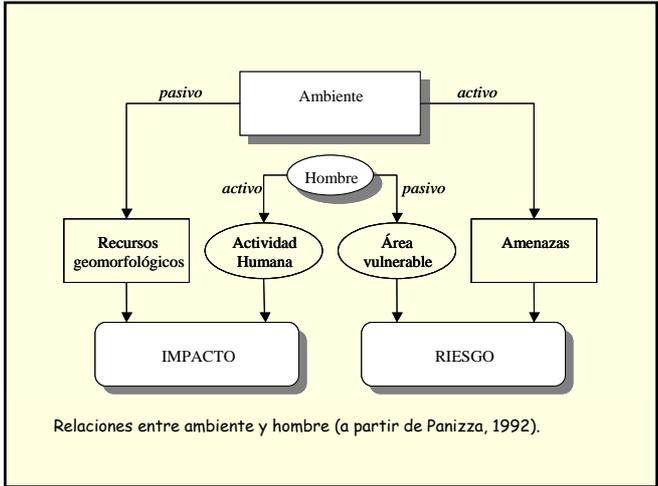
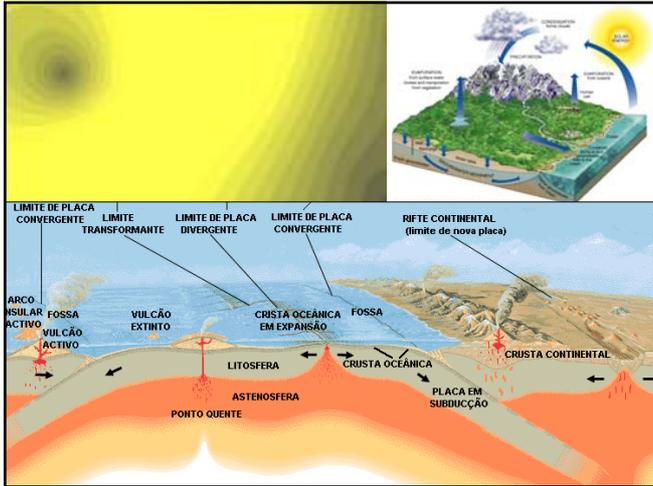




- En geología tradicionalmente se han utilizado poco las matemáticas
- Matemáticas ligadas a la física y química utilizadas
- Excepción: prospección de recursos naturales
- La estadística se ha generalizado



FECHA	EVENTO	VÍCTIMAS
1939	Inundaciones en Hunan (China)	1.000.000
1887	Inundaciones del río Huang Ho (China)	900.000
1556	Terremoto en Shensi (China)	830.000
1976	Terremoto de Tangsan, Pequín y Tientsin (China)	655.237
1970	Ciclón en Bangla Desh	300.000
1737	Terremoto en Calcuta (India)	300.000
1939	Inundaciones en el norte de China	200.000
1920	Terremoto en Kansu (China)	180.000
1923	Terremoto en Tokio (Japón)	143.000
1290	Terremoto en Chinghi (China)	100.000
1731	Terremoto en Pekín (China)	100.000
1893	Terremoto en Arbadid (Irán)	100.000
1948	Terremoto en Ashkabad (URSS)	100.000
1815	Erupción del volcán Tambora (Indonesia)	92.000
1908	Terremoto en Messina (Italia)	75.000
1970	Terremoto y deslizamientos en el norte de Perú	67.000
1935	Terremoto en Quetta, Baluchistán (Pakistán)	60.000
1935	Terremoto de Baluchistán (India)	50.000
1999	Inundaciones y deslizamientos en Venezuela	30.000-50.000
1883	Erupción volcán Krakatoa (Indonesia)	36.000
1979	Terremoto en Nicaragua	30.000
1939	Terremoto en Concepción (Chile)	30.000
1915	Terremoto de Avezano (Italia)	30.000
1902	Erupción del Mont Pelee (Martinica)	30.000
1974	Inundaciones en Bangla Desh	28.700
1985	Erupción (fluj. fango) Nevado del Ruiz	23.000
1976	Terremoto de Guatemala	23.000
1939	Terremoto en Erzincan (Turquía)	23.000
1669	Erupción del Etna (Sicilia, Italia)	20.000
1999	Terremoto en Turquía	17.000
1978	Terremoto en el NE de Irán	15.000
1977	Ciclones en India	14.204
1960	Terremoto en Agadir (Marruecos)	12.000
1949	Deslizamientos en Khait (Tadzhikistán, URSS)	12.000
1998	Huracán Mitch en Centroamérica	11.000
1916	Deslizamientos en los Alpes (Italia y Austria)	10.000
1906	Tifón en Hong Kong	10.000

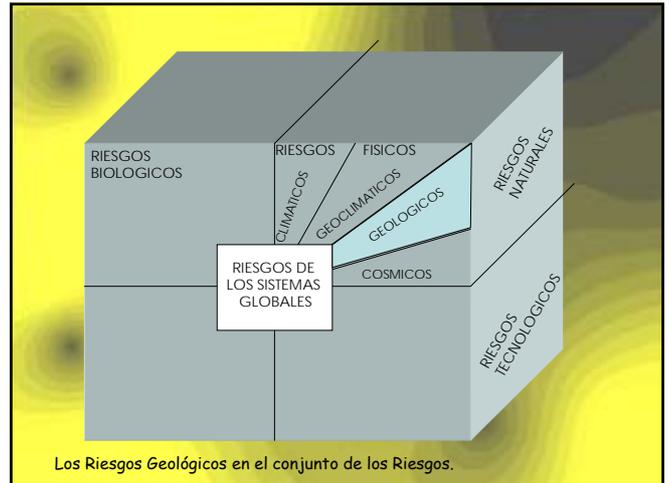
Riesgo

- nº de vidas perdidas, personas perjudicadas, propiedades dañadas, perturbación de la actividad económica o daños al medio ambiente, causados por un determinado fenómeno natural o artificial.

$$R = H \times V \times E$$

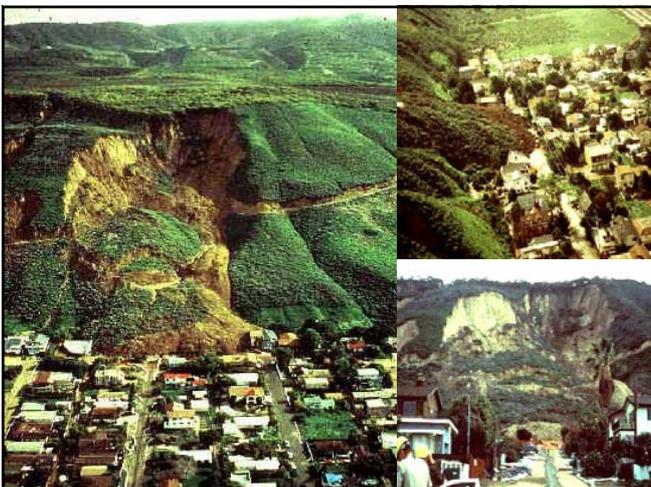
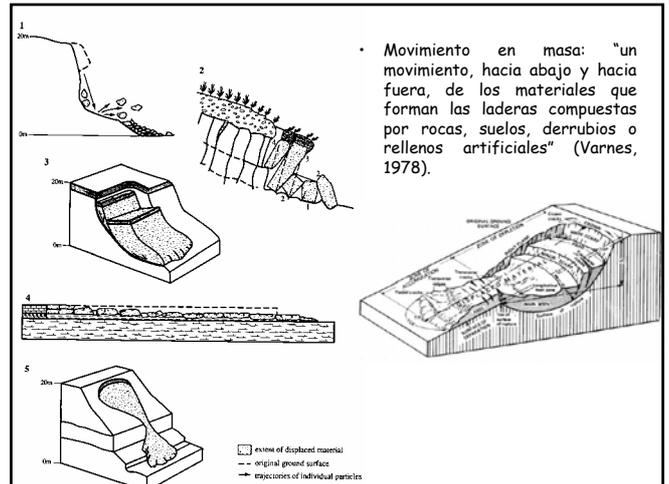
Pérdidas

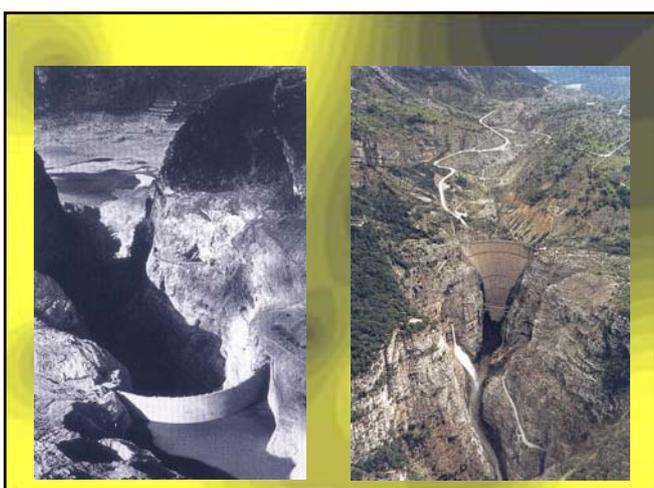
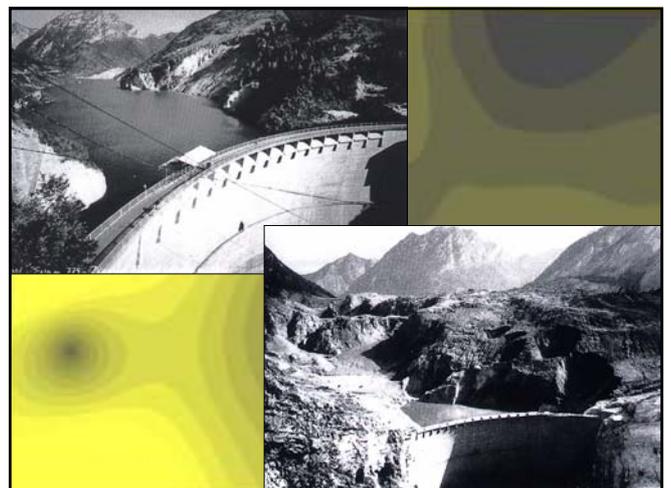
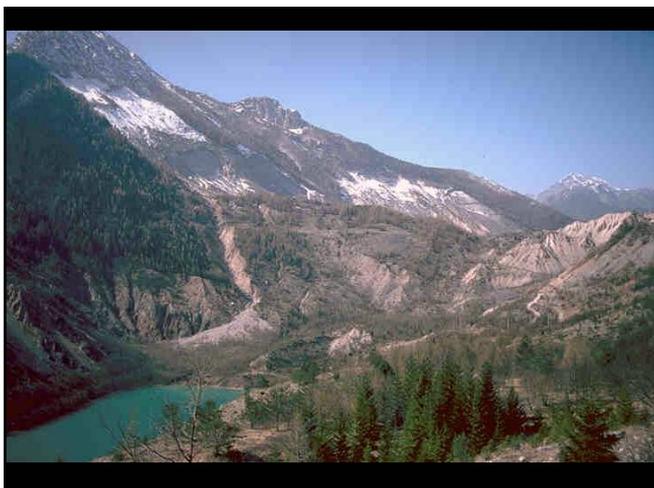
- Directas e indirectas
- Algunas amenazas causan muchas pérdidas económicas pero pocas víctimas y vice versa.
- Muchos procesos se asocian a otros por lo que es difícil establecer las pérdidas/proceso

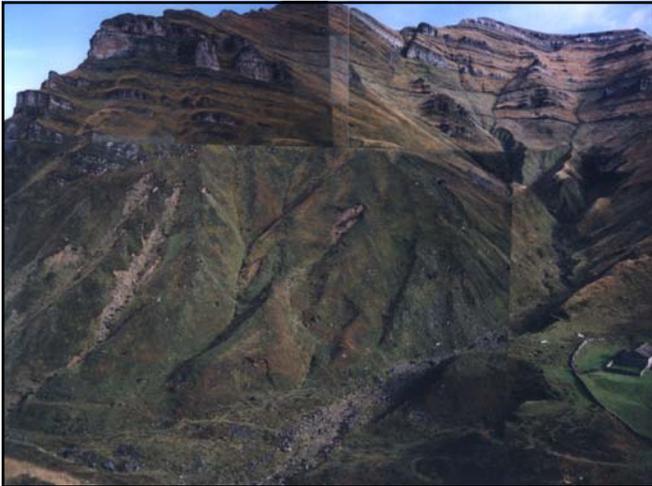
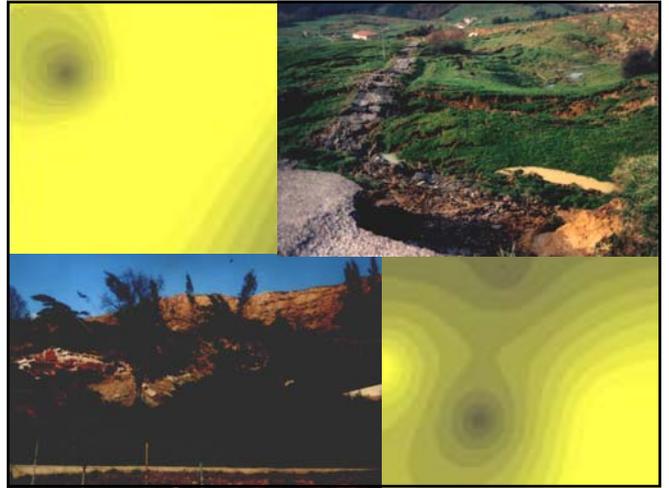


Clasificación de los riesgos naturales

- Terrestres
 - Físico-químicos
 - Litosfera
 - Internos (terremotos, volcanes, etc.)
 - Externos (movimientos en masa, etc.)
 - Geoquímicos
 - Inducidos
 - Hidrosfera (inundaciones, maremotos, etc.)
 - Atmósfera (meteorológicos y climáticos)
 - Biológicos
 - Epidemias, Plagas de cultivos y bosques, Ataques y mordeduras de animales, Algas tóxicas, Alérgenos aeroportados, Incendios forestales (a menudo inducido)
- Extraterrestres
 - Físicos
 - Impactos (asteroides, cometas, meteoritos), Rayos cósmicos y tormentas solares
 - Desequilibrio gravitatorio
 - Biológicos
 - Contaminación biológica







Modelización de riesgos geológicos

- Los procesos geológicos suponen un riesgo para el hombre y sus bienes, sobre todo en zonas densamente pobladas.
- Pérdidas elevadas y crecientes.
- Es necesario desarrollar:
 - herramientas de evaluación y predicción.
 - políticas y planes de mitigación
- Los mapas (modelos) de riesgo son herramientas fundamentales para el diseño de planes de prevención y mitigación.
- En las últimas décadas ha habido un gran esfuerzo encaminado a su obtención.

Riesgos geológicos: características, capacidad de predicción y de mitigación (A partir de Costa y Baker, 1981, Ayala y Durán, 1988 y Cendrero, 1997).

Tipo de proceso	Superficie afectada	Dinámica	Victimas	Peligrosidad		Cap. predicción		Mitigación
				Frecuencia	Magnitud	Espacial	Temporal	
Volcánico	L-R	r-mr	Si	Baja	Mod.-Cat.	Si	(S) (M)	OT-PC
Terremotos	R	mr	Si	Baja	Mod.-Cat.	Regional	Limit (B)	E-OT-PC
Tsunamis	R-C	r-mr	Si	Baja-Mod.	Mod.-Cat.	Si	Si (Red alerta) (A)	OT-PC
Inundaciones	L-R	r-mr	Si	Baja-Alta	Baja-Serv.	Si	(*) (A)	E-OT-PC
Movimientos de ladera	L	l-mr	Raras	Baja-Mod.	Baja-Serv.	Si	(**) (M)	E-OT-PC
Hundimientos	L	l-mr	Raras	Baja-Mod.	Baja-Serv.	Regional	No en la práctica	OT-PC
Hábricos	L	l-mr	Raras	Baja-Mod.	Baja-Serv.	Si	Si (A)	E-OT
Subsistencia	L-R	l	No	Mod.-Alta	Baja-Mod.	Si	Si (A)	E-OT
Erosión	R-C	l	No	Mod.-Alta	Baja-Serv.	Si	Dr. Meteor.	E-OT
Dinámica litoral	L-R	l	No	Variable	Baja-Serv.	Si	Si (A)	E-OT
Radioactividad natural	L-R	l	Si (ind.)	Continuo	Baja-Mod.	Si	Si (A)	E-OT

L: local, R: regional, C: continental, l: lento, r: rápido, mr: muy rápido, (A): alta, (M): media, (B): baja, E: medidas estructurales, OT: ordenación territorial, PC: protección civil, (S): en volcanes bien vigilados, (*): datos meteorológicos y red de alerta, (**): en movimientos bien vigilados.

Susceptibilidad/amenaza/riesgo

- **Amenaza:** probabilidad de que, dentro de un determinado periodo de tiempo y en un área determinada, ocurra un fenómeno potencialmente dañino.
- **Susceptibilidad:** "propensión a....".
- **Riesgo:** nº de vidas perdidas, personas perjudicadas, propiedades dañadas, o perturbación de la actividad económica, causados por un determinado fenómeno natural.

$$R = (H \times V) \times E$$

• ¿Qué es lo que los responsables en la toma de decisiones necesitan en relación a las amenazas?

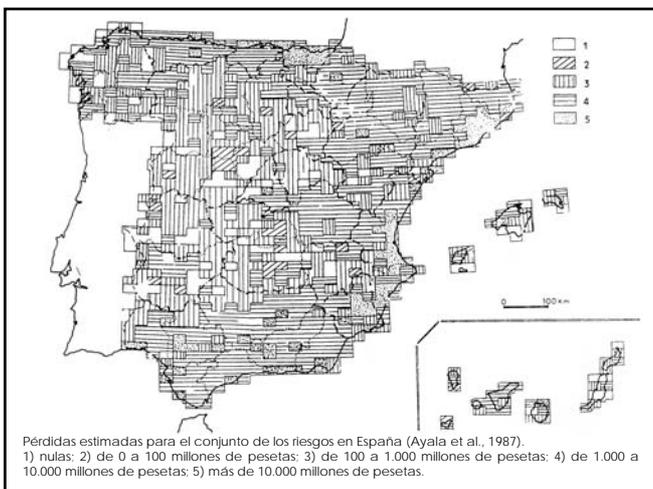
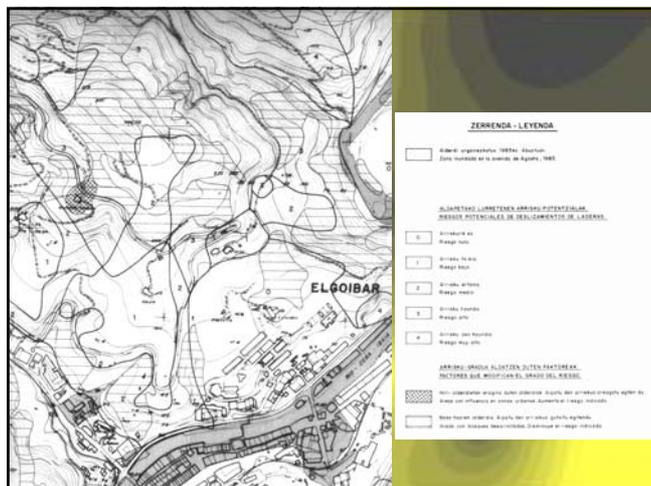
- Al menos, las áreas que quedarán afectadas por el proceso en el futuro (por ejemplo en los próximos 30 años)

• ¿Qué es lo que se les proporciona normalmente?

- Localización de los eventos ya ocurridos, su descripción, etc.
- Modelos cualitativos

• ¿Es esto suficiente?

- No



EL IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL DE LOS RIESGOS EN ESPAÑA

Pérdidas previstas en 30 años (1986-2016). (Según IGME, 1987)

Sin medidas de mitigación

Pérdidas estimadas para el conjunto de procesos (Pta.) 4,970 bill. 8,106 bill.
 (0,51% del PIB)

Muertes: 500-1000 7000-40.000

Para los riesgos más importantes

Inundaciones 2,8 bill.
 Erosión de suelos 0,87 bill.
 Deslizamientos 0,76 bill.

Con medidas de mitigación

para el conjunto de procesos (Pta.) 2,1 bill. 3,41 bill.

Reducción total de pérdidas = 69%
 Coste medidas de mitigación = 19% del coste de las pérdidas

REGIONES MÁS AFECTADAS

% sobre las pérdidas totales

Andalucía.....	27,5 bill.
Valencia.....	19,6 bill.
Cataluña.....	18,6 bill.
País Vasco.....	11,3 bill.

- La naturaleza es como es y no la conocemos bien
 - Fenómenos complejos, multivariables
 - Variabilidad en el espacio y tiempo
- ¿Es realmente posible predecir la localización de futuros eventos?
 - Sí, con matices
- ¿Qué es lo que se necesita para ello?
 - Banco de datos espaciales que incluya los factores causales y, los eventos ocurridos o las variables de un modelo físico
 - Una herramienta para gestionar y analizar el BD cartográfico
 - Un método para modelizar (**matemáticas**)
 - Un método para conocer la calidad de la predicción
- ¿Cuál es el requerimiento crítico de un modelo predictivo?
 - El grado de acierto de la predicción

- ## Puntos débiles
- Pocos datos
 - Simplificación de las variables de entrada
 - Modelos basados en suposiciones no explicitadas o poco claras
 - Limitaciones en la integración de datos espaciales continuos y categóricos
 - Falta de validación de los resultados
 - Se debería tender, al menos, a modelos de peligrosidad
(susceptibilidad+frecuencia+magnitud)

¿Dónde?

¿Con qué magnitud?

¿Cuándo?

¿Daños?

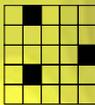


... en términos cuantitativos

• *Proposición:*

"p quedará afectado en el futuro por un suceso"

- Cada cuadrícula representa una unidad regular del territorio.
- El conjunto de cuadrículas representa el área de estudio.
- Las cuadrículas en negro representan los deslizamientos producidos en 10 años.



Probabilidad espacial = 3/25

Probabilidad temporal = 3/10

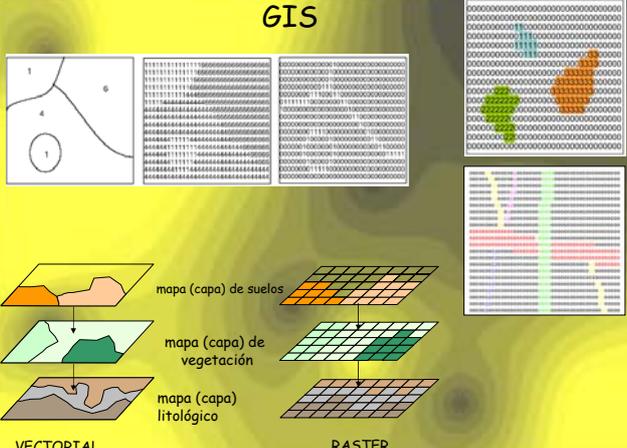
Probabilidad espacio-temporal = (3/25)/10

GIS y SDA

- Introducción, consulta, visualización y análisis
- Funciones de medición, consultas espaciales y clasificación
 - distancia entre rasgos; área, volumen; condiciones lógicas; (re)asignación de características a los rasgos, etc.
- Funciones de interpolación
- Funciones de estadística espacial
- Funciones de superposición
 - Operadores aritméticos, relacionales, condicionales
 - funciones
- Funciones de vecindad
- Funciones de redes
- Funciones analíticas tridimensionales

Entender los datos en sí mismos y sus relaciones espaciales y semánticas con otros datos georeferenciados → Construir modelos

GIS



El diagrama muestra un mapa vectorial con rasgos etiquetados (1, 4, 6) y una tabla de datos asociada. A la derecha, se muestra una representación de datos raster en formato de matriz de celdas con valores numéricos. Abajo, se ilustra el proceso de conversión de mapas vectoriales (capa de suelos, capa de vegetación, capa litológica) a un formato raster.

VECTORIAL RASTER

Métodos

- Punto de vista ingenieril/físico
 - Determinísticos
- Punto de vista geomorfológico:
 - Directos
 - Indirectos
 - Heurísticos
 - Probabilísticos (AD, ..., ANN)

Es posible establecer correlaciones entre parámetros causales y la ocurrencia de procesos en el pasado reciente, de modo que permitan hacer predicciones con respecto al comportamiento futuro.

La ecuación del modelo unidimensional de ladera infinita (Graham, 1984) expresa la relación entre los diferentes factores que influyen en la producción de deslizamientos superficiales traslacionales.

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

donde:

F = factor de seguridad

c' = cohesión efectiva (kPa)

γ = peso por unidad de suelo (kN/m³)

γ_w = peso por unidad de agua (kN/m³)

z = profundidad de la superficie de rotura debajo de la superficie (m)

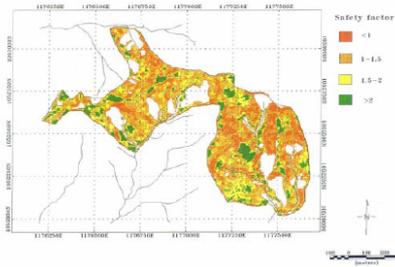
γ_w = altura de la lámina de agua por encima de la superficie de rotura (m)

β = inclinación de la superficie del terreno (°)

ϕ' = ángulo efectivo de la resistencia de cizalla (°)

m = relación entre la altura del nivel freático y el espesor del suelo z_w/z (adimensional)

Classified safety factor map
(Terlien, 1996)



Métodos: determinístico versus probabilístico

- Determinístico
 - Aplicable a movimientos singulares o áreas pequeñas
 - Escalas de detalle
 - Parámetros fáciles de obtener
- Probabilístico
 - Aplicable a grandes extensiones
 - Escalas medias y pequeñas
 - Parámetros disponibles o fáciles de obtener

-Los métodos geotécnicos no son aplicables a estudios zonales. La alternativa son los métodos geomorfológicos (métodos indirectos estadísticos).

BD

- 1) Base de datos ideal
 - A) Variables causales
 - B) Eventos
 - 2) Base de datos realista
 - 3) Construcción del banco de datos
 - 4) Diccionario de datos y metadatos
 - 5) Preparación BD para análisis
- MUESTRAS DE ANALISIS Y VALIDACIÓN

La magnitud es función de la masa, velocidad y alcance

	Clases propuestas por WP/WLI (1994)	Clases propuestas por Varnes (1978)
Extremadamente rápido	(hasta) 5 m/s	3 m/s
Muy rápido	3 m/min.	0-3 m/min.
Rápido	1-8 m/hora	1-5 m/día
Moderado	13 m/mes	1-5 m/mes
Lento	1,6 m/año	1-5 m/año
Muy lento	0,016 m/año	0-6 m/año
Extremadamente lento		

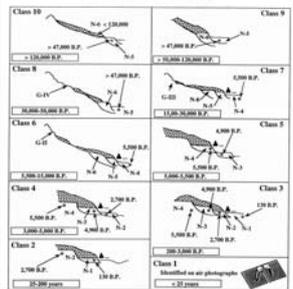
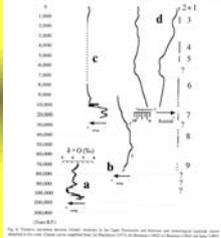
La frecuencia temporal:

Directa: extrapolando a partir de lo ocurrido en el pasado

Indirecta: a partir de la frecuencia de los factores desencadenantes

Cronología a partir de las relaciones geomorfológicas, dataciones arqueológicas y radiométricas.

Se identificaron 10 grupos cronológicos validados Carbono-14 (González-Díez et al., 1995)



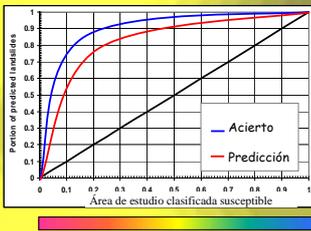
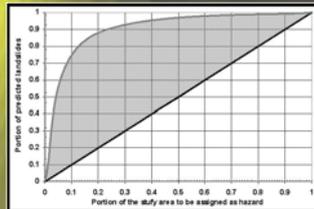
Validación

• Estrategias de validación:

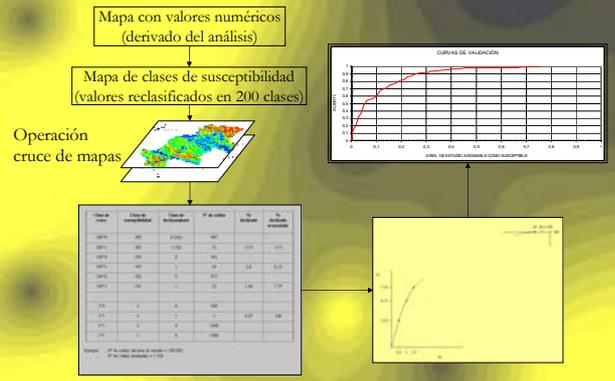
- Temporal
- Espacial
- Aleatoria
- Otras variantes

• Validación cuantitativa \approx función continua

Curva teórica de validación



Curvas de acierto/predicción



Procedimiento de obtención de las curvas de validación

• Riesgo: nº de vidas perdidas, personas perjudicadas, propiedades dañadas, o perturbación de la actividad económica, causados por un determinado fenómeno natural.

$$R = (H \times V) \times E$$

• $R = \text{valor} \times \text{Prob}\{D \cap L\}$; suposición: nº de eventos (L)

$$\text{Prob}\{D \cap L\} = \text{Prob}\{D|L\} \times \text{Prob}\{L\}$$

• $R = \text{valor} \times \text{Prob}\{D|L\} \times \text{Prob}\{L\}$



$\text{Prob}\{D \cap L\}$ es la probabilidad de que un elemento se dañe a consecuencia de un futuro deslizamiento

$\text{Prob}\{D|L\}$ es la probabilidad condicionada de que el elemento quede dañado, si el lugar p es afectado por un deslizamiento

$\text{Prob}\{L\}$ es la probabilidad de ocurrencia de un futuro deslizamiento en el lugar p

$$R = H \times V \times E$$

- Hasta el momento no hemos tenido en cuenta los factores condicionantes del proceso; los denotamos mediante G
- ¿Cómo incorporamos G en la evaluación del riesgo?

- $R = \text{valor} \times \text{Prob}\{D \cap L | G\}$; suposición: n° de eventos (L)

$$\text{Prob}\{D \cap L | G\} = \text{Prob}\{(D|L) | G\} \times \text{Prob}\{L | G\}$$

$$= \text{Prob}\{D|L\} \times \text{Prob}\{L|G\}$$

- $R = \text{valor} \times \text{Prob}\{D|L\} \times \text{Prob}\{L|G\} = E \times H \times V$

$\text{Prob}\{D \cap L | G\}$ es la probabilidad de que un elemento se dañe a consecuencia de un futuro deslizamiento, conociéndose los factores causales existentes en p

$\text{Prob}\{D|L\}$ es la probabilidad condicionada de que el elemento quede dañado, si el lugar p es afectado por un deslizamiento

$\text{Prob}\{L|G\}$ es la probabilidad de ocurrencia de un futuro deslizamiento en el lugar p , dados los factores causales existentes en p

Evaluación de riesgo

- Para estimar $\text{Prob}\{L|G\}$ (H) se propone un procedimiento de dos fases:
 1. Construcción de un modelo de probabilidad espacial
 2. Transformación en un modelo de probabilidad espacio-temporal

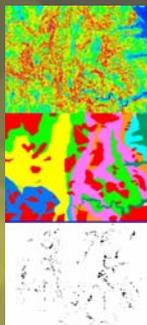
Función de Favorabilidad

- Se construye una función $g(\cdot)$ en cada pixel p :
 - $g(Y=1 : m \text{ factores condicionantes})$
 - $Y=1: p$ es deslizamiento
- $g(c_1, \dots, c_m)$ representa un nivel relativo de susceptibilidad del pixel dados los m valores en el pixel, $g(c_1, \dots, c_m)$
- Si los m valores (c_1, \dots, c_m) del pixel i presentan unas condiciones geomorfológicas más propensas a los deslizamientos que las del pixel j , (d_1, \dots, d_m) , entonces

$$g_i(Y=1 | c_1, \dots, c_m) > g_j(Y=1 | d_1, \dots, d_m)$$
- A partir datos del territorio deberíamos ser capaces de estimar la función de favorabilidad $g(Y=1 | c_1, \dots, c_m)$ para cada pixel del área de estudio

Datos utilizados diferentes

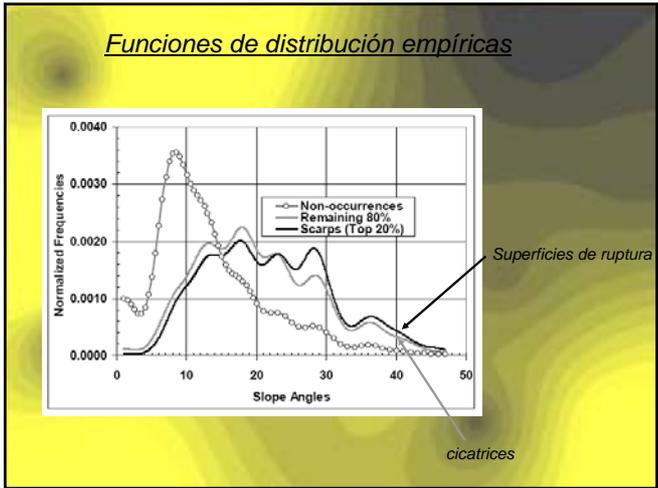
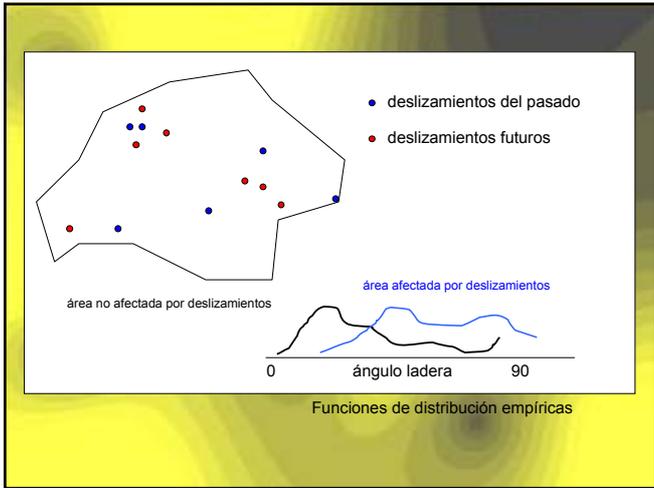
- Tres tipos de capas de información
 - Capas temáticas
 - Geología
 - Estructura
 - Usos del suelo
 - Capas de datos continuos
 - Datos geofísicos, teledetección
 - DEM y derivados
 - Deslizamientos
 - Polígonos de zonas de rotura, escarpes
 - Puntos de ocurrencia
 - Deslizamientos activos e inactivos
- Diferentes resoluciones y escalas
- Incertidumbre en los límites de unidades en las capas temáticas



- Tres marcos matemáticos para los modelos predictivos

$$g(Y=1 | c_1, \dots, c_m)$$

1. Teoría de probabilidades
 - probabilidad condicionada conjunta
 - relación de probabilidades
 - factor de certidumbre
 - pesos de evidencia
2. Teoría de los conjuntos difusos de Zadeh
 - Función de pertenencia
3. Teoría evidencial Dempster-Shafer



- ## Suposiciones
- El proceso no es aleatorio, sigue ciertas reglas que no conocemos bien
 - Los eventos utilizados son una muestra aleatoria de todos los eventos ocurridos y por ocurrir
 - Los especialistas son infalibles y proporcionan las evidencias para localizar los futuros eventos

$g(Y=1 | c_1, \dots, c_m)$ entendida como función de relación de probabilidades

idea matemática básica

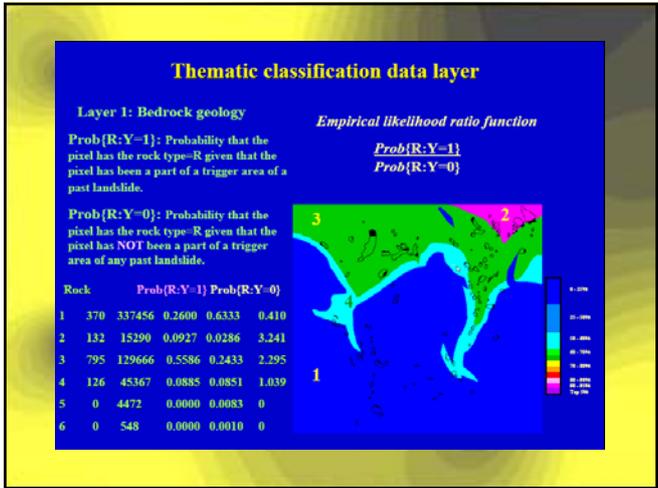
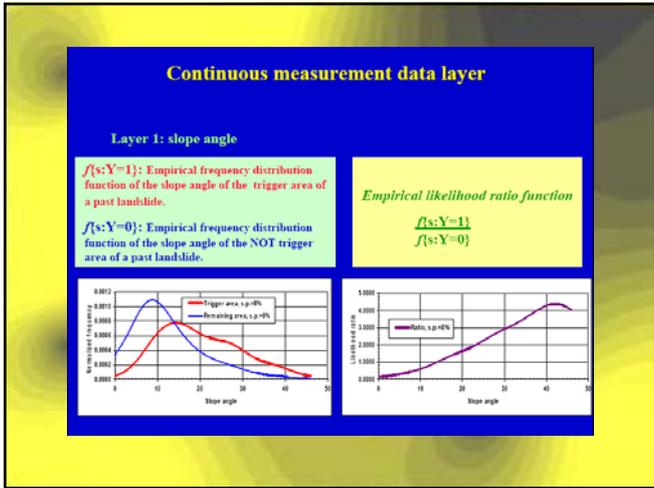
M_p : p del área afectada por deslizamientos, M

\bar{M}_p : p del área no afectada por deslizamientos, \bar{M}

$f(c_1, \dots, c_m | M_p)$: función de distribución del area afectada por deslizamientos

$f(c_1, \dots, c_m | \bar{M}_p)$: función de distribución del area no afectada por deslizamientos

La relación de probabilidades resalta la diferencia entre dos funciones

$$\lambda_p = \frac{f(c_1, \dots, c_m | M_p)}{f(c_1, \dots, c_m | \bar{M}_p)}$$


Modelos predictivos para varias capas
(continuas y temáticas):
función de relación de probabilidades

$$\lambda_p(c_1, \dots, c_m) = \frac{f(c_1, \dots, c_m | M_p)}{f(c_1, \dots, c_m | \bar{M}_p)}$$

Suponiendo que $(c_1, \dots, c_k), (c_{k+1}, \dots, c_m)$ son independientes

$$\begin{aligned} \lambda_p(c_1, \dots, c_m) &= \lambda_p(c_1, \dots, c_k) \lambda_p(c_{k+1}, \dots, c_m) \\ &= \frac{f(c_1, \dots, c_k | M_p)}{f(c_1, \dots, c_k | \bar{M}_p)} \frac{f(c_{k+1}, \dots, c_m | M_p)}{f(c_{k+1}, \dots, c_m | \bar{M}_p)} \end{aligned}$$

Si consideramos que el área está afectada por
distintos procesos y/o procesos de diferente
magnitud/frecuencia, entonces:

$$\text{Riesgo} = E(1 - (1 - H_1 V_1) (1 - H_2 V_2) \dots (1 - H_n V_n))$$

$$R = EHV$$