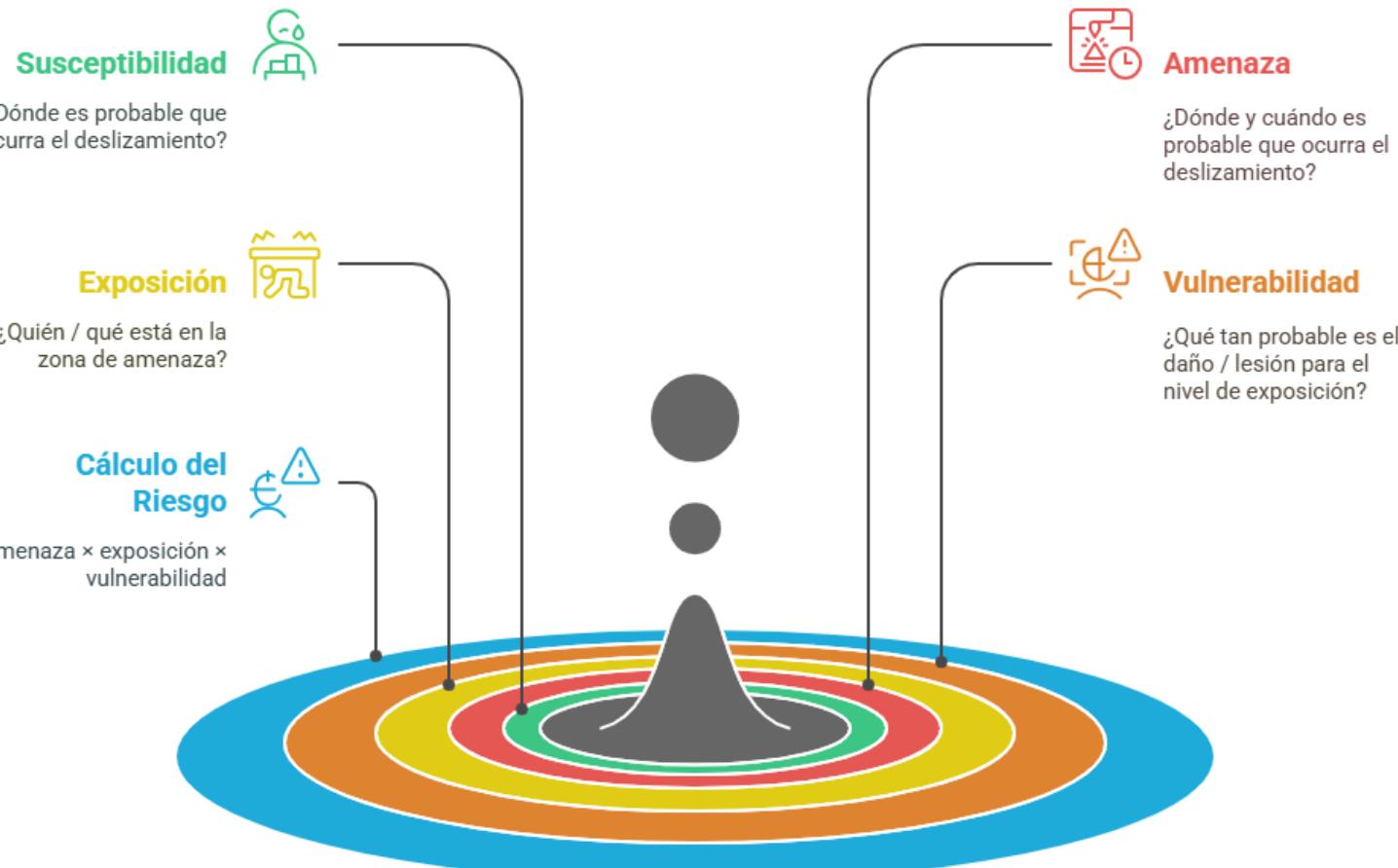


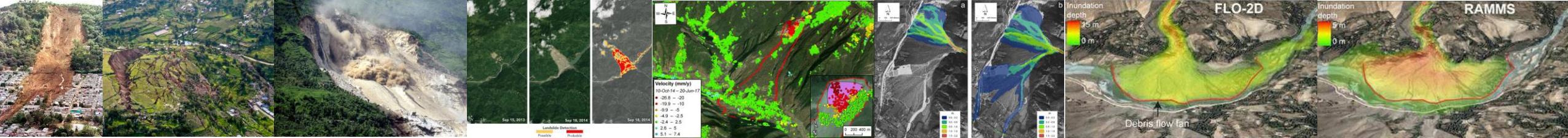
Unidad 5. Curso de Corrección de Torrentes

Susceptibilidad a deslizamientos

Reichenbach et al., 2018: "La susceptibilidad a deslizamientos... [es la] probabilidad de que ocurra un deslizamiento en un área, con base en las condiciones del terreno y ambientales locales".

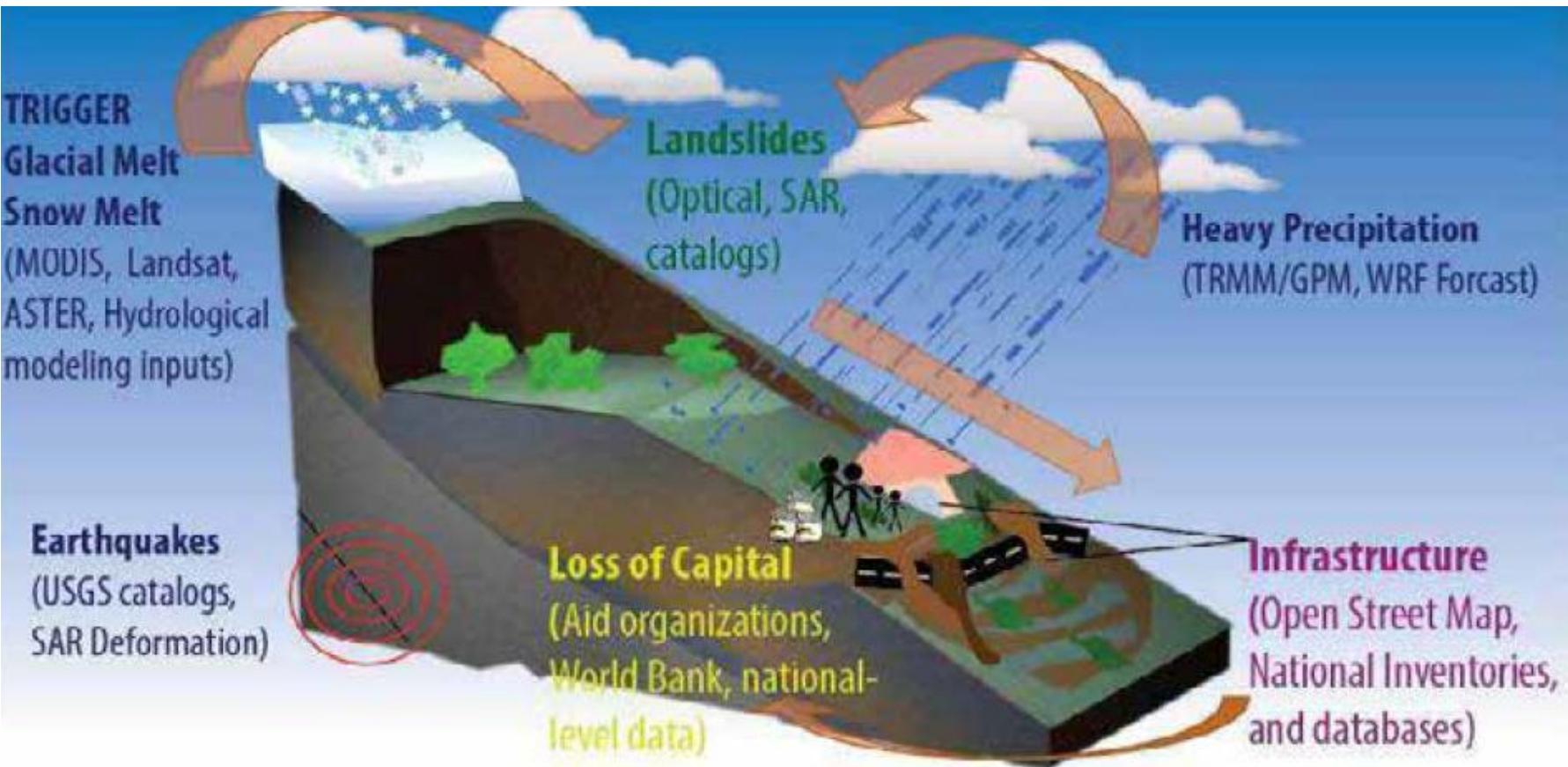
Evaluación del Riesgo de Deslizamientos de Tierra

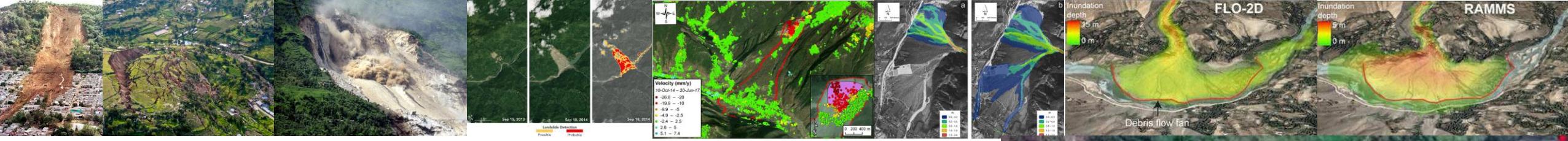




Definición de Susceptibilidad a Deslizamientos

- **Los detonantes** (terremotos, lluvias intensas, deshielo) **no determinan** la susceptibilidad.
- ¿Qué factores afectan la susceptibilidad y **cómo podemos observarlos**?

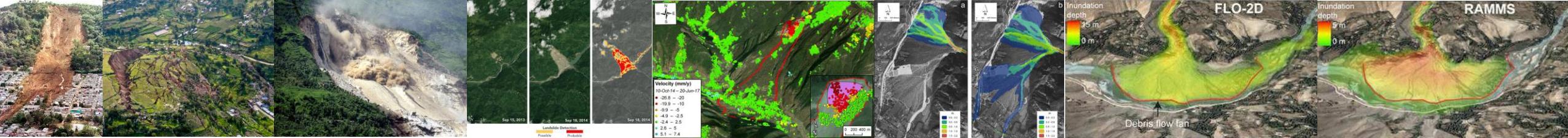




Definiendo la Susceptibilidad a Movimientos en Masa (Deslizamientos)

- Es importante considerar las diferencias entre la **ubicación del origen** del deslizamiento y la **zona de impacto**.
- La **susceptibilidad** describe las áreas donde es probable que **se originen** los deslizamientos.
- El análisis de **peligro e impacto** debe considerar las posibles zonas de **desplazamiento (runout)** y el **impacto general**.
- Esto tiene implicaciones en los **insumos necesarios para los modelos de susceptibilidad**.





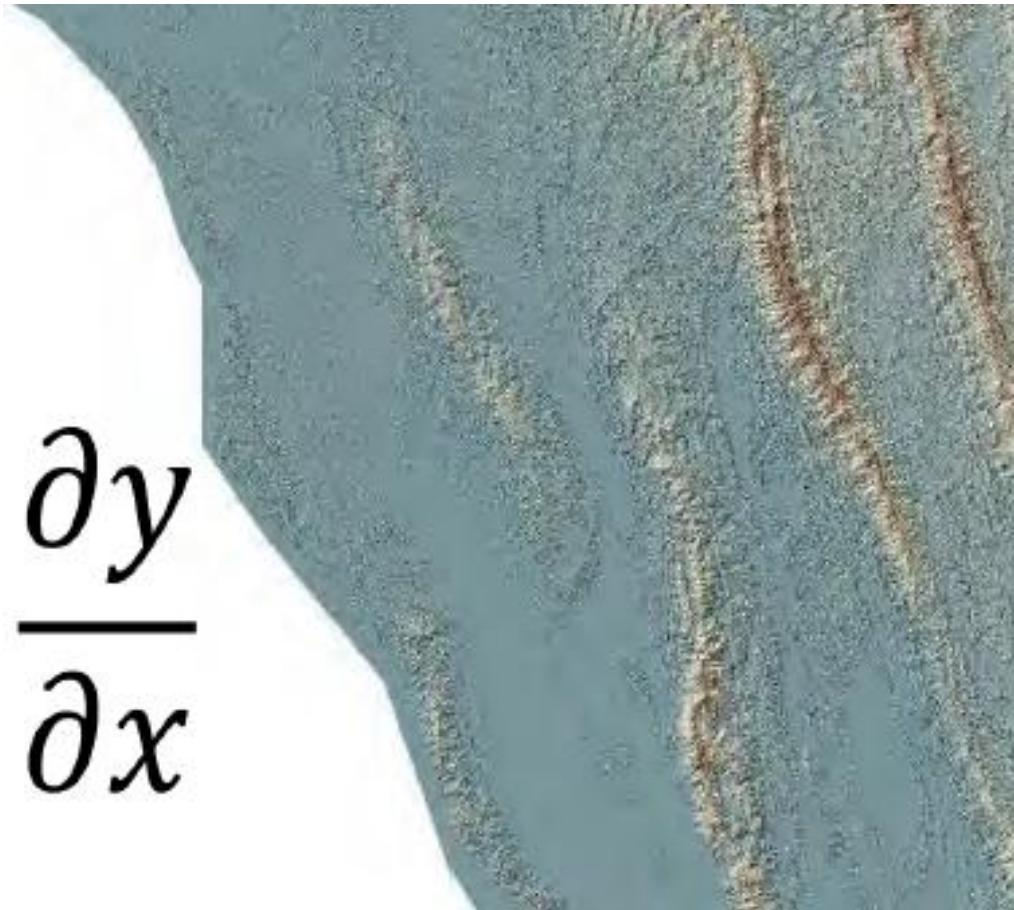
Factores Relevantes y Conjuntos de Datos Satelitales Asociados

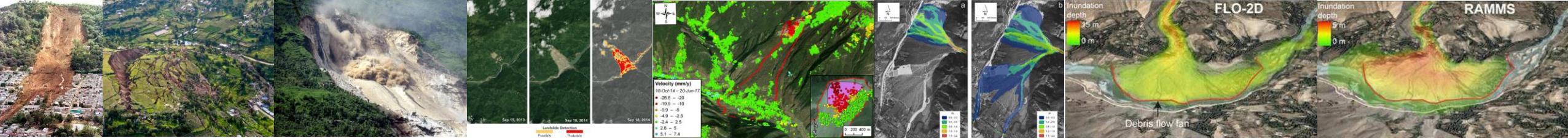
Los factores topográficos son fundamentales para determinar la **susceptibilidad a deslizamientos**.

Los factores relevantes incluyen:

- Pendiente

$$\frac{\partial y}{\partial x}$$

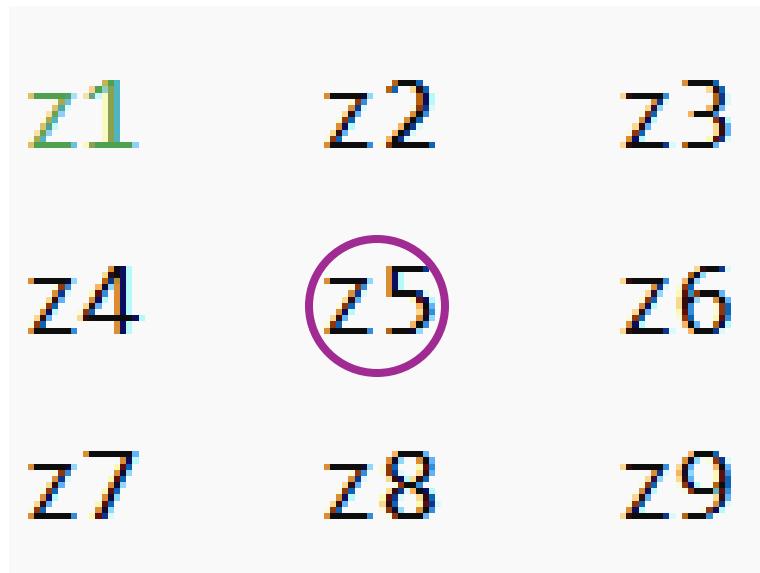




$$\text{Slope} = \arctan \left(\sqrt{\left(\frac{dz}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dy} \right)^2} \right)$$

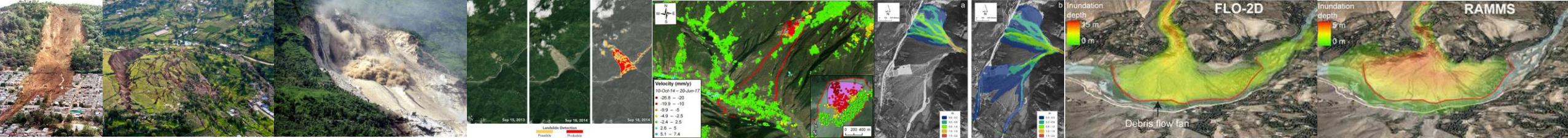
$\frac{dz}{dx}$ = cambio de elevación en dirección este-oeste (pendiente en x)
 $\frac{dz}{dy}$ = cambio de elevación en dirección norte-sur (pendiente en y)

Para una celda con vecinos z_1 a z_9 (de izquierda a derecha, de arriba hacia abajo):



$$\frac{dz}{dx} = \frac{(z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)}{8 \cdot \text{cellsize}}$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{(z_1 + 2z_2 + z_3) - (z_7 + 2z_8 + z_9)}{8 \cdot \text{cellsize}}$$



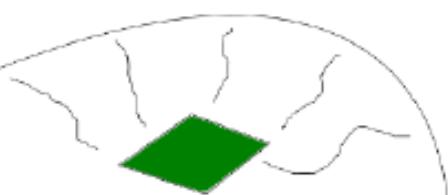
Factores Relevantes y Conjuntos de Datos Satelitales Asociados

Los factores topográficos son fundamentales para determinar la **susceptibilidad a deslizamientos**.

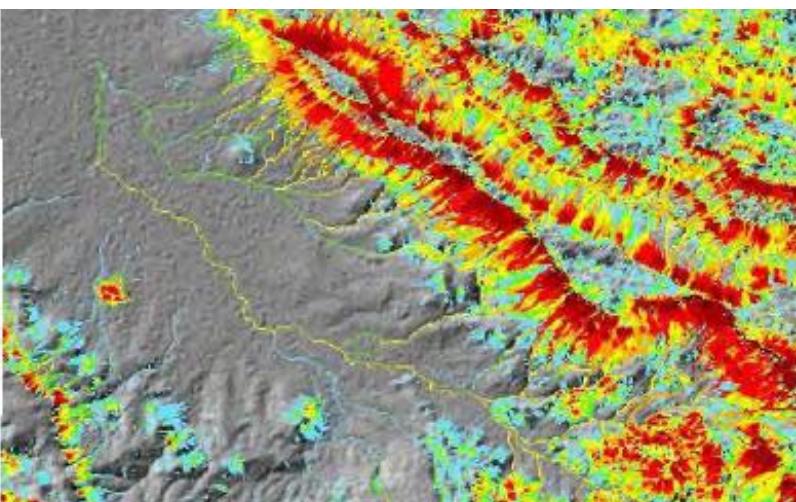
Los factores relevantes incluyen:

- Pendiente
- Pendiente promedio aguas arriba

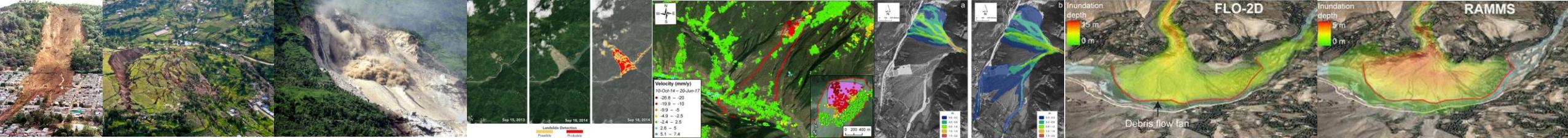
- ✓ Identificar zonas con mayor riesgo de deslizamiento.
- ✓ Priorizar áreas para intervenciones en infraestructura o conservación de suelos.
- ✓ Evaluar la energía potencial de flujos de detritos (debris flows).



■ < 1
■ 1-2
■ 2-3
■ 3-5
■ 5-7
■ 7-10
■ 10-15
■ 15-20
■ 20-30
■ > 30



Monte Elgon es un estratovolcán en la frontera entre Kenia y Uganda



Factores Relevantes y Conjuntos de Datos Satelitales Asociados

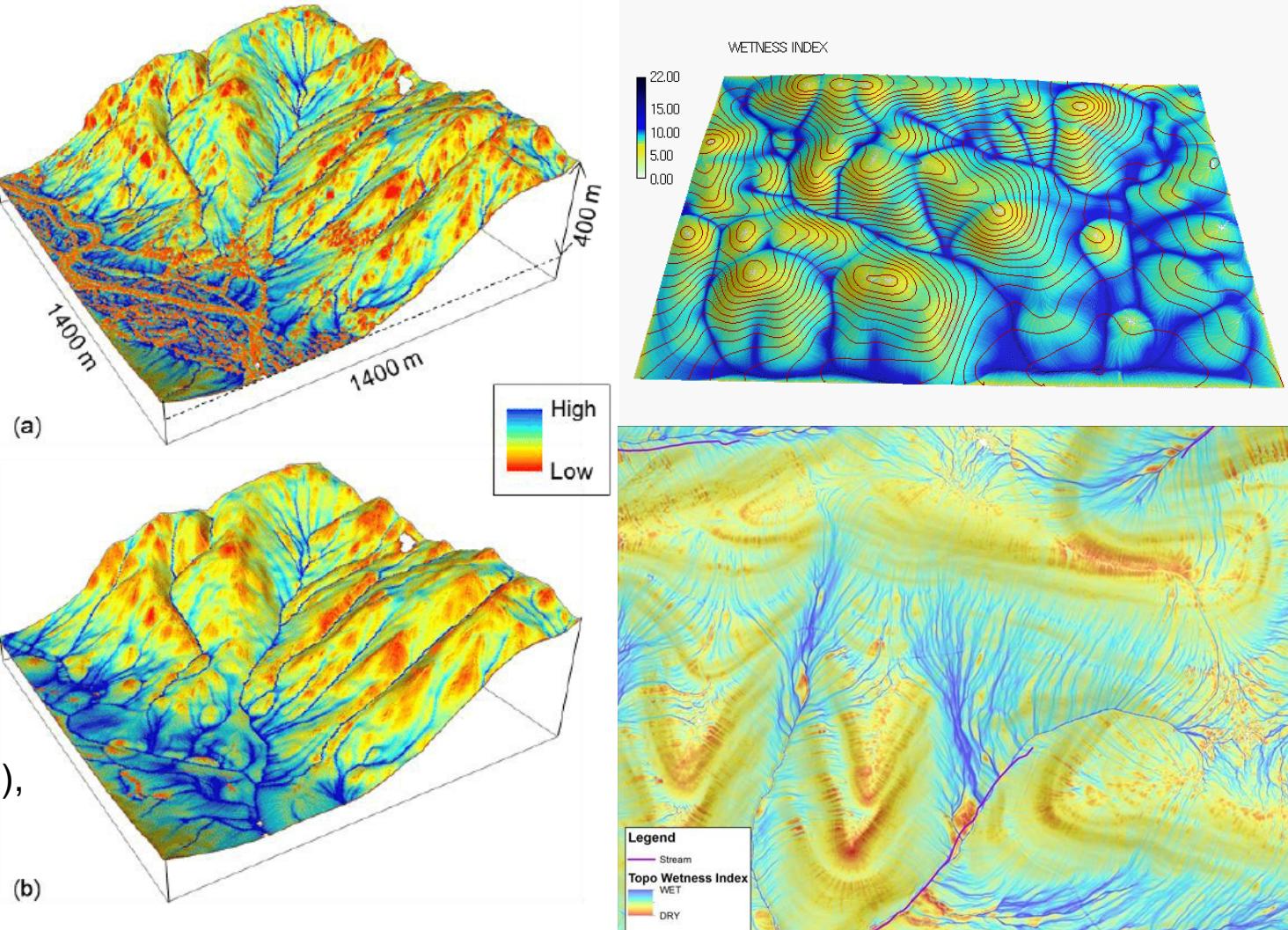
Los factores topográficos son fundamentales para determinar la **susceptibilidad a deslizamientos**.

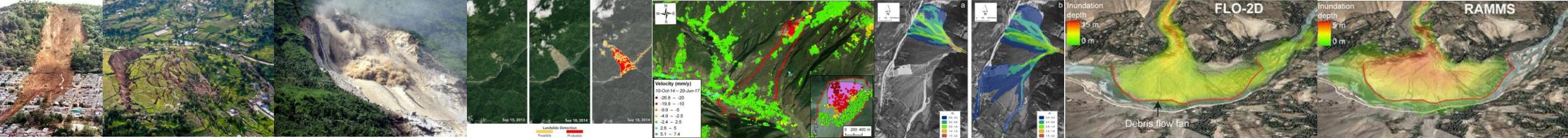
Los factores relevantes incluyen:

- Pendiente
- Pendiente promedio aguas arriba
- Índice Topográfico Compuesto / Índice de Humedad

$$TWI = \ln \left(\frac{a}{\tan \beta} \right)$$

- a = Área de contribución por unidad de contorno (m^2/m), obtenida del mapa de **acumulación de flujo**.
- β = Pendiente del terreno en radianes.





Factores Relevantes y Conjuntos de Datos Satelitales Asociados

Los factores topográficos son fundamentales para determinar la **susceptibilidad a deslizamientos**.

Los factores relevantes incluyen:

- Pendiente
- Pendiente promedio aguas arriba
- Índice Topográfico Compuesto / Índice de Humedad
- Rugosidad / Aspereza Topográfica

$$TRI = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (z_i - z_c)^2}$$

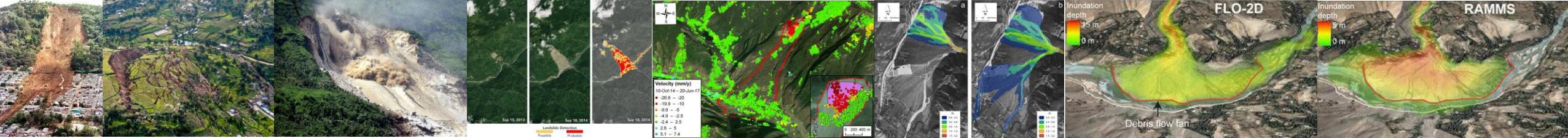
• z_c : valor de elevación del píxel central

• z_i : valor de elevación de cada uno de los 8 vecinos

• Se toma la **diferencia al cuadrado** entre el píxel central y cada vecino, luego se promedia y se saca la raíz cuadrada.



TRI = raíz del promedio de las diferencias al cuadrado en elevación entre un píxel central y cada uno de sus ocho píxeles vecinos.



Factores Relevantes y Conjuntos de Datos Satelitales Asociados

Los factores topográficos son fundamentales para determinar la **susceptibilidad a deslizamientos**.

Los factores relevantes incluyen:

- Pendiente
- Pendiente promedio aguas arriba
- Índice Topográfico Compuesto / Índice de Humedad
- Rugosidad / Aspereza Topográfica
- Posición Topográfica

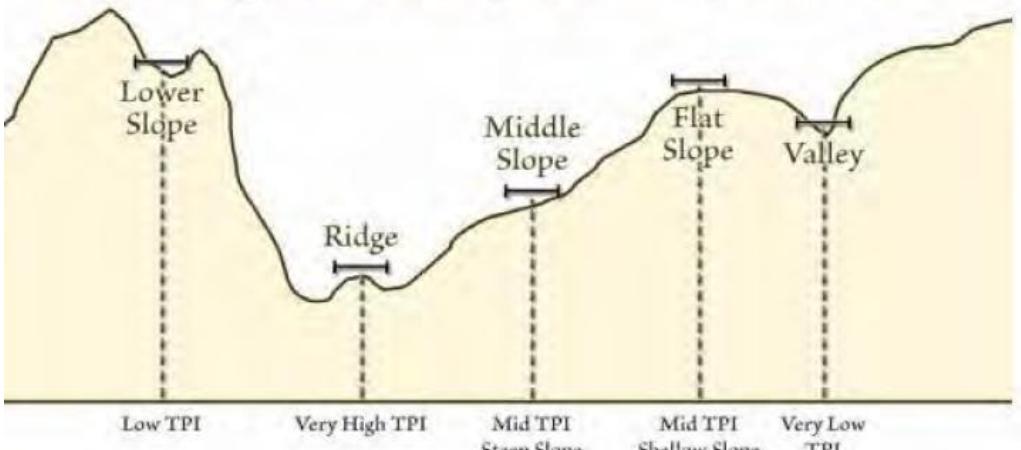
clasificación de posiciones en ladera usando el Índice de Posición Topográfica (TPI), diferenciando entre vecindarios pequeños y grandes:

- z_{central} : elevación del píxel de interés

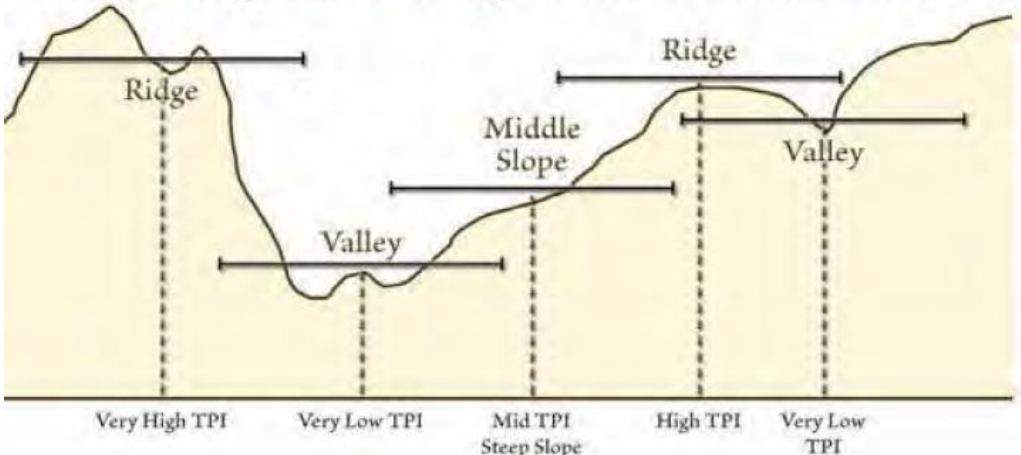
$$\text{TPI} = z_{\text{central}} - \bar{z}_{\text{vecinos}}$$

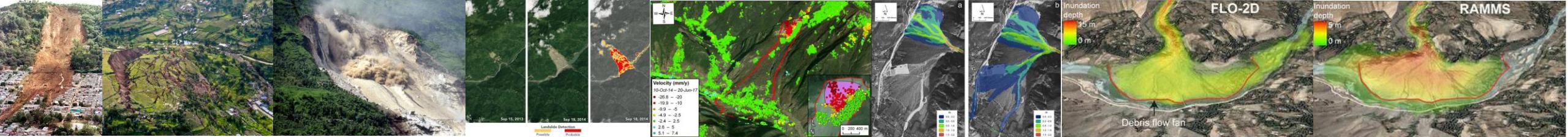
- \bar{z}_{vecinos} : promedio de elevaciones alrededor del píxel

Small-Neighborhood Slope Position Classification



Large-Neighborhood Slope Position Classification

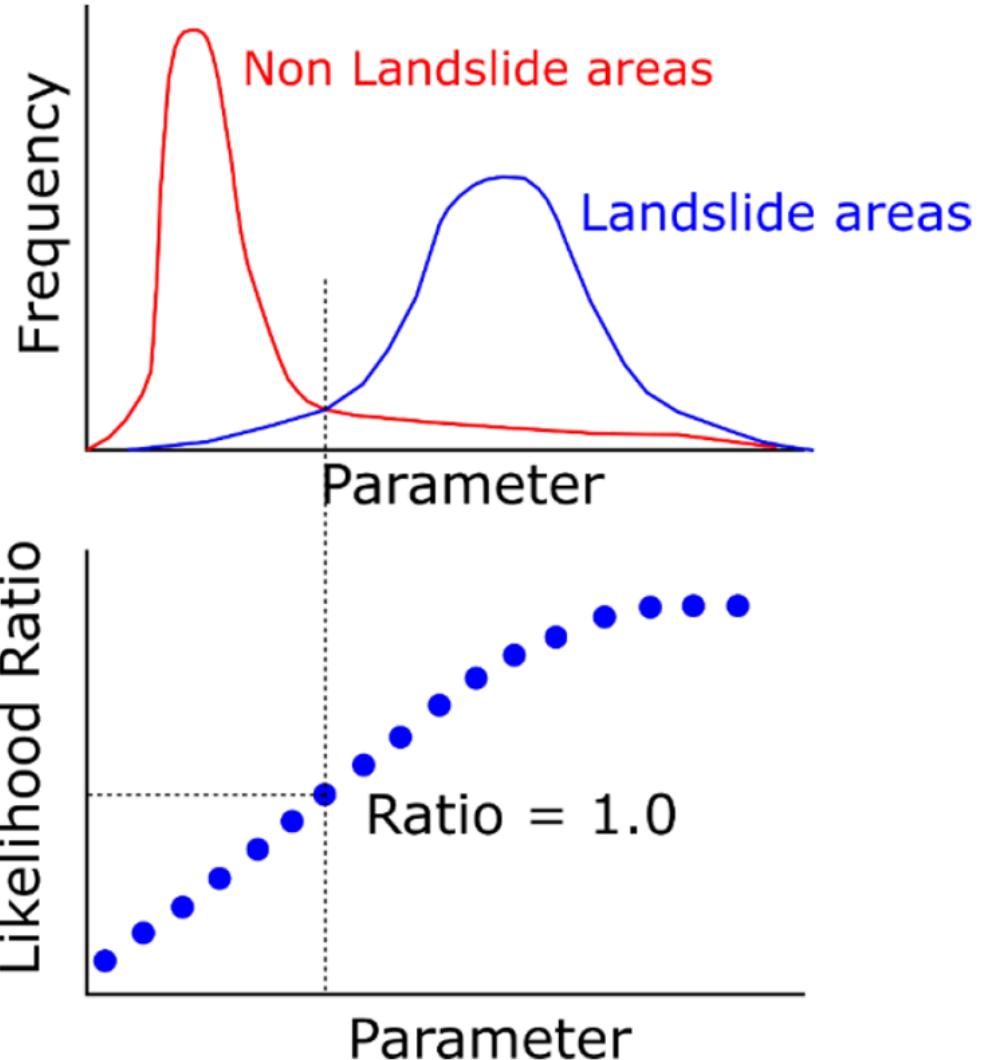


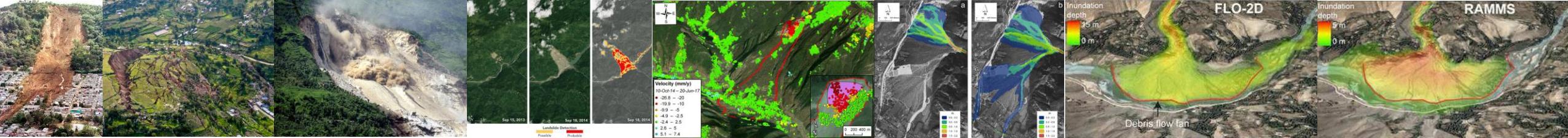


Análisis de Ubicaciones de Deslizamientos en Datos de MDE (Modelo Digital de Elevación)

- Los píxeles asociados con deslizamientos pueden compararse con píxeles sin deslizamientos en un área de estudio para mostrar la frecuencia relativa de ocurrencia.
- A menudo existen relaciones claras entre las zonas de origen y las zonas de recorrido del deslizamiento.

influencia de un parámetro (por ejemplo, pendiente, curvatura, TWI, etc.) en la **ocurrencia de deslizamientos**,





Evaluación de la pendiente en la ocurrencia de deslizamientos

Supongamos que dividimos la pendiente en clases (en grados) y contamos cuántos píxeles caen en cada clase para áreas con y sin deslizamientos:

Clase de Pendiente (°)	Píxeles con deslizamiento	Píxeles sin deslizamiento
0–5	20	400
5–15	80	600
15–30	250	300
30–45	150	150
>45	50	50

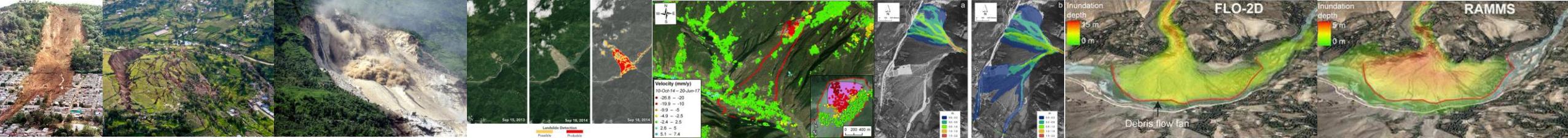
Supongamos:

- Total de píxeles con deslizamiento = **550**
- Total de píxeles sin deslizamiento = **1500**

$$P(D|X) = \frac{\text{Píxeles con deslizamiento en la clase}}{\text{Total píxeles con deslizamiento}}$$

$$P(ND|X) = \frac{\text{Píxeles sin deslizamiento en la clase}}{\text{Total píxeles sin deslizamiento}}$$

Para cada clase calculamos:

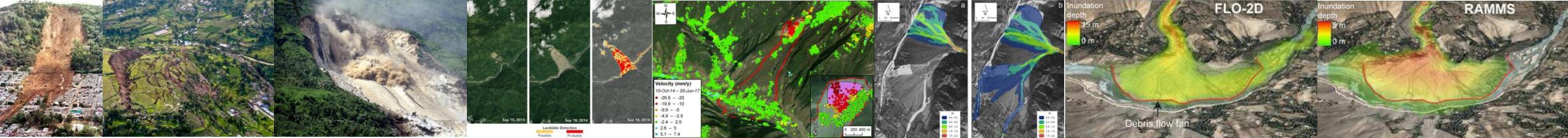


Calcular la **razón de verosimilitud (Likelihood Ratio)**

$$LR = \frac{P(D|X)}{P(ND|X)}$$

- **LR > 1**, indicando **mayor probabilidad de deslizamiento**.
- **LR < 1**, es decir, **baja probabilidad de deslizamiento**.

Característica	Áreas con Deslizamientos	Áreas sin Deslizamientos
Proporción en el paisaje	Baja	Alta
Número de píxeles en el análisis	Menor	Mayor
Valores típicos del parámetro (pendiente)	Moderados a altos	Bajos
Frecuencia en el histograma	Más baja (pero selectiva)	Más alta (por abundancia)
Riesgo asociado	Alto	Bajo
Importancia en modelos de susceptibilidad	Muy alta	Sirven como control/comparación



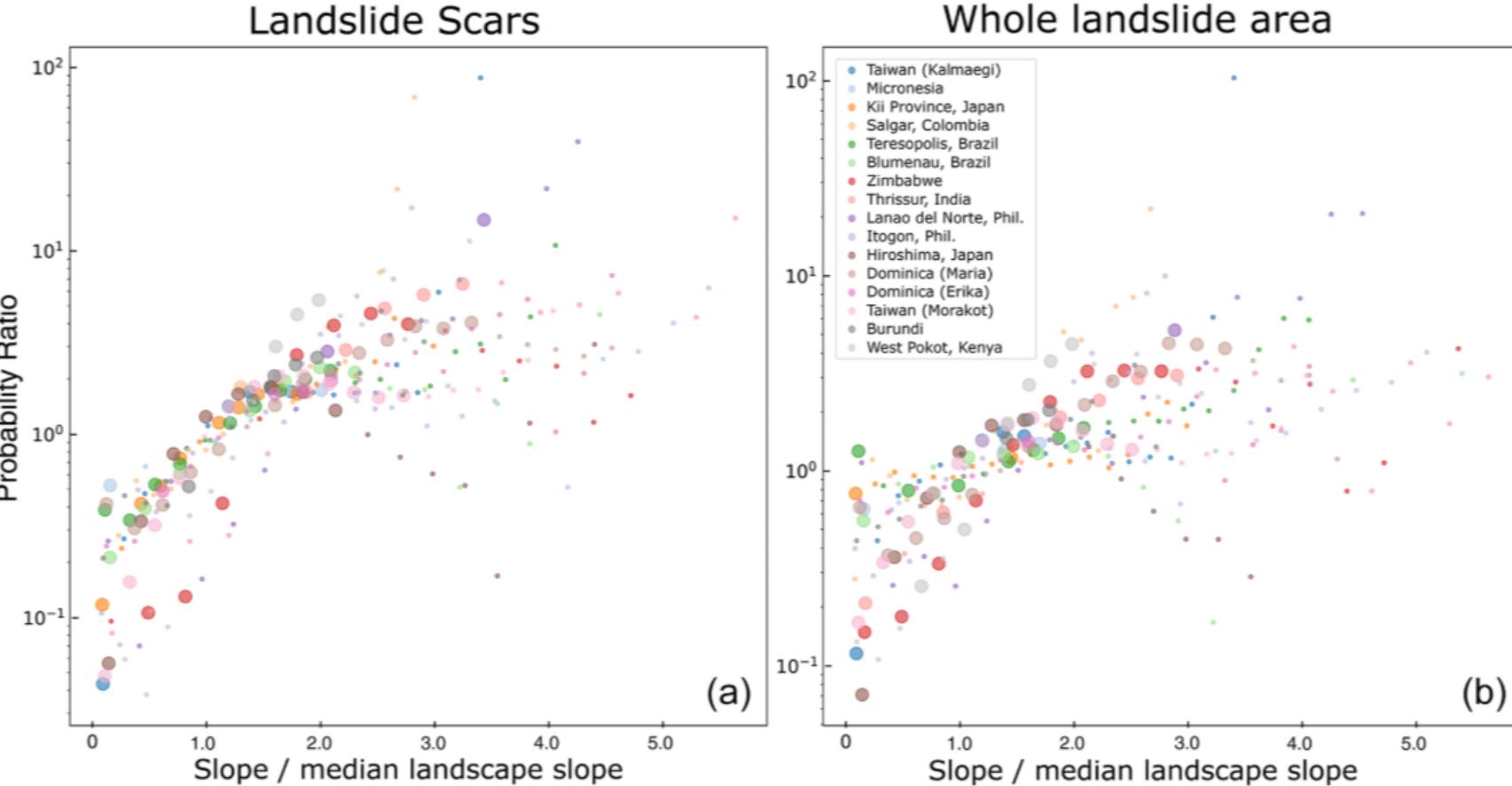
Análisis de Ubicaciones de Deslizamientos con Datos de MDE

- Los píxeles asociados con deslizamientos pueden compararse con píxeles sin deslizamientos en un área de estudio para mostrar la frecuencia relativa de ocurrencia de deslizamientos.
- A menudo existen relaciones claras entre las zonas de origen y las zonas de recorrido del deslizamiento.

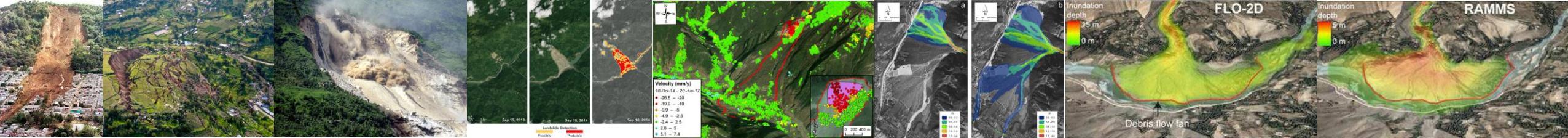
Slope / Median landscape slope

(Razón de probabilidad):

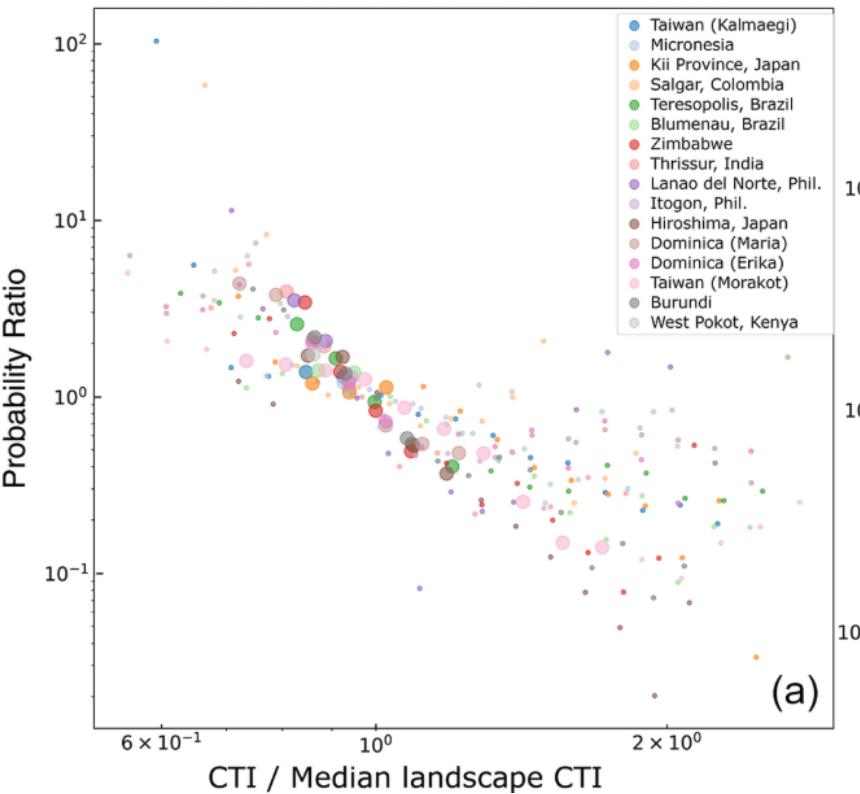
- **> 1** → mayor probabilidad de deslizamiento.
- **= 1** → probabilidad igual al promedio del paisaje.
- **< 1** → menor probabilidad.



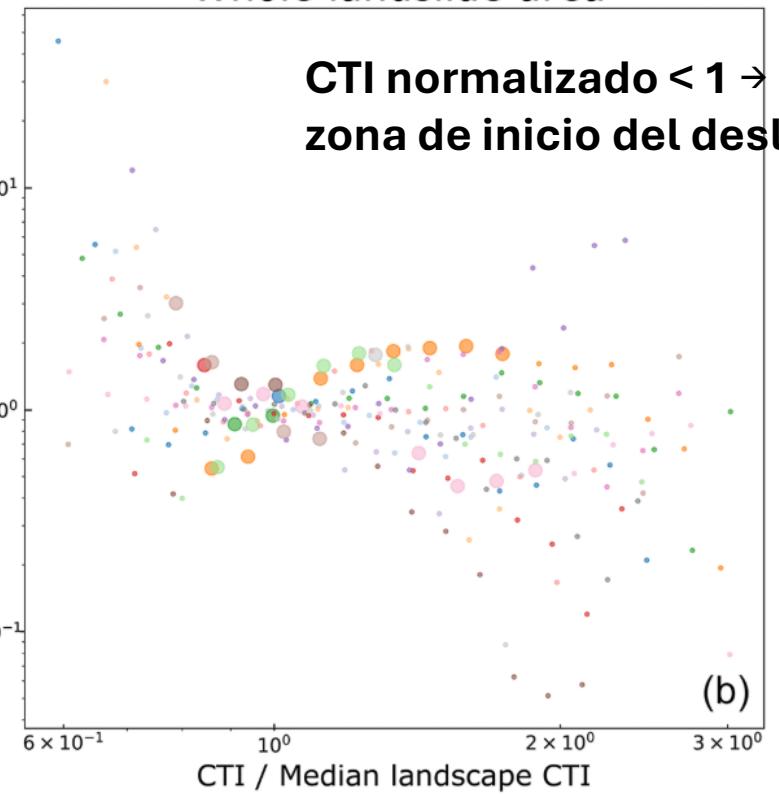
- Esta imagen muestra dos gráficos que analizan la relación entre la **pendiente del terreno normalizada** y la **probabilidad de ocurrencia de deslizamientos**, comparando distintas regiones del mundo.



Landslide Scars

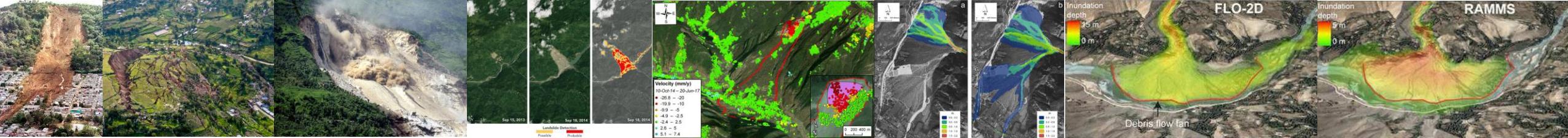


Whole landslide area

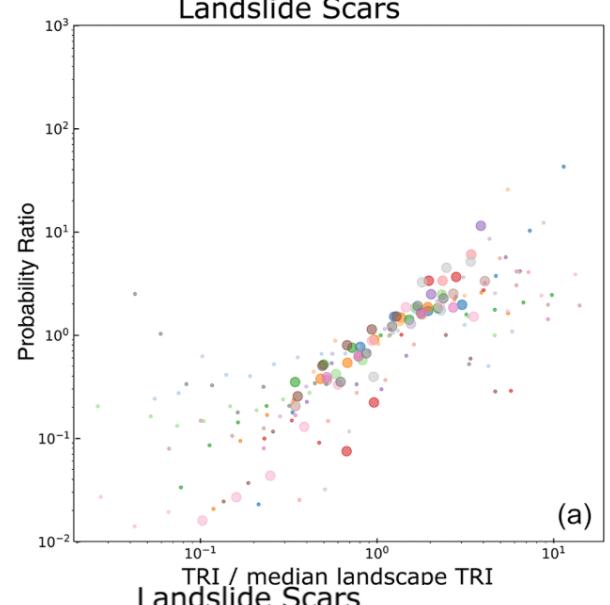


- A menor CTI relativo (zonas más secas/altas), mayor probabilidad de ocurrencia de cicatrices de deslizamiento.
- Se confirma que los deslizamientos se originan típicamente en crestas o laderas empinadas con poca acumulación de agua superficial.

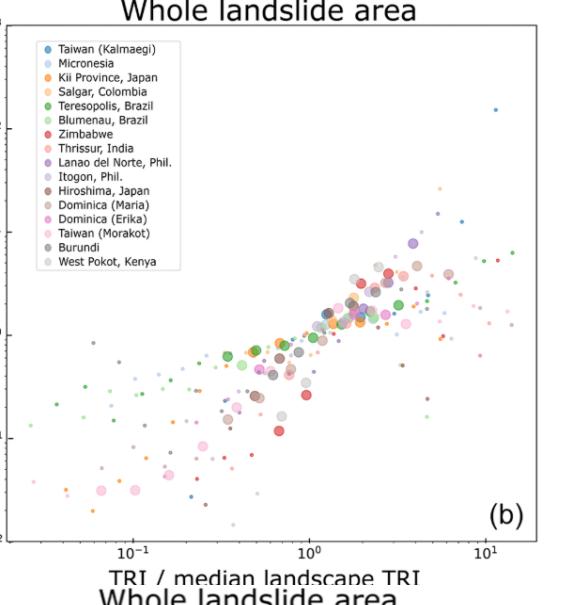
Aunque los deslizamientos comienzan en zonas secas, se desplazan hacia zonas más húmedas con mayor CTI.



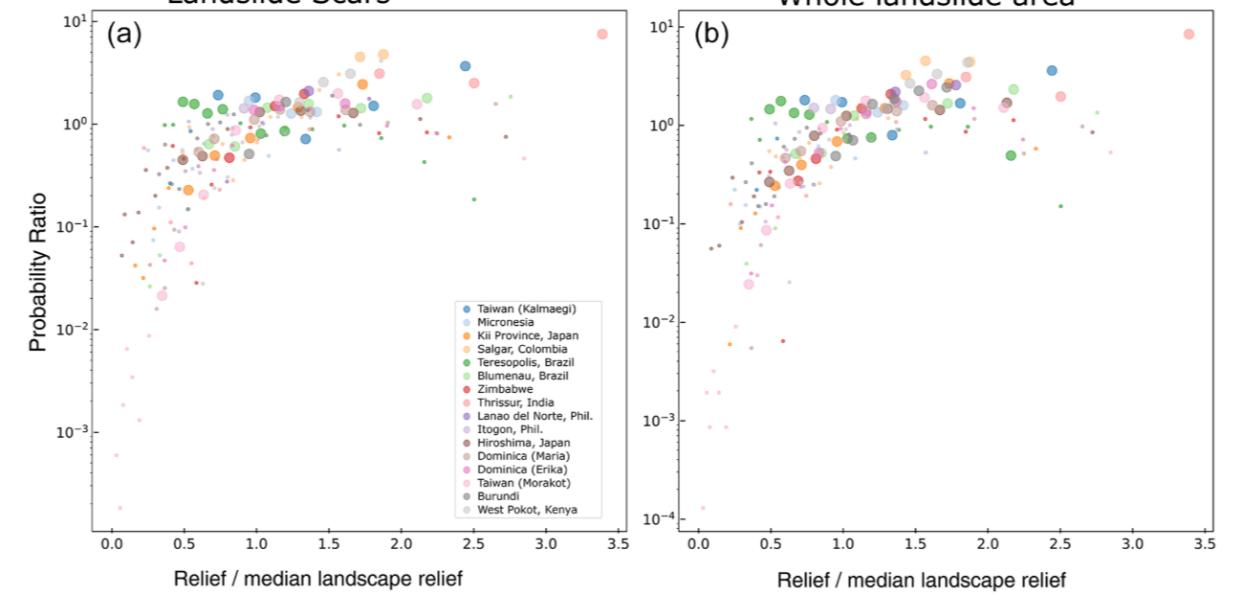
Landslide Scars



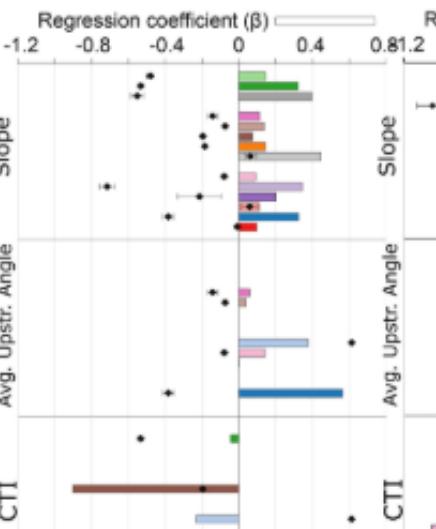
Whole landslide area



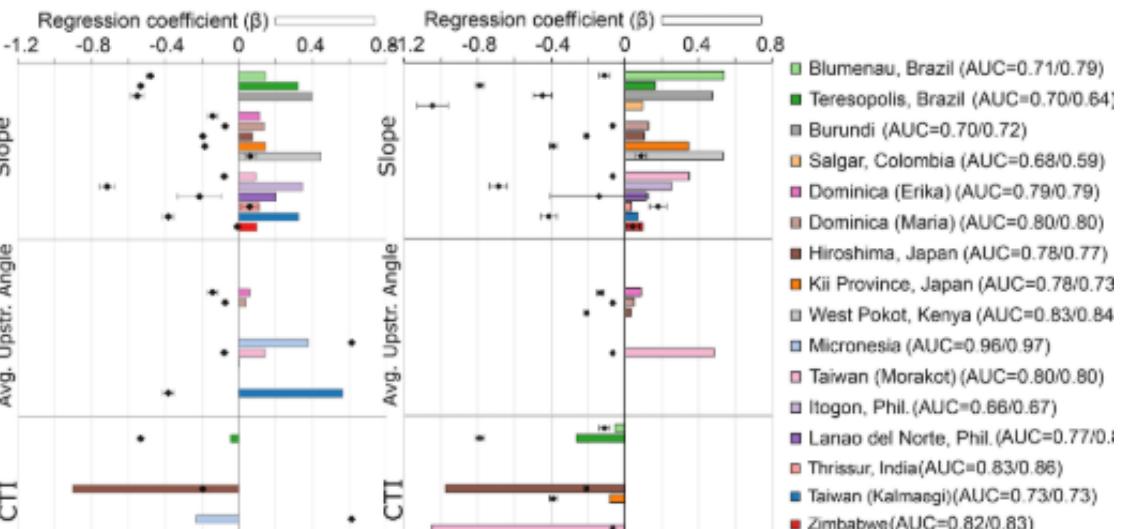
Landslide Scars



(a) Scar areas



(b) Entire Landslide



Legend for locations:

- Taiwan (Kalmagi)
- Micronesia
- Kii Province, Japan
- Salgar, Colombia
- Teresopolis, Brazil
- Blumenau, Brazil
- Zimbabwe
- Thrissur, India
- Lanao del Norte, Phil.
- Ilogen, Phil.
- Hiroshima, Japan
- Dominica (Maria)
- Taiwan (Morakot)
- Burundi
- West Pokot, Kenya

AUC values for each metric:

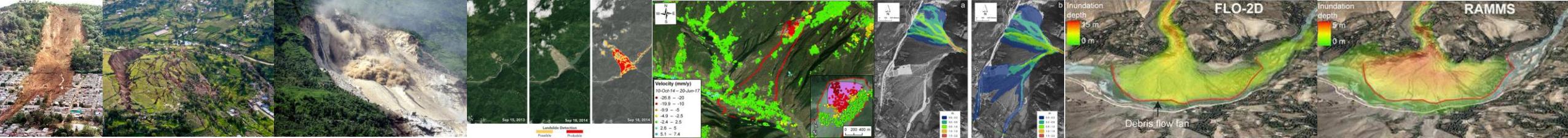
Metric	AUC
Blumenau, Brazil (AUC=0.71/0.79)	
Teresopolis, Brazil (AUC=0.70/0.64)	
Burundi (AUC=0.70/0.72)	
Salgar, Colombia (AUC=0.68/0.59)	
Dominica (Erika) (AUC=0.79/0.79)	
Dominica (Maria) (AUC=0.80/0.80)	
Hiroshima, Japan (AUC=0.78/0.77)	
Kii Province, Japan (AUC=0.78/0.73)	
West Pokot, Kenya (AUC=0.83/0.84)	
Micronesia (AUC=0.96/0.97)	
Taiwan (Morakot) (AUC=0.80/0.80)	
Ilogen, Phil. (AUC=0.66/0.67)	
Lanao del Norte, Phil. (AUC=0.77/0.77)	
Thrissur, India (AUC=0.83/0.86)	
Taiwan (Kalmangi) (AUC=0.73/0.73)	
Zimbabwe (AUC=0.82/0.83)	

Legend for locations:

- Taiwan (Kalmagi)
- Micronesia
- Kii Province, Japan
- Salgar, Colombia
- Teresopolis, Brazil
- Blumenau, Brazil
- Zimbabwe
- Thrissur, India
- Lanao del Norte, Phil.
- Ilogen, Phil.
- Hiroshima, Japan
- Dominica (Maria)
- Taiwan (Morakot)
- Burundi
- West Pokot, Kenya

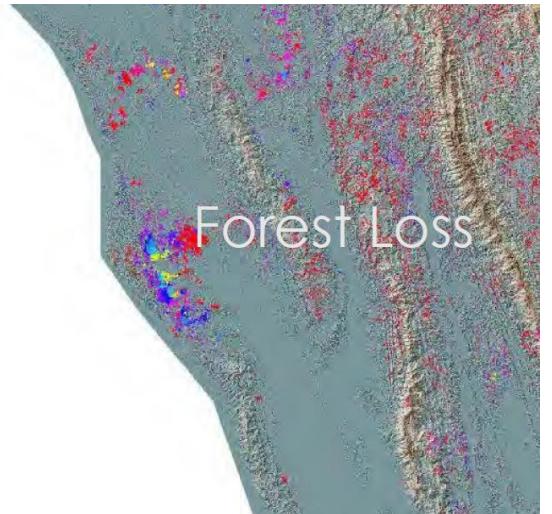
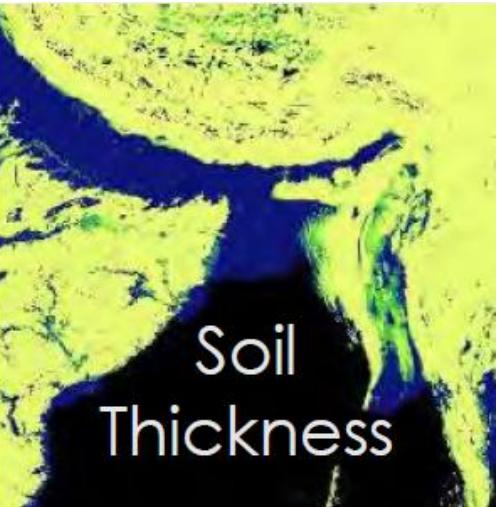
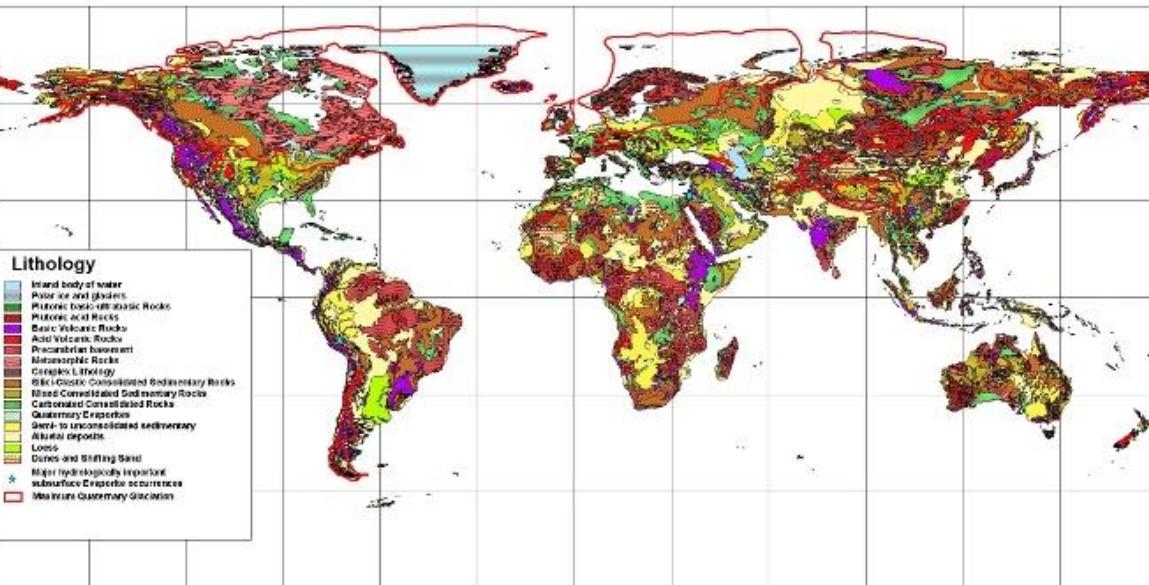
AUC values for each metric:

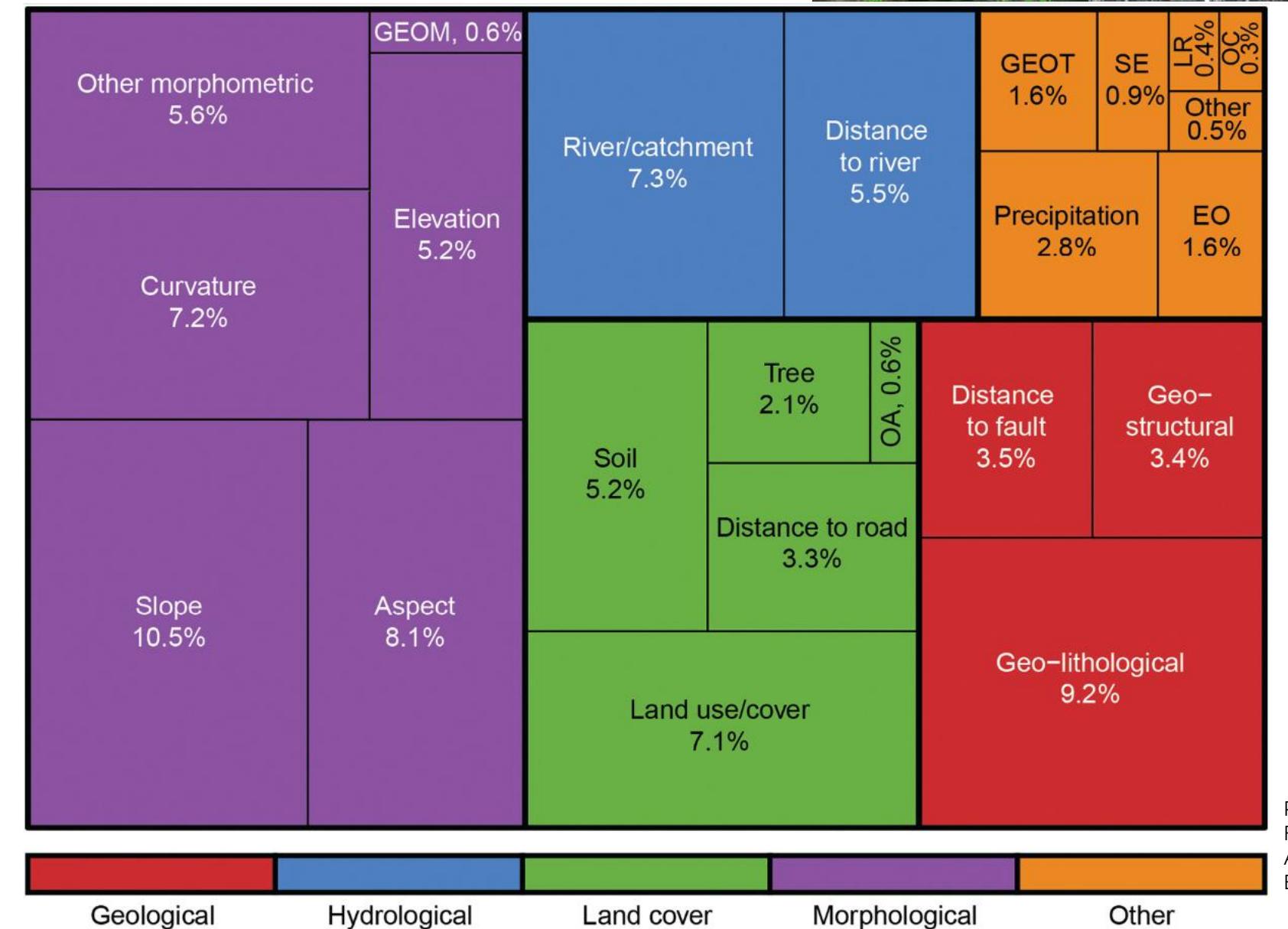
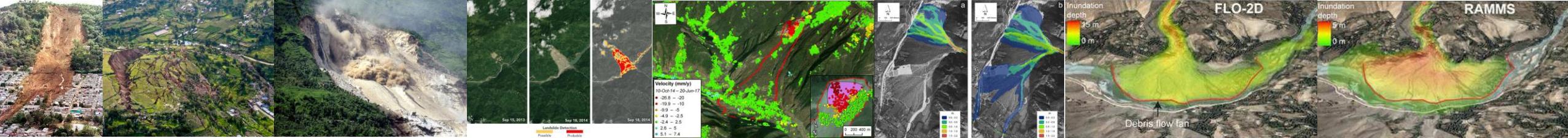
Metric	AUC
Blumenau, Brazil (AUC=0.71/0.79)	
Teresopolis, Brazil (AUC=0.70/0.64)	
Burundi (AUC=0.70/0.72)	
Salgar, Colombia (AUC=0.68/0.59)	
Dominica (Erika) (AUC=0.79/0.79)	
Dominica (Maria) (AUC=0.80/0.80)	
Hiroshima, Japan (AUC=0.78/0.77)	
Kii Province, Japan (AUC=0.78/0.73)	
West Pokot, Kenya (AUC=0.83/0.84)	
Micronesia (AUC=0.96/0.97)	
Taiwan (Morakot) (AUC=0.80/0.80)	
Ilogen, Phil. (AUC=0.66/0.67)	
Lanao del Norte, Phil. (AUC=0.77/0.77)	
Thrissur, India (AUC=0.83/0.86)	
Taiwan (Kalmangi) (AUC=0.73/0.73)	
Zimbabwe (AUC=0.82/0.83)	



Factores Relevantes y Conjuntos de Datos Satelitales Asociados

- Los conjuntos de datos típicos incluyen datos de **MODIS, Landsat y Sentinel**.
- El análisis a largo plazo y la detección de cambios son consideraciones relevantes
- Litología (modelo global o local). También son relevantes las fallas y la información geoestructural

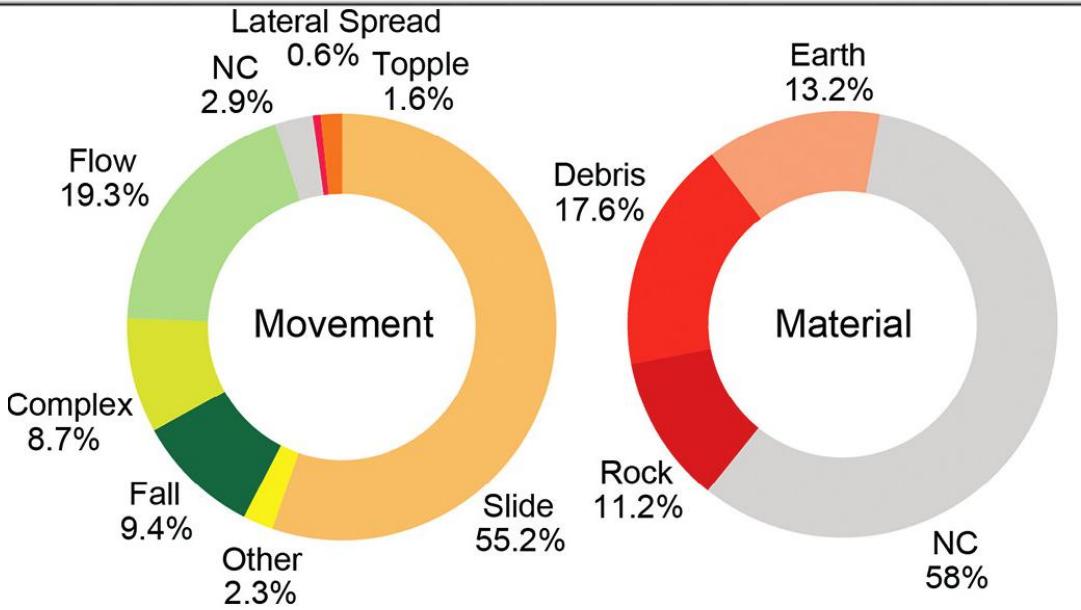
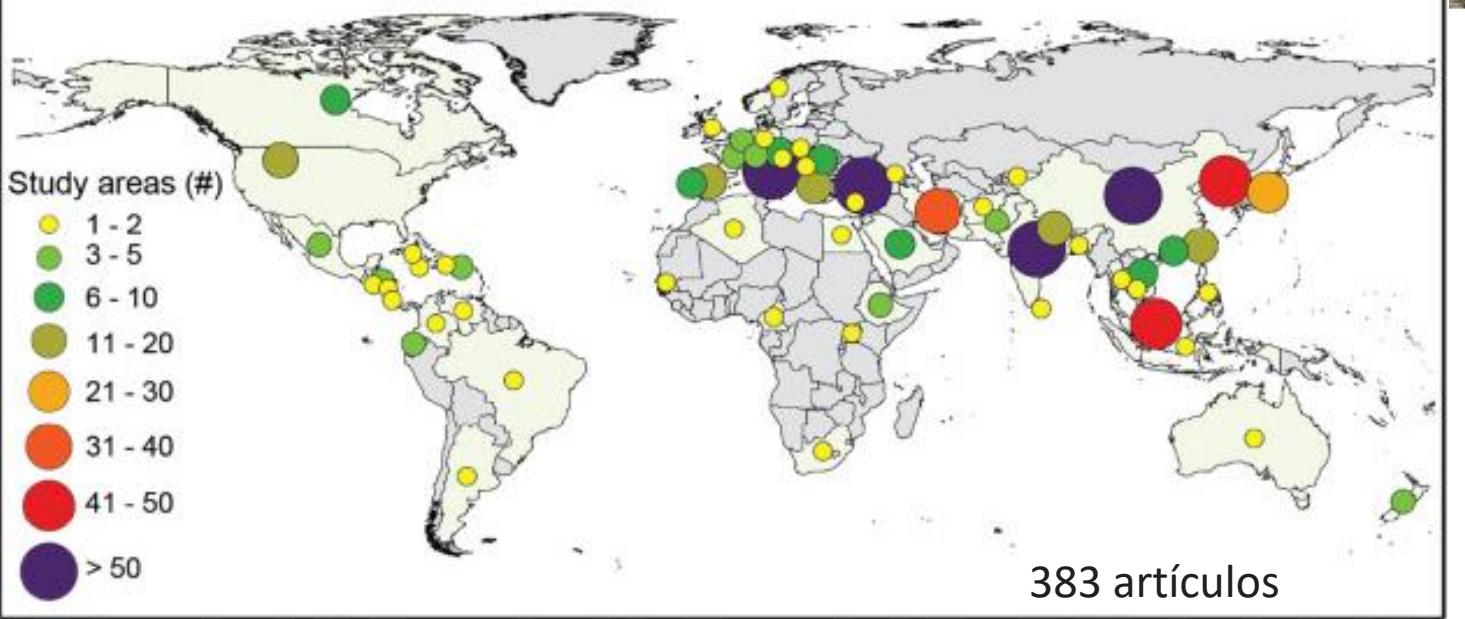
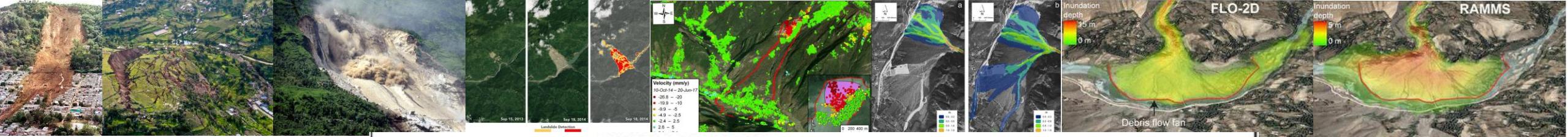


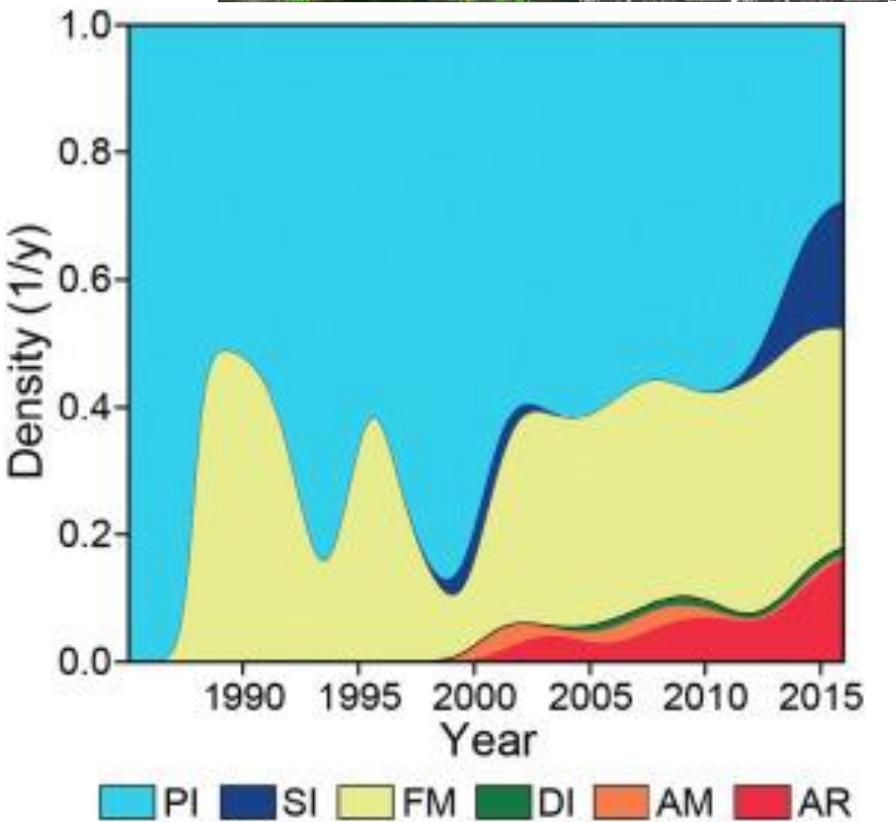
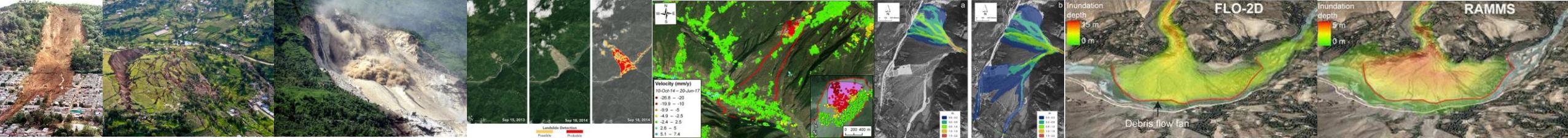


Factores incluidos en los modelos de susceptibilidad a deslizamientos:

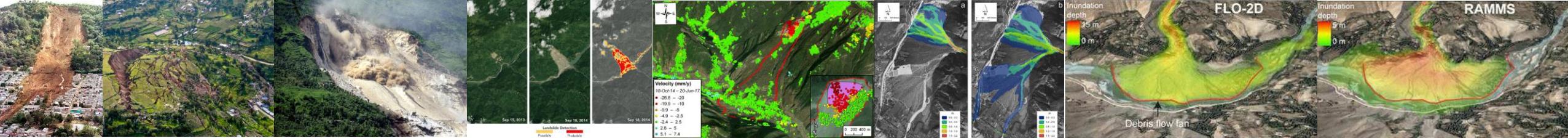
Variables temáticas. El diagrama de árbol muestra la proporción de las variables temáticas originales, según se listan en la base de datos de artículos en la literatura. Las variables se agrupan en 23 clases pertenecientes a cinco grupos temáticos, representados con diferentes colores. Leyenda: EO, observación de la Tierra; GEOM, geomorfológica; GEOT, geotécnica; LR, relacionada con deslizamientos de tierra; OA, otras antrópicas; OC, otras climáticas; SE, sísmica.

Paola Reichenbach, Mauro Rossi, Bruce D. Malamud, Monika Mihir, Fausto Guzzetti,
A review of statistically-based landslide susceptibility models, Earth-Science Reviews, Volume 180, 2018.





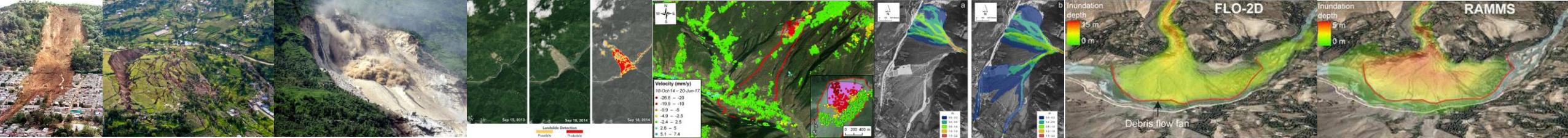
Técnicas de mapeo de deslizamientos. El gráfico de densidad condicional muestra la distribución del uso de las técnicas de mapeo para cada año, según se describe en los artículos de la base de datos bibliográfica. Leyenda: **PI**: interpretación visual de fotografías aéreas; **SI**: interpretación visual de imágenes satelitales; **FM**: mapeo de campo; **DI**: interpretación visual de derivadas [de DEM](#); **AM**: mapeo automático o semiautomático mediante imágenes [de teledetección](#); **AR**: análisis de archivos y fuentes históricas.



Los datos satelitales son muy efectivos a escala local, regional e incluso global.

- El análisis de datos de superficie utilizando grandes inventarios de deslizamientos permite un análisis estadístico eficaz de las áreas afectadas.
- Sin embargo, la mayoría de los datos de observación de la Tierra sirven solo como un **proxy** de las razones físicas por las que ocurren los deslizamientos; la fricción subterránea y las fuerzas gravitacionales relevantes generalmente **no son caracterizadas**.
- Los modelos basados en EO suelen ser estadísticos; algunos modelos localizados que utilizan métodos de la ingeniería geotécnica pueden permitir una modelación basada en la física.

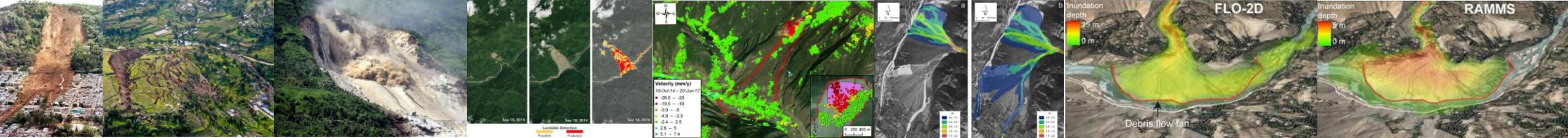




Construcción de Modelos de Susceptibilidad a Deslizamientos

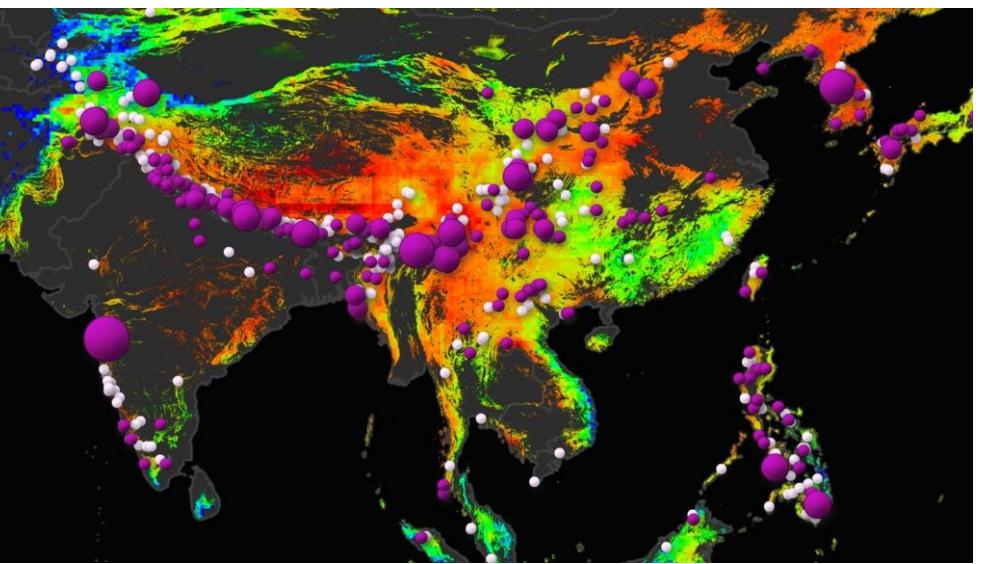
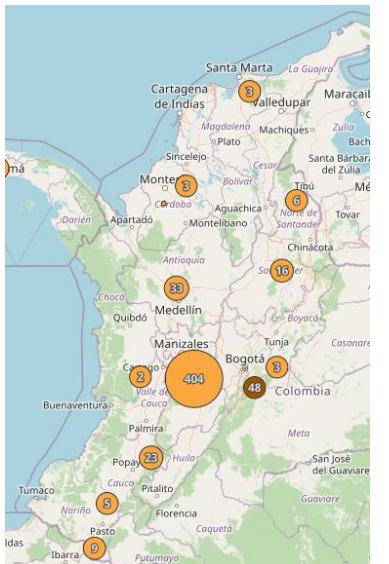
- Los modelos estadísticos utilizan combinaciones de datos asociados a la susceptibilidad junto con datos de entrenamiento, que normalmente consisten en **ubicaciones conocidas de deslizamientos**.
- Se determinan relaciones entre la ubicación de los deslizamientos y los factores de entrada.
- Luego, estas relaciones se **generalizan** y se aplican a los datos de entrada para generar un **mapa de susceptibilidad**, es decir, una predicción de otras zonas donde probablemente ocurrán deslizamientos.
- Los modelos de un solo parámetro son conceptualmente simples, pero la introducción de más parámetros puede generar consideraciones adicionales.





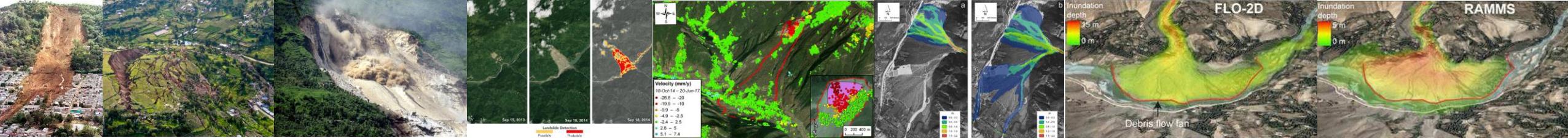
Los inventarios de deslizamientos **varían ampliamente**.

- El **Catálogo Global de Deslizamientos** no es un conjunto de datos “completo”.
- Los datos más **locales** pueden estar más completos y detallados.



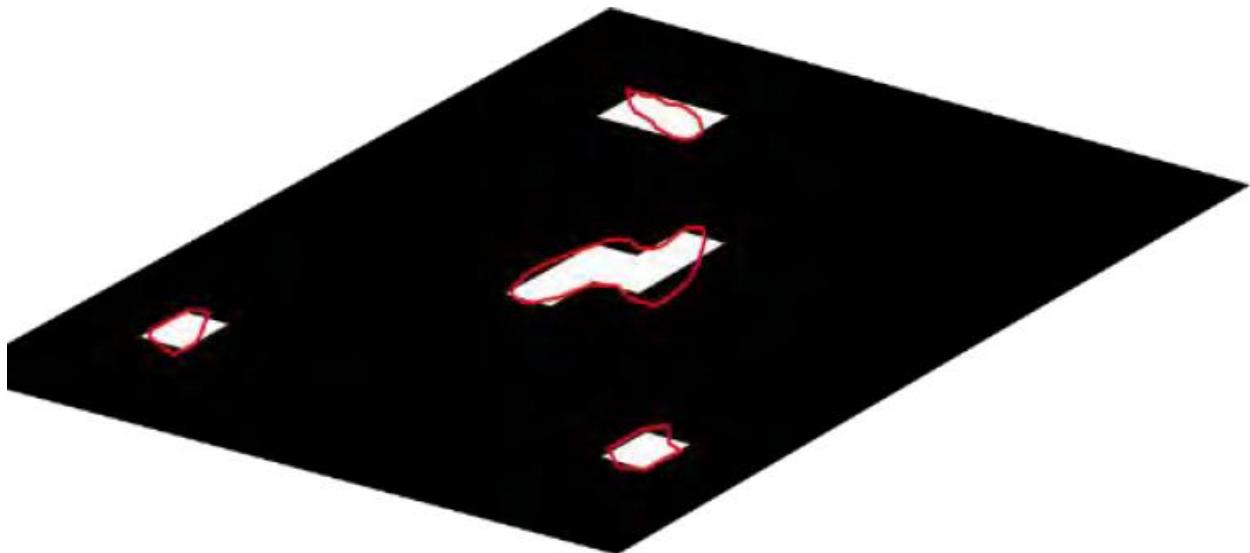
<https://maps.nccs.nasa.gov/arcgis/apps/experiencebuilder/experience/?id=29bd25e78fff45foa6dbfd0328b4d03e>

https://datos.sgc.gov.co/datasets/312c8792ddb24954agd271bd89d1afe_0/explore



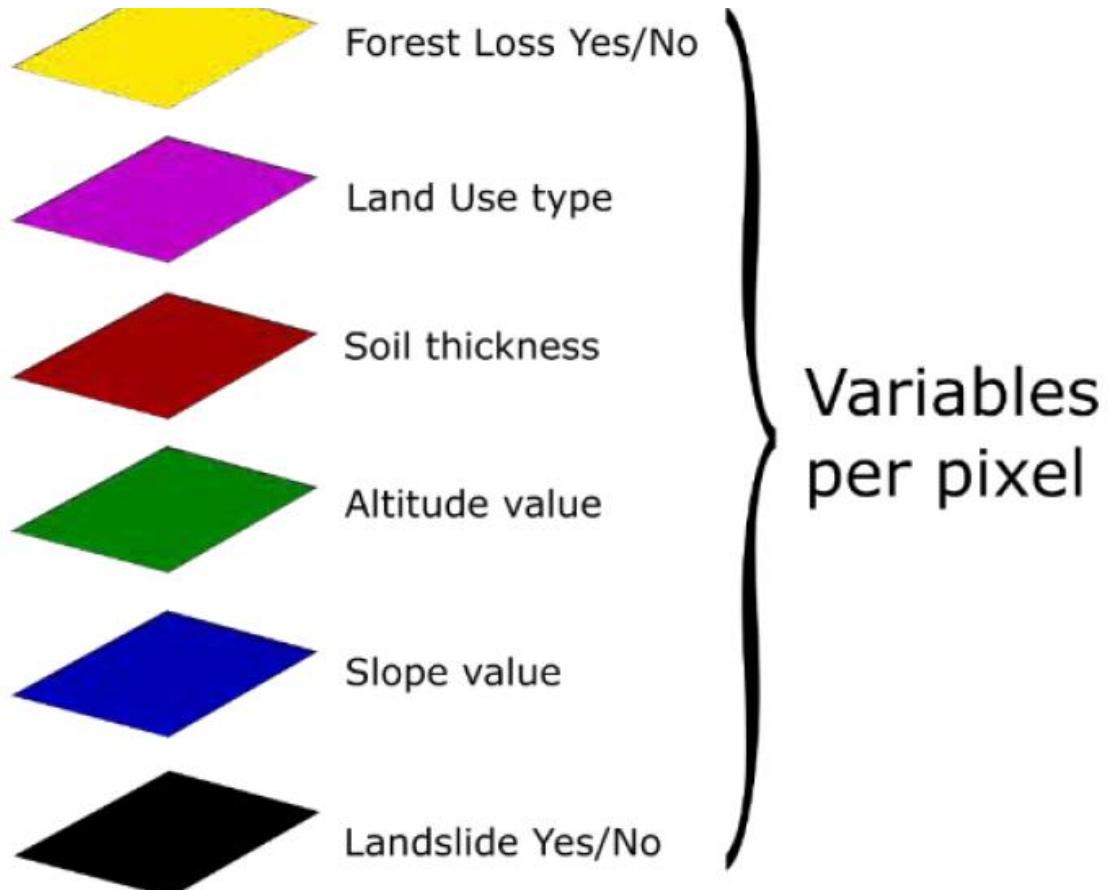
Enfoques Basados en Píxeles

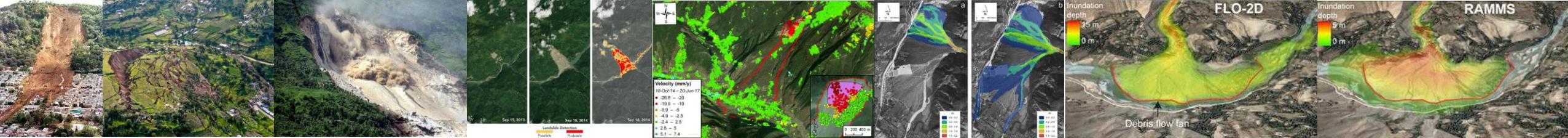
Process datasets to get observations for each pixel.



Convert Landslide polygons to presence/absence pixel map

Procesar los conjuntos de datos para obtener observaciones en **cada píxel**.

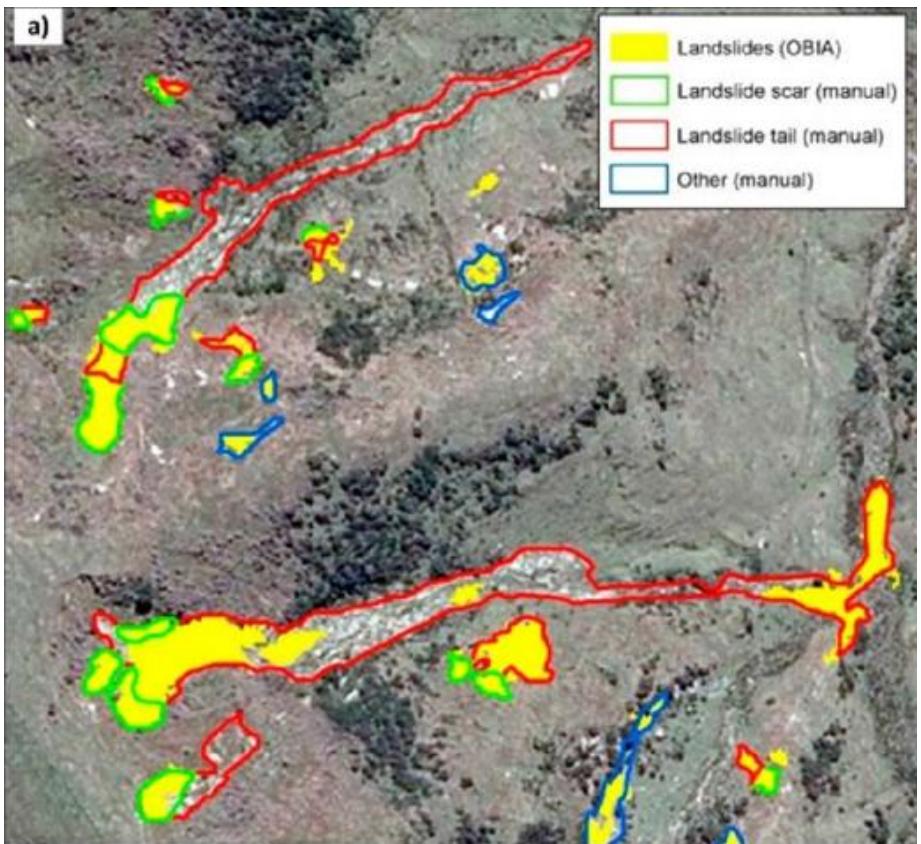


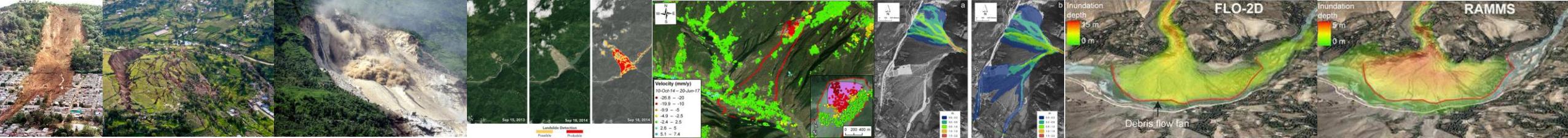


Enfoques Basados en Unidades de Ladera (Slope Units)

Este tipo de modelación utiliza **unidades geomorfológicas completas**, como laderas delimitadas por divisorias y líneas de drenaje, en lugar de píxeles individuales

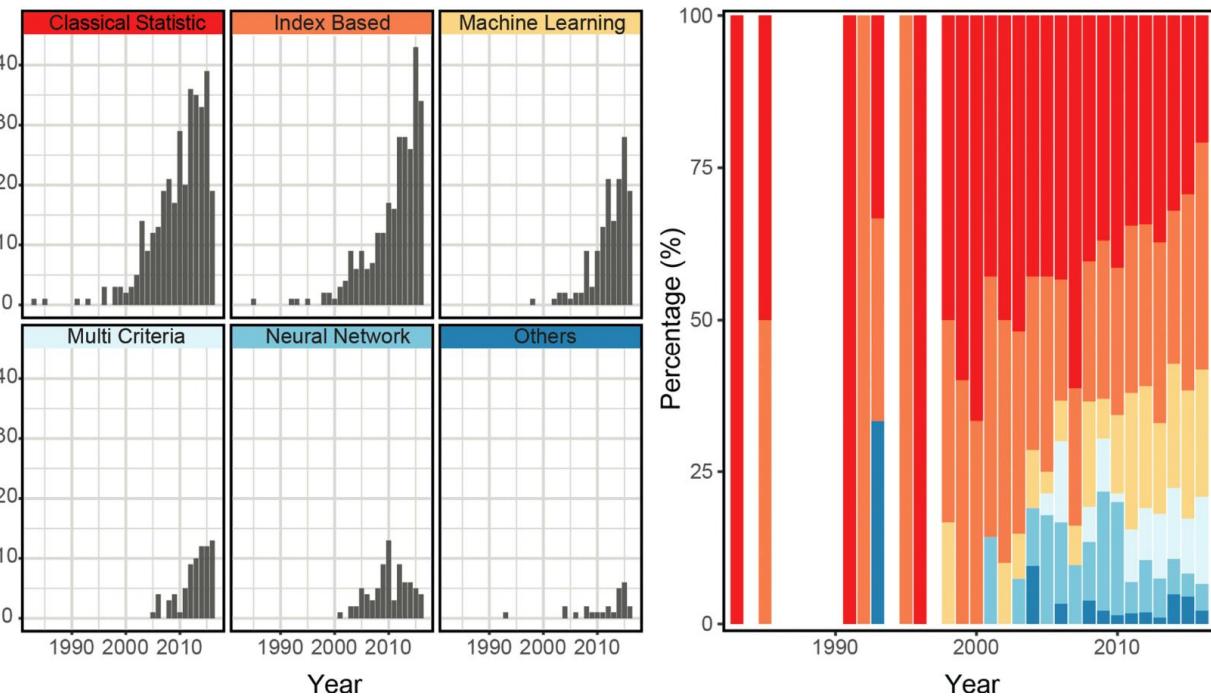
- Puede ser **más preciso** y evita que los píxeles crucen dos valles o unidades geomorfológicas distintas.
- Este enfoque se encuentra en investigaciones más **recientes y avanzadas**, donde se prioriza la unidad geomorfológica sobre la unidad de análisis tipo ráster.

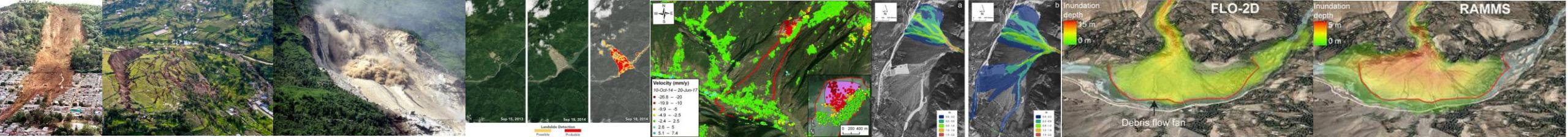




Métodos estadísticos

- Existe una **enorme variedad de métodos estadísticos** utilizados para el análisis de susceptibilidad.
- Los investigadores han empleado enfoques estadísticos clásicos, de **aprendizaje automático (machine learning)** y de **redes neuronales** para generar estimaciones de susceptibilidad.
- Cada enfoque tiene **limitaciones** en cuanto a los datos utilizados.
- Regla clave: **los resultados solo son tan buenos como los datos de entrada.**





Datos Continuos vs. Datos Categóricos

- Los modelos estadísticos pueden incorporar tanto **datos categóricos** como **datos continuos**.
- Evaluar la **importancia de los datos continuos** suele ser más fácil de conceptualizar.
- En algunos modelos estadísticos, es necesario **convertir los datos categóricos en datos continuos** para mejorar la precisión del análisis.

Tipo de dato	Descripción	Ejemplos	Tratamiento en modelos estadísticos
Continuos	Valores numéricos que pueden variar en un rango continuo	Pendiente, elevación, TWI, distancia a fallas	Se pueden usar directamente; permiten análisis de regresión
Categóricos	Variables que representan clases o grupos sin orden numérico inherente	Litología, uso del suelo, tipo de roca	A menudo se codifican (p. ej., one-hot encoding) o se convierten a continuos



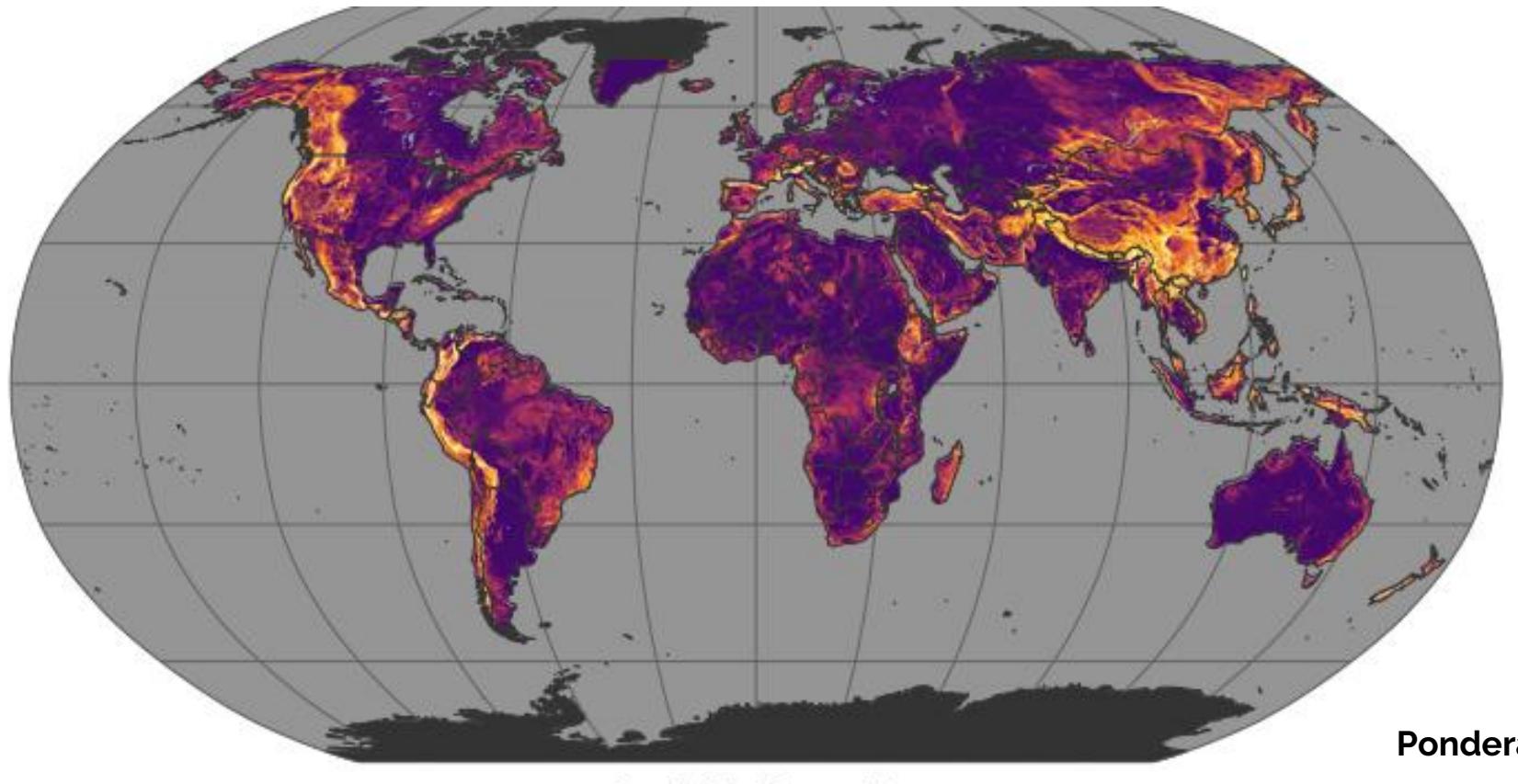
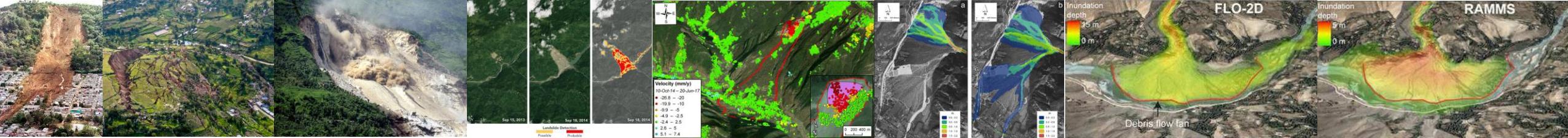
Can take any value in range

E.g., Slope, Soil Moisture, Rainfall Intensity



Values are classified

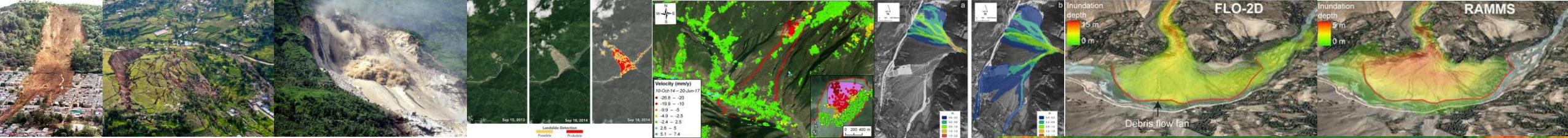
E.g., Land use type, lithology



Available for download at:
<https://pmm.nasa.gov/applications/global-landslide-model>

Ponderación Heurística de Factores de Entrada

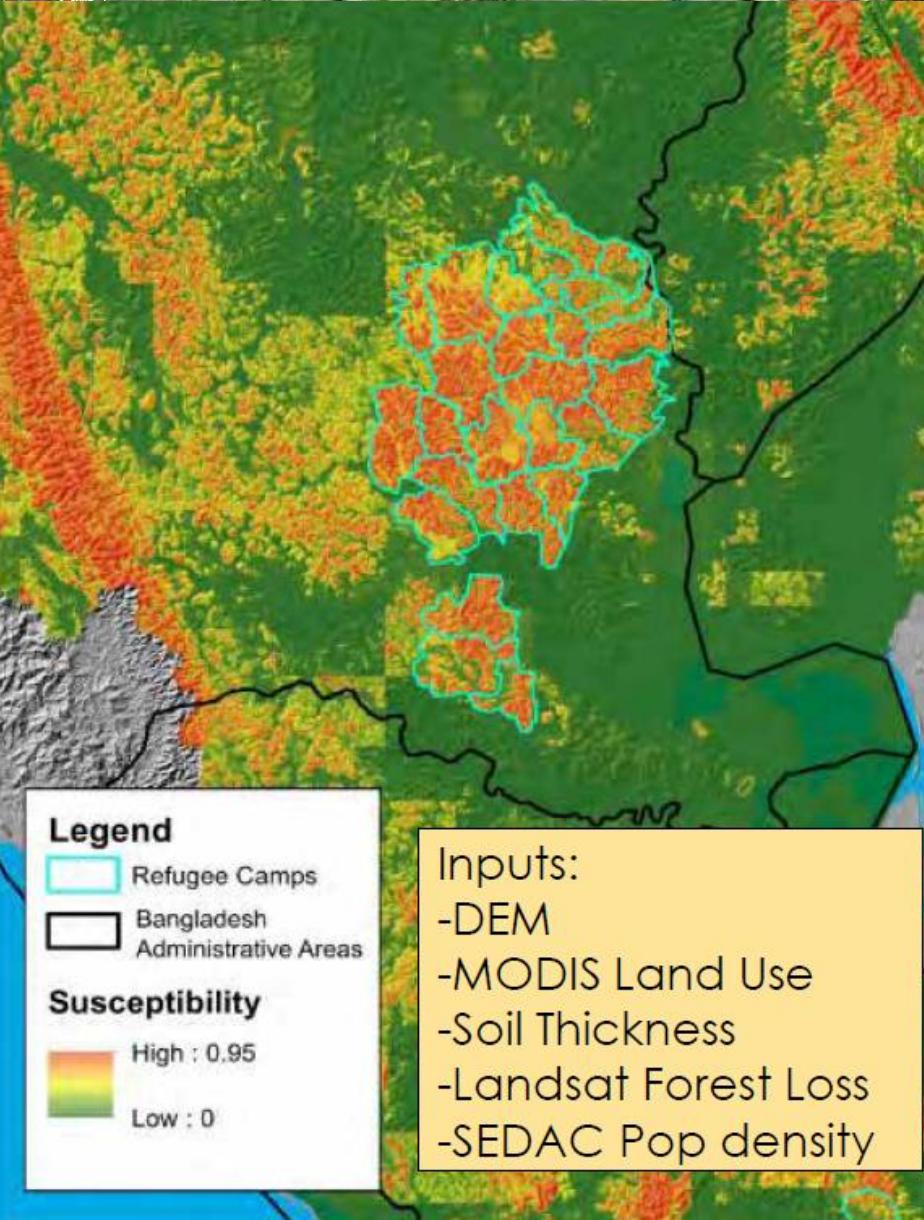
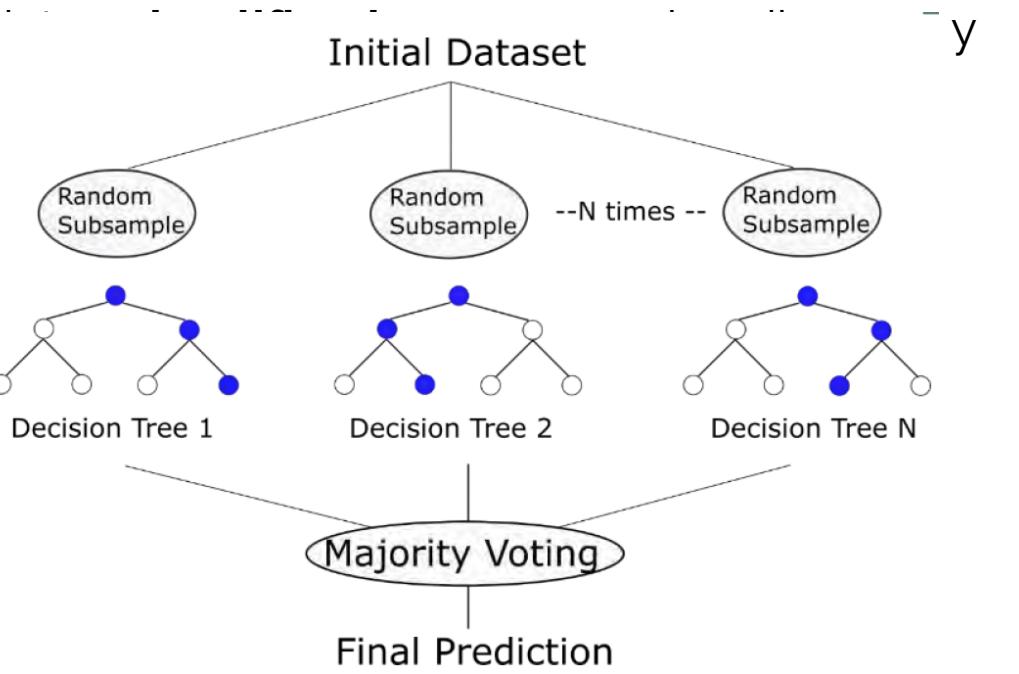
Es un método en el que los factores que influyen en la susceptibilidad a deslizamientos (como pendiente, litología, uso del suelo, etc.) se **ponderan manualmente** con base en el **conocimiento experto**, experiencia previa o literatura científica.

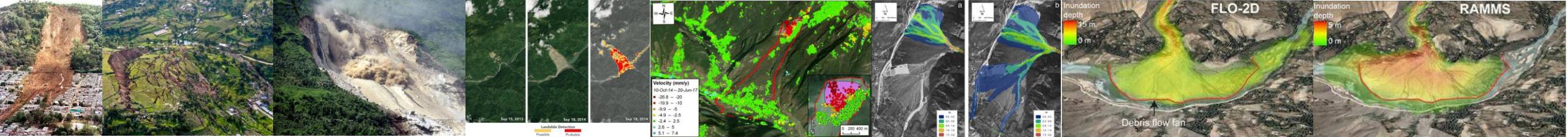


Ejemplo Local / Regional

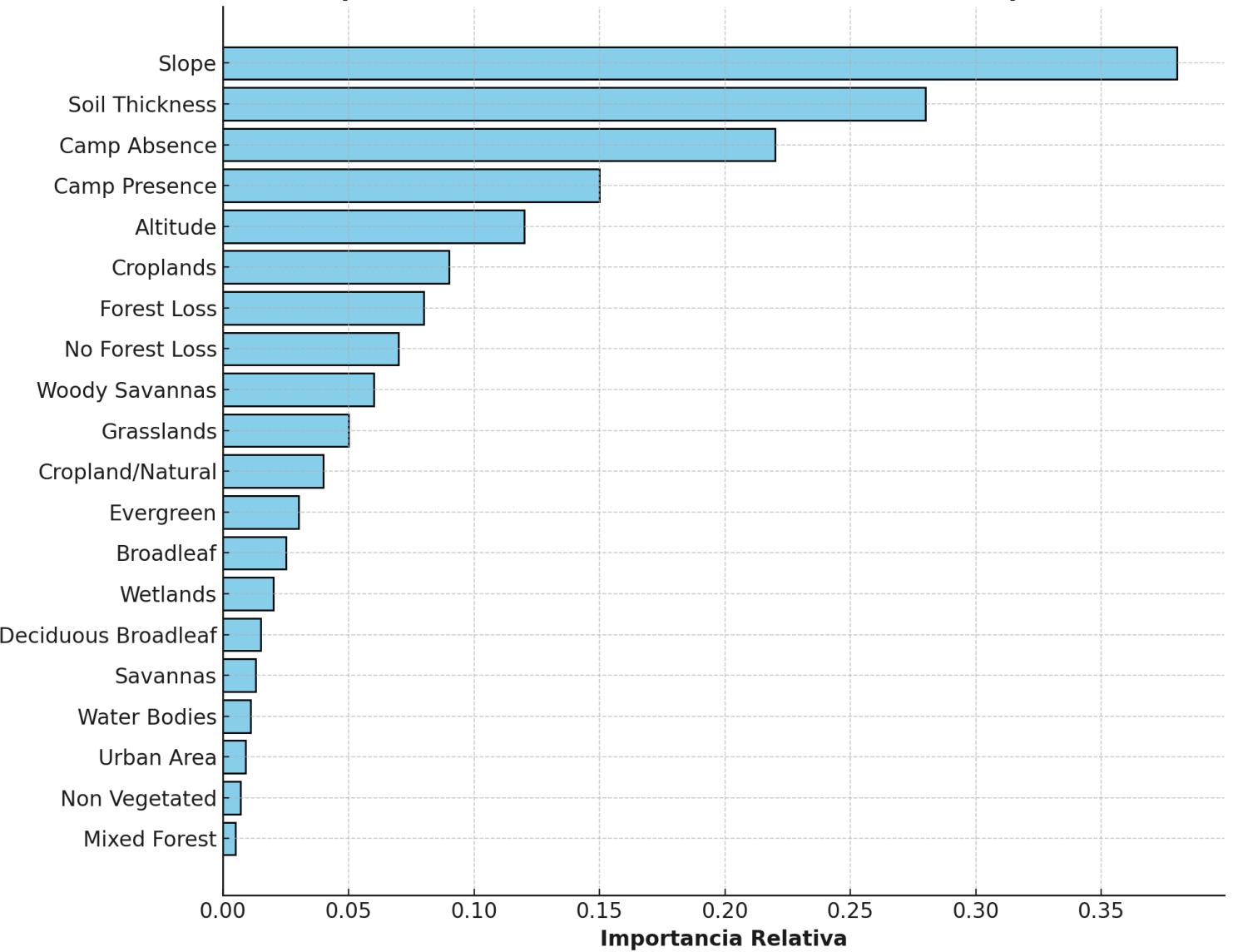
Modelo de datos de **código abierto** desarrollado por **la NASA**

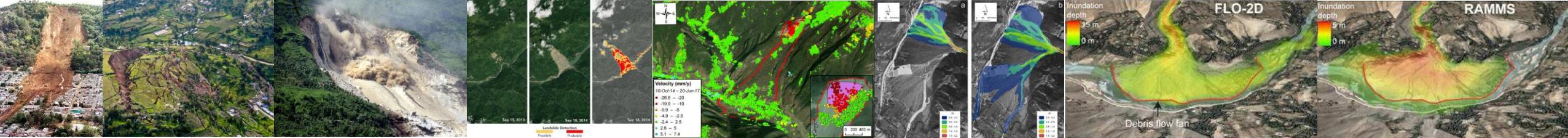
- El **mapa de susceptibilidad** se genera utilizando un modelo de **bosque aleatorio (random forest)**
- Es **independiente del tipo y fuente de datos de entrada**
- Procesamiento de no especializados





Importancia de los Factores en el Modelo de Susceptibilidad





Evaluación del Desempeño

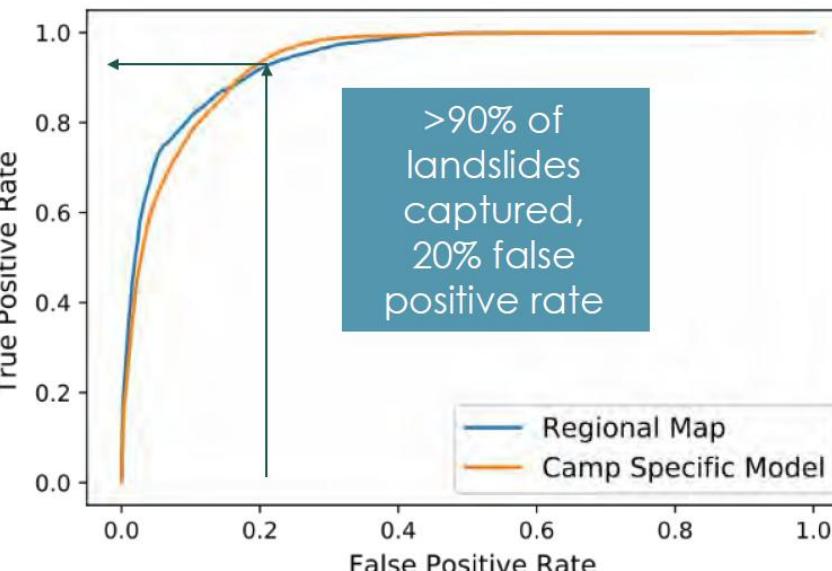
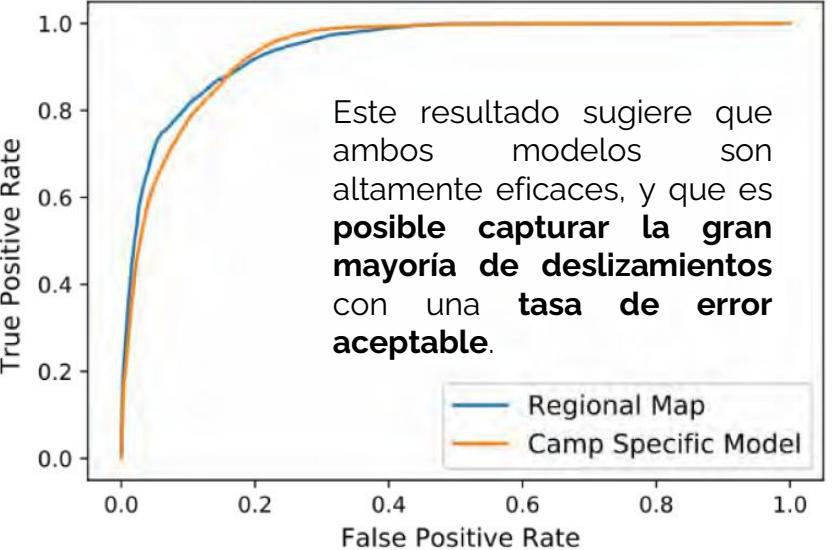
- Variedad de métodos utilizados para determinar la **precisión del modelo**.
- Los datos de entrenamiento de deslizamientos son un **factor determinante clave**.
- El conjunto de datos de "prueba" debería ser **idealmente independiente**.
- Las **curvas ROC (Receiver Operating Characteristic)** se usan ampliamente.
- Las curvas ROC también pueden utilizarse para **establecer umbrales de clasificación**

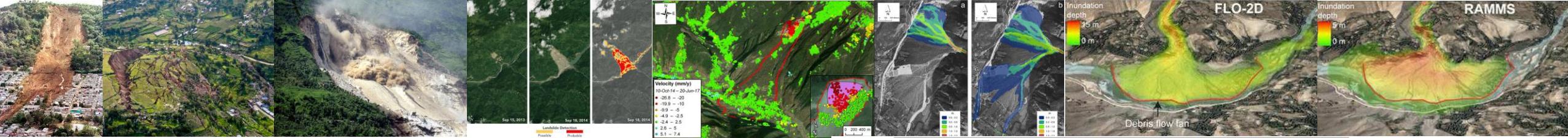
>90% of landslides captured

→ El modelo logra identificar **más del 90% de los deslizamientos reales** (alta tasa de verdaderos positivos).

20% false positive rate

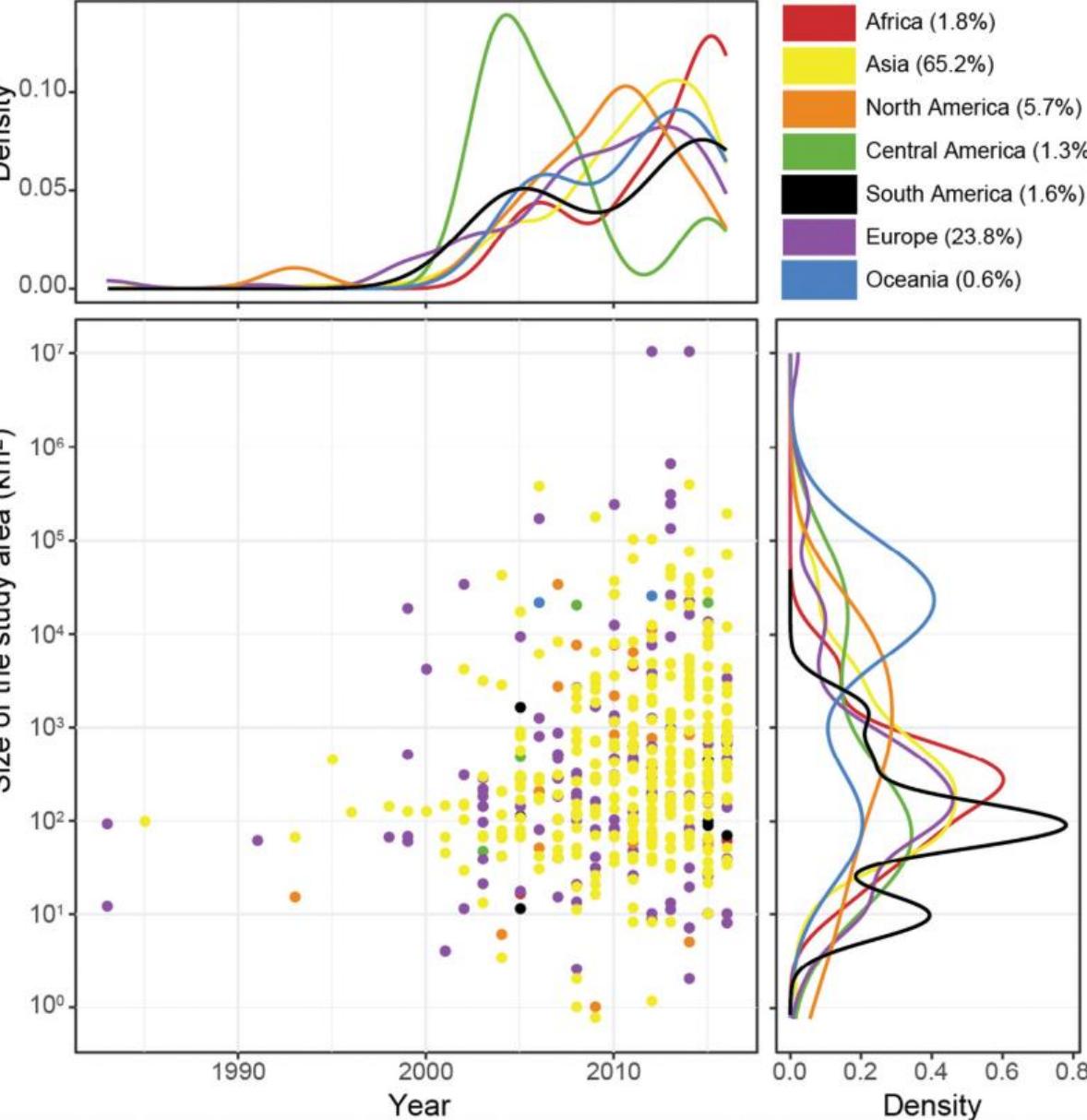
→ A cambio, comete un **20% de falsos positivos**: zonas predichas como susceptibles donde no ocurrieron deslizamientos.

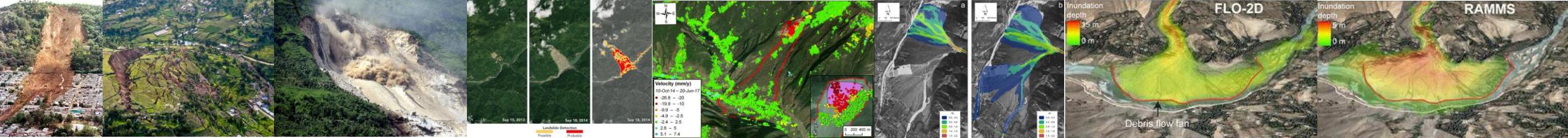




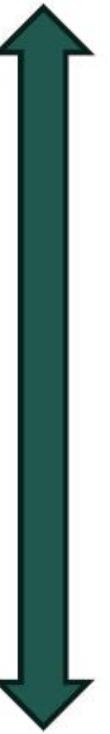
¿Escala Regional Ampliada?

- La mayoría de los modelos estadísticos de susceptibilidad cubren áreas de **10 a 1000 km²**.
- A gran escala regional, es un desafío obtener **inventarios completos de deslizamientos**.
- Los inventarios a escala global dependen típicamente de **datos incompletos**, y esto debe ser considerado con cuidado en los análisis.

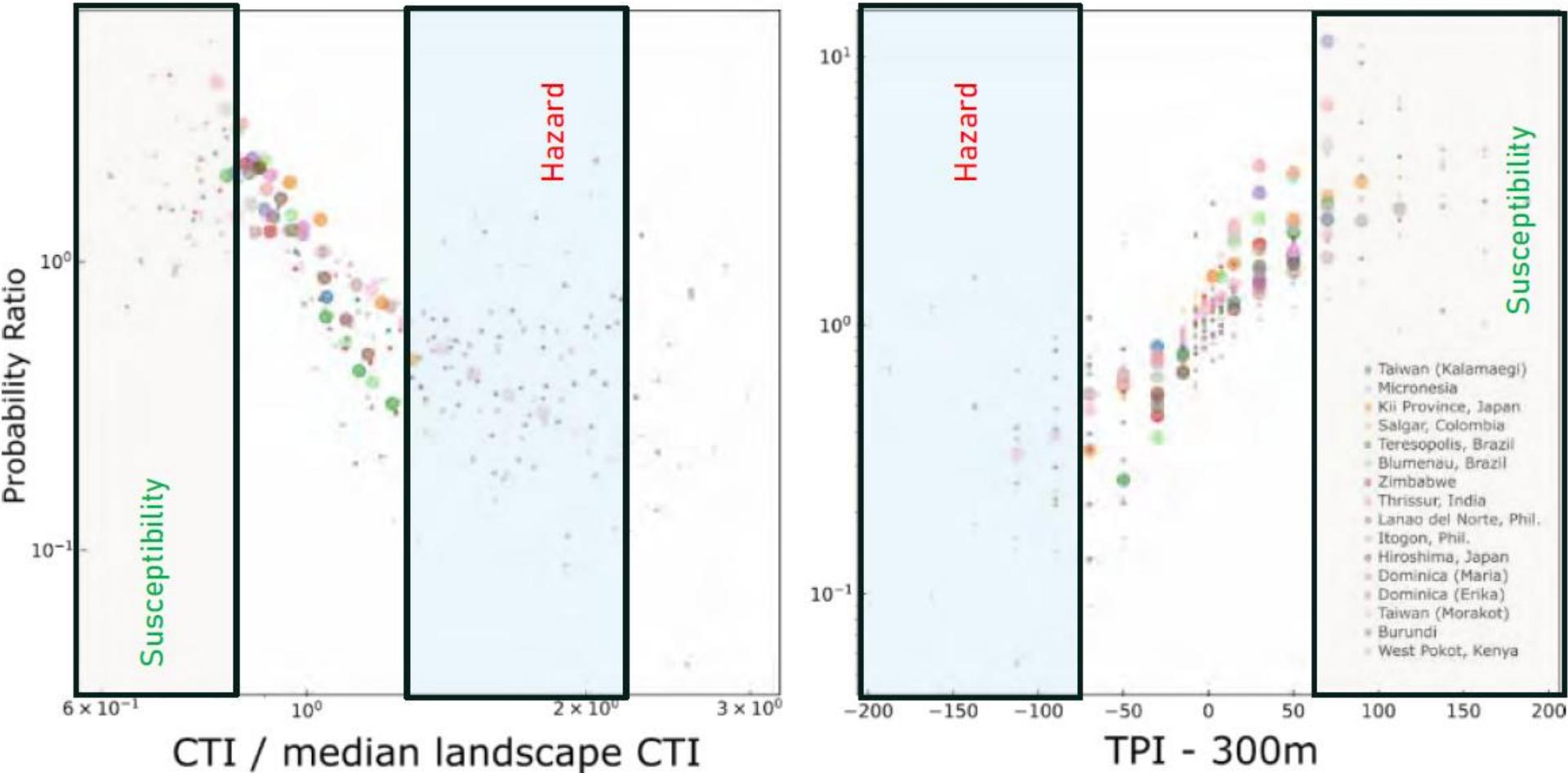




Scars more likely



Deposits more likely



Este análisis multivariado permite **diferenciar zonas de origen de deslizamientos y zonas de depósito**, utilizando métricas topográficas normalizadas. Es fundamental para diseñar mapas de **susceptibilidad y peligro** más precisos.

