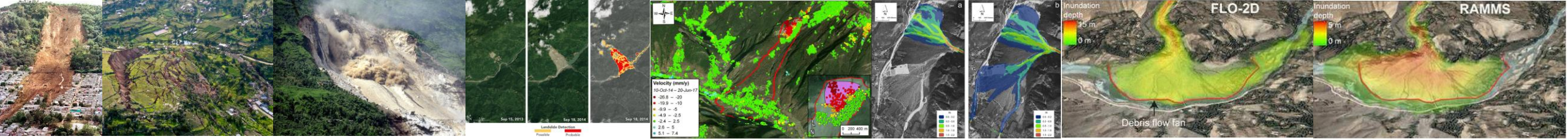


Unidad 4. Curso de Corrección de Torrentes

Mapeo de la Ocurrencia de Deslizamientos Usando Observaciones de la Tierra

Objetivos:

1. Seleccionar datos satelitales y modelos apropiados para apoyar la ciencia de los deslizamientos y la preparación ante desastres asociados con deslizamientos.
2. Reconocer cómo mapear las zonas donde han ocurrido deslizamientos utilizando datos ópticos y de radar, y comprender cómo se pueden usar herramientas automatizadas para este propósito.



Mapeo de Deslizamientos Usando Datos Satelitales

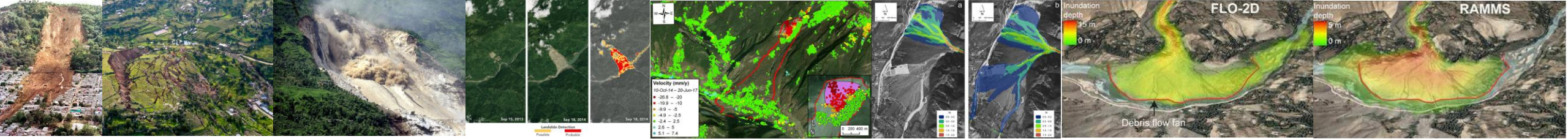
¿Ha ocurrido un deslizamiento en tu área de interés? ¿Qué se necesita para el mapeo usando datos satelitales?

- Imágenes posteriores al evento, lo más cercanas posible al momento en que ocurrió; las imágenes previas al evento también son útiles.

Es importante asegurarse de que estén georreferenciadas.

- Sistema de software SIG (Sistema de Información Geográfica).
- Datos auxiliares adicionales que a veces pueden ser útiles.





¿Qué caracteriza a los eventos de deslizamiento?

- El movimiento rápido y a menudo devastador de material ladera abajo suele crear cambios de superficie altamente visibles.
- Los impactos en los sistemas humanos pueden ser evidentes.

Razones por las que los impactos pueden ser evidentes:

- **Infraestructura destruida:** Carreteras, puentes, viviendas o líneas eléctricas pueden quedar sepultadas, arrasadas o gravemente dañadas.
- **Cambios abruptos en el uso del suelo:** Zonas agrícolas o urbanas pueden desaparecer o quedar inutilizables.
- **Desplazamiento de personas:** Las familias pueden perder sus hogares y ser evacuadas, lo cual genera alteraciones sociales y económicas.
- **Interrupción de servicios:** El transporte, suministro de agua o energía puede verse afectado.
- **Heridos o pérdidas humanas:** Cuando el evento es severo, las pérdidas humanas son parte visible del impacto.

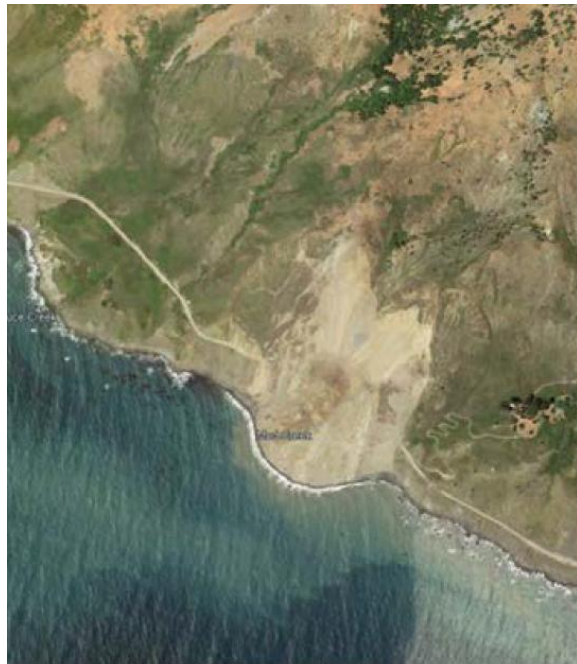


Rockfall in Oregon, USA. Source: Oregon DOT



¿Qué caracteriza a los eventos de deslizamiento?

- La capacidad de traducir observaciones bidimensionales desde órbita en una comprensión de lo que esto podría significar en tierra es una habilidad crítica que se debe desarrollar.

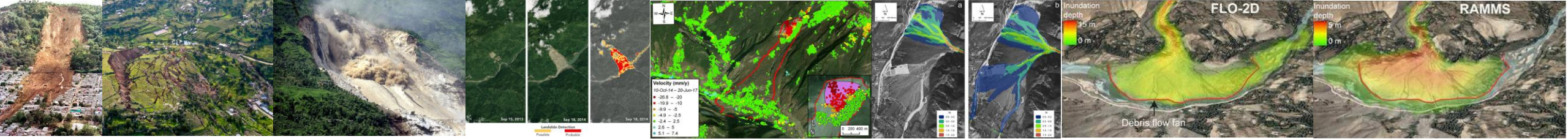


Big Sur Landslide (California, USA).
Source: Google Earth Imagery



Big Sur Landslide (California, USA). Source: John Madonna, AP

Desde los satélites, las imágenes que recibimos son bidimensionales (planas), como una vista desde arriba. Pero los procesos como deslizamientos de tierra ocurren en un entorno tridimensional, con relieve, volumen y profundidad. Por eso, es fundamental desarrollar la habilidad de interpretar esos datos 2D (como imágenes ópticas o radar) para entender realmente qué está pasando en el terreno: si hay daño, si el suelo se desplazó, si una comunidad fue afectada, etc.

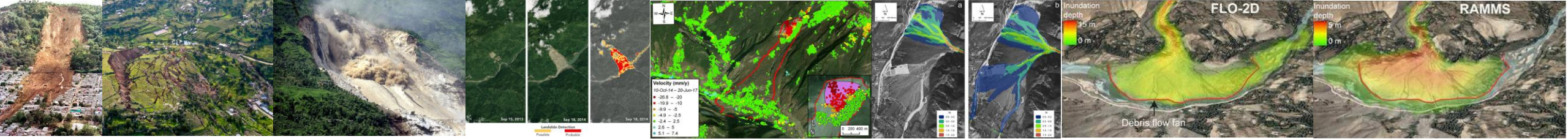


Delimitación de Deslizamientos de Tierra

- Una vez que hayas identificado un deslizamiento en una imagen satelital, el siguiente paso es registrar la ubicación.
- Las herramientas SIG, incluyendo Esri, Google Earth y sistemas de código abierto, permiten dibujar formas alrededor de las áreas.
- Esto produce un polígono que delimita la ubicación del deslizamiento.
- Múltiples deslizamientos pueden combinarse en un archivo shapefile multipolígono o en una geodatabase.

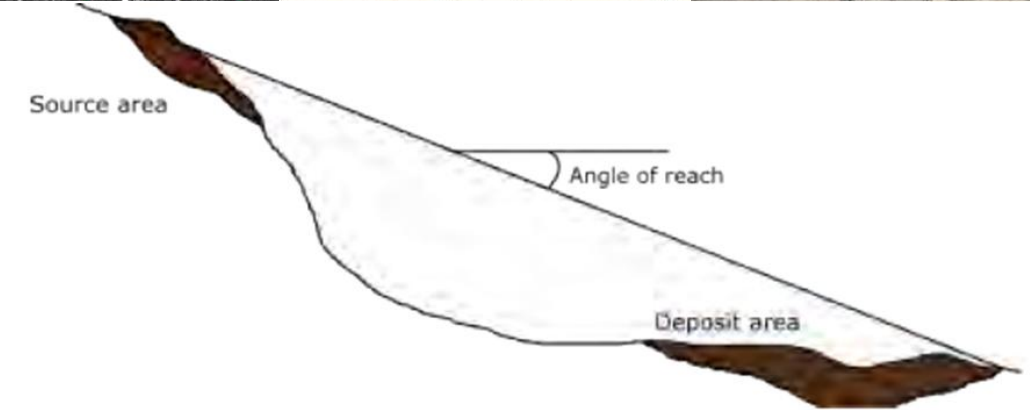


Landslide in British Columbia, Canada. Source: Planet Imagery



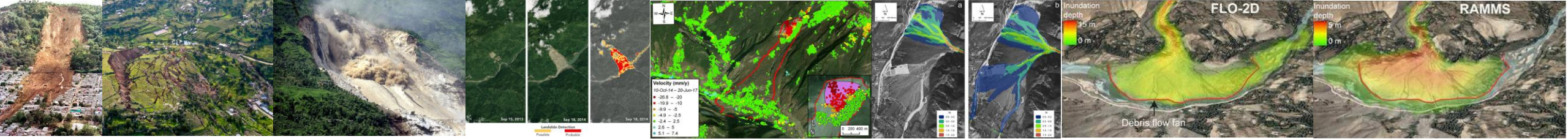
Zonas de origen y de recorrido.

- La cartografía simplificada puede combinar el área fuente (o escarpe principal) de un deslizamiento con las zonas de recorrido y depósito.
- Diferenciar estas zonas es importante para el análisis comparativo de susceptibilidad y amenaza.
- Definir manualmente las zonas de origen y depósito a veces es posible mediante imágenes satelitales si están separadas, pero generalizar este proceso puede ser difícil.



Kaikoura Landslide, NZ. Credit: GNS Science

"ángulo de fricción equivalente" o "ángulo de trayectoria", y se refiere al ángulo entre la cima del deslizamiento (zona fuente) y el punto más bajo alcanzado por el material movilizado (zona de depósito), medido respecto a la horizontal.



Zonas de origen y de recorrido

- Los eventos con recorridos largos presentan desafíos para la cartografía; típicamente, el recorrido hacia ríos y quebradas no se mapea.



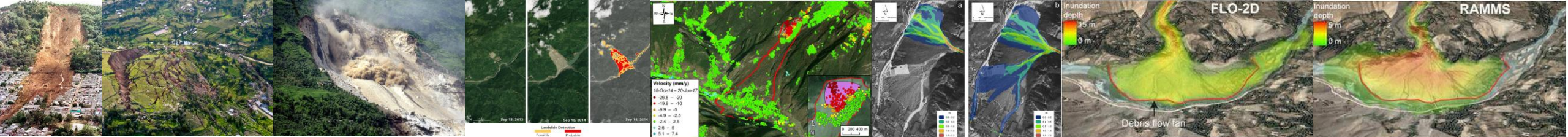
Landslides in Southern Taiwan.
Source: Google Earth



- Algunas reglas geométricas simplificadas pueden ayudar a determinar el área relativa de las zonas fuente de deslizamientos.
- Utilizando el perímetro y el área (A) de un deslizamiento, podemos calcular la elipse equivalente y su relación de aspecto (K), y obtener el ancho asociado (W) de la siguiente manera:

$$W \approx \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

- Con base en conjuntos de datos globales, el área de la cicatriz del deslizamiento es aproximadamente $1,5 W^2$

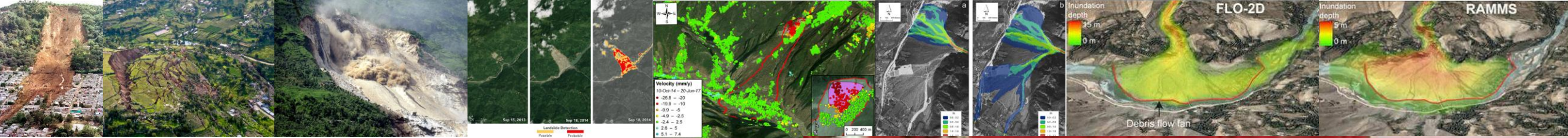


- Cuando ocurre un deslizamiento de tierra, deja una zona afectada que llamamos **área fuente** o **cicatriz**. Esta área tiene una forma irregular, pero para hacer análisis más simples, muchas veces se aproxima con una **forma geométrica conocida**, como una **elipse**.
- Se busca estimar el ancho característico del área del deslizamiento. Para ello, se usa una fórmula basada en el área total del deslizamiento. Suponiendo que la forma de la cicatriz es similar a una elipse, se usa la siguiente fórmula:

$$W \approx \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

- Esta fórmula da una estimación del ancho promedio (W) de la elipse equivalente. Es una forma de simplificar la geometría real para poder compararla, analizarla o modelarla.
- Una vez calculado el ancho W , los estudios globales han observado que la **superficie real de la cicatriz del deslizamiento** suele ser aproximadamente:

$A \approx 1,5 W^2$ Esto significa que, en promedio, la **forma real del deslizamiento no es un círculo perfecto ni una elipse regular**, sino algo más **alargado o complejo**, lo que hace que el área real sea un poco **mayor** que la de una elipse ideal basada en **W** .



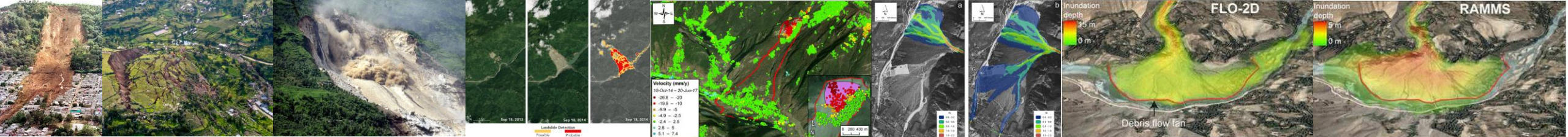
Imágenes en falso color

- Los deslizamientos de tierra que dejan al descubierto la roca madre pueden ser más visibles utilizando diferentes combinaciones de bandas de imágenes ópticas.
- El cambio en la vegetación suele utilizarse, ya que con frecuencia es más sensible a las alteraciones en la superficie.
- La combinación de bandas para el NDVI muestra cambios claros en zonas afectadas por deslizamientos, como por ejemplo en Taiwán.

Un **typhoon** (tifón, en español) es un tipo de **ciclón tropical** que se forma en el **océano Pacífico noroccidental**, especialmente entre el este de Asia (China, Japón, Filipinas, Taiwán) y el sudeste asiático. Es el mismo fenómeno que en otras regiones se conoce como:

- **Huracán**, en el Atlántico norte y el Pacífico nororiental
- **Ciclón**, en el océano Índico y el Pacífico sur





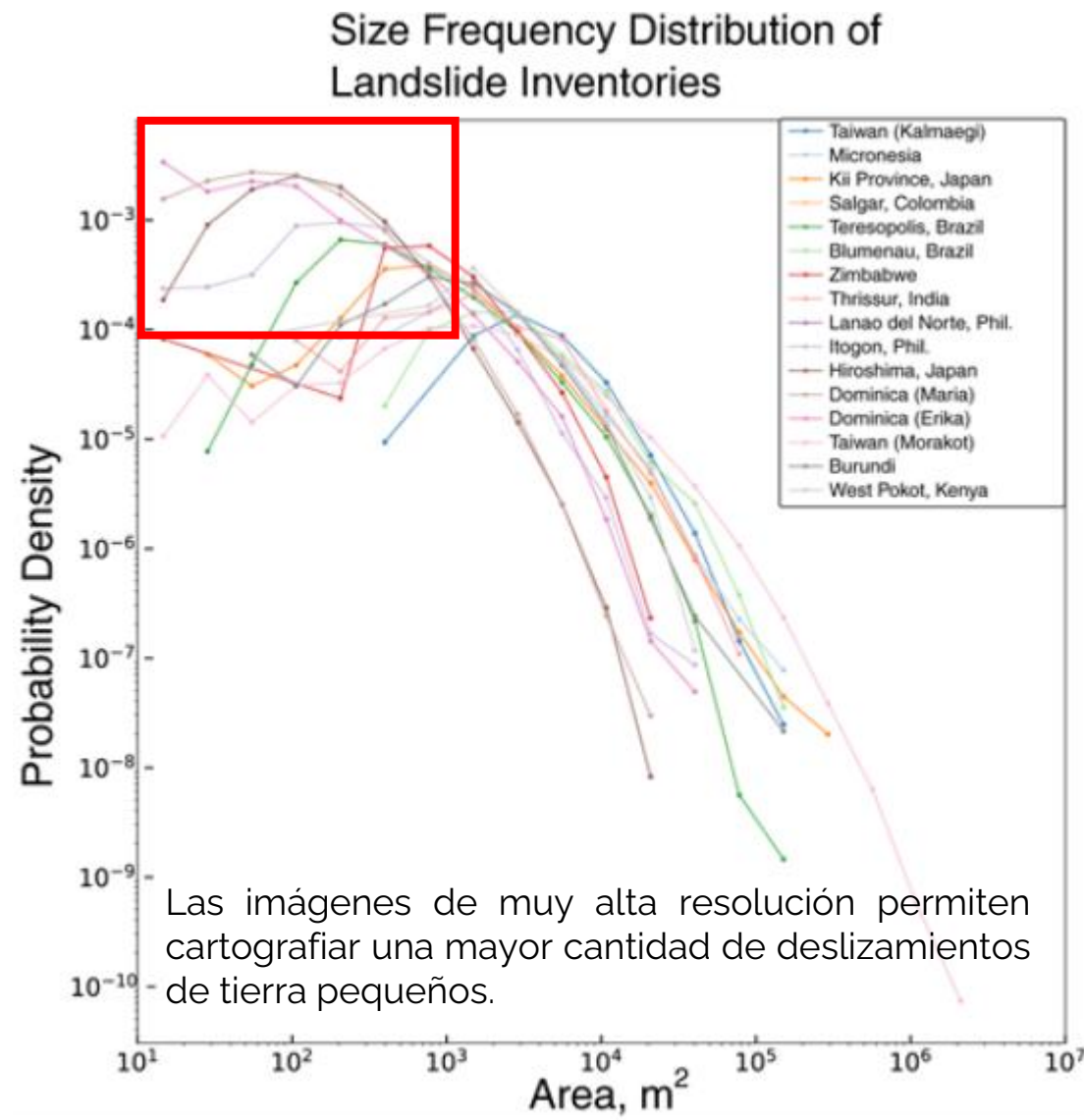
Resolución de la imagen

- El número y el tamaño de los deslizamientos de tierra que pueden observarse dependen en gran medida de la resolución de las imágenes disponibles.
- Un análisis de múltiples inventarios de deslizamientos muestra la distribución del área de los deslizamientos.
- Los inventarios elaborados utilizando imágenes comerciales de muy alta resolución incluyen una proporción significativamente mayor de deslizamientos pequeños.

• La resolución de la imagen satelital o aérea influye directamente en el número y tamaño de deslizamientos detectables.

• Inventarios con imágenes de muy alta resolución tienden a registrar más deslizamientos pequeños, lo cual es clave para estudios de riesgo, erosión, y monitoreo

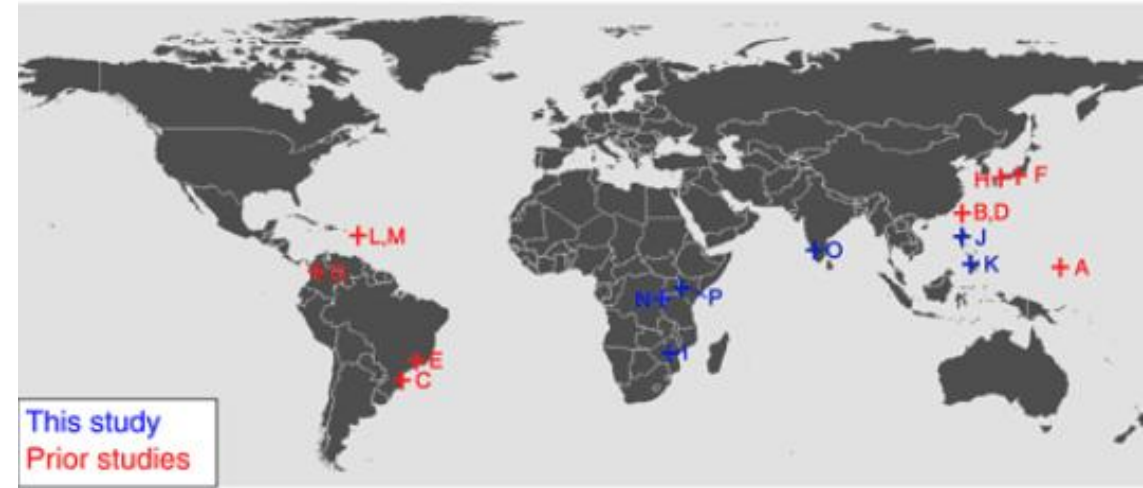
Distribución tamaño-frecuencia de inventarios de deslizamientos de tierra



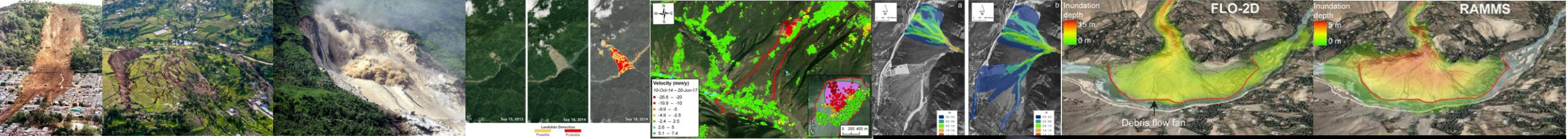


Insights from the topographic characteristics of a large global catalog of rainfall-induced landslide event inventories

Robert Emberson [✉](#), Dalia B. Kirschbaum, Pukar Amatya, Hakan Tanyas, and Odin Marc

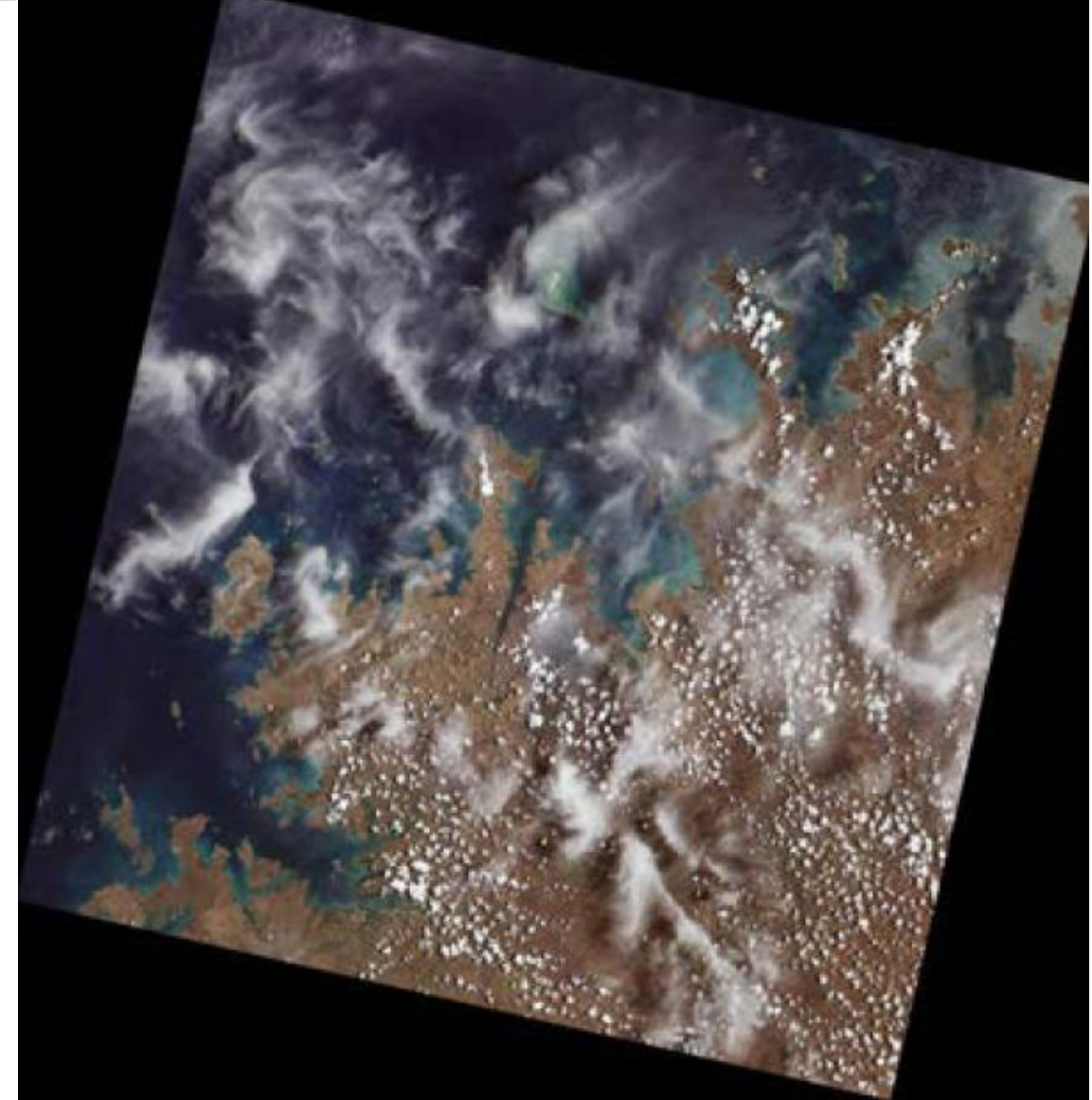


"Perspectivas a partir de las características topográficas de un gran catálogo mundial de inventarios de eventos de deslizamientos de tierra inducidos por la lluvia

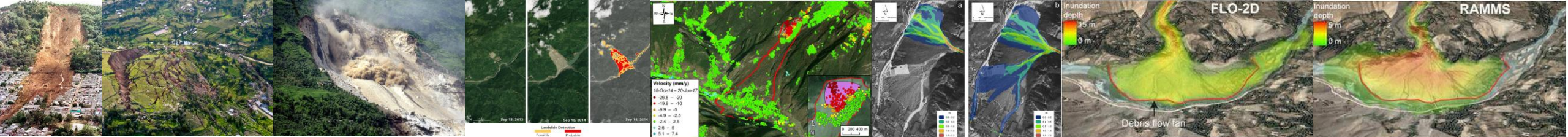


Cobertura nubosa

- Las nubes son un factor significativo para las imágenes ópticas.
- Estas pueden enmascarar fuertemente las áreas donde ocurren deslizamientos.
- Se prefiere buscar imágenes libres de nubes para la cartografía.
- Si esto no está disponible, es importante proporcionar polígonos que delimiten la ubicación de las nubes en el inventario asociado, para aclarar la extensión total del área cartografiada.



Landsat 9 OLI-2 image of clouds over Northern Australia.



Metadatos Relevantes

¿Qué se necesita típicamente como datos asociados para un conjunto de datos de deslizamientos cartografiados?

- Ubicación
- Posible evento detonante
- Fecha(s) de las imágenes (crítico para determinar si los deslizamientos incluyen eventos históricos)
- Fuente de las imágenes (tipo de sensor, resolución)
- Método de cartografía (puntos, polígonos, manual o automático)
- Persona que realizó la cartografía
- Publicaciones asociadas
- Extensión del área cartografiada (incluyendo cobertura nubosa)
- Tipo de deslizamiento (caída de rocas, avalancha de escombros, etc.)



Deslizamientos nuevos o históricos

- Después de un deslizamiento inicial, puede ocurrir revegetación durante un período de años o incluso décadas.
- Los deslizamientos antiguos pueden volverse invisibles como cicatrices claras en imágenes ópticas después de la revegetación.
- La reactivación de grandes deslizamientos es común.
- Los **inventarios de deslizamientos multitemporales** pueden ofrecer un análisis a más largo plazo.



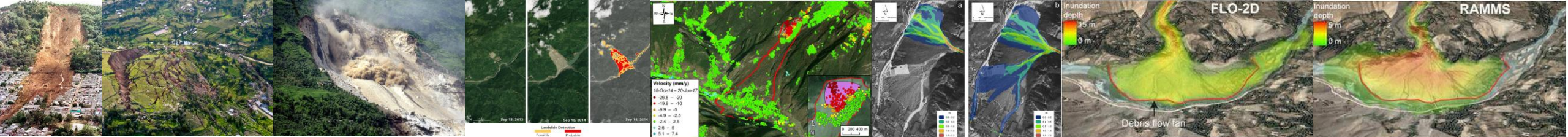
Landslides in Southern Taiwan—event occurred in 2009; left image 2011, right image 2024



¿Cómo funciona la cartografía automatizada de deslizamientos?

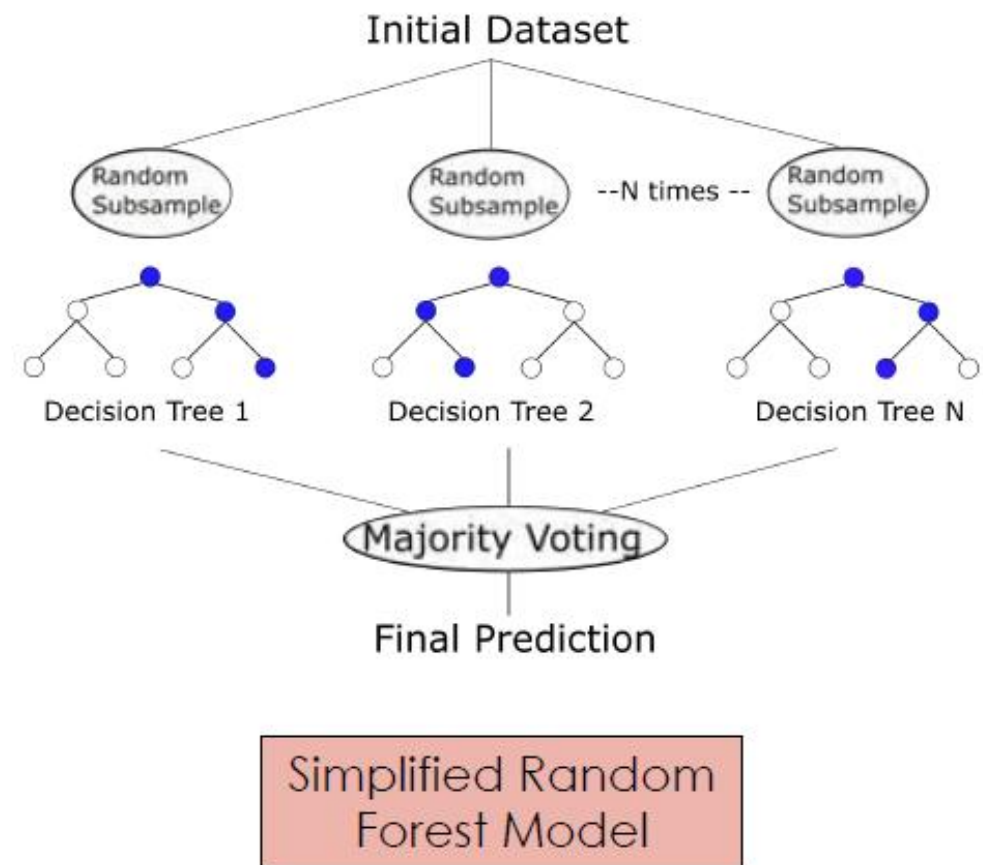
- En algunas zonas, un solo evento de lluvia puede desencadenar miles de deslizamientos.
- La cartografía manual de estos eventos consume mucho tiempo, por lo que los investigadores han buscado métodos automáticos para simplificar el proceso.
- Los métodos automáticos aprovechan los cambios típicos en la textura, el color y las propiedades espectrales de las áreas recientemente perturbadas.
- Existen dos enfoques clave: basado en píxeles y basado en objetos.
- La amalgamación es un problema clave.

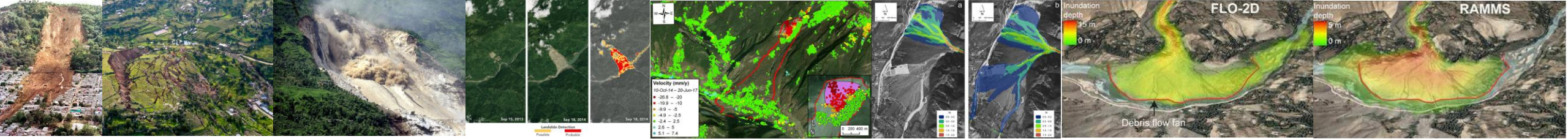




¿Cómo funciona la cartografía automatizada de deslizamientos?

- Para evaluar los cambios, es necesaria información de entrenamiento sobre deslizamientos. Esta normalmente consiste en deslizamientos cartografiados manualmente.
- La mayoría de los métodos utilizan datos de entrenamiento previos para caracterizar píxeles u objetos que corresponden a zonas con o sin deslizamientos.
- Posteriormente, se puede utilizar una variedad de enfoques basados en regresión, aprendizaje automático o inteligencia artificial para predecir otros píxeles u objetos que coincidan con el tipo de información usada en el entrenamiento, lo cual se genera como una predicción de las ubicaciones probables de deslizamientos.





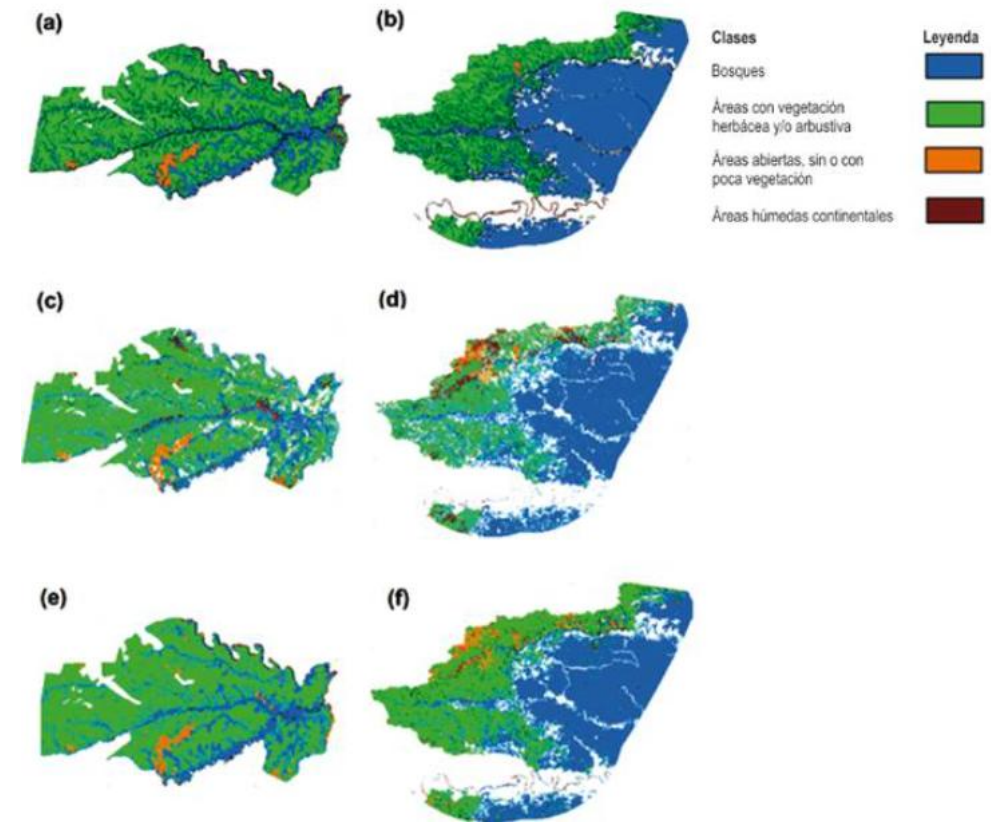
¿Cómo funciona la cartografía automatizada?

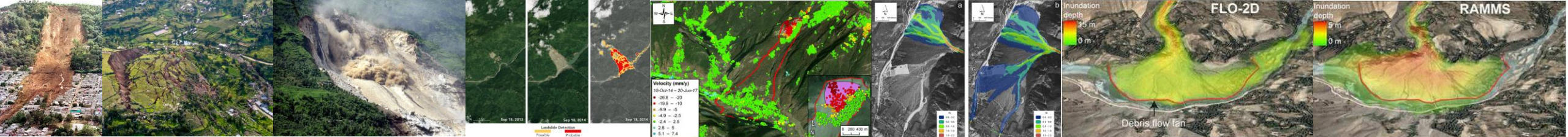
1. Basado en píxeles

- Utiliza información espectral de píxeles individuales
- Sufre del efecto "sal y pimienta" (clasificación dispersa e inconsistente)
- Computacionalmente poco exigente

2. Análisis de imágenes basado en objetos (OBIA)

- Convierte píxeles homogéneos en objetos
- Puede incorporar información espectral, textural, morfológica, geométrica y contextual
- Computacionalmente exigente





Análisis de Imágenes Basado en Objetos (OBIA)

• Dos pasos:

1. Segmentación

- Segmentación multirresolución,
- Segmentación por desplazamiento de media (Mean-Shift),
- Segmentación por líneas divisorias de aguas (Watershed)

2. Clasificación

- Basada en reglas
- Aprendizaje automático (Random Forests, Vector Machine, etc.)

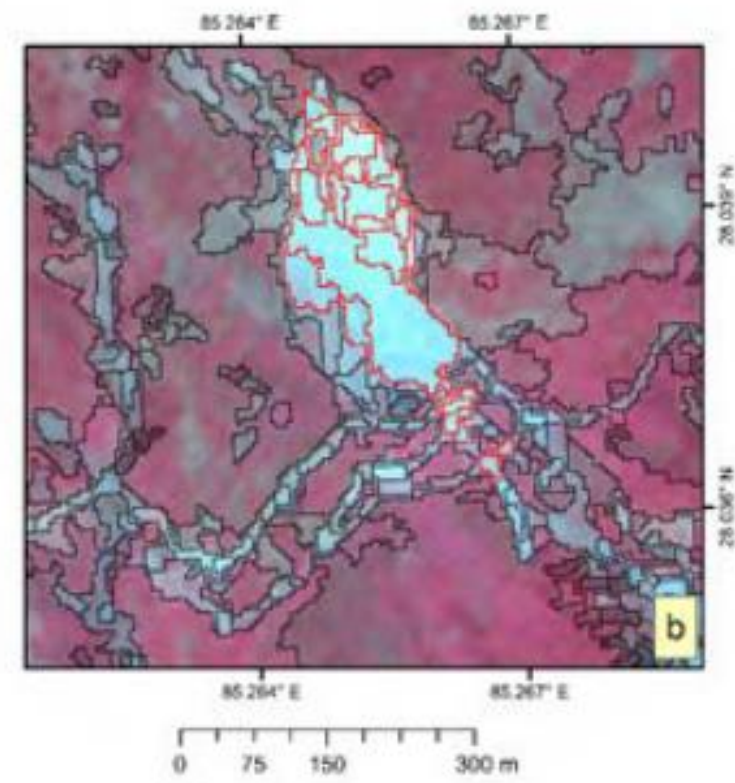
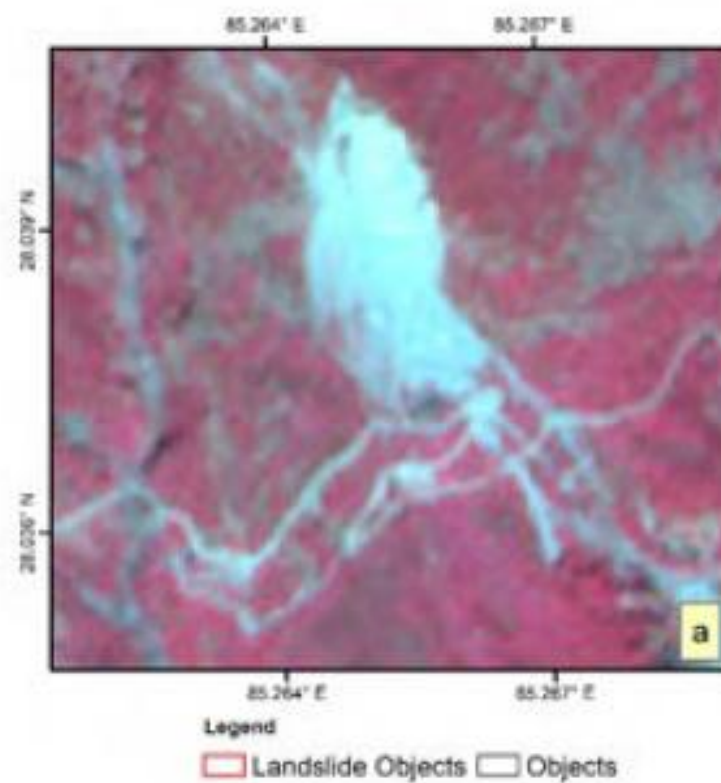
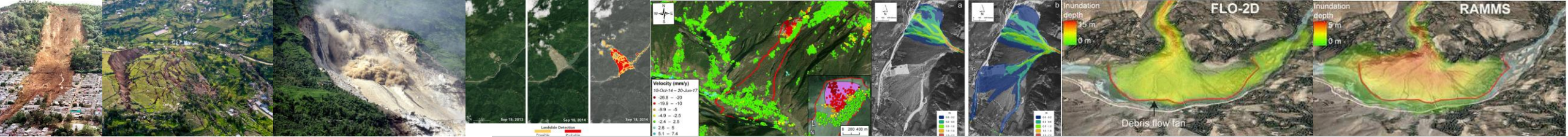


Image ©Planet Labs

Divide la imagen en regiones u "objetos" Divide la imagen en regiones u "objetos" que comparten características similares (color, textura, forma, etc.).



Sistema de Detección Semiautomática de Deslizamientos (SALaD)

Entradas (Azul):

- Imágenes ópticas y *DEM*

Componentes definidos por el usuario (Amarillo):

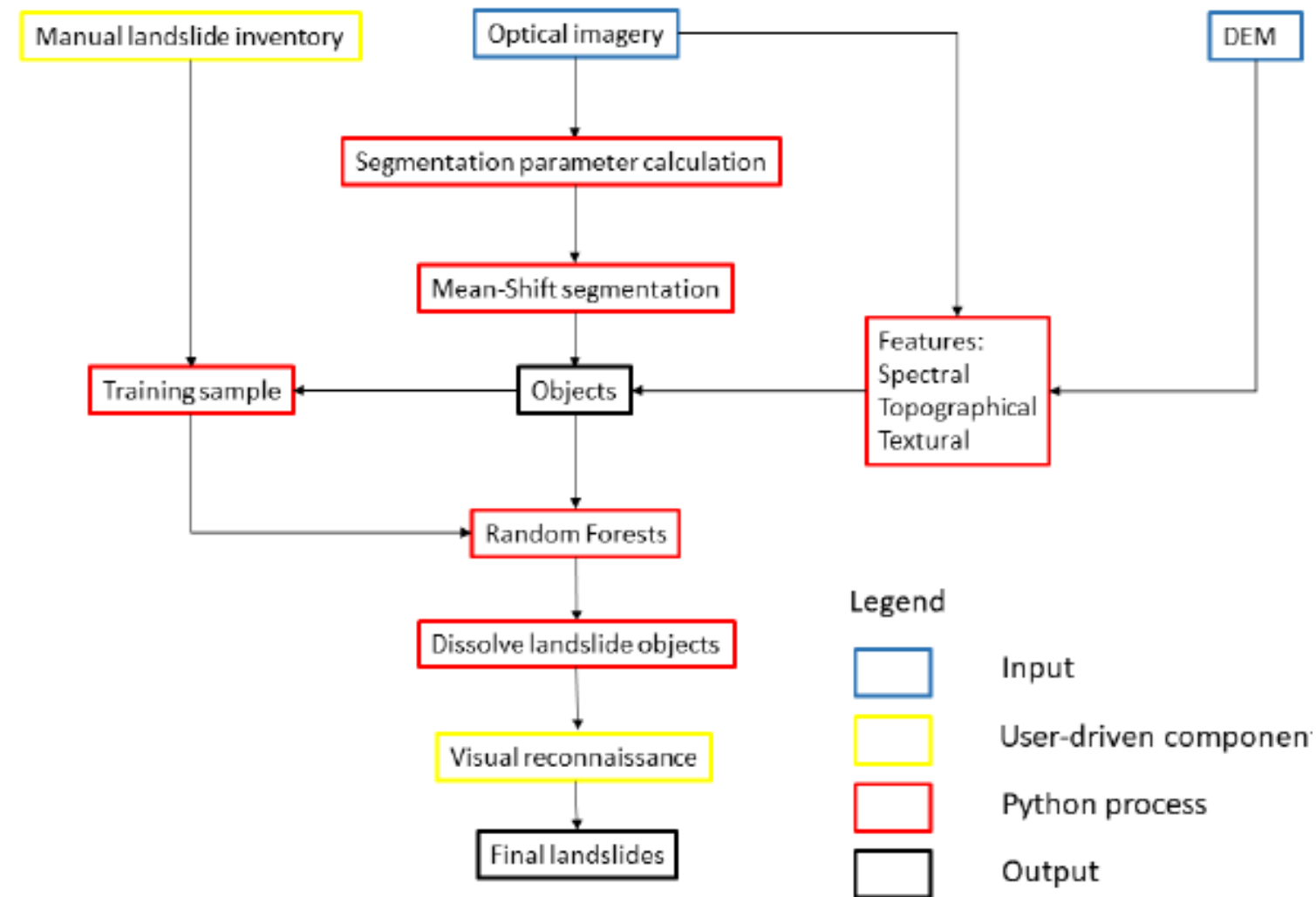
- Inventario manual de deslizamientos
- Reconocimiento visual

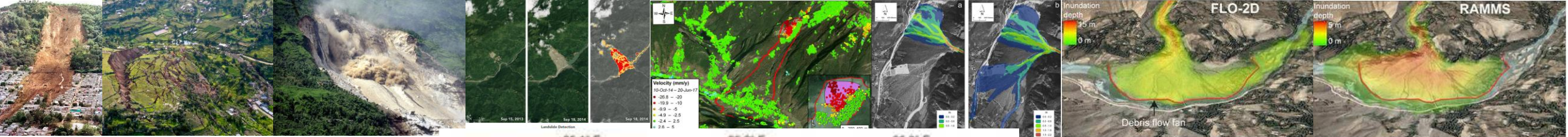
Procesos en Python (Rojo):

- Cálculo de parámetros de segmentación
- Segmentación por desplazamiento de media
- Muestra de entrenamiento Características: espectrales, topográficas, texturales
- Bosques aleatorios → *Random Forests*
- Disolver objetos de deslizamiento

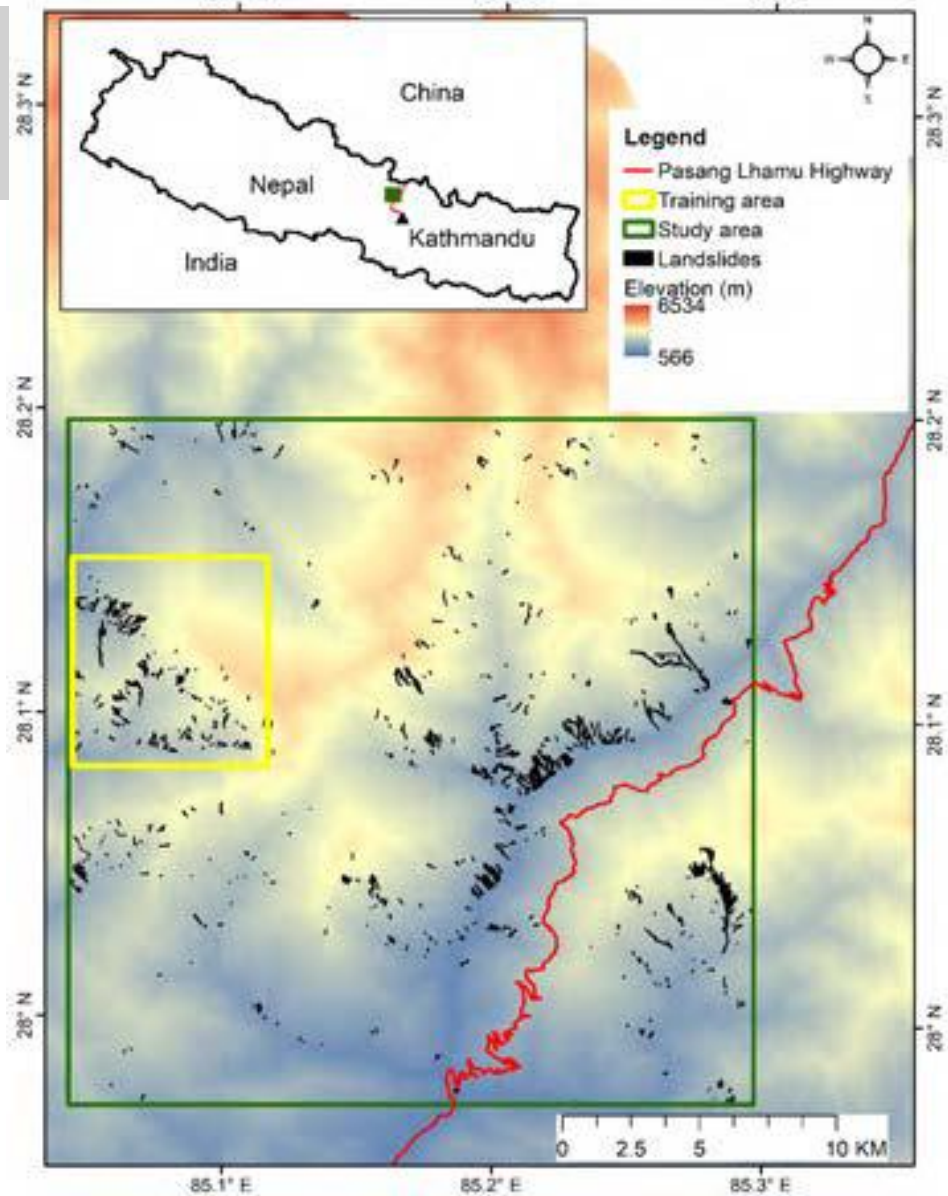
Salidas (Negro):

- Deslizamientos finales → *Final landslides*





Sistema de Detección Semiautomática de Deslizamientos (SALaD)

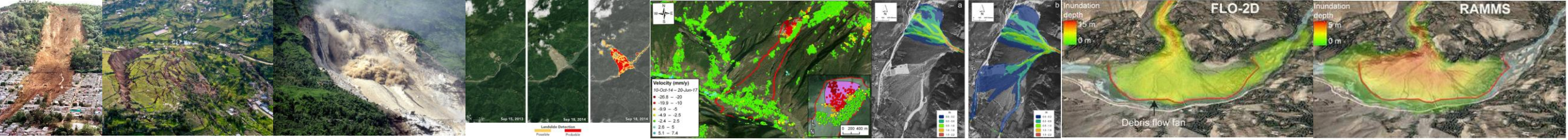


Location: Pasang Lhamu Highway, Nepal

Area = 625 km²

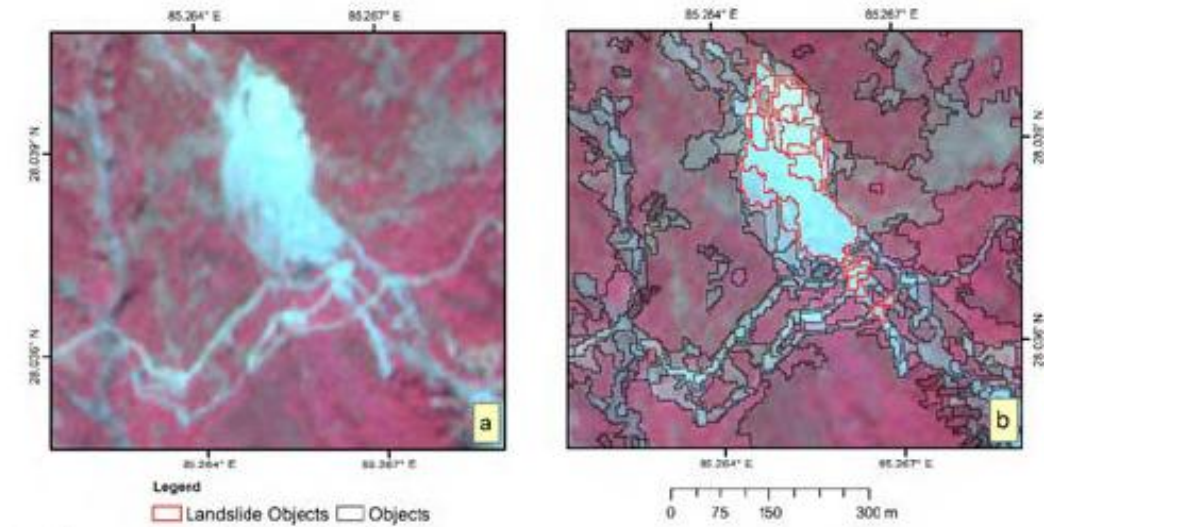
623 landslides manually mapped

Imagery: RapidEye

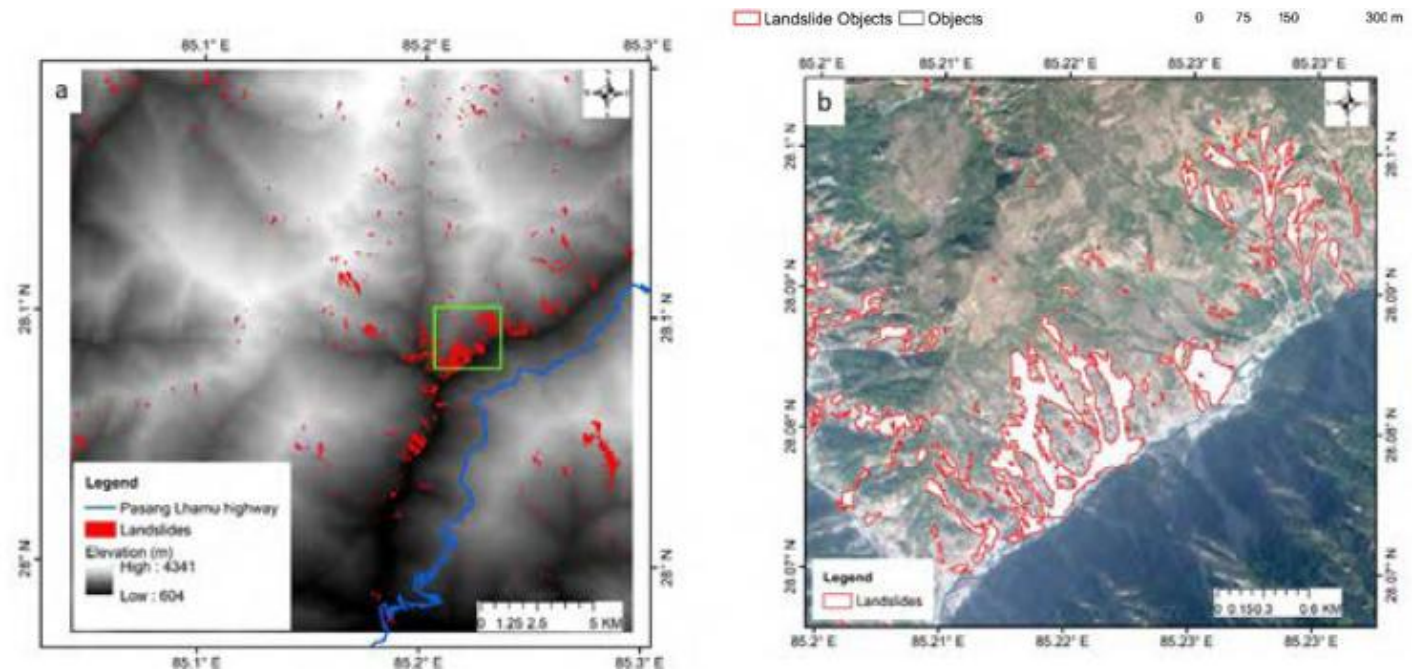


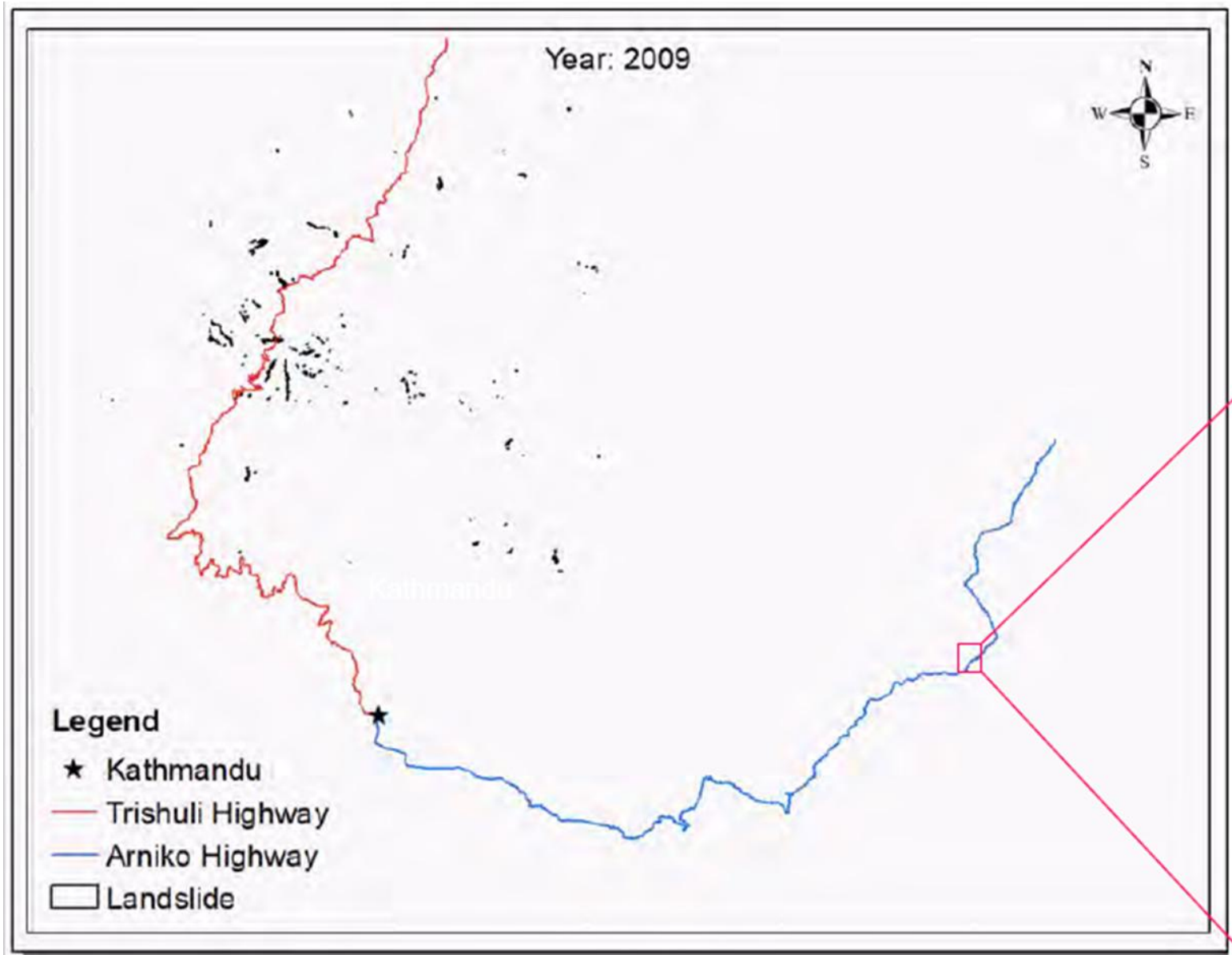
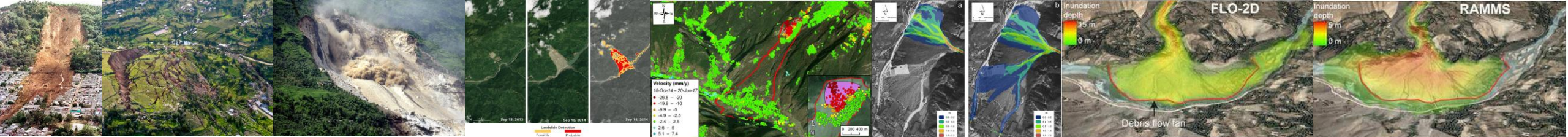
Sistema de Detección Semiautomática de Deslizamientos (SALaD)

Objetos segmentados

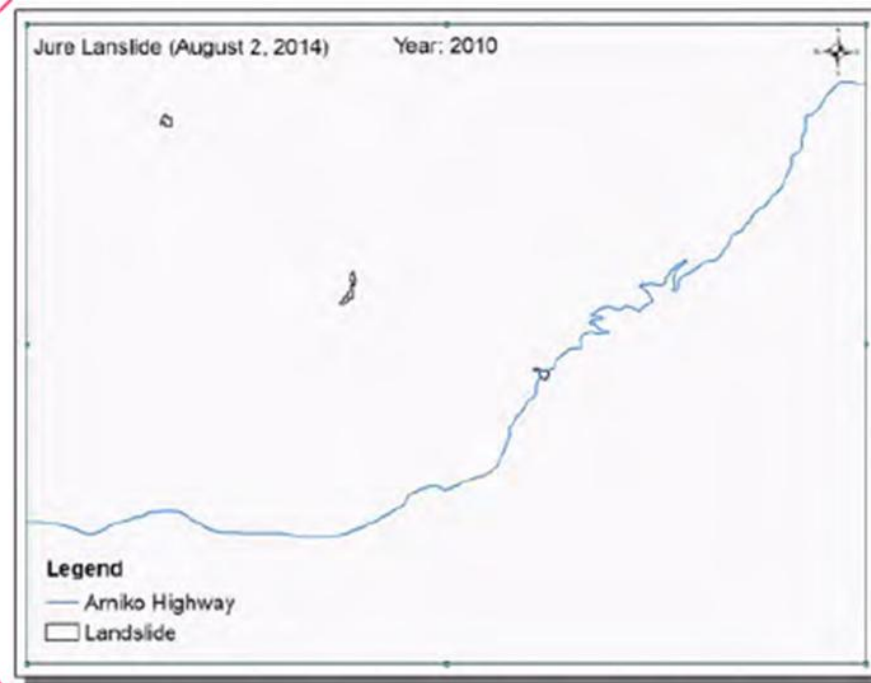


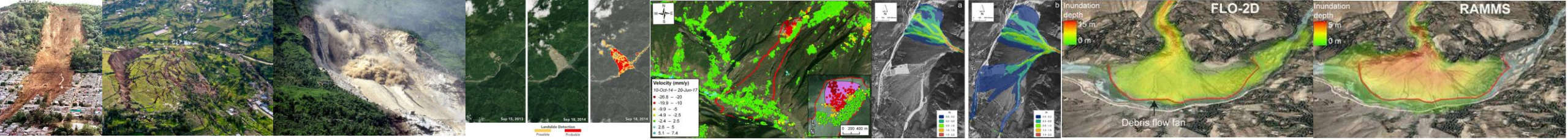
Deslizamientos detectados por SALaD.





Source: Landsat 8





Mapeo automático

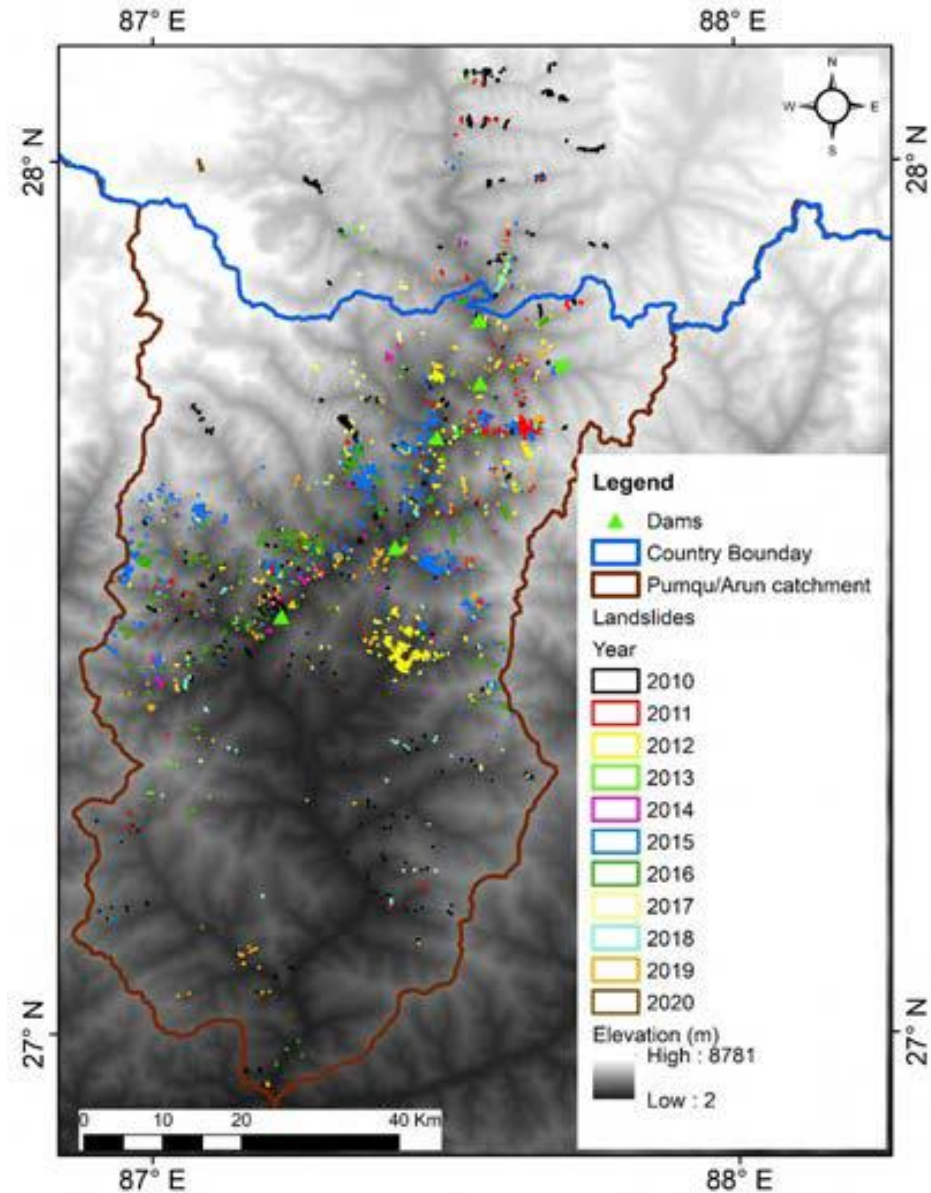


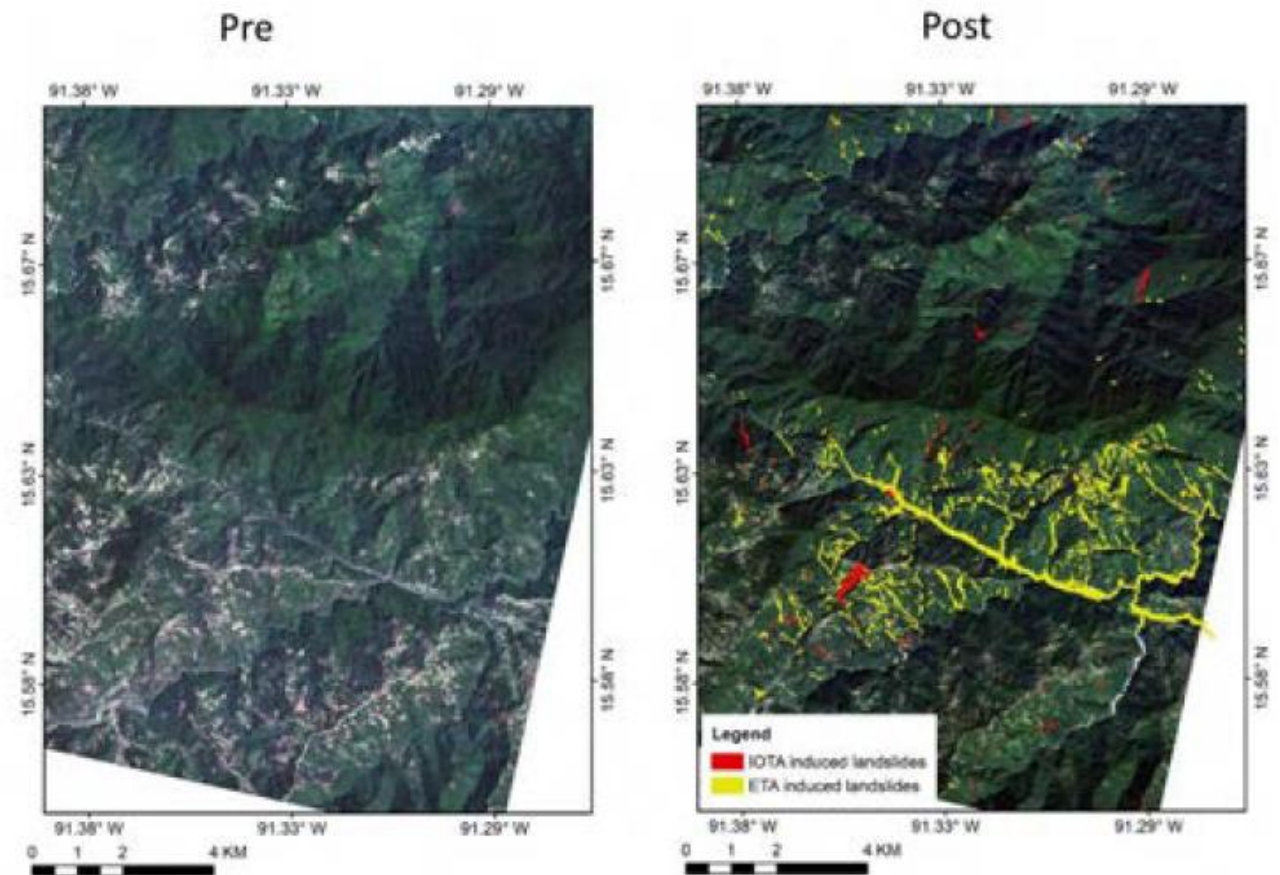
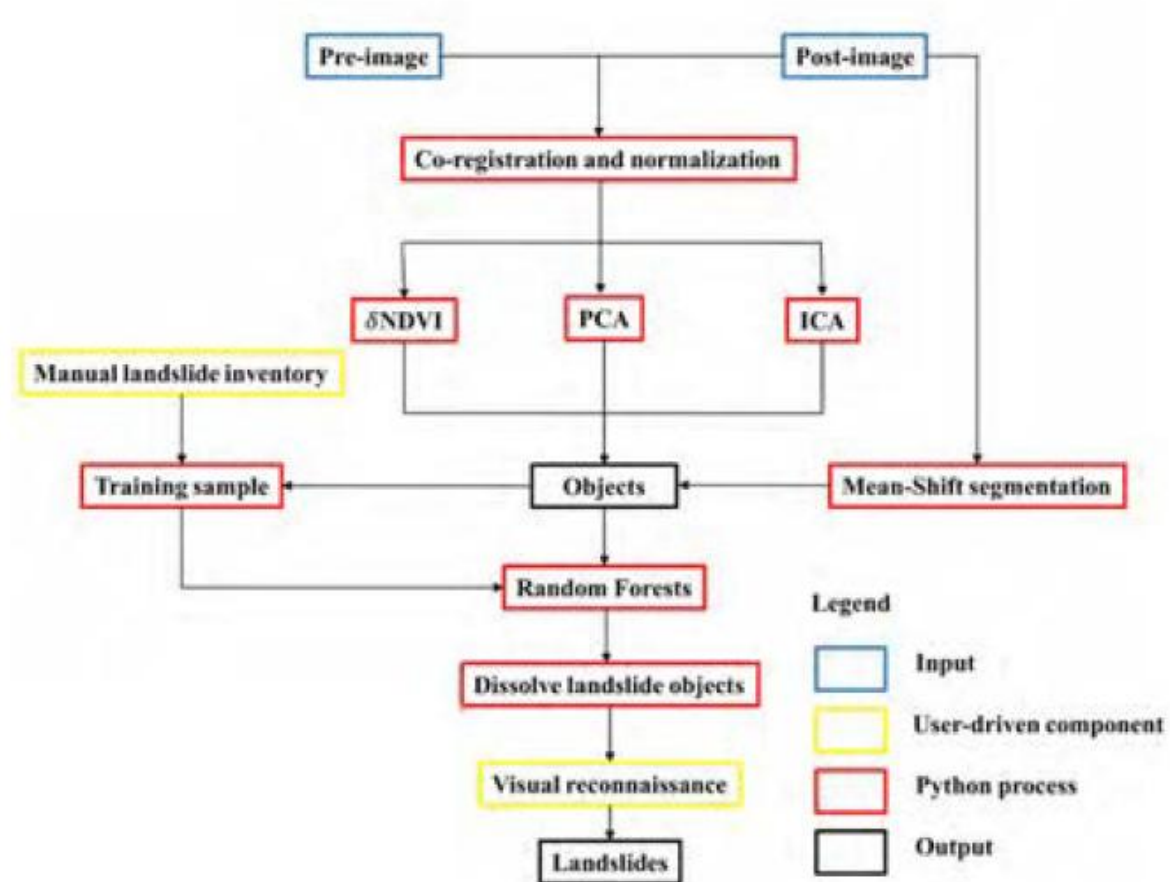
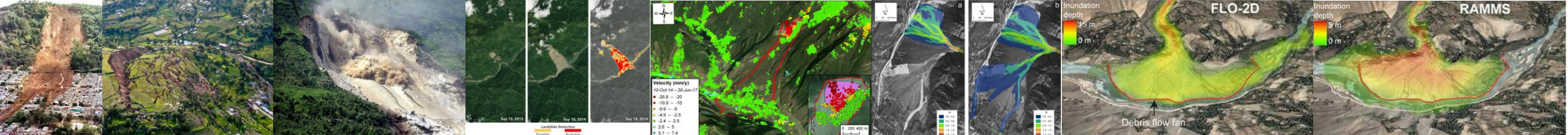
Years = 2010 –2020

•Number = 2439

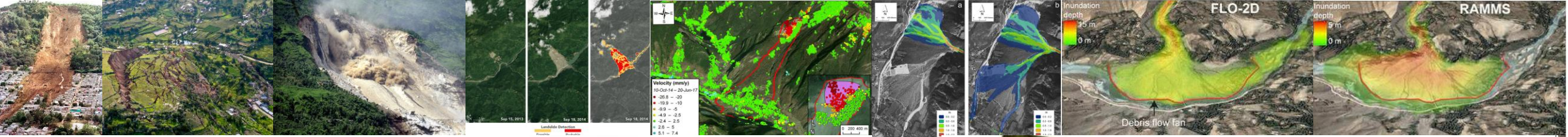
•Minimum size = 97 m²

•Maximum size = 357089 m²

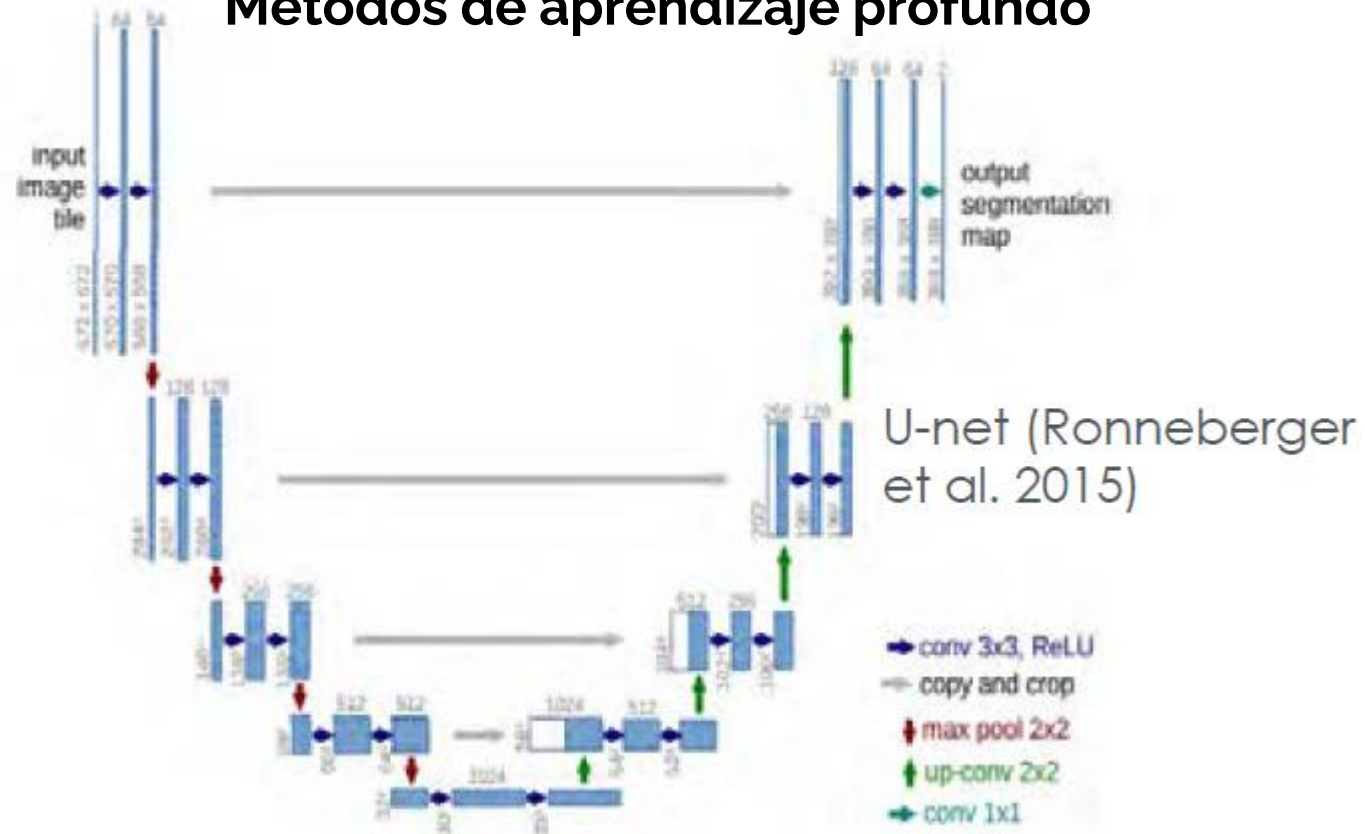




Iota y **Eta** fueron dos huracanes muy intensos que afectaron América Central en noviembre de 2020



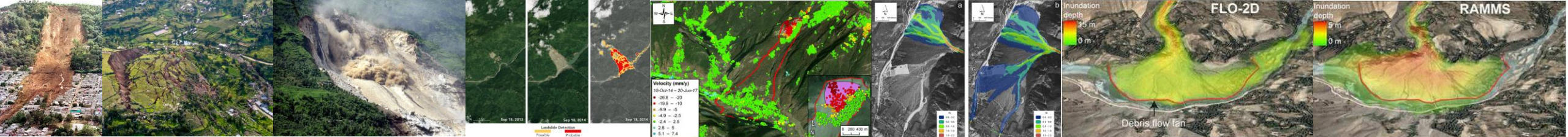
Métodos de aprendizaje profundo



El nuevo método desarrollado **U-net** aprovecha enfoques avanzados de aprendizaje profundo (*deep learning*).

- Configuración más rápida; más confiable y precisa.

<https://maps.disasters.nasa.gov/arcgis/home/item.html?id=78f299478c3746c19642c97ed4977cca>



- Los datos de entrenamiento influyen fuertemente en los resultados. Los enfoques basados en SALaD se han utilizado para mapear daños por inundaciones, basándose en la detección de cambios.
- Las entradas de MDE —incluyendo estimaciones de pendiente— pueden ser útiles para enmascarar inundaciones en zonas de baja elevación dentro de los resultados de deslizamientos.
- Las áreas sin cambios significativos en textura, color o propiedades espectrales pueden presentar desafíos; esto incluye regiones desérticas y deslizamientos reactivados.

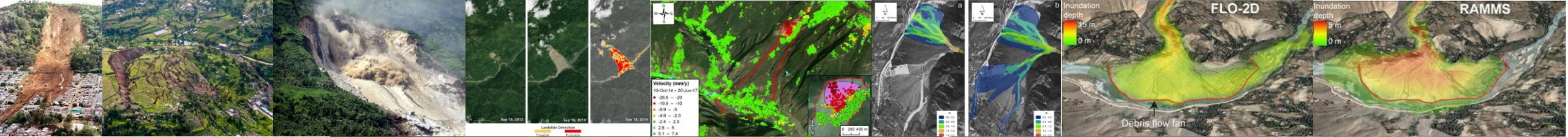
Consideraciones adicionales



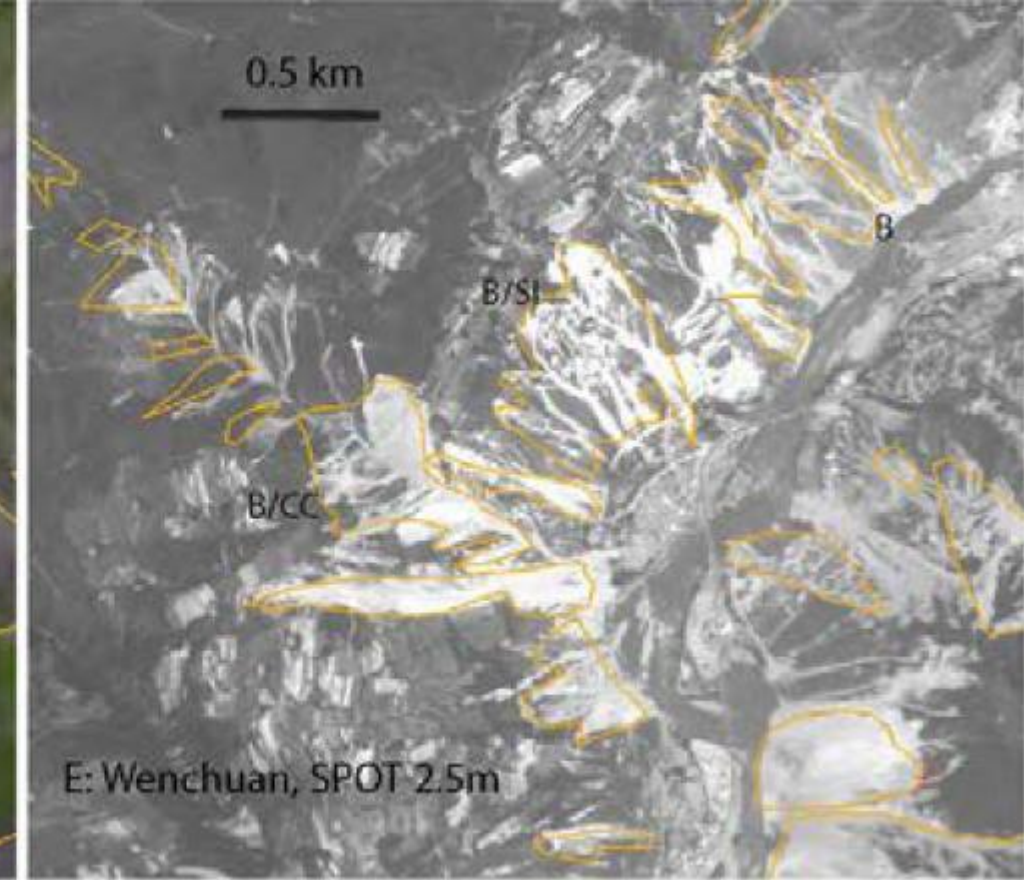
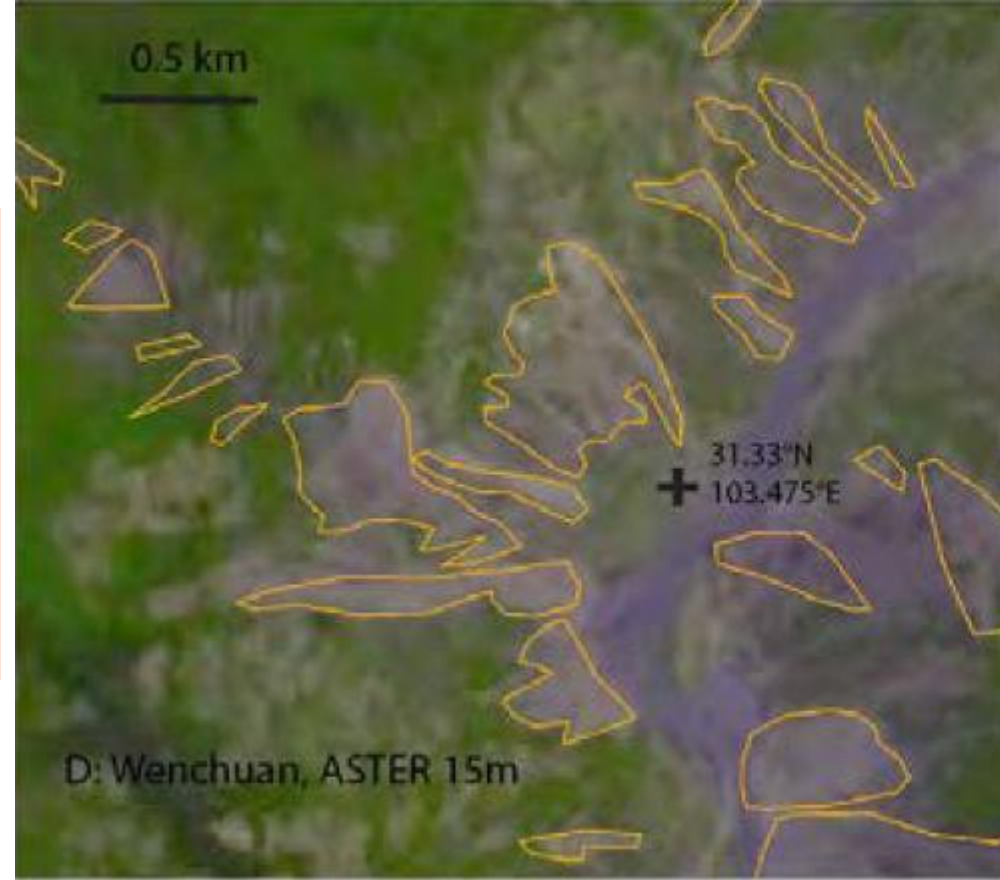
Image ©Planet Labs



Flood damage



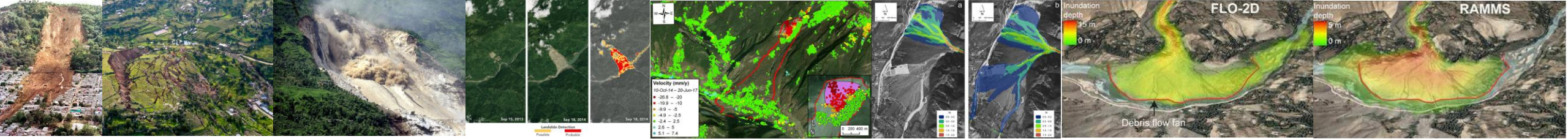
Los deslizamientos cartografiados usando imágenes de baja resolución pueden generar polígonos amalgamados (izquierda) que no reflejan la realidad (derecha). Imágenes de la región del terremoto de Wenchuan, Marc et al. 2015.



- **Amalgamación**

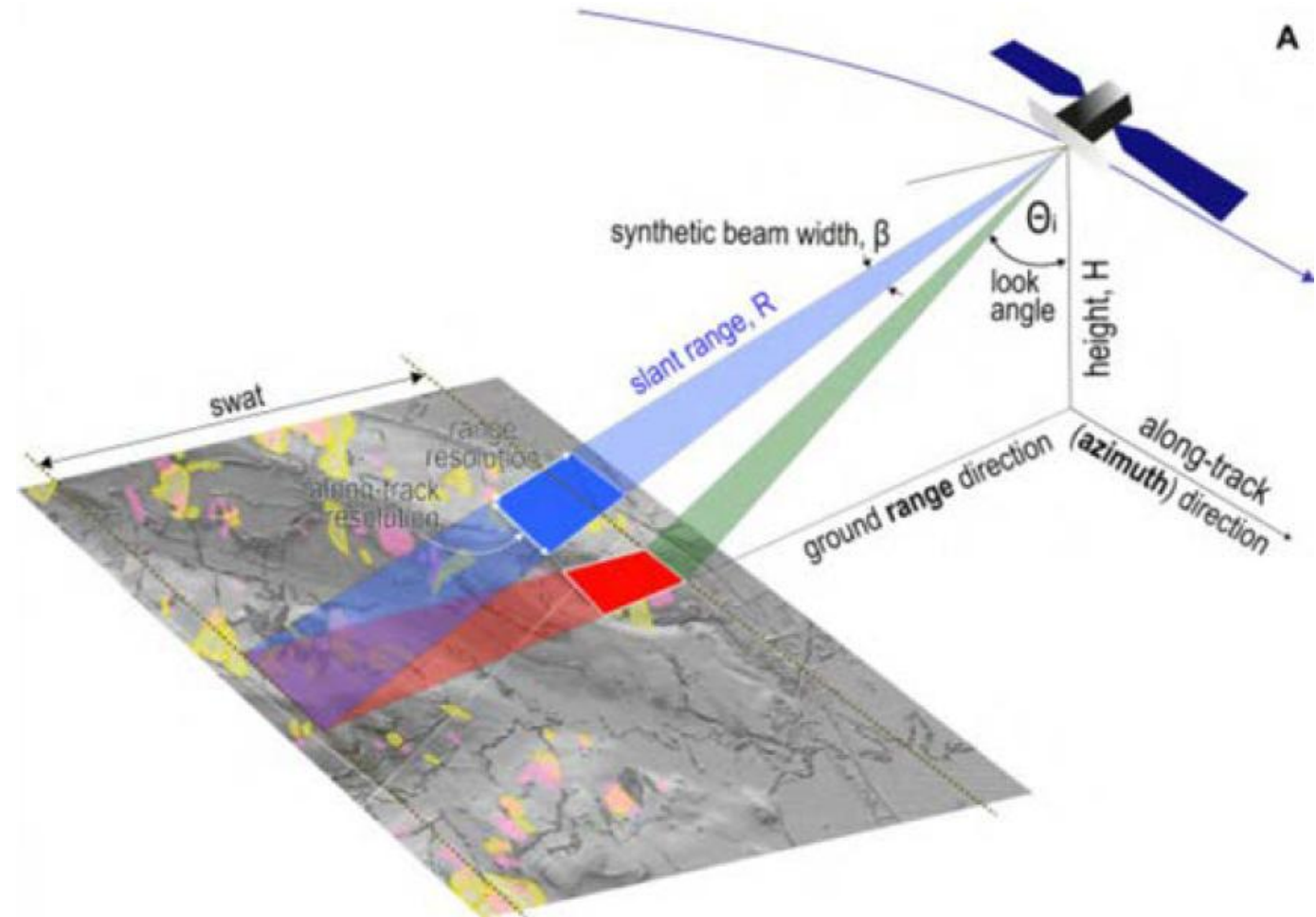
La cartografía automática tiende a fusionar deslizamientos individuales, lo que genera problemas de amalgamación.

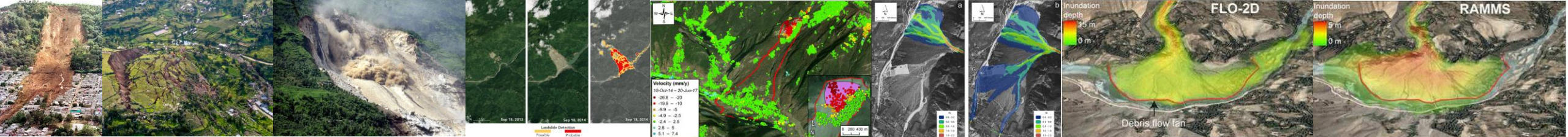
- Aunque el efecto sobre la estimación total del área de deslizamientos puede ser limitado, esto puede influir fuertemente en cualquier análisis derivado, incluyendo el análisis del recorrido (*runout*).



Análisis SAR

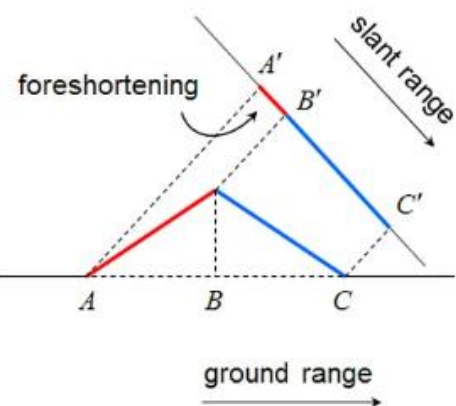
- SAR utiliza datos de radar para generar imágenes de la superficie terrestre.
- Aunque en principio es una técnica sencilla, hay muchos factores que influyen en la detección de deslizamientos.
- Los efectos de acortamiento (foreshortening), superposición (layover) y sombra (shadow) son críticos en terrenos de alto relieve, donde suelen ocurrir deslizamientos.





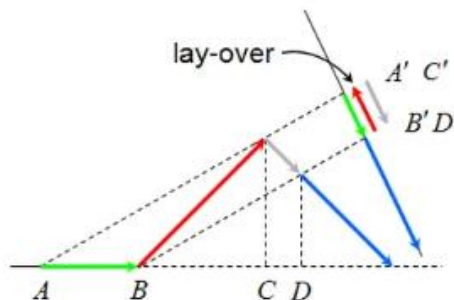
Foreshortening

- Sensor-facing slope foreshortened in image
- Foreshortening effects *decrease* with increasing look angle



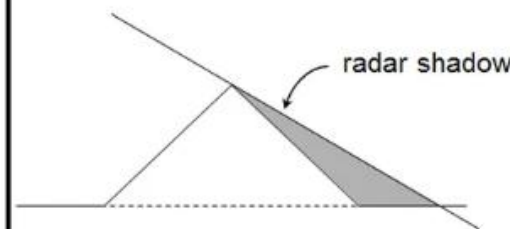
Layover

- Mountain top overlain on ground ahead of mountain
- Layover effects *decrease* with increasing look angle



Shadow

- Area behind mountain cannot be seen by sensor
- Shadow effects *increase* with increasing look angle



Relief and influence on SAR results

From Meyer et al. 2019

Sombra:

Se produce cuando **el radar no puede ver detrás de una montaña o pendiente** empinada, creando una “zona ciega” (sombra radar).

Distortions induced by side-looking SAR. Ground points a, b, c are ‘seen’ by radar as points a', b', c' in the slant

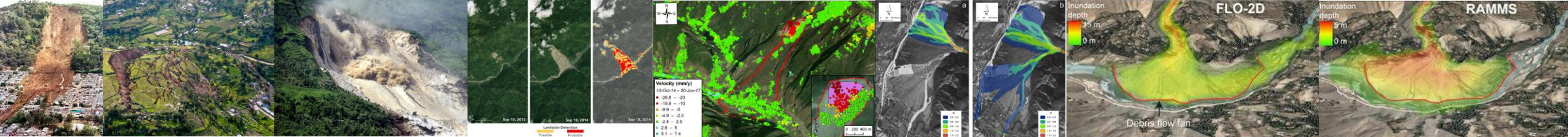
Acortamiento

Ocurre cuando una **pendiente orientada hacia el sensor** aparece comprimida en la imagen radar.

Consecuencia: Las laderas que miran al radar parecen más cortas y empinadas.

Surperposición:

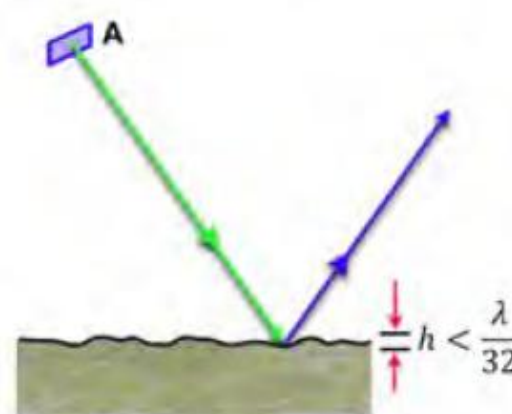
Se presenta cuando la cima de una montaña aparece sobrepuesta a su base en la imagen radar.



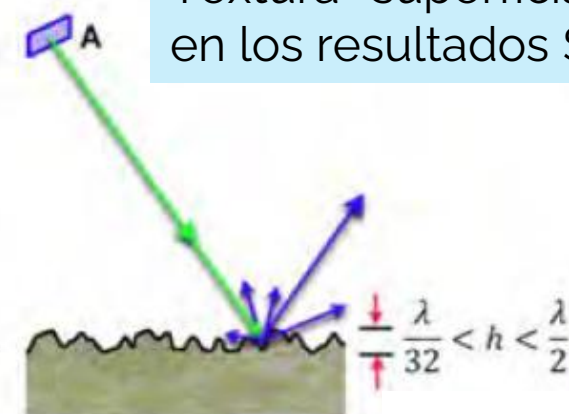
El tipo de superficie también es **crítico para determinar la reflexión** en imágenes SAR.

La **rugosidad o textura de la superficie** afecta directamente cómo se reflejan las ondas de radar:

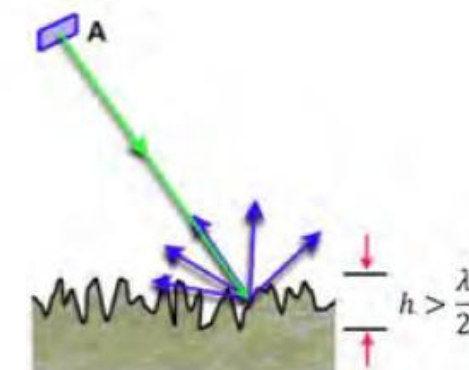
- **Superficies lisas** (como agua, asfalto húmedo, nieve fresca): Reflejan la señal en una sola dirección (reflexión especular), lo que genera **baja retrodispersión** (se ven oscuras en la imagen SAR).
- **Superficies rugosas** (como vegetación densa, suelos irregulares, áreas perturbadas): Dispersan la señal en múltiples direcciones, generando **alta retrodispersión** (se ven brillantes).
- **Superficies intermedias** (como áreas parcialmente erosionadas o perturbadas): Presentan **retrodispersión variable**, dependiendo del ángulo de incidencia y la longitud de onda del radar.



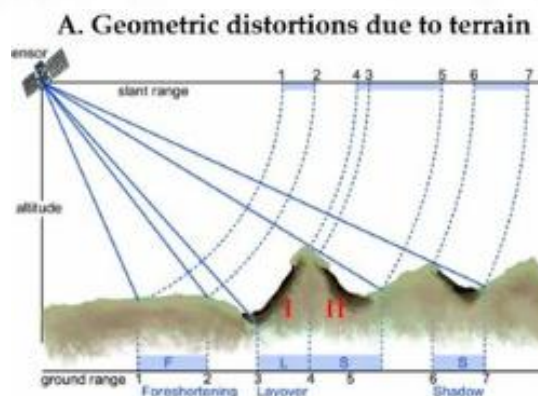
No return:
Smooth surface,
specular reflection



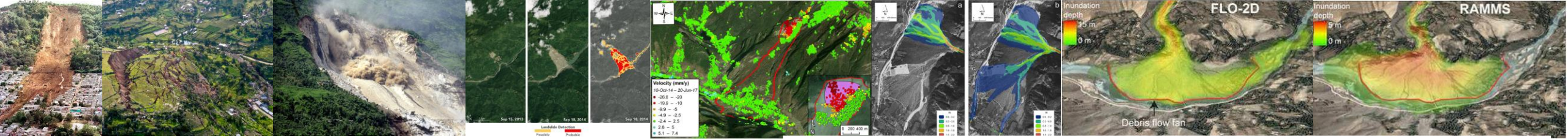
Moderate return:
Intermediate
roughness



Strong return:
Rough surface,
diffuse scattering

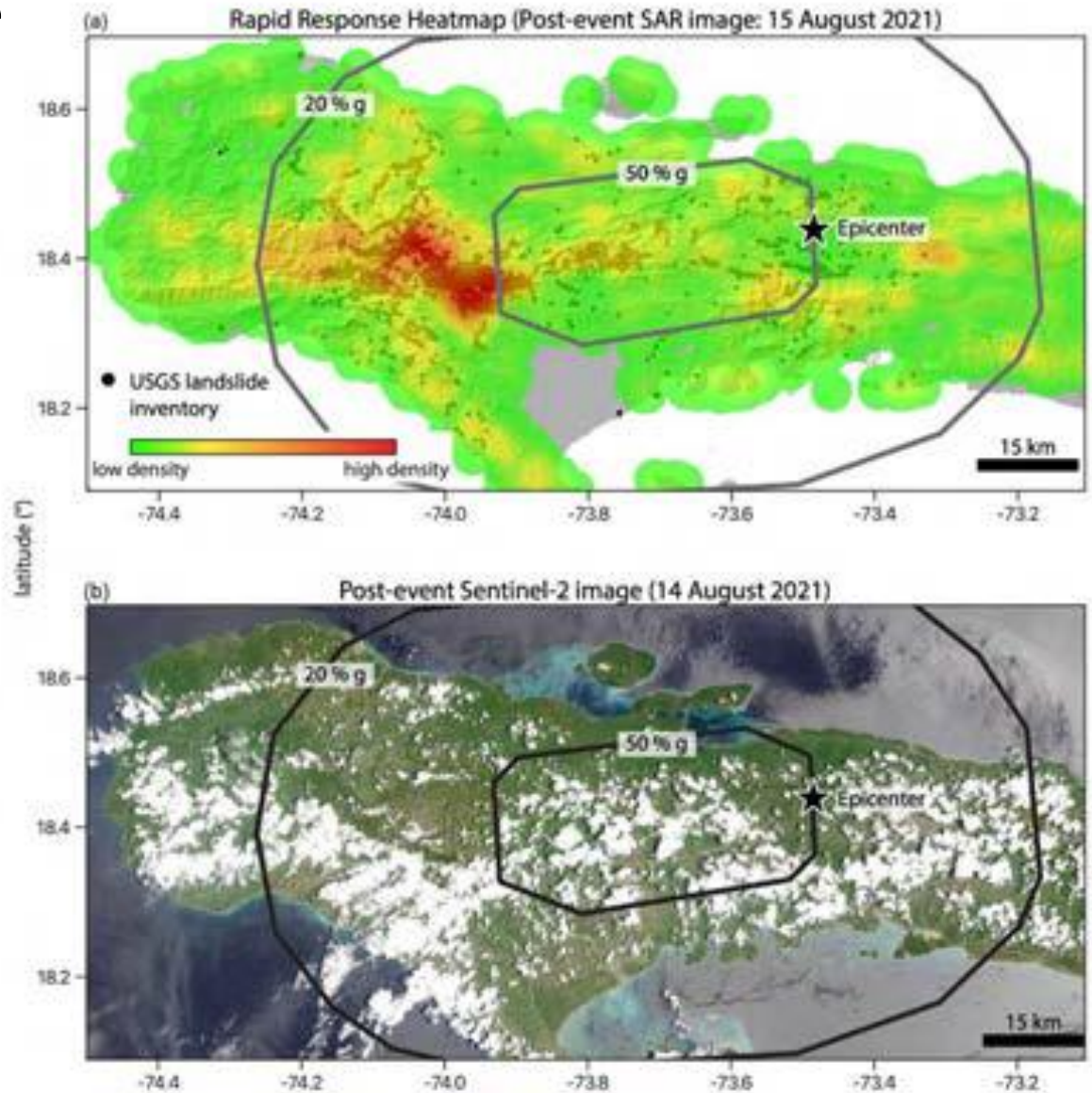
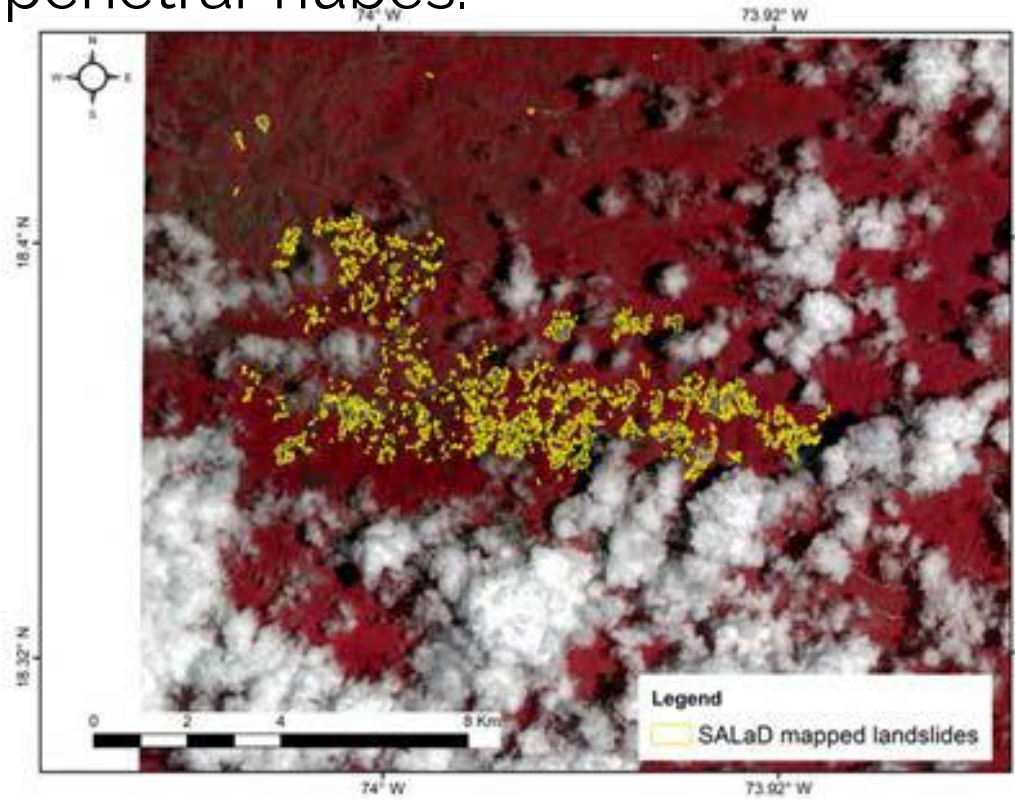


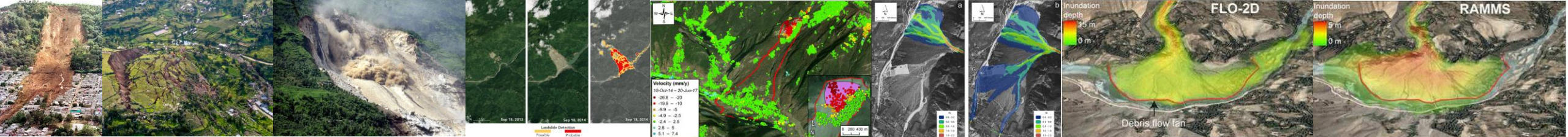
Textura superficial influencia en los resultados SAR.



Terremoto de Haití 2021 y cartografía de deslizamientos

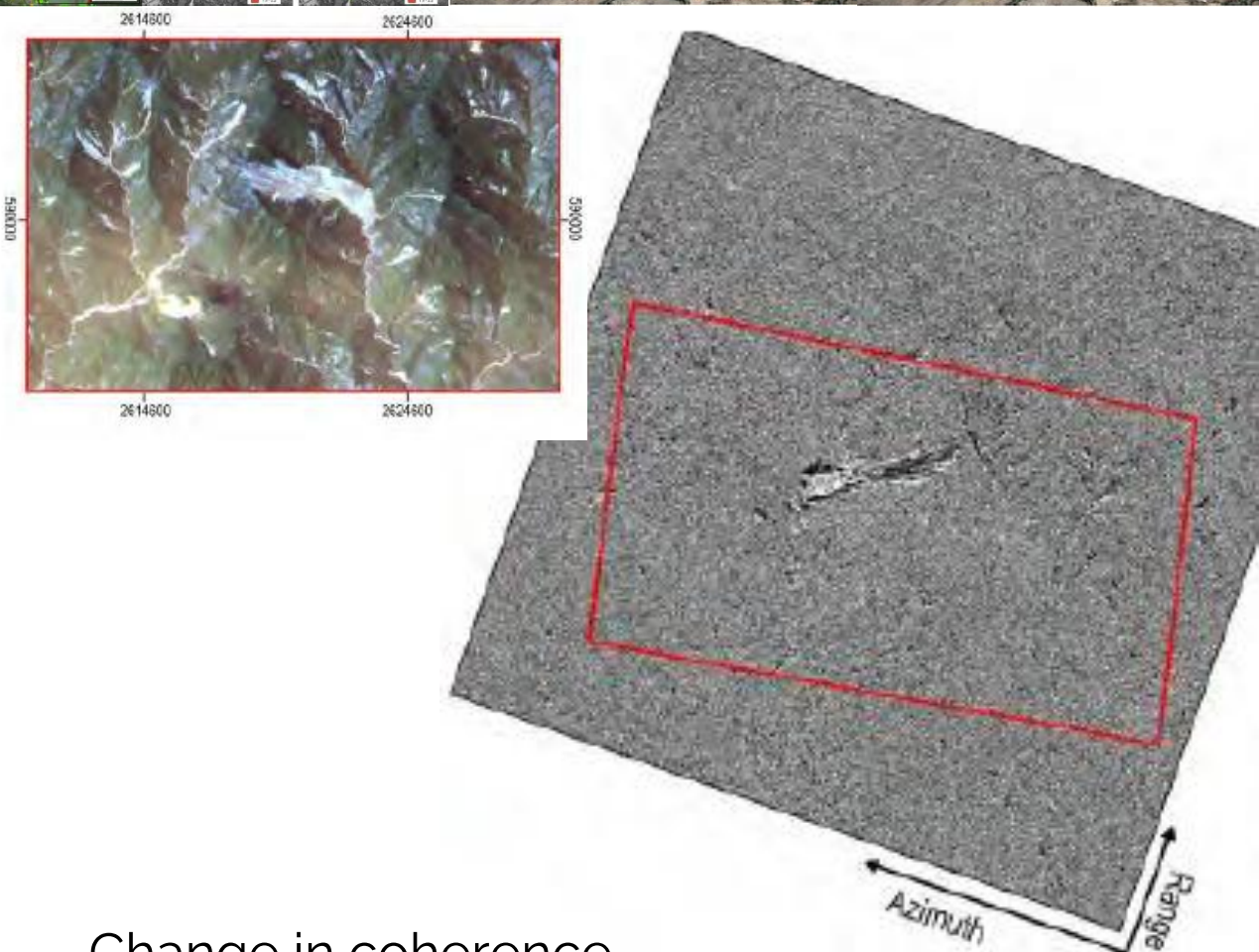
Método robusto y rápido que puede penetrar nubes.





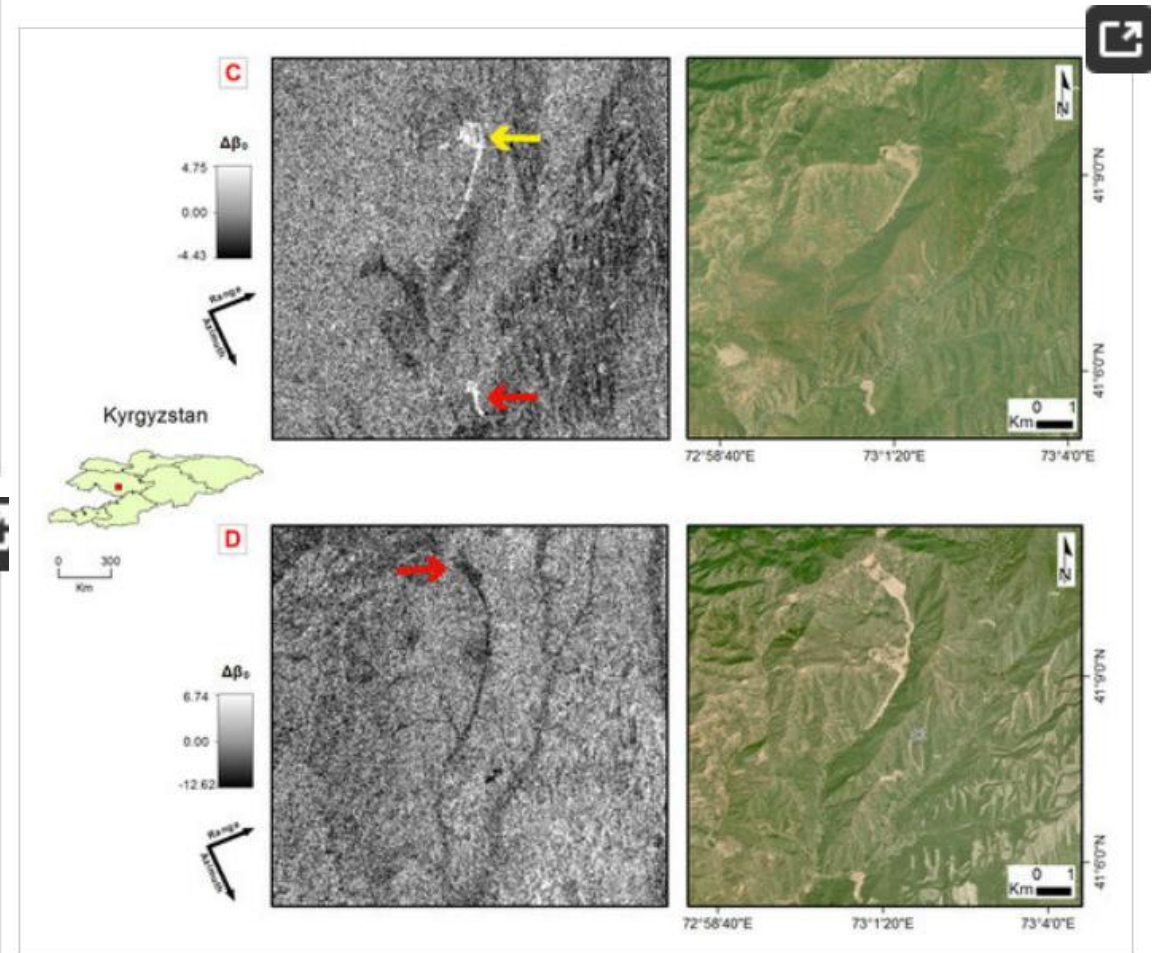
Enfoques basados en la coherencia SAR

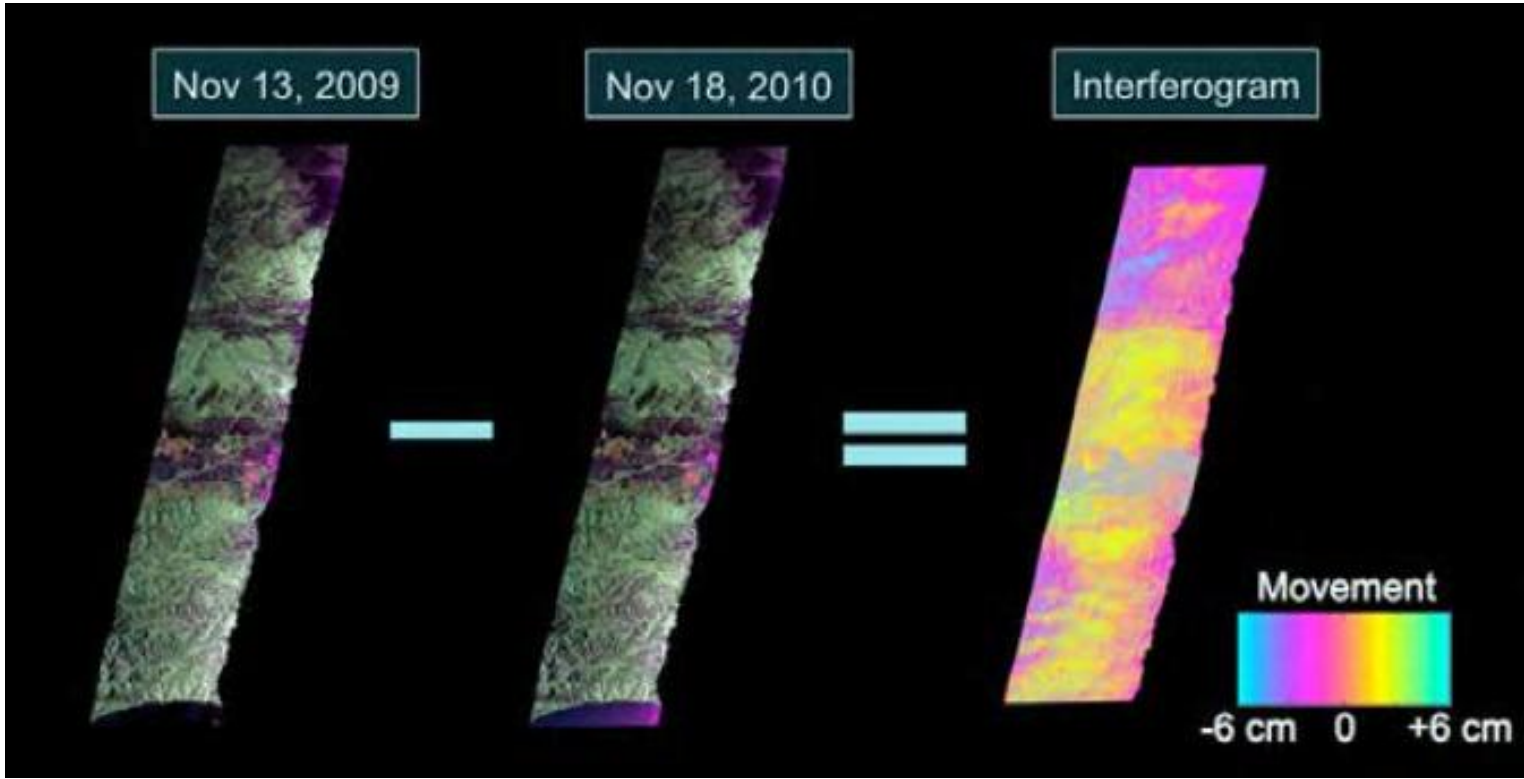
- Los cambios en la coherencia entre dos imágenes SAR se han aprovechado recientemente como un método para detectar deslizamientos.
- En algunos casos (ver imagen a la derecha), esto puede resaltar los deslizamientos con bastante claridad, pero en otras áreas los resultados pueden ser difíciles de interpretar.
- En zonas propensas a la **decorrelación** de los datos SAR (por ejemplo, bosques), el cambio de coherencia puede tener **baja capacidad de detección**.

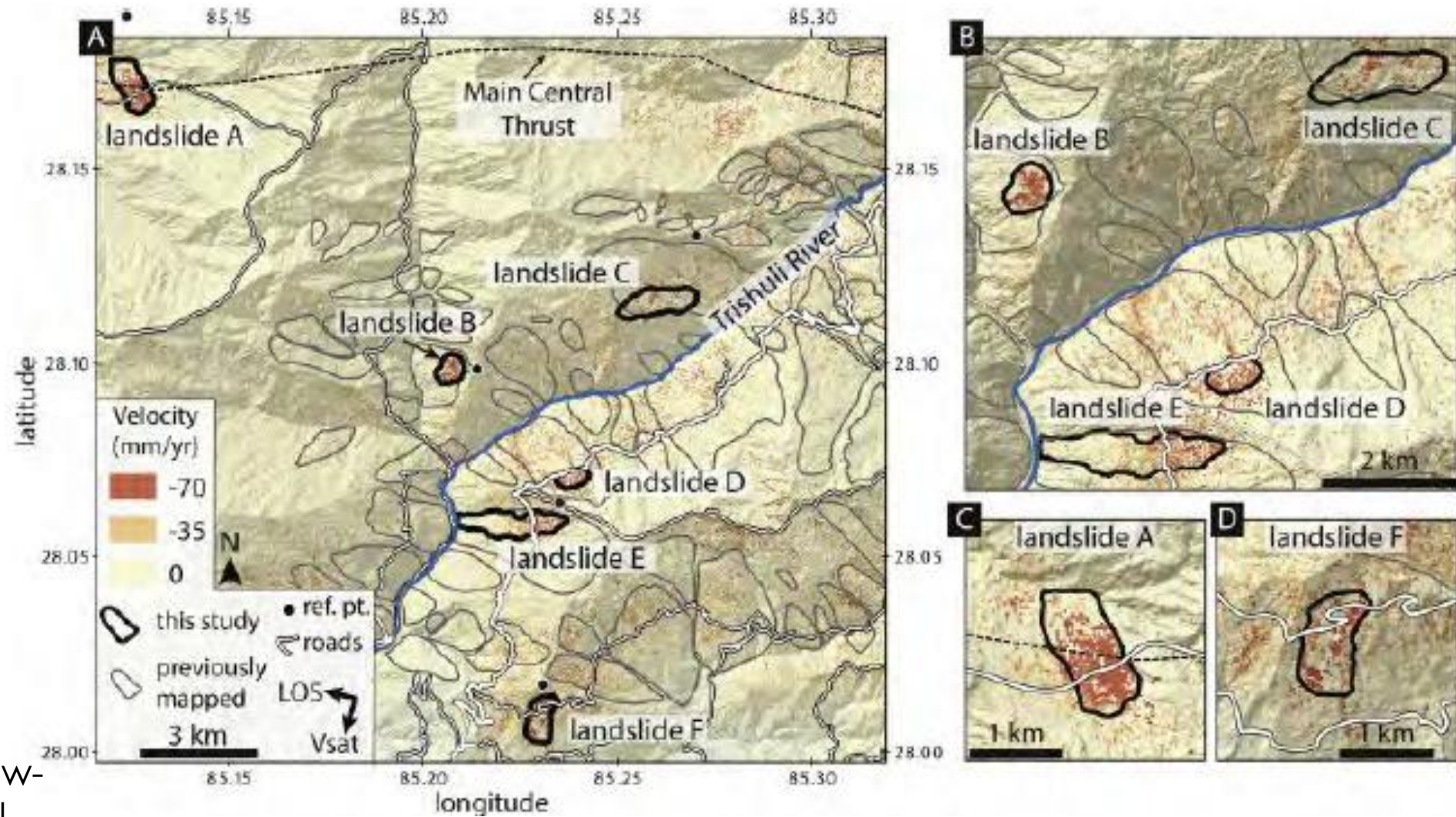
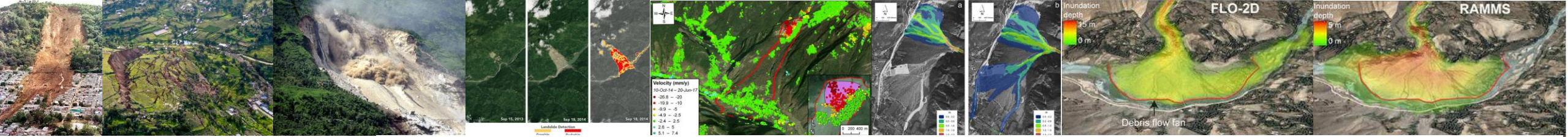


Change in coherence
highlighting a large landslide in
Myanmar.

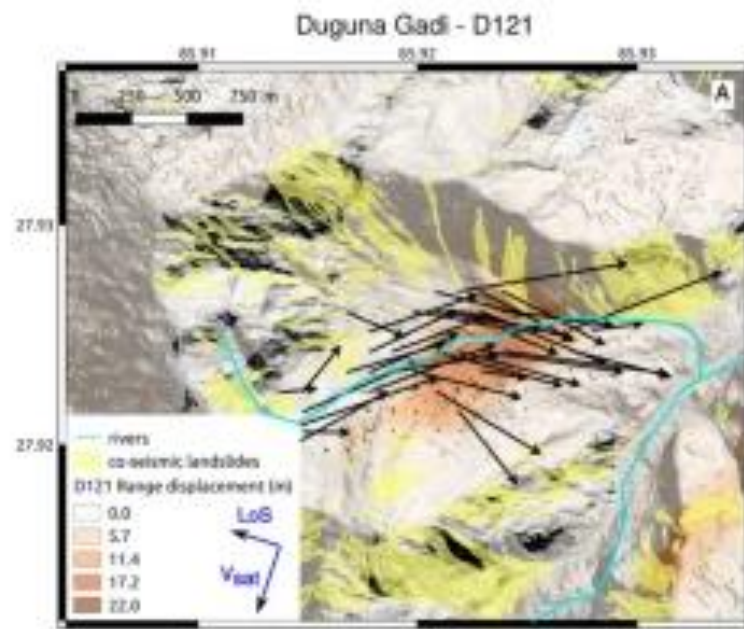
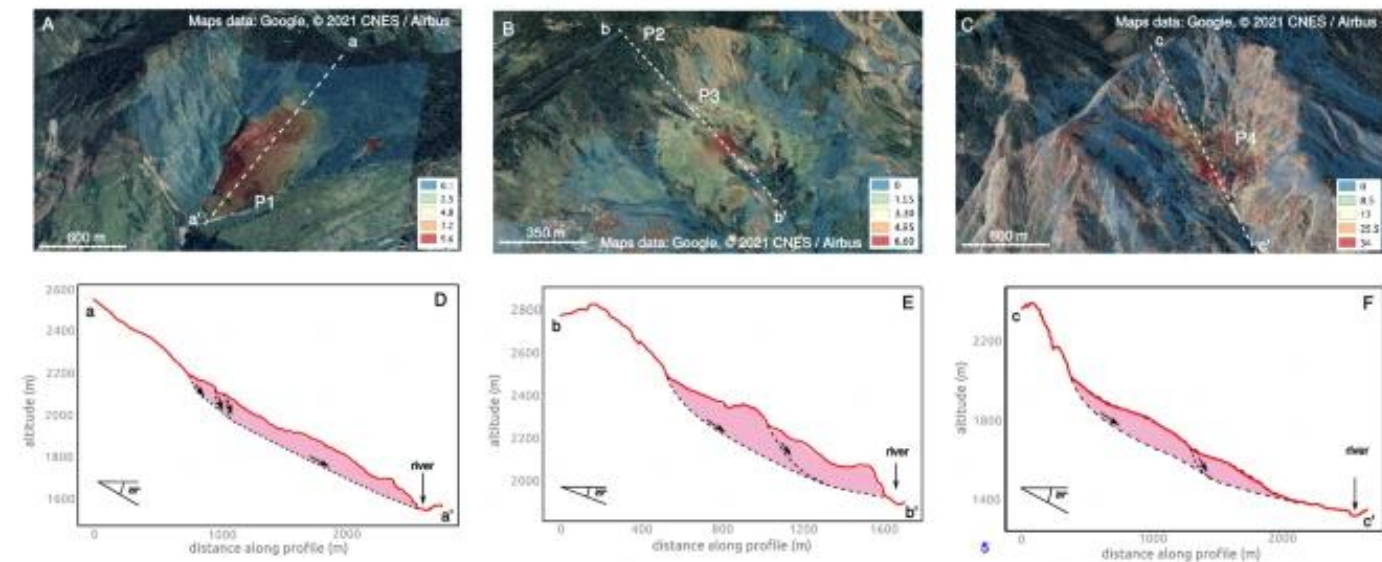
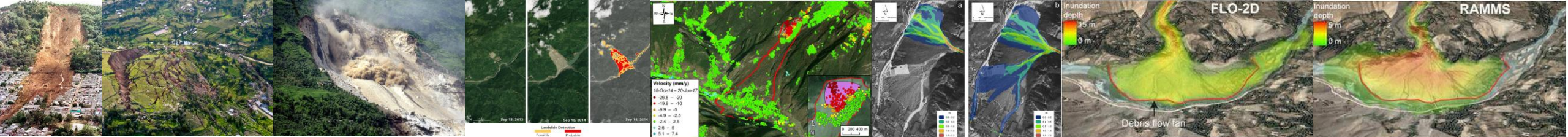
Source: Mondini 2021







InSAR based analysis of slow-moving landslides in Nepal.
Source: Bekaert et al. 2020.



Lacroix, P., Gavillon, T., Bouchant, C. *et al.* SAR and optical images correlation illuminates post-seismic landslide motion after the Mw 7.8 Gorkha earthquake (Nepal). *Sci Rep* **12**, 6266 (2022).
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-10016-2>

