizables:** terrenos inestables y restringidos por condiciones como las mencionadas para la subzona anterior.

Fuente: Chica (1998)



Prof. Hernán Martínez -Curso Cartografía Geotécnica (1999)

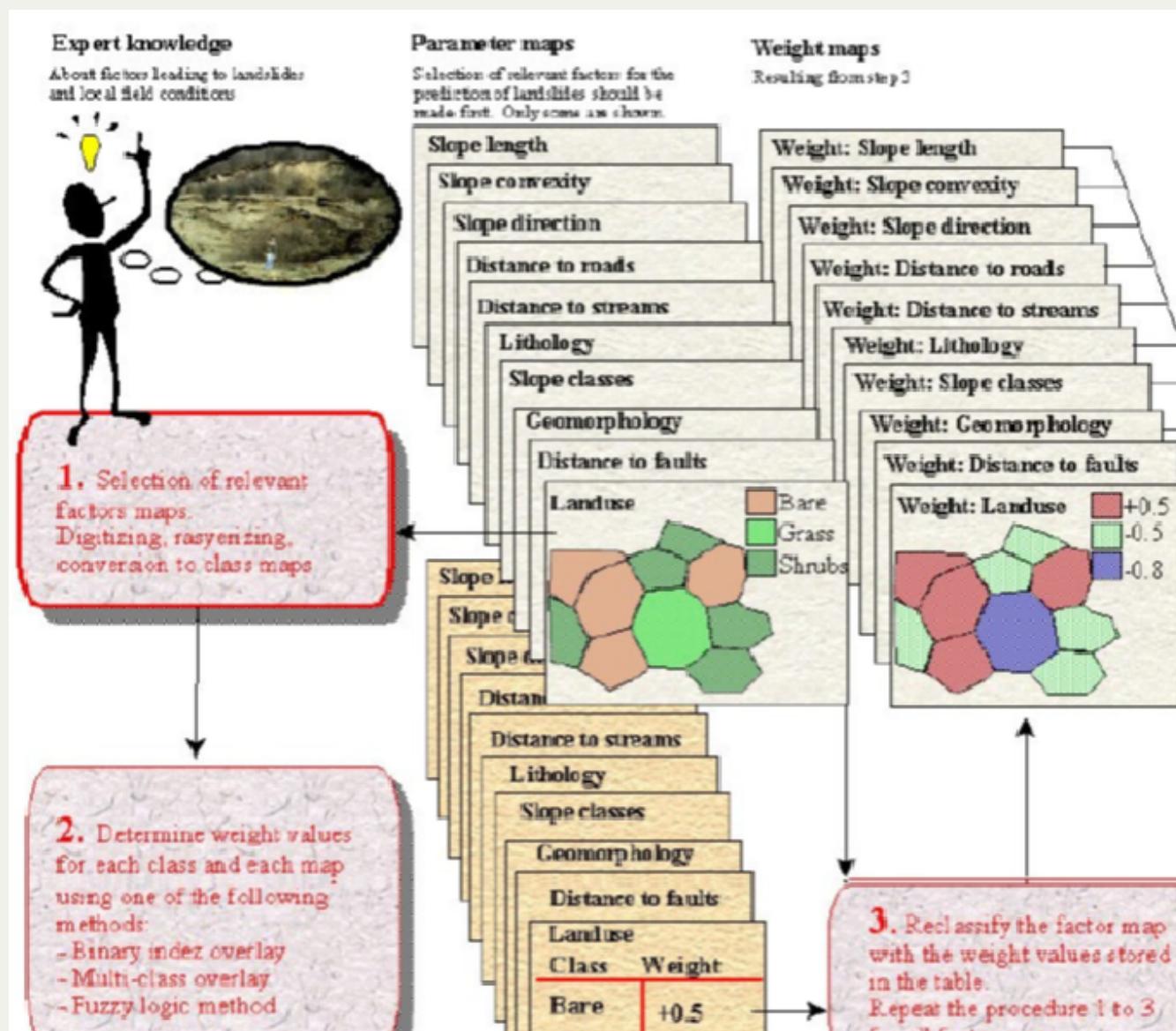
Categoría	Clasificación	Criterios de chequeo
Áreas Urbanizadas	Estables, para consolidación	Susceptibilidad baja Sin evidencias de problemas Sin registros
	Potencialmente inestables, para intervención	Susceptibilidad media Con evidencias de problemas Con registros de eventos Sin estudios / sin evidencias
	Inestables, para recuperación	Susceptibilidad alta Problemas detectados Con registro de eventos Sin estudios / con evidencias y/o registros
Áreas No Urbanizadas pero Urbanizables	Restricciones mínimas	Susceptibilidad baja Sin problemas aparentes Sin registro de eventos
	Restricciones considerables	Susceptibilidad media o alta Con evidencias de problemas Con registros de eventos Sin estudios
	Estables, para consolidación rural	Susceptibilidad baja Sin problemas aparentes Sin registro de eventos
No Urbanizadas - No Urbanizables	Potencialmente inestables, para intervención	Susceptibilidad media Con evidencias de problemas Con registros de eventos Sin estudios / sin evidencias
	Inestables para recuperación y conservación	Susceptibilidad alta Problemas detectados Con registro de eventos Sin estudios / con evidencias y/o registros

Fuente: Aristizábal & Hermelin (2011)

- **Zonas aptas:** alto grado de estabilidad, sin procesos morfodinámicos activos e inactivos, estabilidad condicionada al tipo de intervención y su manejo..
- **Zonas aptas con restricciones moderadas:** zonas estables con estabilidad condicionada por la incidencia directa de los procesos morfodinámicos activos identificados en la UMI. Su estabilidad depende del manejo a los procesos existentes y la intervención, con obras de estabilización proyectadas técnica y económicamente viables.
- **Zonas aptas con restricciones altas:** se evidencia la ocurrencia de proceso morfodinámicos activos, y su estabilidad depende del manejo que se le de a estos procesos y la intervención. El estudio debe evaluar la viabilidad técnica y económica de las obras de estabilización proyectadas.
- **Zonas no aptas:** con evidente inestabilidad por la ocurrencia de procesos morfodinámicos. El estudio considera que las obras de estabilización proyectadas son complejas y de alto costo con respecto a las intervenciones proyectadas en la zona o predio de interés.

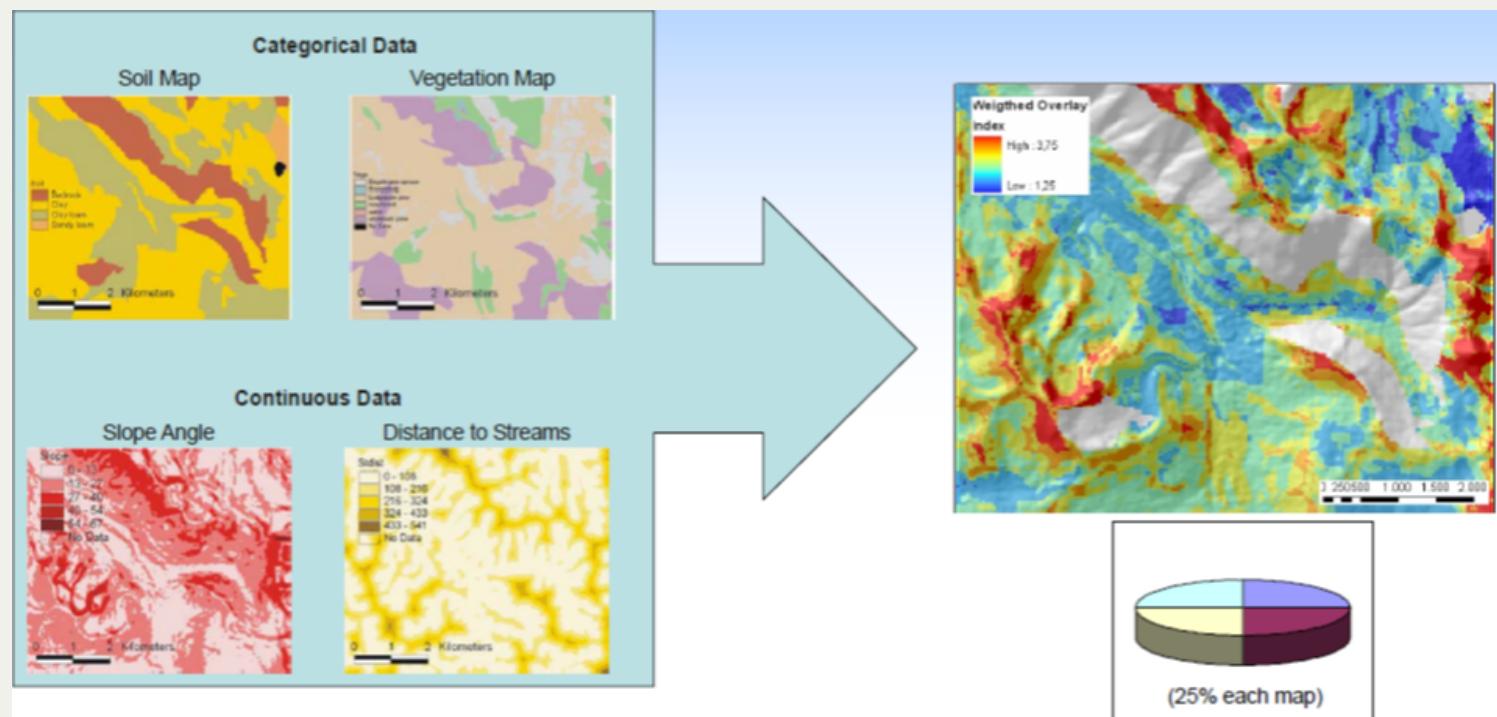
Fuente: Directrices y lineamientos AMVA (2012)

# Index mapping



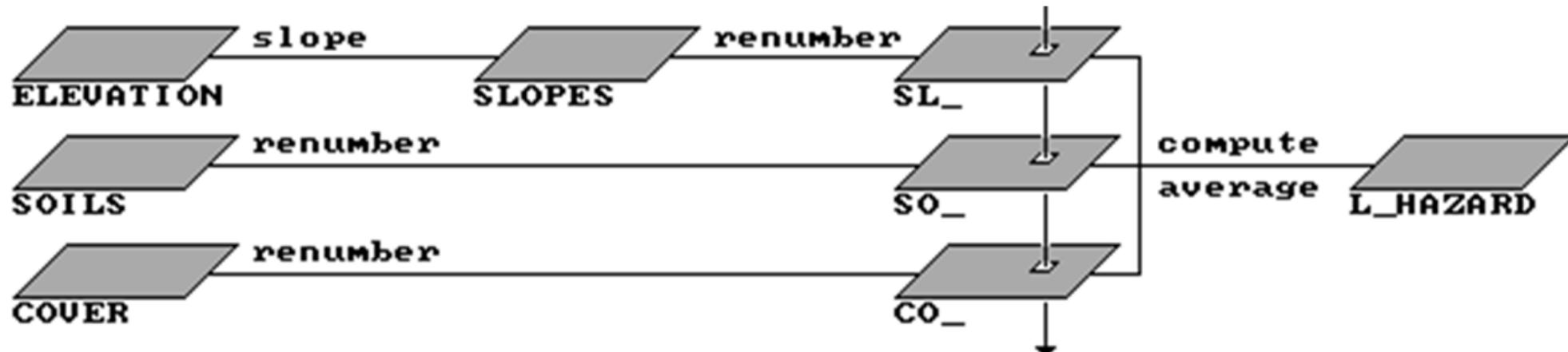
Fuente: van Visten (Introduction of Landslide Part 4 Use of GIS for landslide mapping)

Combina mapas de factores asociados con la ocurrencia de deslizamientos. Los pesos son determinados para cada factor basado en un estimativo de la influencia relativa a los deslizamientos. Las variables son generalmente divididas en clases, los cuales son ponderados utilizando el criterio de expertos. Finalmente, un índice de susceptibilidad o amenaza es obtenido para cada unidad del mapa.

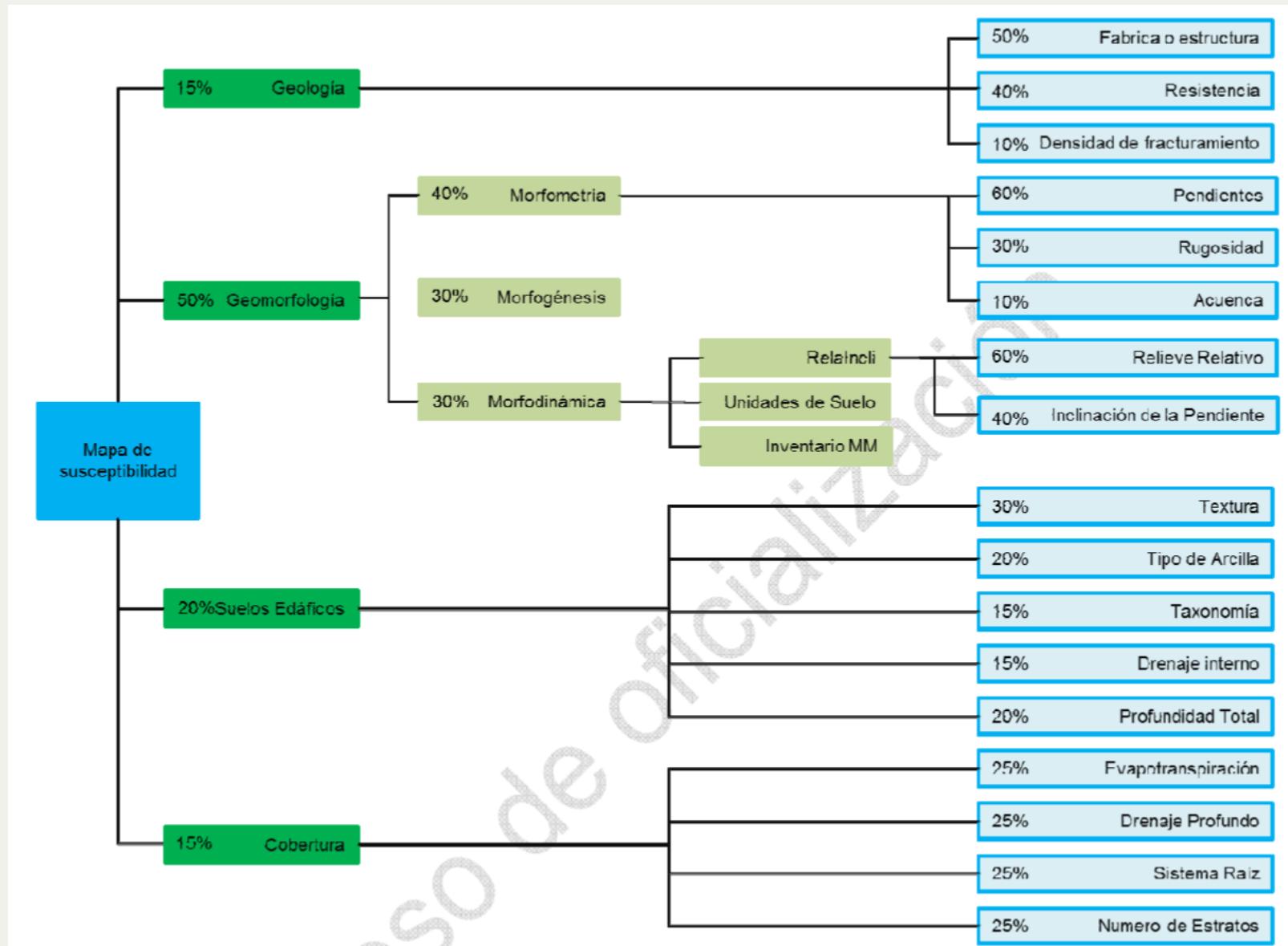


# Landslide Susceptibility — identifies landslide susceptible areas

Landslide Hazard Model —  $f_n(\text{Slope}, \text{Soil Type}, \text{Cover Type})$



<u>Value or Range</u>	<u>Model Type</u>	<u>Example Computations</u>	<u>Interpretation</u>
0 or 1 No or Yes	Simple Binary (Times)	$(1 * 0 * 0) = 0$ $(1 * 1 * 1) = 1$	0 = No 1 = Yes
	Binary Ranking (Plus)	$(1 + 0 + 0) = 1$ (Low Rank) $(1 + 1 + 1) = 3$ (High Rank)	0 = No, 1 = One 2 = Two, 3 = Three Yes
1 to 9 Low to High	Simple Rating (Average)	$(9 + 3 + 3) / 3 = 5.00$	5.00 = Moderate Rating
	Weighted Rating (Weighted Average)	$(9*5) + (3*1) + 3*1)) / 7 = 7.28$	7.28 = High Rating



Fuente: SGC, 2015)

# Análisis Jerárquico de Procesos

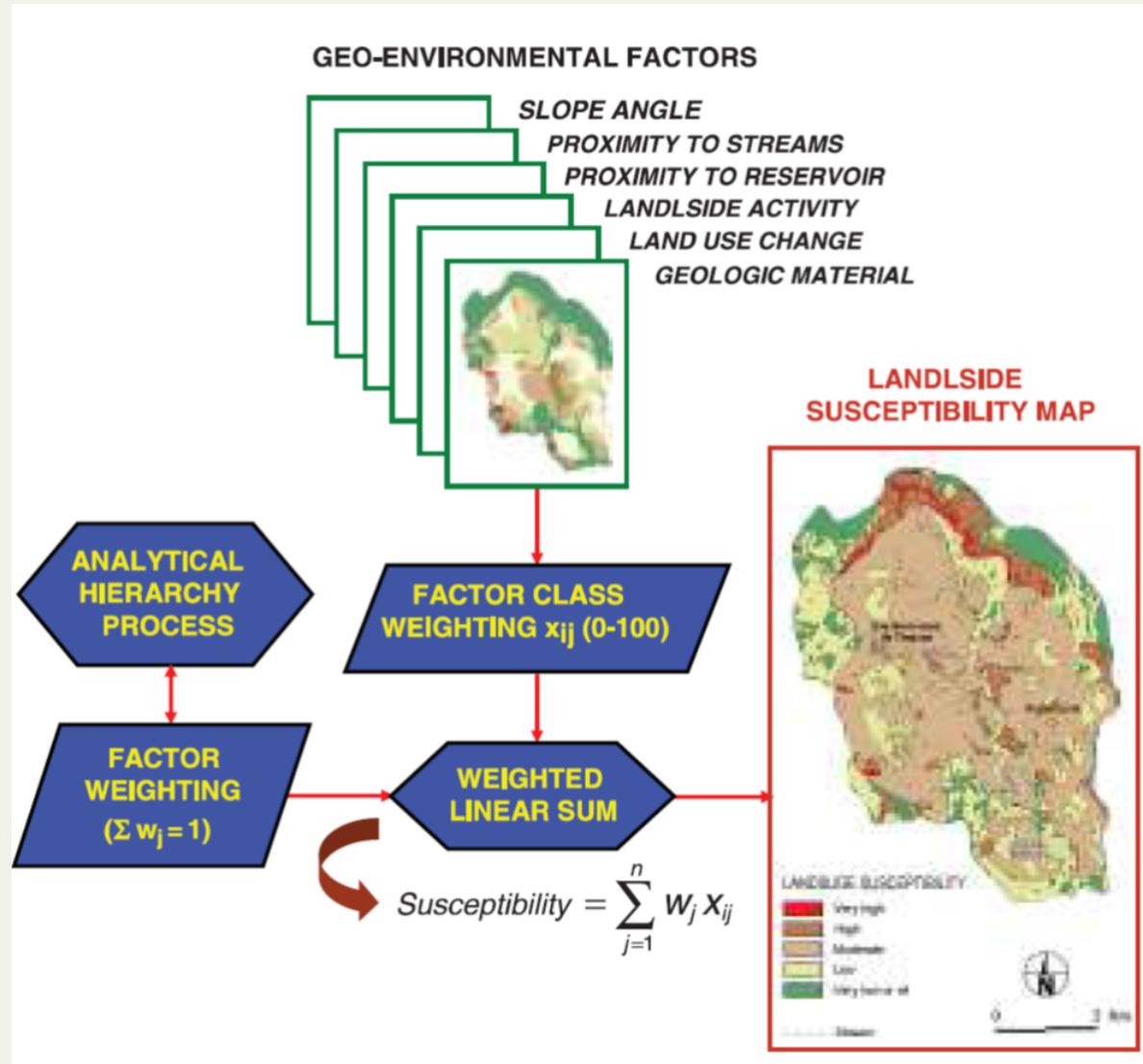
## Toma de decisiones multicriterio

Conjunto de aproximaciones, métodos, modelos, técnicas y herramientas dirigidas a mejorar la calidad integral de los procesos de decisión seguidos por los individuos y los sistemas, para mejorar la efectividad, eficacia y eficiencia de los procesos de decisión y a incrementar el conocimiento de los mismos.

## Paradigma de la Racionalidad

Aproximación orientada al proceso, cuyo propósito es la comprensión y el consenso. Y pretende la incorporación a los modelos de aspectos subjetivos, intangibles y no considerados, que condicionan la toma de decisiones de los individuos y organizaciones.

Fuente: Moreno (2000)



Fuente: Hervas & Bobrowsky (2009)

Es una técnica multi-objetivo y multi-criteria para toma de decisiones que permite al usuario llegar a una escala de preferencias a partir de un determinado numero de alternativas. Consiste en organizar una serie de factores en orden de jerarquía, asignando valores numéricos a valoraciones subjetivas sobre la relativa importancia de cada factor.

- Los pesos son obtenidos generalmente a través de los valores y vectores propios de la matriz. El vector propio que corresponde al mayor valor propio genera la prioridad relativa de los factores.
- También puede ser obtenido normalizando cada columna de la matriz de comparación, y calculando el promedio de las filas para resolver la matriz.

Escala para incorporar los juicios o valoraciones del decisor. La escala es estrictamente positiva y elimina las ambigüedades que tiene el ser humano en comparar elementos en la proximidad del cero o del infinito.

Los individuos son mas preciso al comparar elementos de la misma magnitud, número mágico de Miller (1956) 7(+/-2).

Scales	Degree of preferences	Explanation
1	Equally	Two activities contribute equally to the objective.
3	Moderately	Experience and judgment slightly to moderately favor one activity over another.
5	Strongly	Experience and judgment strongly or essentially favor one activity over another.
7	V. strongly	An activity is strongly favored over another and its dominance is showed in practice.
9	Extremely	The evidence of favoring one activity over another is of the highest degree possible of an affirmation.
2, 4, 6, 8	Intermediate values	Used to represent compromises between the preferences in weights 1, 3, 5, 7 and 9.
Reciprocals	Opposites	Used for inverse comparison.

Fuente: Saaty (2000) tomado de Ayalew et al (2005)

Q2	With respect to the "Risk" of Landslide Given that the Vegetation is Bare Land which criteria is more important?	1 3 <b>5</b> 7 9
	Slope Angle is strongly more important than Proximity to Channel (PC)	
Q3	With respect to the "Risk" of Landslide Given that the Vegetation is Bare Land which criteria is more important?	1 <b>3</b> 5 7 9
	Slope Angle is moderately more important than Lithology (LI)	
Q4	With respect to the "Risk" of Landslide Given that the Vegetation is Bare Land which criteria is more important?	<b>1</b> 3 5 7 9
	Slope Aspect is equally important than Proximity to Channel	

Fuente: Neupane & Piantanakulchai (2006)

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Fuente: Neupane & Piantanakulchai (2006)

## Radio de consistencia (CR)

Es utilizado para estimar la probabilidad que la matriz de juicio fue creada aleatoriamente.

$$CR = CI / ICA \longrightarrow CR < 0,1$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Índice de Consistencia Aleatorio

3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ICA	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452	1,484	1,513	1,535	1,555	1,570	1,583

Fuente: Neaupane & Piantanakulchai (2006); Moreno (2000)

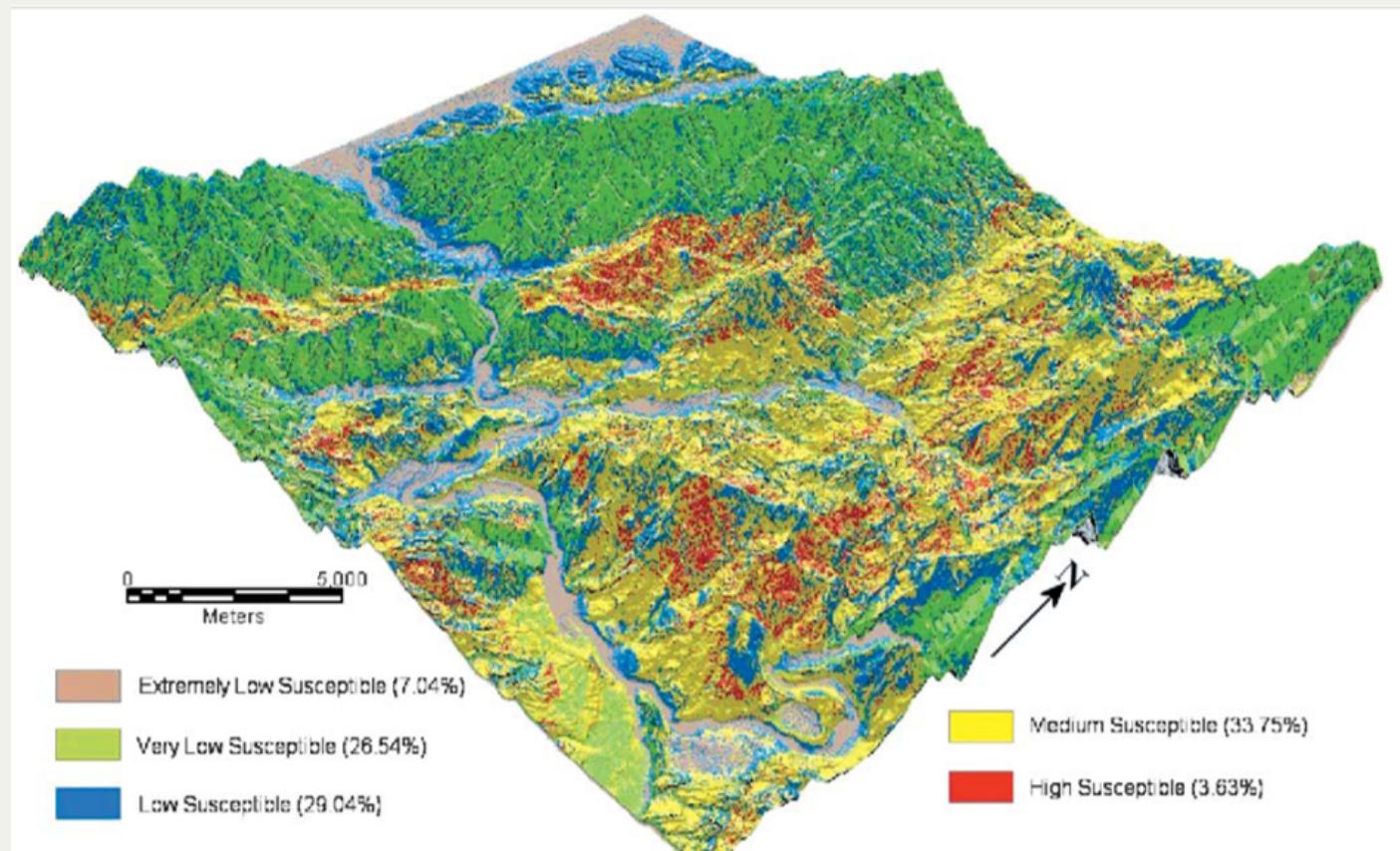
	SI	SA	PC	LI	$\lambda_{\max}$	Principal Eigen Vector ( $W$ )	Normalized $W_i = W/1.5817$
SI	1	5	5	3	4.033	0.925	0.58
SA	1/5	1	1	1		0.2087	0.13
PC	1/5	1	1	1		0.2087	0.13
LI	1/3	1	1	1		0.2393	0.16

*Total = 1.5817*

$$\text{CI} = \frac{\lambda_{\max} - 1}{(n-1)} \\ = 0.011 < 0.1 \text{ (OK)}$$

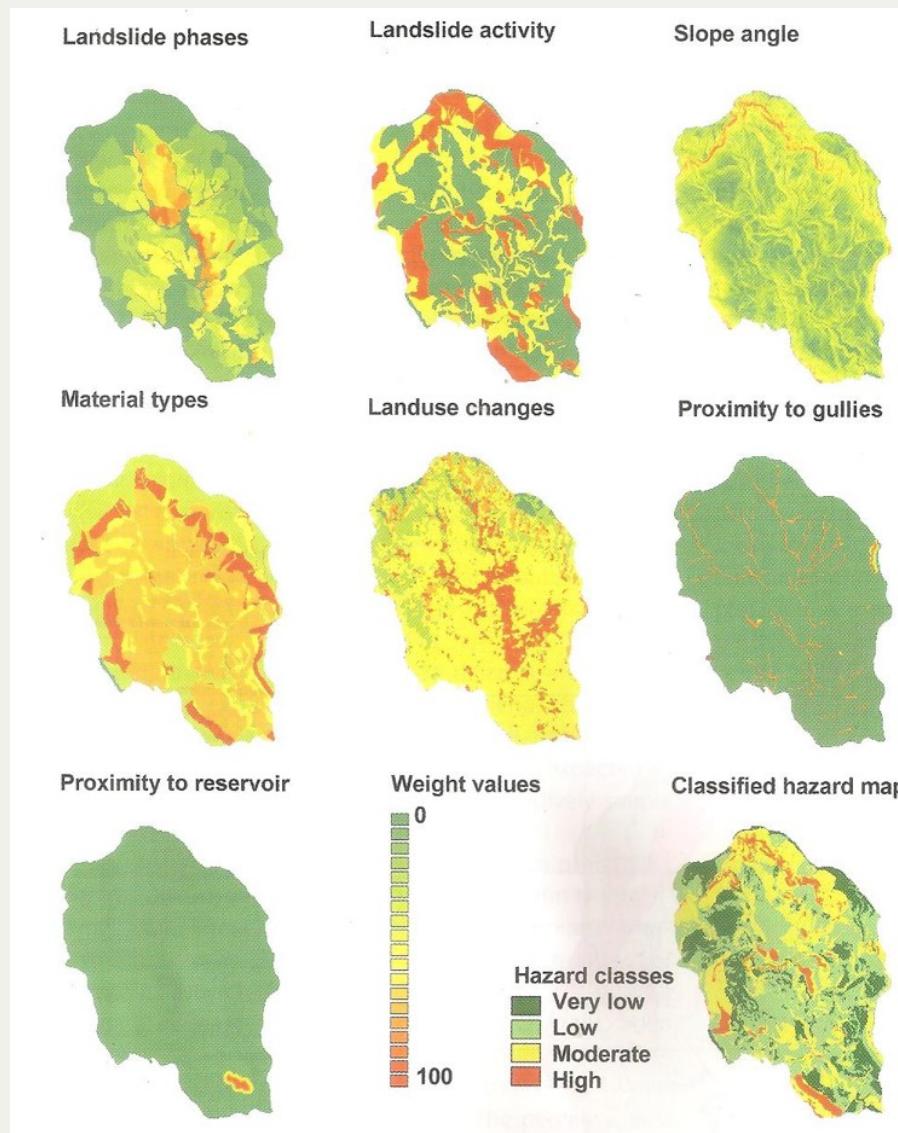
Fuente: Neupane & Piantanakulchai (2006)

Pair-wise comparison 9 point continuous rating scale									
Extremely Less important	V. Strongly	Strongly	Moderately	Equally Important	Moderately More Important	Strongly	V. Strongly	Extremely	
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9	Aspect Elevation Lithology Plan curvature Profile curvature Slope gradient Factor weights Consistency ratio (CR)
Aspect	1						0.0657	0.07	
Elevation	3	1					0.1929		
Lithology	3	3	1				0.2569		
Plan curvature	1	1/5	1/3	1			0.0715		
Profile curvature	3	1	1	1	1		0.1478		
Slope gradient	3	1	1	5	3	1	0.2651		



Fuente: Ayalew et al (2007) en Niigata (Japón)

# Mapeo directo vs AHP



Fuente: Barredo et al. (2000)

Components	Direct method	Pairwise matrix
Topography	0.3	0.224
Slope	0.7	0.7
Internal relief	0.2	0.2
Shape	0.1	0.1
Geology	0.2	0.131
Formation	1	1
Tectonic	0.05	0.040
Active faults	1	1
Hydrology	0.05	0.038
Springs	0.5	0.5
Drainage density	0.5	0.5
Geomorphology	0.4	0.566
Subunits	0.4	0.4
Landslides zones	0.6	0.6
Total for criteria	1	0.999

Fuente: Barredo et al. (2000)