

**XVII CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTÉCNIA “EVALUACIÓN Y  
GESTIÓN DE RIESGOS GEOTÉCNICOS CON ÉNFASIS EN LOS  
EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO”**

**14 al 18 de Noviembre de 2022**



**GEOTECNIA ES ARTE, OFICIO, TÉCNICA, CIENCIA.**

**MANUEL GARCÍA LÓPEZ**  
**Socio Fundador**  
**Ingeniería y Geotecnia S.A.S.**





## CONTENIDO

1. Introducción.
2. Ingeniería Civil y Geotécnica en la cultura Tairona.
3. Deslizamiento complejo de “Cusillo”, La Unión, Nariño.
4. Importancia del trabajo de campo en la Geotecnia.
5. Conclusiones.



## INTRODUCCIÓN

Hemos tomado la frase con la cual se titula esta charla de la “Lección de apertura del XIII Congreso Colombiano de Geotecnia” reunido en Manizales en Septiembre de 2010, pronunciada por el destacado Ingeniero Civil y Humanista Carlos-Enrique Ruiz Restrepo, Profesor de la Universidad Nacional Sede de Manizales y ex-Vicerrector de la misma, en el comienzo del capítulo 1. “Algo surgió de la nada”. En el capítulo 2. “La Geotecnia en el descubrir del mundo” expresa que “*En cada punto de la naturaleza, en cada guijarro, piedra y terrón, en cada estrato está el registro de un pasado de agite, con secretos en la gestación de lo que ha ido encontrando el ser humano en su caminar, un tanto sin rumbo, bastante al azar. En general, agua, tierras y rocas son el ámbito del ser humano, a la manera del enunciado antiguo: aire, fuego y agua.*”.

Mas adelante expresa el Maestro Ruiz Restrepo que “*El sentido ambicionado de pronóstico, para prevenir o eludir males indeseados, es también parte de ese ocuparse a diario las ciencias de la tierra de habitar el mundo, en geografías y circunstancias, las más disímiles. La Geotecnia entra a ser, entonces, esa componente pragmática por acondicionar el medio terrestre a unas maneras deseadas de vivir, con cierto grado de armonía con la naturaleza, aquella porción que nos ha tocado en suerte disfrutar y padecer. Pragmática, digo, pero orientado por teoría en continuo desarrollo, desde la química, la biología, la mineralogía, la física, la matemática, la geoestadística, hasta en sus relaciones con la historia y la antropo-sociología.*”.



## INTRODUCCIÓN

En el capítulo 5. “La primera conferencia regional” realizada en esta sede de la Universidad Nacional en agosto de 1975, completa dicho autor lo relacionado con su descripción de la Geotecnia con lo que denomina “tres comprensiones sobre la Geotecnia, con asidero en otras y personales experiencias: La primera, del mexicano Juan B. Puig, quien propuso entender la Geotecnia como la disciplina que se practica-decía él- por ingenieros civiles que posean conocimientos profundos en Geología; la segunda, formulada en ponencia de la sección de Geotecnia de la UN-Bogotá, en la aludida conferencia regional, con la sugerencia de entender la Geotecnia como una interdisciplina dedicada al análisis de los problemas relacionados con el comportamiento mecánico de suelos y rocas. Y la tercera, con enunciado de simplicidad, al entenderla como geología aplicada, o mejor como geología para ingenieros o al conjunto integrado por la Mecánica del Suelo y la geología aplicada”.

En mis estudios para la obtención del Master of Science in Civil Engineering en la universidad de Purdue, EE.UU. tuve como profesor de Mecánica de Rocas I y II al Dr. William R. Judd, autor con Dimitri P. Krynine del libro “*Principles of Engineering Geology and Geotechnics, McGraw-Hill Book Company, Inc. 1957*”. Para estos autores, la Geotecnia es simplemente, la aplicación de las ciencias de la tierra a la solución de los problemas de Ingeniería Civil. Reintegrado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional en Febrero de 1969, fui designado Jefe Encargado de la Sección de Mecánica de Suelos del Departamento de Ingeniería Civil en Abril del mismo año, y Jefe del Laboratorio de Ensayo de Materiales en Mayo y después, en Junio de 1969, Director Encargado de Instituto de Ensayos e Investigación, cargo que ocupé hasta Octubre de 1969.



## INTRODUCCIÓN

Entre el 28 de Agosto y el 23 de Noviembre de 1972, de acuerdo con disposiciones internas de la Facultad solicité y fue aprobado el cambio de nombre de la Sección de Mecánica de Suelos a Sección de Geotecnia, siguiendo la tendencia moderna de dicho cambio adoptado entre otras instituciones por la American Society of Civil Engineering. En ese entonces fui también Presidente de la Comisión de Mecánica de Suelos de la Sociedad Colombiana de Ingenieros y tramité el cambio a Sección de Geotecnia.

En los cambios mencionados se tuvo la colaboración de los profesores de planta de la Facultad Julio E. Moya Barrios, Samuel Feferbaum Ztyo y Manuel Delgado Vargas, junto con otros profesores de Catedra, todos ellos especializados en Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, y desde estas fechas en la nueva ciencia de la Geotecnia. Finalizo estas rememoraciones, comentando que en Marzo del presente año 2022, pasé al retiro como docente de la Universidad Nacional, en obedecimiento de normas legales según las cuales solo se puede ser empleado público en la docencia hasta cumplir los 80 años. Continuaré, Dios mediante, como profesor de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.

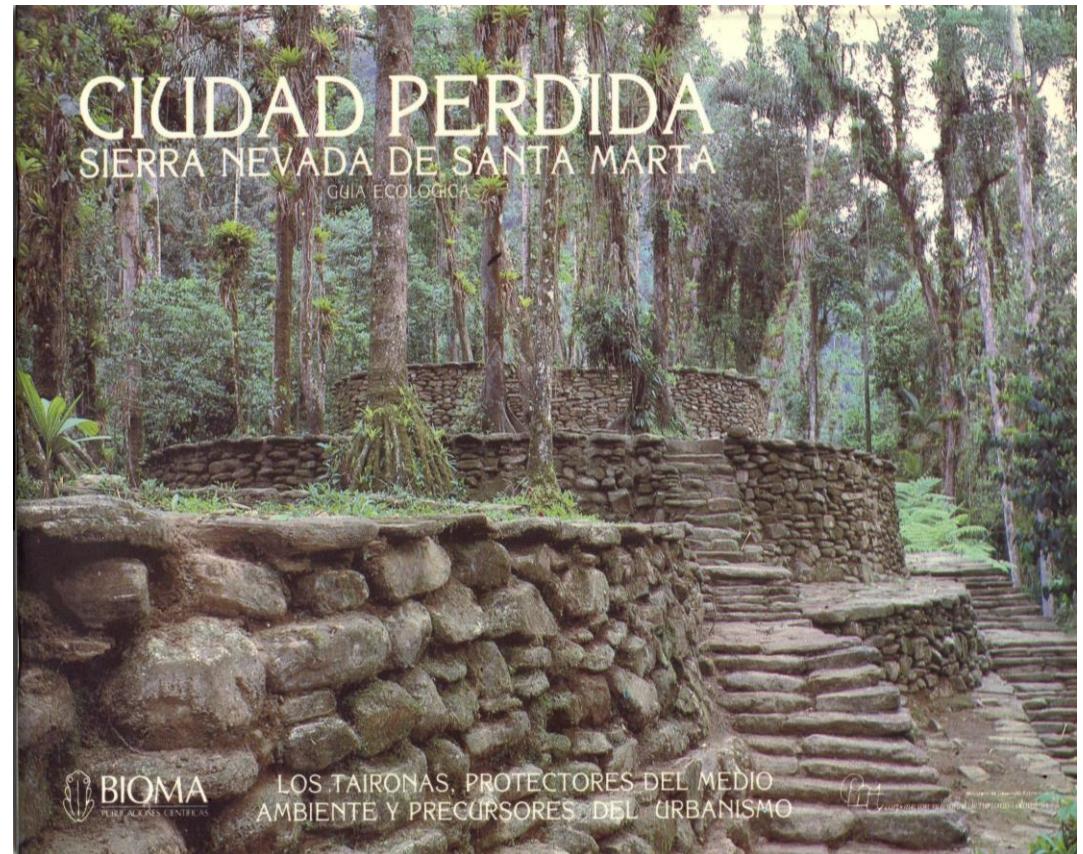
A continuación se presentan los capítulos de Ingeniería Civil y Geotécnica en la cultura Tairona, Deslizamiento complejo de “Cusillo” en La Unión, Nariño, e Importancia del Trabajo de Campo en la Geotecnia. Trataré de destacar que el contenido de estos capítulos puede enmarcarse en la definición que he propuesto para esta charla: Geotecnia es arte, oficio, técnica, ciencia.



## INGENIERÍA CIVIL Y GEOTÉCNICA EN LA CULTURA TAIRONA

En el estudio de las obras de Ingeniería Civil de las culturas precolombinas, (en las cuales podemos encontrar temas que hoy en día están vinculados a la Geotecnia), es frecuente pensar en las obras maravillosas de los **Mayas** y los **Incas**. Se considera de interés para la comunidad geotécnica echar un vistazo a lo realizado por los **Taironas** que habitaron la Sierra Nevada de Santa Marta localizada sobre la costa Caribe de Colombia.

Al respecto se presentará en este capítulo una valiosa información publicada por la Corporación Nacional de Turismo, Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia (Publicada por BIOMA, Bogotá, c1980).

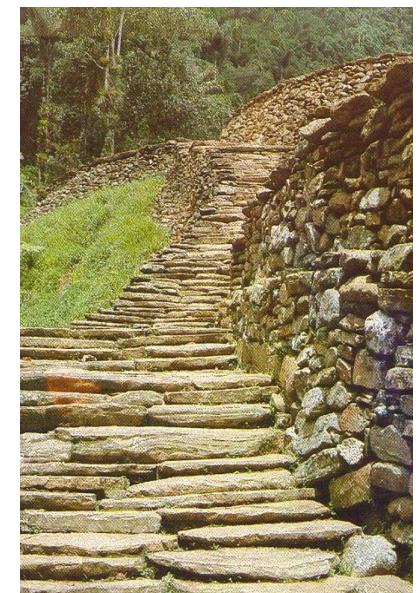
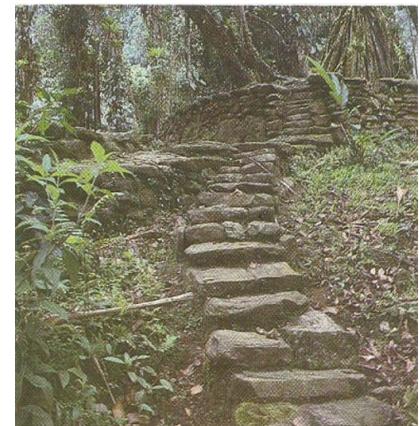




## INGENIERÍA CIVIL Y GEOTÉCNICA EN LA CULTURA TAIRONA

*“Es Colombia un país único en el mundo, con zonas culturales definidas, unas independientes, otras interrelacionadas: **Tairona**, Muisca, Nariño; Sinú, Quimbaya, Calima, Cauca, Tolima; Tumaco, San Agustín, Tierradentro, que florecieron antes de la Conquista y han sido clasificadas, algunas de ellas, dentro de las clásicas de la América Precolombina.” Los Taironas “alcanzaron grandes realizaciones por su organización social y económica, las técnicas desarrolladas en la orfebrería y la cerámica, y su especial sentido de adaptación al medio ecológico.”.*

Como aspecto histórico, en 1501 “la expedición conquistadora al mando de Pedro Alonso Niño y Cristóbal Guerra recorrió las costas del Caribe, efectuó los primeros desembarcos en tierra firme y dió inicio a un largo período de saqueos, lucha y dominación. El primer contacto directo con los taironas ocurre también en 1.501, cuando Rodrigo de Bastidas arriba a la bahía de Gaira; pero sólo hasta 1.525 tiene lugar el asentamiento definitivo con la fundación de Santa Marta por el mismo Adelantado y Gobernador. A partir de allí y durante 98 años habrá de librarse una violenta guerra, al cabo de la cual los españoles quedaron en posesión de las zonas litoraleñas, y los sobrevivientes indígenas, debilitados pero libres, en las partes altas de la Sierra.”.



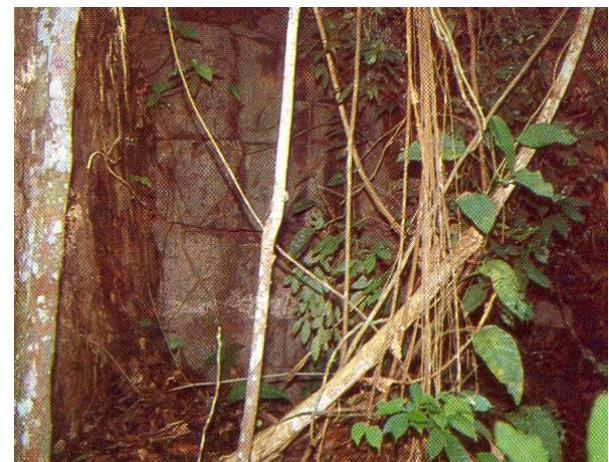


## INGENIERÍA CIVIL Y GEOTÉCNICA EN LA CULTURA TAIRONA

Después de la conquista, “*la región quedó envuelta en un manto de olvido. La naturaleza lo cubrió todo con intrincada selva, y la comarca se convirtió en una apasionante leyenda de ciudades perdidas. Luego, habrían de pasar varias centurias, hasta que el interés de historiadores y científicos, o por motivos de la colonización y la guaquería, se descubrieron los numerosos yacimientos arqueológicos de los Taironas, uno de ellos Pueblito ...*”

Según la publicación consultada, ... “*en lo que más trascendieron es como ingenieros y urbanistas a nivel regional, y local al desarrollar sabias técnicas de adaptación y conservación del medio ambiente, con sistemas de filtros, aterrazamientos y amurallados a veces ciclópeos.*” (El resaltado es nuestro).

“*Una de las realizaciones más significativas de los taironas, demostrativas de su laboriosidad y gran desarrollo social, fueron las prolongadas redes de caminos que construyeron por todas las comarcas de la Sierra Nevada de Santa Marta donde ejercieron su dominio territorial.*”

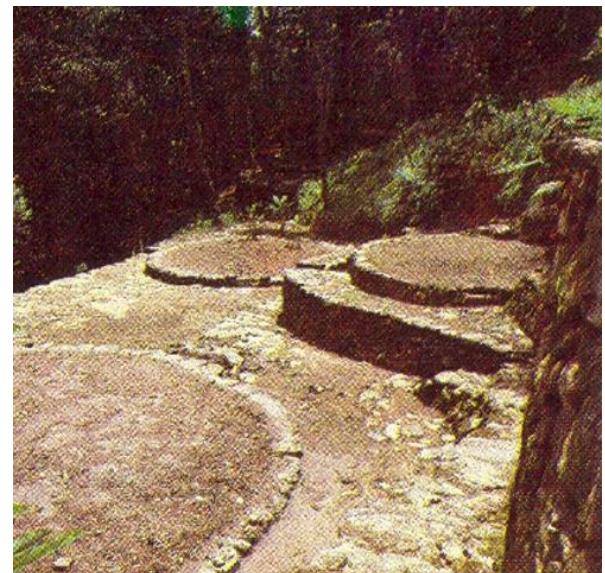
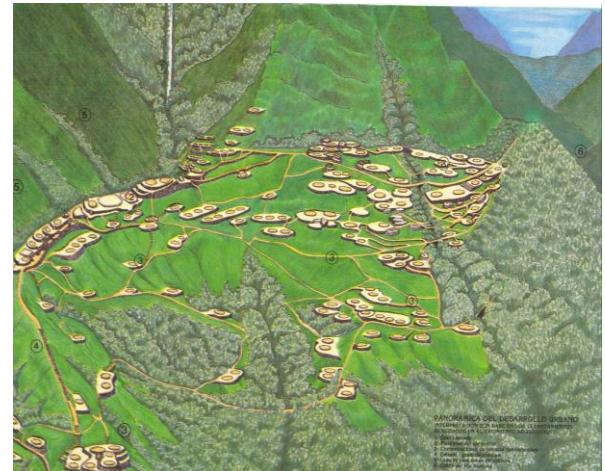




## INGENIERÍA CIVIL Y GEOTÉCNICA EN LA CULTURA TAIRONA

*“El sitio de Pueblito (200 m.s.n.m.) dentro de los linderos del actual Parque Nacional Tairona, a 40 km al Este de Santa Marta, fue una inmensa y a no dudar importante concentración habitacional que debió tener muy estrecho contacto con todas las actividades relacionadas con el mar, y propias de la gente del litoral (pesca, navegación, comercio, agricultura de esa primera franja inmediata al mar).”.*

*“Según Reichel Dolmatoff, en Pueblito se calculan unos 1.000 sitios habitacionales, de los cuales quedaron reseñados 400, lo cual da idea de su extensión y densidad poblacional, comunicados entre sí por una compleja red de caminos principales y secundarios, convergentes a una zona central de contornos monumentales, por la amplitud de las terrazas encinturadas en puntos estratégicos por murallas de piedra; estos muros también son característicos a orillas de las quebradas, para controlar la erosión de crecientes invernales.”.*





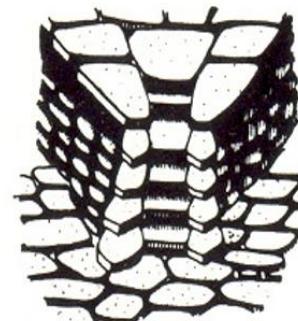
## INGENIERÍA CIVIL Y GEOTÉCNICA EN LA CULTURA TAIRONA



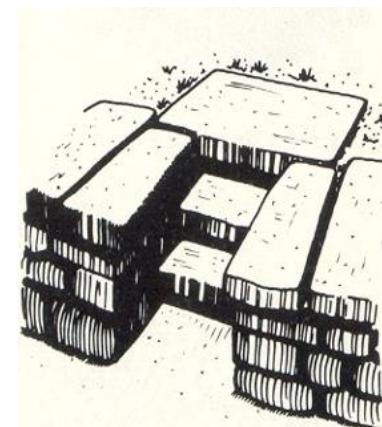
Calzada gradería principal



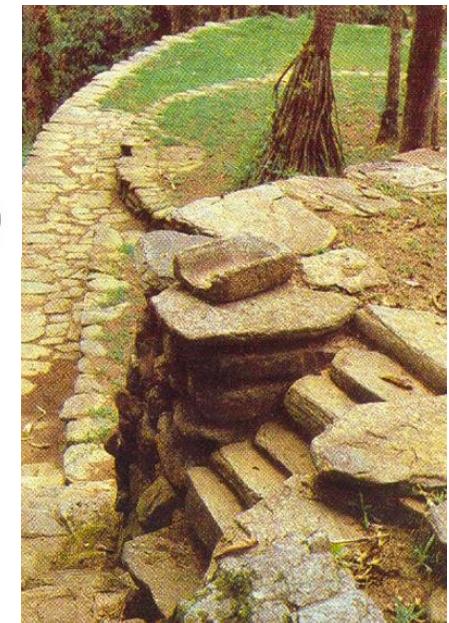
Camino secundario



Escalera atípica (triangular)



Acceso a vivienda



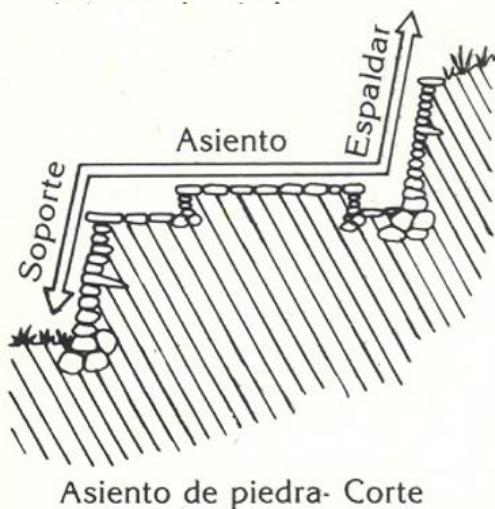
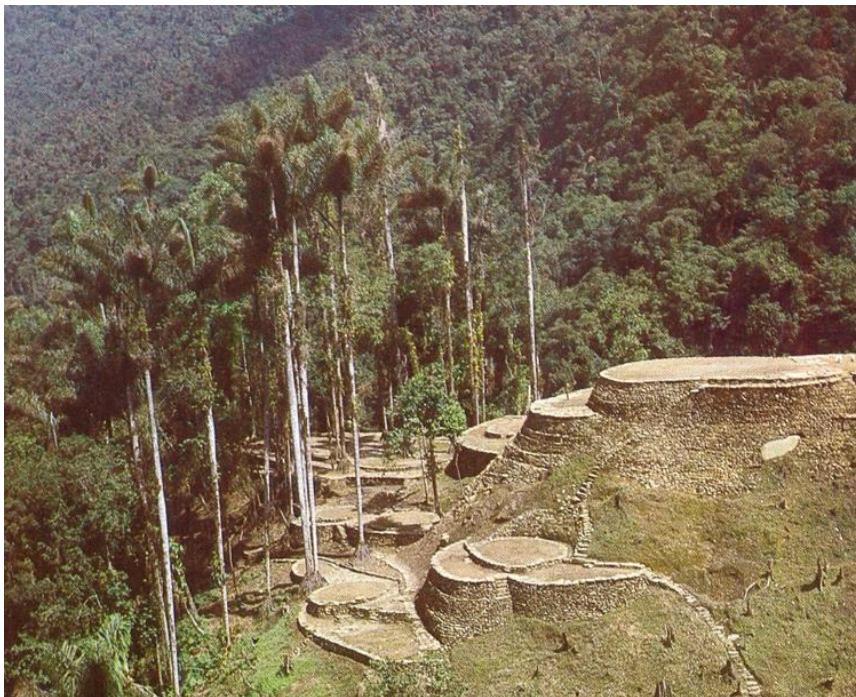
*“... fueron redes viales de muchos centenares de kilómetros que comunicaron todo el país de los taironas, desde el litoral a los puntos mas alejados de las montañas ...”*



# INGENIERÍA CIVIL Y GEOTÉCNICA EN LA CULTURA TAIRONA

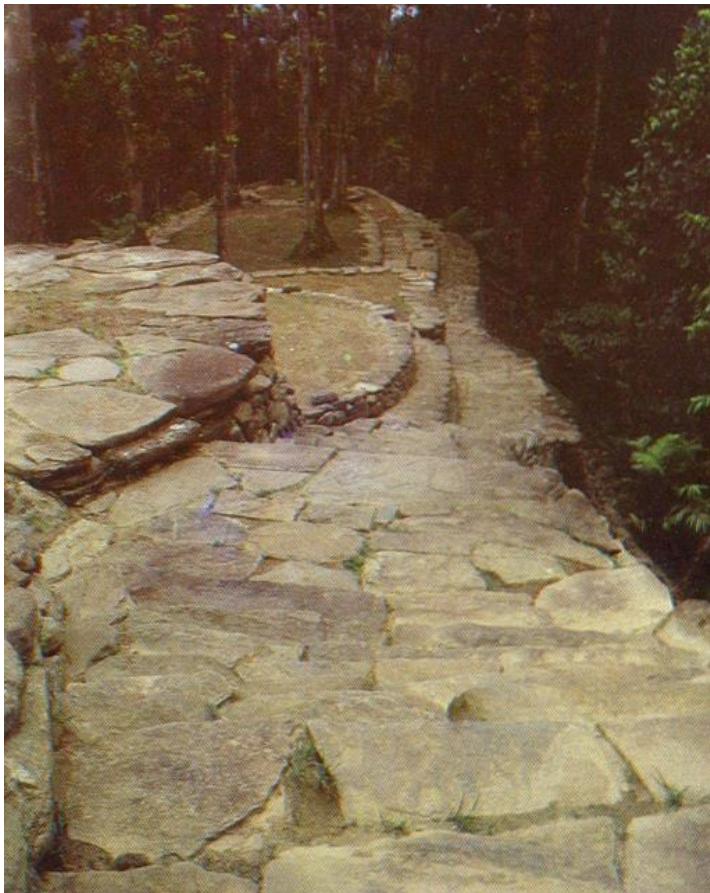
## Aterrazamientos

*“Los aterrazamientos de los taironas son uno de los elementos constructivos que caracterizan en forma determinante a la gran cultura de la Sierra Nevada, pudiéndose distinguir según su uso, en terrazas con destino a campos de cultivo, para sitios de vivienda, y para servir de plazoletas en reuniones comunitarias. Su hechura obligó a movimientos de tierra colosales.”*

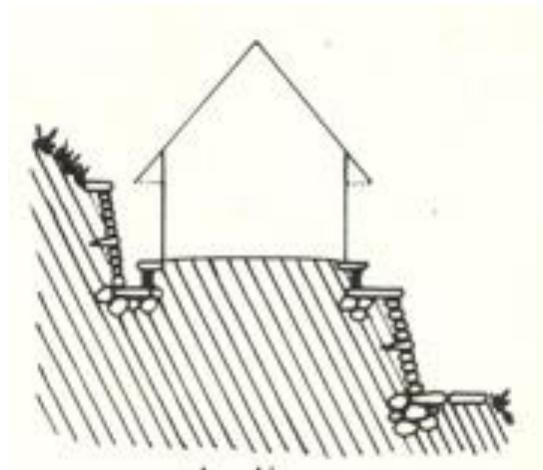
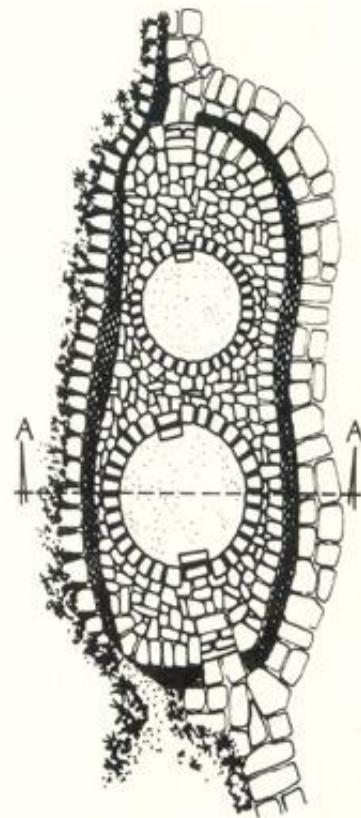




## INGENIERÍA CIVIL Y GEOTÉCNICA EN LA CULTURA TAIRONA



*“Los sitios habitacionales se distinguen por anillos de piedra a manera de cimientos de los bohios, cuyo diámetro alcanzó a veces a 24 m. situados en medio de terrazas apisonadas y ligeramente inclinadas.”.*



Terraza habitacional-Planta y Corte

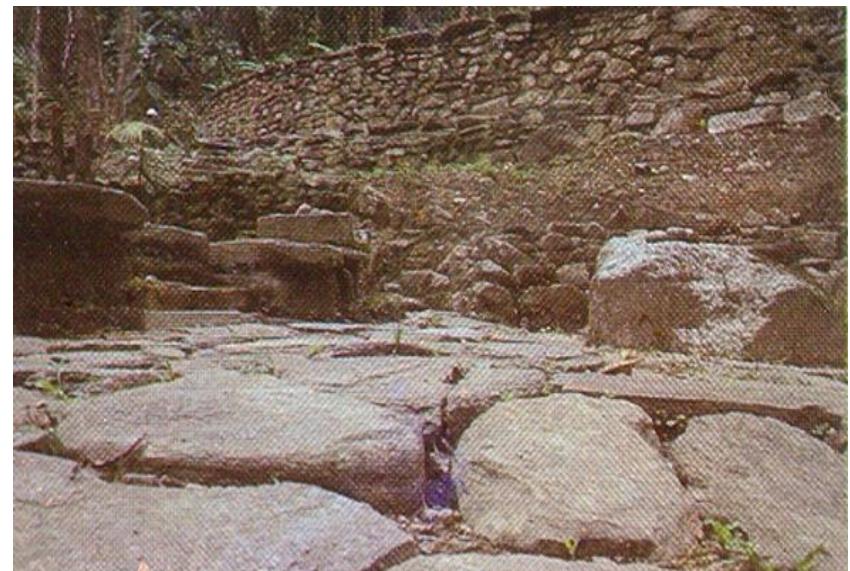


## INGENIERÍA CIVIL Y GEOTÉCNICA EN LA CULTURA TAIRONA

### Muros de contención

*“Sin lugar a dudas, el elemento constructivo que más impresiona en Ciudad Perdida, y en los primeros trabajos de salvamento y restauración hizo pensar que se trataba de una ciudadela fortificada, con fines de guerra y defensa, fueron sus muros de piedra, que iban apareciendo por todas partes, tan pronto se despejaban las malezas y se removían las capas de humus, algunos de imponencia sobrecogedora por sus dimensiones, escalonamientos y altura”*

*“El material empleado en ellos consistió muchas veces en cantos rodados aportados por las quebradas o el río Buritaca, fuente también de piedra de granito empleada en tallar metales, manos de moler y morteros varios. Así mismo se usaron rocas partidas sacadas de diversas afloraciones cercanas. Y las laminares o metamórficas, piedras de sedimento, extraídas de diversas partes, una de ellas la quebrada de la gran cascada, que sirvieron para los enlosados en los patios, plazoletas y ciertos trayectos de los caminos; estas lajas se usaron en los muros como cuñas de sustentación a alturas intermedias, o para formar las goteras”*



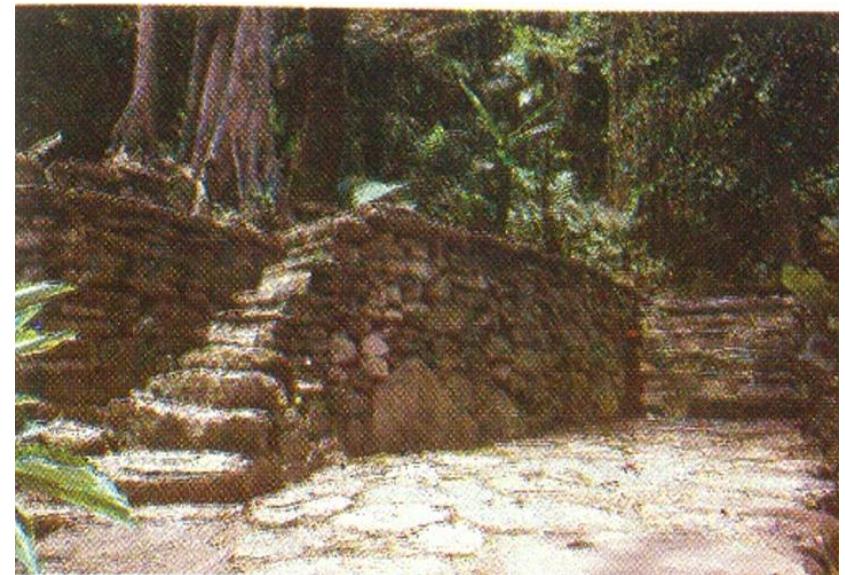


## INGENIERÍA CIVIL Y GEOTÉCNICA EN LA CULTURA TAIRONA

### Muros de contención

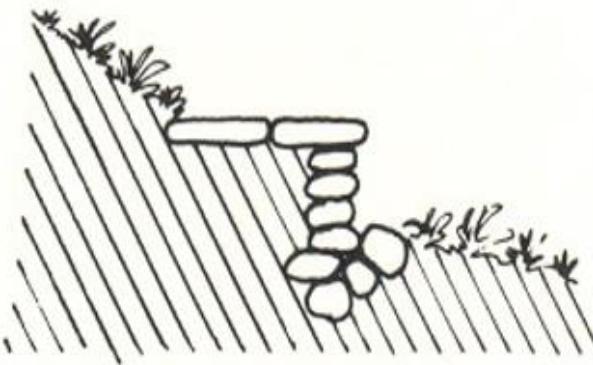
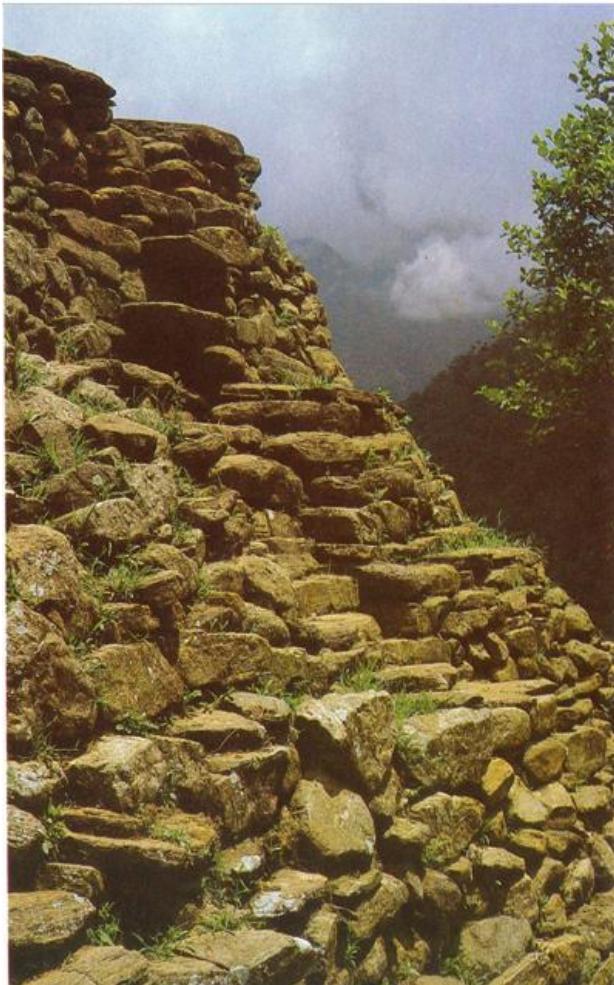
*“En la construcción de los muros no se empleó ninguna mezcla de mortero o concreto. Bajo la superficie de la tierra, los cimientos se conformaron con pedruscos acuñados con cascajo apisonado con la arcilla arenosa propia del lugar, que además de compactar, servía a la gradación menor del filtro. Sobre este cimiento se comenzaron a acomodar las piedras del muro, siempre con una inclinación hacia el interior, y simultáneamente se completaba y compactaba el relleno de la terraza.”*

*“Cuando el muro iba por una altura aproximada de un metro, o un poco más, se colocaba la primera serie de cuñas, que penetraban y se afirmaban con el relleno. Luego se continuaba alzando otro tanto el muro, hasta su remate final que se hacía con lajas colocadas como un borde saliente para formar la gotera, y que ya pertenecían al enlosado del patio o plazoleta. Si el muro debía alcanzar mayores alturas, se procedía a construir los escalonamientos o contrafuertes, que a veces prestaban servicio de corredores o calzadas que se empataban con los caminos. Estos escalonamientos superpuestos son los que dan a ciertos lugares de Ciudad Perdida su aspecto de fortín, y caracterizan los sistemas típicos de las construcciones taironas de las montañas, o lugares empleados.”*

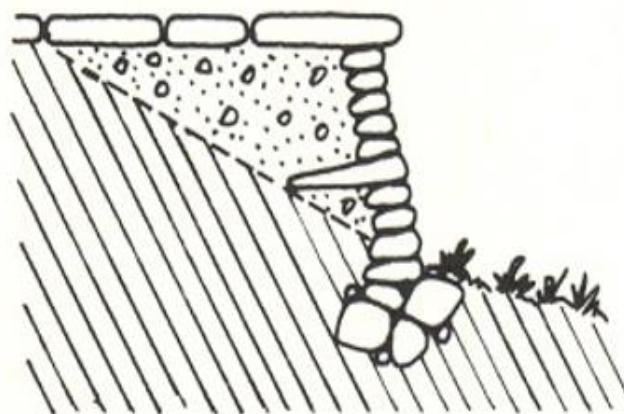




## INGENIERÍA CIVIL Y GEOTÉCNICA EN LA CULTURA TAIRONA



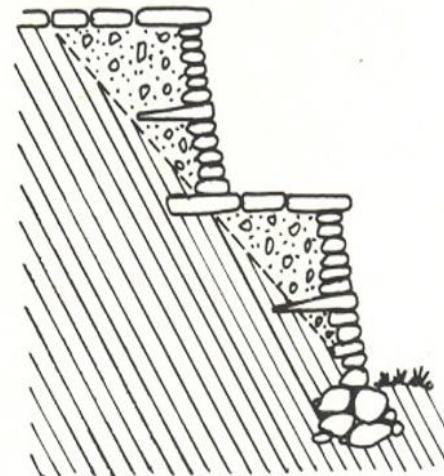
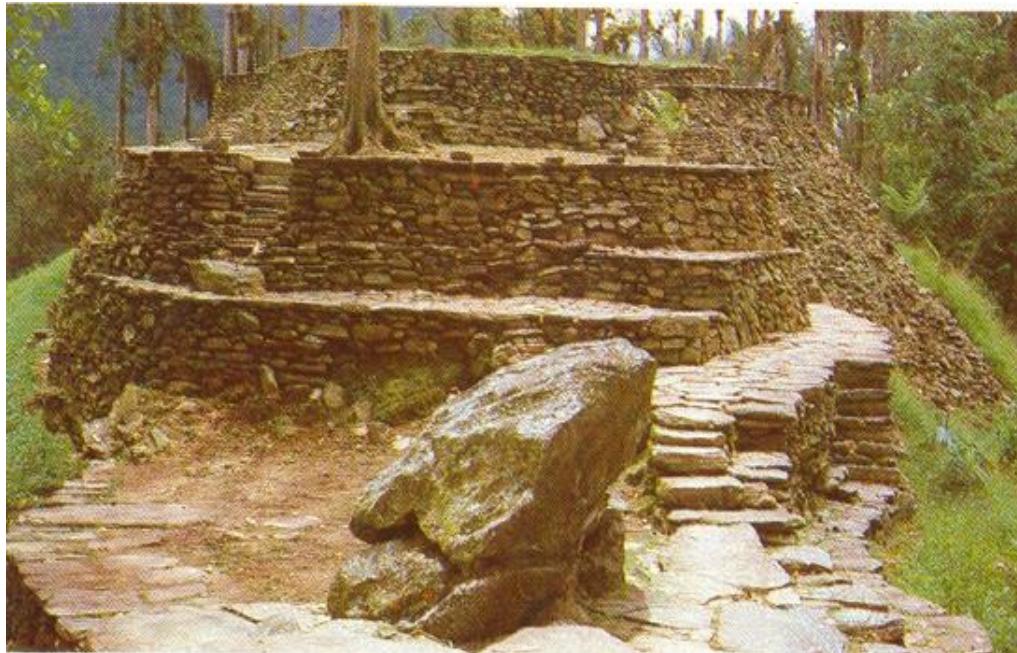
Muro de contención para  
camino



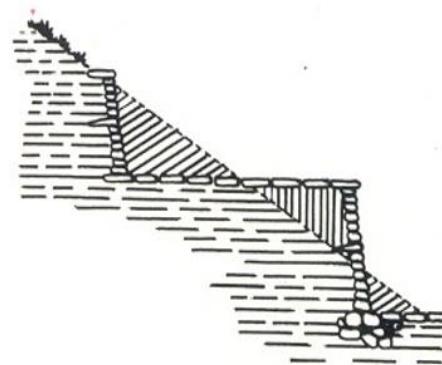
Muro de contención para  
terraza



## INGENIERÍA CIVIL Y GEOTÉCNICA EN LA CULTURA TAIRONA



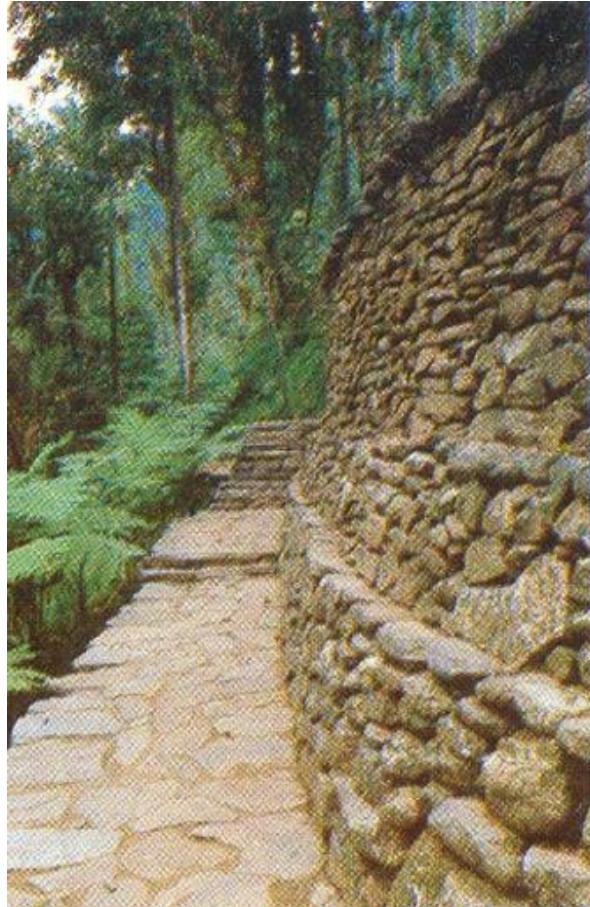
Muro escalonado de contención para terraza



Movimiento de tierra tairona-  
Excavación y relleno para  
terraza de  $\frac{1}{2}$  ladera



## INGENIERÍA CIVIL Y GEOTÉCNICA EN LA CULTURA TAIRONA



*“Son también típicas las largas canales de piedra con tapa, perfectamente talladas y dispuestas, que prestaron servicio como conductoras de aguas; o las largas y anchas calzadas, con lajas a veces enormes, acomodadas con exactitud y a nivel.”*



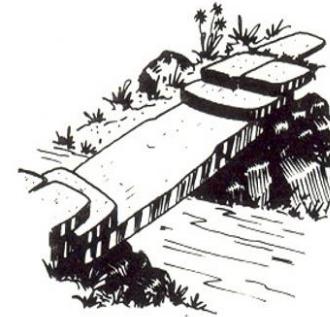
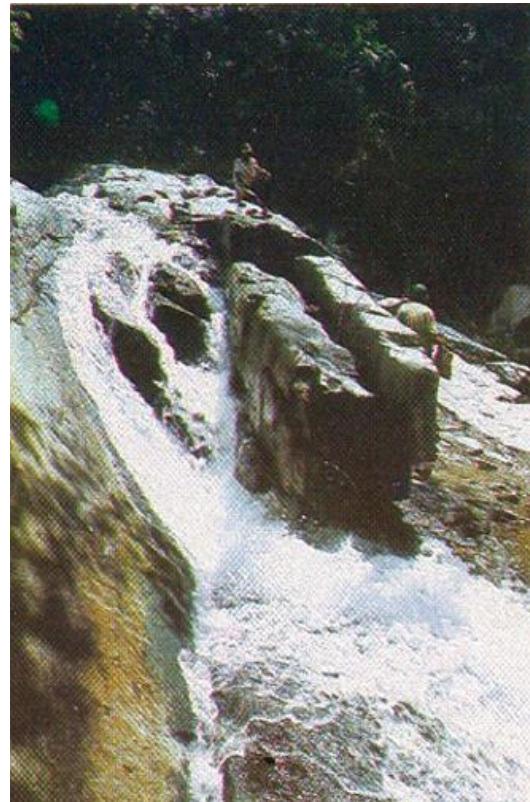
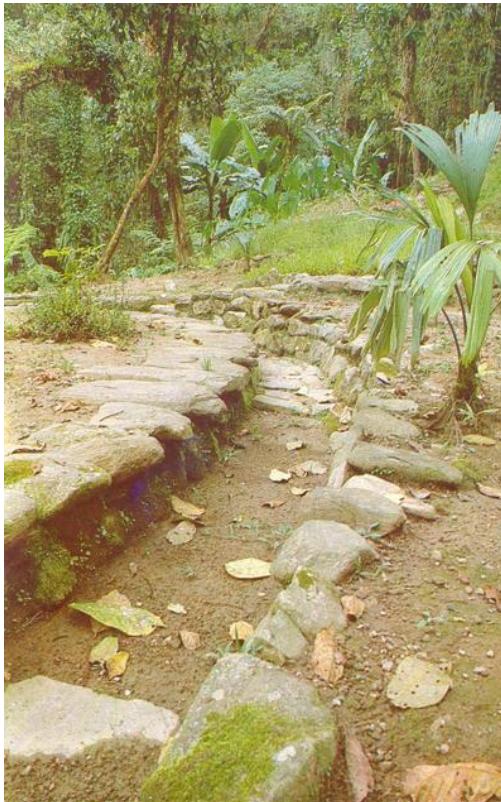
Funcionamiento de los muros como filtro.



## INGENIERÍA CIVIL Y GEOTÉCNICA EN LA CULTURA TAIRONA

### Canales y puentes

La parte del río Buritaca donde está la Ciudad Perdida y las zonas habitacionales de los contornos, son de un índice de pluviosidad muy alto (**4.000 mm**).



Puente lítico



Técnica para movilizar grandes piedras



## DESLIZAMIENTO DE “CUSILLO”, LA UNIÓN - NARIÑO

Como bien se sabe, en un estudio formal de deslizamientos, en resumen se realizan las actividades de exploración del subsuelo, ensayos de campo y laboratorio centrados en la determinación de los parámetros de resistencia al corte, cohesión ( $c$ ) y fricción ( $\phi$ ), y el peso unitario, hallar los mecanismos de falla, establecer la posición del nivel freático y demás condiciones del agua infiltrada, hacer un modelo geológico-geotécnico, análisis de estabilidad, diseño de las obras remediales y preventivas, instrumentación y monitoreo de la eficacia de las obras, y mantenimiento. Como es lógico todo esto demanda tiempo y dinero.

Sin embargo en Colombia, y teniendo en cuenta las condiciones vividas por La Niña de 2010–2011, y aún mas graves que afectan al país en la actualidad (y desde hace algo más de un año y que todo indica que se propagará hasta el año entrante). Es necesario atender la urgencia de los acontecimientos, las dificultades topográficas y climáticas (entre estas los eventos extremos), los recursos económicos y técnicos disponibles, por lo general escasos y los delicados factores socio-políticos y de acción de grupos armados.



## DESLIZAMIENTO DE “CUSILLO”, LA UNIÓN - NARIÑO

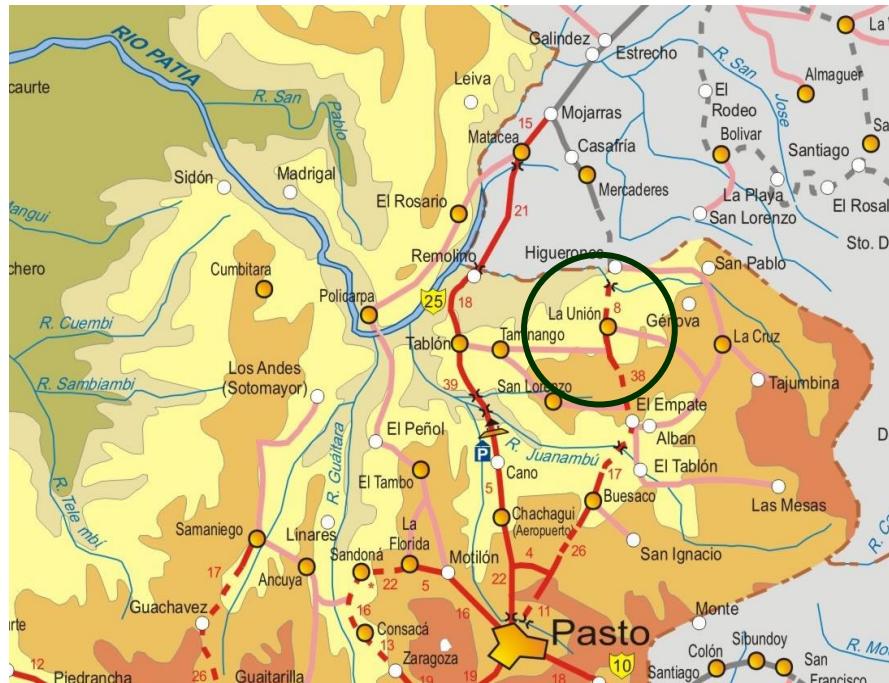
En consecuencia se plantea que es necesario y conveniente aplicar un procedimiento práctico que abarca un estudio foto-geológico, un reconocimiento geológico-geotécnico rápido, diseño en sitio (“aquí y ahora”), incluso trabajando bajo la lluvia, empleo intenso, casi que único de mano de obra local y uso de materiales de construcción disponibles, levantamiento manual de perfiles topográficos estratégicamente seleccionados, e intensa y cuidadosa comunicación (interacción) con la comunidad afectada, y las autoridades locales o regionales.

Es muy necesario brindar la máxima atención a las obras de infraestructura, vías de acceso, sistemas de acueducto y alcantarillado, suministro de energía eléctrica. El geotecnista debe multiplicarse, con gran vocación de servicio social.

En condiciones algo similares a lo descrito hasta ahora, se describirá en forma resumida un estudio geotécnico efectuado en la vereda “Cusillo” del municipio de La Unión, Nariño, enfocado a la reposición de una carretera de gran importancia para la Región.

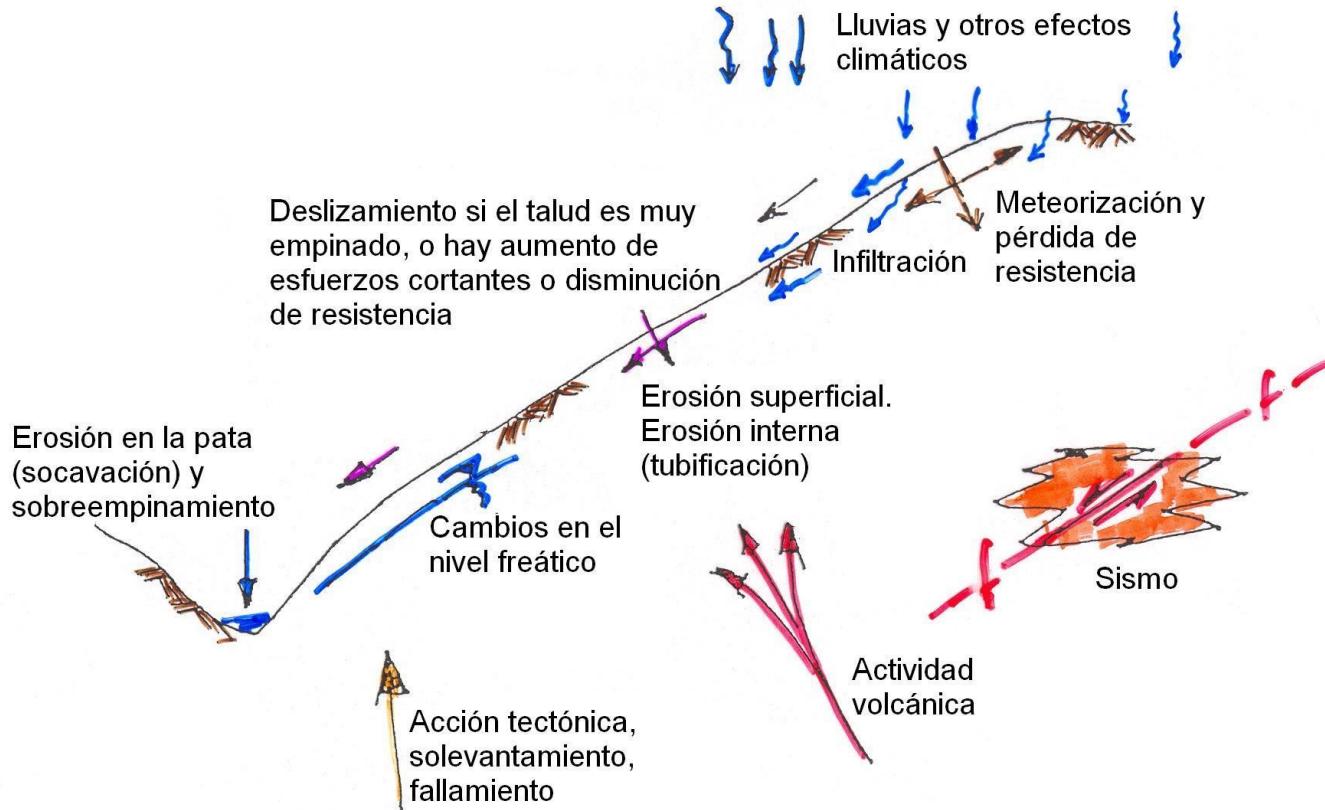


## DESLIZAMIENTO DE “CUSILLO”, LA UNIÓN - NARIÑO





## FACTORES NATURALES QUE PUEDEN LLEVAR A CAUSAR DESLIZAMIENTOS





## DESLIZAMIENTO COMPLEJO DE “CUSILLO”.



1-Vista general del deslizamiento tomada desde la carretera a Belén, adelante del mismo. El movimiento de esta gran masa de suelo destruyó casi 300 m de la carretera La Unión – Belén. En **A** se localiza el escarpe principal del deslizamiento, en **B** el flanco izquierdo y en **C** el flanco derecho, con un flujo de tierras en su vecindad.

En **D** se señala el escarpe principal de un deslizamiento rotacional que ocurrió en la pata del deslizamiento general, y es un deslizamiento “huésped” del principal. La gran actividad que muestra es señal de que persiste la acción de los factores causantes del gran deslizamiento.



## DESLIZAMIENTO COMPLEJO DE “CUSILLO”.



Sector del centro del deslizamiento, con el volcamiento de un gran bloque de la masa de suelo parte del flanco derecho. La línea roja punteada corresponde a la posición aproximada de la carretera original, y con la línea azul se indica el trazado preliminar de una variante.



Arriba uno de los flujos de tierras activos en la mitad inferior del cuerpo del deslizamiento principal. A la izquierda el deslizamiento rotacional D que ocurrió en la pata del deslizamiento principal, y bloqueó el cauce de la quebrada “Cusillo”.



## DESLIZAMIENTO COMPLEJO DE “CUSILLO”.



Parte superior del cuerpo del deslizamiento. Se observa el escarpe principal en A, flanco izquierdo en B y el derecho en C. El intenso agrietamiento y la generación de bloques o cuñas de suelo asentadas o semivolcadas, es característico de movimientos eminentemente translacionales. Notar las capas de ceniza volcánica procedente de antiguas erupciones del Volcán “Doña Juana”, que se localiza varios kilómetros al oriente de La Unión.

En el recuadro de la izquierda, dos de los integrantes de un grupo de “guaqueros” que inspeccionaban túneles que en investigación realizada después del trabajo de campo, se supo que podrían haber sido hechos por indígenas **Quillacinges**, que acostumbraban hacer túneles a partir de la tumba de alguno de sus dignatarios.





## DESLIZAMIENTO COMPLEJO DE “CUSILLO”.



Aspectos de la inspección geotécnica del deslizamiento. Al fondo se aprecia el terreno de origen volcánico de la región; En el recuadro sector del volcán Doña Juana, que se encuentra al oriente de la zona en estudio.

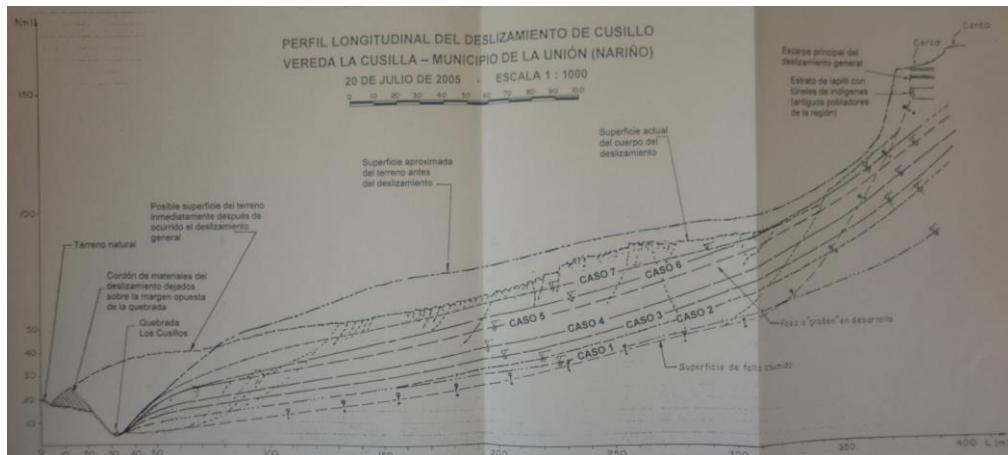




## DESLIZAMIENTO COMPLEJO DE “CUSILLO”.

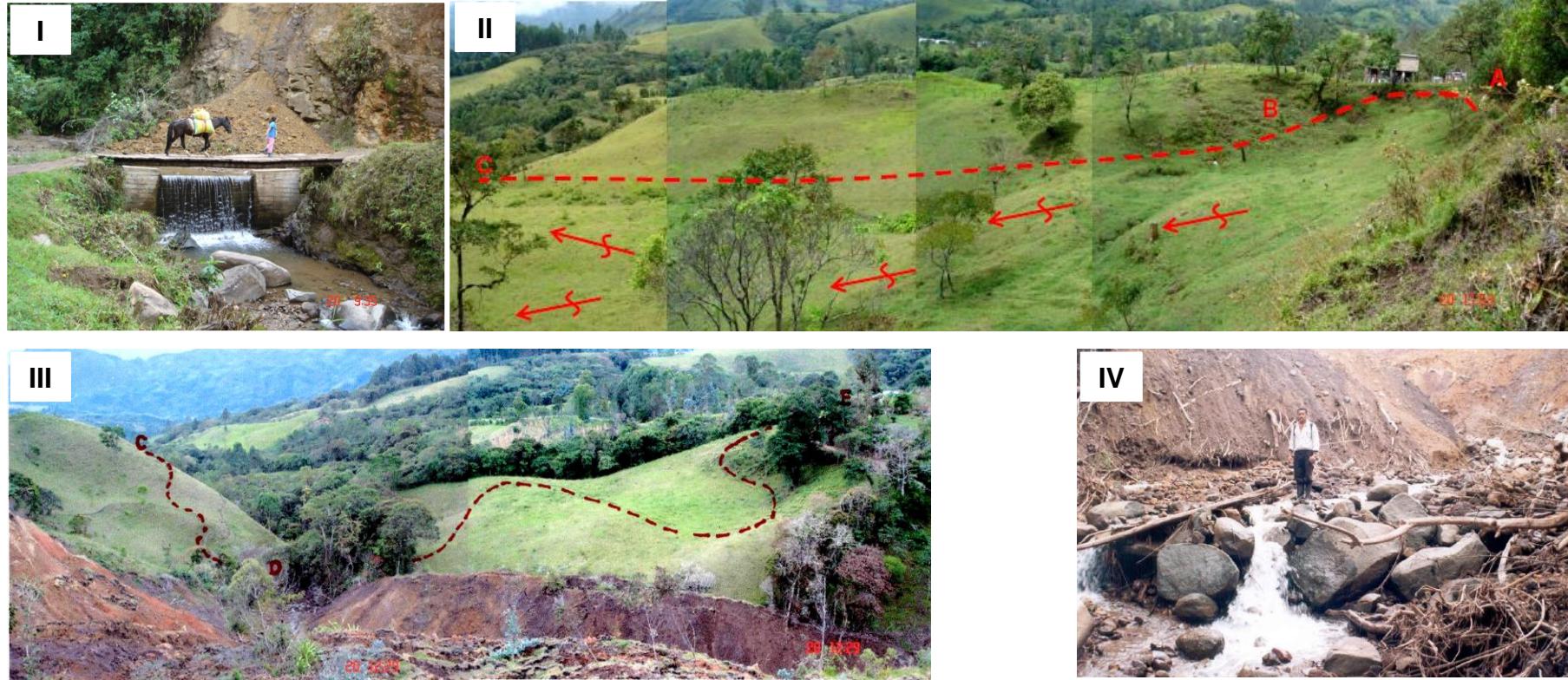


En desarrollo del trabajo de campo se hicieron presentes los habitantes de la zona, muy interesados en la reconstrucción de la carretera. Se realizó una reunión explicativa en una escuela rural vecina al deslizamiento.





## DESLIZAMIENTO COMPLEJO DE “CUSILLO”.



La solución práctica, económica y que pudiera realizarse en el menor tiempo posible, para restituir el transporte regional (ver la fotografía I), consistió en construir una variante que eludiera tanto el deslizamiento como otras zonas inestables en reptación y flujo de tierras (fotografías II y III). El cruce de la quebrada “Cusillo” se planteó con una placa de concreto alejada de los flancos de deslizamientos, construida sobre un enrocado de protección (ver la fotografía IV). Además, se recomendó construir varios diques de enrocado aguas arriba del cruce, aprovechando grandes bloques rocosos depositados en la quebrada.



## IMPORTANCIA DEL TRABAJO DE CAMPO EN LA GEOTECNIA

En consonancia con lo explicado al comienzo del capítulo 2 (Deslizamiento de Cusillo), se considera de interés reflexionar con la rapidez que proporciona el tiempo disponible para esta charla, sobre la importancia que tiene la inspección o reconocimiento geotécnico tanto en el estudio, evaluación y solución de deslizamientos y otros tipos de movimientos de falla del terreno, en la ejecución de inventarios geotécnicos, en la planeación y desarrollo del mantenimiento de obras de infraestructura, en especial los proyectos de gran desarrollo lineal como carreteras, conducciones de acueducto y alcantarillado, oleoductos, gasoductos y poliductos, líneas de transmisión eléctrica, y otros, que también son llamados “líneas vitales” aludiendo a su importancia para la vida de la comunidad.

Al respecto se cuenta con formatos como el de la figura 1, como ejemplo sencillo, pues las diversas compañías consultoras y entidades relacionadas con dichos proyectos cuentan con formatos mucho más detallados y que cubren un gran número de factores, datos, observaciones, mediciones, entrevistas con los habitantes de la zona del proyecto y con los encargados de la operación y mantenimiento. Además, en muchas publicaciones se presentan por expertos un buen número de formatos, tablas y desde luego en la ayuda del computador se puede hacer mucho en este tema.

TRAMO:		No.
LOCALIZACION DEL SITIO	Población: Altitud: Clima:	Fecha: Corriente de agua: Fotos:
RELEVE	Plano: <input type="checkbox"/> Ondulado: <input type="checkbox"/>	Montañoso: <input type="checkbox"/> Escarpado: <input type="checkbox"/> Inundable: <input type="checkbox"/>
PENDIENTE PROMEDIO:	Longitudinal: <input type="checkbox"/>	Transversal: <input type="checkbox"/>
VEGETACION	Selva: <input type="checkbox"/> Bosque: <input type="checkbox"/> Pasto: <input type="checkbox"/> Cultivo: <input type="checkbox"/>	Area afectada: _____ m <sup>2</sup> Notas: _____
EROSION	Incipiente: <input type="checkbox"/> Ligeras: <input type="checkbox"/> Avanzada: <input type="checkbox"/> Erosión Intensa: <input type="checkbox"/> Antiguas: <input type="checkbox"/> Cárcavas: <input type="checkbox"/>	Continua: <input type="checkbox"/> En zonas: <input type="checkbox"/>
	Medidas Correctivas: Sí: <input type="checkbox"/> No: <input type="checkbox"/>	
	Presas: <input type="checkbox"/> Reforestación: <input type="checkbox"/>	
	Diques: <input type="checkbox"/> Trinchos: <input type="checkbox"/>	
	Terreno: <input type="checkbox"/> Canales: <input type="checkbox"/>	
	Barr. Vivas: <input type="checkbox"/> Otros: <input type="checkbox"/>	
GEOLOGIA	Descripción de la unidad geológica:	
	Condiciones de la roca:	
	Fragil: <input type="checkbox"/> Masiva: <input type="checkbox"/>	Estratificación: Favorable: <input type="checkbox"/>
	Meteorizada: <input type="checkbox"/> Desclasada: <input type="checkbox"/>	Desfavorable: <input type="checkbox"/>
	Fracturada: <input type="checkbox"/> Fallas: <input type="checkbox"/>	Indiferente: <input type="checkbox"/>
	Pantano: <input type="checkbox"/>	
SUELO	Residual: Sí: <input type="checkbox"/> No: <input type="checkbox"/>	
	Descripción:	
	Takas: <input type="checkbox"/> Cono: <input type="checkbox"/>	Notas: _____
	Coluvión: <input type="checkbox"/> Terraza: <input type="checkbox"/>	
	Flujos: <input type="checkbox"/> Aliván: <input type="checkbox"/>	
	Pantano: <input type="checkbox"/>	
CAUCE	Espesor:	
	Torrencial: <input type="checkbox"/> Materiales del cauce: _____	
	Recto: <input type="checkbox"/> Márgen Izquierda: _____	Altura: _____ m
	Trenzado: <input type="checkbox"/> Lecho: _____	Ancho: _____ m
	Meandrífico: <input type="checkbox"/> Márgen derecha: _____	Altura: _____ m
	Delta: <input type="checkbox"/>	
Pendiente: % Socavación: _____		
Radio de curvatura: m		
DESLIZAMIENTO:		
Roca: <input type="checkbox"/> Suelo: <input type="checkbox"/>	Estado actual:	POSIBLES CAUSAS
Rotacional: <input type="checkbox"/> Caídas: <input type="checkbox"/> Hujo de derrito: <input type="checkbox"/>	Activo: <input type="checkbox"/>	Deslizamiento de la pala: <input type="checkbox"/>
Plana: <input type="checkbox"/> Volco: <input type="checkbox"/> Hujo de fértil: <input type="checkbox"/>	Inestable: <input type="checkbox"/>	Abandono en la ladera: <input type="checkbox"/>
En corte: <input type="checkbox"/> Transversal: <input type="checkbox"/> Hujo de fondo: <input type="checkbox"/>	Avanzado: <input type="checkbox"/>	Geología: <input type="checkbox"/>
Caídas: <input type="checkbox"/> Rotacional: <input type="checkbox"/> Repliegue: <input type="checkbox"/>	Potencial: <input type="checkbox"/>	Movimiento: <input type="checkbox"/>
	Estabilizado: <input type="checkbox"/>	Talud: <input type="checkbox"/>
		Antiguo: <input type="checkbox"/>
		Monzón: <input type="checkbox"/>
		Terremoto: <input type="checkbox"/>
		Actividad sísmica: <input type="checkbox"/>
		Corte: <input type="checkbox"/>
		Deslizamiento: <input type="checkbox"/>
		Deforestación: <input type="checkbox"/>
		Otros: <input type="checkbox"/>

Figura 1 Formato detallado de campo.



## IMPORTANCIA DEL TRABAJO DE CAMPO EN LA GEOTECNIA

Sin embargo, y de nuevo nos referimos a las dificultades con las cuales se tropieza la geotecnia en nuestro país como las mencionadas en el capítulo 2, y sobretodo la inseguridad (el secuestro y extorsión, los ataques armados, etc.). Además no puede ignorarse la pandemia y la situación económica del país, y en la actualidad, destacamos el alto numero departamentos y municipios, poblaciones importantes con posibilidades económicas para superar lo problemas, y con un alto número de poblaciones medianas y pequeñas, y comunidades rurales, en la cuales escasean los recursos. Tal vez deberán adicionarse las dificultades económicas y la falta de conocimiento práctico de los encargados de dirigir o realizar el trabajo de campo.

Haciendo a un lado las dificultades anotadas, y mas bien en el deseo de colaborar en beneficio de esta actividad geotécnica, se considera que debemos preparar a los futuros Ingenieros Civiles (también a los Geólogos e Ingenieros Geólogos) desde las aulas universitarias, en la forma de llevar a cabo y los beneficios de los reconocimientos de campo. Al respecto se presenta a continuación una descripción gráfica de “salidas de campo” de cursos de Estabilidad de Taludes, Riesgos Geotécnicos y Evaluación Geoambiental de proyectos lineales, bajo la dirección del autor de estas notas, tanto en la Universidad Nacional como en la Escuela Colombiana de Ingeniería.



## IMPORTANCIA DEL TRABAJO DE CAMPO EN LA GEOTECNIA



1: Túnel falso, deslizamiento del Cune, Villeta.



2: Lutitas, Villeta.



3: Deslizamiento de areniscas con intercalaciones de arcillolitas altamente meteorizadas. Alto de la “Mona”.



4 y 5: Vistas frontales de 3.



6: Talud con revestimiento de concreto lanzado.



## IMPORTANCIA DEL TRABAJO DE CAMPO EN LA GEOTECNIA



7:Descripciones de viaje. 8 y 9:Observación de depósitos piroclásticos del Volcán Cerro Bravo, desde “Delgaditas” carretera Fresno - Manizales.



10: Volcán Cerro Bravo. 11 y 12: Conferencia de la Geól. María Luisa Molsalve, Observatorio Vulcanológico de Caldas, Manizales.



## IMPORTANCIA DEL TRABAJO DE CAMPO EN LA GEOTECNIA



13: Geól. Mauricio Diaz e Ing. Cristian Zapata (Monitor de la salida). 14 y 15: Conferencia del Profesor Gonzalo Duque. Terraza de la Facultad de Arquitectura, U.N., Manizales.



16,17 y 18: Inspección de obras remediales, carretera Manizales – La Esperanza.

**GEOTECNIA ES ARTE, OFICIO, TÉCNICA, CIENCIA**



## IMPORTANCIA DEL TRABAJO DE CAMPO EN LA GEOTECNIA



19,20 y 21: Almuerzo en el restaurante “La Esperanza”, donde se desvía la carretera al Ruiz y Murillo (Tolima) de la principal Manizales - Fresno



22,23 y 24: Recorrido La Esperanza – cercanías del Volcán Nevado del Ruiz.



## IMPORTANCIA DEL TRABAJO DE CAMPO EN LA GEOTECNIA



25,26 y 27: Capas de ceniza de diversas erupciones, campo de frailejón y valle glacial.



28: Restos del cráter adventicio “La Piraña” o “La Pirámide”. 29 y 30: Observación en vecindades del Cráter Arenas y fumarola



## IMPORTANCIA DEL TRABAJO DE CAMPO EN LA GEOTECNIA



31: Nacimiento del río Azufrado, por el cual se desplazó el volumen principal del lahar de Armero. 32: Estudiantes de postgrado en Geotecnia U.N. y 33: Cercanías del nacimiento del río Lagunilla que recibe al Azufrado varios km más abajo y llega a Armero.



34: Coladas de lava antiguas del Ruiz en vecindades del Líbano, Tolima. 35: Observación del valle donde existió Armero 36: Ruinas en Armero



## IMPORTANCIA DEL TRABAJO DE CAMPO EN LA GEOTECNIA



37 y 38 : Armero antes y después del desastre 39: Oración del Papa Juan Pablo II (hoy en día Santo) ante la cruz conmemorativa de la tragedia, visita del 6 de julio de 1986. Fotografías que se encuentran en el museo de Armero.



40, 41 y 42: Observación de lodolitas, carretera Cambao – Albán, sector Vianí – Guayabal de Síquima.



## CONCLUSIONES

1. En relación con la cultura Tairona se encuentra un buen volumen de información, más que todo de las ciencias humanas. La Sierra Nevada de Santa Marta ha sido objeto de estudios geológicos de importancia y utilidad en el conocimiento de esta zona del país. Tal vez ha hecho falta el tratamiento histórico asociado con la Ingeniería Civil y la Geotecnia; si lo hay conviene una mayor difusión; si no lo hay, confió en que esta noticia despierte interés por el tema siguiendo las maravillosas obras de Mayas e Incas. Por el momento es lamentable el peligro en que se encuentran las obras descritas, en general la cultura Tairona por acción del narcotráfico, la siembra de coca y marihuana y la avidez que se muestra por ocupar las áreas vecinas al litoral del Caribe con fines turísticos o similares.
2. Lo tratado en el capítulo del deslizamiento de Cusillo permite ilustrar el aspecto de servicio social de la Geotecnia. Basta agregar que en desarrollo del estudio, cuando las autoridades municipales y dirigentes cívicos se enteraron de la presencia de alguien experto en temas de estabilidad del terreno solicitaron (y se aceptó con todo gusto) el examen de deslizamientos incipientes que amenazaban el colegio principal de la población y calles vecinas.

En el caso de Cusiilo técnicamente puede asignarse a una aplicación del método observacional (Peck, 1969). Al respecto me permito transcribir el siguiente texto de Terzaghi tomado de Christian, J.E y Baecher C. B (2011)\*:



## CONCLUSIONES

Problema No. 6: “Connecting the observational method to Buyersian Updating”

“Cerca del final de su vida, Terzaghi escribió lo siguiente: los proyectos de ingeniería de suelos (...) sugieren una gran cantidad de esfuerzo y trabajo, consignando en forma solamente en forma aproximada valores para las constantes físicas que aparecen en las ecuaciones. Los resultados de los cálculos no son más que hipótesis de trabajo sometido a confirmación o modificaciones durante la construcción. Hasta ahora solo se han utilizado dos métodos para enfrentar las incertidumbres inevitables: adoptar un factor de seguridad conservador, o hacer suposiciones de acuerdo con la experiencia promedio general; el primer método es ineficiente, el segundo es peligroso. Se ha dispuesto de un tercer método que utiliza el método experimental cuyos elementos básicos se resumen en la frase “aprender a medida que actúa”: Base el diseño en cualquier información que se consiga. Haga un inventario detallado de todas las posibles diferencias entre la realidad y las suposiciones. Luego calcule varias cantidades que puedan medirse en el terreno, con base en las suposiciones originales. A partir de los resultados de tales mediciones complete gradualmente y cierre los vacíos en el conocimiento y, si es necesario modifique el diseño durante la construcción.

Los autores citados agregan que dicho método requiere que se vaya recolectando información a medida que se proceda con el proyecto de manera que puedan irse actualizando el diseño y la construcción. También se requiere que haya un plan para el manejo de las condiciones cambiantes y advierten que acudir al método observacional sin entrar en la posibilidad de obtener información precisa actualizada lleva a un resultado insatisfactorio.

*John T. Christian and B. Baecher, Geotechnical Reliability – Ten Unresolved Problem Geo – Strata*  
[www.asce.org/geo](http://www.asce.org/geo)



## CONCLUSIONES

3. Para finalizar, puedo comentar que las técnicas docentes que he desarrollado a lo largo de 56 años de docencia en la Universidad Nacional, incluyendo de manera especial las salidas de campo se han constituido en un complemento interesante de los cursos de geotecnia para muchos estudiantes que han preferido la geotecnia para su especialización, postgrado, ejercicio profesional y que hoy en día son expertos geotecnistas, varios de ellos en este congreso



# ¡GRACIAS!

¿Preguntas?

[mgarcial@ingenieriygeotecnia.com](mailto:mgarcial@ingenieriygeotecnia.com)

XVII CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTECNIA

15 NOVIEMBRE 2022



# ADVANCES IN REGIONAL SEISMIC LANDSLIDE ASSESSMENT



---

**ELLEN M. RATHJE, PHD, PE, F. ASCE**

Janet S. Cockrell Chair, The University of Texas at Austin

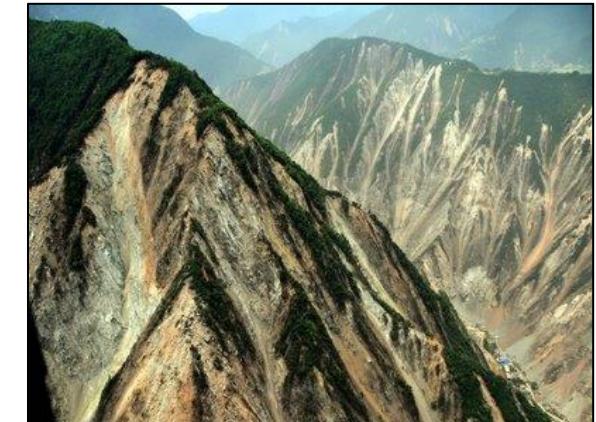
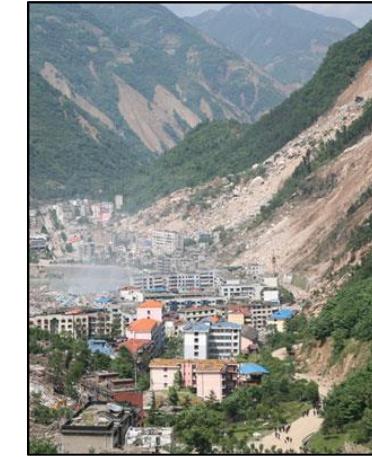
**OLAIDE OJOMO**

Graduate Research Assistant, The University of Texas at Austin

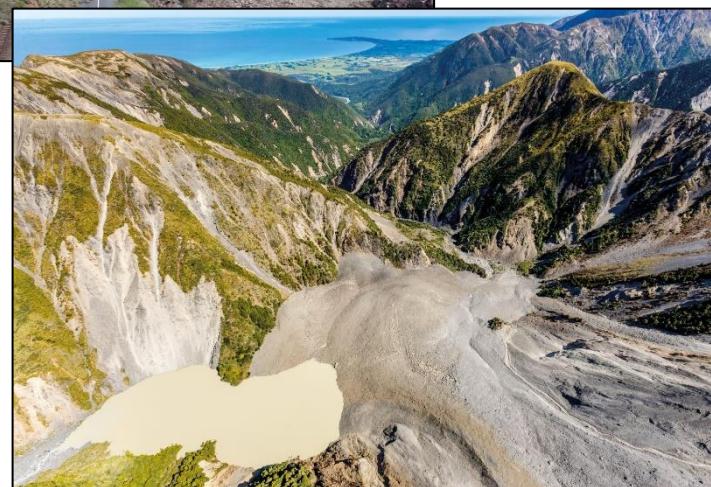
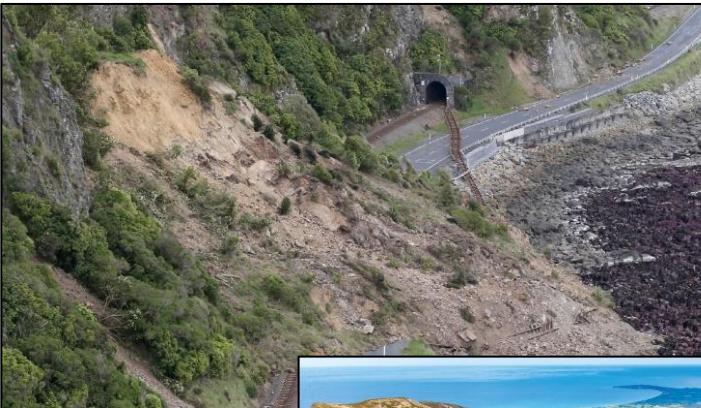
# Earthquake-Induced Landslides



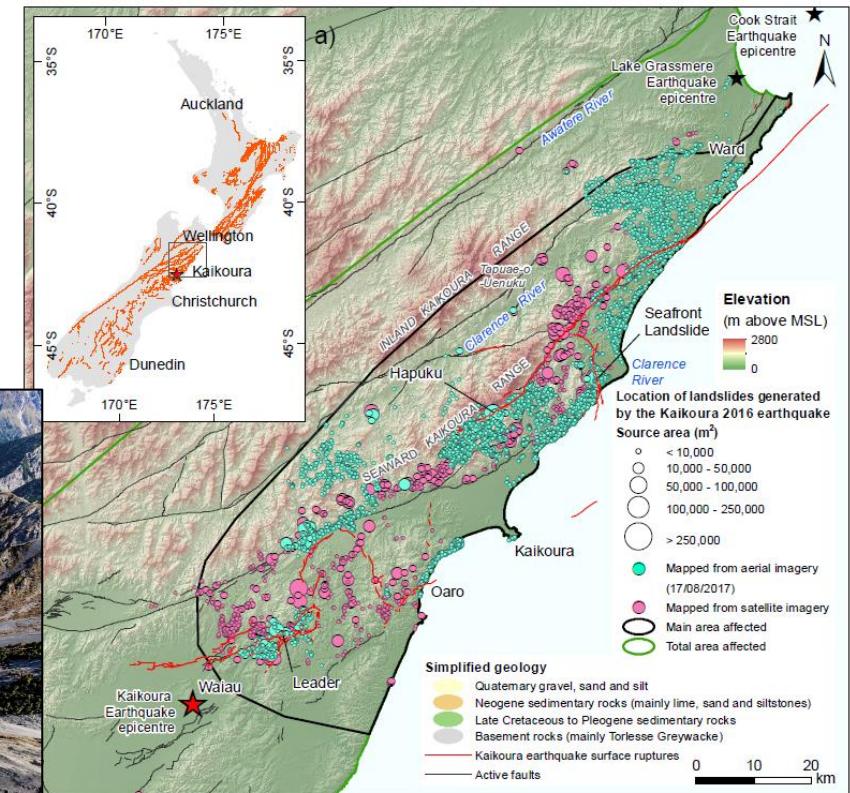
- 1994 Northridge, USA
- 1999 Chi-Chi, Taiwan
- 2008 Wenchuan, China
- 2016 Kaikoura, New Zealand



# Why Regional Scale?

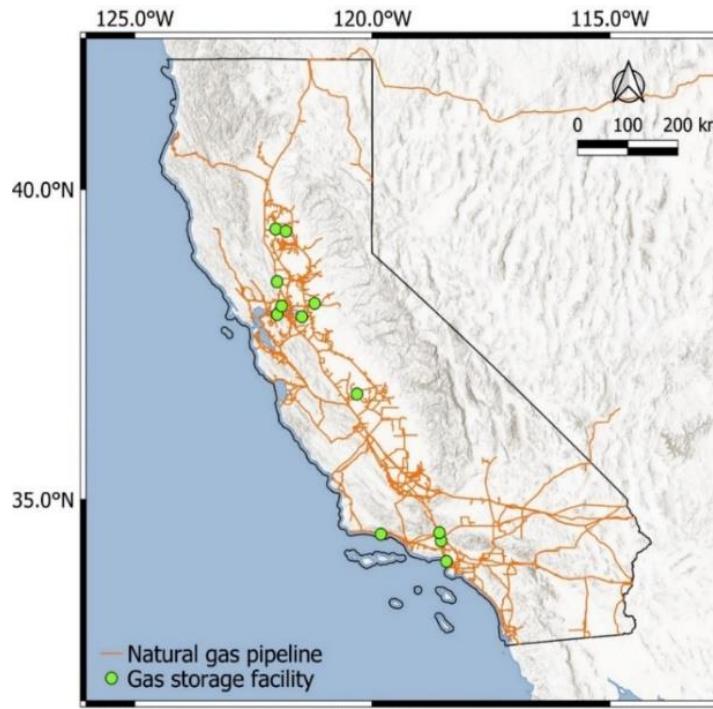


**2016 Kaikoura, NZ**



Massey et al. (2018) BSSA

# Why Regional Scale?



**Distributed Infrastructure**

# Seismic Landslide Assessment for Evaluating Pipeline Risk



- Requires an assessment of landslide location, size, displacement, direction of movement
- Funding from California Energy Commission (PI: Bozorgnia)
- Geohazards team
  - UT Austin (Rathje), UCLA (Stewart), Caltech (Asimaki)

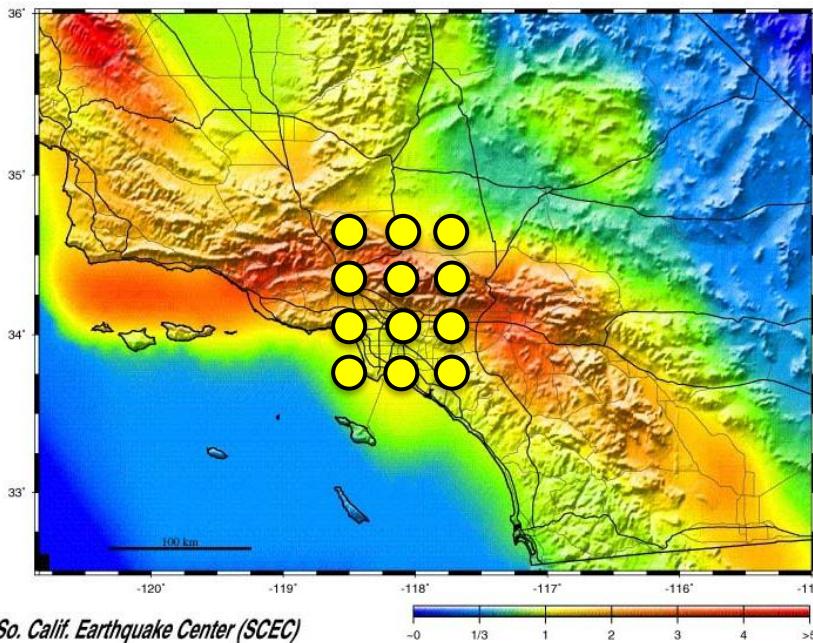
# Outline

- ***Ground motion characterization***
  - Scenario-based ground motions that match ground motion hazard curves
- ***Landslide assessment***
  - General sliding block methodology
  - Displacement analysis incorporating uncertainties
  - Identification of landslide zones
  - Development of statistical distributions of landslide size, displacement, and direction of movement

***Applied to the entire State of California***

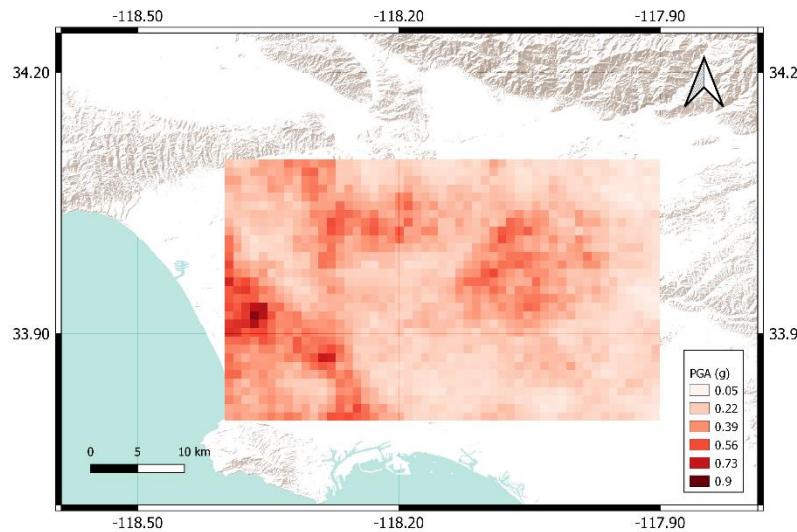
# Ground Motion Hazard

## Hazard Map



- Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) performed at individual locations
- Ground motion interpolated into a single map
- Appropriate for individual facilities
- **Not** appropriate for distributed facilities
  - These motions do not occur in a single event

# Ground Motion Hazard: Scenario Events



- Perform PSHA at individual locations
- Identify earthquake scenarios ( $M$ , fault) from disaggregation
- Select scenarios that together approximately match hazard at all locations considered
- For each scenario, develop ground motion (GM) map that includes spatial correlation

# Outline

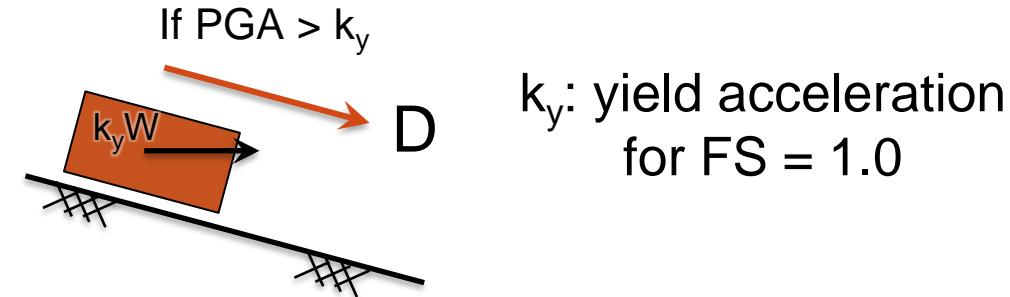
- ***Ground motion characterization***
  - Scenario-based ground motions that match ground motion hazard curves
- ***Landslide assessment***
  - General sliding block methodology
  - Displacement analysis incorporating uncertainties
  - Identification of landslides zones
  - Development of statistical distribution of landslide size, displacement, and direction of movement

# Outline

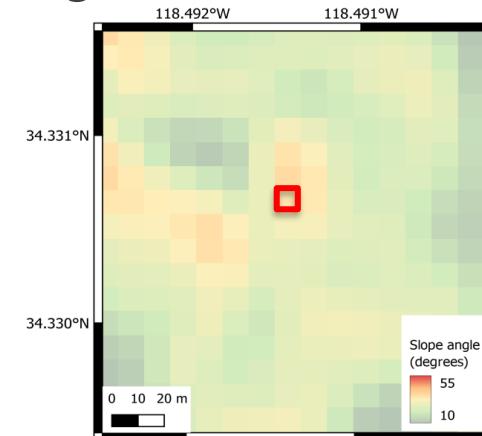
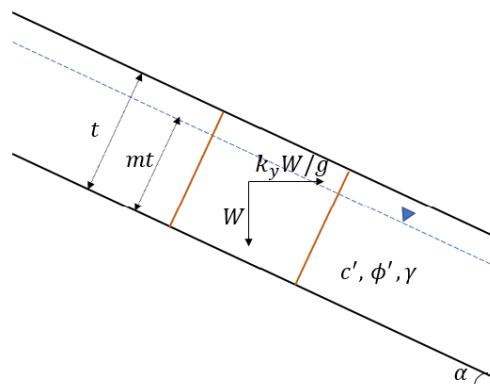
- ***Ground motion characterization***
  - Scenario-based ground motions that match ground motion hazard curves
- ***Landslide assessment***
  - General sliding block methodology
  - Displacement analysis incorporating uncertainties
  - Identification of landslides zones
  - Development of statistical distribution of landslide size, displacement, and direction of movement

# Landslide Assessment: General Methodology

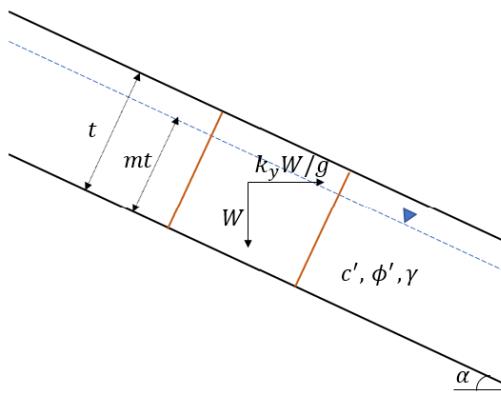
- Sliding block approach



- Infinite slope model applied to 10-m grid



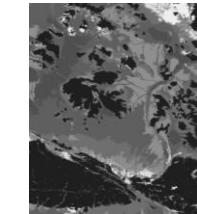
# Yield acceleration ( $k_y$ ) calculation



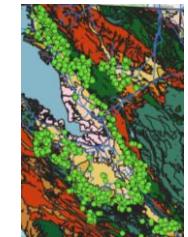
$$k_y = \frac{(FS-1)g}{(\cos \alpha \cdot \tan \phi' + 1/\tan \alpha)}$$

$$FS = \frac{c'}{\gamma \cdot t \cdot \sin \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} (1 - m \cdot \gamma_w / \gamma)$$

- Slope angle:  $\alpha \rightarrow$  DEM



- Strength:  $c', \phi' \rightarrow$  Geology and borehole data

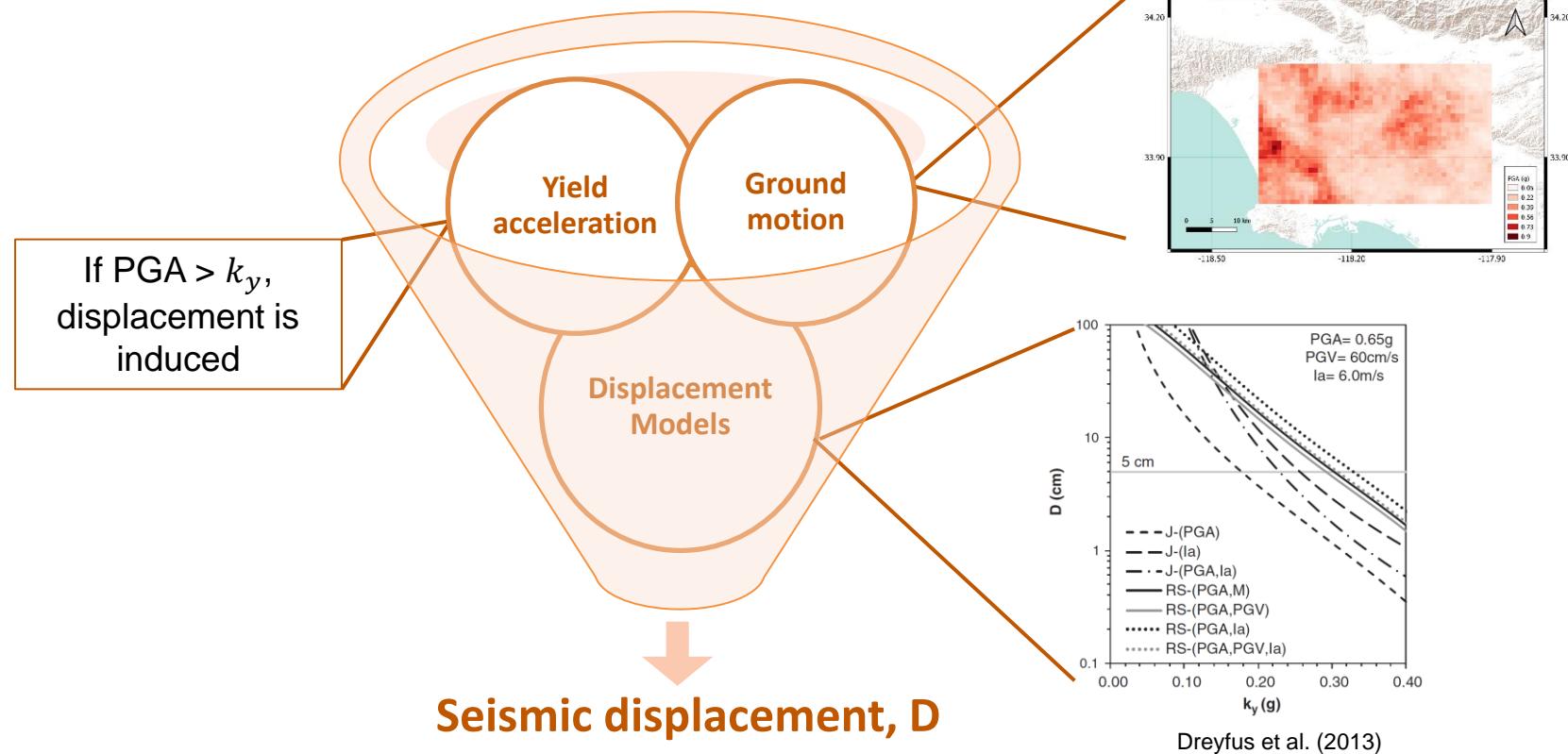


- Thickness of failure surface:  $t \rightarrow$  Judgement



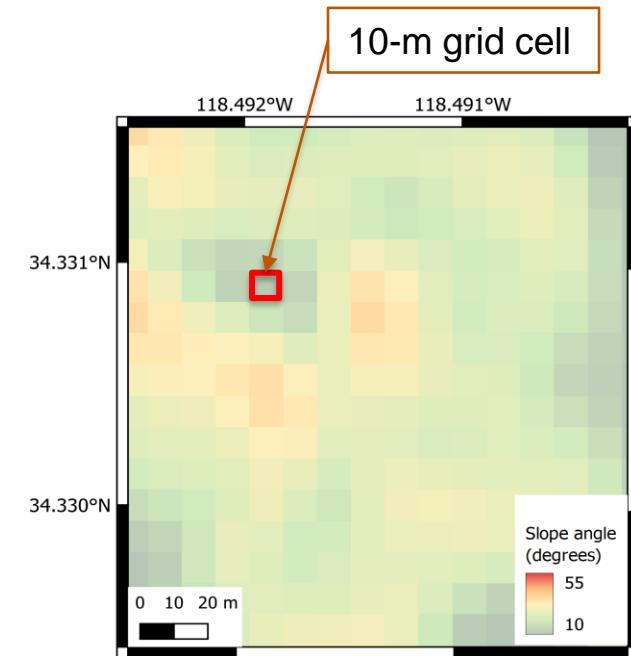
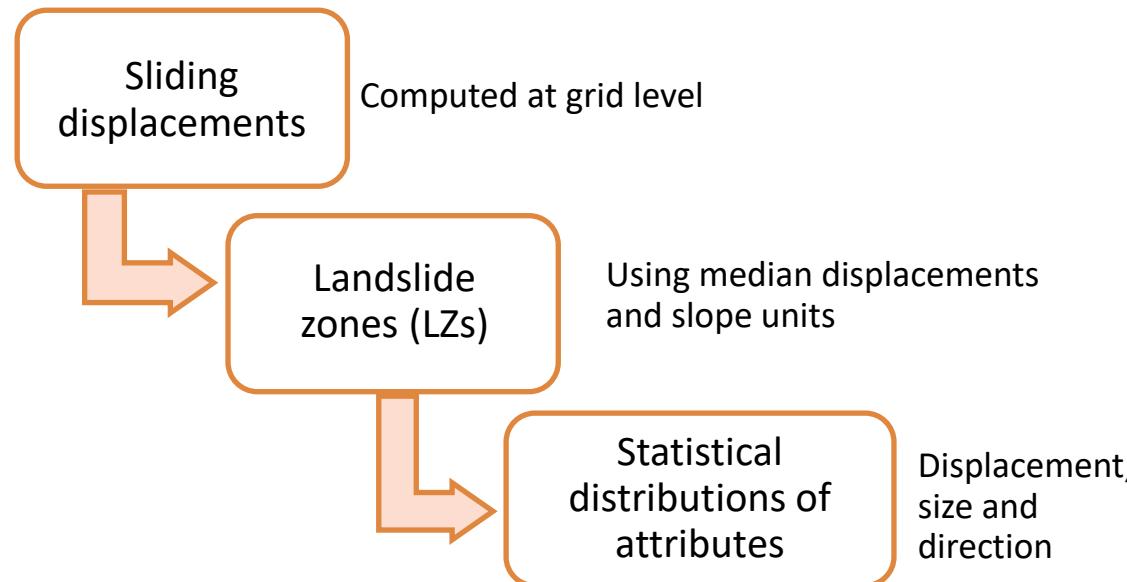
- Saturation thickness:  $m \rightarrow$  Well data

# Estimating seismic slope displacements



# Landslide Assessment: General Methodology

***Translate grid-based displacements into realistic landslide zones***

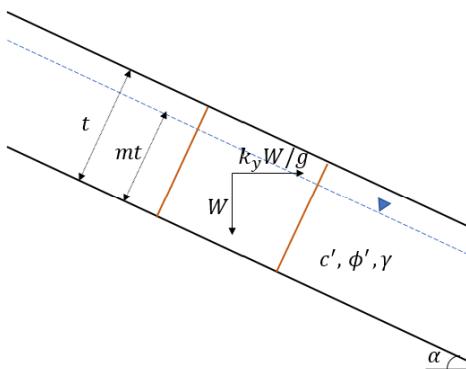


# Outline

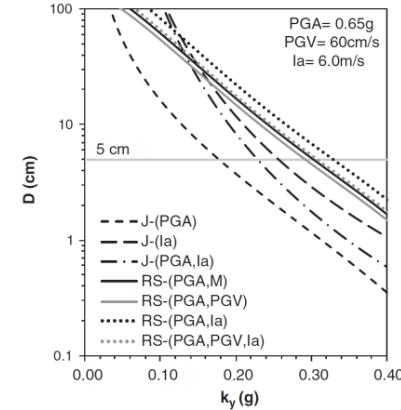
- ***Ground motion characterization***
  - Scenario-based ground motions that match ground motion hazard curves
- ***Landslide assessment***
  - General sliding block methodology
  - Displacement analysis incorporating uncertainties
  - Identification of landslides zones
  - Development of statistical distribution of landslide size, displacement, and direction of movement

# Sources of Uncertainty

$$k_y = f(xn(c', \phi', t, m \text{ or } gwt))$$



## Displacement Model



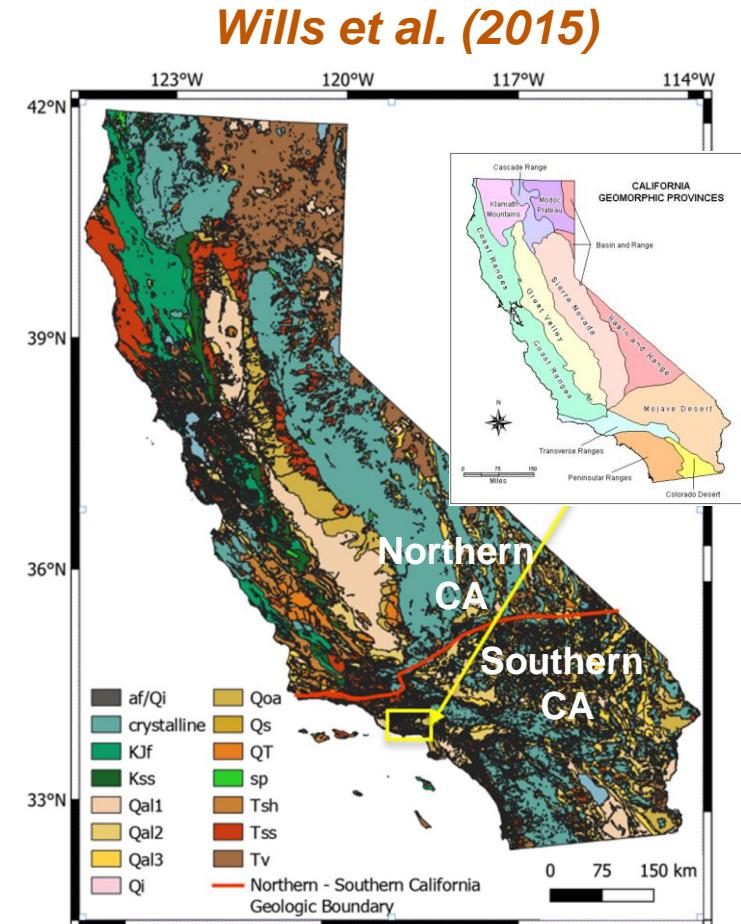
- $k_y$ : Define statistical distributions of input parameters
- Displ Models: Consider alternative models and their  $\sigma$

**Logic Tree**

# Regional Geology

**10 geologic units on slopes > 10°**

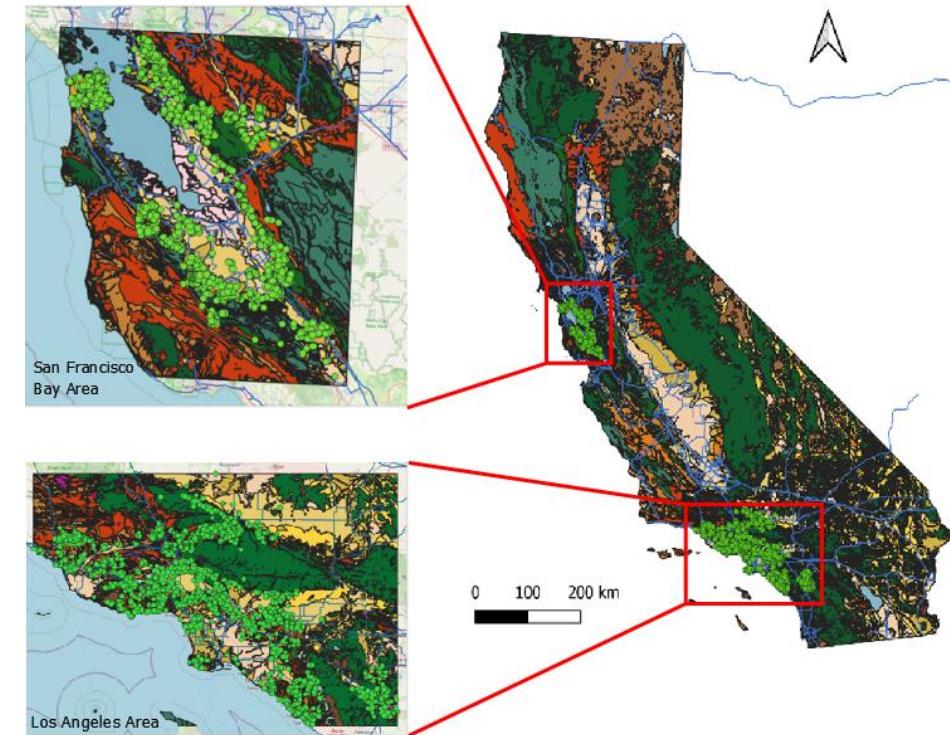
Map Symbol	Geologic Unit Description	% Area Covered
Qal3	Quaternary (Holocene) alluvium on slopes steeper than 2%	10
Qoa	Quaternary (older Pleistocene) alluvium	10
QT	Quaternary to Tertiary alluvial deposits such as Saugus of SoCal, Paso Robles of central coast ranges, and Santa Clara of the Bay Area	2
Tsh	Tertiary shale/siltstone such as Repetto, Fernando, Puente and Modelo in LA	3
Tss	Tertiary sandstone such as Topanga in LA and Butano sandstone in SF Bay area	8
Tv	Tertiary volcanic such as Conejo Volcanics in Santa Monica Mountains and Leona Rhyolite in East Bay Hills	11
sp	Serpentine, generally considered part of the Franciscan complex	1
Kss	Cretaceous sandstone of the Great Valley Sequence in the central Coast Ranges	2
KJf	Franciscan complex rock such as melange, sandstone, shale, chert, and greenstone	6
crystalline	Crystalline rocks, including Cretaceous granitic rocks, plutonic igneous and Jurassic metamorphic rocks	29



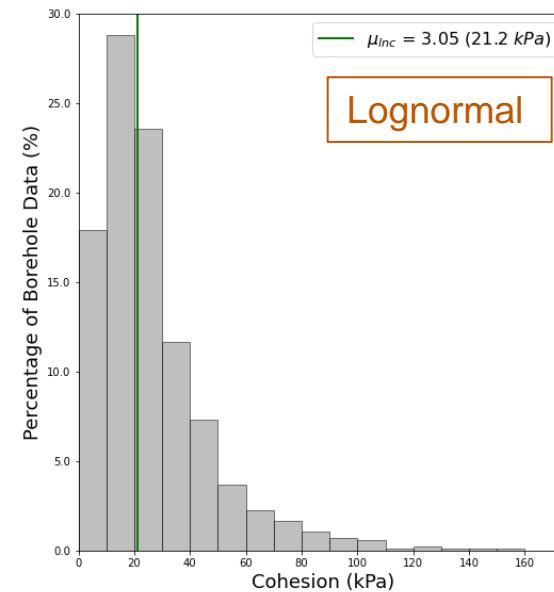
# Borehole Database

- Approx. 45,000 borehole samples
  - 13,000 with  $c'$  and  $\phi'$
- Predominantly in San Francisco Bay Area and Los Angeles

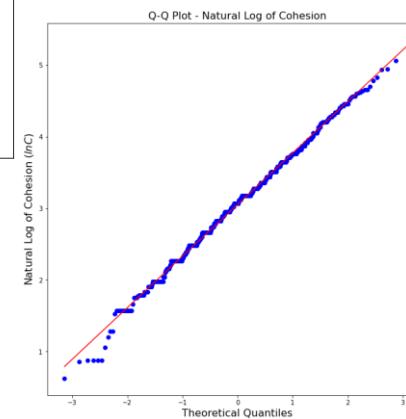
*California Geological Survey*



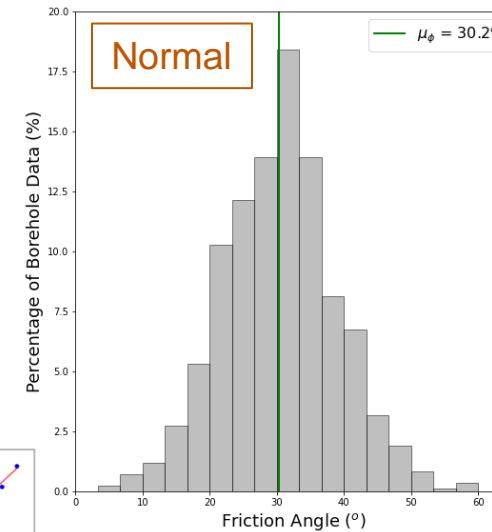
# Statistics for $c'$ and $\phi'$



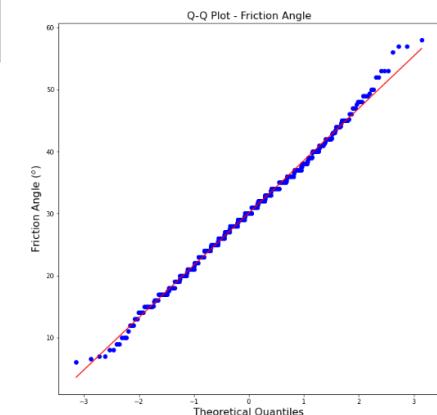
**Cohesion,  $c'$**



Tsh (Tertiary Shale): 848 samples

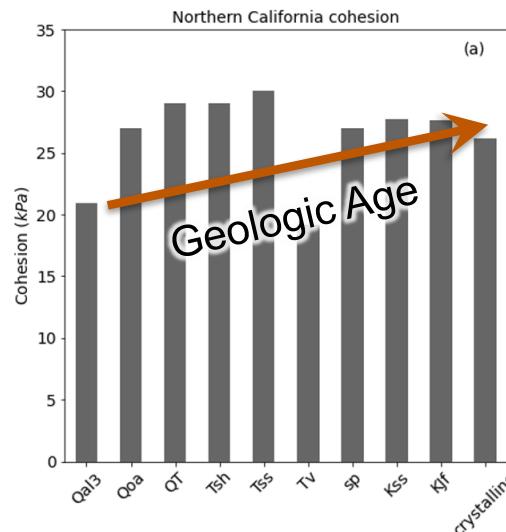


**Friction angle,  $\phi'$**

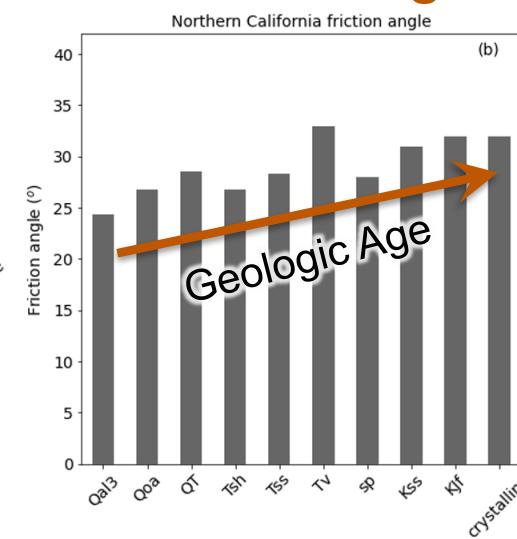


# Statistics for $c'$ and $\phi'$

## Cohesion



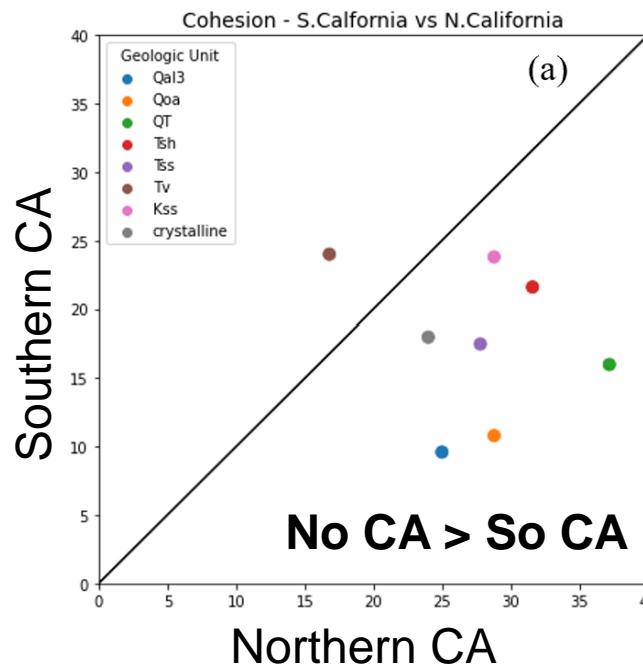
## Friction Angle



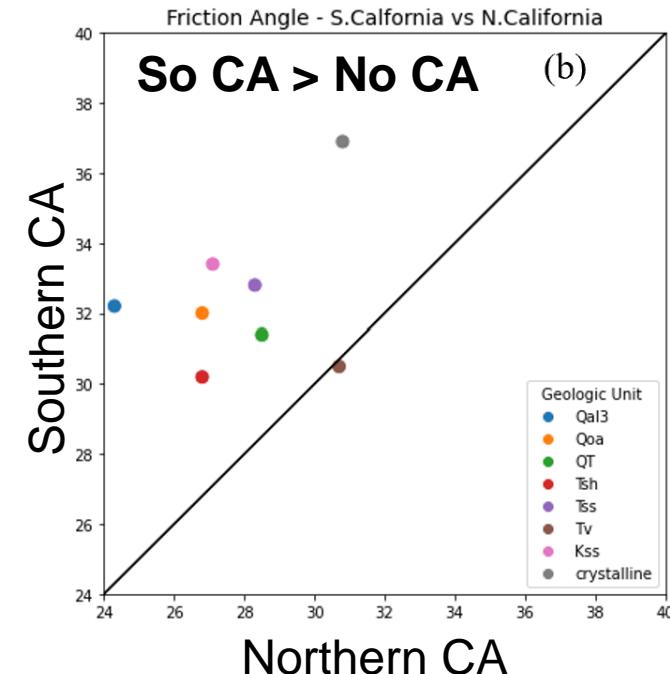
- $c'$  mostly larger than previously published values
  - Previous studies incorporated residual strengths
- $\phi'$  values mostly within  $\pm 10\%$  of previously published values

# Regional Differences: No CA vs So CA

## Cohesion

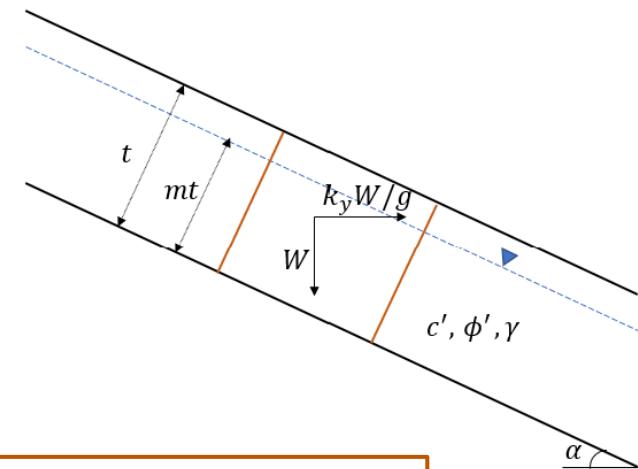


## Friction Angle



# Other slope properties

- Thickness ( $t$ )
  - No CA: 5 to 15 m
  - So CA: 1.5 to 4.5 m
- Saturation thickness ( $m$ ) and  $gwt$ 
  - Consider well data for  $gwt$
  - 25% to 75% values
- Unit weight
  - Assumed 18 kN/m<sup>3</sup>



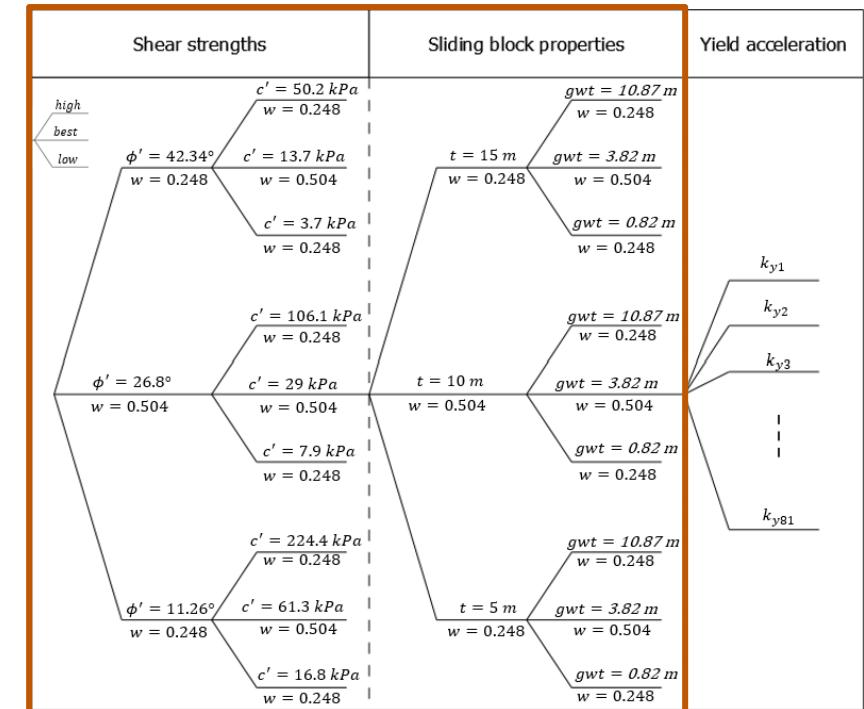
$$m = 1 - \frac{gwt}{t}$$

(Dry slope)  $0 \leq m \leq 1$  (fully saturated slope)  
 $t$  – sliding mass thickness

# Incorporating uncertainties: logic tree for $k_y$

- Represent input parameters with 3 branches each
  - Low, best, and high estimates based on statistical distributions
  - Weights assigned as 0.25, 0.5 and 0.25
  - $c'$  and  $\phi'$  negatively correlated
- $k_y$  computed for each combination of parameters
- Total weight for each  $k_y$

$$w_{k_y,i} = w_{\phi,i} * w_{c,i} * w_{t,i} * w_{m,i}$$

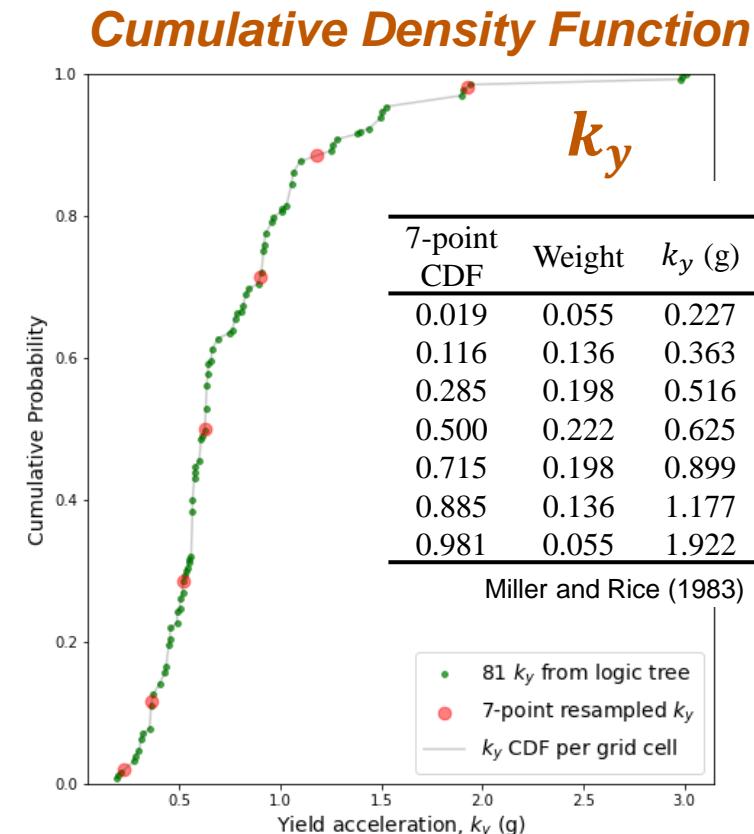


$$3\phi' * 3c' * 3t * 3m = 81k_y$$

(per 10-m grid cell)

# Example $k_y$ distribution for single cell

- Spread of the CDF denotes the degree of uncertainty in  $k_y$  (0.2 g to 1.9 g)
- Resampled  $k_y$  from 81 to 7
  - Number of branches ↑
  - computational demand ↑
  - storage requirements ↑
  - 7  $k_y$  for displacement calculation



# Displacement Calculation, given GM scenario

- Displacement models

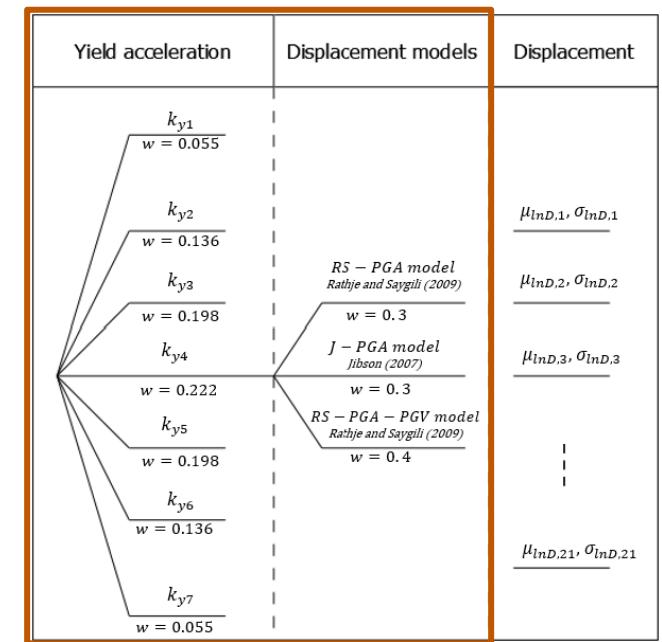
$$\ln D = f_{xn}(GM, k_y) + \sigma_{\ln D}$$

$\ln D$ : natural logarithm of D in cm ( $\mu_{\ln D}$ )

GM: gm intensity measures (PGA, PGV)

$\sigma_{\ln D}$  – aleatory variability in D predictions

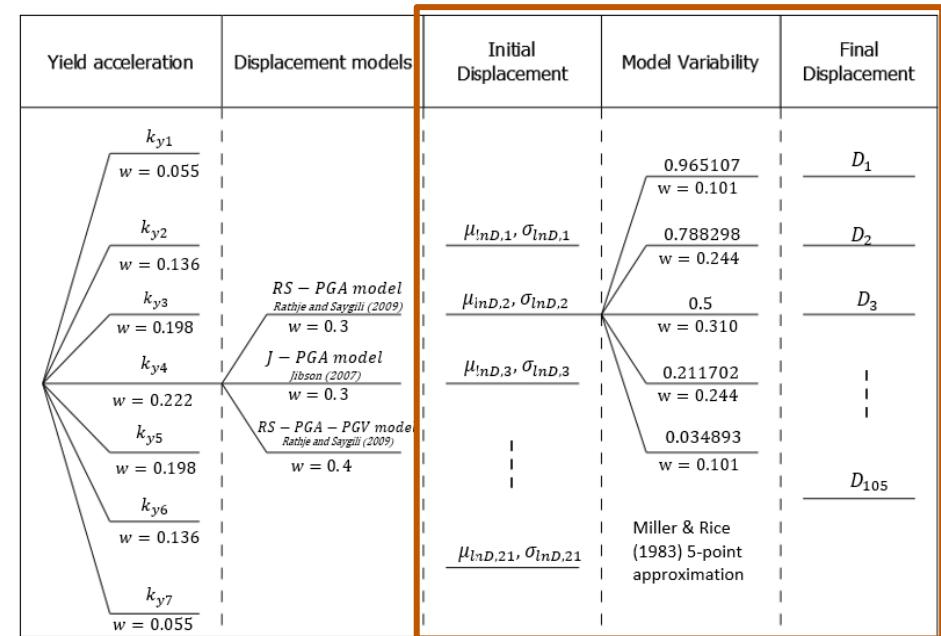
- Use 3 separate models to compute  $\mu_{\ln D}$  and  $\sigma_{\ln D}$ 
  - Rathje and Saygili (2009): PGA
  - Rathje and Saygili (2009): PGA, PGV
  - Jibson (2007): PGA



$$7 k_y * 3 models = 21 \mu_{\ln D} \text{ values per cell}$$

# Accounting for variability $\sigma_{lnD}$

- Represents the statistical distribution of  $lnD$  ( $\mu_{lnD}, \sigma_{lnD}$ )
- Sample the continuous distribution ( $\mu_{lnD}, \sigma_{lnD}$ ) using 5 values of  $\varepsilon$  with associated weights

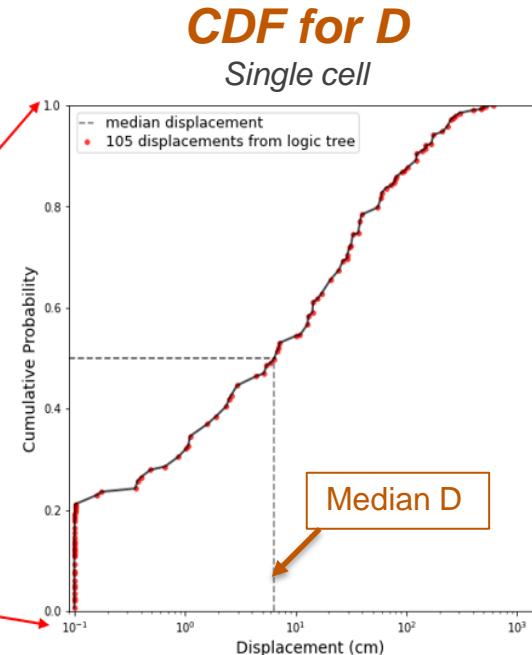
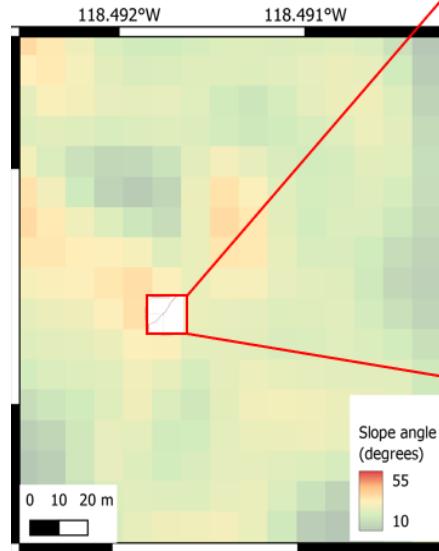


$$21 \mu_{lnD} * 5 \varepsilon = 105 D_{final}$$

values per cell

# Example Displacement Calculation

$PGA = 0.82 \text{ g}$   
 $PGV = 100 \text{ cm/s}$

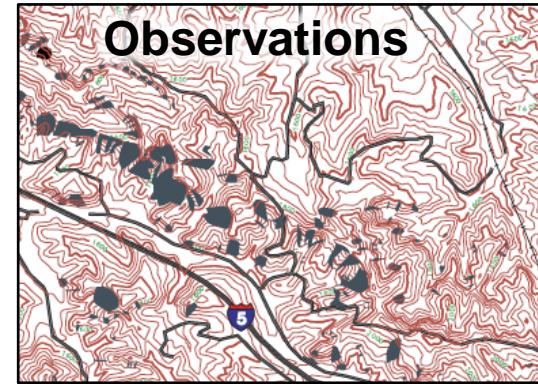


# Outline

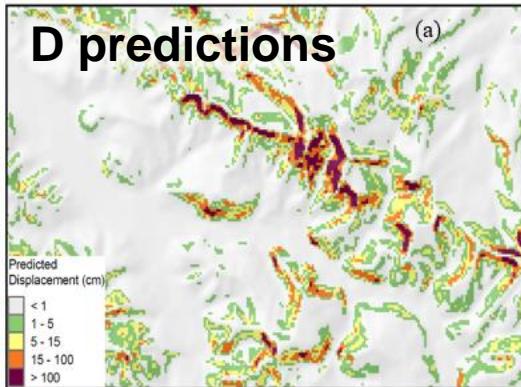
- ***Ground motion characterization***
  - Scenario-based ground motions that match ground motion hazard curves
- ***Landslide assessment***
  - General sliding block methodology
  - Displacement analysis incorporating uncertainties
  - Identification of landslides zones
  - Development of statistical distribution of landslide size, displacement, and direction of movement

# Previous studies

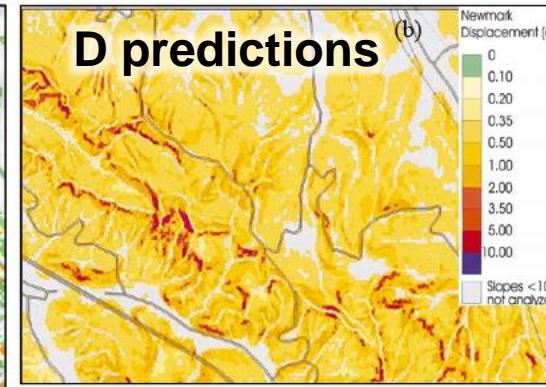
**Landslides:**  
**Northridge EQ**  
Jibson et al. (2000)



Hazard	Disp (cm)
Low	0 – 1
Moderate	1 – 5
High	5 – 15
V. High	> 15



Dreyfus, Rathje et al. (2013)

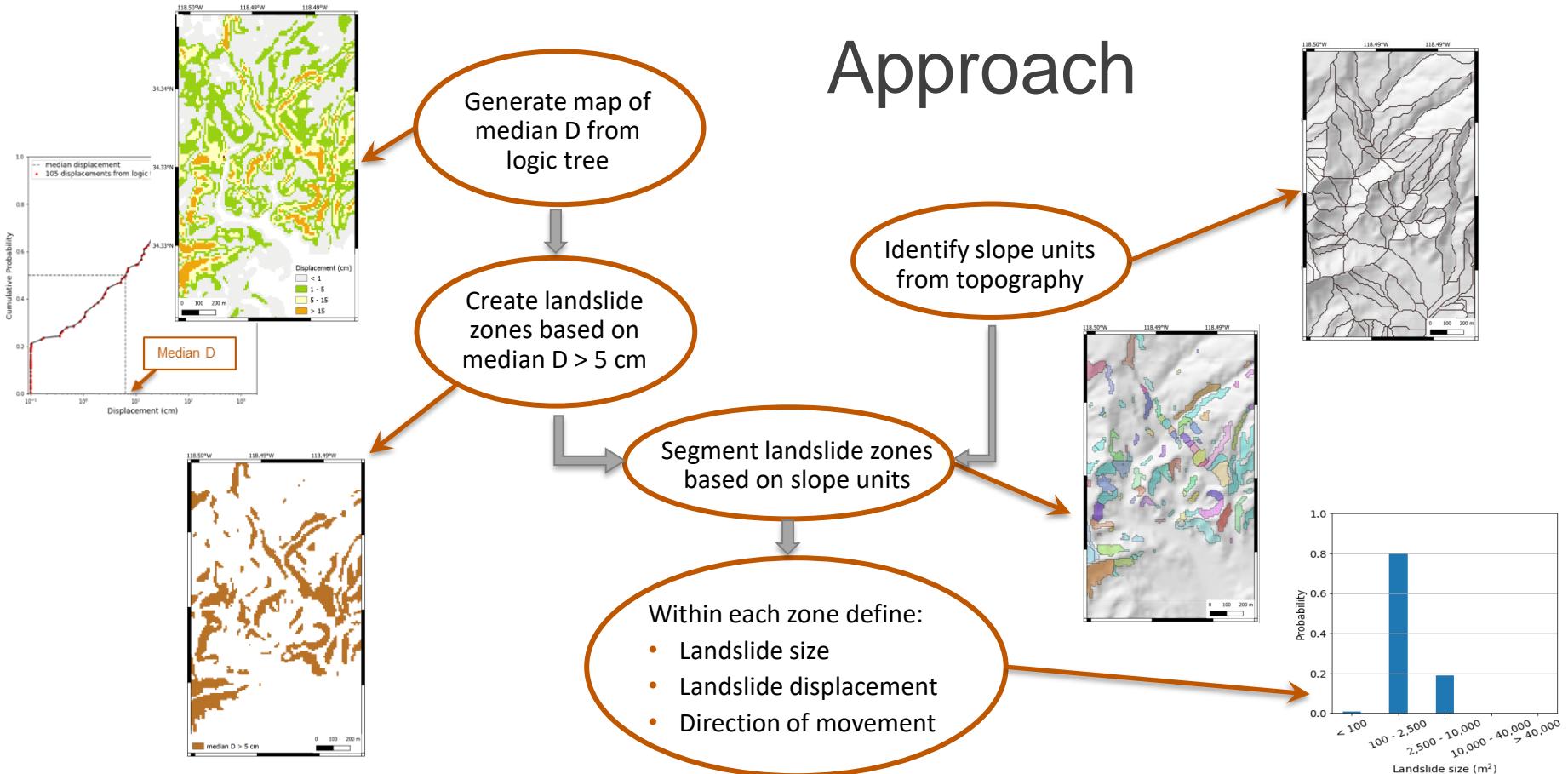


Jibson et al. (2000)

Our pipeline risk models require:

- Size of landslides
- Displacement levels
- Direction of movement

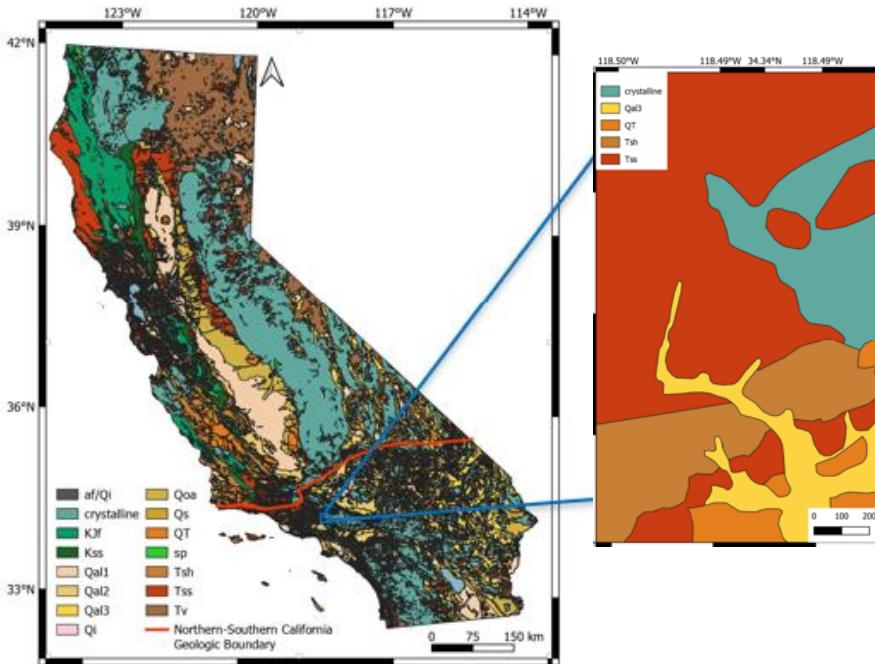
# Approach



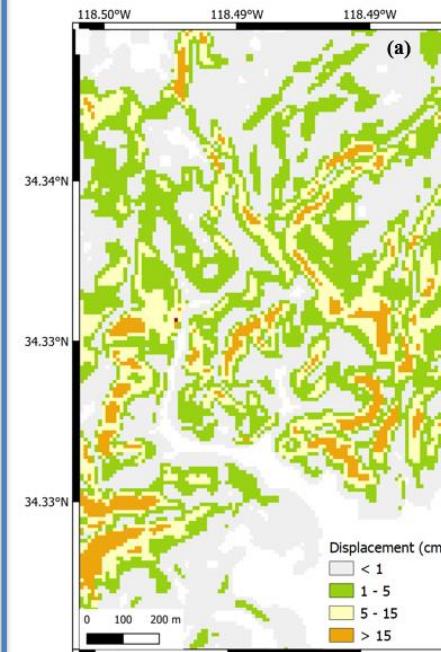
# Define landslide zones

## *Small Study Area*

Santa Susana Mtns



## Generate map of median $D$

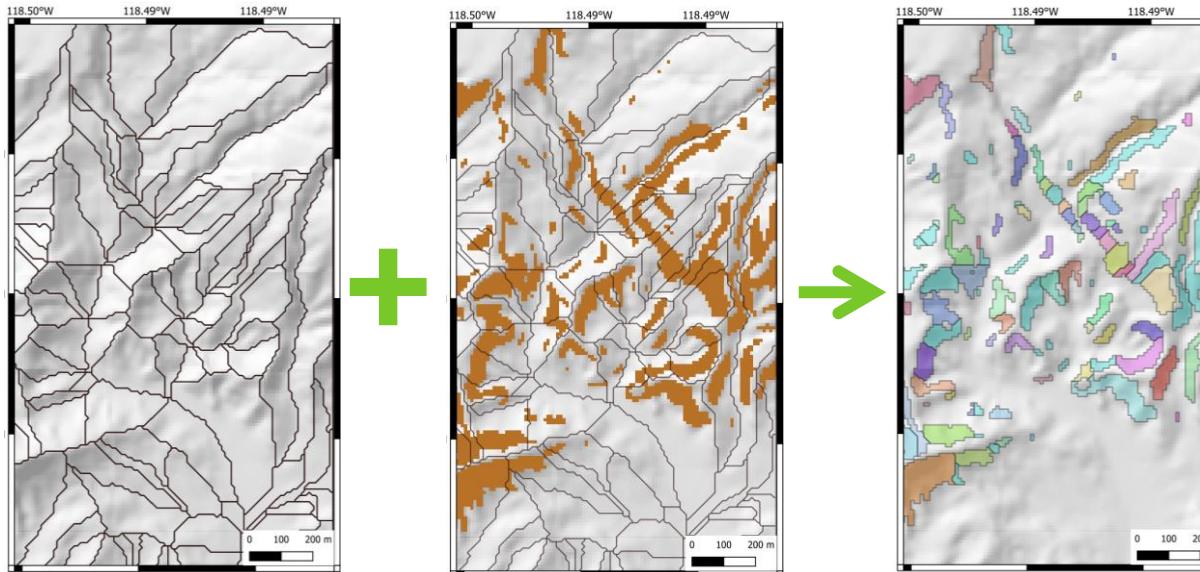
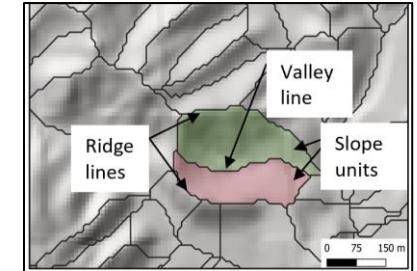


Create landslide zones ( $D > 5$  cm)



# Slope units

- Half of a catchment basin constrained by ridge and valley lines, similar aspect, hydrologic conditions
- Generated from DEM using r.slopeunits (Alvioli et al. 2016)

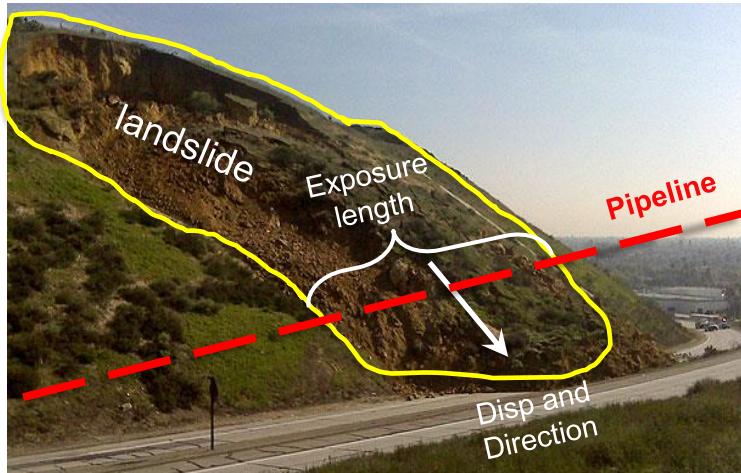


Segmented  
landslide zones  
(LZ)

# Outline

- ***Ground motion characterization***
  - Scenario-based ground motions that match ground motion hazard curves
- ***Landslide assessment***
  - General sliding block methodology
  - Displacement analysis incorporating uncertainties
  - Identification of landslides zones
  - Development of statistical distributions of landslide size, displacement, and direction of movement

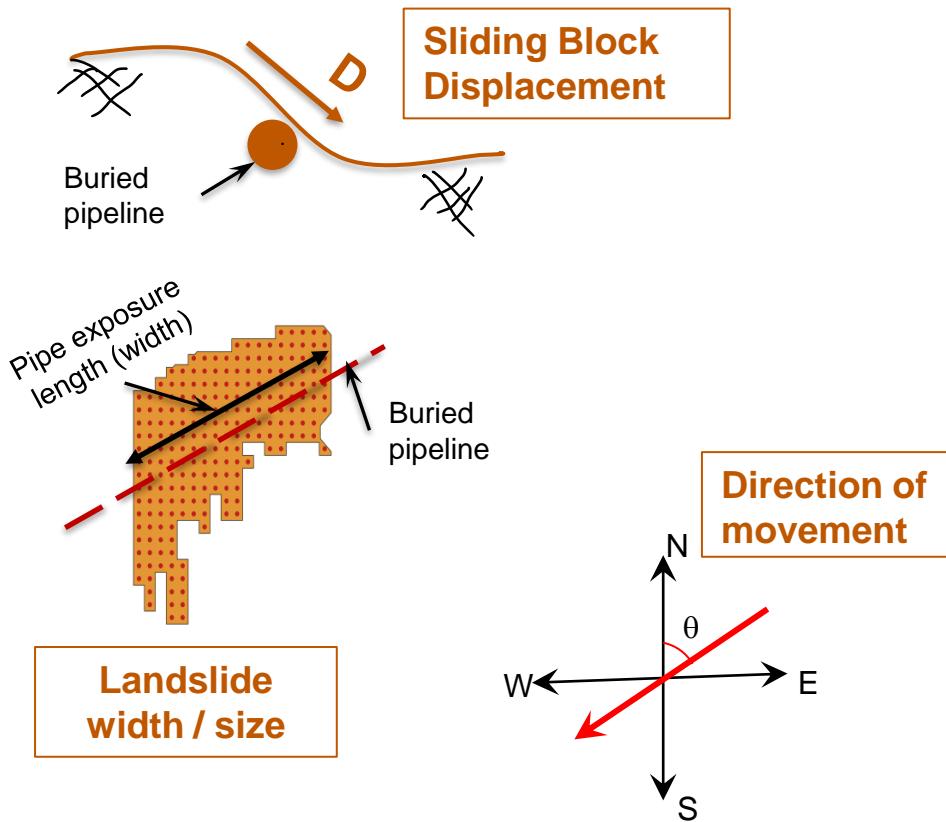
# Pipeline risk assessment



<https://blogs.agu.org/landslideblog> - landslide in Pomona, California

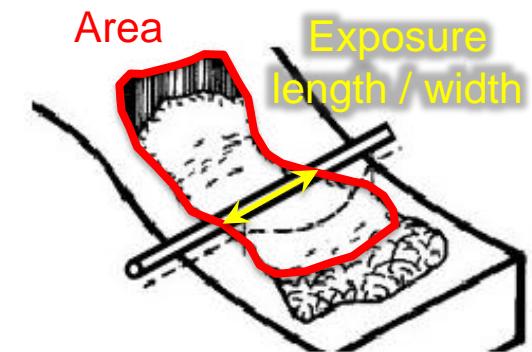
## How do we relate:

1. sliding block displacement to true landslide movement?
2. pipeline exposure length to landslide size?



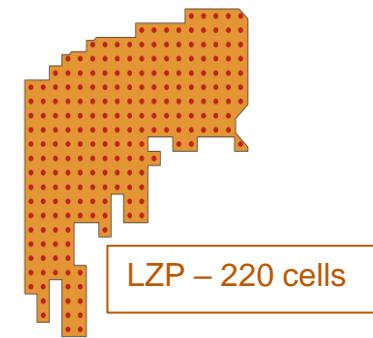
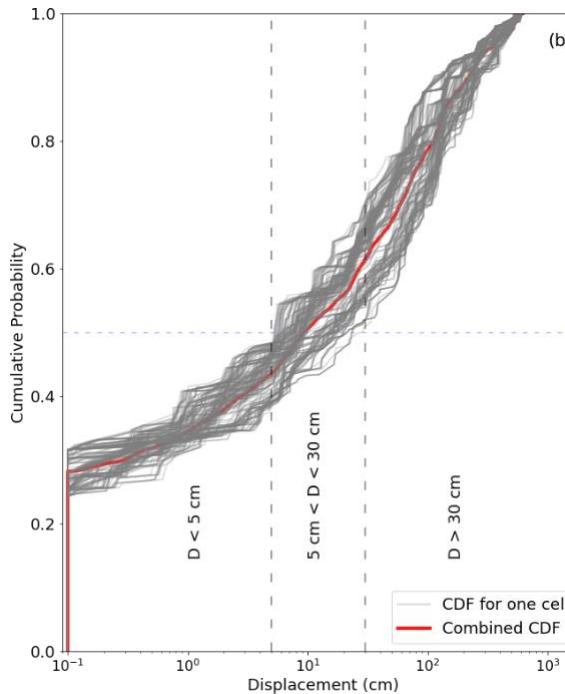
# Pipeline fragility models: inputs

- Displacement (cm)
  - 0-30, 30-150, 150-300, 300-600, 600-900, 900-1200 cm
- Pipeline exposure length (m)
  - < 10, 10-50, 50-100, 100-200, > 200
  - Assume equidimensional landslides:  
**Area = Width<sup>2</sup>**  
**Exposure length = Width**
- Direction ( $^{\circ}$ , north =  $0^{\circ}$ )
  - 0-5, 5-10, 10-15, ..., 175-180



# Statistical distribution of displacement

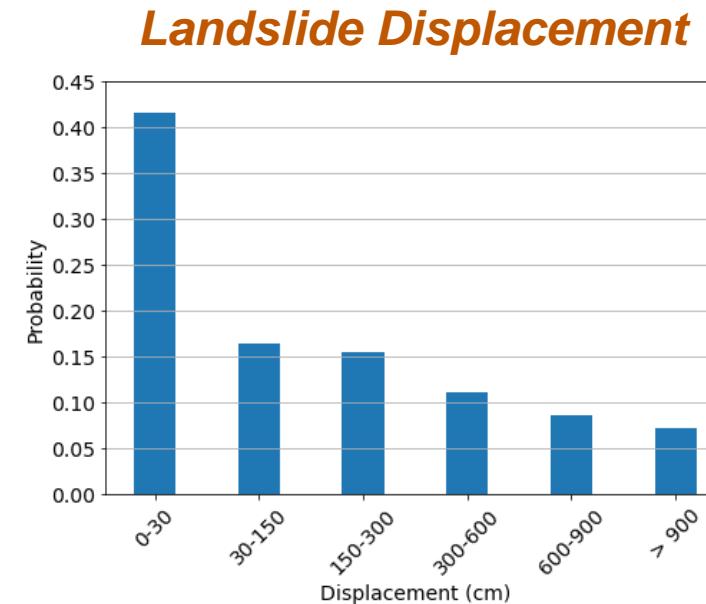
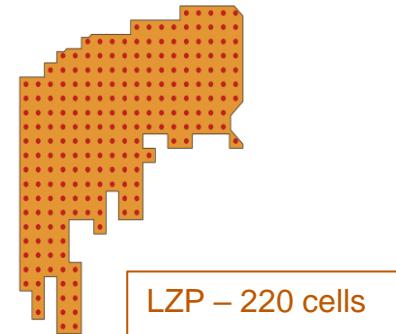
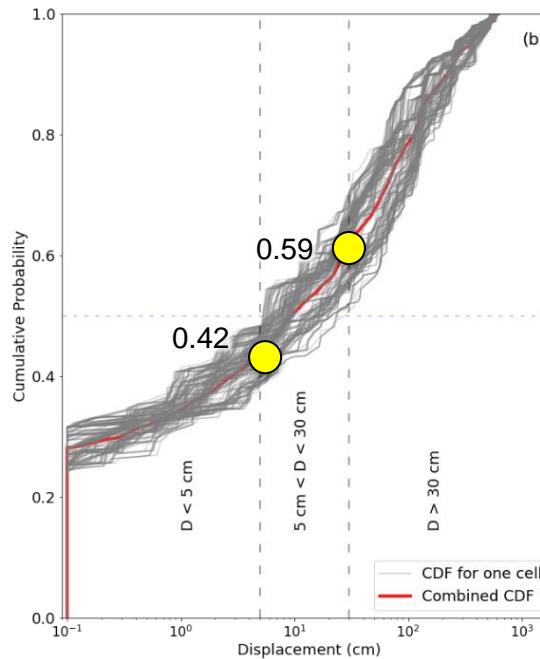
For each segmented landslide zone (LZ), compute combined CDF for D



Convert sliding block displacement,  $D$  into landslide movement

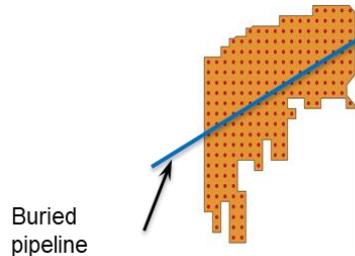
- $D < 5\text{ cm}$  → 0 to 30 cm
- $D = 5 - 30\text{ cm}$  → 30 to 150 cm
- $D > 30\text{ cm}$  → exponentially distributed to 4 bins between 150 cm and > 900 cm

# Statistical distribution of displacement

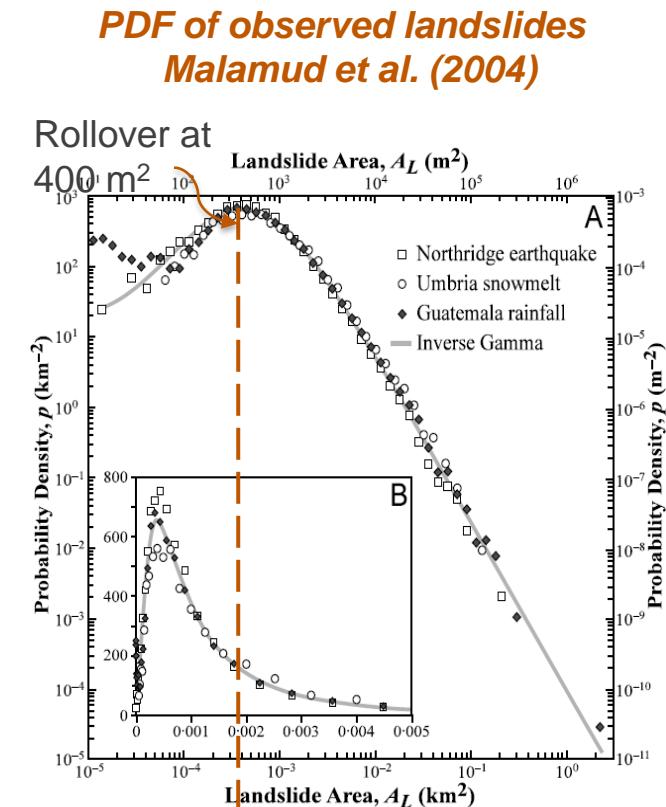


# Statistical distribution of pipeline exposure length

- Pipeline exposure length related to landslide size (i.e., area)
- Unlikely that entire segmented landslide zone (LZ) will fail
  - Smaller landslides within LZ are possible



- Used empirical distribution of landslide area truncated at size of LZ



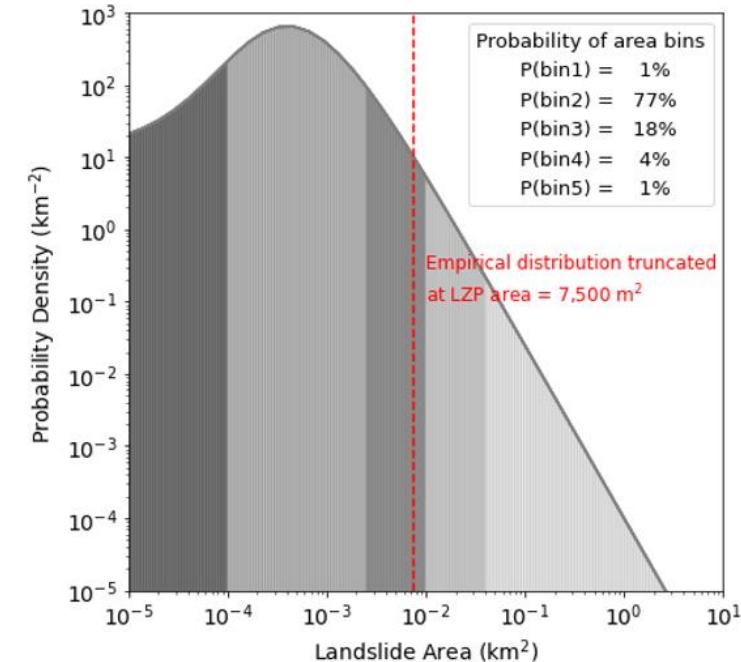
# Pipeline exposure length and landslide size

Pipeline risk  
models

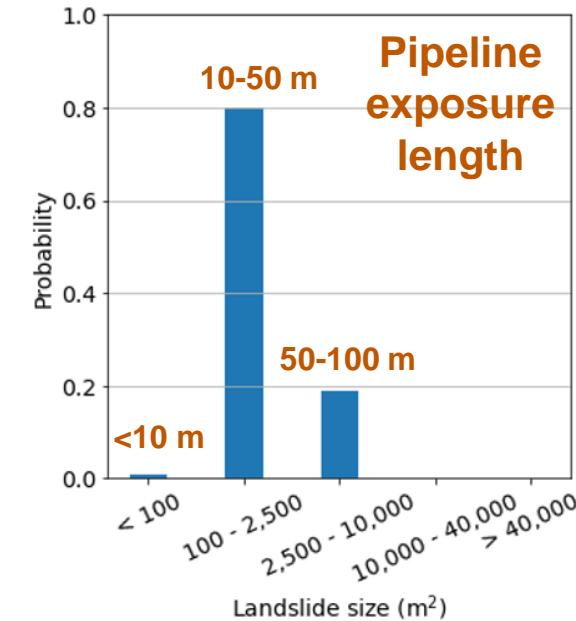
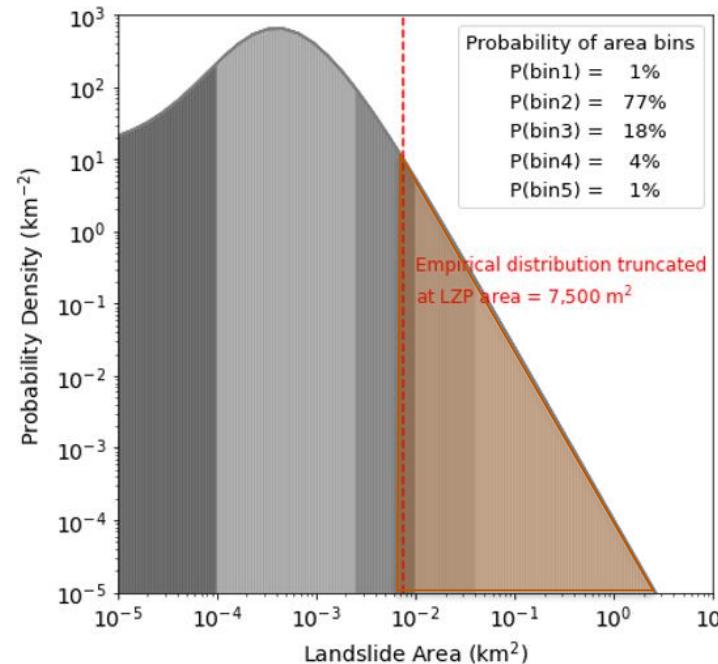
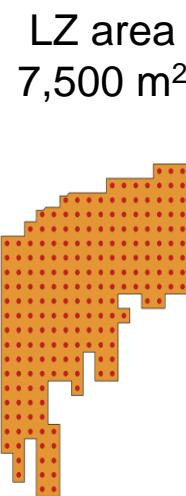
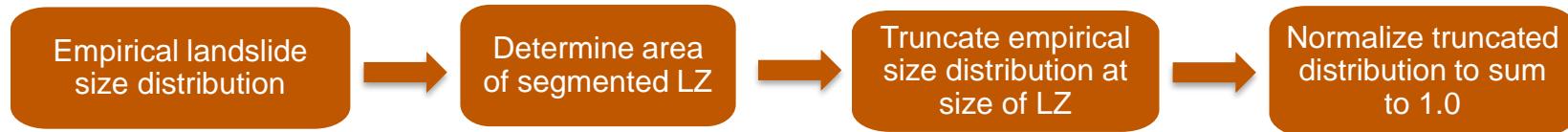
Area =  
Length<sup>2</sup>

Empirical  
Distribution

Exposure Length (m)	Landslide Area (m <sup>2</sup> )	Percentage
< 10 m	< 100 m <sup>2</sup>	0.9%
10 – 50 m	100 – 2500 m <sup>2</sup>	77%
50 – 100 m	2500 – 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	18%
100 – 200 m	10 <sup>4</sup> – 4·10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	3.5%
> 200 m	> 4·10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	0.6%

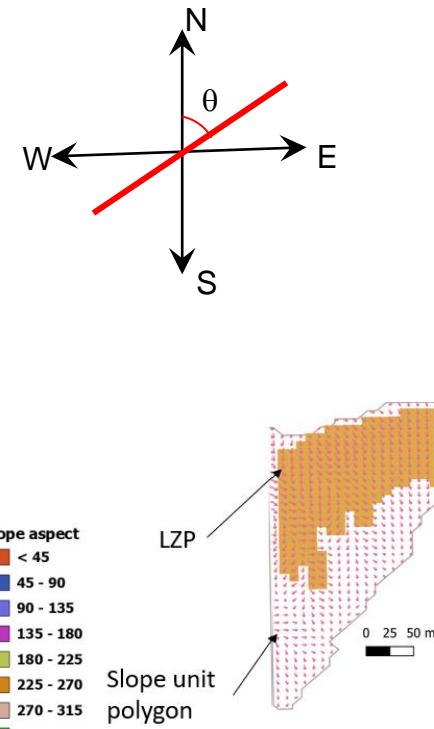
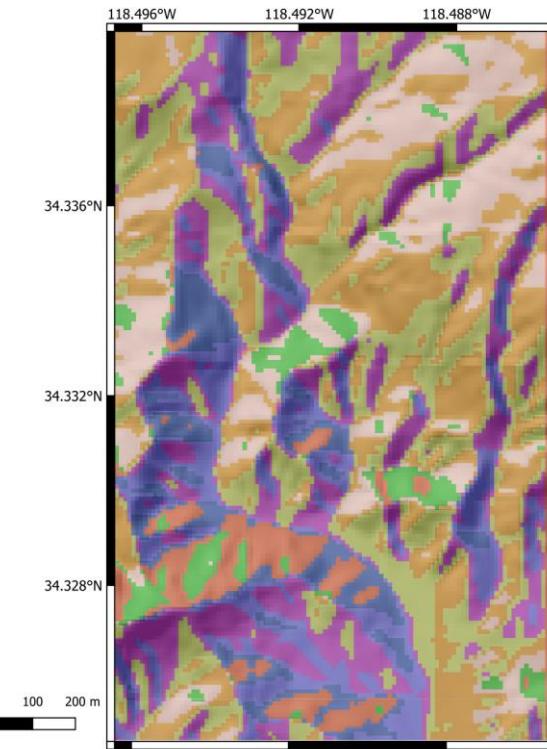


# Pipeline exposure length and landslide size

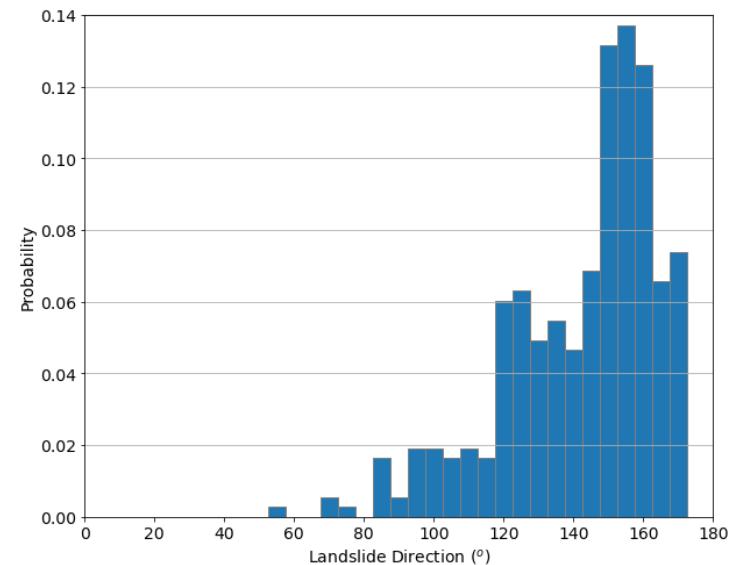


# Statistical distribution of direction of movement

## Slope Aspect

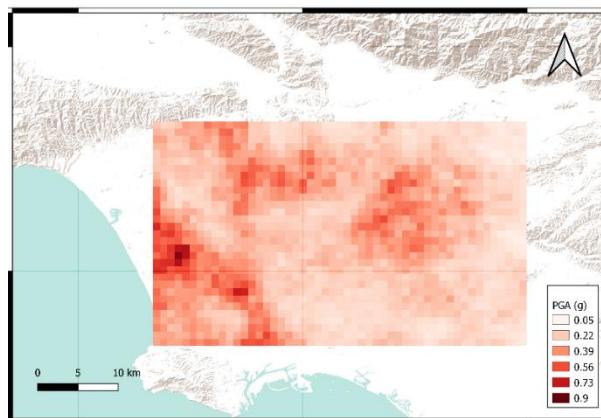


## Movement Direction ( $0-180^\circ$ )

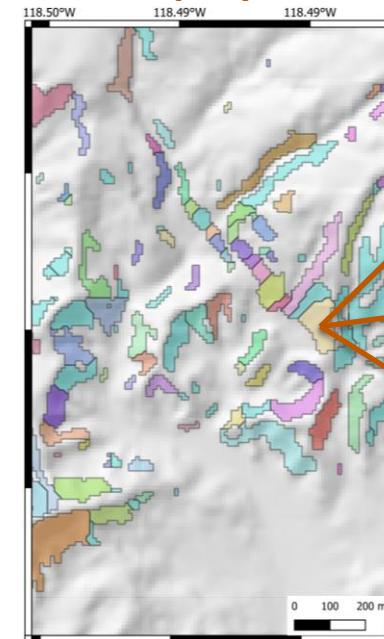


# Hand-off to Pipeline Risk Assessment

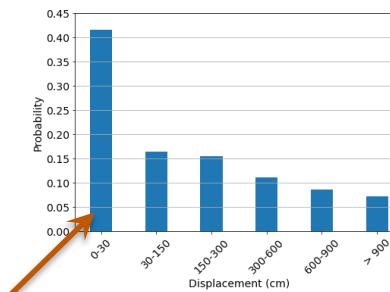
*GM Scenario*



*Segmented Landslide Zones (LZ)*

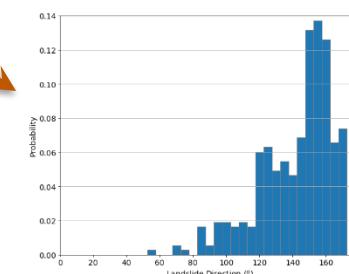


*Displacement*

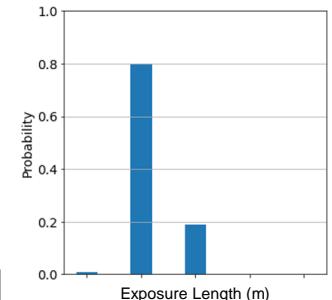


Define for each LZ

*Direction*



*Exposure Length*

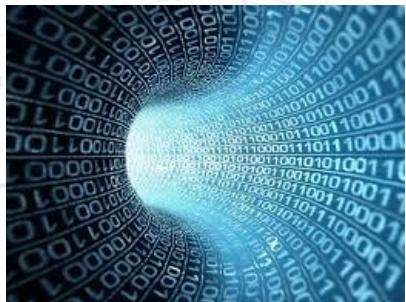


# Computational requirements

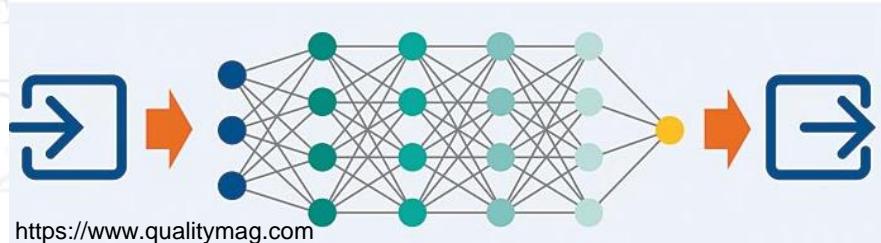
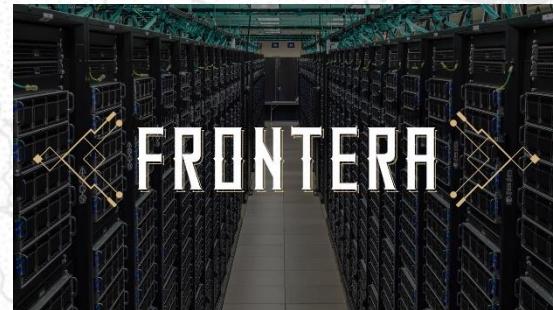
- State of California: ~425,000 km<sup>2</sup> and ~4.25 billion cells at 10-m resolution
- Data size
  - State-wide raster with 1 value/cell = 25 GB
  - Resampled  $k_y$  logic tree includes 7 values/cell
  - 25 earthquake scenarios analyzed for displacements
  - Resulting displacement data: ~4 TB
- Requires parallelization and high-performance computing from Texas Advanced Computing Center (TACC)

# Research Ecosystem

Data



Computational Resources



Data analytics / Algorithms / Tools



**DESIGNSAFE-CI**   
NHERI: NATURAL HAZARDS ENGINEERING RESEARCH INFRASTRUCTURE

 **TEXAS**  
The University of Texas at Austin

**UCLA**

**TACC**

**RICE**

*Florida Tech*



# Vision

- Promote the pervasive use of data analytics/computation and the publishing/reuse of data in natural hazards engineering
- A cyberinfrastructure that is an integral part of research discovery
  - Provide a platform for ***data sharing/publishing***
  - Enable research workflows and access to ***high performance computing (HPC)***
  - Deliver ***cloud-based tools*** that support the analysis, visualization, and integration of diverse data types

***Available to the global community of natural hazards researchers***



# DesignSafe Components

[www.designsafe-ci.org](http://www.designsafe-ci.org)

Data

The screenshot shows a "DATA DEPOT" interface with a search bar at the top. Below it is a table with columns for "Project ID" and "Project Title". The table contains the following data:

Project ID	Project Title
PRJ-3651	NOA-East Extended ground motion database
PRJ-1305	Community Data
PRJ-3617	VaDD Estimates in California from the P-Wave Seismogram Approach
PRJ-3609	Research Experience for Undergraduates (REU), NHERI 2022: Deriving Soil Constitutive Model using Artificial Intelligence (AI) on Unconsolidated Soil Conditions.
PRJ-3615	Research Experience for Undergraduates (REU), NHERI 2022: Implementing Physics Constraints into Graph Network-based Simulator for Natural Hazard Predictions

The screenshot shows a "SimCenter Research Tools" interface with several sections:

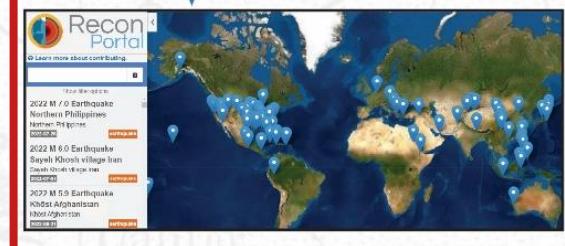
- Workspace
- Learning Center
- Data Depot
- Tools & Applications
- Recon Portal
- SimCenter Research Tools
- User Guides
- Use Cases

Visit NHERI DesignSafe's YouTube Channel for the Full Archive

#### Featured Playlists

- DesignSafe Webinars
- SimCenter Series: Studying Coastal Hazards with HydroUC
- 2021 Joint NSF NHERI WOW and Lehigh RTMD EF User Workshop
- SimCenter Series: Advances in Computational Modeling and Simulation

Data



Simulation &  
Data Analytics

The screenshot shows a "SimCenter Tools" interface with tabs for "Simulation", "SimCenter Tools", "Visualization", "Analysis", and "Hazard Apps". Under "SimCenter Tools", there are icons for ADCIRC, ANSYS, cleawpack, Dakota, MPM, OpenFOAM, OpenSees, and OpenSees-STKO.



**DESIGNSAFE-CI**   
NHERI: NATURAL HAZARDS ENGINEERING RESEARCH INFRASTRUCTURE

**TEXAS**  
The University of Texas at Austin

**UCLA**

**RICE**

*Florida Tech*

# Electronic Publishing of Research Products

## DATA DEPOT

+ Add

Published

Published (NEES)

Community Data

Help ▾

### PRJ-2998 | Machine Learning Models for the Evaluation of the Lateral Spreading Hazard in the Avon River Area Following the 2011 Christchurch Earthquake

 Download Dataset

Author(s)	Durante, Maria Giovanna; Rathje, Ellen
Data Type	Jupyter Notebook
Natural Hazard Type	Earthquake
Date of Publication	03-12-2021
Awards	Improving our Understanding of Liquefaction-Induced Displacements using Data from the 2010/2011 New Zealand Earthquakes   CMMI-1462855 NHERI Cyberinfrastructure   CMMI-1520817 New Zealand Geotechnical Database
Related Work	An exploration of the use of machine learning to predict lateral spreading
Keywords	Machine Learning; Random Forest; Liquefaction; Lateral Spreading; 2011 Christchurch Earthquake.
DOI	<a href="https://doi.org/10.17603/ds2-3zdj-4937">10.17603/ds2-3zdj-4937</a>
Version	2 <span style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">▼</span> Version Changes <a href="https://doi.org/10.17603/ds2-3zdj-4937">https://doi.org/10.17603/ds2-3zdj-4937</a>

<input checked="" type="checkbox"/> Name	Size	Last modified
<input type="checkbox"/> Model Development	--	2/8/21 11:11 AM
<input type="checkbox"/> Model Usage	--	2/15/21 5:09 AM
<input type="checkbox"/> ReadMe.pdf	86.8 kB	3/12/21 1:23 PM



# Make ★your★ research count!

*Make your research re-producible and  
your data re-usable*



- **Formally publish** products in stable data repositories
  - DesignSafe, Zenodo, Dataverse, figshare, Dryad, others
  - Include data, scripts, models, outputs...
- Resource needs a permanent, **digital location (DOI)** not just a URL
- Cite publication **in the reference list** of your paper using DOI, citation language

provided here. Additionally, the probabilistic approaches described in this paper are implemented as executable Jupyter notebooks (Saygili 2018a, b). These notebooks can be accessed in the Data

## References

Saygili, G., Rathje, E., and Wang, Y. (2018a). "Probabilistic seismic hazard analysis for the sliding displacement of rigid sliding masses [Data set]." Designsafe-CI (<https://doi.org/10.17603/ds22d6k>)



**DESIGNSAFE-CI**   
NHERI: NATURAL HAZARDS ENGINEERING RESEARCH INFRASTRUCTURE

 **TEXAS**  
The University of Texas at Austin

**UCLA** 

**RICE** 

# Summary

- Regional-scale seismic landslide assessments are required to quantify risks to distributed infrastructure
- Ground motions from multiple earthquake scenarios calibrated to represent seismic hazard
- Landslide assessments incorporate:
  - Uncertainties in soil and sliding block properties
  - Uncertainties in D prediction through multiple models
  - Statistical distributions of landslide size, displacement, and direction

# 1<sup>st</sup> South American Geotechnics Seminar and 17<sup>th</sup> Colombian Congress of Geotechnics

## Holistic Management of Landslide Risk: systems framework and public safety policies



Ken Ho & Carrie Cheung

Geotechnical Engineering Office  
Civil Engineering and Development Department  
Hong Kong SAR Government



# OUTLINE OF PRESENTATION

1

Importance of Portfolio Landslide Risk Management

2

Systems Framework for Holistic Risk Management

3

Strategies for Managing Urban and Rural Slopes

4

Making Good Use of Technology and Data in Public Domain

5

Slope Safety Preparedness for Climate Change



# **IMPORTANCE OF PORTFOLIO LANDSLIDE RISK MANAGEMENT**

# LANDSLIDE RISK MANAGEMENT

Loading the gun

Predisposing factors  
(including human activities)

Pulling the trigger

Natural factors  
(e.g. rain, earthquake)  
Human factors  
(e.g. blasting)



Life & property [RISK]



1991: Shau Kei Wan, Hong Kong

Blasting-induced failure



1998: Hang Lok Lane, Shatin, Hong Kong

Leakage of water mains

# Collaboration of Key Stakeholders

## Governance

- Safety risk managers and regulators



## Policy-makers

- Allocators of human and financial resources



## Professionals

- Competence in terms of technical expertise and professionalism;
- Undertake responsibility at both design and construction stage



## Human Uncertainties



## General public & Media

- Enhance awareness, preparedness and resilience;
- Willing to follow temporary evacuation orders
- Avoid poor anthropogenic practices
- Enforcement action for non-compliance

# **Multi-pronged, Systems Approach for Landslide Risk Management**





# **SYSTEMS FRAMEWORK FOR HOLISTIC RISK MANAGEMENT**

# RISK-BASED SYSTEMS DESIGN

PROBLEMS



SOLUTIONS



PUBLIC SAFETY  
POLICIES

Painful lessons  
Technical understanding  
Expert/Management reviews

KEY

**Quality Data  
& Insight**

Engineering & Non-  
engineering  
approaches – integrated

Strategies, Goals,  
Roadmaps

KEY

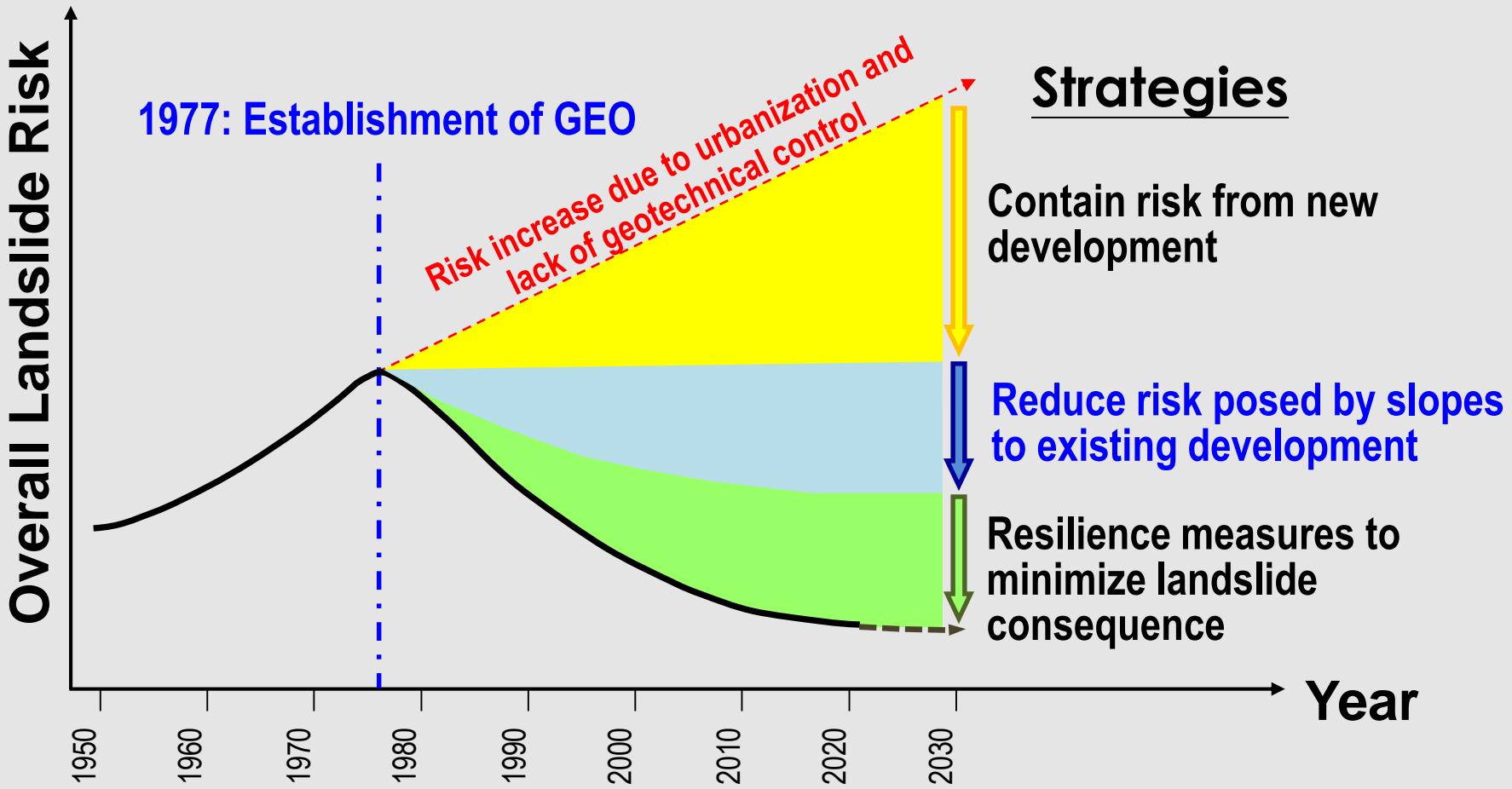
**Scope, standards,  
risk-based priority  
and partnering**

KEY

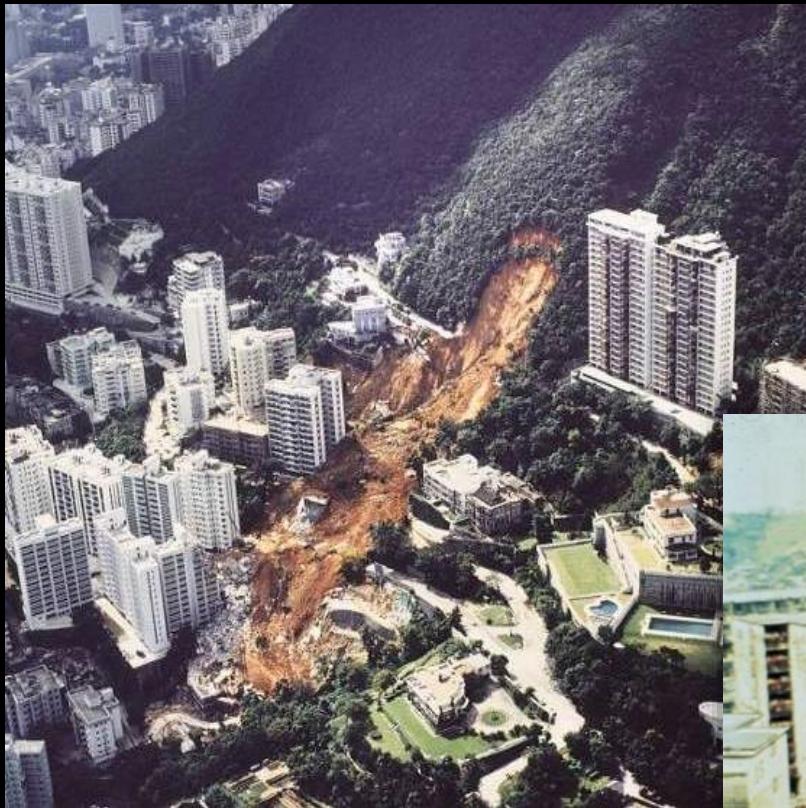
**Justifications,  
Resources, Legislation  
& Administrative  
Procedures**

**Early engagement of policy-makers  
and relevant stakeholders**

# Landslide Risk Management Strategies in Hong Kong



# PAINFUL LESSONS



1972: Po Shan Road, Mid-levels  
Hong Kong  
(67 fatalities)



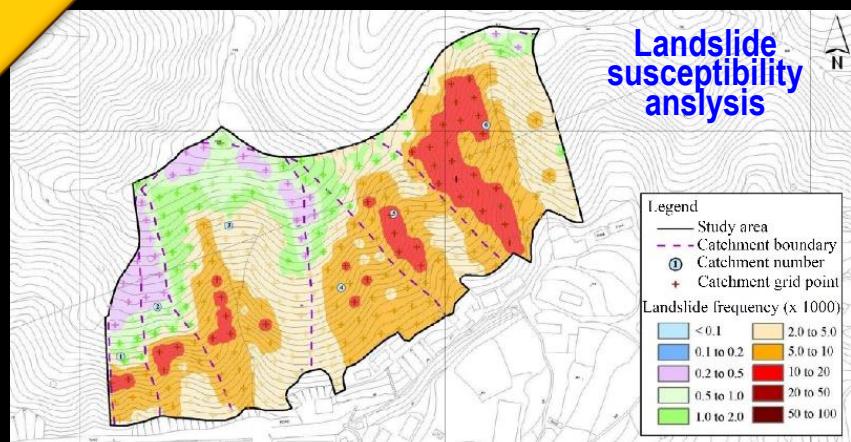
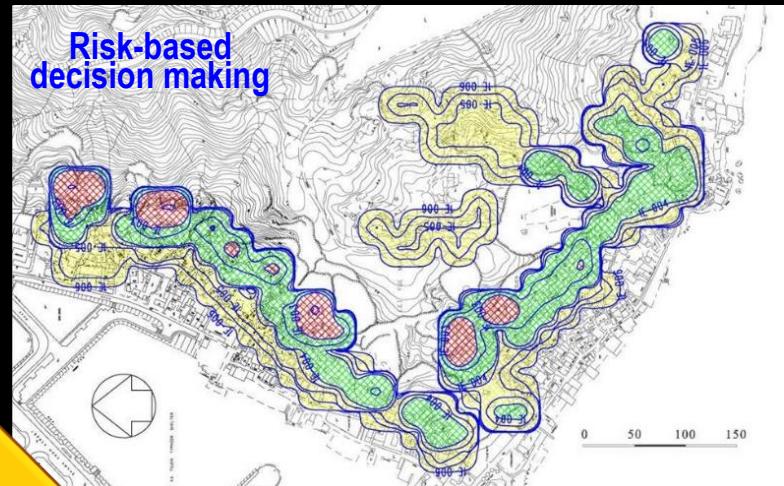
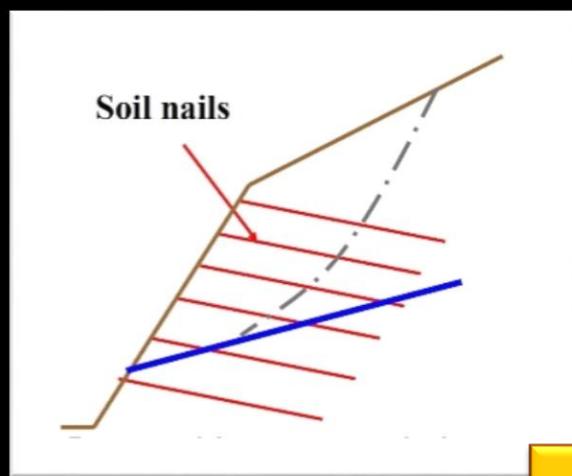
1972: Sau Mau Ping, Hong Kong  
(71 fatalities)



1976: Sau Mau Ping, Hong Kong  
(18 fatalities)

# A PARADIGM SHIFT IS NEEDED

from conventional geotechnical approach  
to risk management approach



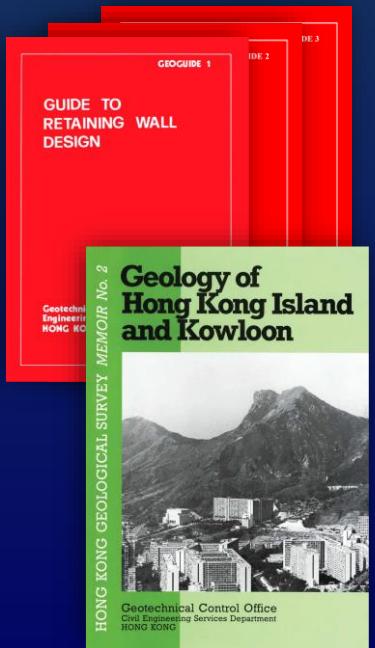
# Application of Modern Geotechnology

Customized Technical Guidelines

Technical Development Work

Legislative Framework & Governance

Systematic Retrofitting Programme

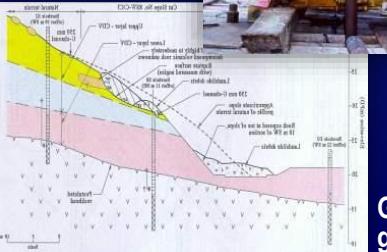


Standards for design, laboratory testing and fieldworks



Engineering geological mapping

Ground investigation



Geological and groundwater models

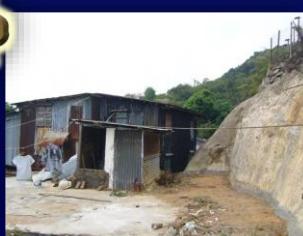
Land development control



Statutory control



Landslide warning & emergency response



Squatter clearance

Landslip Preventive Measures (LPM) Programme (risk-based priority ranking system)



# Resilience Measures



Roving exhibition, VR experience and souvenirs



Hong Kong Slope Safety | Geotechnical Engineering Office Civil Engineering and Development Department

GENERAL PUBLIC OWNER / MANAGEMENT PROFESSIONALS STUDENTS / TEACHING DOWNLOADING AREA PHOTO & VIDEO

Students / Teachers

- Slope Information System
- Community Education and Publicity Campaigns
- Landslide Warning System
- Hong Kong Geology
- Bowen Road Slope Study Trail
- Photos of Major Landslides and Geological Landscapes
- Educational Materials
- New Senior Secondary Teaching Kit and Support Materials
- Quantitative Risk Assessment (QRA)
- Evaluation of Rainstorm Return Period in Hong Kong
- GEO Publications

Website with essential information; education & training kits for teachers

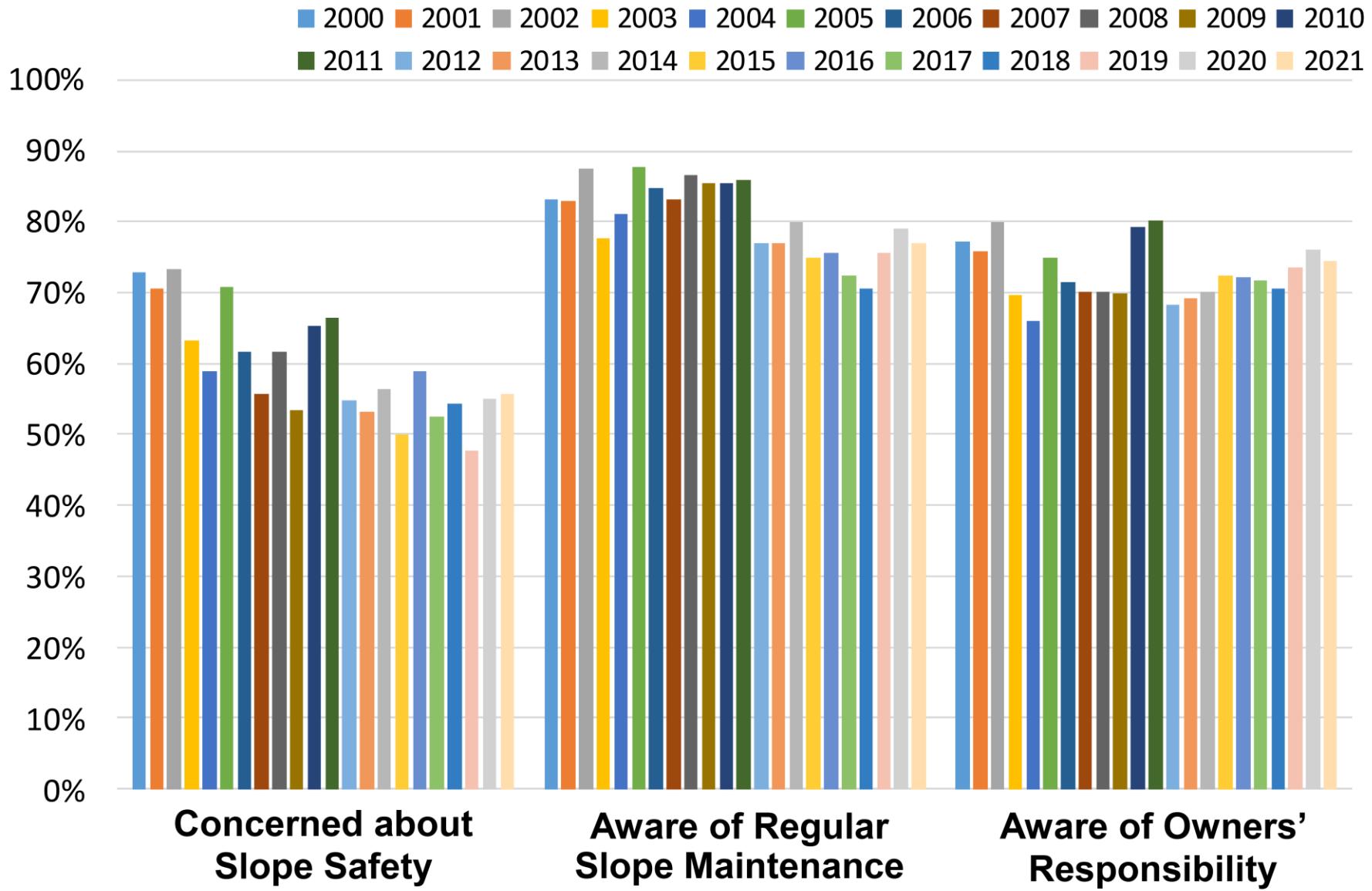


Landslip warning



Self-help tips for emergency preparedness  
Leaflets and TV advertisements

# Public Awareness of Landslide Risk in HK



## Willingness to Invest to Tackle Future Uncertainties



Political buy-in



Sustained funding  
and resources



Stakeholder  
awareness



# Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030

## TARGETS

### SUBSTANTIAL REDUCTIONS

A. Reduce global disaster mortality



B. Reduce the number of affected people globally



C. Reduce direct economic loss in relation to GDP



D. Reduce disaster damage to critical infrastructure and disruption of basic services



G. Increase the availability of and access to multi-hazard early warning systems



E. Increase the number of countries with national and local disaster risk reduction strategies



F. Substantially enhance international cooperation to developing countries



SUBSTANTIAL INCREASES

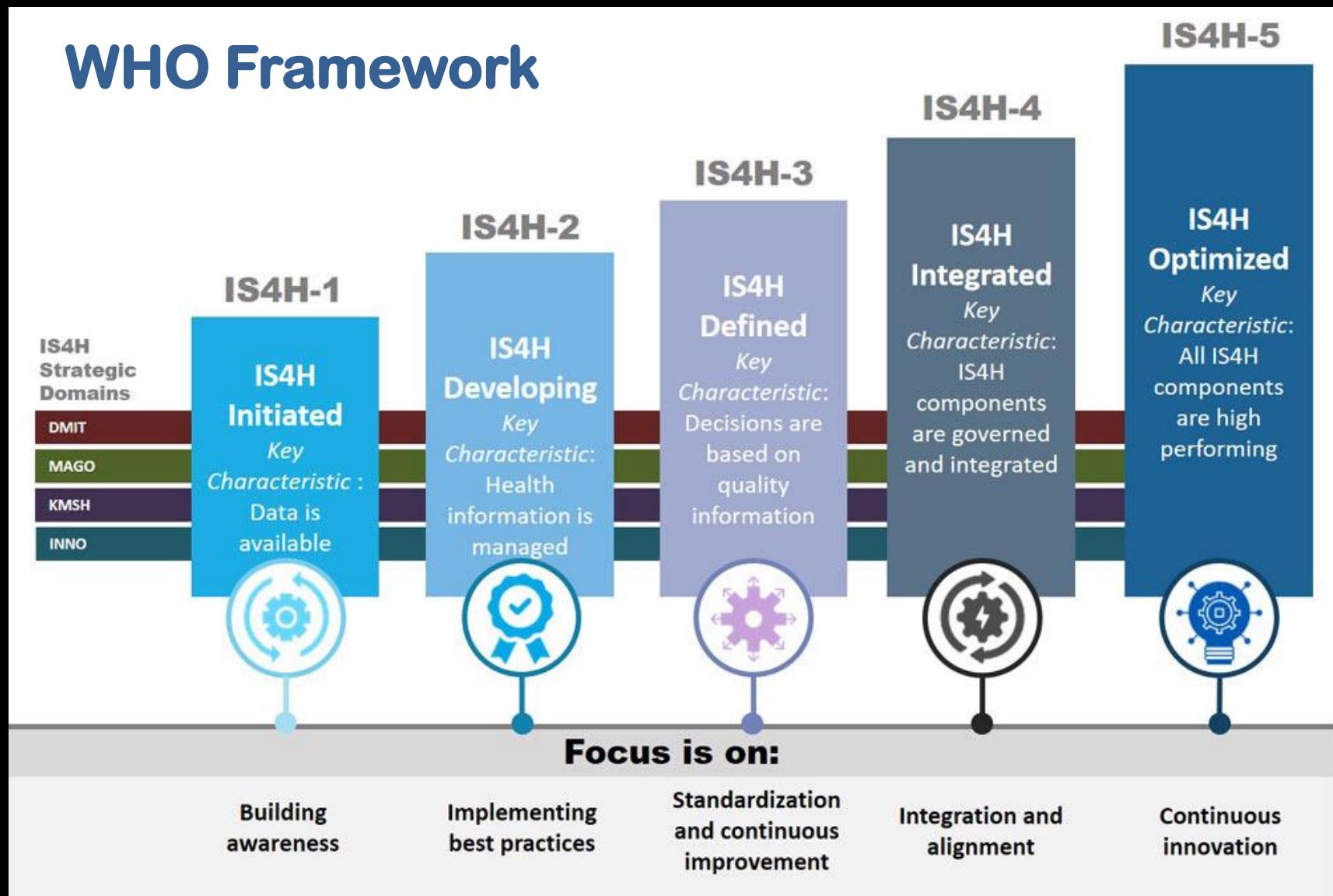
**Goal** Manage disaster risk through the implementation of integrated and inclusive measures that reduce hazard exposure and vulnerability to disaster, increase preparedness for response and recovery, and strengthen resilience

## Priorities for Action

1. Understanding disaster risk
2. Strengthening disaster risk governance to manage disaster risk
3. Investing in disaster risk reduction for resilience
4. Enhancing disaster preparedness for effective response, and to ‘build back better’ in recovery, rehabilitation and reconstruction

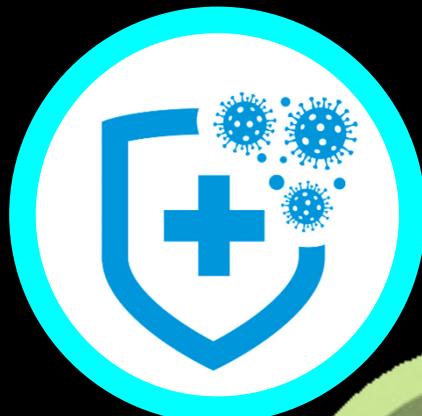
# PUBLIC SAFETY POLICIES

## WHO Framework



# Quality & Fit-for-Purpose Public Safety Policies

Transparent &  
Defensible



People-centric



Rational & Reliable



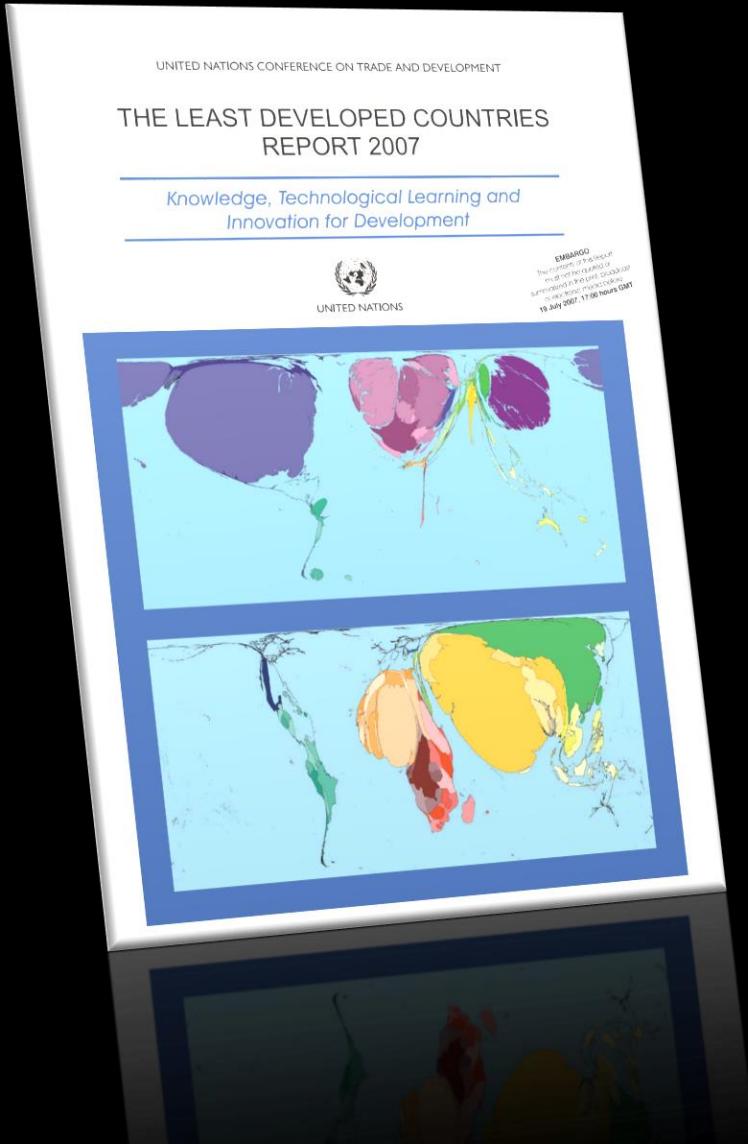
Holistic

Outcome-  
focused



# Resources

UNCTAD Report (2007)

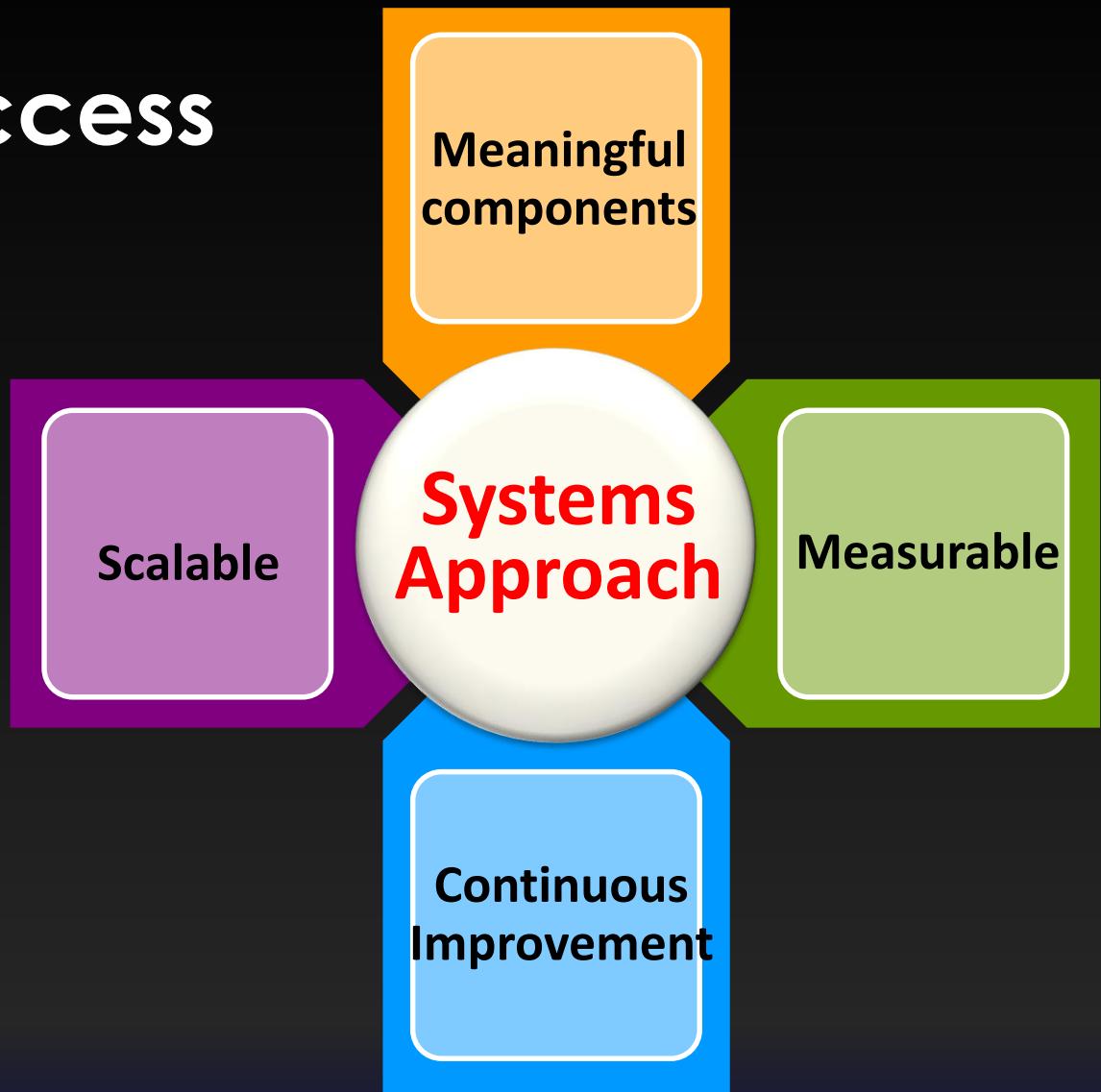


**Maximize benefits through:**

- Collaborations
- Public-private-partnerships

**Mechanisms to be considered at different scale, such as national and inter-state / county / province levels**

# Keys to Success



# Important points for governance



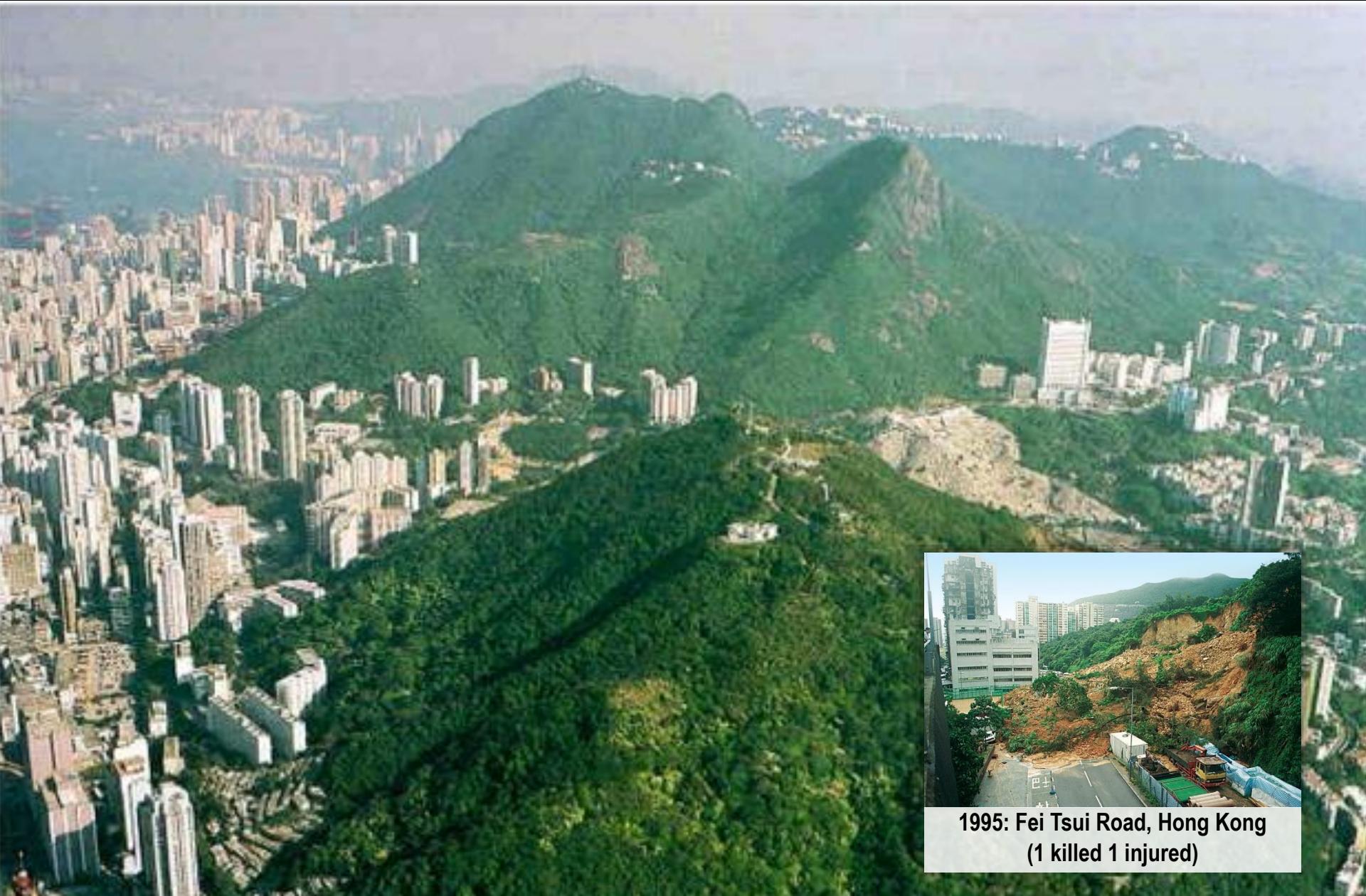
## 5 CHALLENGES

- Disconnect between policy and practice
- Human inadequacies
- Weak link between government steer and community-based programmes
- System uniqueness + expert benchmarking
- Deficiency in risk communication



# **STRATEGIES FOR MANAGING URBAN AND RURAL SLOPES**

# Slopes in Urban Setting



1995: Fei Tsui Road, Hong Kong  
(1 killed 1 injured)

# Slopes in Rural Setting

<http://opinion.cw.com.tw/blog/profile/390/article/8398>



2009: Shiao Lin Village, Taiwan  
(fatalities ~500)

<https://thedarjeelingchronicle.com/disaster-management-reflections-from-manipur-landslides/>



2008: Lantau, Hong Kong  
(traffic disruption and communication cutoff)

June 2022: Tupul, India  
(58 fatalities)

# Multi-pronged Approach

Involvement of suitable experts for special engineered structures



Risk mitigation concept in lieu of traditional slope engineering practice



Community-based (“bottom-up”) approach



Real-time monitoring + crisis preparedness + emergency management



## STEP 01 Initiation



1. Gather community data
2. Organize a planning team
3. Build project partnership
4. Set goals and develop activities
5. Seek community supports

## STEP 02 Examination



1. Collect historic disaster events
2. Understand physical & socio-economic characteristics
3. Conduct field surveys
4. Identify critical structures & vulnerable people

Community Database



## STEP 03 Assessment



1. Assess community vulnerability
2. Discover problems
3. Discuss solutions
4. Develop risk reduction measures and emergency response actions

Community Hazard Map



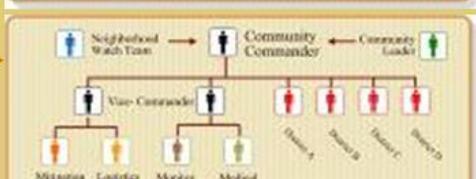
Mapping Vulnerability

## STEP 04 Organization



1. Discuss community disaster management tasks
2. Classify tasks and develop organization structure
3. Recruit team members

CBDM Team



## STEP 05 Planning



1. Discuss strategies covering mitigation, preparedness, response & recovery
2. Develop an annual plan
3. Seek government supports

## STEP 07 Practice



1. First-aid
2. Search & rescue
3. Walkie-talkie operation
4. Evacuation drill
5. Disaster scenario

## STEP 06 Communication



1. Propaganda & campaign
2. Brochure, poster & handbook
3. Connect with school or religious activities

CBDM Map 32



# Community-based Disaster Risk Management Framework in Taiwan

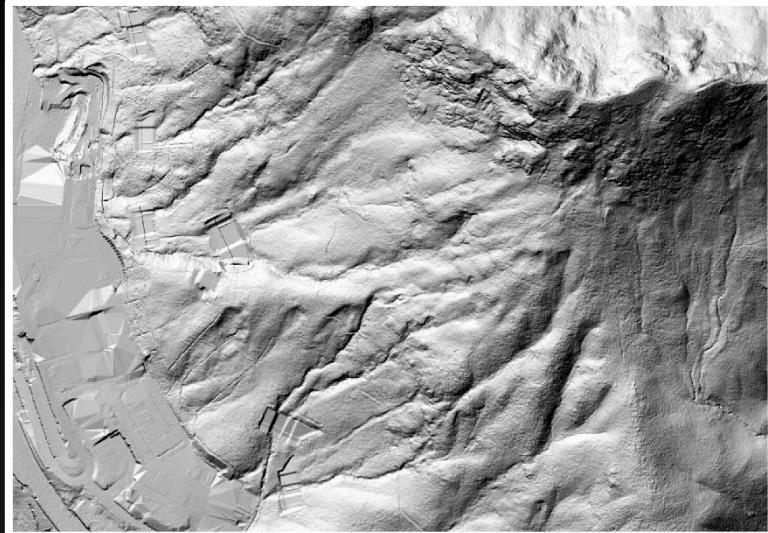
## STEP 08 Execution & evaluation

## STEP 07 Practice



**MAKING GOOD USE OF TECHNOLOGY  
AND DATA IN PUBLIC DOMAIN**

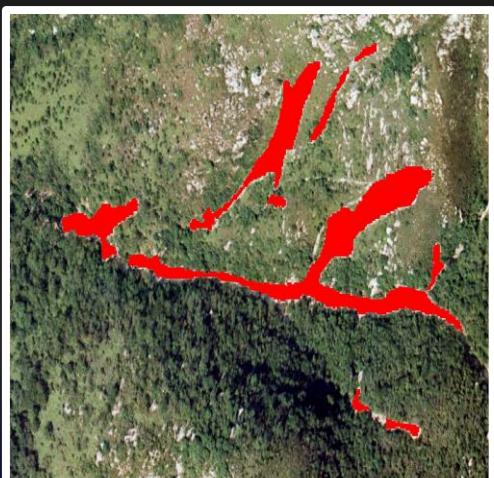
# Application of Innovation & Technology



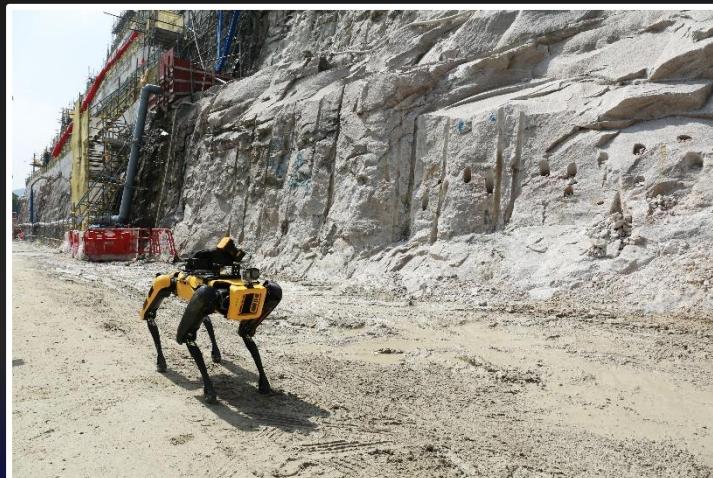
Digital terrain model generated using Airborne LiDAR



Digital Design Workflow



Artificial Intelligence



Robotics



Smart construction<sup>28</sup>



Self-compacting backfill material



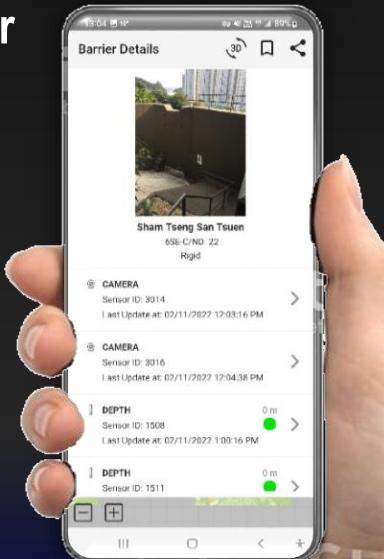
Automated concrete cube testing system



Camera 照相機

Debris depth gauge  
泥石厚度計

## Smart barrier



Debris impact switch  
泥石衝擊感應器

# Sources of Free Data

Description of input data	National entities that most commonly have this data	Examples of open databases available from international sources
Digital elevation model	National mapping and cartography authority	SRTM30 (NASA)
Lithology	National geological survey	UNESCO (CGMW, 2000), One Geology initiative
Vegetation cover	National agriculture/ environment and/or national forest agency	GLC2000 database
Soil moisture factor	National agriculture/ environment and/or national meteorological agency	Climate Prediction Center
Hourly, daily and monthly precipitation	National meteorological agency	Global Precipitation Centre of the Meteorological Agency
Seismicity	National building code(s)	Global Seismograph Network
Infrastructure and road/railway network in mountainous regions	National road and/or railway authority	Good Earth



Source:  
UNISDR

# Open Data for Public Use by the Hong Kong SAR Government

<https://www.geomap.cedd.gov.hk/GEOOpenData/eng/Default.aspx>

Geotechnical Engineering Office  
**GEO Data for Public Use**

The grid of icons includes:

- Soil testing equipment
- Map with coordinate grid
- Map with location pins
- Topographic map
- ENTLI (Engineering Technical Library) icon
- Rainy weather with industrial symbols
- Map with water droplets
- Map with coordinate reference
- Airplane with surveying lines
- Mountain peak with road
- Mountain peak with building
- Map with waves
- Document with antenna icon
- Document with dashed study area boundary
- Document with map boundary
- Lightbulb with map
- Car icon

<https://www.landsd.gov.hk/en/spatial-data/open-data.html>

Lands Department  
The Government of the Hong Kong Special Administrative Region

What's New | Resources | About Us |  
Land Disposal and Transaction | Development Control and Compliance | Land Acquisition and Clearance | Land Management and Enforcement | Survey and Mapping | Spatial Data

**Spatial Data**

Home > Spatial Data > Open Data (Geospatial)

## Open Data (Geospatial)

### 1:200 000 Digital Topographic Map

The 1:200 000 Digital Topographic Map is a topographic map of the Hong Kong Special Administrative Region. It shows the key geographical features and is suitable for map applications in 1:200 000 scale. The image for download is geo-referenced to the local coordinate system in Hong Kong 1980 Grid.

Please read the [Terms and Conditions of Use of DATA.GOV.HK](#) before [download](#).

### 1:100 000 Digital Topographic Map

The 1:100 000 Digital Topographic Map is a topographic map of the Hong Kong Special Administrative Region. It shows the key geographical features and is suitable for map applications in 1:100 000 scale. The image for download is geo-referenced to the local coordinate system in Hong Kong 1980 Grid.

Please read the [Terms and Conditions of Use of DATA.GOV.HK](#) before [download](#).

### 1:50 000 Digital Topographic Map

The 1:50 000 Digital Topographic Map is a topographic map of the Hong Kong Special Administrative Region. It shows the key geographical features and is suitable for map applications in 1:50 000 scale. The image for download is geo-referenced to the local coordinate system in Hong Kong 1980 Grid.

Please read the [Terms and Conditions of Use of DATA.GOV.HK](#) before [download](#).

### Geo-referenced Public Facility Data

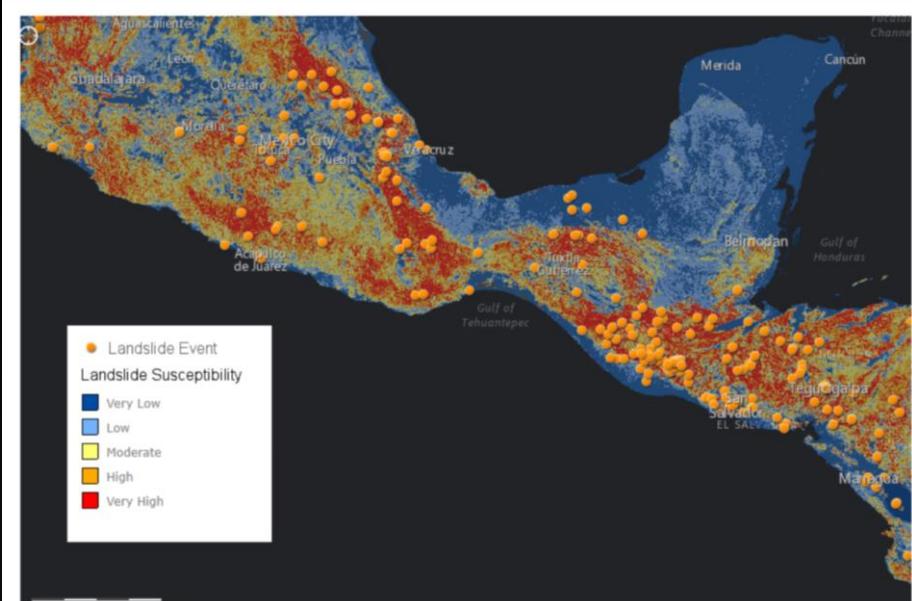
HONG KONG GEODATA STORE

Geo-referenced Public Facility Data contain 79 types of geo-referenced public facility data, which are available on the [Hong Kong GeoData Store](#) and DATA.GOV.HK for free download by the general public.

Users could visit the [Hong Kong GeoData Store](#) to preview the distribution of the selected type of public facility and download the geo-referenced data, with attributes including names, addresses, WGS84 Latitudes and Longitudes, and HK 1980 Grid coordinates in machine-readable formats of CSV, GeoJSON, GML, KML, as well as GeoData API.

### SatRef GNSS Real Time Raw Data Streams

The Hong Kong Satellite Positioning Reference Station Network (SatRef) has been supporting high accuracy positioning applications for public since 2010. The reference stations receive real-time GNSS signals from GPS, GLONASS and Beidou satellites round-the-clock. The GNSS Real-time raw data streams are then instantaneously disseminated via DATA.GOV.HK as part of the [Public Sector Information \(PSI\)](#). They can be acquired by means of NTRIP with the appropriate



COOLR landslide points (in orange) and NASA landslide susceptibility (blue = low susceptibility, red = high susceptibility), in Central America. Notice that there are a lot of areas with high susceptibility but no landslide reports, signifying we need more data on past landslides to make sure our susceptibility maps are accurate. Image from [Landslide Viewer](#) with added map legend.

## NASA Landslide Team Projects

- **Landslide Hazard Assessment for Situational Awareness**
- **Global Landslide Model**
- **Global Landslide susceptibility Map**
- **Global Landslide Catalogue of Cooperative Open Online Landslide Repository**

(<https://gpm.nasa.gov/landslides/projects.html>)

## The Landslide Blog

(<https://blogs.agu.org/landslideblog/>)

The banner features a photograph of a large, rocky mountain slope with a prominent landslide scar. Overlaid on the image is the text "THE LANDSLIDE BLOG". Below the banner is a dark blue navigation bar with white text: "HOME", "ABOUT DAVE", and "CONTACT ME".

28 OCTOBER 2022

### The Duffey Lake landslide: old logging roads and slope failures

*The Duffey Lake landslide: old logging roads and slope failures*

On 15 November 2021 a series of landslides occurred during a period of heavy rainfall in British Columbia, Canada. [I wrote about those landslides at the time](#). Substantial damage was caused to both Highway 1 and Highway 99. In the most deadly failure, now known as the Duffey Lake landslide, five people were killed and substantial damage was caused to Highway 99.

[The Canadian media organisation CBC](#) has a piece that explores the causes of these landslides, highlighting the role of old resource (logging) roads on the hillside above Highway 99. There is a very interesting video, which last about 10 minutes, in the article. It includes this diagram about the two landslides triggered in the Duffey lake area:-

Connect with Dave:



ABOUT DAVE



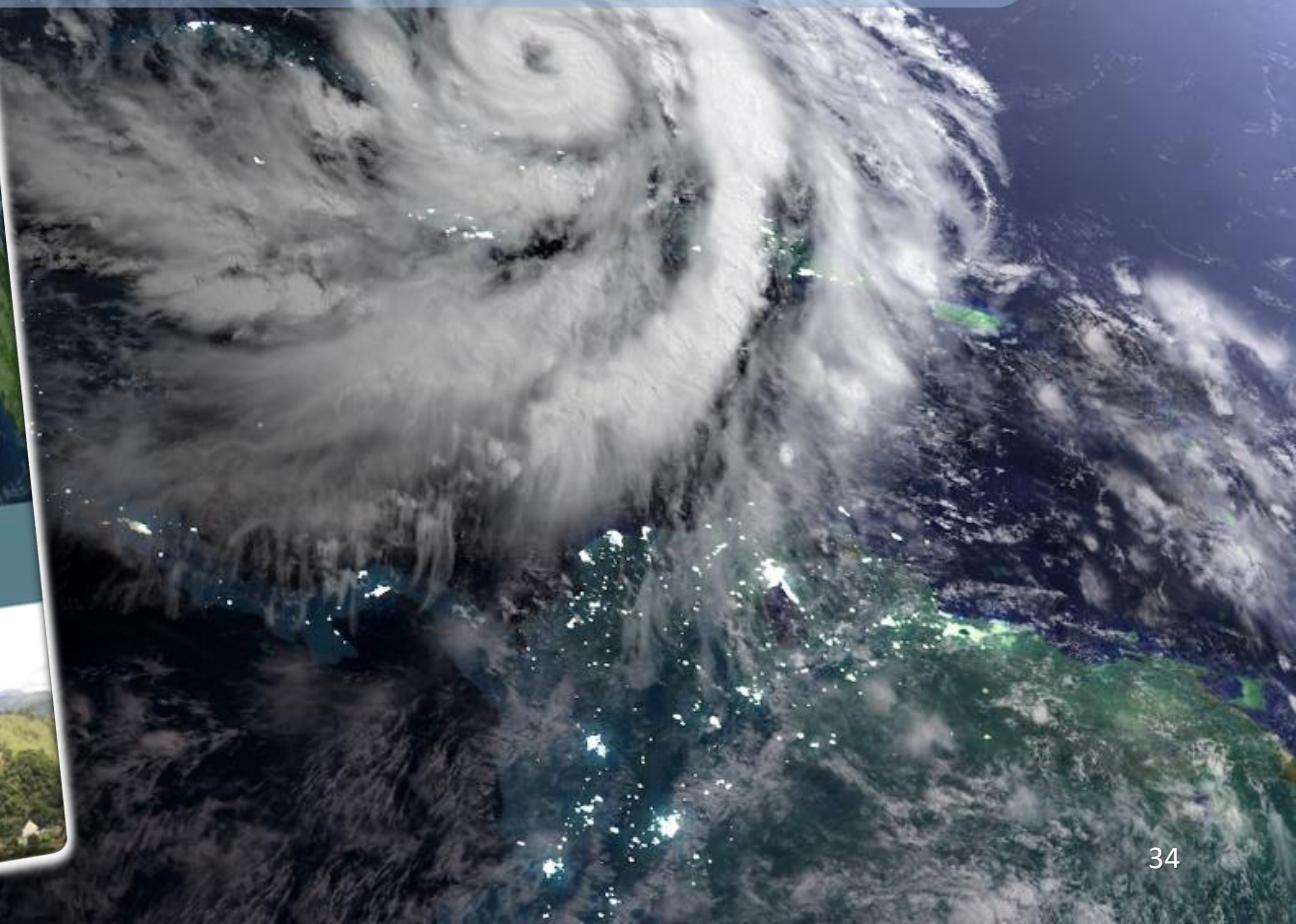
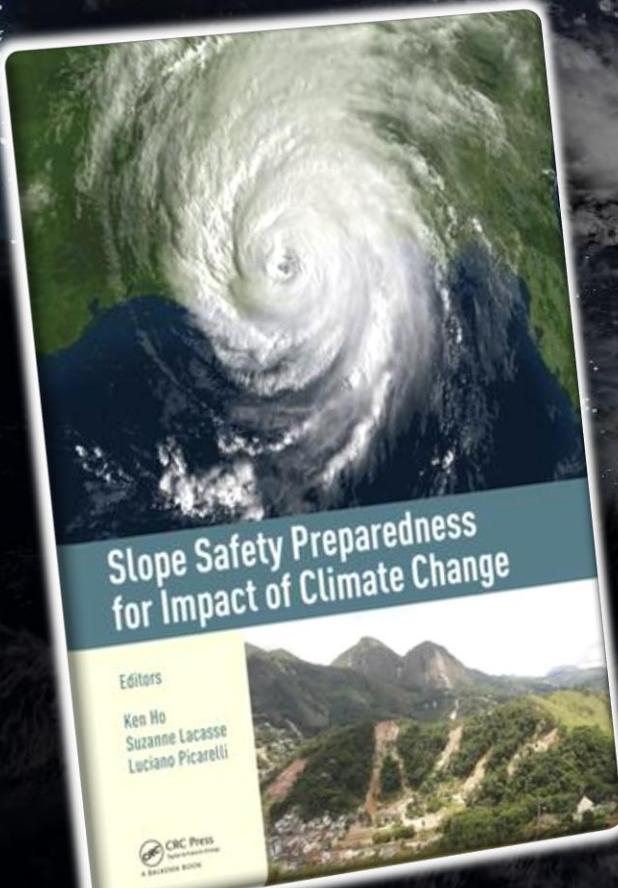
Dave Petley is the Vice-Chancellor of the University of Hull in the United Kingdom. His blog provides commentary and analysis of landslide events occurring worldwide, including the landslides themselves, latest research, and conferences and meetings.



# **SLOPE SAFETY PREPAREDNESS FOR CLIMATE CHANGE**

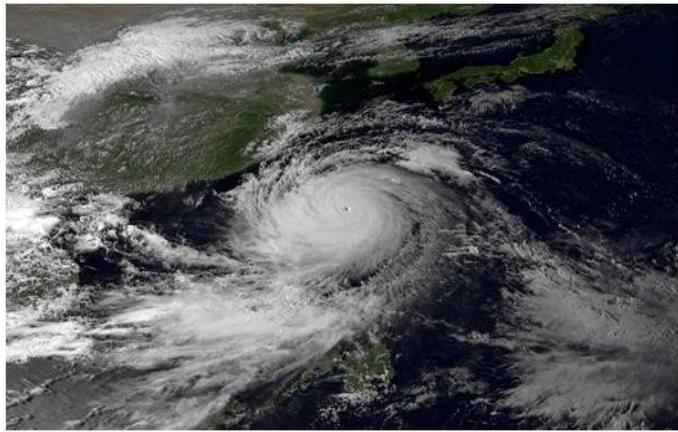
# Climate Change and Extreme Weather Events

Heavy reliance on early warning and community resilience



# Fifth World Landslide Forum in Osaka , Japan, 2020

## Enhancing Slope Safety Preparedness against Impact of Climate Change – Hong Kong experience



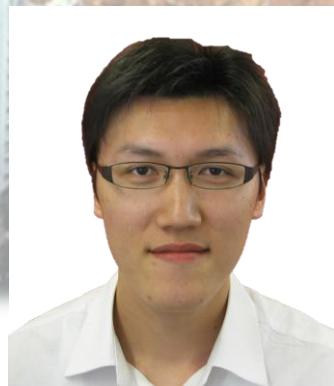
Ken Ho



Wing Sun

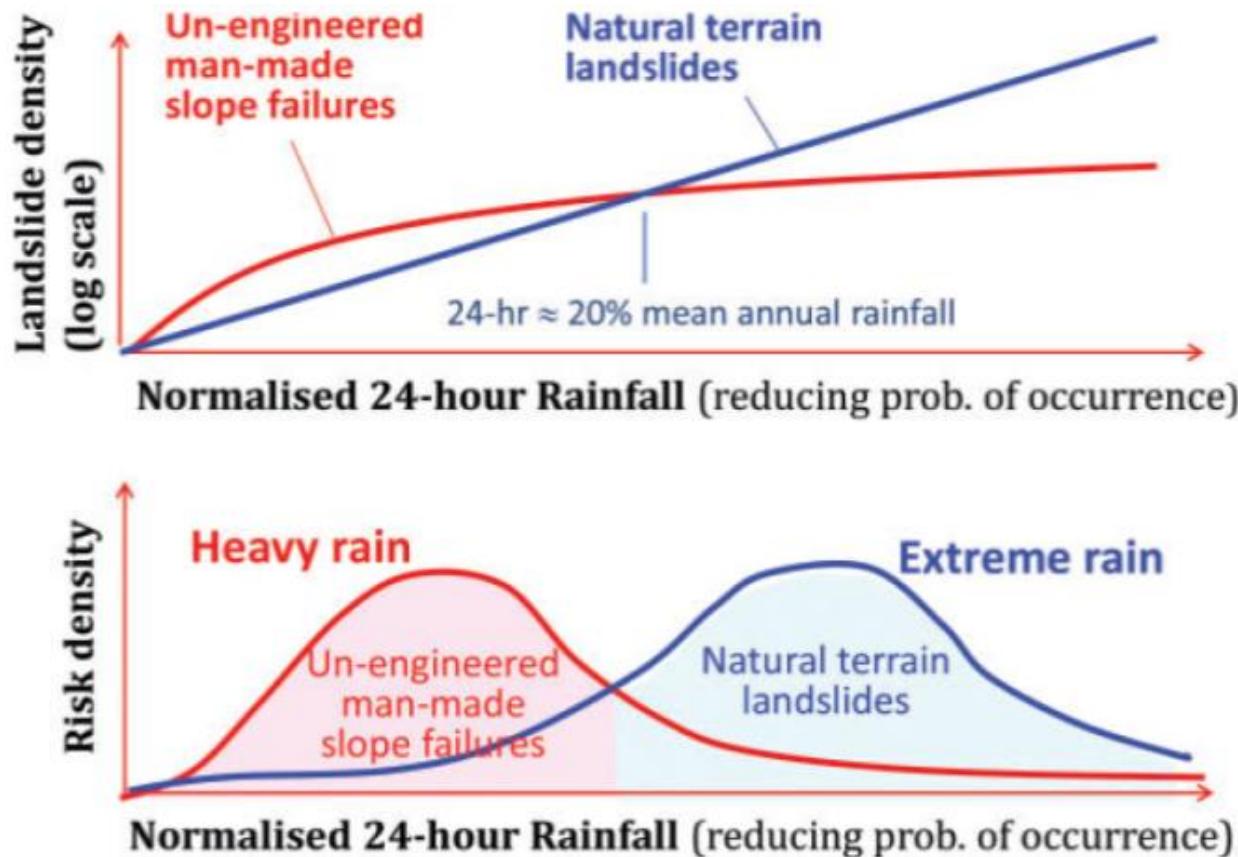


Elaine Lam



Frankie Lo

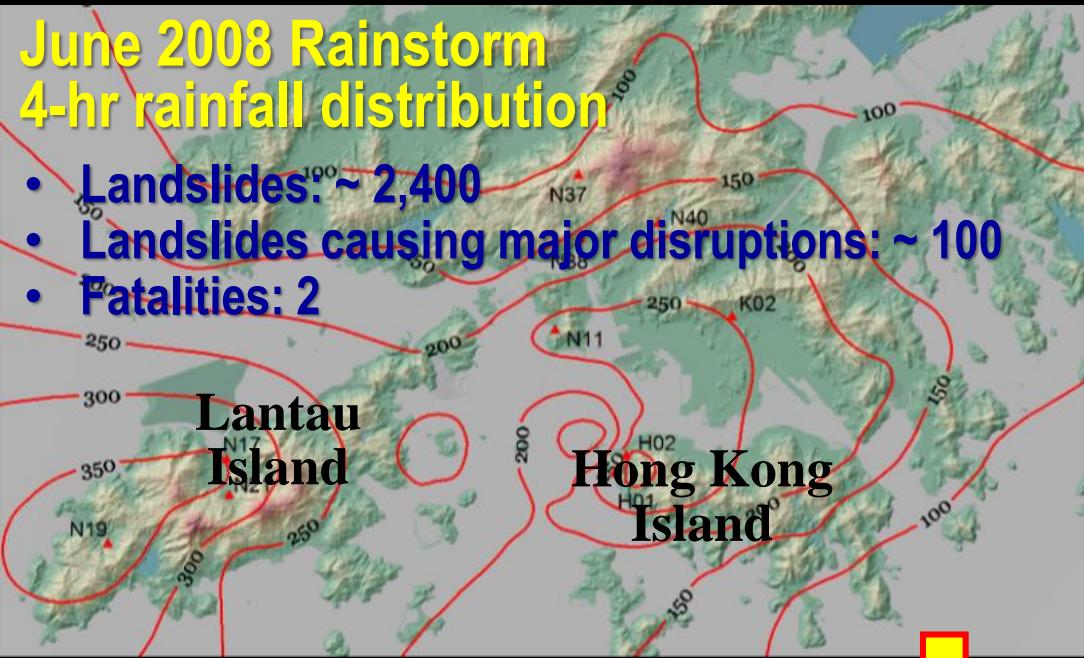
# Relative Effects of Extreme Rainfall on Man-made Slopes and Natural Terrain



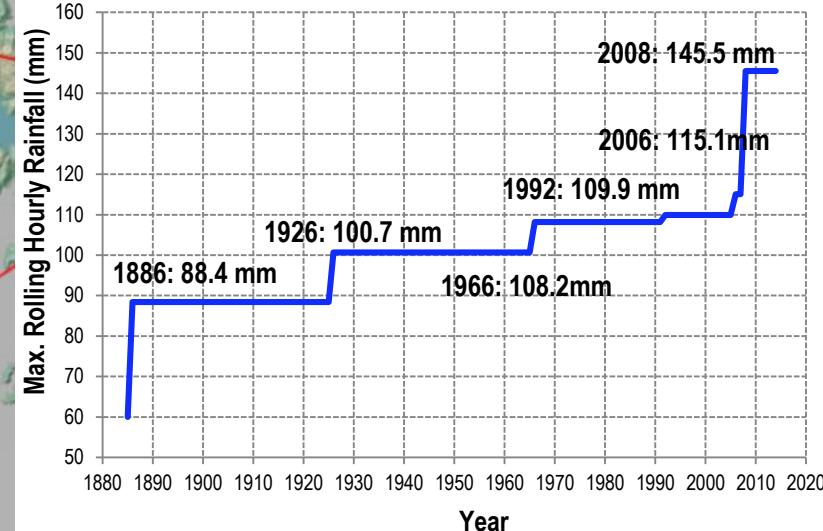
# Extreme Rainfall Scenarios and Stress Testing

## June 2008 Rainstorm 4-hr rainfall distribution

- Landslides: ~ 2,400
- Landslides causing major disruptions: ~ 100
- Fatalities: 2

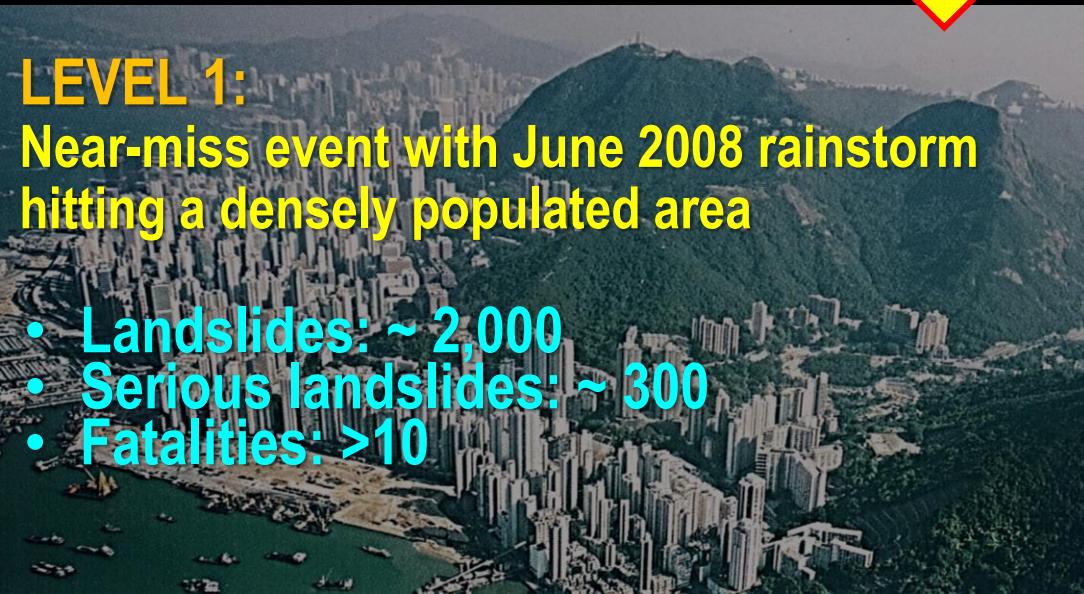


Hourly Rainfall Record at Hong Kong Observatory  
Raingauge (since 1885)



**LEVEL 1:**  
Near-miss event with June 2008 rainstorm  
hitting a densely populated area

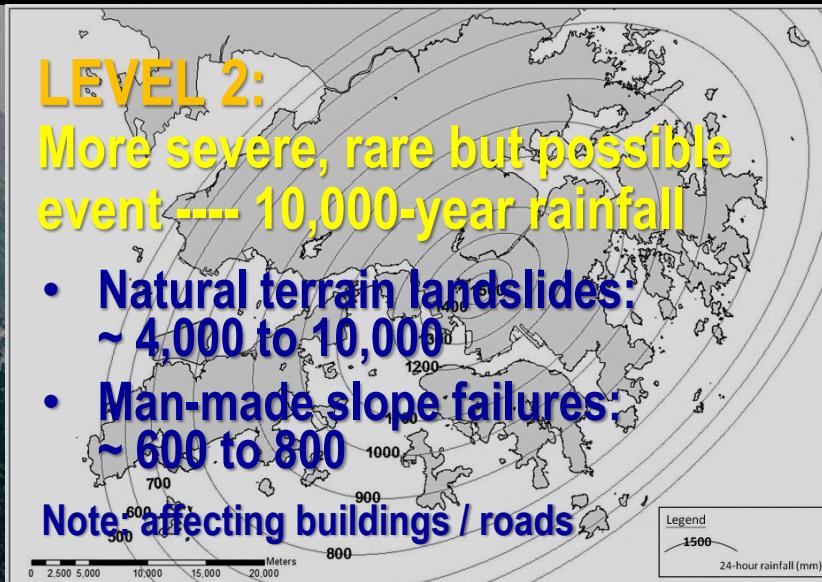
- Landslides: ~ 2,000
- Serious landslides: ~ 300
- Fatalities: >10



**LEVEL 2:**  
More severe, rare but possible  
event ---- 10,000-year rainfall

- Natural terrain landslides: ~ 4,000 to 10,000
- Man-made slope failures: ~ 600 to 800

Note: affecting buildings / roads



# We need to gear up to tackle:

- Concurrent multiple hazards (landslide, flooding, overland flow)
- Cascading effects

COP for Emergency Management

Reporting period  
Custom  
From 05/06/2020 to 09/06/2020

Emergency Control Centre

	BD	Inactive
	CEDD	Inactive
	DSD	Inactive
	HD	Inactive
	HyD CB	Inactive
	HyD NT	Inactive
	HyD TMCA	Inactive
	HyD TIRMAN	Inactive

Status < >

Incident Summary List

- 2020/06/2675 (Minor)  
Created Date: 09/06/2020 20:02:06  
Location: 180M SE OF MA ON SHAN HAT SUEN, MA...
- 2020/06/0377 (Minor)  
Created Date: 09/06/2020 19:48:44  
Location: Sam Tung UK Resite Village
- 2020/06/2674 (Minor)  
Created Date: 09/06/2020 19:47:58  
Location: 180M SE OF MA ON SHAN HAT SUEN, MA...

All Departments < >

Reported Incident Overview Map

Show Major Cases Only Show Active Cases Only

GIS Map Platform

FULL FUNCTION MODE QUICK PREVIEW MODE

Radar (64km)

Reported Road  
Reported Flooding  
Reported Landslide

Incident Summary by Departments

 BD Incidents 0	 DSD Incidents 39	 CEDD Incidents 50
 HyD Incidents 1	 HD Incidents 0	 LandsD Incidents 14

All Incidents < >

# Strategies for Managing Extreme Weather Events

\* Most effective ones are improved emergency management & enhanced community preparedness and resilience

**Prevention**  
enhance slope design & practice

**Preparedness\***

**Mitigation**  
implement landslip mitigation measures (e.g. upgrading & retrofitting works)

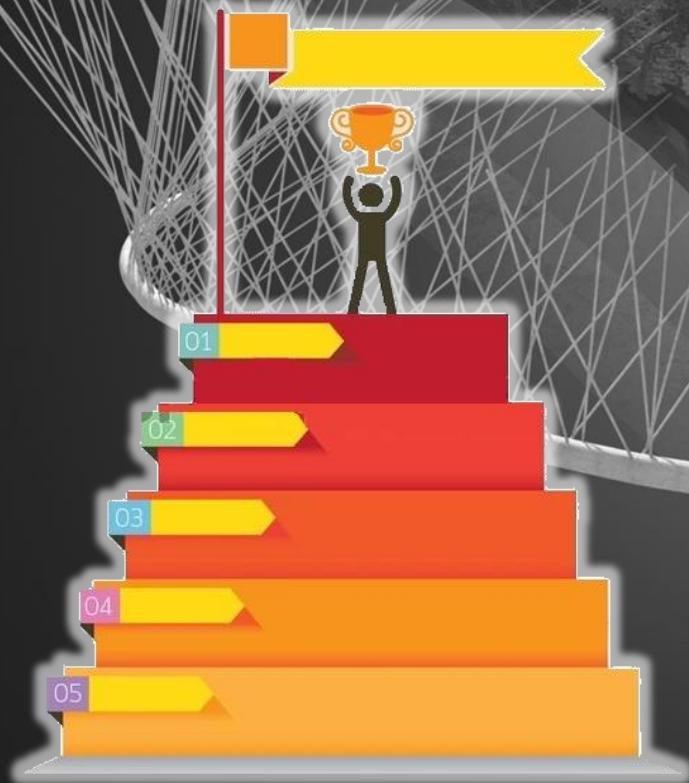
**Response\***

**Recovery\***

A black and white photograph capturing a massive engineering disaster. A long, multi-story concrete wall has suffered a catastrophic failure, with a massive wedge of earth and debris cascading down its length. The ground in front is covered in a thick layer of rubble and soil. In the background, other buildings and parts of the same structure are visible, showing signs of damage and instability. The scene conveys a sense of immense structural failure and environmental impact.

## CONCLUDING REMARKS

# Keys to an effective disaster risk management system : People, Policy, Technology & Data



Ignorance

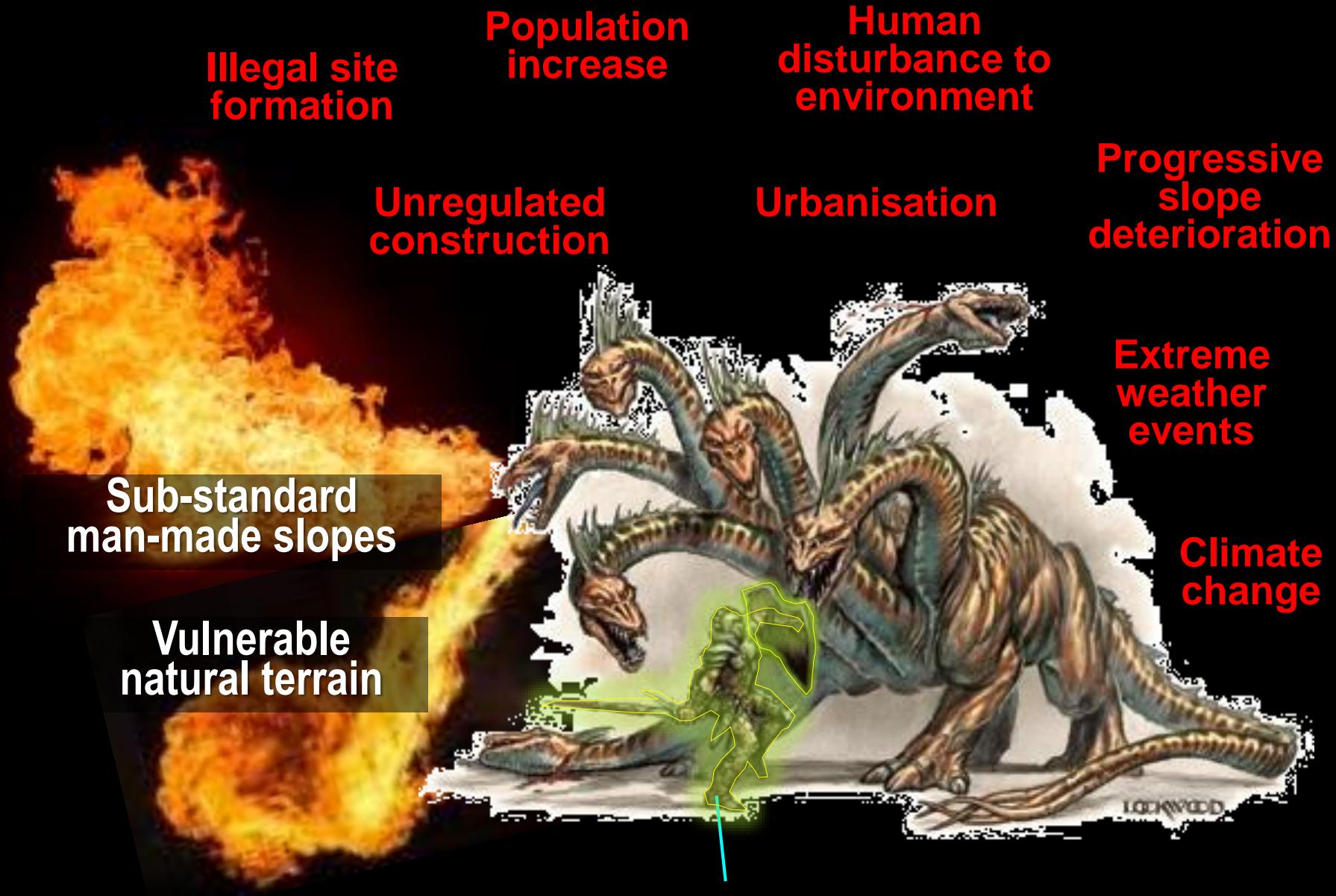
Inertia

Complacency

Gambler's mentality  
*- hope for the best*

Unconscious of  
changing environmental  
conditions

Unconscious of changing  
public expectations



RISK MANAGER

# THANK YOU!





Instituto Colombiano de Ensayos  
e Investigaciones Geotécnicas



50  
años  
1971-2021

## Gestión del riesgo para afrontar la inestabilidad de laderas y el calentamiento global antropogénico en los países en desarrollo



Sergio Mora Castro

[smoracastro@consultarx.com](mailto:smoracastro@consultarx.com)

1

**infobae**  
AMÉRICA ARGENTINA MÉXICO COLOMBIA TENDENCIAS DEPORTES

VENEZUELA  
Tragedia en Venezuela: la cifra de muertos por un deslave aumentó a 36 mientras continúa la frenética búsqueda de sobrevivientes

Al menos 36 personas murieron en Venezuela, debido a las fuertes lluvias que ocasionaron el desbordamiento de una quebrada

Atípica temporada de lluvias, agravada por el fenómeno de La Niña, ondas tropicales y los coletazos del huracán Julia.



Los miembros de rescate trabajan después de un deslizamiento de tierra debido a las fuertes lluvias, en Las Tejerías, estado de Aragua, Venezuela, 10 de octubre de 2022 (REUTERS/Leonardo Fernando Viloria)

Un militar, al frente de una cuadrilla, dirige las labores de búsqueda con un altavoz en este pueblo industrial. "Están removiendo escombros y se vio sangre", dice el oficial desde un techo de concreto en una de las pocas estructuras que quedó en pie luego del deslave.

Es el peor desastre natural de Venezuela en décadas: La crecida del río, de hasta seis metros en las estructuras más cercanas al cauce, arrastró automóviles, porciones de viviendas y las antenas telefónicas.

¿Hasta cuándo seguiremos responsabilizando a la naturaleza y al cambio climático de los desastres?



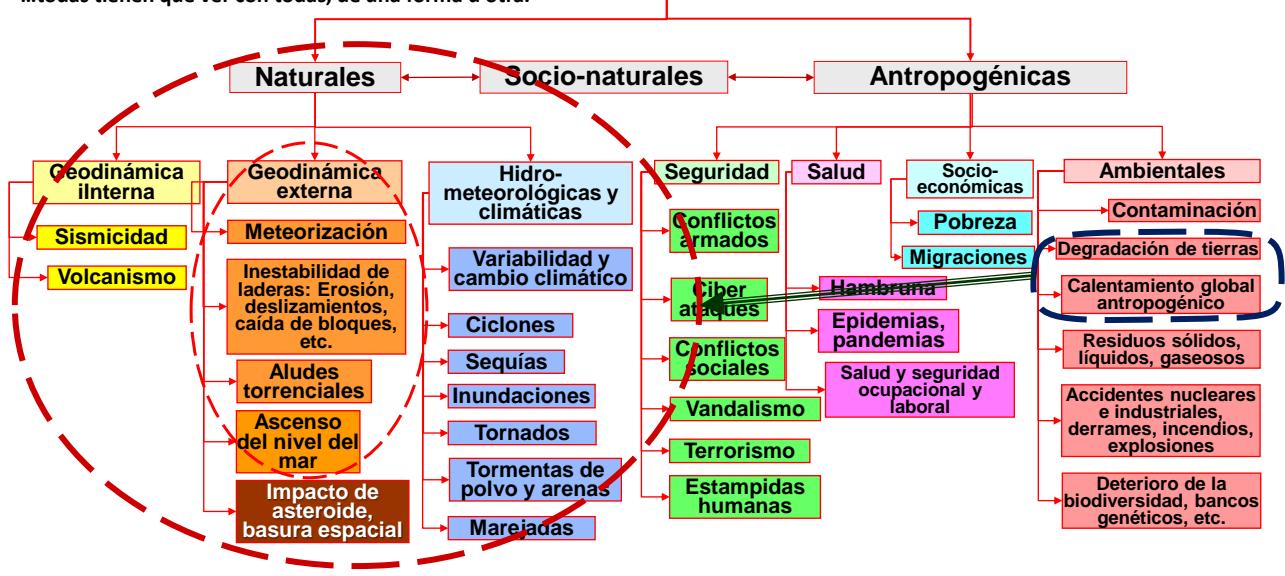
SMora

2

# Riesgo derivado de la inestabilidad de laderas e influencia del CGA

Gestión del riesgo: Debe considerar todas las amenazas y vulnerabilidades, asociadas y respectivas...

...todas tienen que ver con todas, de una forma u otra.

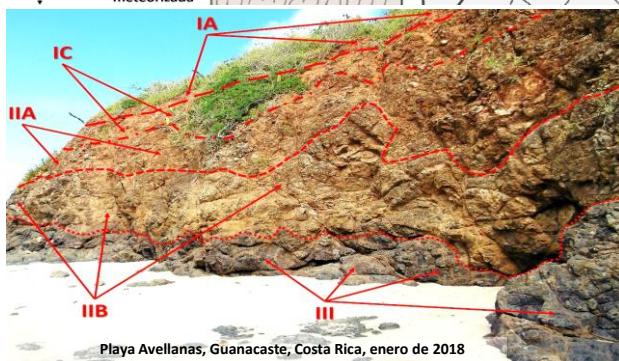
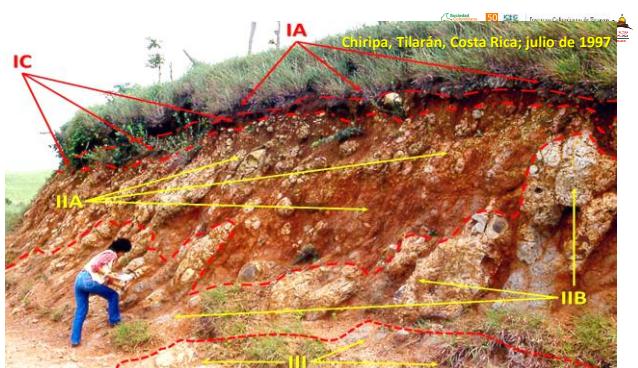
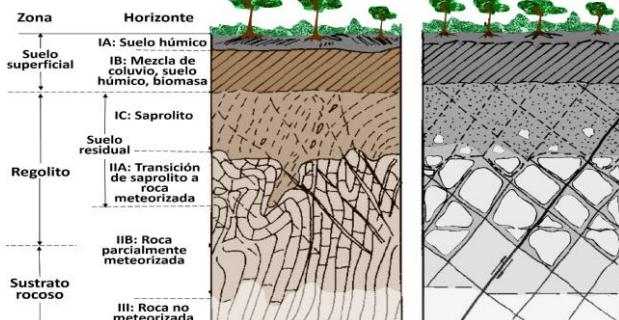


SMora

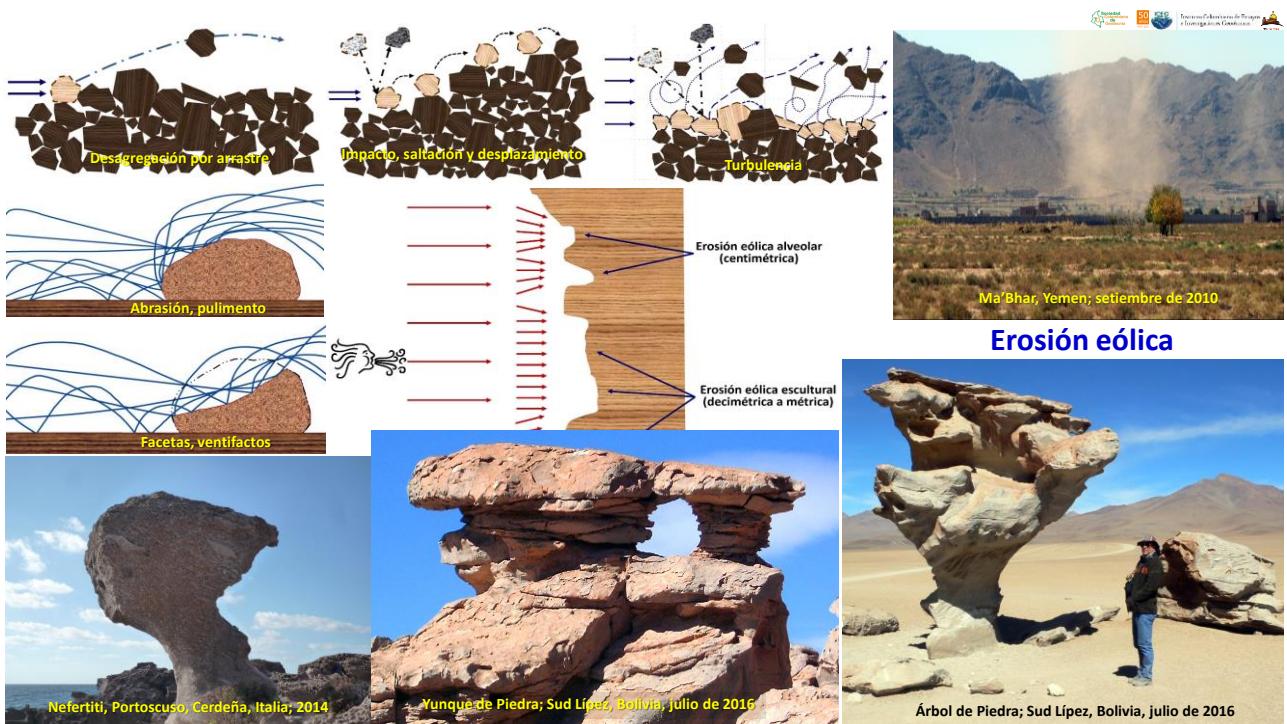
3

3

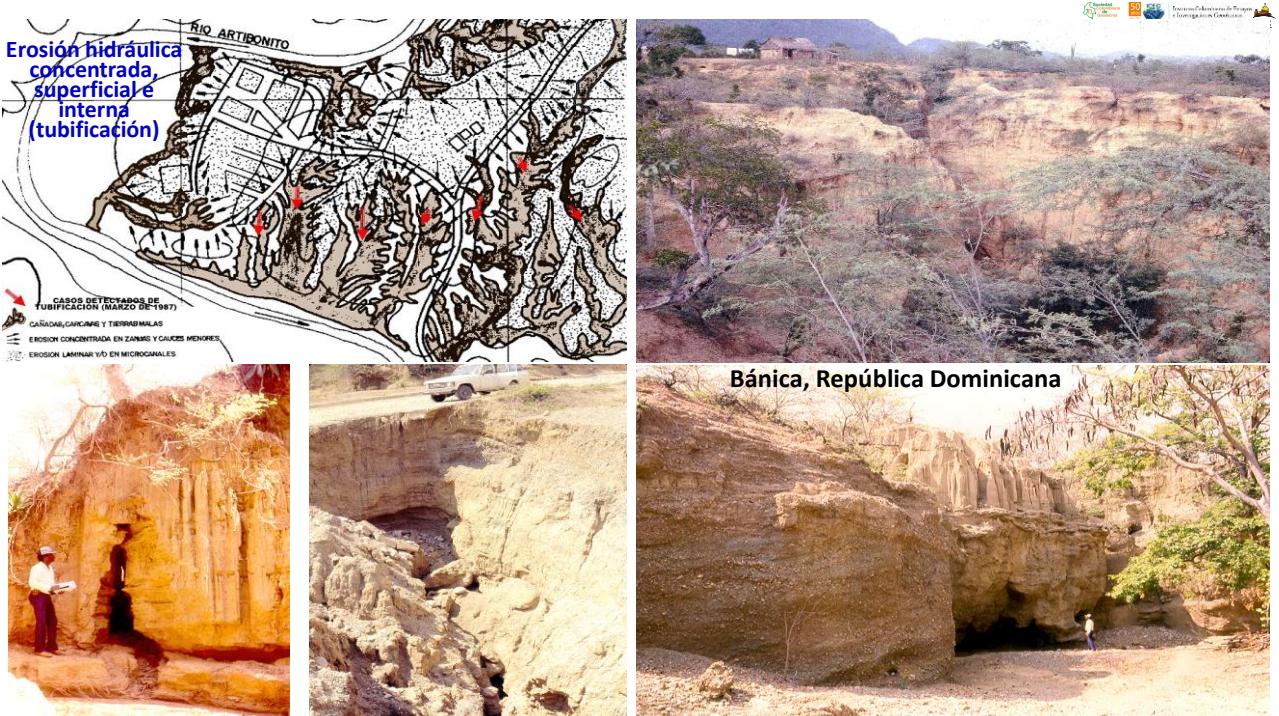
## La meteorización



4



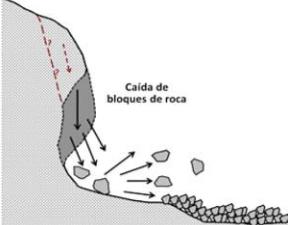
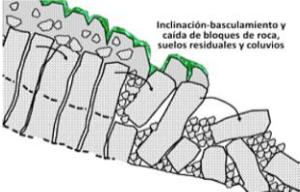
5



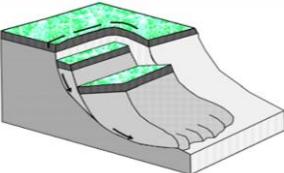
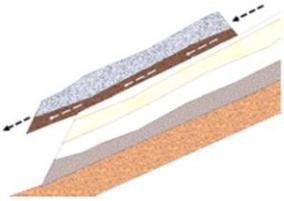
6

# Riesgo derivado de la inestabilidad de laderas e influencia del CGA

## Clasificación de los procesos de la inestabilidad de laderas: Basado en Varnes (1954, 1978); Varnes y Cruden (1996); Hungr, Leroueil & Picarelli (2013)

Tipo de movimiento	R - Roca y bloques grandes (métricos) de roca	M - Mezcla de detritos rocosos, suelos, biomasa, hielo y nieve	S - Suelos finos, biomasa
<b>C - Caída libre, rebotes, fragmentación y propagación</b>	<p><b>CR-1.</b> Caída libre, rebotes y fragmentación de bloques de rocas.</p> 	<p><b>CM-2.</b> Caída de masas con mezclas de bloques rocosos y en ocasiones con suelos, hielo y nieve.</p> 	<p><b>CS-3.</b> Caída de masas con mezclas variables de suelos, biomasa y en ocasiones, hielo y nieve.</p>  <p>Catati, Sucre, Bolivia; mayo de 2006</p>
<b>I - Inclinación, basculación, volcamiento y caída, rebotes, fragmentación y propagación</b>	<p><b>IR-1.</b> Inclinación-basculación, volcamiento, caída y fragmentación de columnas y/o bloques de roca.</p> <p><b>IR-2.</b> Inclinación-basculación, con flexura, caída, rebotes y fragmentación de columnas de roca.</p> 	<p><b>IRMS-3.</b> Inclinación-basculación de masas con mezclas de rocas, suelos, biomasa, hielo y nieve</p> 	 <p>Columnas de ignimbrita, Oligoceno, Sinaloa, México; setiembre de 2012</p> <p>Areniscas y conglomerados, Plioceno; Palca, Bolivia; marzo de 2006</p>

7

Tipo de movimiento	R – Roca y bloques grandes (métricos) de roca	M - Mezcla de detritos rocosos, suelos, biomasa, hielo y nieve	S - Suelos finos, biomasa
<b>T - Deslizamiento traslacional, por translación y/o rotación sobre superficies planas, prismáticas o curvas cóncava hacia arriba</b>	<p><b>TR-1.</b> Deslizamiento rotacional de masas de rocas.</p> <p><b>TR-2.</b> Deslizamiento y translación de masas y bloques rocosos sobre superficies planas.</p> <p><b>TR-3.</b> Deslizamiento de masas rocosas con formas prismáticas, cuneiformes.</p> <p><b>TR-4.</b> Deslizamiento y translación compuesta, sobre superficies irregulares, de masas de rocas.</p>  <p>Deslizamiento, translación, rotación de masas de terrenos.</p>  <p>Deslizamiento traslacional-planar de masas de rocas.</p>	<p><b>TM-5.</b> Deslizamiento rotacional; masas rocosas, suelos, biomasa, hielo y nieve.</p> <p><b>TM-6.</b> Deslizamiento traslacional sobre superficies de ruptura planares y/o rotacionales en terrenos con masas rocosas y suelos intercalados y superficiales.</p> <p><b>TM-7.</b> Deslizamiento, sobre superficies planas, cóncavas y compuestas, en masas con mezclas de bloques rocosos, suelos, y proporciones menores de biomasa, hielo y nieve.</p> <p><b>TMS-8.</b> Deslizamiento traslacional, cóncavo y compuestos, de masas con mezclas de bloques rocosos, suelos gruesos y finos, biomasa, hielo y nieve.</p>  <p>Shishio, Cuenca, Ecuador; setiembre de 1994.</p>  <p>Purisil, Cartago, Costa Rica; noviembre de 1997.</p>  <p>Arenisca y lutitas, Oligoceno, Esquipulas, Río Naranjo, Costa Rica; abril 1985.</p>	<p><b>TS15.</b> Deslizamiento rotacional de suelos predominantemente finos (arcillas y limos), y biomasa.</p> <p><b>TS16.</b> Sobre superficies planas; translación, de suelos predominantemente finos (arcillas y limos).</p> <p><b>TS17.</b> Reptación de suelos, y biomasa.</p> <p><b>TS18.</b> Solifluxión de suelos, y biomasa.</p>   <p>Losa de caliza del Eoceno medio-superior, sobre una marga meteorizada; Corredores, Puntarenas, Costa Rica; noviembre de 1985.</p>

8

8

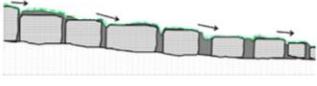
Tipo de movimiento	R - Roca y bloques grandes (métricos) de roca	M - Mezcla de detritos rocosos, suelos, biomasa, hielo y nieve	S – Suelos finos, biomasa
<b>F - Flujos y aludes de materiales sueltos, en conjunto y mezclados con agua</b>	<p><b>FR-1.</b> Alud de rocas, con proporciones menores de agua, suelos y biomasa.</p> <p>Alud y deyección de bloques de roca; torrencial cuando se asocia a lluvias intensas y proporciones agua-sólidos elevadas.</p> <p><b>KR-1.</b> Deslizamiento complejo-compuesto de masas de roca, mezcladas con suelos y biomasa.  <b>KR-2.</b> Colapso, subsistencia y hundimiento de masas rocosas con algún grado de solubilidad (e.g. kárst).  <b>KR-3.</b> Socavación en cascadas y acantilados</p> <p>Mega-deslizamientos complejos de terrenos formados por bloques de masas de rocas y suelos.</p>	<p><b>FM-2.</b> Flujo de bloques rocosos, con mezclas menores de agua, suelos, biomasa y nieve.  <b>FM-3.</b> Alud torrencial, mezcla variable de bloques rocosos y suelos, con proporciones elevadas de agua y cantidades menores de biomasa, hielo y nieve.  <b>FM-4.</b> Lahares; alud torrencial en edificios volcánicos; mezcla de bloques rocosos y piroclastos, con proporciones variables de agua, biomasa, hielo y nieve.  <b>FM-5.</b> Flujo hiperconcentrado y licuado con bloques rocosos, gravas, arenas y suelos finos.  <b>FMH-6.</b> Aludes de hielo, con proporciones variables de nieve, fragmentos de rocas y suelos.  <b>FHM-7.</b> Avalanche de hielo y/o nieve.</p>	<p><b>FS-8.</b> Flujo seco de gravas, arena y limo.  <b>FS-9.</b> Flujo de limos y arcillas plásticas.  <b>FS-10.</b> Deslizamiento y flujo de arena, limo y proporciones menores de bloques rocosos y biomasa.  <b>FS-11.</b> Flujo de turbas.</p> <p><b>KS-5.</b> Colapso, asentamiento, sifón y tubificación de suelos granulares, arenosos, loess, cenizas volcánicas, diatomitas.</p>
<b>K - Complejos, compuestos; combinación de dos o más procesos; megadeslizamientos y colapsos verticales del techo de cavidades subterráneas</b>		<p>Achocalla, La Paz, Bolivia; abril de 2007.</p>	<p>Kalahawira, Calacoto, La Paz; Bolivia; marzo 2006.</p>

9

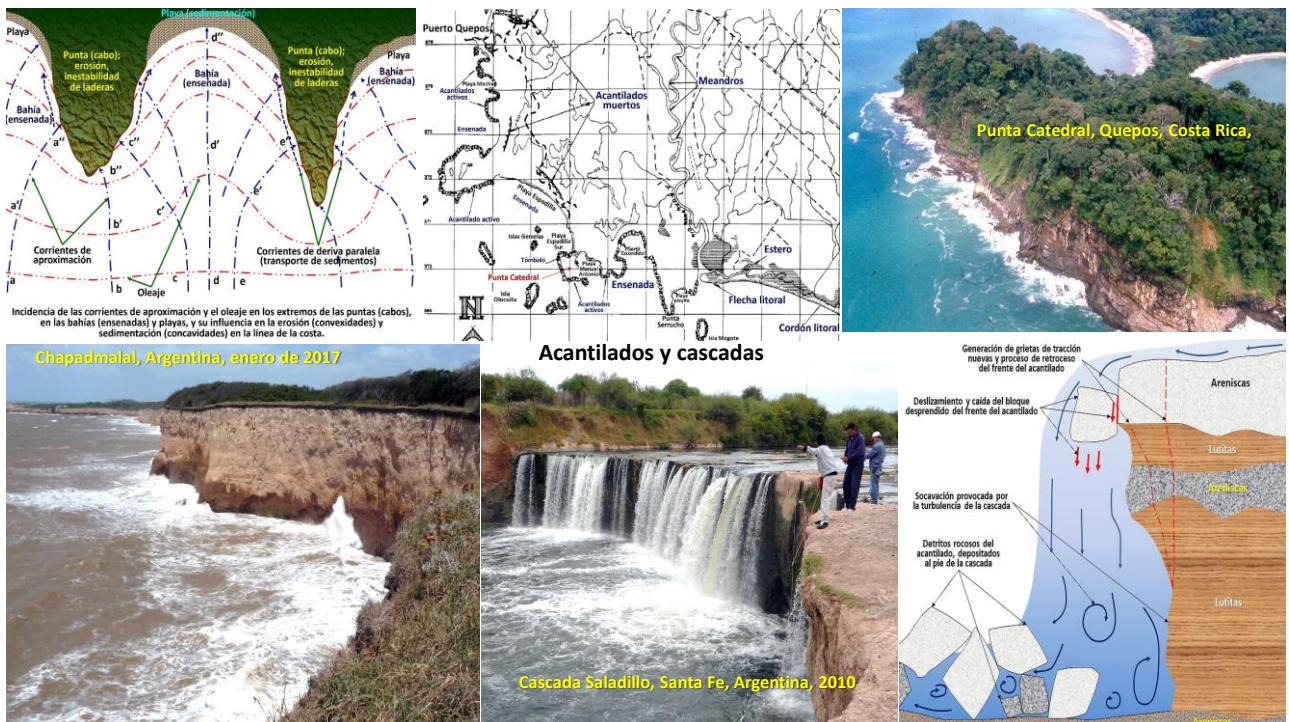
Tipo de movimiento	R - Roca y bloques grandes (métricos) de roca	M - Mezcla de detritos rocosos, suelos, biomasa, hielo y nieve	S – Suelos finos, biomasa
<b>R - Represamiento de cauces fluviales y sus efectos conexos</b>	<p><b>R-1.</b> Represamiento temporal de cauces fluviales, con mezclas de materiales rocosos, suelos y biomasa.</p> <p>Represamiento, Río Toro; 1992</p>		<p>North Young, Nueva Zelanda, 10 de mayo de 2008</p>
<b>A - Inestabilidad y desprendimientos en cortes, taludes, apilamientos, rellenos y depósitos construidos o influenciados por la actividad antrópica</b>	<p><b>AM-1.</b> Deslizamiento y flujo en depósitos y apilamientos antropogénicos, con mezclas de fragmentos rocosos, suelos, escombros, basura y biomasa.</p> <p>Deslizamiento 28 de setiembre, 2015 Deslizamiento Oct. 2015 Las Brisas, Zapote, Costa Rica; 2009</p>		<p>Relleno, margen izquierda del puente (cc. Saprisa) sobre el río Virilla, Tibás, Costa Rica; octubre de 2017.</p>

10

# Riesgo derivado de la inestabilidad de laderas e influencia del CGA

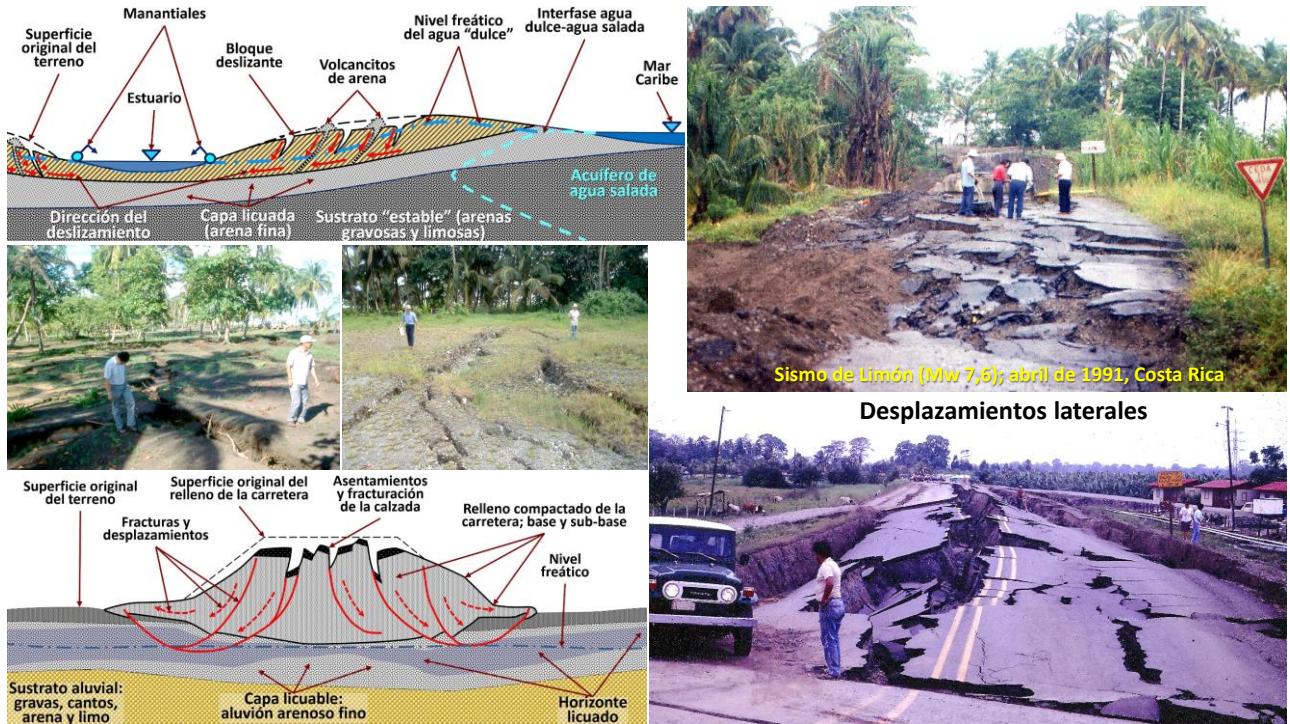
Tipo de movimiento	R – Roca y bloques grandes (métricos) de roca	M - Mezcla de detritos rocosos, suelos, biomasa, hielo y nieve	S – Suelos finos, biomasa
L - Separación, extensión y desplazamiento lateral	<p><b>LR-1.</b> Separación lateral de bloques de roca.  <b>LH-2.</b> Separación lateral de masas de hielo (glaciares).</p>  <p>Desplazamiento y separación lateral de bloques de roca y suelo.</p>	<p><b>LMS-3.</b> Separación y desplazamiento lateral de masas de suelos arenosos, con mezclas menores de gravas, limos y biomasa; frecuentemente activados por licuefacción sísmica.</p>  <p>Licuefacción y desplazamiento lateral de suelos, Vizcaya; sismo de Limón-Telire, Costa Rica; abril de 1991.</p>	 <p>Bloques columnares de brecha volcánica; Sinaloa, México; setiembre de 2015</p>
D - Deposition gravitatoria y/o torrencial de los materiales desprendidos por los procesos de la inestabilidad de laderas y su transporte subsecuente	<p><b>DR-1.</b> Conoides de deyección, predominantemente rocosos, con proporciones menores de suelos y biomasa.</p>  <p>Vizcachani, La Paz, Bolivia, marzo de 2006.</p>	<p><b>DM-2.</b> Abanicos aluviales de piedemonte.  <b>DM-3.</b> Depósitos coluviales en laderas, con mezclas variables de bloques rocosos, suelos y biomasa.  <b>DM-4.</b> Mantos coalescentes extensos (glacis), en el piedemonte, con mezclas variables de bloques rocosos, suelos y biomasa.</p>  <p>Cachi, Orosi, Cartago, Costa Rica; noviembre de 2014.</p>	<p><b>DS-5.</b> Depósitos fluvio-marinos, costeros y litorales, granulares y finos y biomasa.  <b>DS-6.</b> Depósitos eólicos, predominantemente finos y secos.  <b>DS-7.</b> Depósitos glaciares y periglaciares; mezclas variables de bloques rocosos y suelos.</p>  <p>Léogane, Haití, julio de 2012.</p>

11



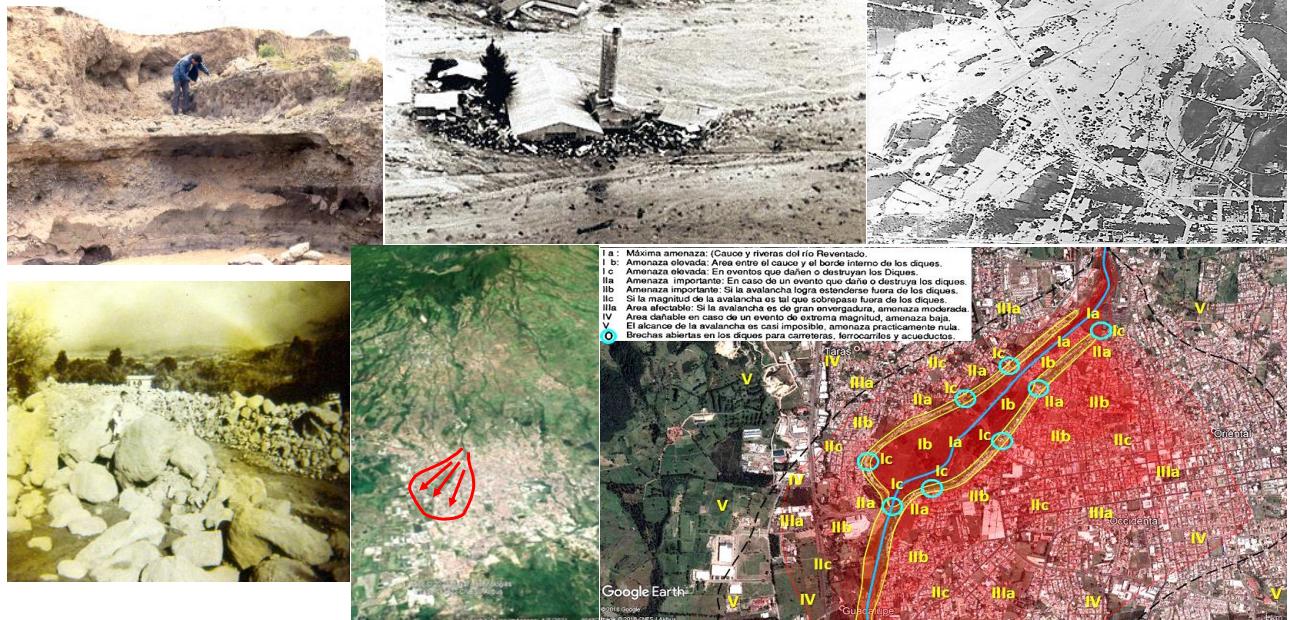
12

# Riesgo derivado de la inestabilidad de laderas e influencia del CGA



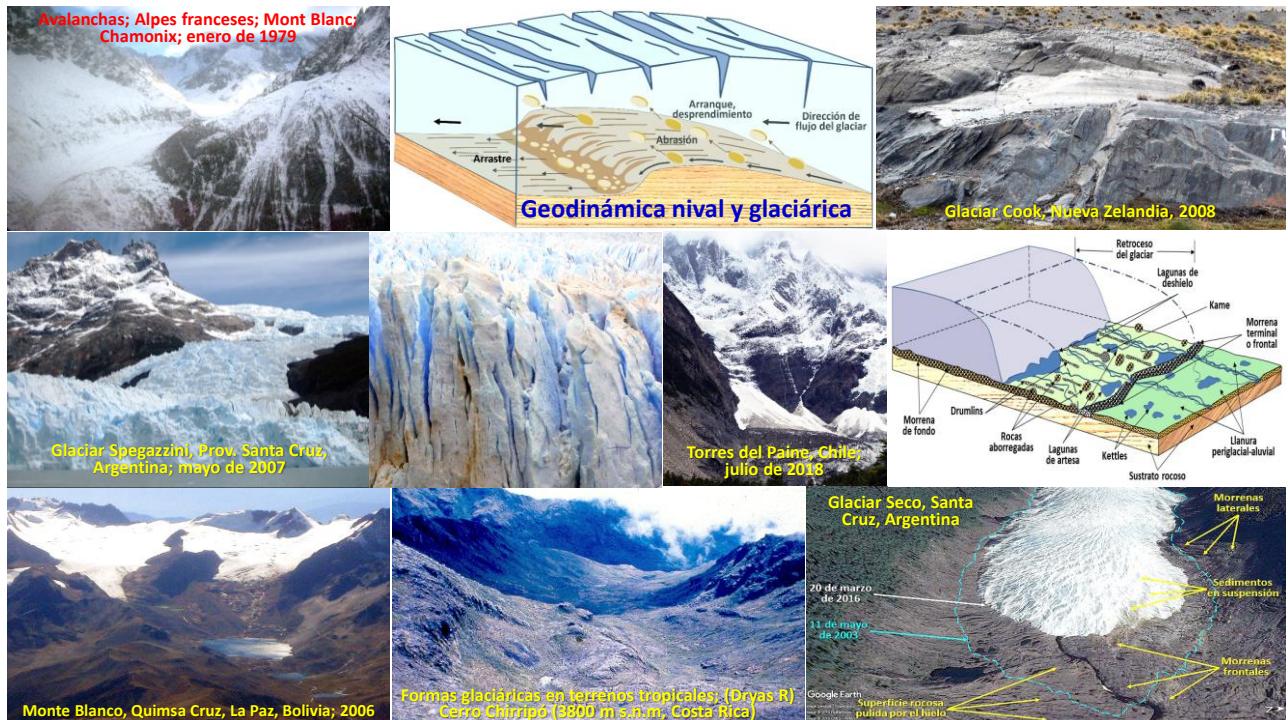
13

## Tránsito y depositación torrencial; flujos híper-concentrados: Lahar, río Reventado, volcán Irazú, Cartago, Costa Rica; 1963

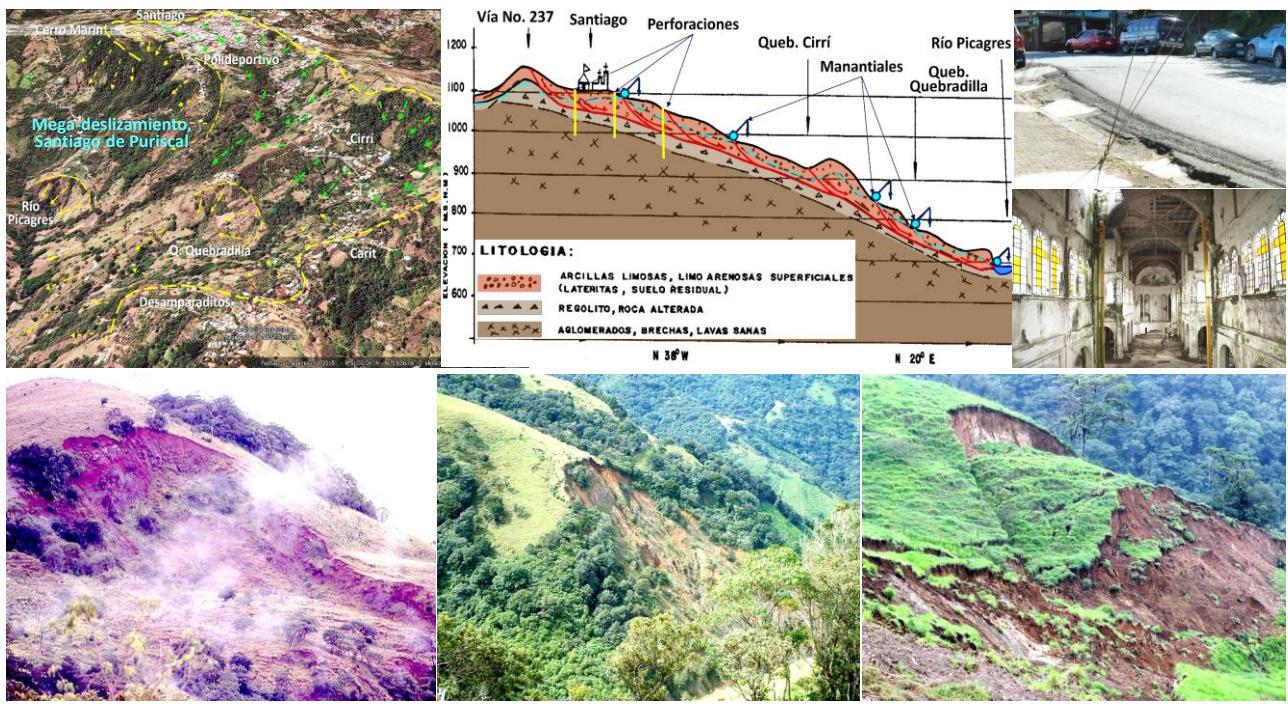


14

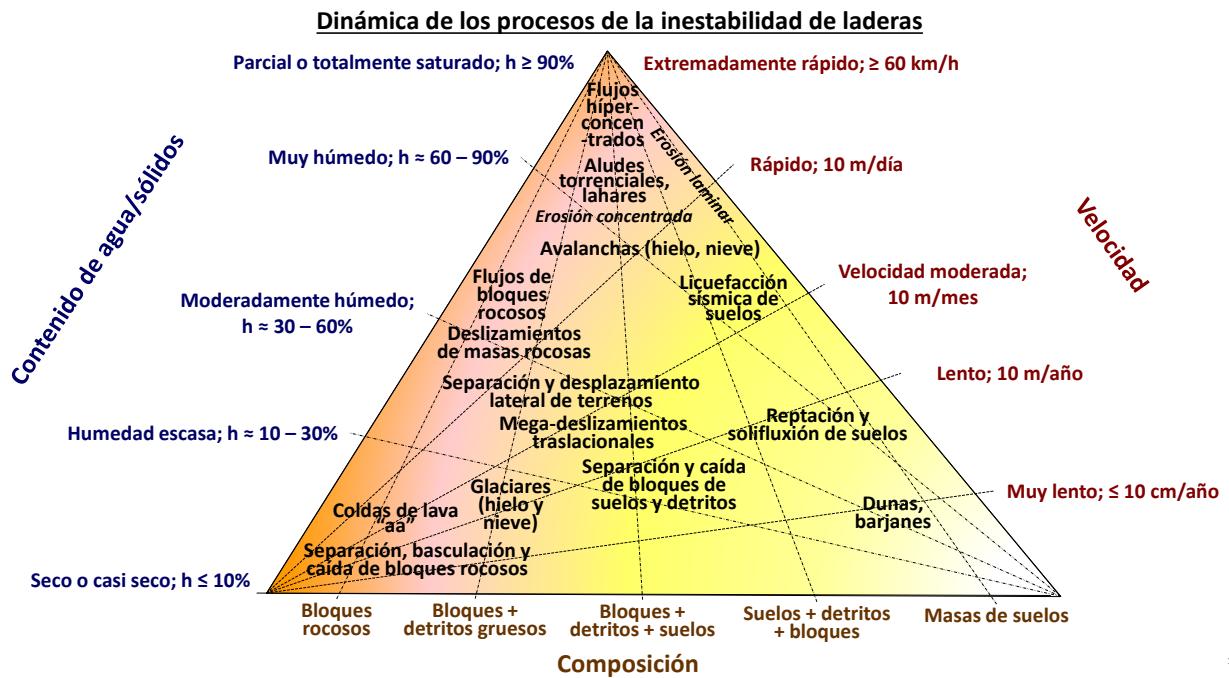
# Riesgo derivado de la inestabilidad de laderas e influencia del CGA



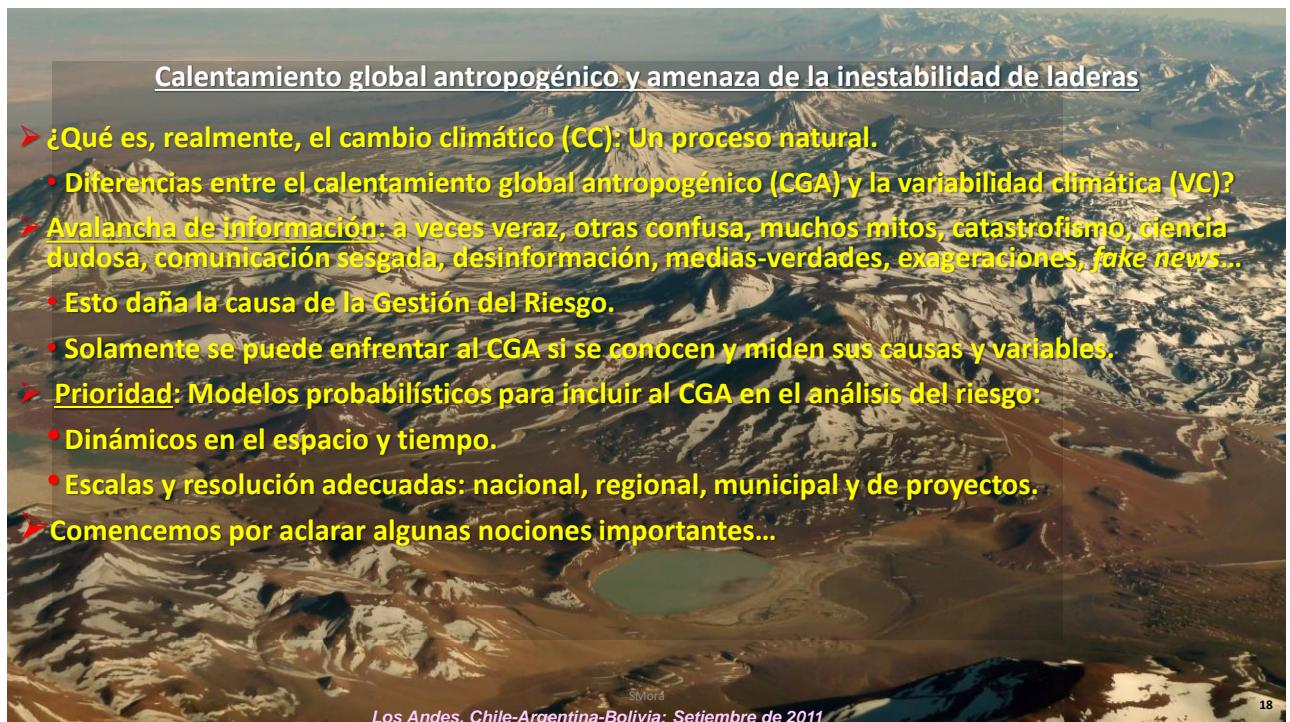
15



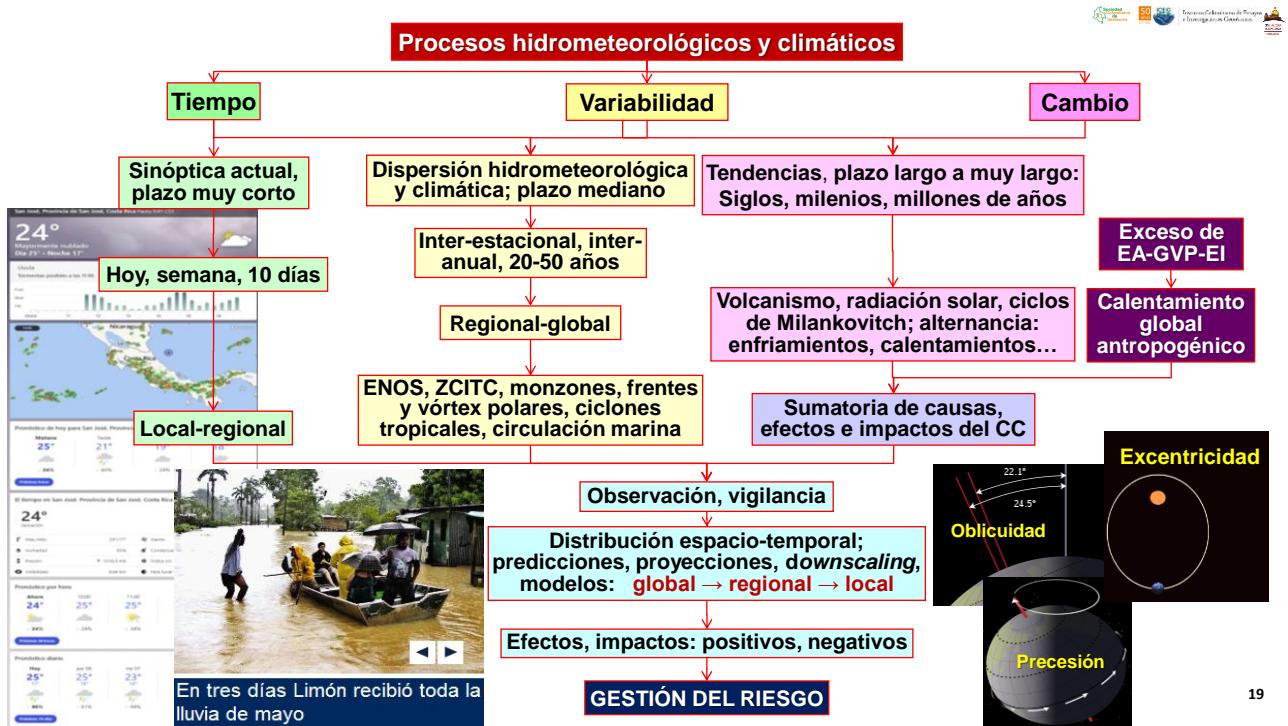
16



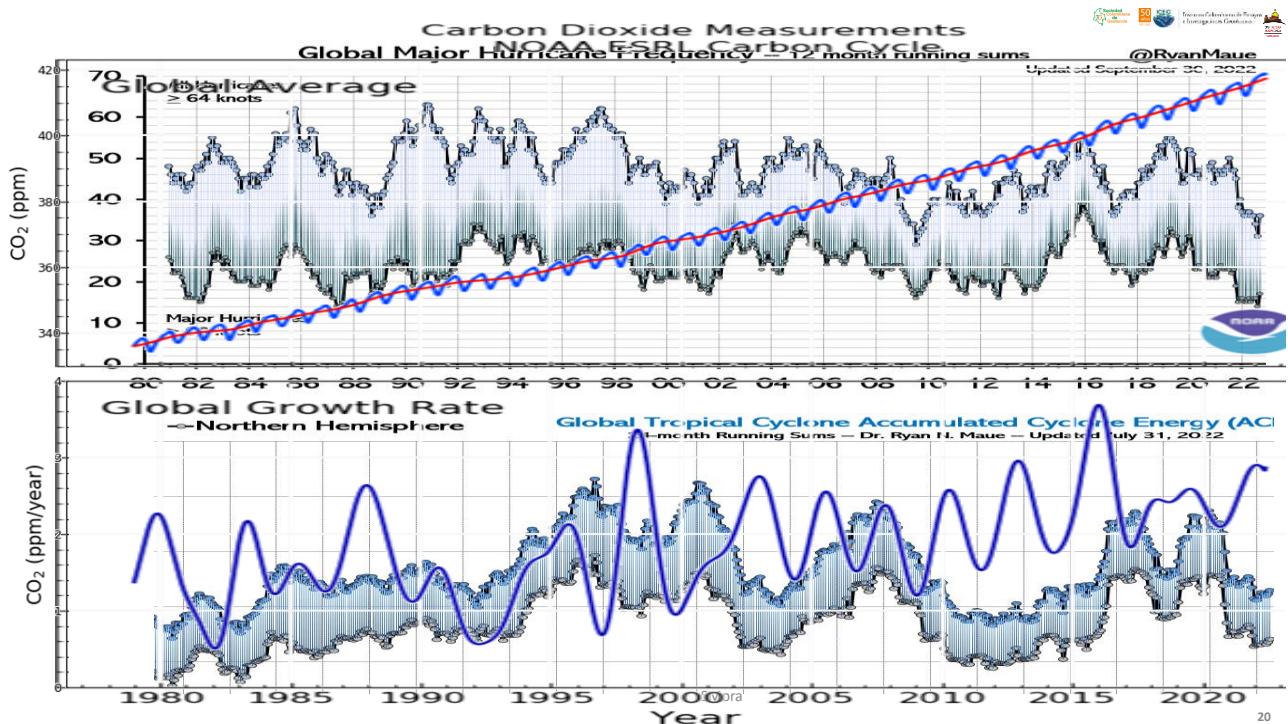
17



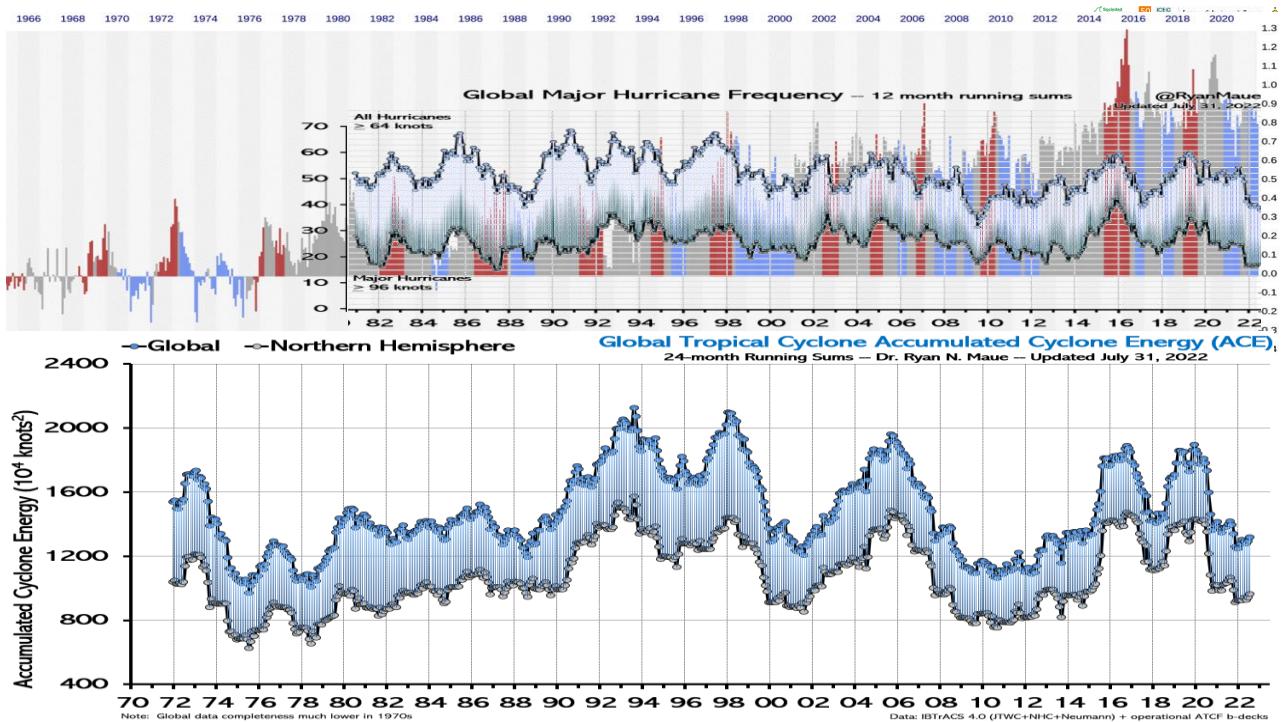
18



19



20



21

### Riesgo:

- Describo mediante la **función de excedencia de pérdidas (FEP)**
- Número de veces por año, con que sucederían eventos que igualen/exceden un valor específico de pérdidas
- Frecuencia anual de excedencia: **Tasa de excedencia**, calculada mediante el teorema de la probabilidad total (<http://www.redalyc.org/pdf/1210/121035720001.pdf> ; [http://www.iitk.ac.in/nicee/wCEE/article/WCEE2012\\_0726.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wCEE/article/WCEE2012_0726.pdf))

#### Eventos

$$v(p) = \sum_{i=1} Pr(P > p | \text{Evento } i) \cdot FA(\text{Evento } i)$$

- $v(p)$ : Tasa de excedencia de la pérdida  $p$
- $FA(\text{Evento } i)$ : Frecuencia anual de materialización del evento  $i$
- $Pr(P > p | \text{Evento } i)$ : Probabilidad de que la pérdida  $P$  supere  $p$  (materialización del  $i$ -ésimo evento).
- $Tr$ : Período de recurrencia de la pérdida  $p$ , i.e. inverso de la tasa de excedencia  $v(p)$
- $P$ : Pérdidas de los elementos expuestos, en los eventos del conjunto de escenarios estocásticos.

Deslizamientos causados por el terremoto (Mw 7,6) de Limón, Costa Rica, abril de 1991

22

# Riesgo derivado de la inestabilidad de laderas e influencia del CGA

## Riesgo e inestabilidad de laderas

$$R = FEP = \sum_{v,e=1}^{V,E} \cdot N_{v,e} \cdot P\left(\frac{x,y,z}{A,V}\right) \cdot \left(\frac{S}{V}\right)_v \cdot \left(\frac{EI}{S}\right)_{v,e} \cdot V_{v,e} \cdot DP_e$$

$R$  = Riesgo =  $FEP$  = Función de excedencia de daños y pérdidas: Durante determinado período, un número de veces  $N$  que, en una localidad específica, la masa desprendida de la ladera, de volumen " $v$ ", puede causar daños y pérdidas a los elementos expuestos " $e$ ", localizados a distancias " $s$ " del origen de la masa.



$N_{v,e}$  = Frecuencia-recurrencia (i.e. 1, 5, 10, 50 años...) con área  $a$  y volumen  $v$  del evento  $e$

$P(x,y,z/A,V)$  = Probabilidad de extensión de la inestabilidad ( $x,y,z$ ) y área  $A$  en la corona del terreno inestable (grietas, deslizamiento...), y que alcance un volumen  $V$ .

$P(S/V)_v$  = Probabilidad de que un volumen de la masa  $v$ , desplazada ladera-abajo, alcance la distancia " $s$ " en donde se encuentra un elemento expuesto  $e$ .

$P(EI/S)_{v,e}$  = Elementos expuestos a los daños y pérdidas. Probabilidad de que un elemento expuesto " $e$ " sea afectado (efecto-impacto,  $EI$ ) por la ruptura del terreno en la corona o por la masa en desplazamiento  $v$ , a una distancia  $s$ .

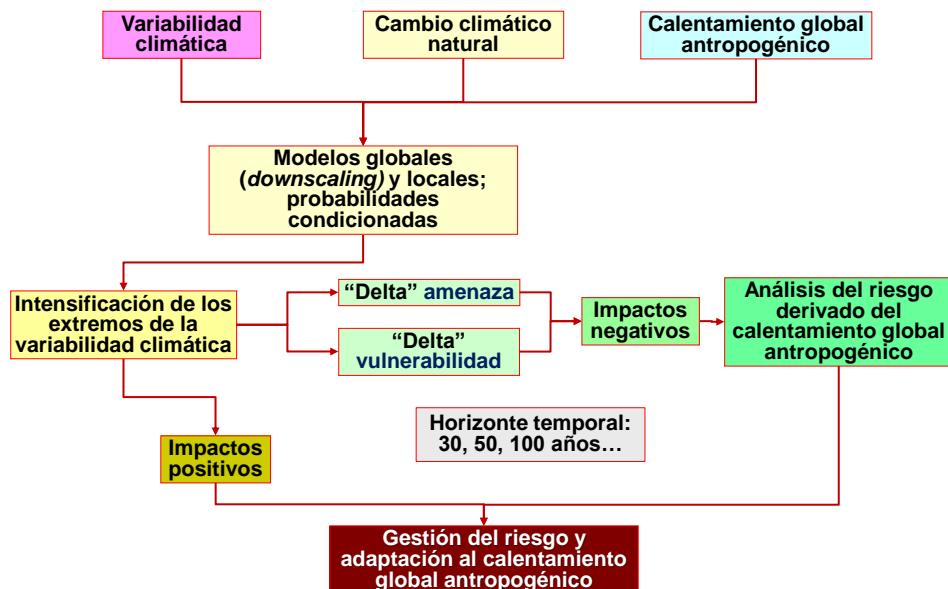
$V_{i,e}$  = Fragilidad de los elementos expuestos a los daños y pérdidas ante el área, volumen y distancia con la que se manifiesta la inestabilidad de la ladera

$DP_e$  = Valor de los elementos expuestos a los daños y pérdidas



23

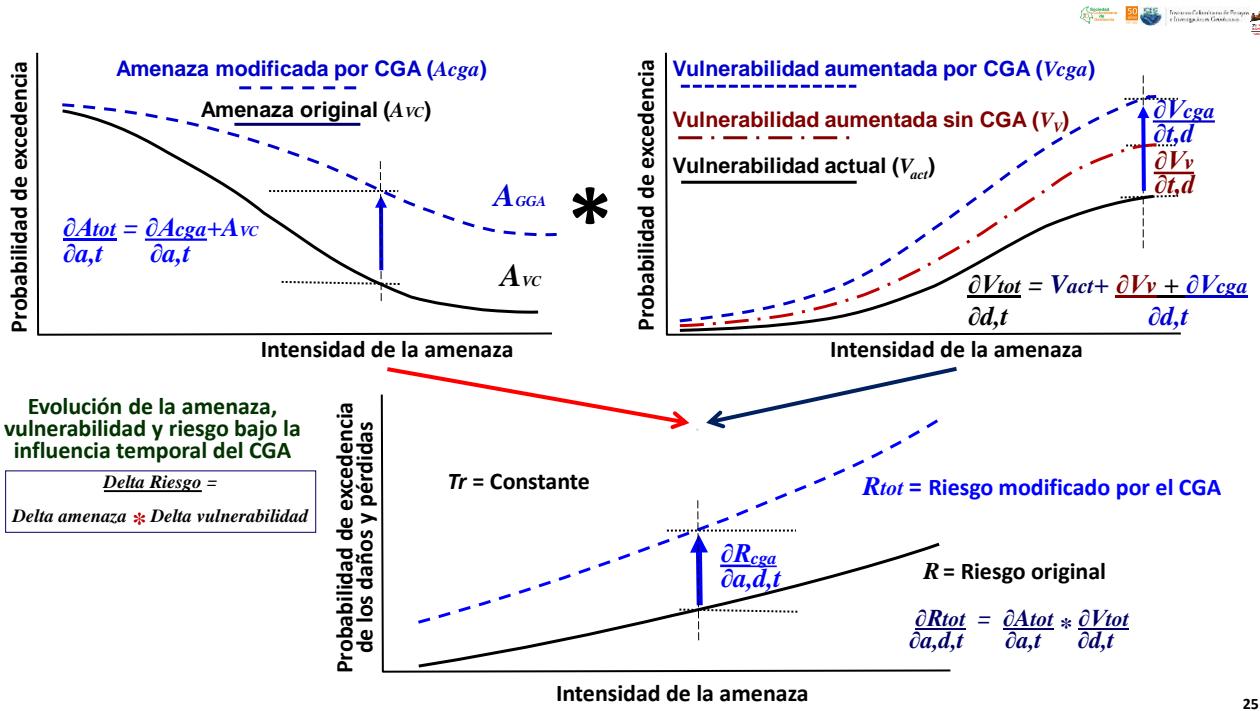
## Análisis del riesgo derivado de los eventos extremos y su evolución, por influencia de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas



24

24

# Riesgo derivado de la inestabilidad de laderas e influencia del CGA



25

25

## Evolución del riesgo e influencia del CGA

- Actualmente, la mayor cantidad de daños y pérdidas son causados por la vulnerabilidad humana y la geodinámica natural, más que por el CC/CGA.
- La evolución del riesgo, en un horizonte temporal, debe analizar la incidencia del CGA sobre amenazas y vulnerabilidad.
- Los cambios no serán súbitos, sino progresivos:

$$\Delta R = \Delta A * \Delta V$$

$$\frac{\partial R}{\partial a,d,t} = \frac{\partial A}{\partial a,t} * \frac{\partial V}{\partial d,t}$$

**R:** riesgo

**A:** amenaza derivada de la inestabilidad de laderas

**da:** cambio de A, a lo largo del plazo  $\partial t$

**V:** vulnerabilidad

**dd:** cambio del potencial de daños y pérdidas durante  $\partial t$ .

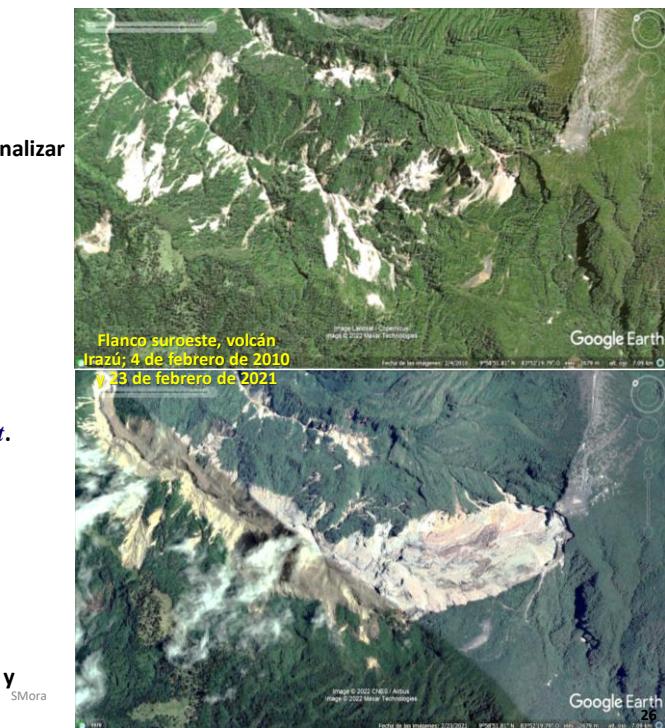
- Tres escenarios posibles:

- El riesgo no cambia:  $\frac{\partial R}{\partial a,d,t} = 0$

- El riesgo disminuye:  $\frac{\partial R}{\partial a,d,t} < 0$

- El riesgo aumenta:  $\frac{\partial R}{\partial a,d,t} > 0$

- El riesgo "nuevo" deberá ser identificado separadamente y agregado al que ya se deriva de la VC...



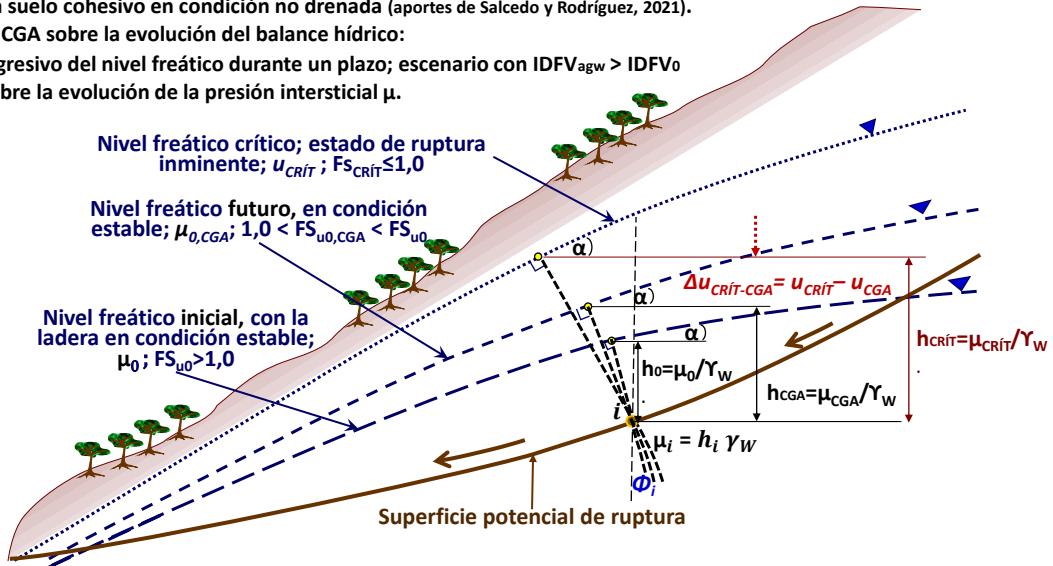
SMora

26

# Riesgo derivado de la inestabilidad de laderas e influencia del CGA

## Y ... ¿en el interior del terreno en una ladera?:

- ... caso de un suelo cohesivo en condición no drenada (aportes de Salcedo y Rodríguez, 2021).
- Influencia el CGA sobre la evolución del balance hídrico:
  - Ascenso progresivo del nivel freático durante un plazo; escenario con  $IDFV_{agw} > IDFV_0$
  - Influencia sobre la evolución de la presión intersticial  $\mu$ .



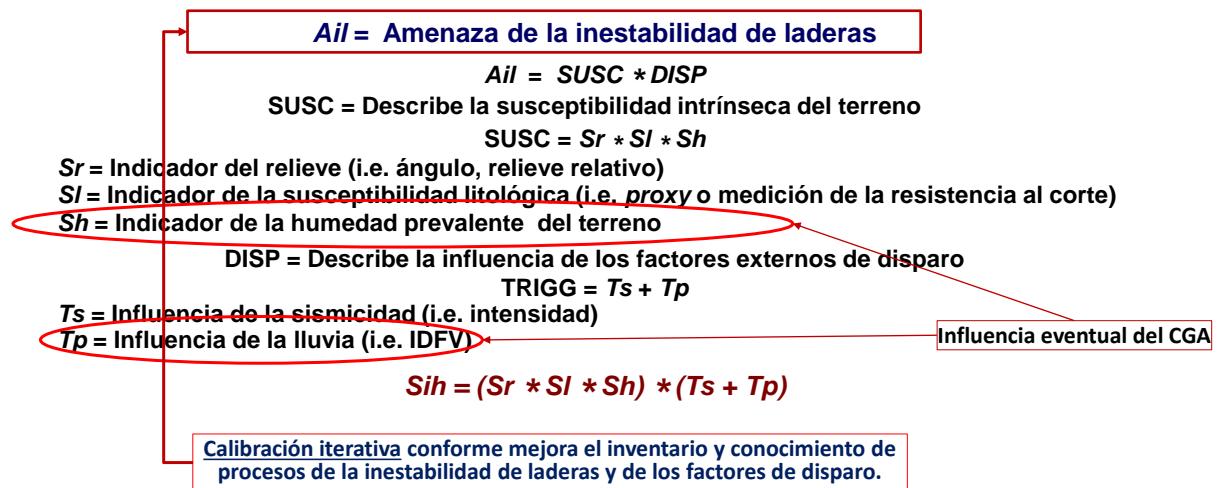
SMora

27

27

## Análisis espacial: Macrozonificación de la amenaza de la inestabilidad de laderas (Ail)

Mora-Vahrson (1994, 2012); modificado por Mora & Saborío (2017, 2019)

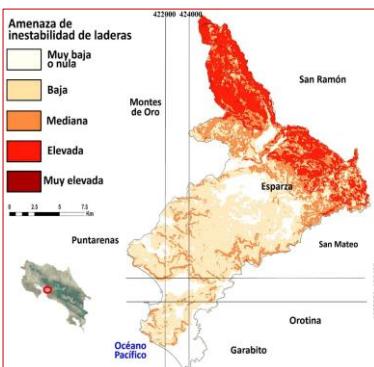
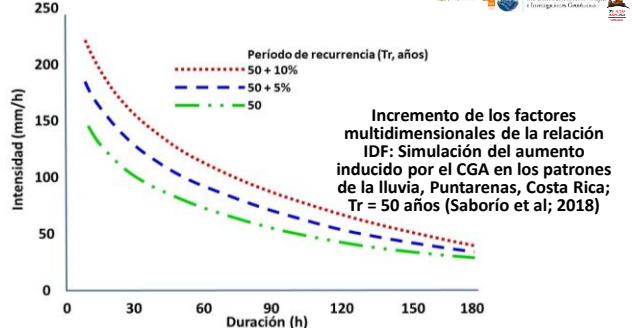
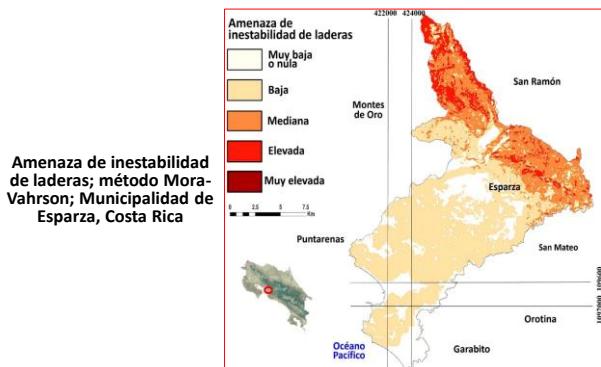
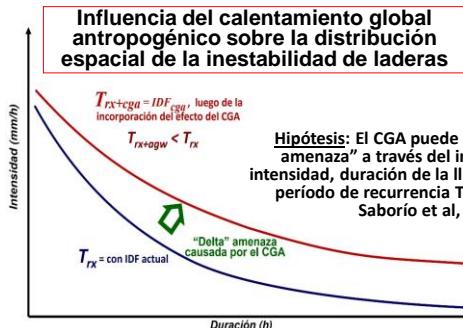


SMora

28

28

# Riesgo derivado de la inestabilidad de laderas e influencia del CGA

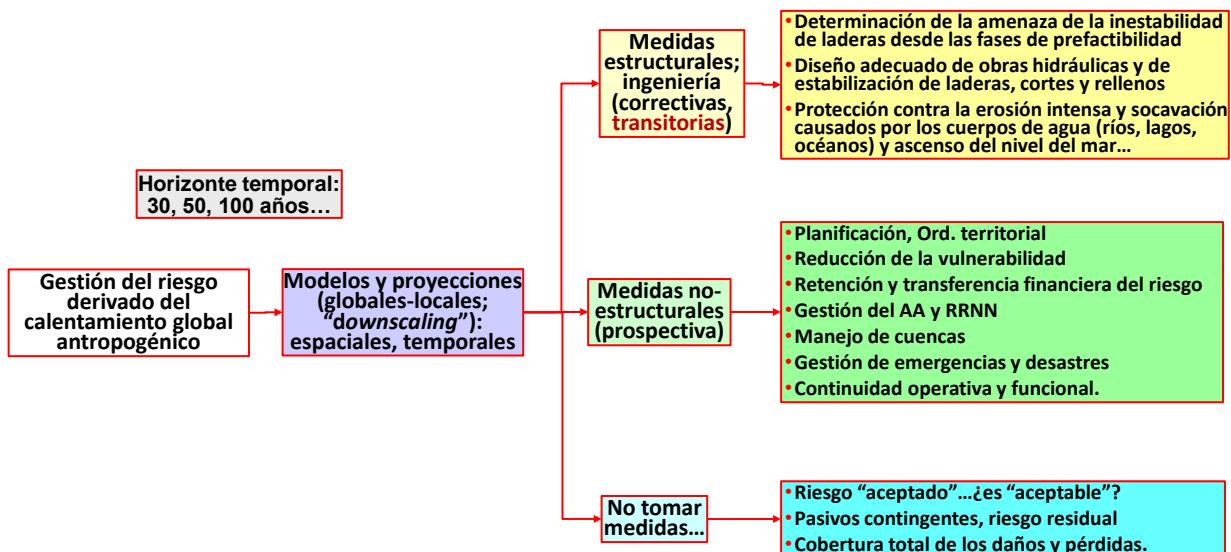


Amenaza de inestabilidad de laderas, incluido el efecto del CGA ( $\Delta_{PPT-cga} \approx +10\%$ )

29



## Gestión del riesgo y calentamiento global antropogénico (CGA+ACC)



SMora

30

30

## **CONCLUSIONES Y RECOMMENDACIONES: Influencia del CGA sobre la inestabilidad de laderas**

- **Compleja:** Multivariable; relaciones entre los factores todavía no están completamente documentadas ni resueltas.
- **Comenzar por comprender y separar:** Influencia del CGA del CC natural, frecuencia, extremos y no-extremos de la VC y su relación con los aspectos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, geomorfológicos, sísmicos y antropogénicos.
- **La inaccesibilidad a los datos e información en nuestro país** impide realizar análisis, cálculos, modelos y escenarios probabilísticos robustos, y con incertidumbres tolerables.
- **Avanzar en la prognosis** y escenarios, fundamentados en el mejor juicio ingenieril, para terminar de comprender la VC, la situación de los balances hídricos locales y su influencia sobre la instabilidad de laderas.
- **Los modelos globales, RCPs y de reducción de escala (downscaling)** no ofrecen resolución espacial suficiente; deben ser reforzados y recalibrados con datos locales para refinar los escenarios y horizontes temporales (e.g. 30, 50, 100 años).
- **El análisis de las variaciones y evolución de la vulnerabilidad humana y ambiental**, es esencial, para poder anticipar la cobertura de los efectos, impactos, daños y pérdidas socioeconómicas y ambientales futuras.
- **La ingeniería financiera** debe aliarse a la geotecnia para asistir el proceso de toma de decisiones mediante escenarios que comparan: "**acciones tomadas vs. acciones limitadas vs. inacción**"; **beneficio/costo**, **valores agregados netos** y otras métricas y parámetros económicos, sociales y ambientales...
- **La gestión del riesgo** debe ser dinámica y adaptable para enfrentar, por lo menos, las situaciones previsibles.
- **No es admisible** que en América Latina y el Caribe no se haya establecido, todavía, un sistema de vigilancia, observación, alerta, advertencia, alarma y respuesta en las carreteras y ciudades ante la amenaza de la inestabilidad de laderas.

31

31



32



Instituto Colombiano de Ensayos  
e Investigaciones Geotécnicas



50  
años  
1971-2021



***i MUCHAS GRACIAS !***

[smoracastro@consultarx.com](mailto:smoracastro@consultarx.com)

El libro se encuentra disponible en las siguientes tiendas y librerías “en línea” (la versión en papel estará disponible más adelante):

- [https://www.amazon.com/gp/product/B0B728KLNN/ref=as\\_li\\_tli?ie=UTF8&creativeASIN=B0B728KLNN&linkCode=as2](https://www.amazon.com/gp/product/B0B728KLNN/ref=as_li_tli?ie=UTF8&creativeASIN=B0B728KLNN&linkCode=as2)
- <https://books.apple.com/us/book/id6443185056>
- <https://play.google.com/store/books/details?id=xYV8EAAAQBAJ&PAffiliateID=1100lcQHW&gl=us>



XVII Congreso Colombiano de Geotecnia

Primer Seminario Suramericano de Geotecnia-ISSAG



# The challenge of managing landslide risk in the face of climate change

Jordi Corominas

Emeritus professor

Department of Civil and Environmental Engineering  
Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech

# Outline

---

- The relationship between climate and landslides
- What do climate models foresee?
- How will climate (global) change affect landslide activity and occurrence?
- Challenges of the Landslide risk management in the face of the climate (global) change
- Final remarks

# Landslide triggers

---

Landslides are multicausal phenomena. Different triggers: rainfall, earthquakes, sea and river erosion, snow melting, vanishing permafrost, anthropogenic action

Some failure mechanisms (shallow slides, debris flows, earthflows) are highly sensitive to climate-related triggers

Others instead show a poor relation (rock avalanches, large rockslides, large landslides, sagging) although in some particular cases this relation may exist



Slope failures triggered during the Wenchuan earthquake  
Beichuan County Town, 2008. Photo World Bank

# Climate-related landslide triggers

---

Rainfall

Temperature

Indirect relation: erosive processes and cascading effects

# Rainfall-triggered landslides

---

Several rainfall patterns may be identified (Corominas, 2000):

Short lasting (hours/days) high intensity storms that trigger **shallow landslides** (debris flows and debris avalanches). Antecedent rain may be required

Long lasting (days/weeks) low to moderate intensity storms that trigger or reactivate **landslides and earthflows**, usually in clayey materials

Abnormally wet seasonal/annual rainy periods that trigger or reactivate **large landslides**

# Landslide triggered by short lasting high intensity storms

---

These type of events typically generate multiple-occurrence of regional landslide events

First-time failures

Fast landslides: shallow slides, debris flows and debris avalanches

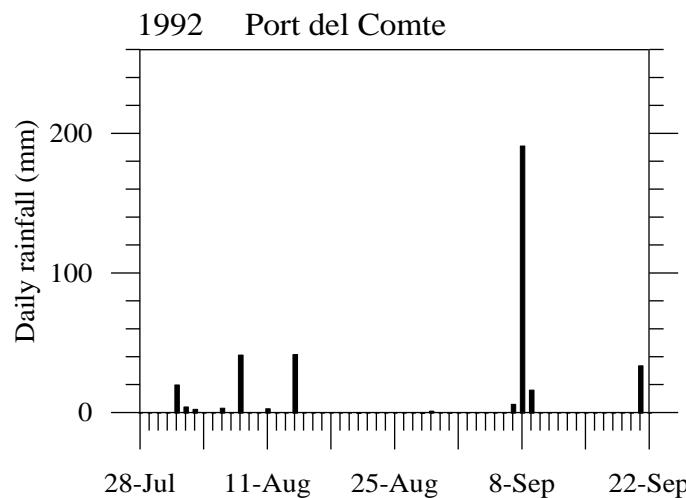
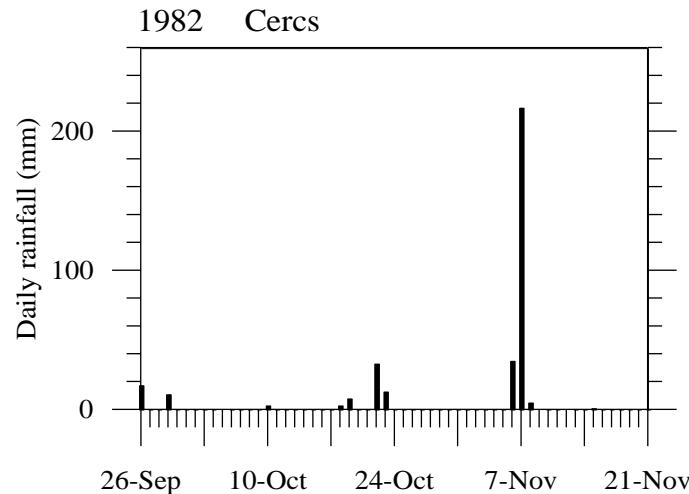


Coalescent failures  
Photo: Mike Crozier



Glyssibach, Brienz, Switzerland  
Source: Planat, CH

# Landslide triggered by short lasting high intensity storms



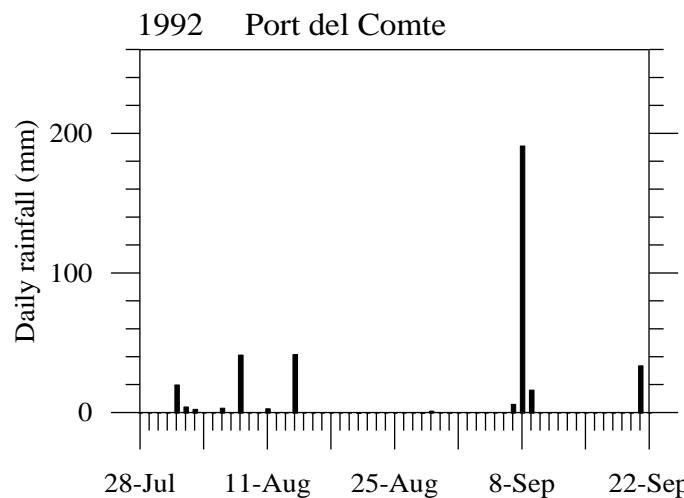
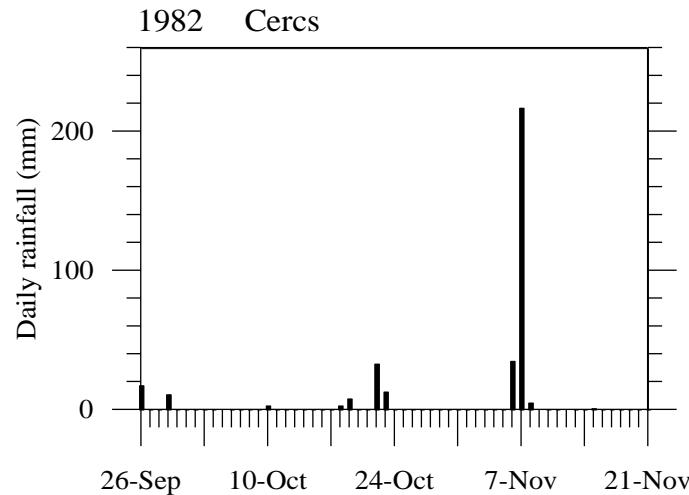
Usually, no antecedent rain required

Typically, two slope contexts:

- (a) Slope covered with pervious colluvium (coarse grain soils).  
The build-up and dissipation of positive pore could be very rapid  
(less than 24 hours).



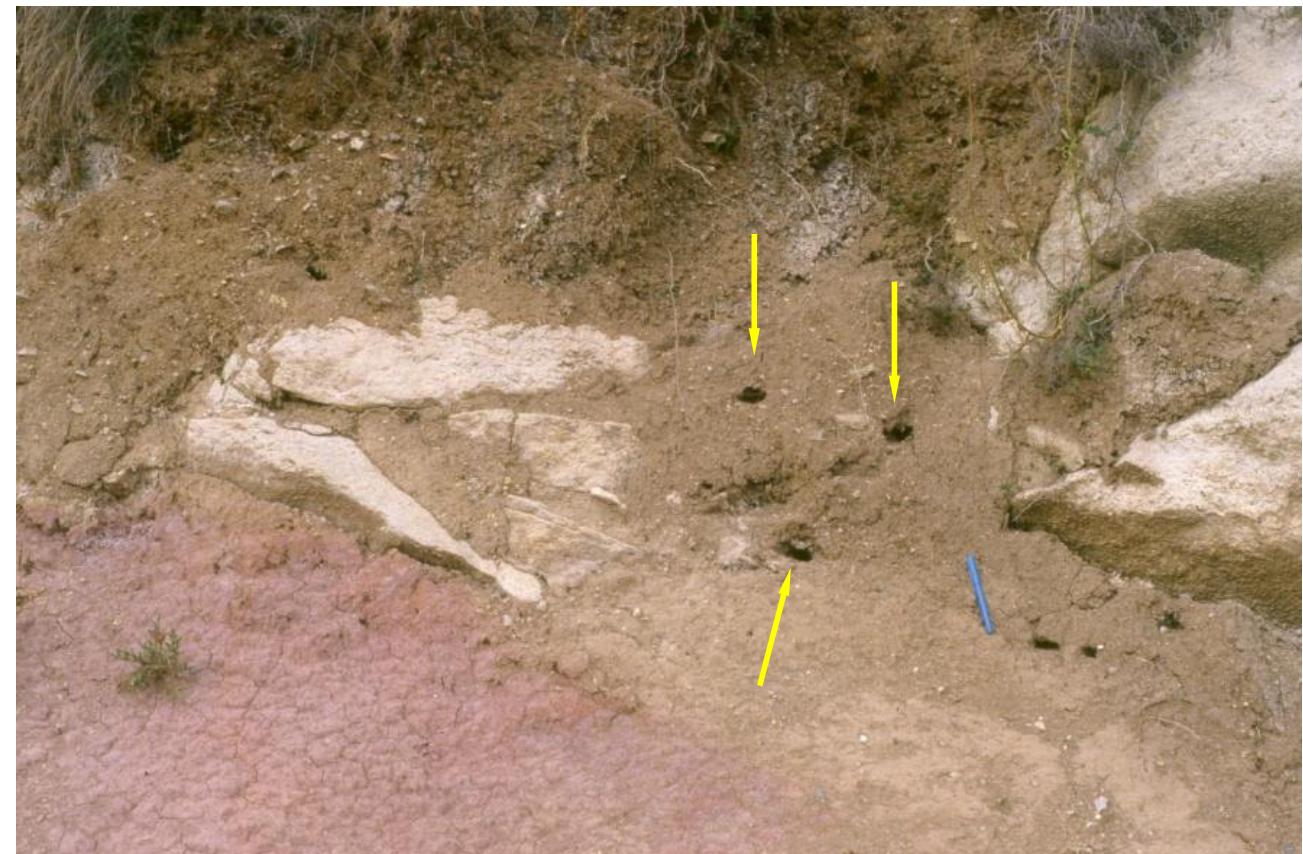
# Landslide triggered by short lasting high intensity storms



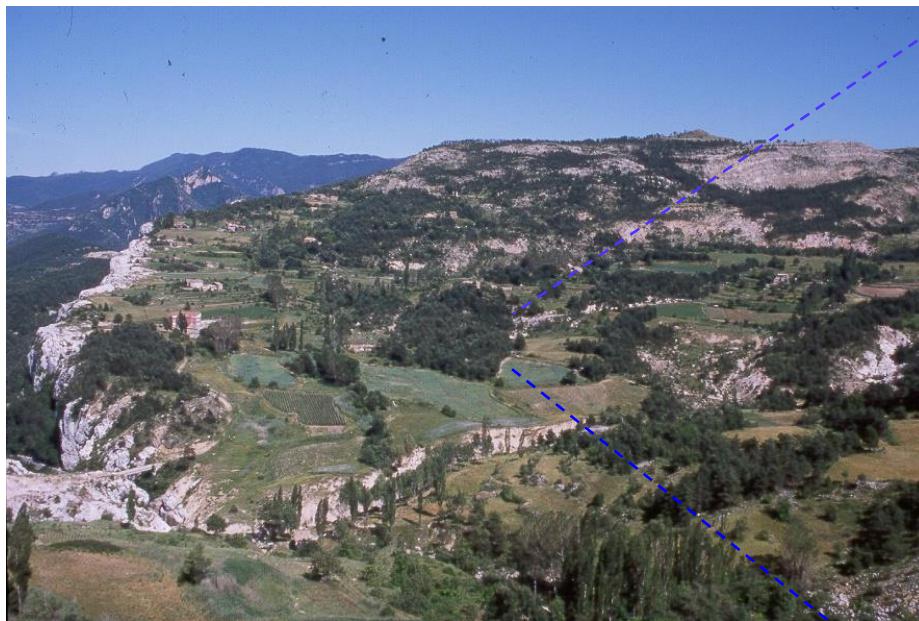
Usually, no antecedent rain required

Typically, two slope contexts:

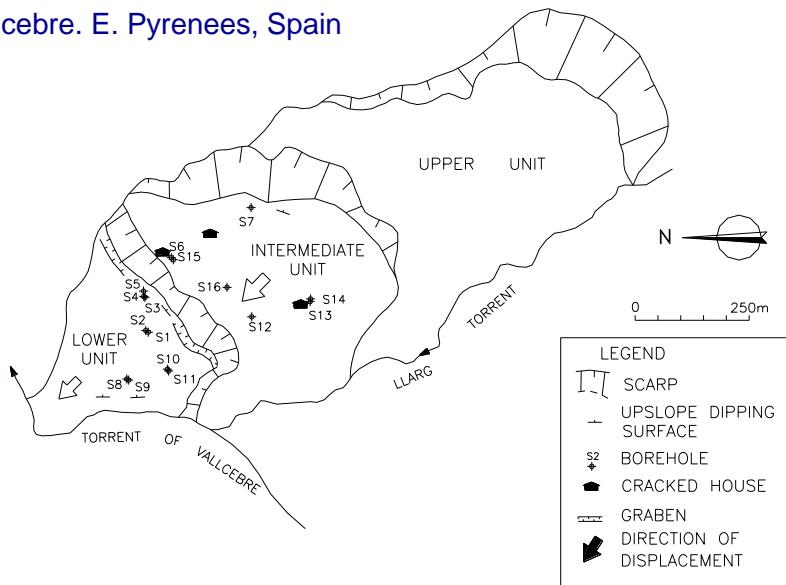
(b) In low-permeability soils (clayey-rich soils) in which fissures and/or macropores play a fundamental role.



# Landslide triggered by short lasting high intensity storms

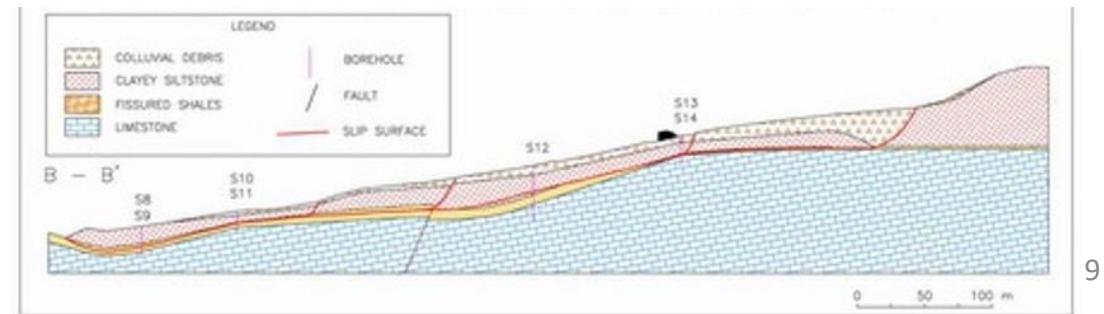
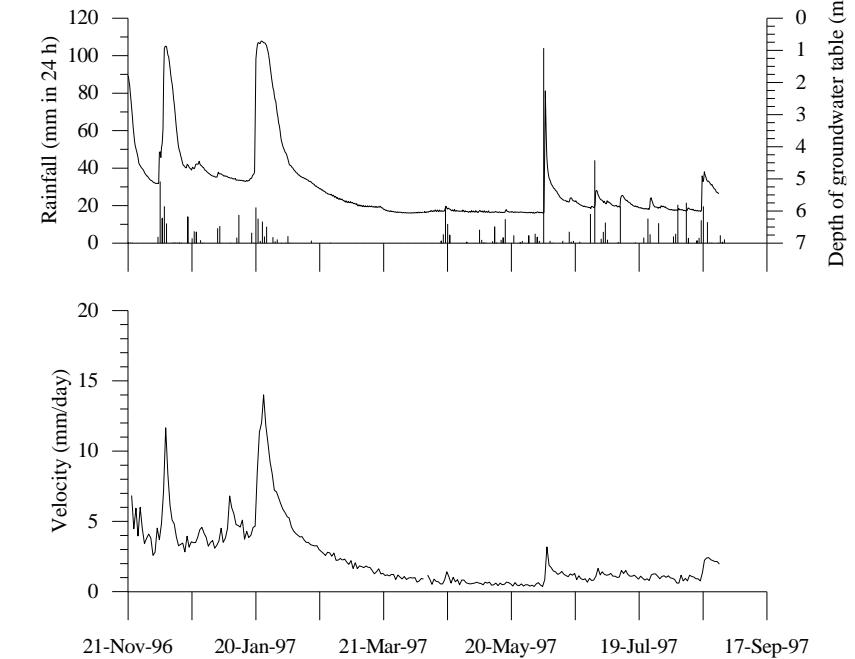


Vallcebre. E. Pyrenees, Spain



Graben – tensión cracks

The relation between climate and landslides is not straightforward. Proper Understanding of the geological context is required



# Landslides triggered by long lasting (days/weeks) rainfall events

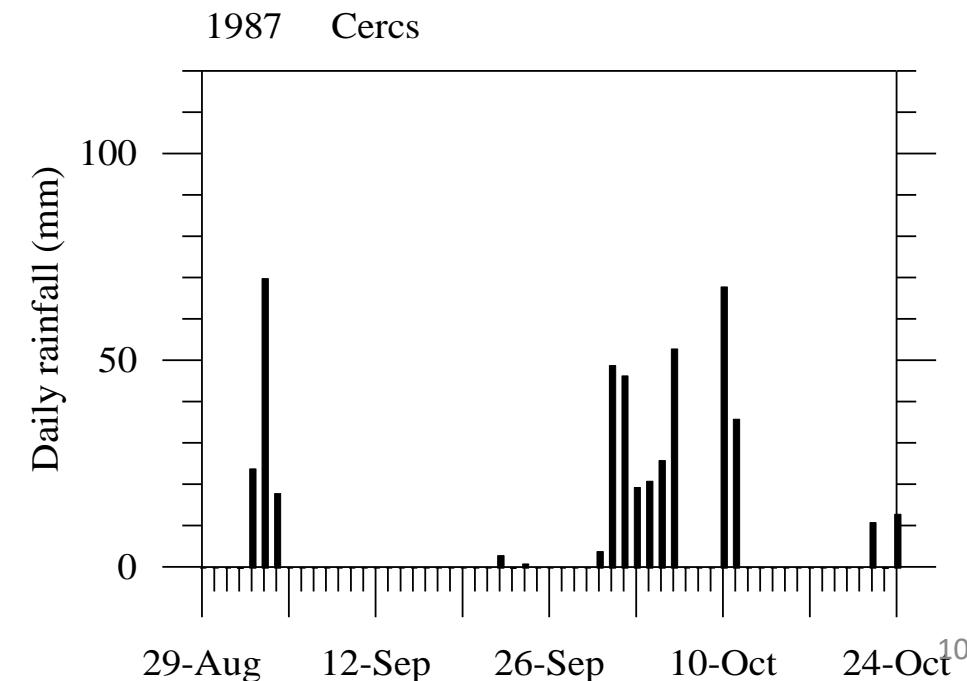
---

Triggering and/or reactivation of mid-size ( $10^4$ - $10^6$  m $^3$ ) landslides and earthflows, mostly in clayey materials.  
Duration: several days or weeks



Earthflow at Zubiza, Navarra, Ebro Basin triggered after an abnormally rainy winter in early March 2013 (photo taken by J.R. Mendióroz).

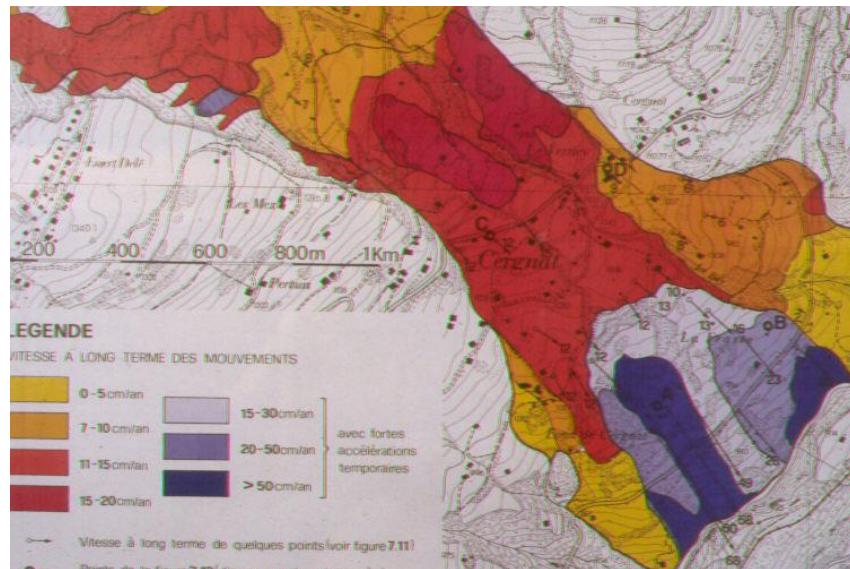
Antecedent rainfall is often a necessary condition for failure. It reduces soil suction and increases the positive pore-water pressures in the soil, thus diminishing the soil strength. Slope failures will occur with rainfall of intensities lesser than those normally required in the previous case



# Wet seasonal/annual rainy periods and landslide occurrence/reactivation



La Frasse, 40M m<sup>3</sup>  
Sepey, Switzerland



Poor correlation with rainfall events

Relation may improve when considering seasonal or multiannual periods

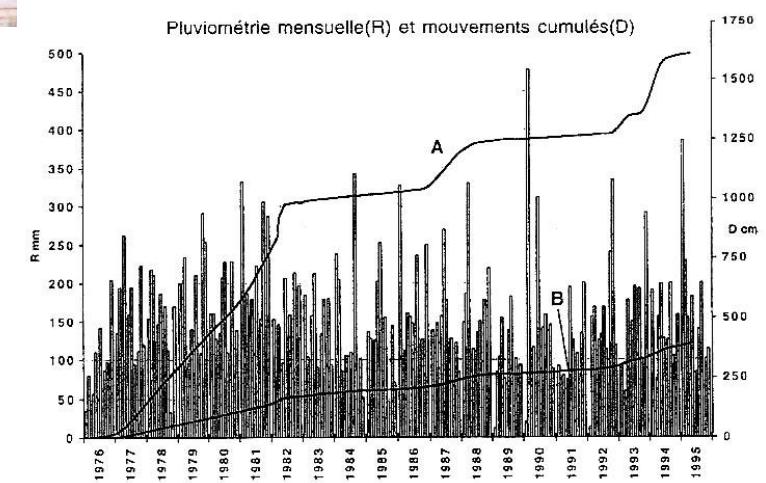
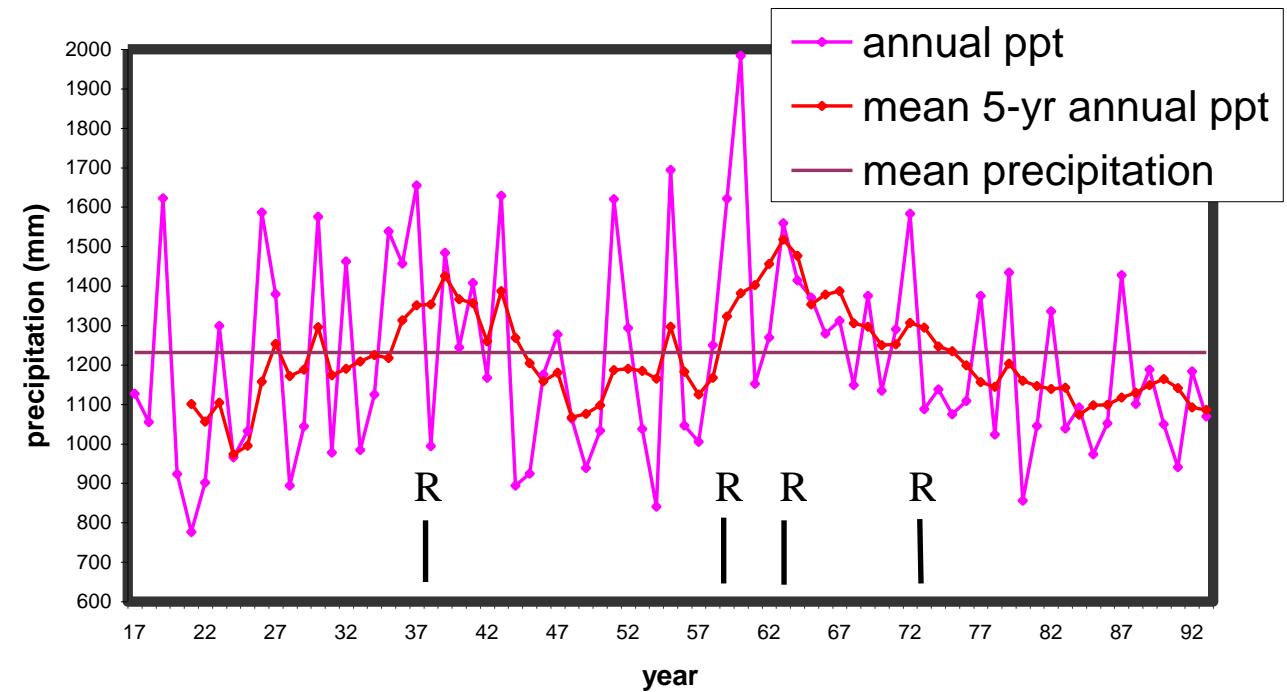


Fig. 7  
Glissement de Cernnat-La Frasse: pluviométrie mensuelle et mouvements cumulés de 1976 à 1995  
Point A : point Ac (1982-1985) et 1231 (1985-1995) de la fig. 2  
Point B : point Bc (1981-1985) et 1127 (1985-1995) de la fig. 2  
Points Ac et Bc : selon thèse Th. Engel (1986)  
Points 1231 et 1127 : mesures Service des Routes

# Wet seasonal/annual rainy periods and landslide occurrence/reactivation

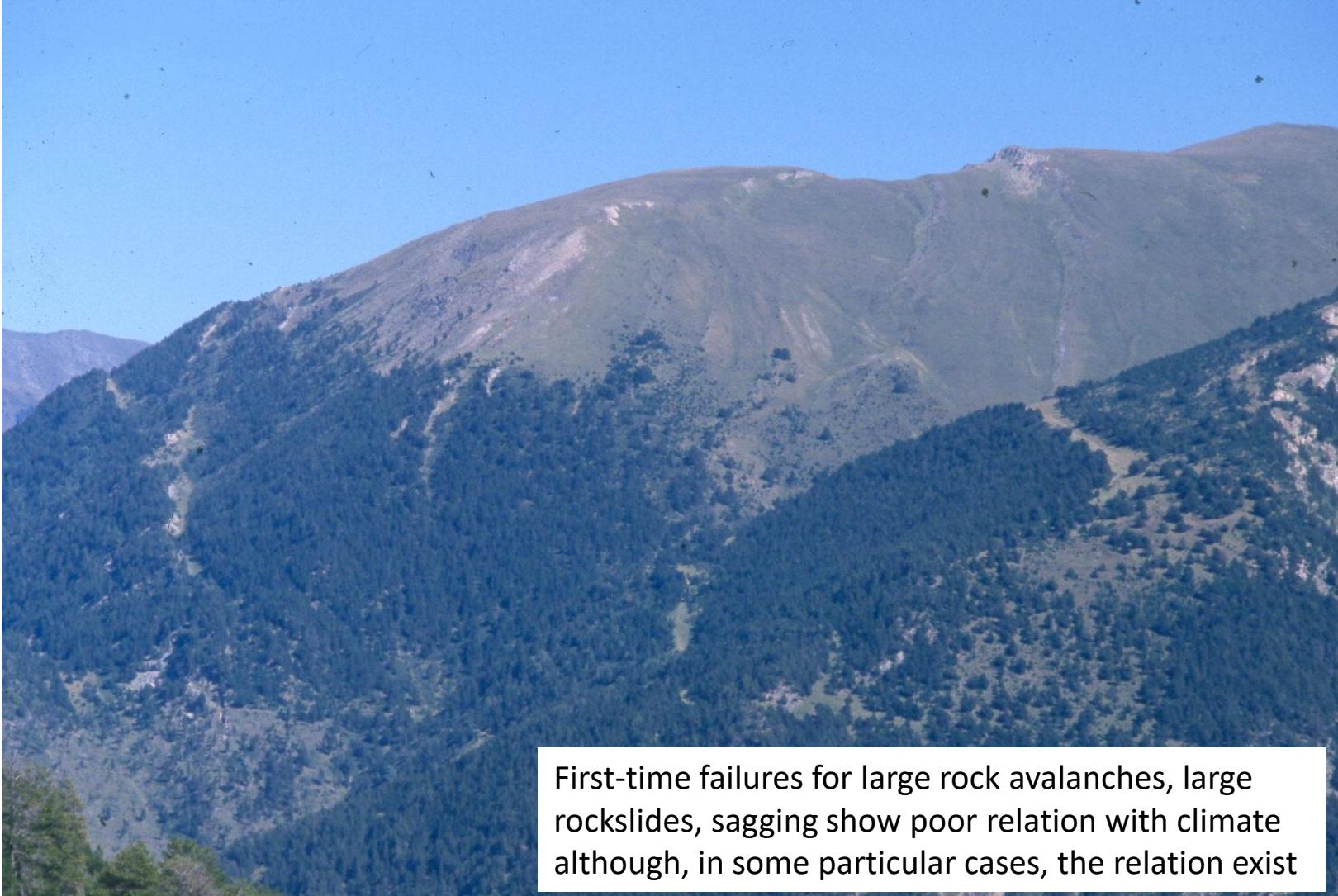


Large landslide (several tens Mm<sup>3</sup>)



## Large landslides

---



First-time failures for large rock avalanches, large rockslides, sagging show poor relation with climate although, in some particular cases, the relation exist

DSGSD may occur as delayed failures after glacier retreat

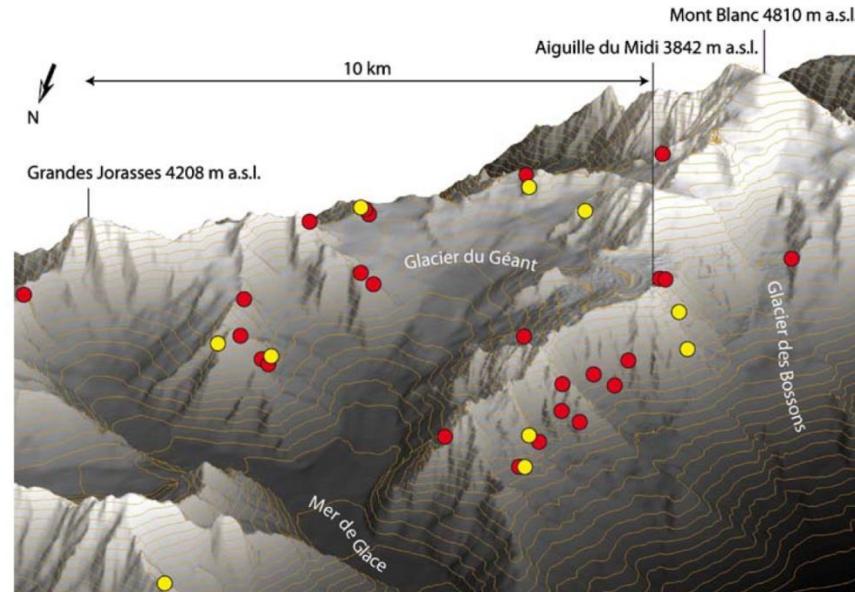
# Landslides related to temperature changes

## Loss of strength of ice-bonded joints

(Harris et al. 2009, Earth Science Reviews, 92: 117-171)



Ice-covered detachment surface exposed by release of the 2003 rockfall on the Matterhorn  
Lion ridge  
Photo: L. Trucco



Rockfall events in the Montblanc massif in 2007(red) and 2008 (yellow)

Ravanel et al. 2010, Landslides, 7: 493-501

## Permafrost degradation



Aiguille du Midi  
Photo J.P. Robert

# Erosional processes and slope stability

---

fluvial undercutting



Rotational slide in the glacier-related deposits of Cerler (Huesca), Central Pyrenees. The erosion of the Remáscolo creek is one of the main triggers of the landslide.



Pont de Bar. E. Pyrenees, Spain.  
November, 1982

# Erosional processes and slope stability

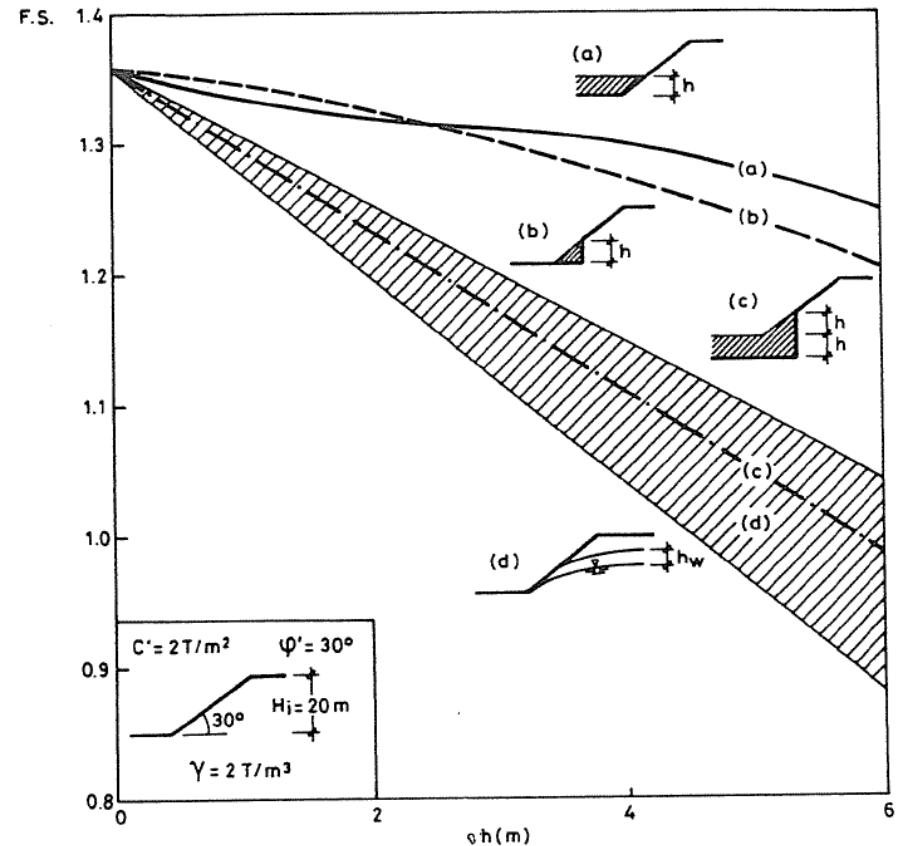
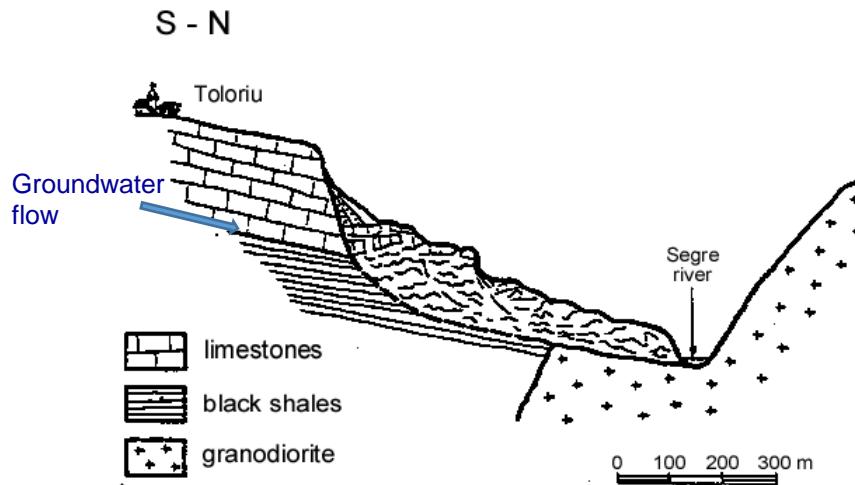


FIG. 5 Relative influence of toe erosion ( $h$ ) and increase of pore water pressure ( $h_w$ ) on safety factor.

- (a) : toe erosion preserving original slope
- (b) : lateral erosion maintaining original slope height
- (c) : combined effect of (a) + (b)
- (d) : mean increase in phreatic surface elevation

# Landslides associated to anthropogenic causes

---

It should be recalled that anthropic disturbances may produce significant changes in the occurrence and frequency of the slope failures

Road and railway cuts caused not only shallow failures but also large landslides.



Aznalcóllar, Spain, tailing dam failure in 1998



Jayaprithvi Highway, Nepal, June 2021, Source: Nepalnews.com

# Climate change: observations and facts

Global surface temperature has increased by 1.09 °C from 1850–1900 to 2011–2020

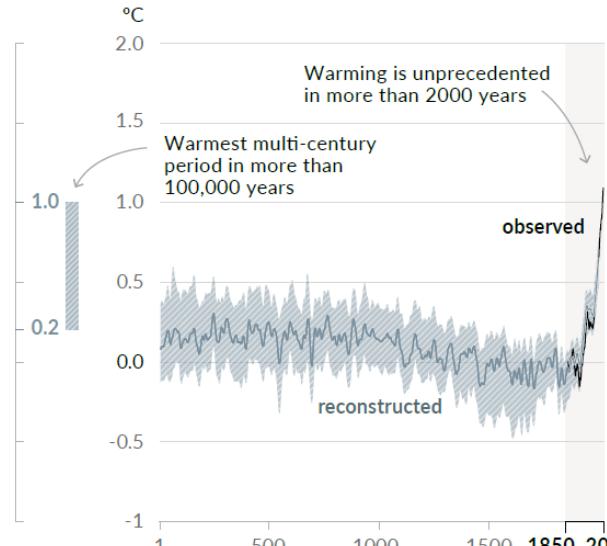
The frequency and intensity of heavy precipitation events have increased over a majority of land regions

Global mean sea level (GMSL) increased by 0.20 m over the period 1901 to 2018 (average rate of 1.7mm.yr<sup>-1</sup>). The rate of rise that has accelerated to 3.7 mm.yr<sup>-1</sup> for the period 2006–2018

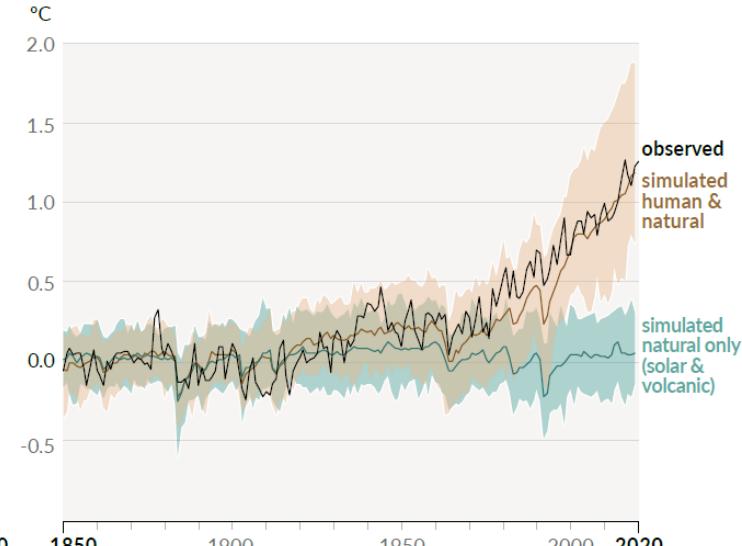
Extreme wave heights, which contribute to coastal erosion and flooding, have increased in the Southern and North Atlantic Oceans by around 1.0 cm.yr<sup>-1</sup> over the period 1985–2018

Changes in global surface temperature relative to 1850-1900

a) Change in global surface temperature (decadal average) as reconstructed (1-2000) and observed (1850-2020)



b) Change in global surface temperature (annual average) as observed and simulated using human & natural and only natural factors (both 1850-2020)



IPCC 2021

# Climate change: what do climate models foresee (IPPC 2021)?

Global surface temperature will continue to increase. Global warming of 1.5°C and 2°C will be exceeded during the 21st century (**glacier retreat**).

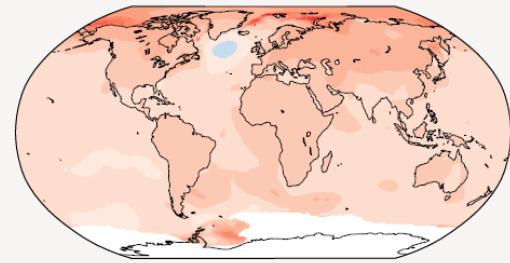
Reductions of snow cover and near-surface permafrost volume in the N. hemisphere. The global volume of **perennially frozen ground** to 3 m below the surface **will decrease** by 25% relative to the present volume

Warming drives an increase in atmospheric evaporative demand and in the severity of drought events (**loss of forest, forest fires**).

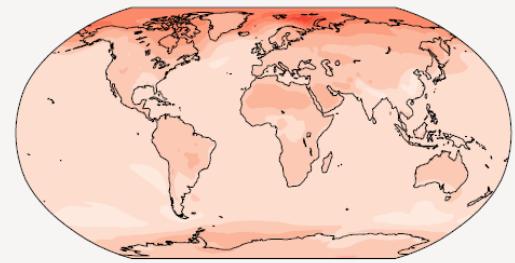
a) Annual mean temperature change (°C) at 1 °C global warming

Warming at 1 °C affects all continents and is generally larger over land than over the oceans in both observations and models. Across most regions, observed and simulated patterns are consistent.

Observed change per 1 °C global warming



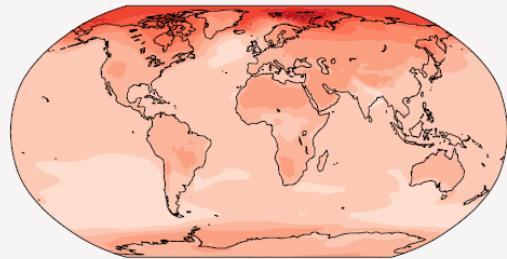
Simulated change at 1 °C global warming



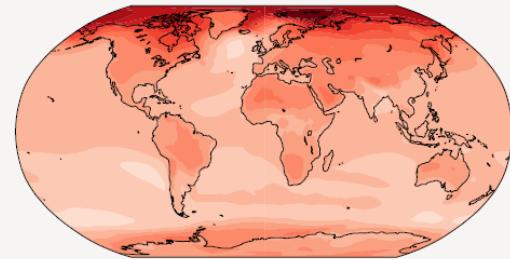
b) Annual mean temperature change (°C) relative to 1850-1900

Across warming levels, land areas warm more than oceans, and the Arctic and Antarctica warm more than the tropics.

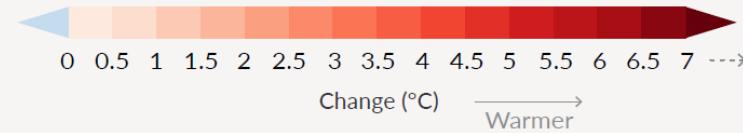
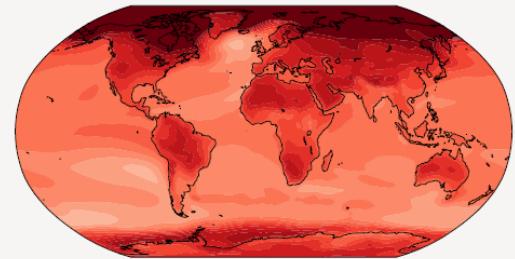
Simulated change at 1.5 °C global warming



Simulated change at 2 °C global warming



Simulated change at 4 °C global warming

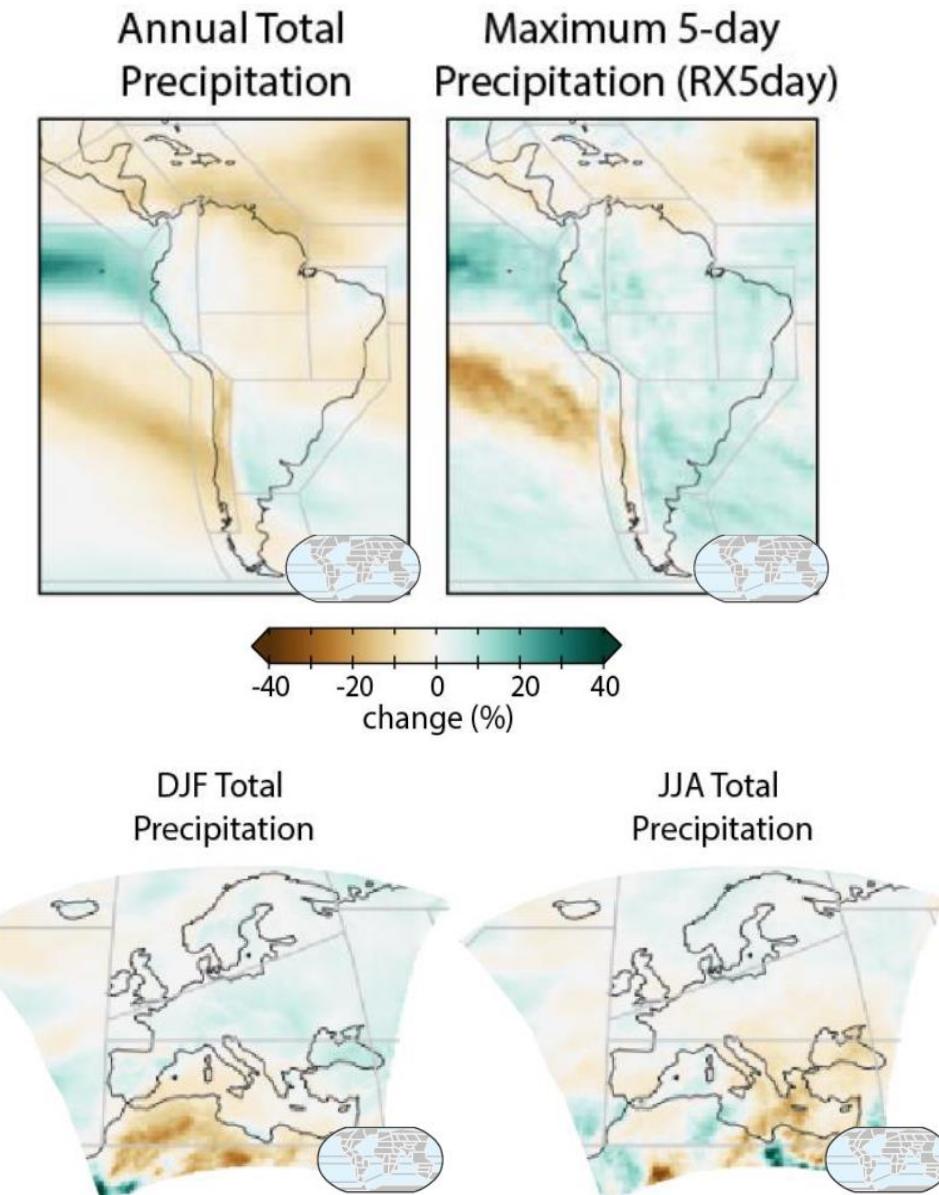


# Climate change: what do climate models foresee (IPPC 2021)?

By 2081-2100, global annual precipitation over land is expected to increase on average between 2.4% and 8.3% relative to 1995–2014.

Patterns of precipitation exhibit substantial regional differences and seasonal contrast. A warmer climate will lead to the intensification of heavy precipitation, increasing the severity of flood hazards. Extreme precipitation will increase in many regions around the world on almost all continents.

Extreme El Niño events are projected to occur about as twice as often when compared to the 20th century. (IPCC, 2021).



# How may climate change affect the landslide occurrence?

---

## Contrasting effect

Climate (global) change will have an incidence on the **landslide predisposing factors**, the **landslide triggering** factors or both.

Frequency and magnitude of landslides will increase by a combination of causes such as the precipitation regime, raise of air temperature, permafrost thawing, and more sediment availability. However, the intensification of landslide activity cannot be generalized. The response of the slopes to the climate forcing will be **geographically uneven, nonlinear, and with a variable time lag**.

		Predisposing factors	Triggering factors
Increase landslide occurrence and/or magnitude	Hydrology	Wetter antecedent conditions in the slopes (Crozier, 2010)	Increase of rainfall duration and/or intensity (Chiang and Chang, 2011)
		Water impoundment: e.g. landslide dams (Richardson and Reynolds, 2000)	Excess of pore water pressures due to permafrost thawing (Harris et al. 2009)
	Slope geometry	Redistribution of stresses in response to changes of slope geometry (e.g. overstepping) by glacier erosion or wave actions on shorelines and cliffs (Crozier, 2010).	
		Cracking and bulging of the slopes as result of the unloading and debuttressing (Evans and Clague, 1994; Holm et al. 2004; Geertsema et al 2006)	
	Soil/rock Strength	Rock deterioration/ weathering - Segregation ice growth and joint widening (Gruber and Haeberli, 2007)	Melting of ice-bonds in rock joints (Davies et al. 2001; Gruber and Haeberli, 2007)
		Unprotected soil cover as result of wildfires and/or logging (Cannon et al. 2008; Glade, 2003)	
	New exposures	New susceptible landforms: e.g. moraines and moraine-dammed lakes( Clague and Evans, 2000; Kääb and Reichmuth, 2005), Increase of available unconsolidated sediment Gruber and Haeberli, 2007; Frank et al. 2019)	
Decrease landslide occurrence		Dryer antecedent conditions: reduction of the mean annual precipitation associated to an increase of evapotranspiration (Gariano and Guzzetti, 2016)	Reduction of the rainfall intensity and /or duration (Comegna et al. 2013; Rianna et al. 2014)
		Long term evolution towards more stable slope profiles (Cruden and Hu, 1993) Sediment exhaustion (Corominas and Moya, 2008)	
		Increase of forest cover (abandonment) (Houet et al. 2017)	

# How may climate change affect landslide occurrence?

---

## Predisposing factors: hydrology

Wetter antecedent conditions in the slopes

Precipitation will change in most regions, either through changes in mean values or the characteristics of rainy seasons or daily precipitation statistics (high confidence).

Annual precipitation is likely to increase in East, South and North Asia; South-Eastern South America; Northern Europe; northern and Eastern North America and the polar regions.

Annual precipitation is likely to decrease include northern and south-western southern Africa, Indonesia, the northern Arabian Peninsula, south-western Australia, Central America, South-Western South America and southern Europe (IPCC, 2021).

# Climate change effects on landslide predisposing factors

---

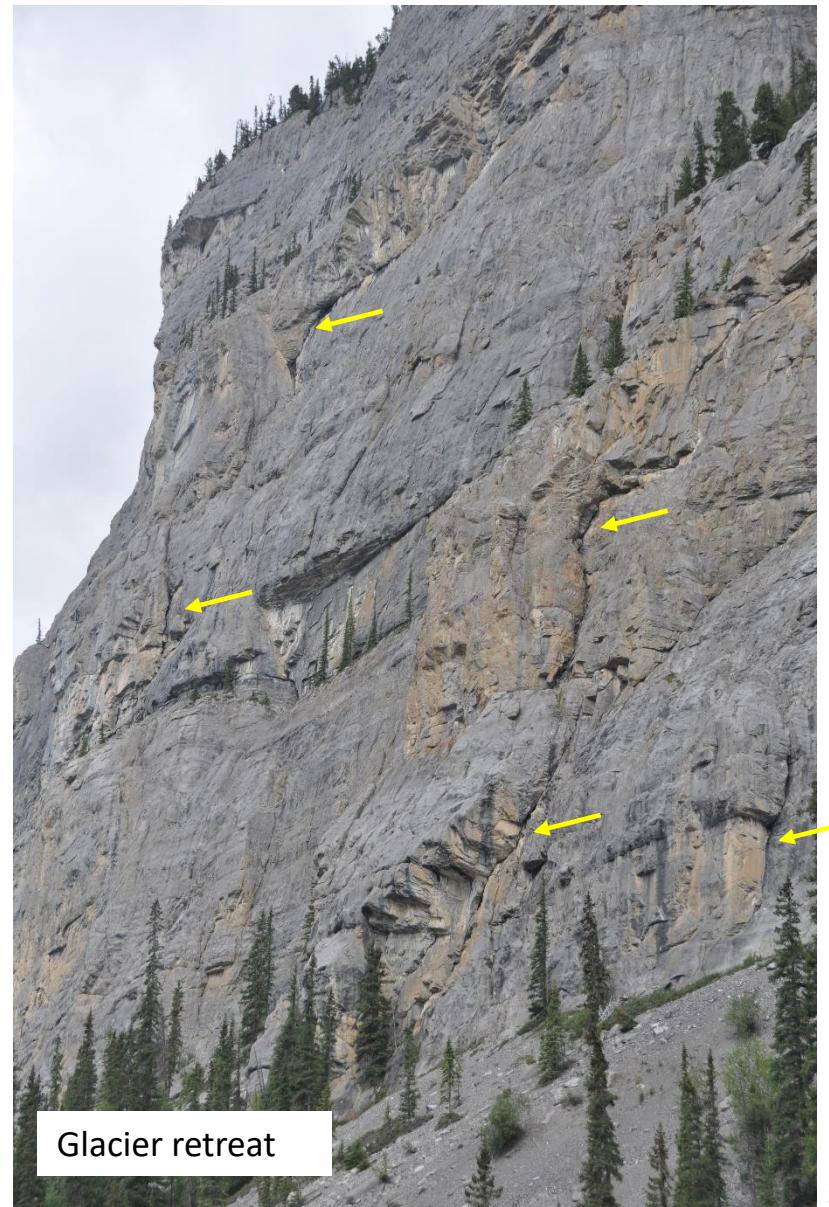
## Slope geometry

Redistribution of stresses in response to changes of slope geometry (e.g. overstepping) by glacier erosion

Cracking and bulging of the slopes as result of the unloading and debuttressing

## Soil/rock strength

Rock deterioration/ weathering - Segregation ice growth and joint widening



# Climate change effects on landslide predisposing factors

---

## Soil/rock strength

Unprotected soil cover as result of wildfires and/or logging



Erosion and shallow landsliding at Degaña, NE Spain after forest fire of 2005

Debris flow in burned areas are found to be triggered by lower I-D rainfall events compared with unburned areas (Cannon et al. 2008, Geomorphology 96: 250-269)

# Climate change effects on landslide predisposing factors

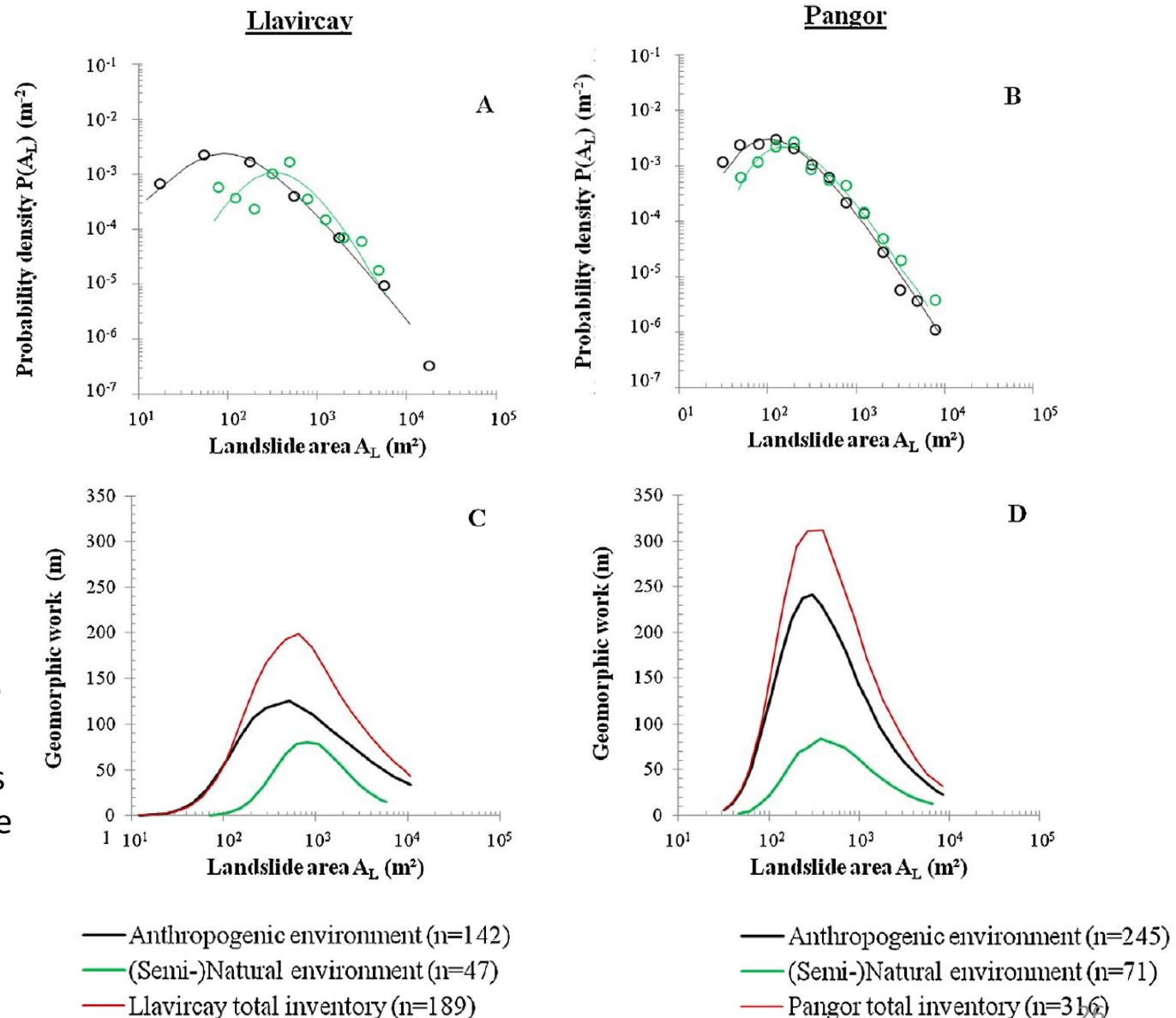
## Soil/rock strength

Effect of deforestation  
Ecuadorian Andes

Guns and Vanacker, 2014

The geomorphic work = magnitude x frequency

The geomorphic work gives the total amount of material displaced by a geomorphic event (Guthrie and Evans, 2007). It allows one to evaluate the influence of high-frequency, low-magnitude events in comparison with infrequent, but high-magnitude events.



# Climate change effects on landslide predisposing factors

---

**Increase of available  
unconsolidated sediment**

New susceptible landforms: e.g. moraines  
and moraine-dammed lakes



Breaching of morainic deposits

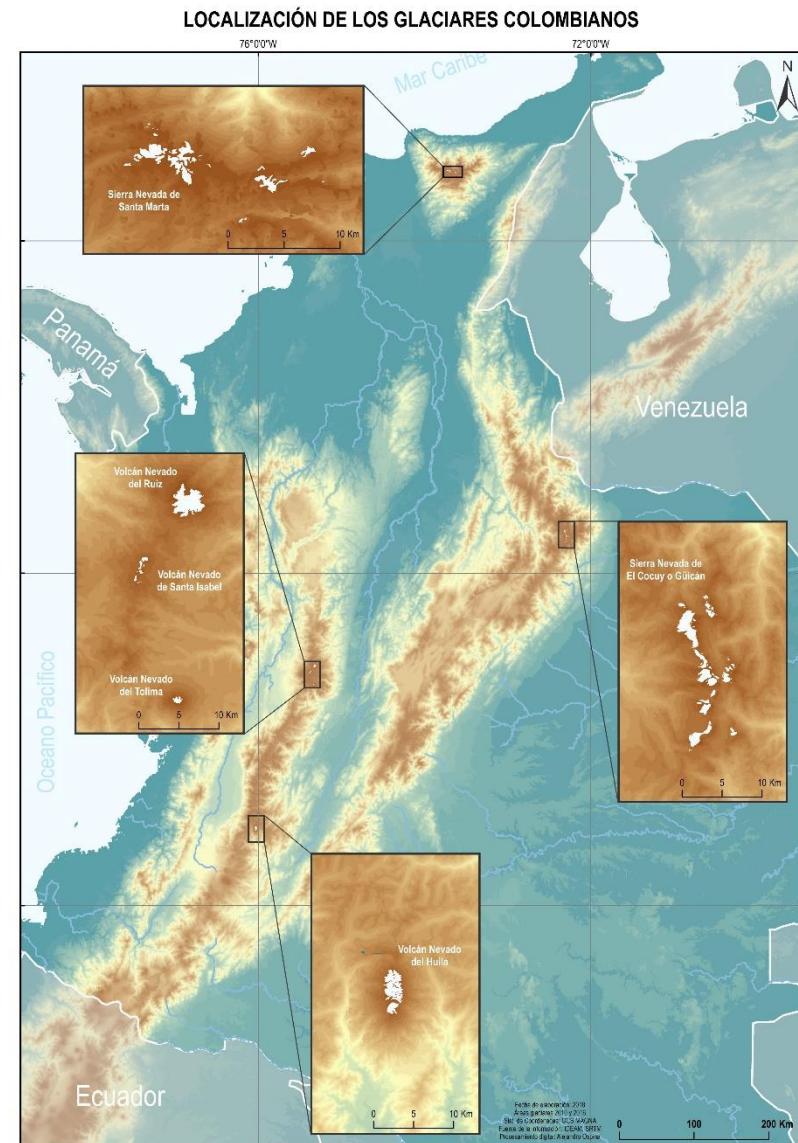


# Climate change effects on landslide predisposing factors

## Predisposing factors

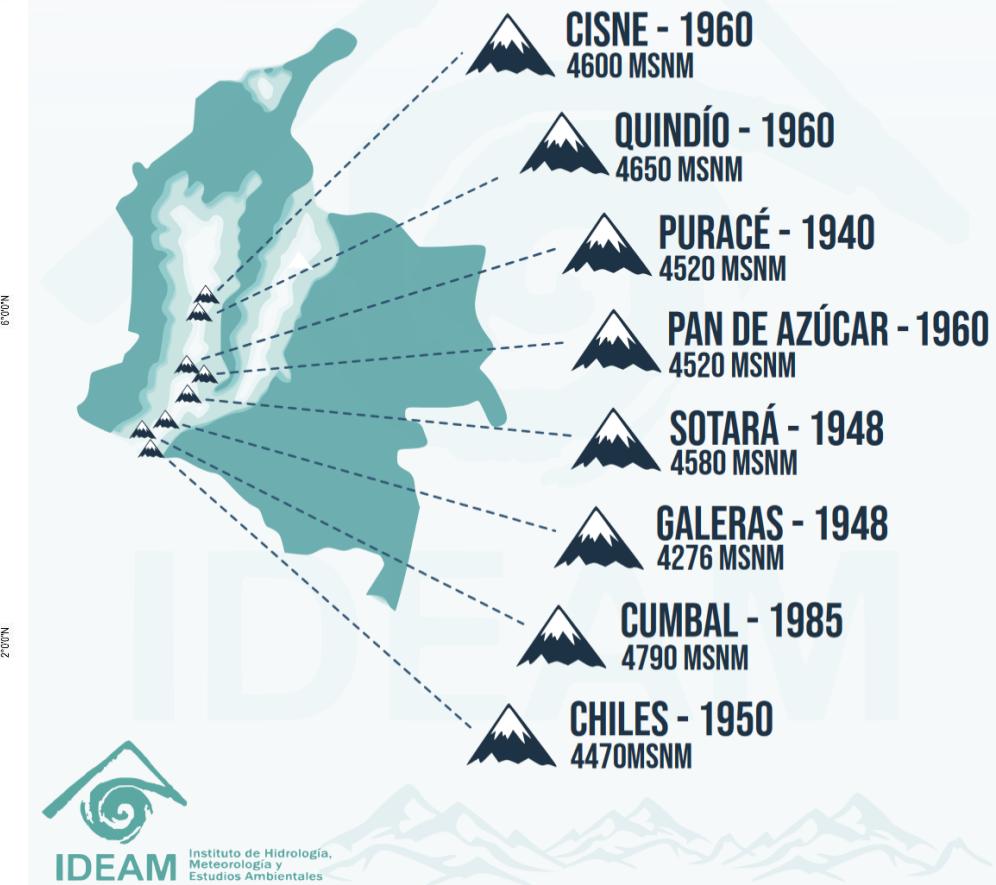
Colombian glaciers have shrunk from approximately 374 km<sup>2</sup> at the end of the Little Ice Age to 34.85 km<sup>2</sup> in 2020 (92% loss of glacier area).

In the last 50 years glaciers have lost 3 to 5% of their glacial surface per year. Between 2010 and 2020, a loss of glacier area of 12.5 km<sup>2</sup> (26%) is estimated (IDEAM).



Fotografías: ©Ideam-2017

## GLACIARES COLOMBIANOS EXTINTOS EN EL SIGLO XX

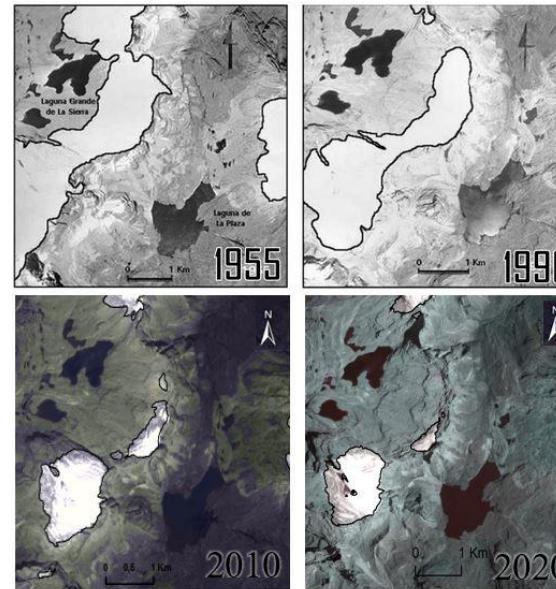


# Climate change effects on landslide predisposing factors

## Predisposing factors



[Panorámica de la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán. Autor: Sergio Gaviria](#)



Evolución área glaciar Sierra Nevada El Cocuy o Güicán		
Año	Área glaciar (Km <sup>2</sup> )	Fuente de datos
±1850	148.7	Interpretación de fotografías aéreas, IDEAM y Universidad Nacional de Colombia, 1997.
50's	38.9	Geosistemas de la alta montaña. Bogotá.
80's	35.7	
90's	23.7	
2003	19.8	
2007	18.6	Interpretación de imágenes satelitales Landsat TM/ETM, Spot, ALOS, RapidEye, QuickBird, Sentinel y PlanetScope. Selección autónoma a partir de combinaciones multiespectrales y posterior interpretación.
2010	16.5	
2016	14.4	
2017	13.75	
2019	13.47	
2020	13.19	

Datos de la evolución del área glaciar en la Sierra Nevada El Cocuy. Fuente: IDEAM

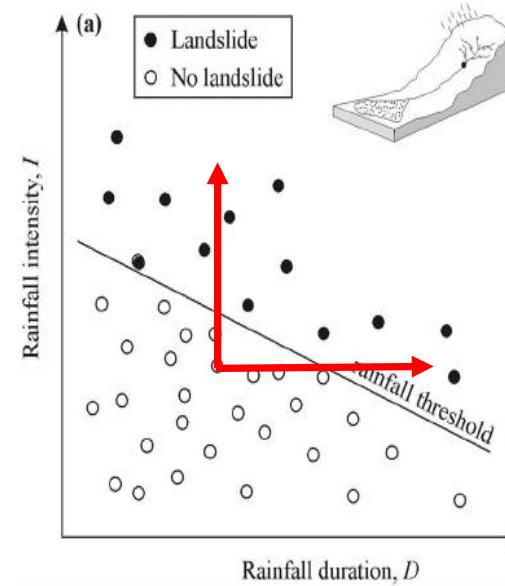


Sierra Nevada El Cocuy SPOT 2015

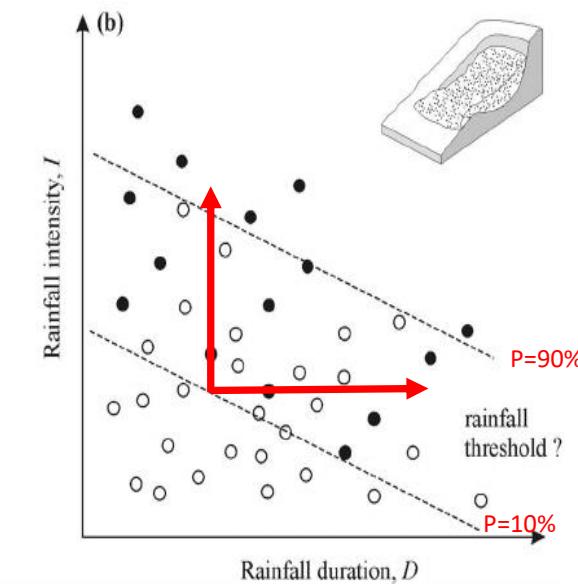
# Climate change effects on landslide triggering factors

## Increase of rainfall duration and/or intensity

invariable trigger thresholds



I-D chart

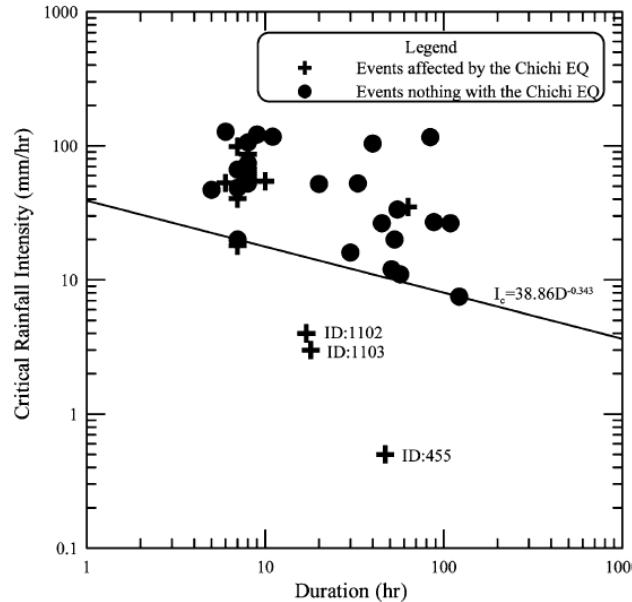


Increase in the probability of landslide failure

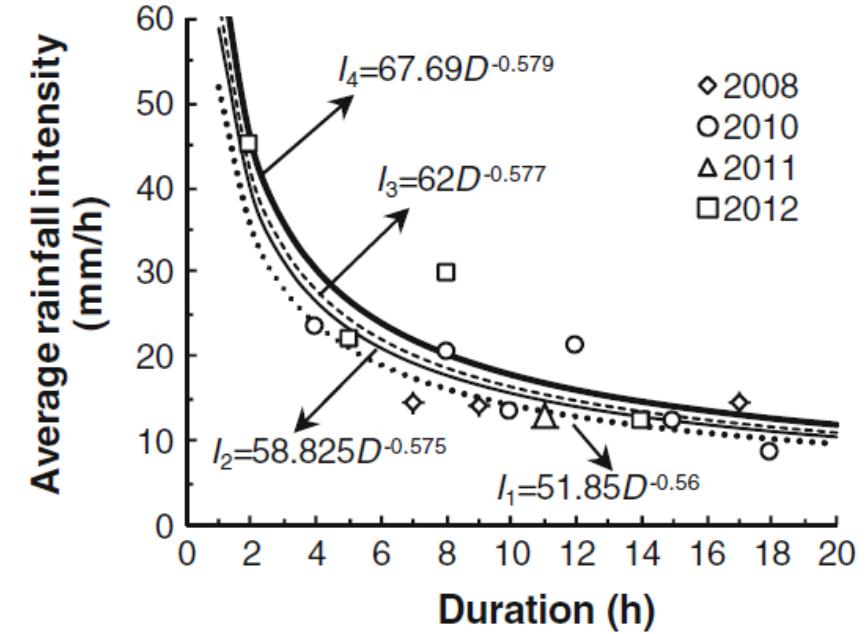
# Climate change effects on landslide triggering factors

other processes unrelated to climate can alter landslide triggering thresholds

Reduction of the critical rainfall-threshold for landslides due to the Chi Chi earthquake



Yuan et al. 2005, Environ. Geology, 47: 715-724



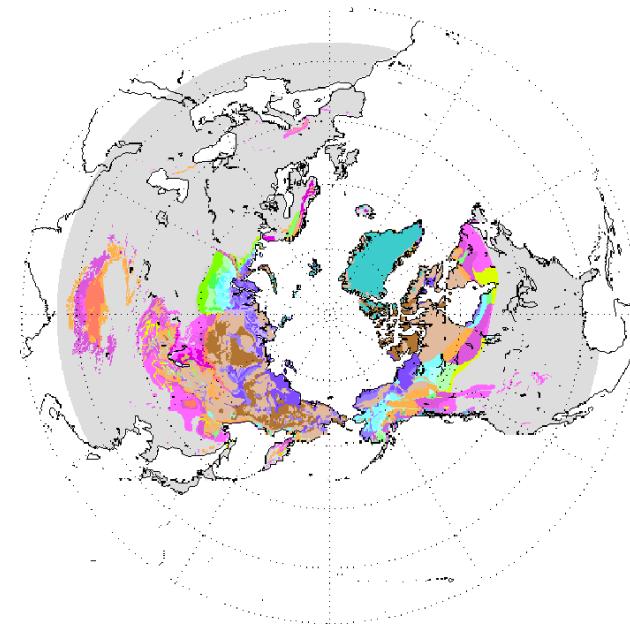
Zhou et al. 2014. Natural Hazards, 70: , 1417-1435

Increase of the debris flows rainfall-threshold after the earthquake

# Climate change effects on landslide predisposing factors: temperature & sea level rise

---

## Sea level rise and permafrost degradation



Brown et al. 1998  
<http://nsidc.org/data/ggd318.html>

Source: <http://coastalcare.org/2010/08/erosion-doubles-along-alaskas-arctic-coast/>

# Climate change effects on landslide predisposing factors: sea level rise

---

Relative to the period 1995–2014, GMSL will rise between 0.18 m and 0.23 m by 2050. By 2100, the projected rise is between 0.38 m and 0.77 m. Coastal hazards will be exacerbated by an increase in the average intensity, magnitude of storm surge and precipitation rates of tropical cyclones.

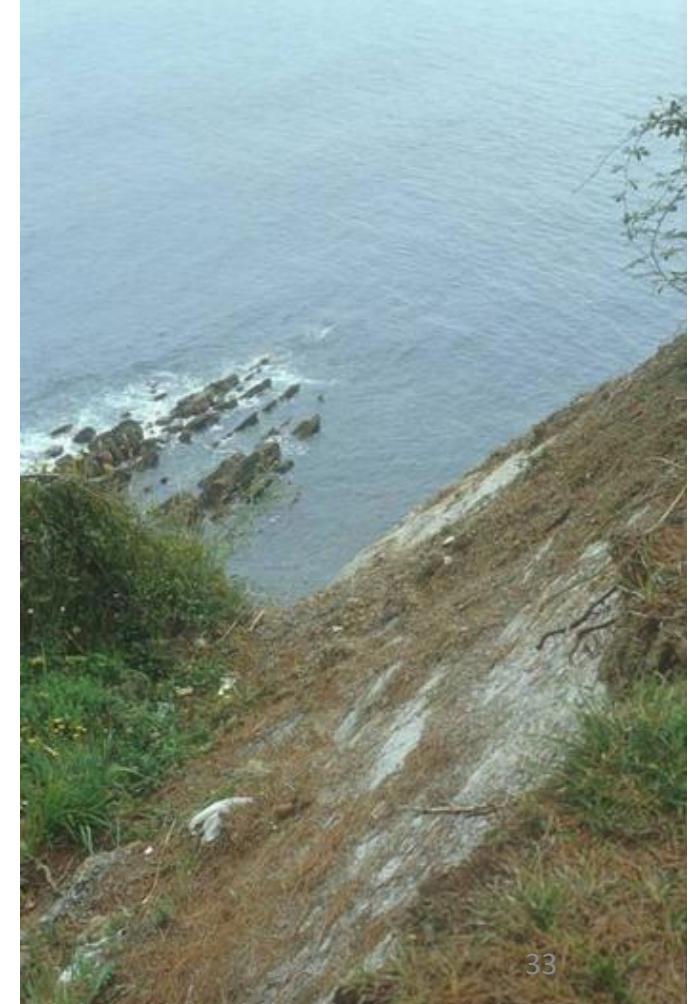


Deba coast, Basque Country, Northern Spain



erosion of weak and/or unfavourable dipping layers will procure increasingly large landslides

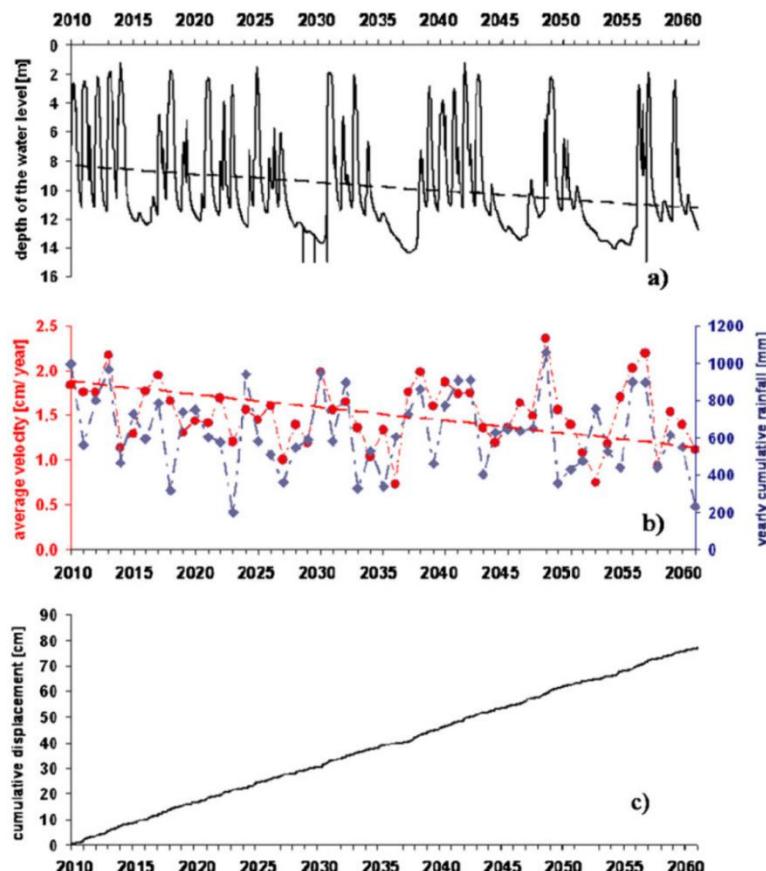
Sea level rise will aggravate cliff erosion



# Changes leading to a decrease of the landslide activity

## Predisposing factors: hydrology

Dryer antecedent conditions: reduction of the mean annual precipitation associated to an increase of evapotranspiration



For large landslides, the increase of rainfall may be matched by increases in evapotranspiration, leaving the frequency of large landslides unchanged (Dixon & Brook, 2007; Collison et al., 2000) or even reduced

The average displacement rate will decrease due to the slightly lesser annual precipitation and higher evapotranspiration  
(Comegna et al. 2013, Landslides, 10: 373–391)

Climate scenario expected by the COSMO-CLM model between 2010 and 2060 (yearly rainy distribution as in 1920) in the Basento river earthflow, Italy (Comegna et al. 2010)

# Changes leading to the decrease of landslide activity

---

Predisposing factors: evolution towards more stable profiles



Coll de Pal, translational slides  
Eastern Pyrenees, Spain



rockslide Swargadwari Danda, Nepal

# Changes leading to the decrease of landslide activity

---

## Predisposing factors: sediment exhaustion

Movable material (colluvium, till) on the slopes is progressively swept down by debris flows and shallow landslides. The slopes may have been emptied



Valira del Nord, Andorra, Central Pyrenees  
Need of refilling after Holocene activity



Nova Friburgo, Brasil  
January, 2010

# Climate change and landslide risk management: challenges

$$R = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [P(M_i) \times P(X_j : M_i) \times P(T : X_j) \times V_{ij} \times C]$$

↔ hazard      ↔ element      ↔ value  
                        exposure      vulnerability  
                        ← consequence →  
↔ risk

R: expected loss due to a landslide (debris avalanche) of a **magnitude  $M_i$**  on an element located at a distance X of the landslide source with an intensity j

**P( $M_i$ ): probability of a debris avalanche of a magnitude  $i$**

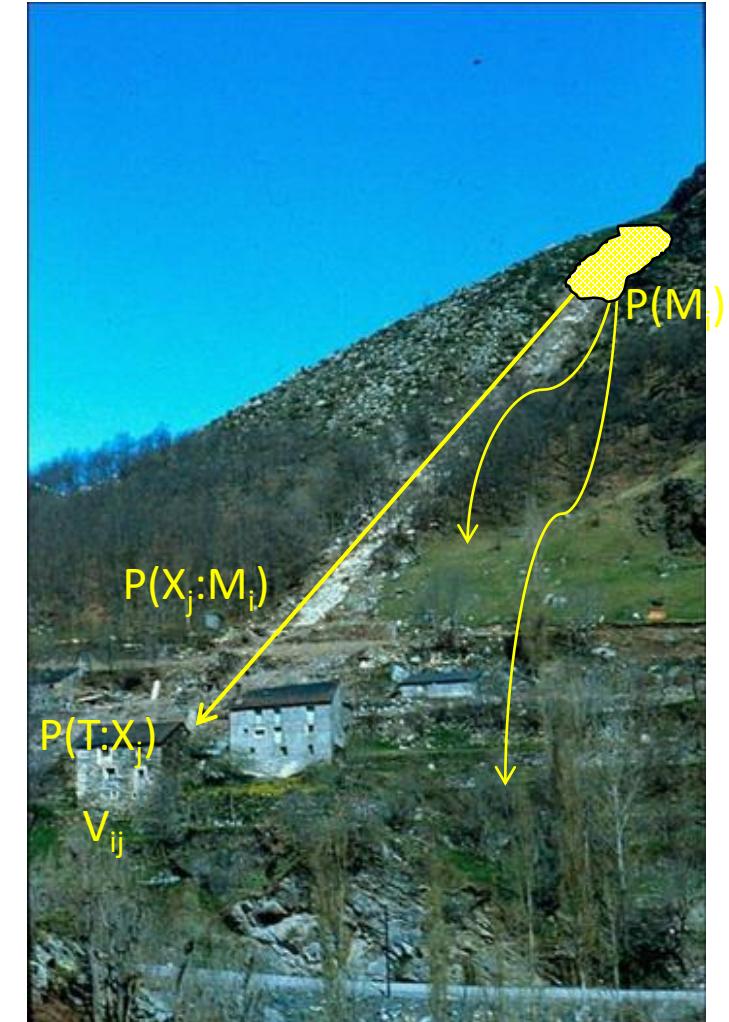
$P(X_j : M_i)$ : probability of a **magnitude  $i$**  debris avalanche reaching a point located at a distance X from the source with an **intensity  $j$** , given that the event has occurred

$P(T : X_j)$ : the temporal-spatial probability of the element at risk (exposure)

$V_{ij}$ : vulnerability of the exposed element for a debris avalanche of magnitude i and intensity j

C: value of the exposed element

Reminder of the QRA equation



# Performance of LS maps

---

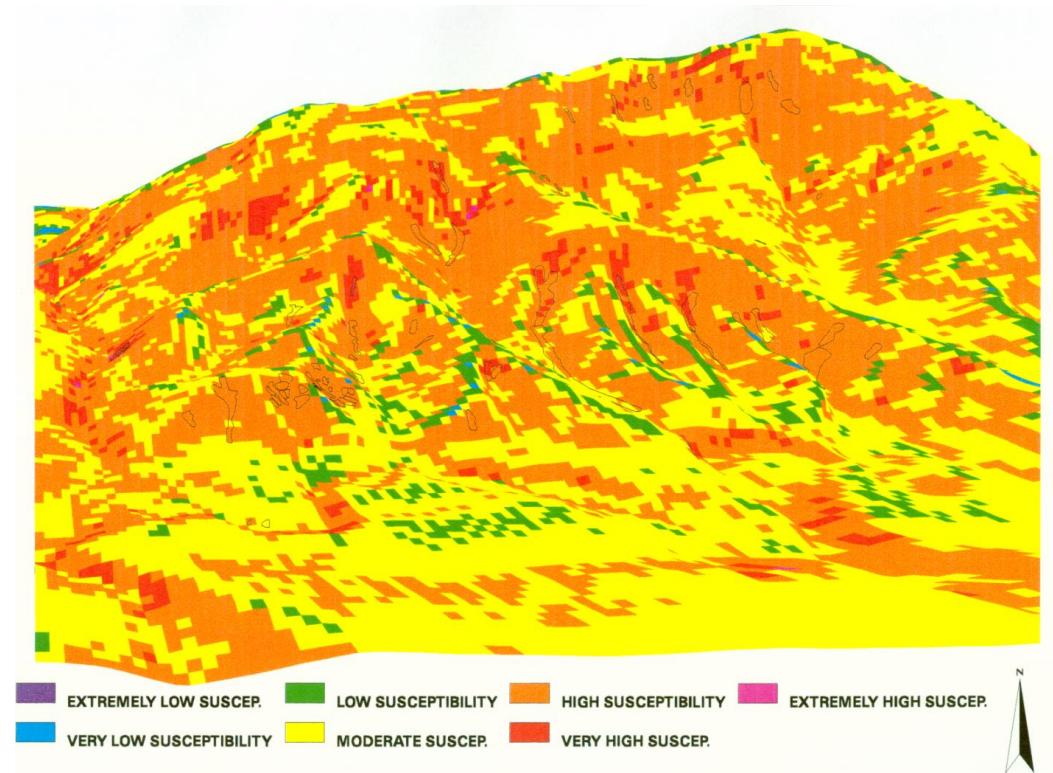
Landslide susceptibility (LS): the propensity of an area to undergo landsliding (Brabb, 1984; Hansen, 1984)

The basic assumption: terrain units having predisposing factors similar to those units that failed in the past are likely to fail in the future.

The ultimate goal of LS maps is the [evaluation of hazard](#) but they can also be a product in themselves with direct application for [land use planning purposes](#) (Crozier and Glade, 2005; Greiving et al, 2014) .

It is therefore fundamental validate LS maps and check their performance.

Misclassification has economical social consequences.



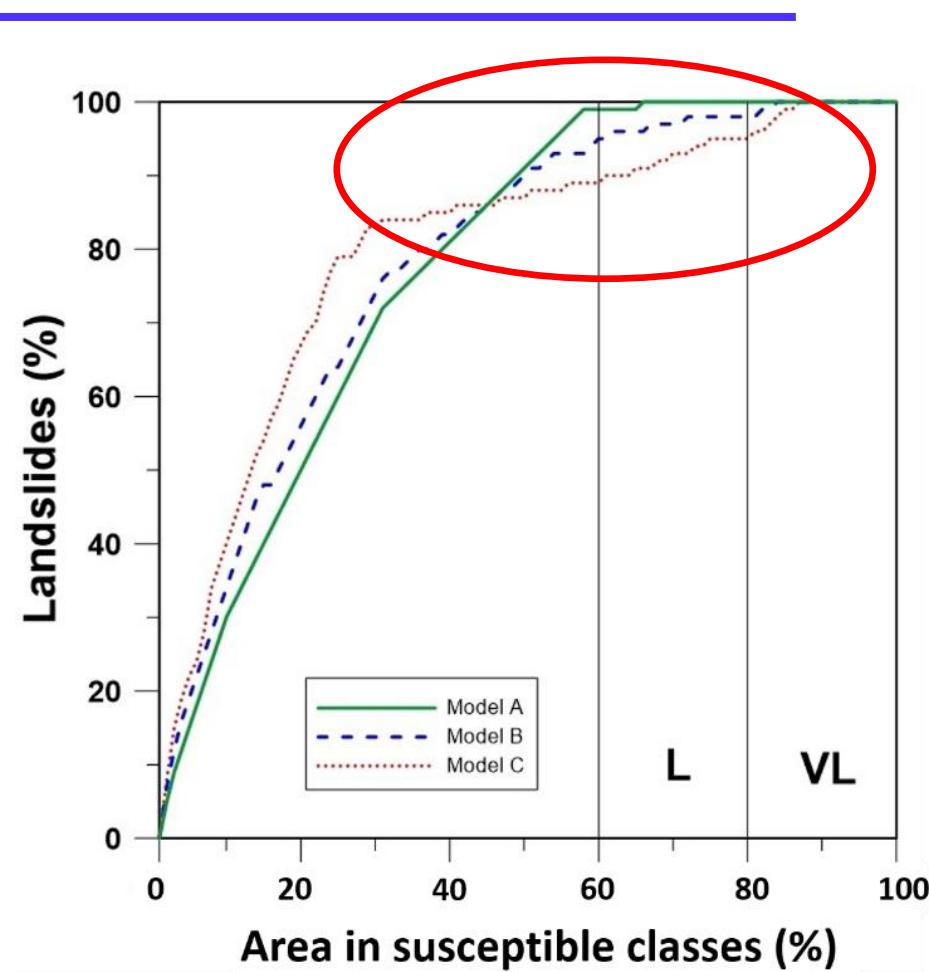
LS Reviews Chacón et al. 2006; Reichenbach et al. 2018

# Performance of LS maps: impact of misclassification

For AUC > 80%, the classifier is considered very satisfactory and >90% indicates a highly accurate model (Swets 1988). However, a number of subjects are hidden behind AUC plots.

What is the acceptable rate of landslide misclassification?

Model	AUC	Missing events (rate)		
		LS class	VLS class	total
A	0.772	0.01	0.0	0.01
B	0.780	0.03	0.02	0.05
C	0.794	0.06	0.05	0.11



Synthetic case. Cumulative % of landslides and study area [ranked from highest to lowest susceptibility](#). Cut off value of P<0.45 is established for stable cells

# Performance of LS maps: impact of misclassification

Landsliding event 20-yr return period (0.05 annual probability) that generates slope failures affecting 5% of the study area.

The probability of landslides affecting a built cell (pixel) is (Chung, 2006):

$$P_b = 1 - [1 - P_c]^{\frac{n_l}{n_c}k}$$

$P_b$  is the probability that a landslide affects a built cell

$P_c$  is the portion (probability) of the susceptibility class in the prediction rate curve

$n_l$  the number of pixels in the susceptibility class expected as future landslides

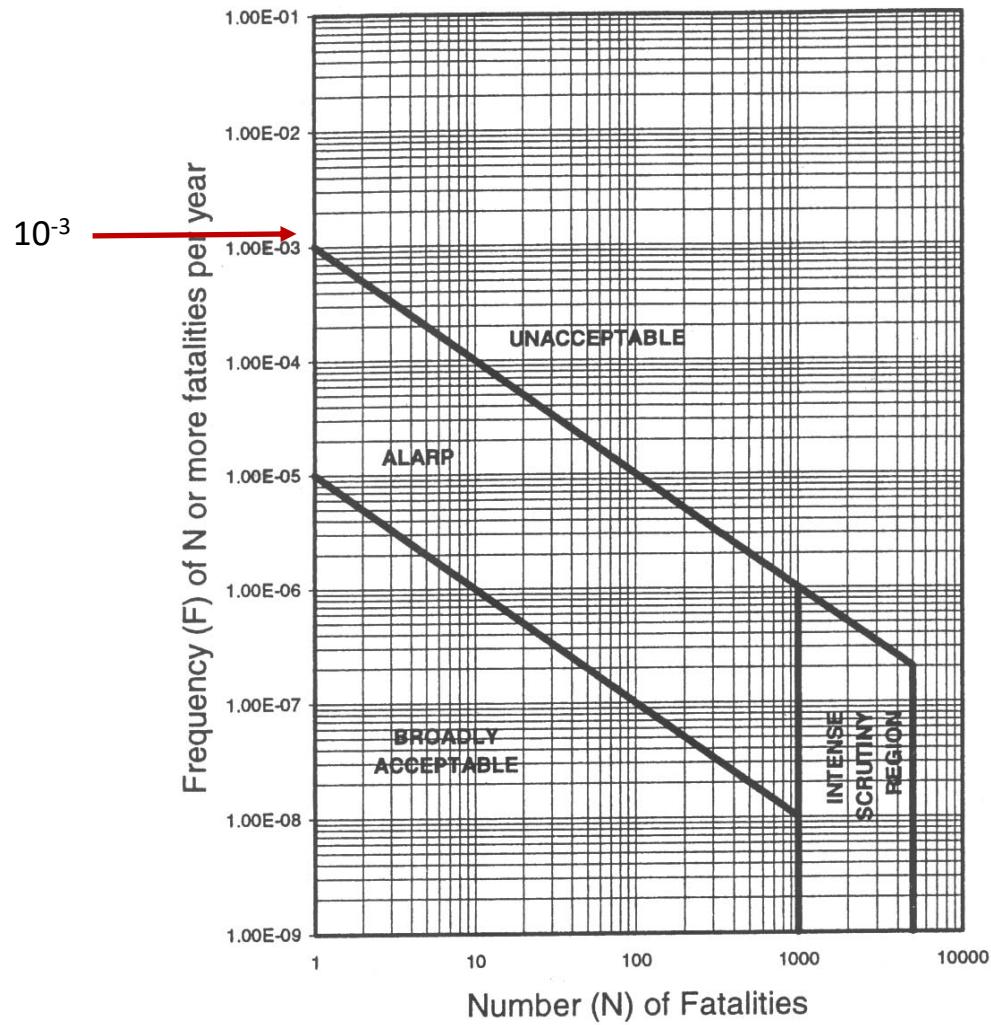
$n_c$  the number of pixels in the susceptibility class

$k$  the number of pixels in the susceptibility class that have been built

Three scenarios: 5, 10, and 20% of the area being developed.

	Model	Pls	probability of landslides in the susceptibility class	% cells built	Probability of a landslide affecting a built cell in this event	Pabc
Low ( $0.2 \leq P < 0.4$ )	A	0.01	5	5	0,003	$1.3 \times 10^{-4}$
				10	0,005	$2.5 \times 10^{-4}$
				20	0,010	$5.0 \times 10^{-4}$
	B	0.03	5	5	0,008	$3.8 \times 10^{-4}$
				10	0,015	$7.6 \times 10^{-4}$
				20	0,031	$1.5 \times 10^{-3}$
Very low ( $P < 0.2$ )	C	0.06	5	5	0,015	$7.7 \times 10^{-4}$
				10	0,030	$1.5 \times 10^{-3}$
				20	0,060	$3.0 \times 10^{-3}$
	A	0	5	5	0	0
				10	0	0
				20	0	0
	B	0.02	5	5	0.005	$2.5 \times 10^{-4}$
				10	0.010	$5.0 \times 10^{-4}$
				20	0.020	$1.0 \times 10^{-3}$
	C	0.05	5	5	0.013	$6.4 \times 10^{-4}$
				10	0.025	$1.3 \times 10^{-3}$
				20	0.050	$2.5 \times 10^{-3}$

# Performance of LS maps: impact of misclassification



probability of landslides  
in the susceptibility class

Probability of a landslide  
affecting a built cell in the  
event

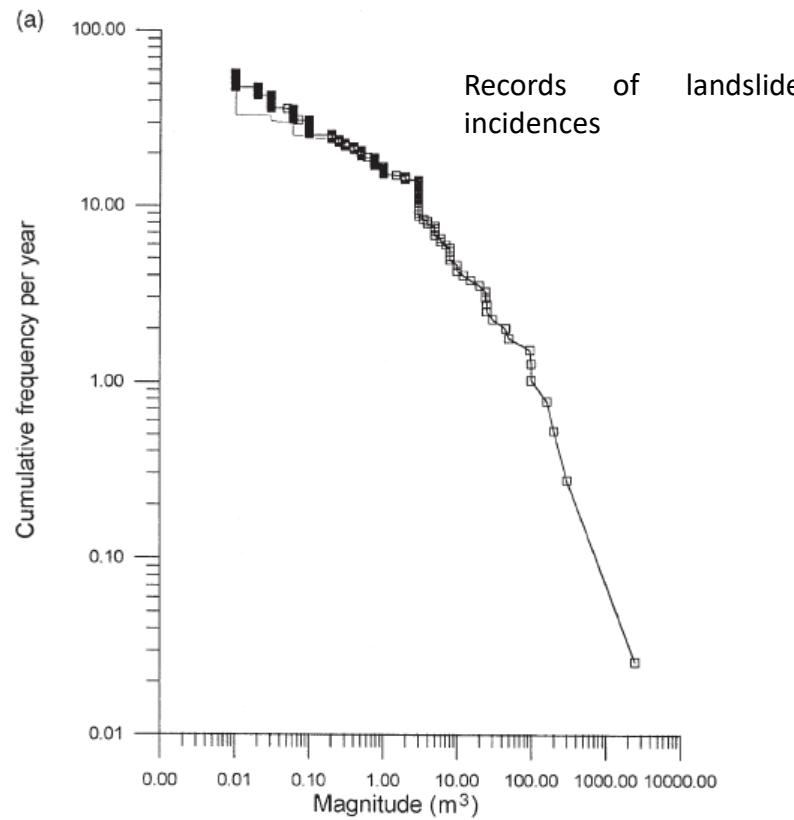
Annual Probability

	Model	P <sub>ls</sub>	% cells built	P <sub>bc</sub>	P <sub>abc</sub>
Low ( $0.2 \leq P < 0.4$ )	A	0.01	5	0,003	$1.3 \times 10^{-4}$
			10	0,005	$2.5 \times 10^{-4}$
			20	0,010	$5.0 \times 10^{-4}$
	B	0.03	5	0,008	$3.8 \times 10^{-4}$
			10	0,015	$7.6 \times 10^{-4}$
			20	0,031	$1.5 \times 10^{-3}$
Very low ( $P < 0.2$ )	C	0.06	5	0,015	$7.7 \times 10^{-4}$
			10	0,030	$1.5 \times 10^{-3}$
			20	0,060	$3.0 \times 10^{-3}$
	A	0	5	0	0
			10	0	0
			20	0	0
	B	0.02	5	0,005	$2.5 \times 10^{-4}$
			10	0,010	$5.0 \times 10^{-4}$
			20	0,020	$1.0 \times 10^{-3}$
	C	0.05	5	0,013	$6.4 \times 10^{-4}$
			10	0,025	$1.3 \times 10^{-3}$
			20	0,050	$2.5 \times 10^{-3}$

These values could be unacceptable for high-intensity landslide events with the capacity to heavily damage or destroy buildings

# Risk management challenge: estimating M-F relation boundaries

The extrapolation of the linear segment of the log-log relationships has been suggested for estimating the frequency of both mid-size and large landslides (Malamud et al. 2004; Picarelli et al. 2005)



# Risk management challenge: estimating M-F relation boundaries

---



Andorra, Central Pyrenees

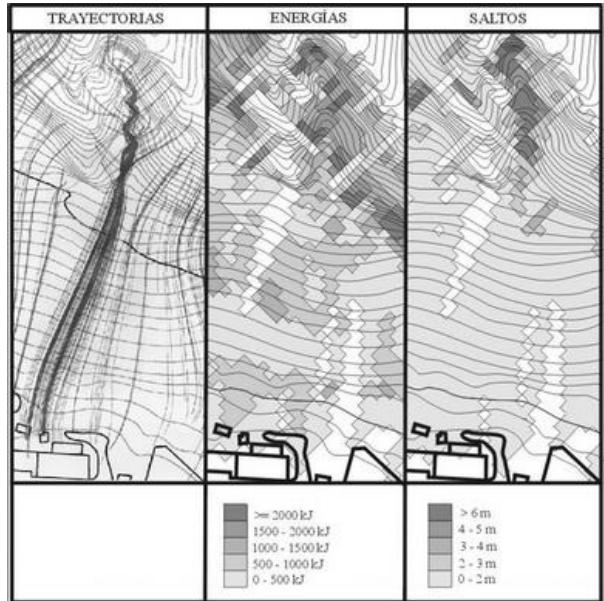


January 1997



43

# Risk management challenge: estimating M-F relation boundaries

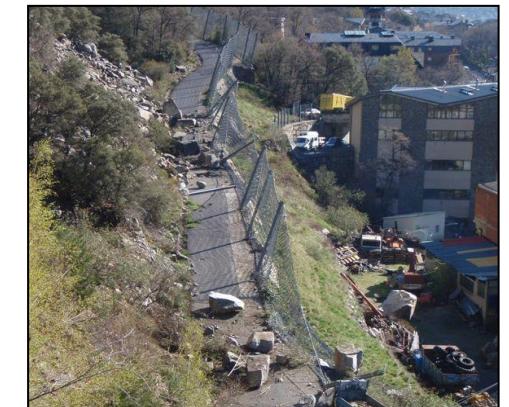
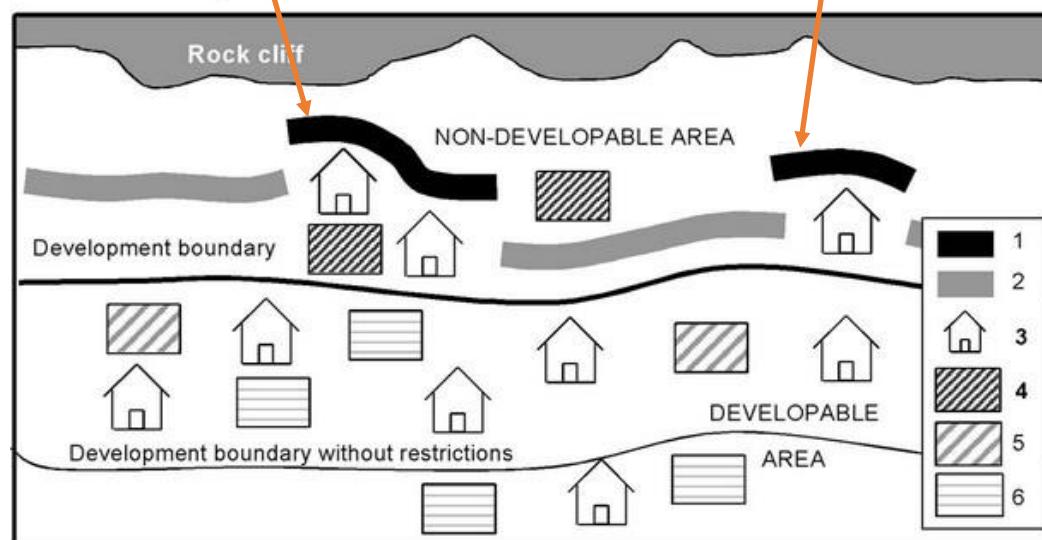


Is it safe enough?

Rock fall hazard master plan:

Upper boundary line for development

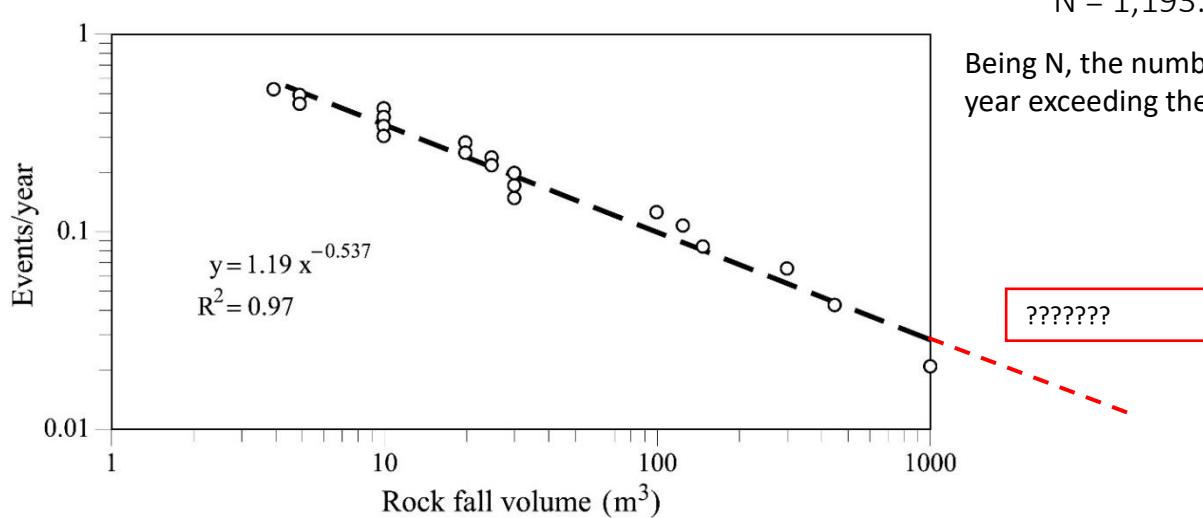
Building restriction



Performance satisfactory <sup>44</sup>

# Risk management challenge: defining WCE

Volume ( $\text{m}^3$ ) of the rockfall events inventoried at the Solà d'Andorra for the last 50 years and the cumulative relative frequency (Corominas et al, 2018)



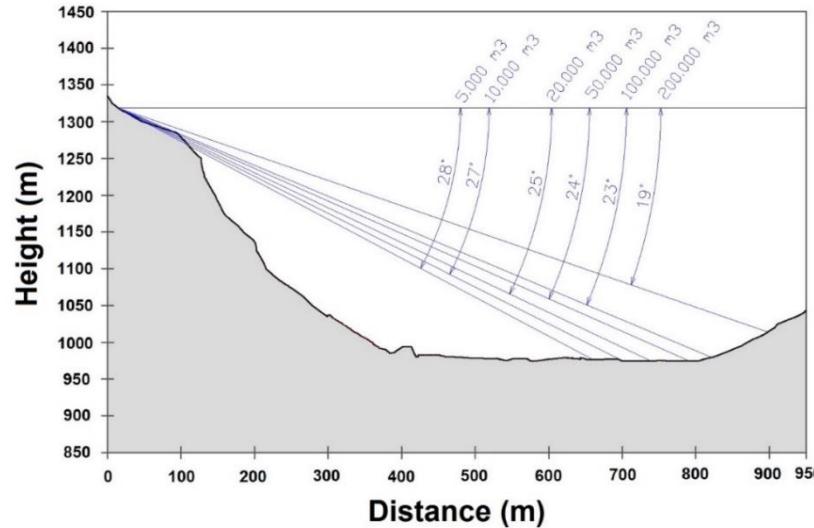
In case of incomplete record, is the extrapolation of the power law acceptable?

Volume range ( $\text{m}^3$ )	Fr (events/year)	Return period (years)
$\geq 1$	1.1933	0.84
$\geq 10$	0.3465	3
$\geq 100$	0.1006	10
$\geq 1,000$	0.0292	34
$\geq 10,000$	0.0085	118
$\geq 100,000$	0.0025	406
$\geq 1,000,000$	0.0007	1397



Cumulative frequency and return periods obtained from the extrapolation of the power law fitted to the rockfalls observed at the Solà d'Andorra (Corominas et al. 2018)

# Risk management challenge: defining WCE



Maximum runout that could be achieved by rockfall events with sizes between 5,000 and 200,000 m<sup>3</sup> originating from the slopes of the Borrassica & Forat Negre in Santa Coloma if they had occurred in the past. The runout is calculated following the criterion of reach angle for unobstructed rockfall events (Corominas 1996; Corominas et al. 2003)

Volume range (m <sup>3</sup> )	Fr (events/year)	Return period (years)
≥1	1.1933	0.84
≥10	0.3465	3
≥100	0.1006	10
≥1,000	0.0292	34
≥10,000	0.0085	118
≥100,000	0.0025	406
≥1,000,000	0.0007	1397

Cumulative frequency and return periods obtained from the extrapolation of the power law fitted to the rockfalls observed at the Solà d'Andorra

Lack of evidences of large events in the past (10,000yr):

The valley bottom is free of large landslide deposits

$$N = 1,193 \cdot V^{-0.537}$$

Corominas et al. 2018

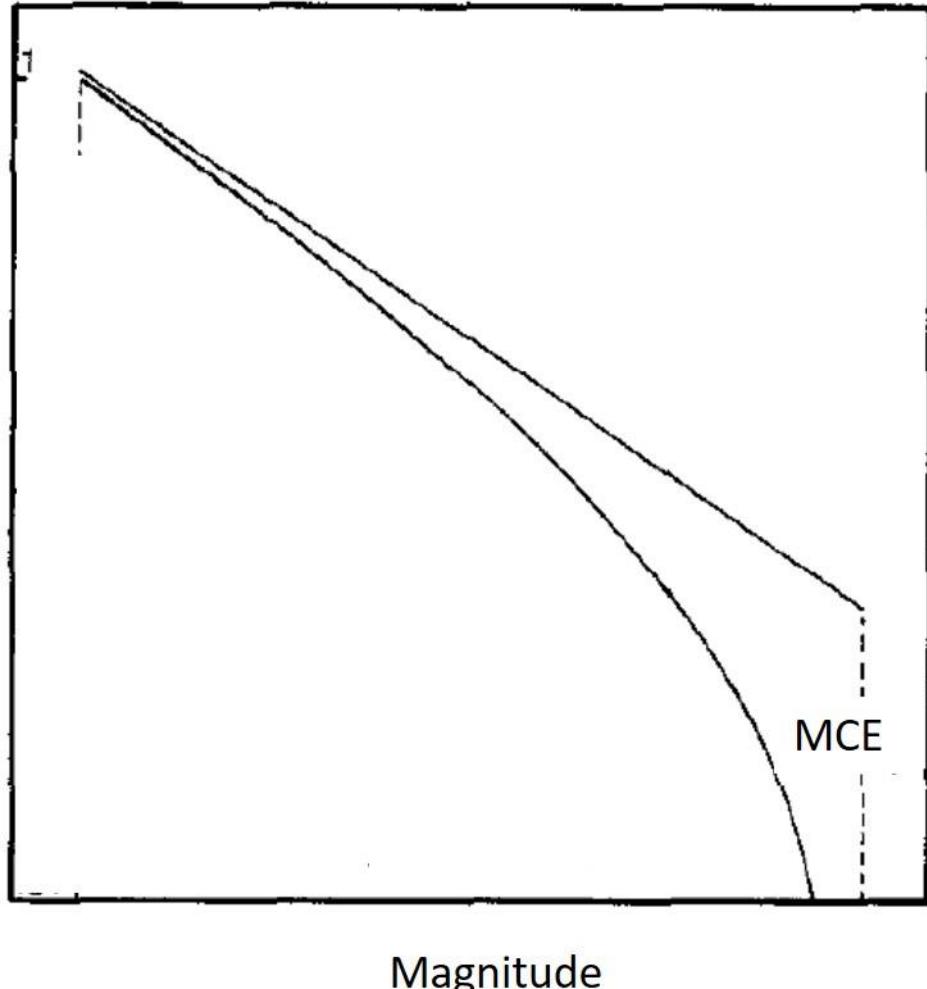


Andorra la Vella, Eastern Pyrenees, in the early 1960s

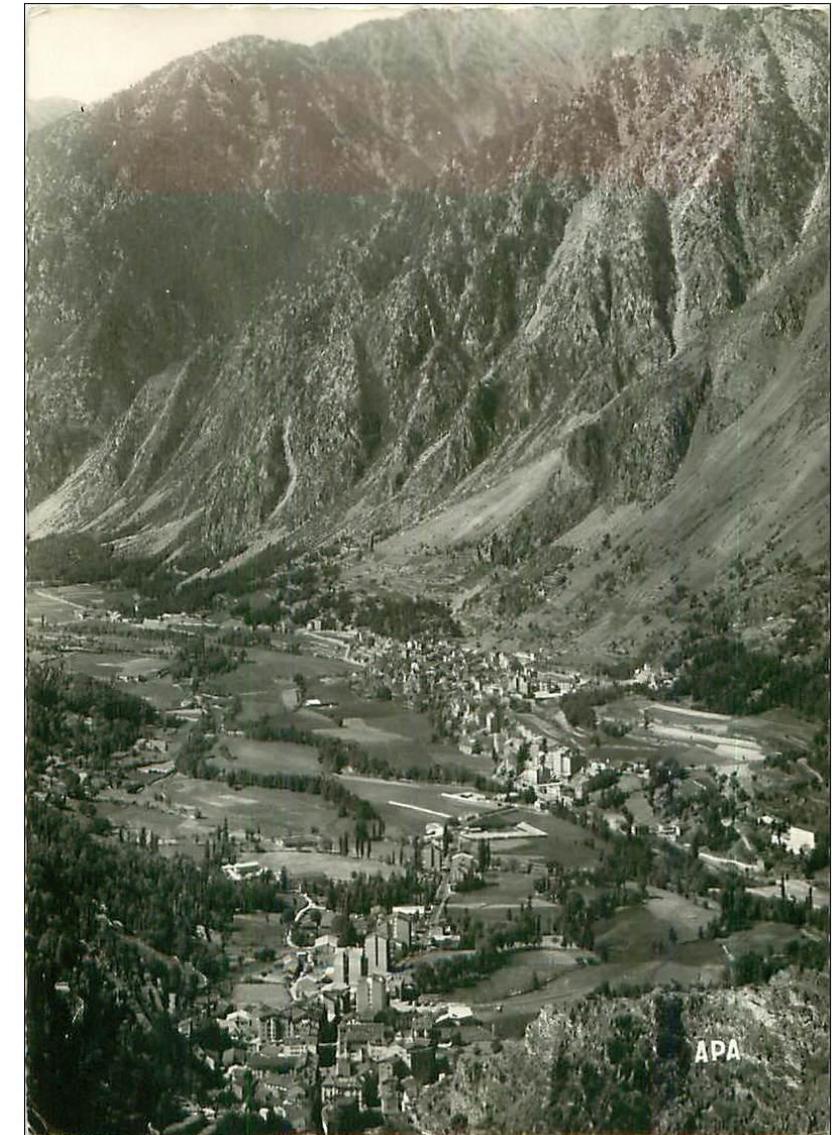
# Risk management challenge: defining WCE

Lack of evidences of large events in the past (10,000yr):

Frequency



Corominas 2021

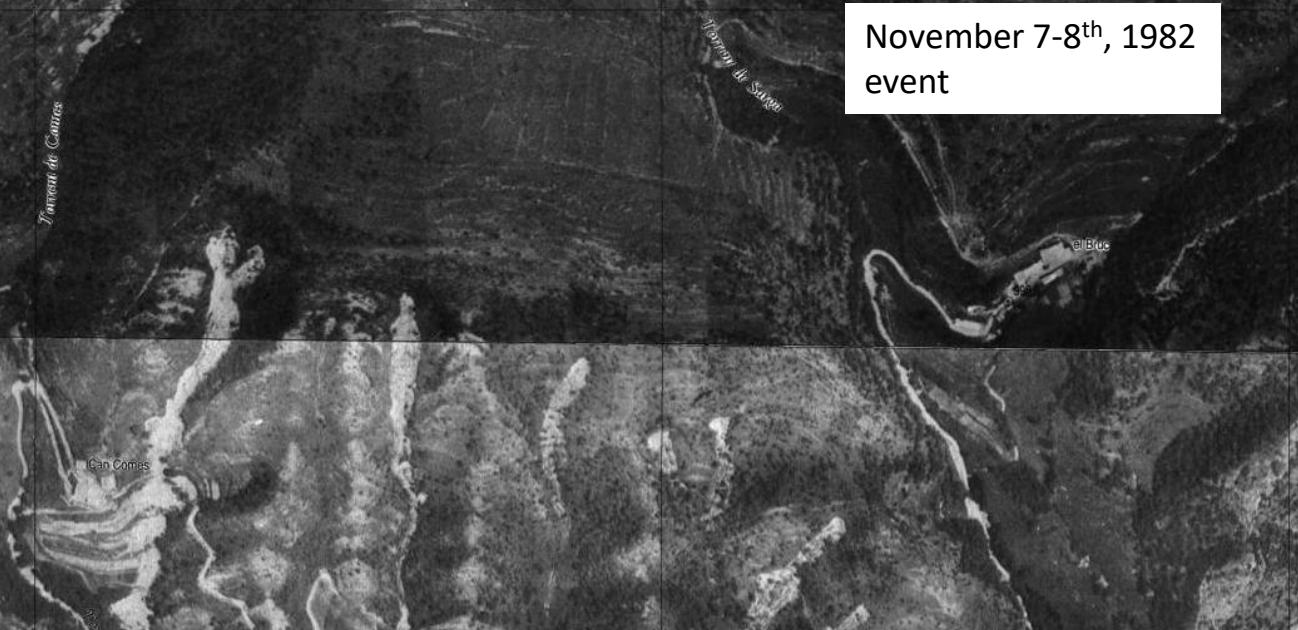


Andorra la Vella, Eastern Pyrenees, in the early 1960s

## Lack of stationarity

November 7-8<sup>th</sup>, 1982 event

Landslide magnitude-frequency analyses assume steady conditions for both triggers and slopes. This assumption is arguable because the conditions responsible for a given frequency in the past may no longer exist (Lateltin, 1997)

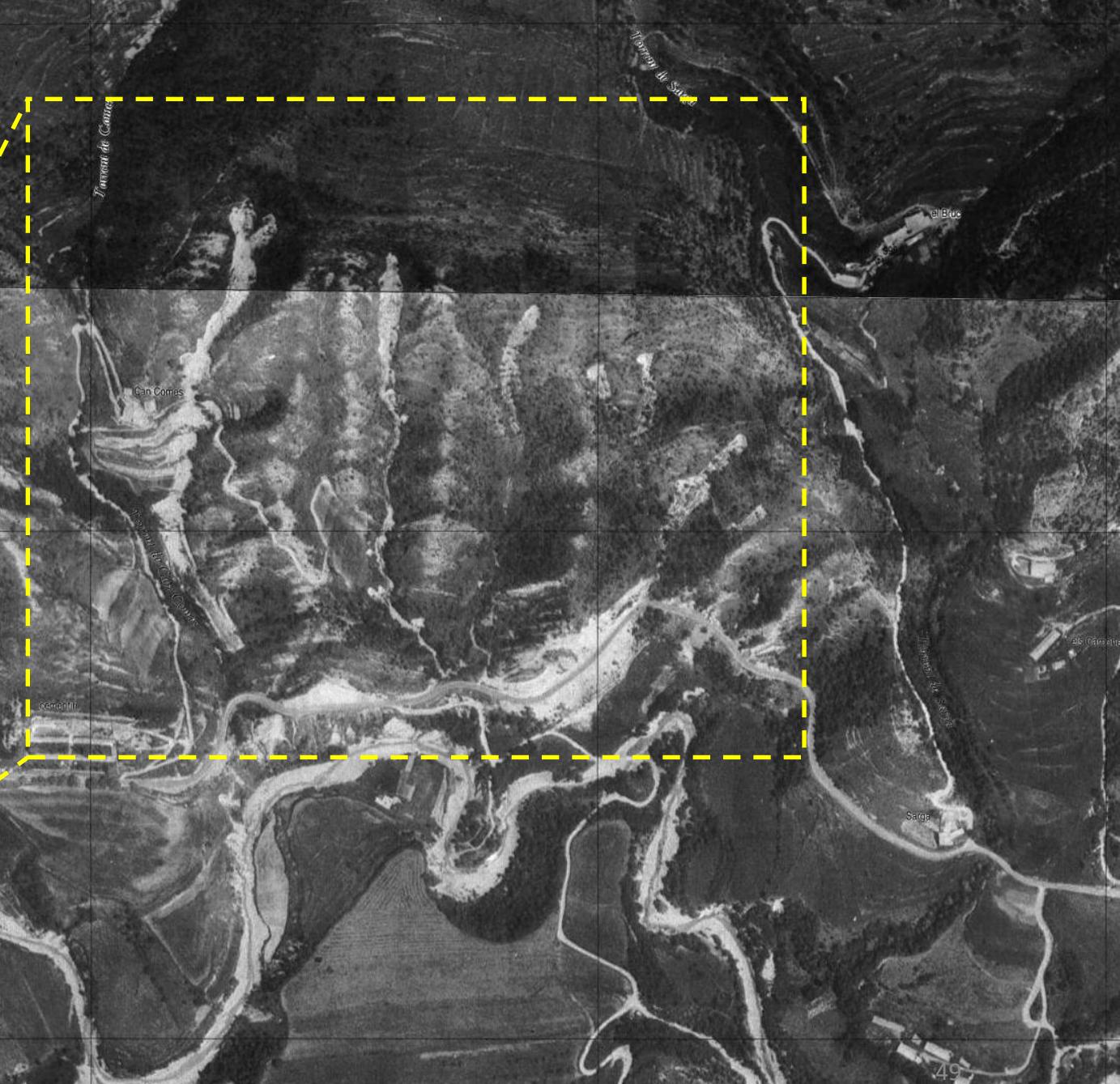


La Pobla de Lillet, Eastern Pyrenees

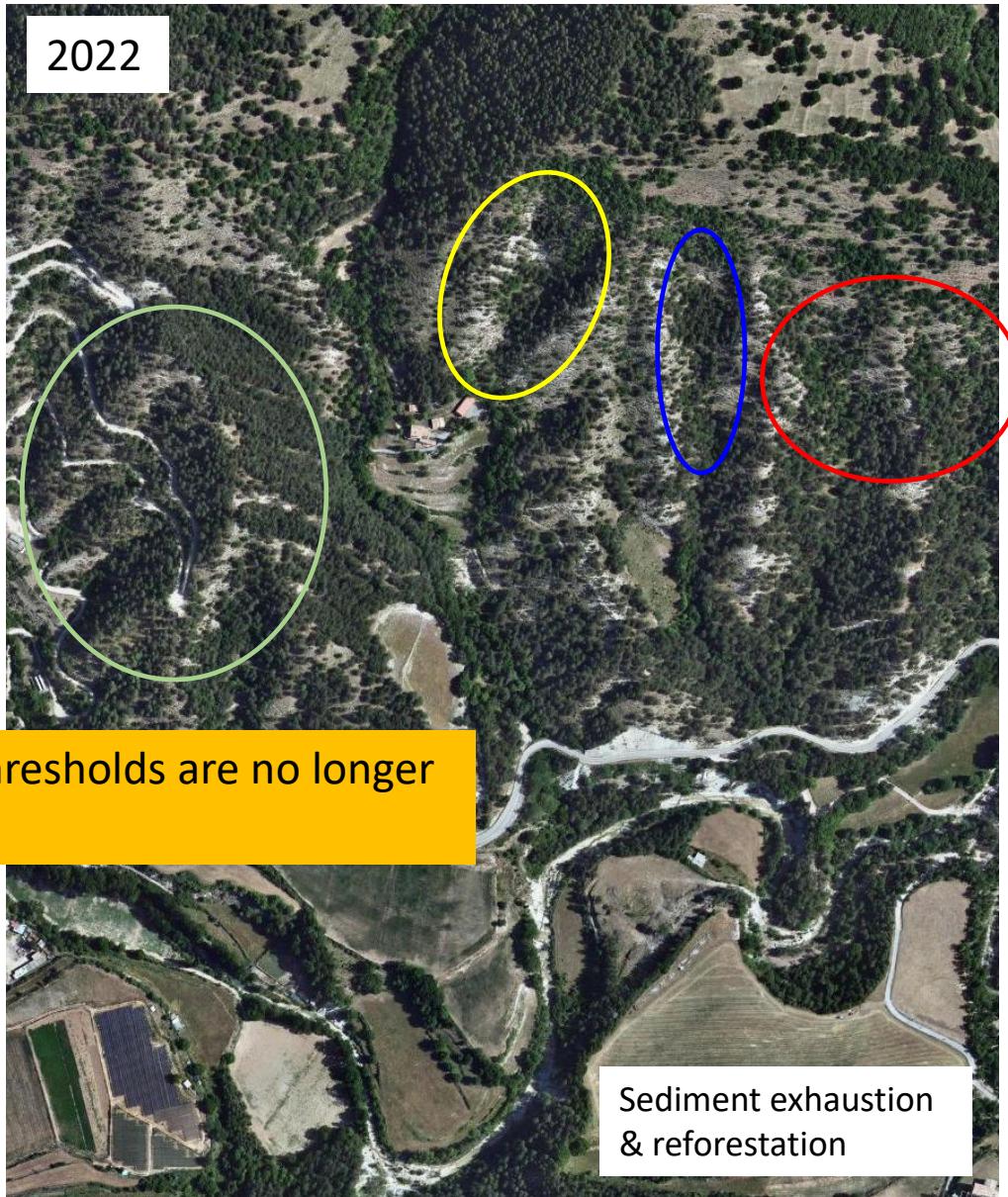
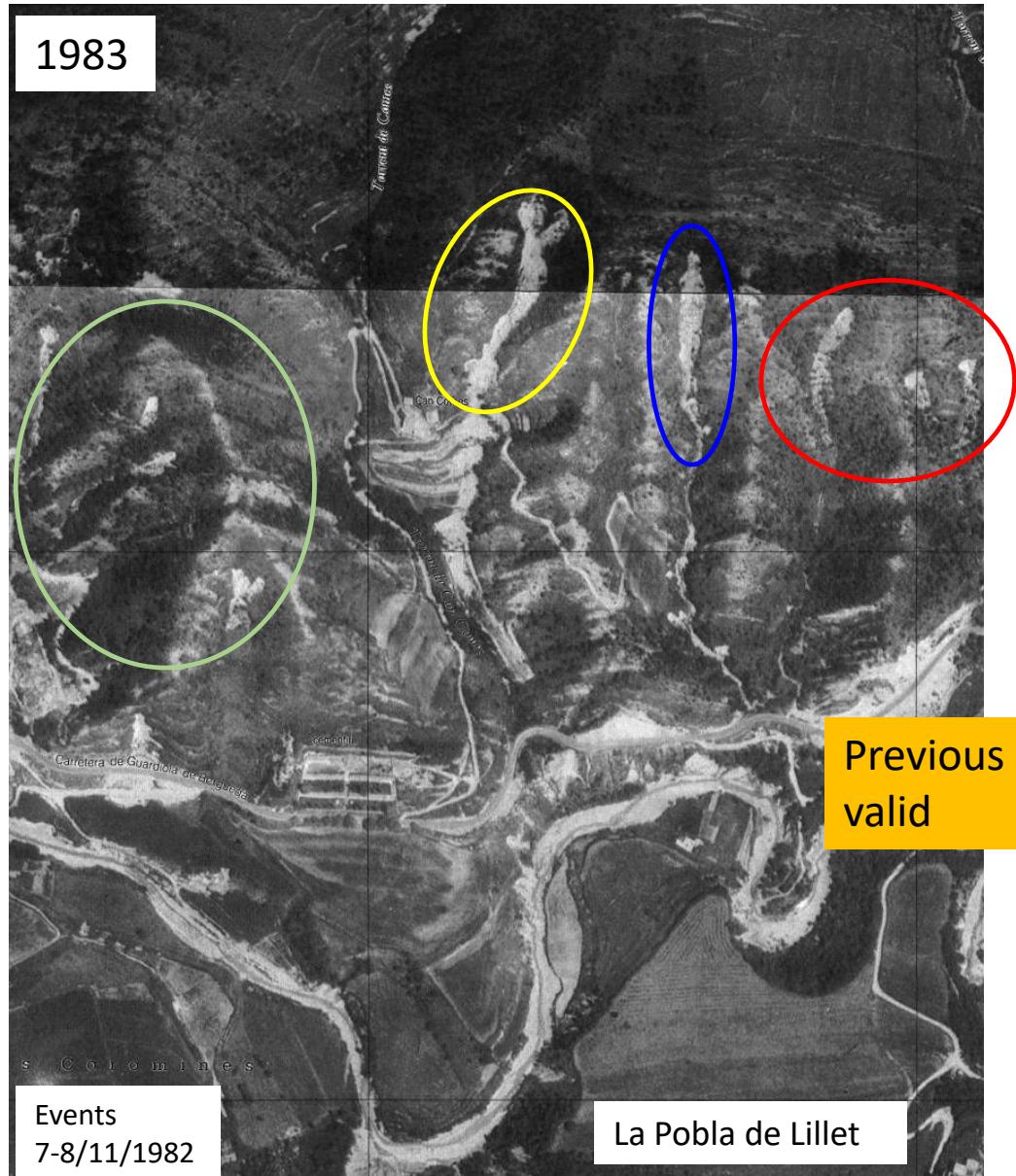
## Lack of stationarity



La Pobla de Lillet



# Landslide occurrence: lack of stationarity



# Landslide occurrence: lack of stationarity



Eruption of Vesuvius in 79 AD, described by Plinius the Young (Scandone et al., 2019).

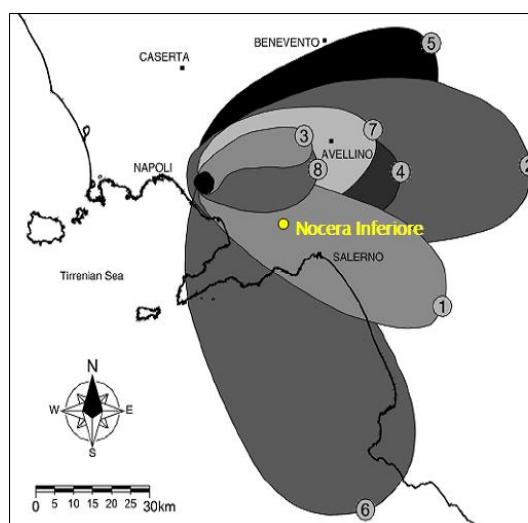


Vesuvius, 1906



Vesuvius, 1944

Distribution map of pyroclastic fall deposits of the Somma-Vesuvius deposited in the last 25 ka BP. Each lobe consists of air fall tephra 10 cm thick from a single Plinian eruption. Numbers are arranged according to the chronological sequence of the eruption. (1) 25.000 anni B.P.; (2) 18.000 anni B.P.; (3) 16020 anni B.P.; (4) 8000 anni B.P.; (5) 3550 anni B.P.; (6) A.D. 79; (7) A.D. 472; (8) A.D. 1631 (modified from Rolandi et al., 2007).



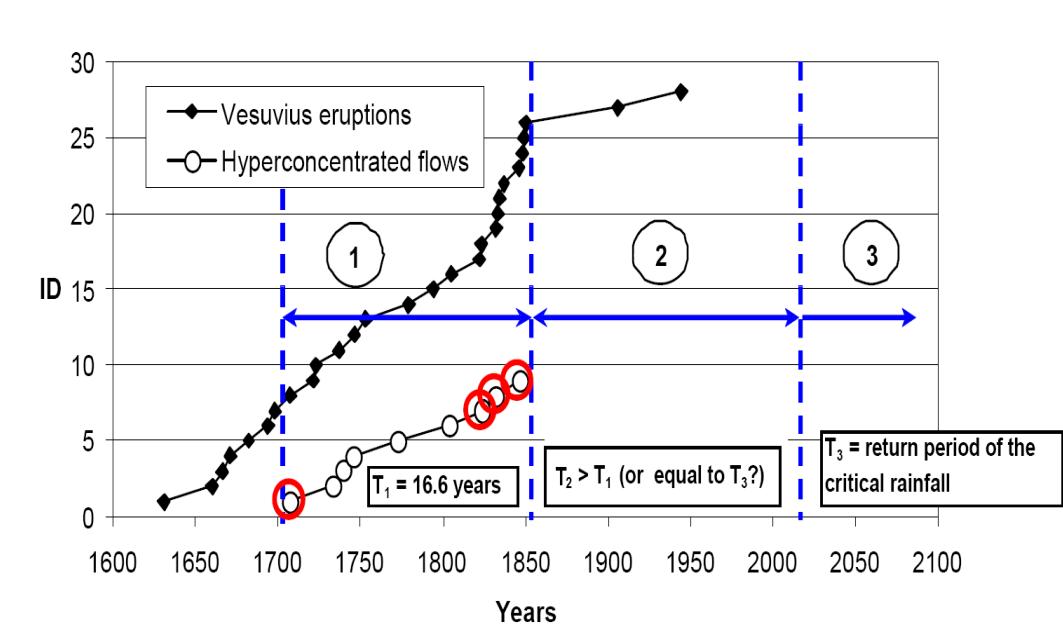
# Landslide occurrence: lack of stationarity



Sarno, Italy 1998



Source: Commissariato per l'Emergenza Idrogeologica in Campania:  
[www.commissario2994.it](http://www.commissario2994.it)



Cumulative distributions of: i) Vesuvius explosive eruptions occurred from 1631 up to now; ii) hyperconcentrated flow incident data (events occurred after the Vesuvius eruptions are circled in red).



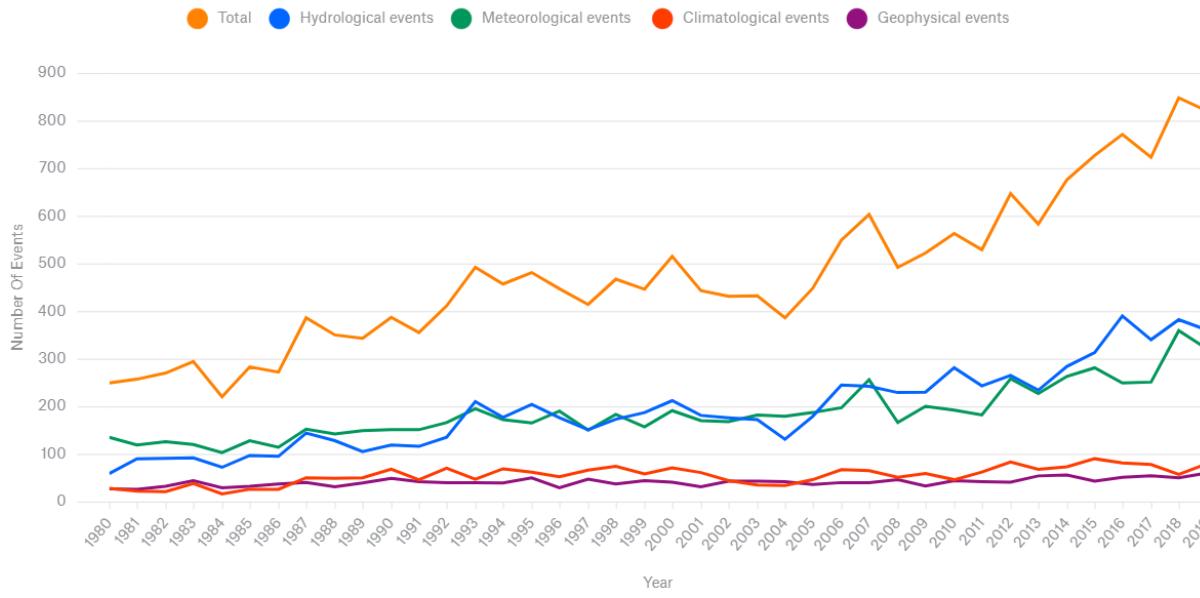
Return periods between 1707 and 1846: **16.6 years**  
Return period between 1846 and nowadays:  $\approx 200$  years



The occurrence is constrained by the availability of pyroclastic soils on the slopes

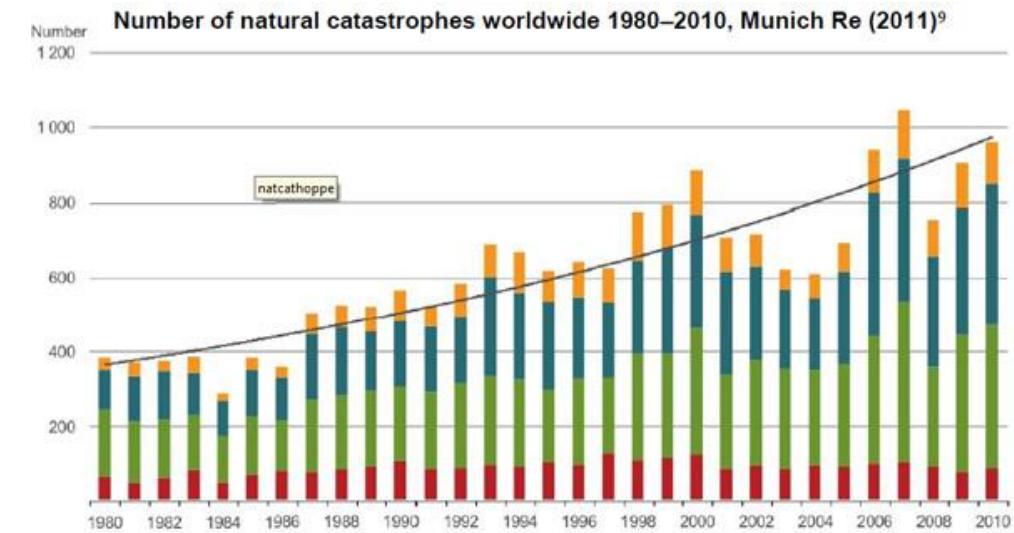
# Risk management challenges: increase of # events or exposure?

## Trends in the occurrence of natural hazards



Damaging events

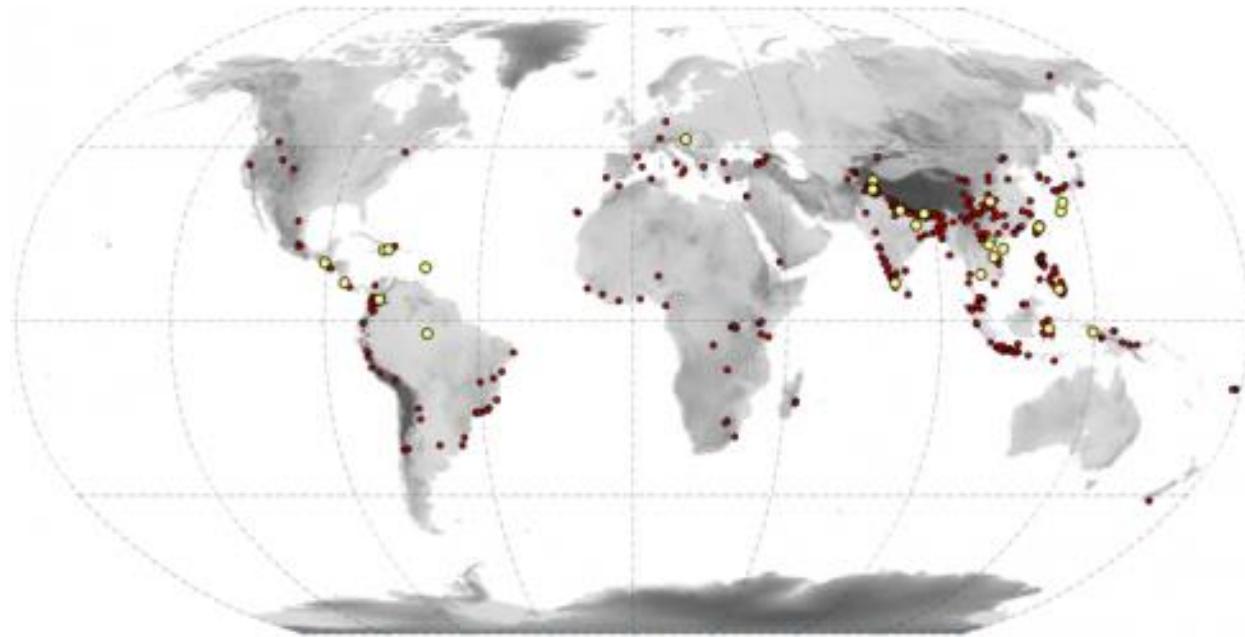
Source: MunichRe



## Natural catastrophe (UN criteria):

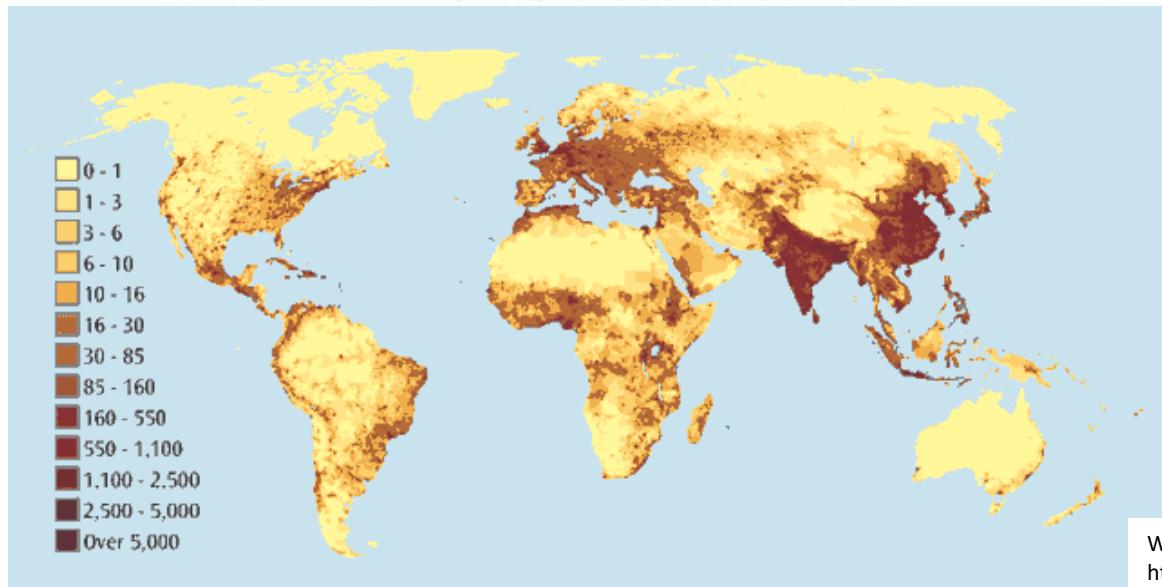
- Interregional or international assistance are necessary
- Thousands of people are killed
- Hundred thousands of people are made homeless
- Substantial economic losses
- Considerable insured losses

# Risk management challenges: increase of # events or exposure?



Available statistics are focussed on the impacts rather than on the occurrence of phenomena

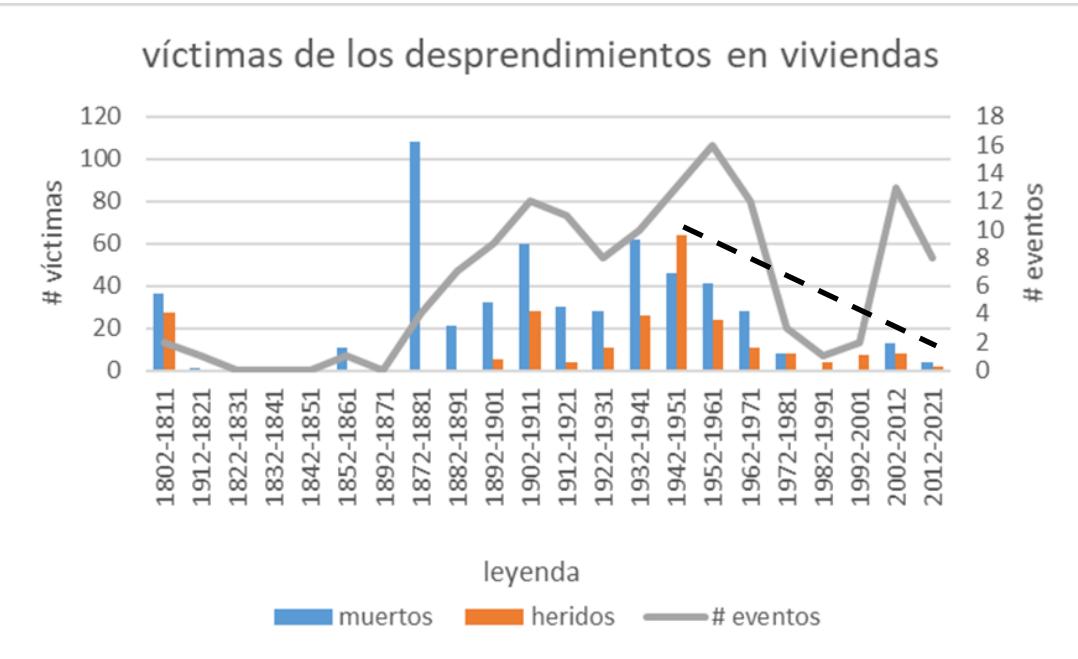
Red dots: fatal landslides in 2009  
yellow dots: fatal landslides in 2010,  
(Institute of Hazard, Risk and Resilience Blog)



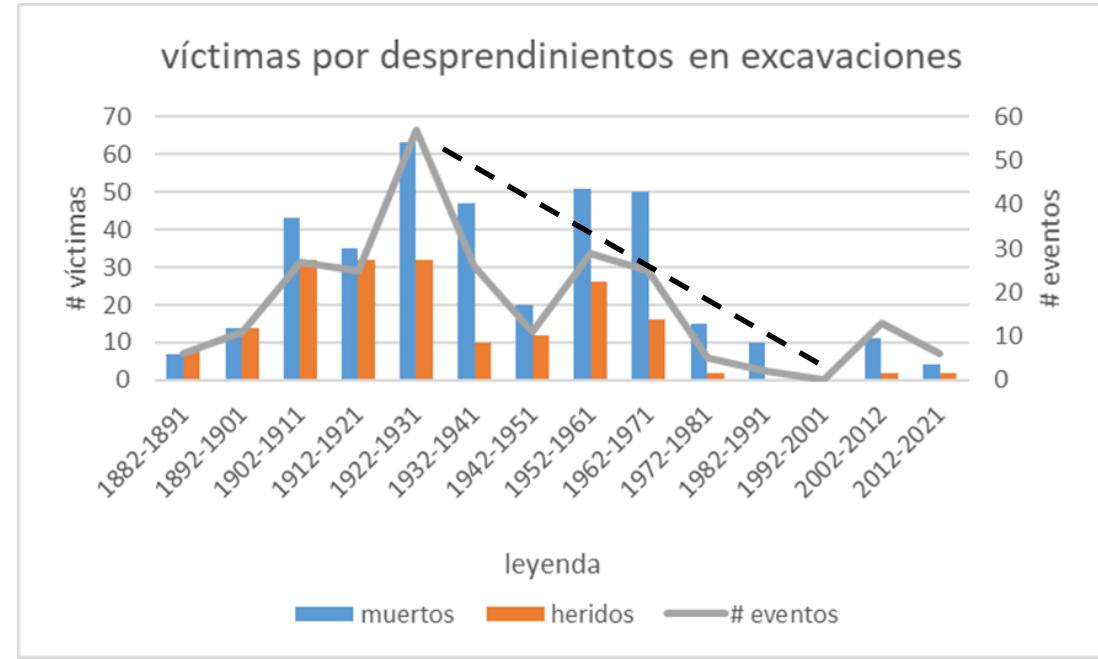
World population density  
<http://www.theglobaleducationproject.org/>

The increase of fatal landslides is not an indicator of a higher frequency of events

# Risk management challenges: increase of # events or exposure?



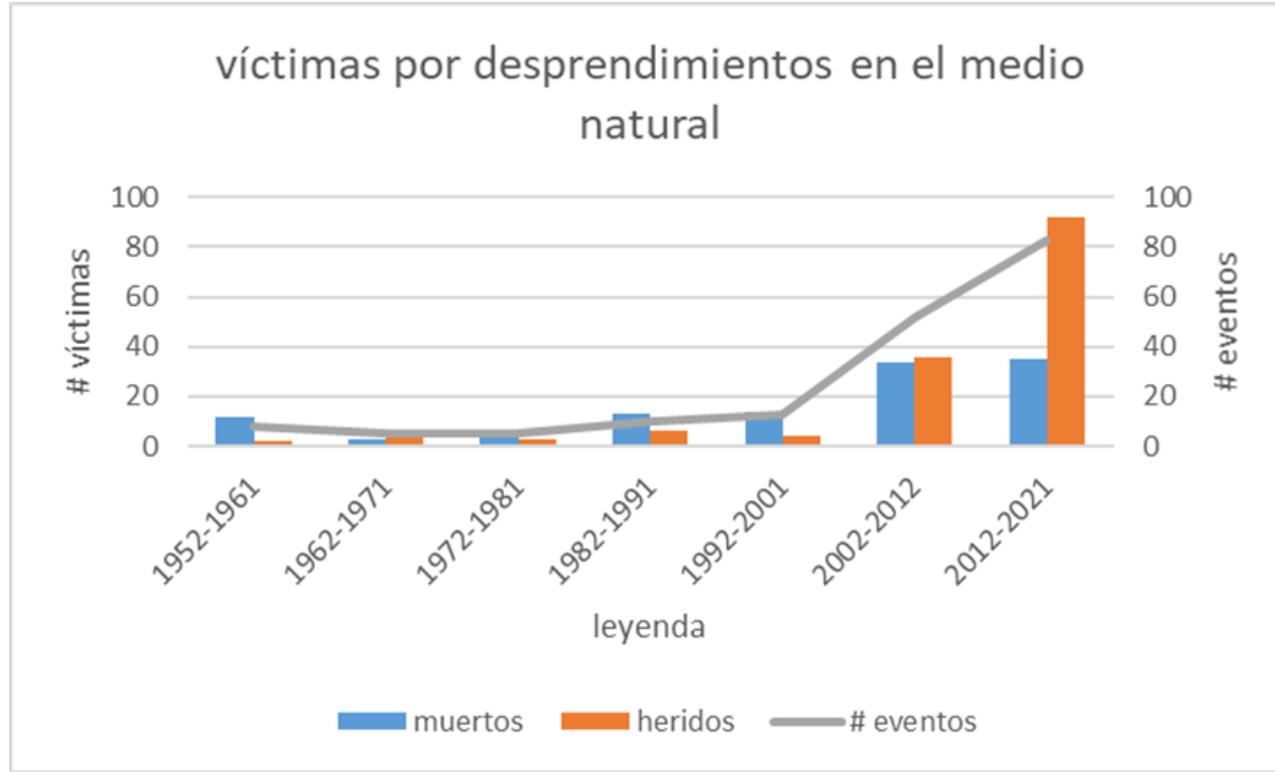
Evolución del número de víctimas causadas por los desprendimientos en viviendas en España, agrupadas por decenios (Corominas, 2022)



Evolución del número de víctimas causadas por los desprendimientos en excavaciones en España, agrupadas por decenios (Corominas, 2022)

The increase of fatal landslides is not an indicator of a higher frequency of events

# Risk management challenges: increase of # events or exposure?



Evolution of the number of victims caused by landslides in the natural environment, grouped by decades (Corominas, 2022)



Playa del Hornillo de Águilas, Murcia, 2010.  
Source: Diario La Opinión



24/08/2018 Playa Mesa del Mar, Tenerife  
Photo: Gabriela Gulesserian

# Climate change and landslide risk management

---

## Increase of intense precipitation events



Non constrained sediment supply

Nova Friburgo, Brasil, January 2011  
Source: [www.boston.com](http://www.boston.com)

Landslide frequency may increase and,  
more importantly, the landslide  
magnitude



constrained sediment supply

Eastern Pyrenees, Spain  
November 1982

Landslide frequency might remain  
unaffected or even decrease by  
sediment exhaustion

# The challenge of living with risk: remedial measures

---

Mitigation measures are designed for a reference event (i.e. 100 y return period).

The frequency of the design event is usually determined based on the observation of past events.

Increase of landslide frequency might be amenable for many of the existing mitigation structures

Engineering designs can be undersized if climate change not only modifies landslide frequency but landslide magnitude



Protective works  
against debris flows

# The challenge of living with risk: unprecedented scenario

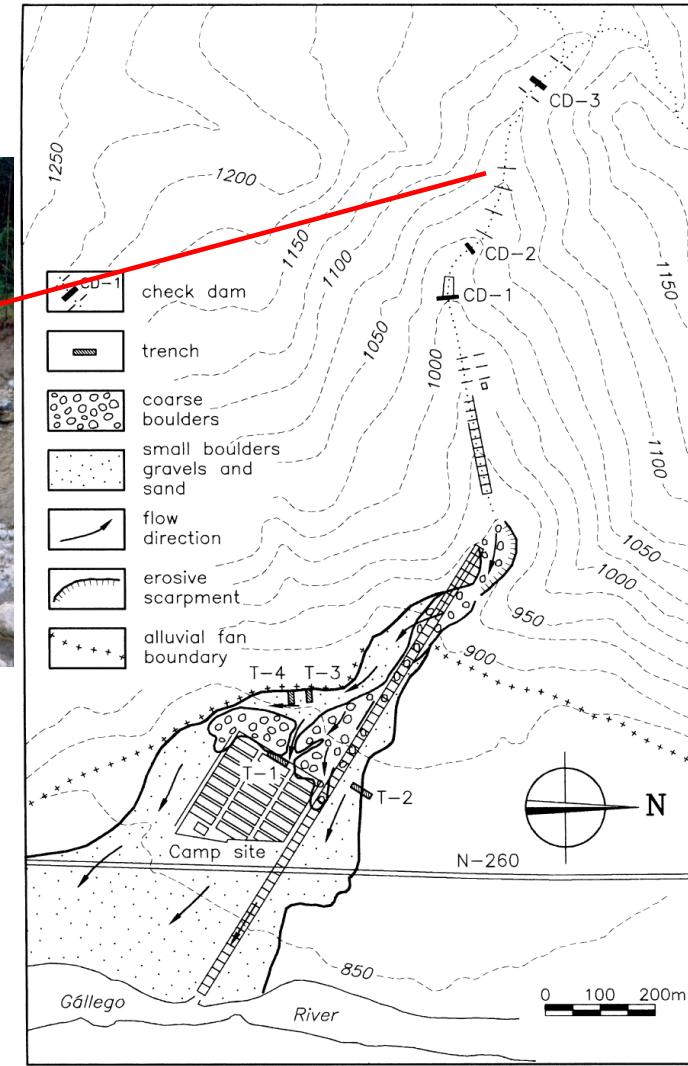
Channelling ( $120\text{m}^3/\text{s}$ )  
undersized



Biescas, Spain. August 7<sup>th</sup>, 1996  
87 lives lost, 55 Millions US\$  
Rain storm lasted for 2hr

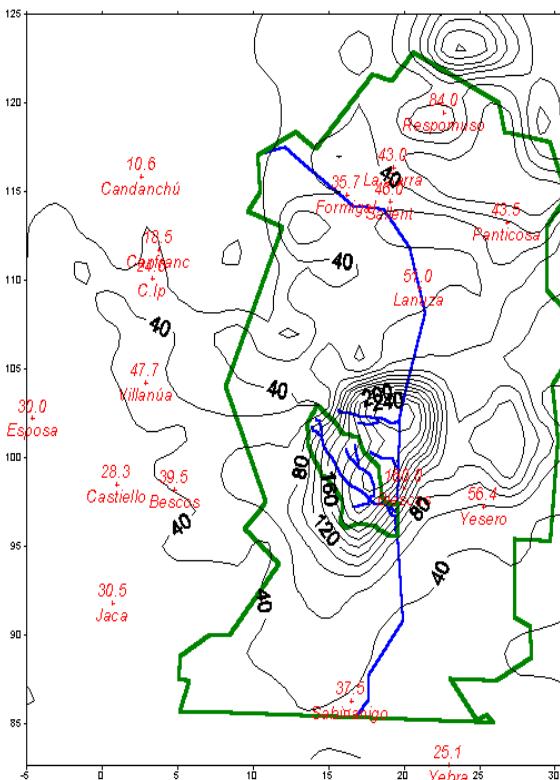
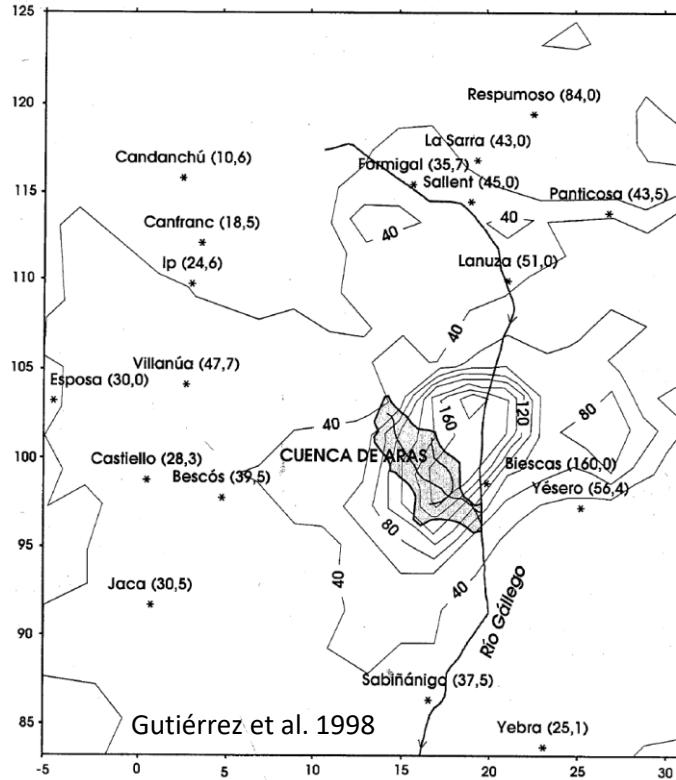


Most of the 40 check dams destroyed, releasing about 68,000 m<sup>3</sup> of stored sediments which spread over the fan. Channel with capacity of  $120 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  was overflowed and buried



Alcoverro et al. 1999

# The challenge of living with risk: unprecedented scenario



Zaragoza meteorological radar

Maximum at Betés of  
252 mm  
Storm duration: 2hr  
unnoticed by the  
network of rain gages!

Rainfall

Observation 1: network of rain gauges  
may miss significant part of the events

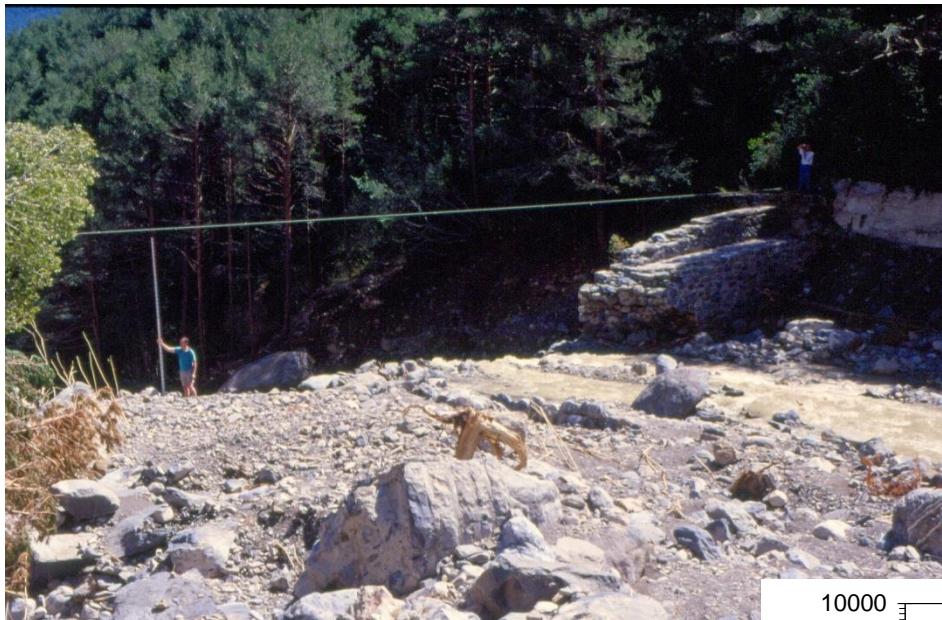


Implications :

- (i) calculation of return periods
- (ii) hydraulic designs
- (iii) local events may remain unnoticed

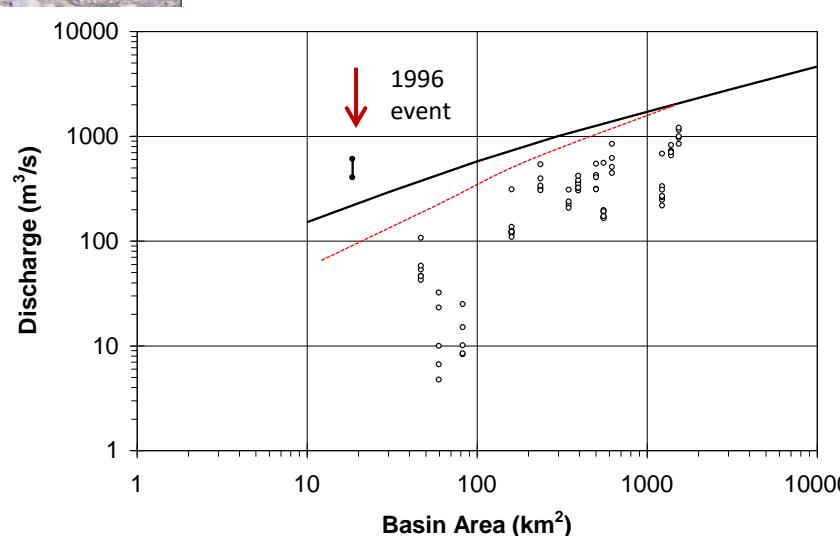
# The challenge of living with risk: unprecedented scenario

Basin: 20 km<sup>2</sup>



Peak discharges recorded at 13 gauges located 150km around Barranco de Arás and upper envelope for rivers of Central-Eastern Pyrenees

Expected maximum discharge based on regional discharge curves of E. Pyrenees is ca. 200 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>



Calculated discharge:

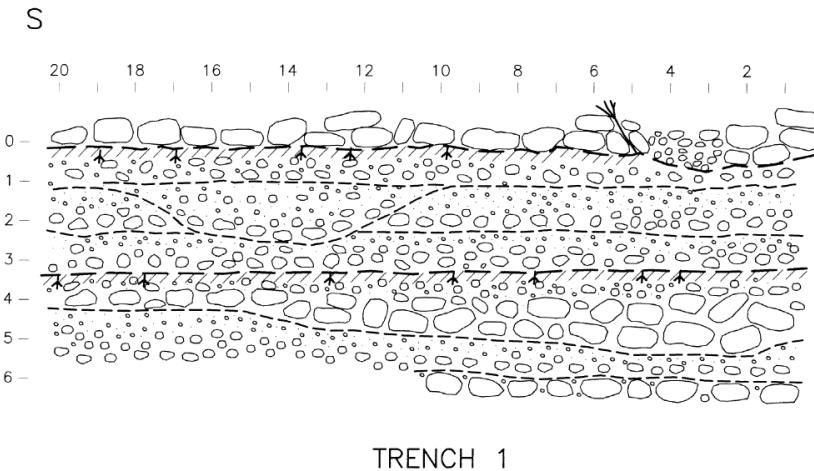
Critical section method:  
400 to 600 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>

Paleohydraulic method:  
300 to 730 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>

## Flood reconstruction

Observation 2: events may be bigger than those recorded in the regional hydrological record

# The challenge of living with risk: unprecedented scenario



TRENCH 1

Fig. 11. Geological cross-section of trench T-1. Several former flooding events may be distinguished underneath the deposits of the 7 August flood. Layers of large boulders appeared at a depth of 3.2 and 6.0 m, respectively. However, the sizes of the largest boulders found in the trench were always slightly smaller than those left by the flood of 7 August.

Two layers of large boulders were found at 3.5 and 5.5m depth.

Boulder diameters were less than 1m and up to 1.1m respectively and smaller than those measured in the 1996 event

**Observation 3: events may be bigger than those recorded in the sedimentary record**



**Stratigraphic record**

# The challenge of living with risk: performance of the remedial works

Built check dams aimed at restrict torrent down cutting and widening, thus preventing erosion and slope failures; sediment storage and decrease bed gradient and water velocity; energy dissipation

Performance of the check dams



Causes of failure: dam undermining, scour of lateral support, hydrostatic pressure, impact of boulders

Observation 4a: engineering works may give a false sense of security

Observation 4b: events exceeding the design event may aggravate consequences

Observation 4c: old engineering designs must be revisited based on updated knowledge

## Final comments on future occurrence of landslide event

---

There exists a variety of triggers. Only a fraction of the slopes will respond to the climate change

The response of slopes to climatic factors is complex. A variety of non-climate related factors (anthropogenic) may alter rainfall thresholds

Effects of climate change on landslide activity will not be evenly distributed. In regions experiencing more frequent intense rainfall events will increase shallow landslide activity provided that sediment is available. Increased winter rainfall would favor the reactivation of some large rotational slides and earthflows, especially if rainfall is accompanied by river floods capable of sustaining the erosive action on the river banks.

In regions experiencing less annual precipitation along with an increase of evapotranspiration may reduce the activity of earthflows and large landslides

The rise in sea level combined with a higher frequency of sea storms, will cause undermining and failure of the coastal cliffs, especially in those made up of soft rocks, lava flows stacks (volcanic islands) and fractured rocky massifs (particularly, those unfavorable dipping).

## Final comments on landslide risk management

---

Anthropogenic changes may become more important than climate-induced changes. The number of new cut slopes and of exposed elements has significantly increased.

The main concern in terms of climate change are the locations where the increase of frequency is associated with an increase of landslide **magnitude**

Landslide hazard maps and landslide mitigation measures have to be revisited. Most engineering design cannot handle high-magnitude low-frequency events. Unprecedented events might occur.



Thank you for your attention