

# Análisis del riesgo derivado de la amenaza de la inestabilidad de laderas bajo influencia del calentamiento global antropogénico: propuesta de un enfoque metodológico

Slope instability hazard and risk analysis under the influence of anthropogenic global warming: proposal for a methodological approach

Sergio Mora

ARX Consultores, San José, Costa Rica  
[smoracastroc@consultarx.com](mailto:smoracastroc@consultarx.com)

(Recibido: 24/06/2021; aceptado: 30/10/2021)

**RESUMEN:** Si el escenario de que el calentamiento global antropogénico (CGA) aumentaría las precipitaciones en algunos microclimas, podrían modificarse a mediano y largo plazo, los procesos de la geodinámica externa. En áreas con equilibrios hídricos inestables, CGA se superpondría a la variabilidad climática y otros factores naturales y antropogénicos: vulnerabilidad, terremotos, volcanismo, expansión urbana e infraestructural, El Niño-La Niña/ENOS, degradación de tierras. La inestabilidad de laderas sería más destructiva social, ambiental y económicamente, por lo cual conviene redefinir las prioridades de las políticas públicas, toma de decisiones y gestión del riesgo. Se propone un procedimiento analítico para áreas con microclimas influenciados por el CGA en donde aumentarían la intensidad, duración, frecuencia, volumen de las lluvias y el desequilibrio hídrico. Asimismo, ascenderían progresivamente el nivel freático y la presión intersticial, y las lluvias intensas críticas reducirían su período de recurrencia. La gestión del riesgo, apoyada en la geotecnia, deberá centrarse en acciones que reduzcan y transfieran el riesgo y disminuyan la vulnerabilidad, como mejor instrumento de adaptación para contrarrestar cualquier amenaza.

**Palabras clave:** amenaza de inestabilidad de laderas; deslizamientos; gestión del riesgo; cambio climático; adaptación.

**ABSTRACT:** Rainfall rates may be modified, in the mid to long term in some microclimates, by the influence of anthropogenic global warming (AGW). If true in areas with unstable hydric balances AGW is likely to become superimposed to climate variability and other hazards, both natural and human: vulnerability, earthquakes, volcanoes, urban and infrastructural expansion, El Niño-La Niña-ENSO, land degradation. Slope instability hazards may become more destructive socially, economically, and environmentally. It is critical to redefine priorities in policy, decision-making, and risk management. An analytical procedure is proposed for areas with microclimate conditions prone to escalate rainfall intensity, duration, frequency, volume, and its resulting hydric unbalances. Progressive rises in water table and interstitial pressure resulting from intense rainfalls, with smaller return periods, may lead to higher water tables and earlier conditions for slope failure. Risk management, supported by Engineering Geology must focus on reducing and transferring risk and decrease vulnerability, as the best adaptation instrument to face any hazard.

**Keywords:** slope instability; landslide hazard; risk management; climate change; adaptation.



## Introducción

### Amenazas naturales y antropogénicas

Las amenazas pueden tener orígenes naturales, antropogénicos y mixtos (Fig. 1). La actividad antropogénica puede exacerbar los procesos naturales y producir las denominadas amenazas “socio-naturales”. Las amenazas naturales pueden clasificarse de la manera siguiente:

- Geodinámica interna: sismicidad, vulcanismo y sus derivaciones: tsunamis, licuefacción de suelos, lahares, entre otros.
- Geodinámica externa: erosión intensa, inestabilidad de laderas, aludes, sedimentación torrencial, transgresiones marinas, dinámica costera. El impacto de los meteoritos y la caída de basura espacial se han incluido a causa del efecto que a veces producen sobre la superficie de la corteza terrestre.
- Hidrometeorológicas: variabilidad y cambio climático; lluvias intensas, inundaciones, sequías, ciclones, vendavales, tornados, tormentas de polvo, ascenso del nivel del mar, El Niño-La Niña/Oscilación del Sur, entre los más relevantes.

Las amenazas antropogénicas son más complicadas de clasificar y cuantificar debido a la diversidad de sus causas y variables. Su influencia puede materializarse como un acelerador, directo o indirecto, de los procesos geodinámicos. Se propone la siguiente clasificación simplificada (Fig. 1):

- Seguridad: conflictos armados, ciberataques, vandalismo, disturbios y agitación social, terrorismo, vandalismo, estampidas humanas.
- Salud: desnutrición, hambruna, epidemia, pandemia; accidentes derivados de la inseguridad laboral y ocupacional.
- Situaciones socioeconómicas y culturales: pobreza, migraciones masivas, desempleo, influencia de ideologías y religiones extremistas.
- Ambiente: accidentes tecnológicos e industriales, derrames tóxicos, contaminación, degradación de la tierra, calentamiento global antropogénico (CGA); disposición inadecuada de residuos sólidos, líquidos y gaseosos; incendios forestales, explosiones y accidentes nucleares; deterioro y destrucción de los ecosistemas terrestres y marinos, biodiversidad local y global, incluidos los bancos genéticos, cambio del pH en los océanos causado por el exceso de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes atmosféricos e hídricos.

La contaminación del aire, suelos y aguas ha crecido constantemente desde al menos la Revolución Industrial, a mediados del siglo XVIII. Su intensificación se ha debido, principalmente, al exceso de residuos antropogénicos de líquidos, sólidos y de emisiones de gases, vapores y partículas de efecto invernadero. Las emisiones antropogénicas hacia la atmósfera, al ser la causa del CGA, pueden impulsar modificaciones leves, pero relevantes y crecientes, de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas y por consecuencia, de la geodinámica externa (IPCC, 2021).

### Geodinámica externa; inestabilidad de laderas

En su mayoría, las laderas están formadas por masas rocosas, bloques disgregados de rocas y suelos, suelos residuales y transportados, coluvios, hielo, nieve y sus mezclas. La diversidad de los procesos de la inestabilidad de laderas es amplia y existen numerosos enfoques y clasificaciones disponibles en la literatura técnica.

Los límites entre clases suelen ser complejos, difusos y ambiguos, con excepciones, variantes y singularidades locales sujetas a la interpretación de cada especialista. Las figuras 2, 3 y 4, muestran algunos ejemplos específicos de la inestabilidad de laderas y de la geodinámica externa en general.

Según Hungr, Leroueil y Picarelli (2014) y Mora (2021), los procesos geodinámicos principales pueden resumirse de la siguiente manera:

- Erosión laminar o concentrada; socavación en la base de los acantilados y márgenes fluviales.
- Inclinación, caída libre, rebotes, rodamiento, fragmentación y propagación de bloques rocosos.
- Extensión lateral y separación horizontal de bloques de suelos y rocas

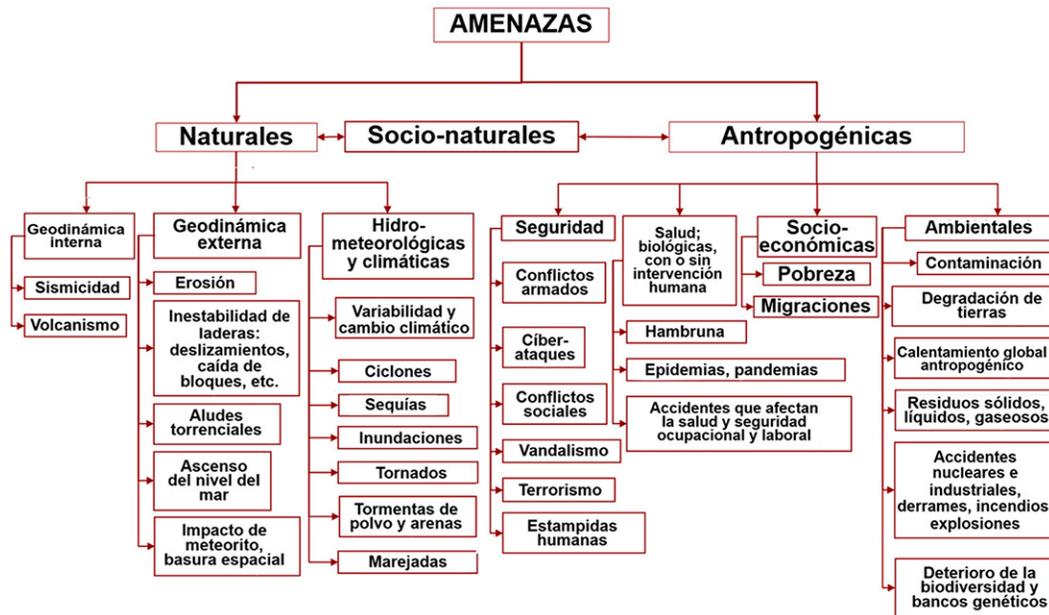


Fig. 1: Clasificación esquemática de las amenazas naturales y antropogénicas. Entre estas dos puede establecerse una categoría intermedia: las “socio-naturales”, definidas como aquellas originadas, inicialmente, por la naturaleza y luego exacerbadas por la actividad humana (modificado de Mora [2021]).

- Deslizamiento y desplazamiento, por traslación y/o rotación, sobre superficies planas, prismáticas, irregulares y curvas (usualmente cóncavas hacia arriba).
- Flujo y tránsito de detritos, aludes torrenciales y lahares, con proporciones variables de agua y materiales sólidos, granulometría y composición; avalanchas, cuando predominan el hielo y la nieve.
- Hundimiento y colapso, generalmente verticales o sub-verticales, causados por erosión interna de terrenos, en el techo de cavidades y tubificaciones, y que producen depresiones (dolinas) y sumideros.
- Represamiento de cauces fluviales causados por la desestabilización de laderas y sus efectos consecuentes (embalsamiento, inundación, alud torrencial).
- Inestabilidad de las laderas, cortes, taludes, apilamientos y rellenos construidos o influenciados por la actividad antropogénica.
- Depositación-sedimentación torrencial, derivada de la inestabilidad de laderas y del transporte de sus materiales respectivos.
- Casos complejos y compuestos, si se involucran o combinan dos o más de las formas anteriores.

En adelante, este artículo se referirá solamente a uno de estos procesos geodinámicos principales: los deslizamientos en suelos finos y en condición no drenada, con el desplazamiento consecuente de masas sobre superficies de ruptura planas, curvas o combinadas.

## Grado de exposición ante la amenaza de la inestabilidad de laderas

El concepto del grado de exposición, de los elementos antropogénicos ante la amenaza de la inestabilidad de laderas, se define como el componente de la vulnerabilidad que caracteriza su cercanía, o proximidad a la influencia de una ladera inestable con potencial de generar daños y pérdidas. Este concepto se combina con la potencialidad de los efectos, impactos y

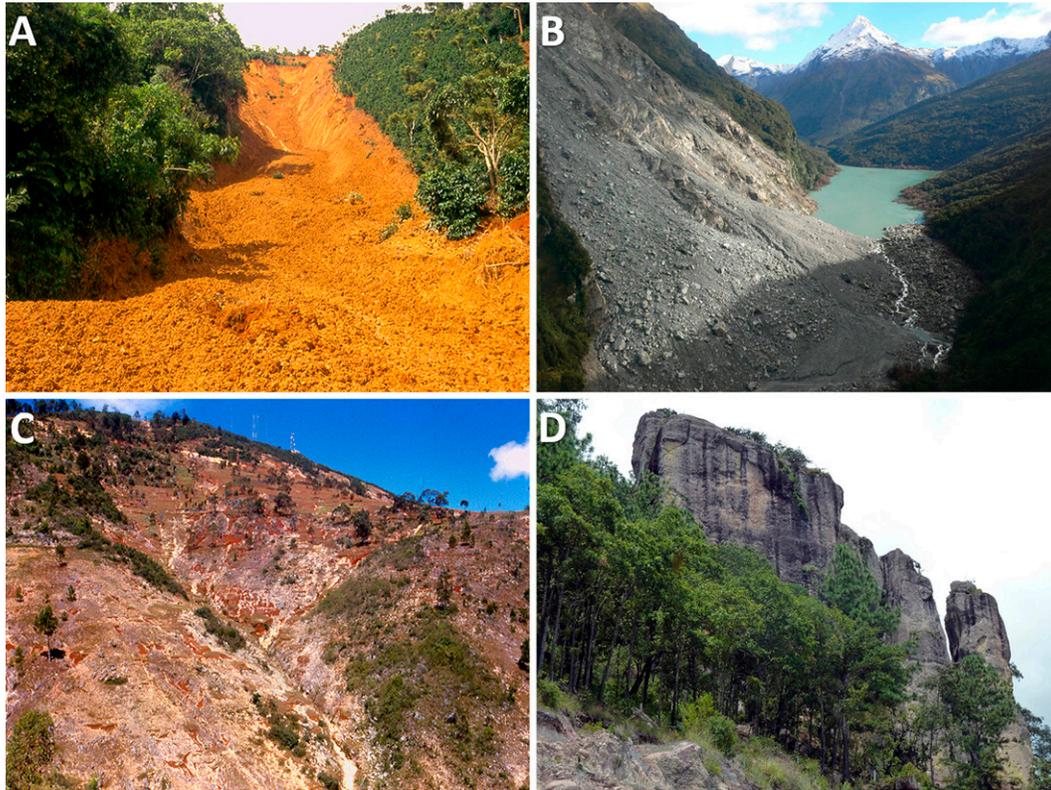


Fig. 2: A) Deslizamiento, alud y flujo en suelos residuales derivados de la meteorización in situ de areniscas y lutitas del Oligoceno-Mioceno, disparados, por las lluvias intensas asociadas con el huracán César, en setiembre de 1996; Llano La Piedra, Tarrazú, Costa Rica. B) Caída y fragmentación de bloques rocosos (gneiss y esquistos del Paleozoico) y represamiento consecuente del río North Young, Isla del Sur, Nueva Zelandia, mayo de 2008. C) Erosión intensa de suelos residuales derivados de la meteorización de calizas del Mioceno, Kenskoff, Haití; agosto de 1986. D) Basculación, caída, fragmentación y dispersión de columnas de ignimbrita del Mioceno-Plioceno; autopista México-Acapulco; setiembre de 2013.

consecuencias a la vida humana, su calidad, medios de subsistencia, infraestructura para la producción de bienes y servicios, y al ambiente y los recursos naturales que conforman su hábitat. Los extremos del grado de exposición se expresan en una escala desde cero, sin exposición, hasta cinco, en el caso de que los elementos se encuentren directamente dentro de una ladera inestable o potencialmente inestable y de acuerdo con la intensidad de la amenaza considerada, la cual varía, a su vez, entre cero y seis.

Para el análisis de la exposición a la inestabilidad de laderas se propone la correlación gráfica que aparece en la figura 5, con los rangos específicos y respectivos de la amenaza y para tres períodos de recurrencia distintos:  $Tr_x$ ,  $Tr_y$ ,  $Tr_z$ . Este podría ser el primer paso para estimar, en el futuro, la vulnerabilidad de los elementos expuestos y el riesgo derivado de la inestabilidad de laderas. Aunque esta es una tarea que se escapa de los objetivos de este artículo, es conveniente señalar que el análisis debe adaptarse a los escenarios específicos en cada tipo de contexto.



Fig. 3: A) Asentamientos humanos y cementerio expuestos a la inestabilidad de laderas; sedimentos continentales del Plioceno, Villa Salomé, La Paz, Bolivia, noviembre de 2009. B) Deslizamiento rotacional en un terreno compuesto por tobas, lavas y paleosuelos del Mioceno-Plioceno, disparado por el terremoto de Santa Rosa de Tilarán (Mw 7,2), Costa Rica; 1972. C) Decantación torrencial de sedimentos generados por procesos de erosión intensa e inestabilidad de laderas en el sistema montañoso de la Península del Sur; Léogâne, Haití; 20012. D) Ejemplo de la socavación marina, causada por la turbulencia del oleaje, al pie de un acantilado formado por areniscas y lutitas del Mioceno-Plioceno. La erosión ha formado cavernas utilizadas por los lobos marinos para su reposo y refugio; Puerto Madryn, Argentina; 2012.

## Calentamiento global antropogénico e inestabilidad de laderas

### Análisis de la influencia del calentamiento global antropogénico en las laderas inestables

Es prioritario comprender la influencia real y neta del calentamiento global antropogénico (CGA) sobre la amenaza de la inestabilidad de laderas (AIL) y cómo afectaría los intereses humanos en el futuro, así como las acciones necesarias para enfrentar los escenarios probables.

Para ello, se formulan varias preguntas iniciales, las cuales se intentará responder a lo largo de este artículo:

- ¿Existe una forma práctica de evaluar, desde el punto de vista geotécnico, la influencia de un escenario climático futuro en el ámbito local?
- Herramientas disponibles: ¿Son suficientes y precisas para evaluar los cambios del clima y su influencia sobre la inestabilidad de laderas y los factores de seguridad en condición metaestable?
- Procedimientos, escenarios (i.e. RCP) y métodos de reducción de escala (downscaling) y extrapolación: ¿Son suficientes para orientar la toma de decisiones en ingeniería y políticas públicas?
- ¿Qué quiere decir datos “suficientes” y “precisos” para evaluar escenarios geotécnicos futuros?

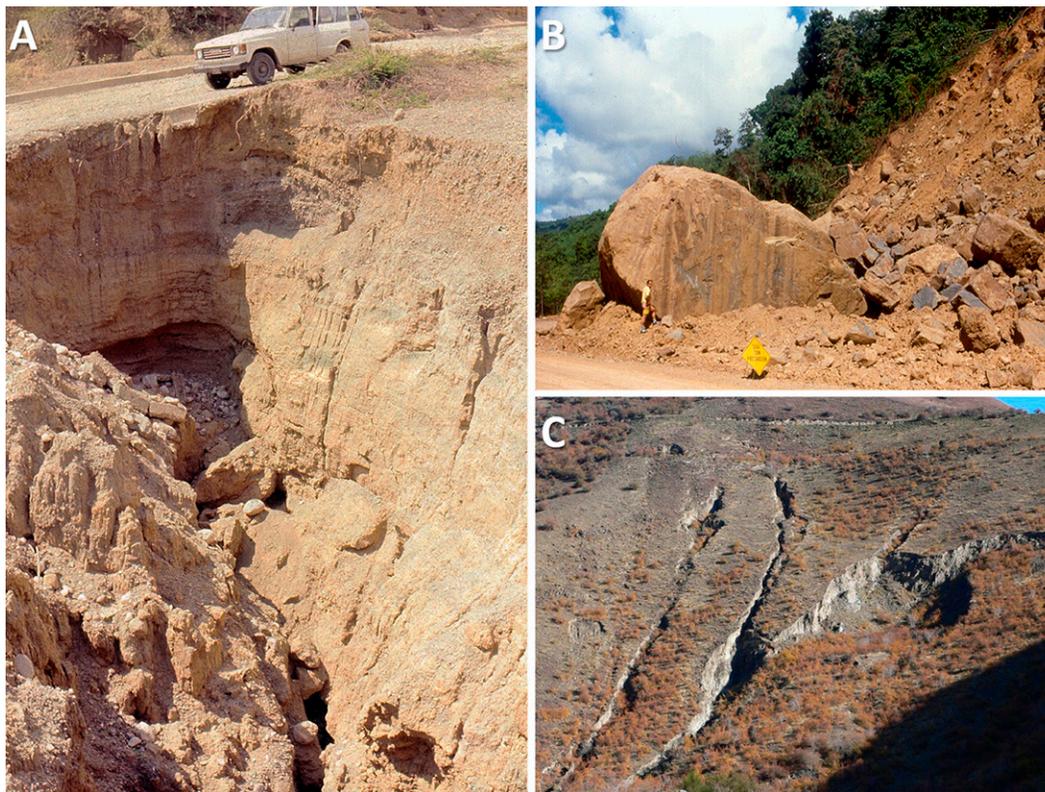


Fig. 4: A) Tubificación, sifonamiento y colapso de arenas, pobremente cementadas y compactadas; aluvión del río Artibonito, Bánica, República Dominicana; junio de 1987. B) Caída, fragmentación y dispersión de bloques de areniscas y lutitas turbidíticas del Oligoceno superior; Fila Costeña, Puntarenas, Costa Rica; setiembre de 1997. C) Erosión intensa, con la formación de cárcavas y surcos en sedimentos glaciáricos; Roxburgh-Dunstan, Isla del Sur, Nueva Zelanda; 2009.

No hay respuestas únicas ni simples para esas preguntas. Sin embargo, los principios de la gestión del riesgo permiten integrar y asistir *ex-ante* el análisis, decisiones y acciones que definen las medidas preventivas que convengan. El cambio climático (CC) y sus posibles escenarios futuros deben abordarse considerando sus posibles consecuencias, pero con la precaución de reconocer que la ciencia todavía no es capaz de descifrar todas las incógnitas que garanticen una práctica ingenieril completamente racional. Aunque las definiciones y resultados analíticos deben abordarse cuidadosamente y ser suficientemente conservadores, de acuerdo con el principio de precautorio, también deben combinarse con el realismo de las relaciones costo/beneficio, tasas de descuento, pérdidas anuales esperadas, pérdidas máximas probables y otras métricas económicas y financieras pertinentes.

## AIL, CGA y vulnerabilidad

Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2021), el clima y los patrones de lluvias extremas pueden variar en el futuro, a mediano y largo plazo, debido a la intensificación de los efectos e impactos de la variabilidad climática (VC) impulsados y reforzados por el calentamiento global antropogénico (CGA). Dado que en algunas regiones

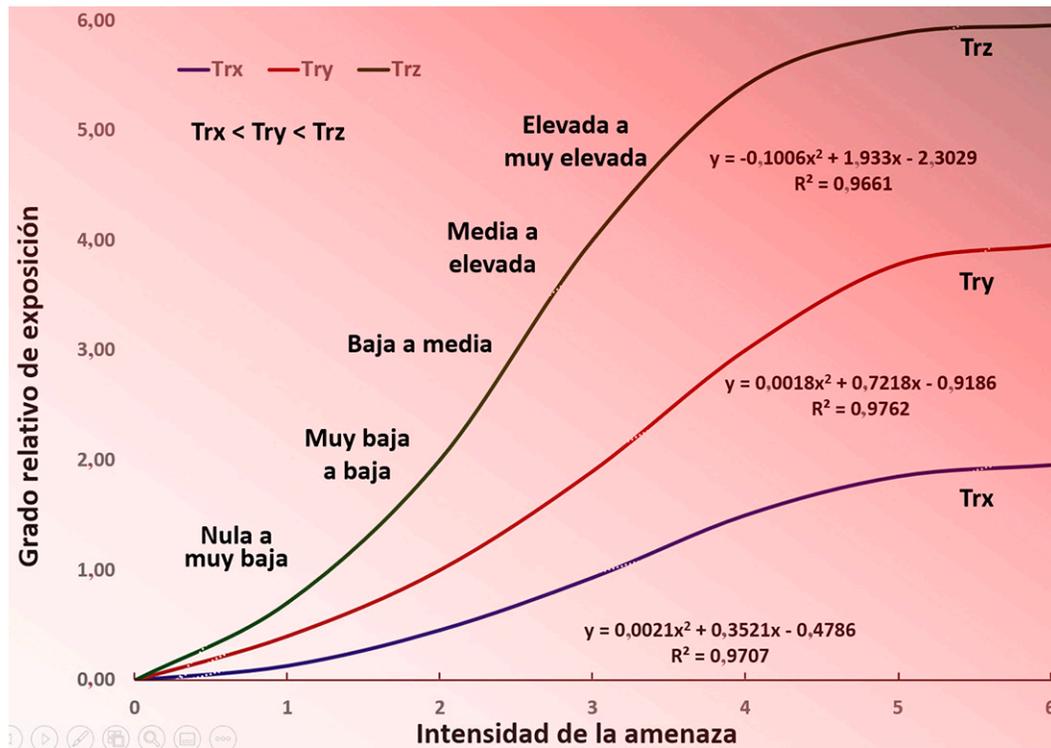


Fig. 5: Correlación gráfica de los rangos relativos del grado de exposición de los elementos humanos, como primer paso, para visualizar y analizar los daños y pérdidas posibles derivados de la intensidad de la amenaza de la inestabilidad de laderas. Tr = periodos de recurrencia.

las lluvias disminuirán, mientras que en otras aumentarán, es necesario establecer los parámetros e indicadores comparativos para medir su evolución en cada sitio bajo escrutinio: intensidad, duración, frecuencia y volumen (IDFV). Los efectos e impactos del CGA se superpondrán a los extremos de la VC y otros factores naturales y humanos amenazantes (e.g. terremotos, volcanes, uso inadecuado de la tierra, expansión desordenada de la infraestructura y espacio urbano, El Niño-La Niña/ENOS, degradación de tierras).

El potencial destructivo de la inestabilidad de laderas, ya entre las amenazas principales, se convertirá en un problema todavía mayor, en el caso de que aumenten las lluvias. Por ello, se hace necesario redefinir los enfoques y prioridades, políticas nacionales y procedimientos de los proyectos de inversión e infraestructura, para establecer las estrategias preventivas correspondientes según las condiciones y singularidades locales. Deberá tomarse en cuenta, para tal efecto, cómo evolucionarían los parámetros de la inestabilidad de laderas (i.e. resistencia al corte, propiedades intrínsecas, desencadenantes extrínsecos) a lo largo del horizonte temporal escogido.

Los paradigmas geotécnicos deberán adaptarse y evolucionar para enfrentar las condiciones potencialmente nuevas que, eventualmente, traería el CGA, particularmente cuando amenazan al bienestar humano. La gestión del riesgo (GdR), en particular la reducción de la vulnerabilidad, no deben verse eclipsadas por la inacción, mientras se comprende cómo enfrentar esta amenaza. La intervención de la vulnerabilidad, guiada por un enfoque que unifique la adaptación al calentamiento global antropogénico (ACGA) y a la GdR, en lugar de la duplicación actual de esfuerzos será, bajo cualquier circunstancia, el mejor instrumento estratégico para enfrentar la inestabilidad de laderas y cualquier otro tipo de amenaza.

## Los efectos potenciales del CCA y la ingeniería geológica para enfrentarlos

### *Geotecnia, GdR y CGA*

Para enfrentar los efectos posibles del CGA sobre la AIL se requiere, como primer paso, aclarar las diferencias entre el cambio climático, la variabilidad climática y el calentamiento global antropogénico (IPCC, 2021; Mora, 2021; Wilby, Mora, Abdallah y Ortiz, 2010):

- Cambio climático (CC): Evolución de las variables del clima en el largo (i.e. siglos/milenios) a muy largo plazo (i.e. millones, cientos de millones de años) y que depende de las variaciones en la intensidad de la radiación solar (i.e. ciclos de Milankovitch, erupciones plinianas, impacto de macro-meteoritos, tectónica de placas).
- Calentamiento global antropogénico (CGA): Alteraciones causadas por la actividad humana al equilibrio termodinámico de la atmósfera, las cuales comenzaron durante la Revolución Industrial (ca. siglo XVII) y se intensificaron en los últimos decenios. Se originan en las emisiones excesivas de gases, vapores y partículas a efectos de invernadero.
- Variabilidad climática (VC): Se manifiestan en el corto plazo (i.e. inter-estacionales, interanuales, decadales); obedecen a las variaciones de los procesos atmosféricos periódicos (e.g. El Niño-La Niña/Oscilación del Sur, posición de la Zona de Convergencia Intertropical, actividad ciclónica tropical, vórtex y frentes polares).

Bajo la realidad actual hay información seria que señala que el clima está cambiando (IPCC, 2021), pues la atmósfera y los océanos se calientan debido a que están siendo severamente contaminados. Esto, al cambiar los patrones pluviométricos, también puede tener efectos negativos sobre la estabilidad de las laderas, así como la pérdida de sus ecosistemas saludables y la cobertura forestal resistente. Ante las consecuencias de la AIL, influenciada por el CGA, la prioridad es la construcción de modelos probabilísticos sólidos que cuantifiquen el riesgo (Cardona, 1986; Cardona, Alcántara, Carreño, Mendes y Saito, 2020; Mora y Ghesquiere, 2010). Estos deben ser dinámicos en el espacio y tiempo y adaptarse a las escalas nacional, regional, municipal y de los proyectos de inversión (Saborío, Saborío y Mora, 2018). También debe fomentarse la difusión de información objetiva y clara, como una de las prioridades.

### *El riesgo: convolución entre la amenaza y la vulnerabilidad*

El riesgo se analiza mediante una función de excedencia de daños y pérdidas, estimada mediante la probabilidad del daño que podría generarse por la relación de convolución entre los factores que definen una amenaza y los elementos vulnerables y expuestos. Se describe mediante la función de excedencia de los daños y pérdidas EDP y se representa por medio de las variables aleatorias que establecen la relación entre la intensidad del evento y la probabilidad de que se produzcan daños y pérdidas en determinado sitio y tiempo. No es la multiplicación simple de algo llamado “amenaza” por algo llamado “vulnerabilidad”, como desafortunadamente ha sido desvirtuado su significado. Es algo mucho más complejo de calcular.

La función de excedencia de los daños y pérdidas  $EDP = v(p)$  es el número de eventos  $P$ , por unidad de tiempo, que producirá un valor igual o mayor de un nivel específico de pérdidas probables  $p$ . Su probabilidad anual, conocida como la tasa de excedencia, se puede calcular mediante el Teorema de la Probabilidad Total, como se indica en la ecuación siguiente (Cardona, Ordaz, Reinoso, Yamín y Barbat, 1986; Cardona et al., 2012; Marulanda, Carreño, Cardona, Ordaz y Barbat 2013; Salgado-Gálvez, Zuloaga, Bernal y Cardona, 2014):

$$R = EDP = v(p) = \sum_{i=1}^n Pr(P > p | \text{evento } i) \cdot fA(\text{evento } i)$$

... en donde el riesgo  $R = v(p)$  es la tasa de excedencia de los daños y las pérdidas  $p$  (EDP);  $fA(\text{evento } i)$  es la frecuencia anual del evento  $i$ , mientras que  $Pr(P > p | \text{evento } i)$  es la probabilidad de que la pérdida  $P$  sea mayor que  $p$ , en el  $i$ -ésimo evento;  $Tr$  es el período de recurrencia de la pérdida  $P$ , es decir, el inverso de su tasa de excedencia anual. La tasa de excedencia  $v(p)$  es, entonces, la sumatoria de las pérdidas en todos los elementos expuestos al conjunto de escenarios estocásticos de la amenaza considerada. Para el análisis de AIL debe especificarse su ubicación, geometría, volumen, celeridad de materialización,

velocidad y extensión de su desplazamiento, frecuencia de ocurrencia, y su prevalencia espacial y temporal, caracterizada por la relación  $\Pr(P > p \mid \text{Evento } i)$ . Entonces,  $v(p)$  representa la frecuencia anual con la que será excedido el valor de una pérdida específica y se representa mediante métricas adecuadas (e.g. pérdida anual esperada, PAE; pérdida máxima probable, PMP). Con ellas, puede estimarse la cantidad de recursos necesarios para dimensionar el alcance de los desafíos correspondientes de la gestión del riesgo.  $v(p)$  puede calcularse, ya sea para el caso del evento más intenso o para la suma de todos los eventos en un año u otro período especificado.

### *Riesgo e inestabilidad de laderas*

Para el caso específico de la amenaza de la inestabilidad de laderas, la función de excedencia de las pérdidas puede expresarse de la siguiente manera (figuras 6 y 7):

$$R = EDP = \sum_{v,e=1}^{v,E} fT_{a,v,e} \cdot \Pr\left(\frac{x,y,z}{A,V}\right) \cdot \left(\frac{S}{V}\right)_v \cdot \left(\frac{DP}{S}\right)_{v,e} \cdot F_{\varepsilon,e} \cdot DP_{\varepsilon}$$

... en donde:

$R = \text{Riesgo} = EDP = \text{Función de excedencia de daños y pérdidas, contabilizadas durante determinado período, un número de veces } N$ , en una localidad específica en donde la masa desprendida de la ladera, de volumen  $v$ , puede causar daños y pérdidas a los elementos expuestos  $\varepsilon$ , localizados a distancias  $s$  del origen y área de desplazamiento de la masa.

$fT_{a,v,e}$  = Frecuencia temporal (o recurrencia; i.e. 1, 5, 10, 50 años...) de los eventos de inestabilidad de laderas, en esa localidad, con área  $a$  y volumen  $v$ , de cada evento  $e$ .

$\Pr(x,y,z/A,V)$  = Probabilidad de extensión espacial de la inestabilidad  $(x,y,z)$ , de área  $A$  en la corona y los alrededores del terreno inestable (e.g. grietas, deslizamiento progresivo de masas del terreno, etc.) y que alcance un volumen  $V$ .

$\Pr(S/V)_v$  = Probabilidad de que un volumen  $V$  de la masa  $v$ , desplazado ladera-abajo, alcance la distancia  $S$  en donde se encuentra un elemento expuesto  $\varepsilon$ .

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

$F_{\varepsilon,e}$  = Fragilidad de los elementos expuestos  $\varepsilon$  a los daños y pérdidas ante el área  $a$ , volumen  $v$  y distancia  $s$  con la que se manifiesta la inestabilidad de la ladera durante cada evento  $e$ .

$DP_{\varepsilon}$  = Valor de los elementos expuestos  $\varepsilon$  a los daños y pérdidas.

### *Evolución de la influencia del CGA sobre el riesgo a lo largo de un horizonte temporal*

El paso siguiente consiste en el establecimiento de los escenarios que describen la evolución del riesgo a lo largo de un horizonte temporal específico. Para ello se requiere evaluar la incidencia del CGA, tanto sobre AIL como de la vulnerabilidad asociada. Dado que se supone que el riesgo debe cambiar a lo largo de la ventana temporal analizada, es necesario considerar y cuantificar sus valores futuros esperados y probables, por ejemplo, mediante la relación siguiente (Mora, 2021):

$$\partial R / \partial a, d, t = \partial A / \partial a, t * \partial V / \partial d, t$$

Esta es una de las formas para representar el cambio (“delta”) del riesgo producido por la convolución entre el “delta amenaza” y el “delta vulnerabilidad”, en donde el riesgo  $R = FEP = EDP = v(p)$ ,  $A$  es la amenaza de la inestabilidad de laderas,  $\partial a$  es el cambio de  $A$ , a través del horizonte temporal  $\partial t$ ;  $V$  es la vulnerabilidad y  $\partial d$  es el cambio del potencial de daños y pérdidas durante el mismo lapso  $\partial t$ .

En la figura 8, se muestra la composición y evolución del riesgo según las variables aleatorias que caracterizan la amenaza y la vulnerabilidad, con respecto al tiempo y bajo la incidencia del CGA. Este modelo se basa en el supuesto de que, al

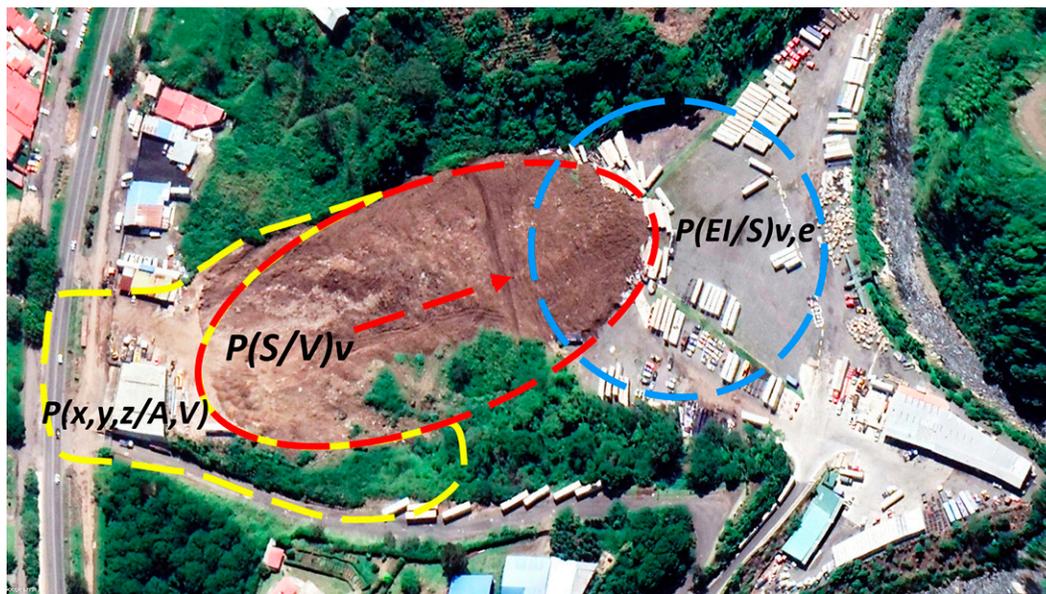


Fig. 6: Esquema ilustrativo que indica la forma de representar los componentes del riesgo en el caso específico de la amenaza de la inestabilidad de laderas. La imagen satelital corresponde con la localidad de Santo Domingo, Heredia, Costa Rica; Google Earth, 2 de julio de 2018.

cabo de un horizonte temporal predefinido, la intensidad de la amenaza, con un período de recurrencia  $T_r$ , constante, aumentaría ( $\partial A$ ) paulatinamente. La vulnerabilidad también aumentaría simultánea y gradualmente ( $\partial V$ ), junto con la exposición y fragilidad de la población, sus elementos socioeconómicos y demográficos ( $\partial V_v$ ). El CGA induciría su influencia adicional sobre la vulnerabilidad a través del tiempo ( $\partial V_{vga}$ ) debido a la pérdida eventual de resiliencia de la comunidad, causada por factores desatendidos del riesgo.

Según el caso y si todos los demás factores (geotécnicos, geodinámicos, vulnerabilidad) se mantuviesen constantes, el CGA podría influenciar (o no) el riesgo derivado de la AIL al menos de tres maneras:

- i Reducción del potencial de excedencia de las pérdidas durante el período considerado, dado el cambio (delta) de los parámetros multidimensionales de las amenazas y de la vulnerabilidad
- ii Igualdad, en el caso de que no haya cambios significativos en los parámetros del riesgo
- iii Incremento del potencial de excedencia de las pérdidas durante el período considerado, según el cambio (delta) de los parámetros multidimensionales de las amenazas y la vulnerabilidad.

Según las tendencias actuales, las pérdidas y daños serían causados, principalmente, por la vulnerabilidad ante la VC, más que por el impacto del CGA. La vulnerabilidad seguirá incrementándose si se toma en cuenta que la GdR todavía no es prioridad en muchos países. Tal y como se representa en la figura 8, la vulnerabilidad aumenta debido al crecimiento demográfico, exposición y fragilidad de la población y sus elementos socioeconómicos, infraestructurales y ambientales. Cuando la incidencia del CGA induce un aumento en la evolución de AIL a través del tiempo y a la vez una pérdida de la resiliencia en las comunidades y países, causada por los factores preventivos desatendidos, el riesgo también se incrementará (Mora, 2021).



Fig. 7: En el mismo caso de la figura 6, esta fotografía fue tomada desde Los Sitios de Moravia el 16 de setiembre de 2018.  $P(x,y,z/A,V)$  representa la probabilidad de extensión espacial de la inestabilidad  $(x,y,z)$ , su área  $A$  y volumen  $V$  en la corona del terreno.  $P(S/V)v$  es la probabilidad de que un volumen  $V$  de la masa  $v$ , desplazado ladera-abajo, alcance la distancia  $s$  en donde se encuentran los elementos expuestos  $\epsilon$ .  $P(DP/S)v,\epsilon$  son los elementos expuestos a los daños y pérdidas y  $\epsilon$  es la probabilidad de que un elemento expuesto sea afectado (daño-pérdida, DP) por la ruptura del terreno en la corona y/o por la masa en desplazamiento  $v$ , a una distancia  $s$ .

## Evaluaciones y escenarios

### Análisis espacial de los factores que influyen en la AIL

Una forma para enfocar los procesos de toma de decisiones consiste en la incorporación de los posibles efectos e impactos del CGA en la planificación territorial (Fig. 9). La evaluación debe incluir las variables geológicas, geotécnicas, hidrológicas e hidrogeológicas, así como de la geodinámica externa e interna, el uso de la tierra y las circunstancias antropogénicas relevantes, entre ellas el uso de la tierra. Enseguida deben involucrarse los aspectos asociados a la manera cómo el CGA aumentaría (e.g. mayor intensidad, duración y frecuencia de las lluvias; IDF), o eventualmente disminuiría (e.g. menor IDF) su influencia sobre la variabilidad climática y las amenazas hidrometeorológicas. Para ello, se debe definir una línea base, con indicadores y métricas apropiadas, para dar seguimiento a las tendencias, el alcance y limitaciones de los resultados de los escenarios futuros. La extrapolación de las tendencias actuales permitirá la interpretación rigurosa y sistemática de los parámetros que describen los cambios futuros y posibles de las condiciones del clima. De esta manera, podrán aplicarse *ex-ante* las medidas para la GdR, predefinidas y adaptadas para enfrentar los escenarios del CGA en los horizontes temporales esperados. Cualquier resultado derivado de los factores analizados, debe ajustarse a las condiciones y situaciones ambientales, características del territorio y uso óptimo de la tierra. Se deberá hacer hincapié en evitar los conflictos de uso y fomentar los programas de recuperación de las tierras degradadas.

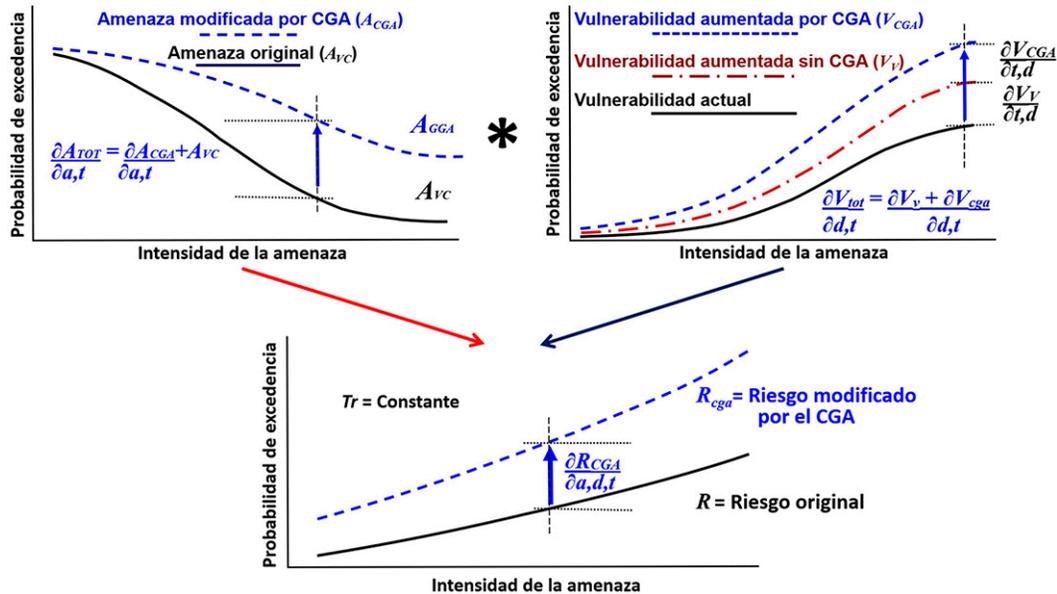


Fig. 8: Composición y evolución del riesgo (amenaza, vulnerabilidad), bajo la incidencia del CGA. Al cabo de un horizonte temporal predefinido la intensidad de la amenaza, con período de recurrencia  $Tr = \text{constante}$ , aumentaría ( $\partial A$ ) paulatinamente. La vulnerabilidad también aumentaría ( $\partial V$ ) junto con la exposición y fragilidad de la población, sus elementos socioeconómicos y demográficos ( $\partial V_v$ ). El CGA induciría su influencia adicional sobre la vulnerabilidad a través del tiempo ( $\partial V_{CGA}$ ) por la pérdida eventual de resiliencia de la comunidad, causada por factores desatendidos del riesgo (Modificado de Mora, 2021).

## Influencia del CGA sobre la inestabilidad de laderas

Uno de los retos más complejos de la GdR es el análisis de las características de la VC y de las variables naturales de los eventos extremos y la forma cómo influyen en la AIL. Determinar la influencia del CGA sobre los impulsores naturales del clima y cómo podrían intensificar los extremos de la VC, a lo largo de los horizontes temporales bajo consideración, es el desafío mayor (Fig. 10).

Dado que los datos robustos y confiables son escasos en los países en desarrollo, los cálculos, evaluaciones, diagnóstico y diseño ingenieril requieren la aplicación del criterio científico y profesional para optimizar los proyectos e inversiones y que no sean retrasados ni afectados.

Mediante los modelos globales de reducción de escala (*downscaling*) e incorporando la mayor cantidad de datos e información local disponible, los escenarios más adecuados se fundamentan en las probabilidades condicionadas y su evolución a través de los horizontes temporales predefinidos, por ejemplo 30, 50, 100 años.

En las regiones en donde se reduciría la incidencia de los factores hidrometeorológicos desencadenantes (i.e. menos lluvia, balances hídricos disminuidos, sequía) y por lo tanto habría menor AIL, se deberían identificar, delinear y valorar los impactos positivos posibles. Si por otro lado aumentan las amenazas y la vulnerabilidad, será necesario estimar los efectos e impactos negativos agregados para evaluar cómo aumentaría el riesgo en consecuencia.

La política para la GdR, incluida la adaptación ante el CGA, deben considerar todos los escenarios probables para orientar las acciones requeridas (Fig. 10). Los procedimientos para analizar y evaluar la vulnerabilidad no es el enfoque de este artículo, pero se puede mencionar que existen varias plataformas especializadas para realizar este tipo de tareas (Bernal y Cardona, 2018; Mora y Ghesquiere, 2010).

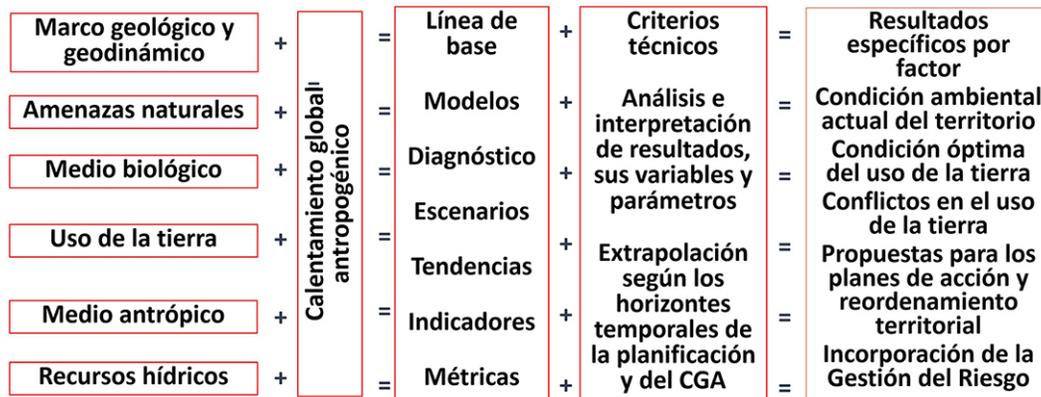


Fig. 9: Factores para tomar en cuenta al diagnosticar las condiciones del territorio y para preparar el enfoque de los escenarios futuros de los posibles efectos e impactos del CGA, orientar las acciones para la planificación del uso de la tierra, la gestión del riesgo y así abordar el caso de la AIL (Mora, 2021).

## Análisis prospectivo para evaluar el riesgo derivado de la AIL, influenciada por el CGA

El análisis prospectivo para evaluar el riesgo derivado de AIL, bajo el impulso del CGA, debe comenzar por estudiar la evolución de la VC (intensidad, duración, frecuencia y volumen de las lluvias; IDFV) y su distribución espacial a lo largo de horizontes temporales predefinidos (Fig. 11).

La evolución de AIL y la vulnerabilidad, es decir del riesgo influenciado por el CGA, puede abordarse considerando el cambio en las tendencias climáticas en el plazo escogido y la modificación del balance hídrico local. La consecuencia respectiva será la presencia, mayor o menor, de la lluvia “que se infiltra”.

La evolución del nivel freático es pues un factor clave para comprender cómo podrían comportarse las laderas en el futuro. Los escenarios deben, por lo tanto, establecer la situación original actual y luego extrapolarla hacia los cambios posibles del factor de seguridad (FS) en cada sitio.

En laderas, acantilados y otras áreas costeras circundantes, se puede agregar que el ascenso global del nivel del mar, de varios milímetros por año, conduciría probablemente a la inmersión, erosión e incremento de AIL (Fig. 11).

Con base en estos supuestos, se pueden concebir tres escenarios de exposición plausibles:

A. Menores proporciones multidimensionales de la relación IDFV de las precipitaciones, descenso de los niveles freáticos y caudales de los ríos. Se reducirían así AIL y la tasa de erosión en laderas, acantilados, cortes y rellenos en carreteras; también habría menos aludes y sedimentación torrencial.

B. Mayores proporciones multidimensionales en la relación IDFV de las precipitaciones, con el consiguiente ascenso paulatino de los niveles freáticos y caudales de los ríos y sus turbulencias respectivas, por lo que se esperaría un aumento de la erosión e inestabilidad en las laderas, cortes de carreteras, rellenos y socavamiento en acantilados, aludes y sedimentación torrencial.

C. Ascenso del nivel del mar, con la consiguiente inmersión de costas en litorales, humedales y lagos; ampliación del efecto de las mareas, marejadas y tsunamis. También podría haber humedad adicional disponible y, por lo tanto, mayor inestabilidad de laderas en sus entornos.

Los escenarios B y C podrían suceder concurrentemente o no, con o sin la combinación de sus efectos a lo largo de las laderas cercanas. Su factor común es que la resistencia al corte de los materiales constituyentes se reduciría proporcionalmente al incremento de la presión intersticial en poros, fisuras y otras discontinuidades.

A y C también pueden suceder simultáneamente, pero en este caso el factor predominante sería C, es decir, el impulso de los efectos de una transgresión marina sobre las áreas costeras (Fig. 11).

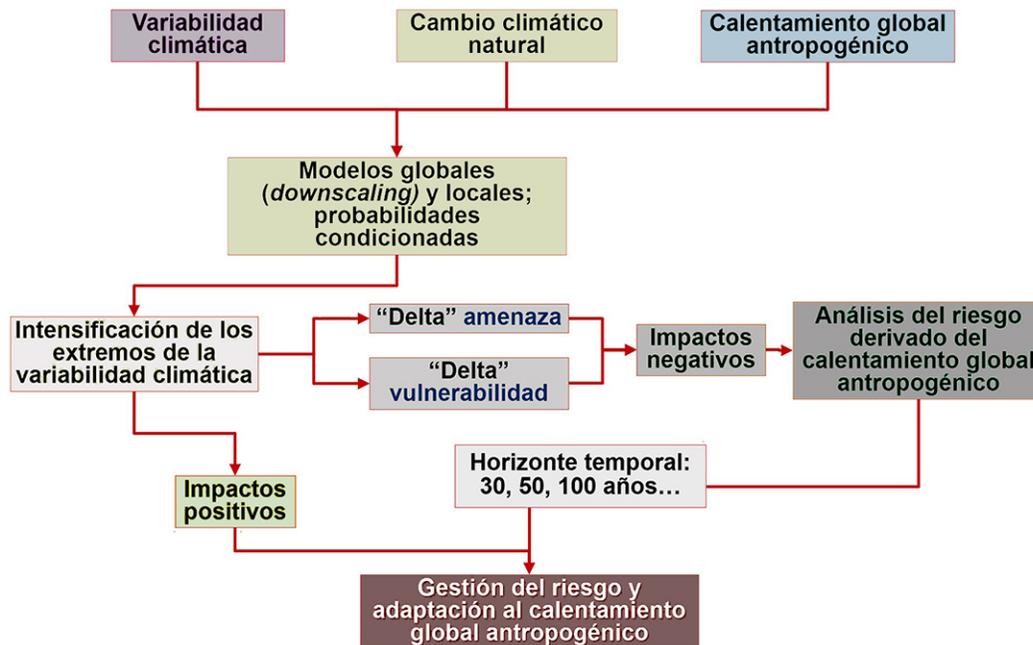


Fig. 10: Factores para la gestión del riesgo, variables y pasos a considerar al evaluar la evolución de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas cuando están influenciados por la variabilidad climática, el cambio climático natural y el calentamiento global antropogénico (Mora, 2021).

## Evolución de la presión intersticial bajo la influencia del CGA

Ante el escenario de un aumento de la IDJV derivado del CGA y que conduzca al ascenso paulatino del nivel freático, el análisis deberá comenzar por dilucidar el estado actual de los esfuerzos *in situ*.

Como se muestra en la figura 12, el nivel freático original es  $h_0$ , el cual transmite una presión intersticial inicial  $\mu_0$ , con la cual el factor de seguridad  $FS > 1,0$  y refleja una situación estable.

Este es el escenario simplificado de una ladera formada por un suelo cohesivo (arcilloso, limoso) homogéneo y en condición no drenada. Se supone que los grados de saturación variarán proporcionalmente en las zonas bajo la influencia de los cambios en la altura del nivel freático. La saturación progresiva se transfiere, directamente, hacia la presión intersticial y a la superficie de ruptura. Las presiones ejercidas por el flujo hidrodinámico no se toman en cuenta y se supone que la forma, configuración y posición de la superficie de ruptura y la resistencia al corte del material, no cambian a lo largo del tiempo. A partir de las condiciones iniciales, una tormenta intensa podría producir suficiente infiltración para aumentar las masas saturadas y, en consecuencia, elevar el nivel freático hasta una altura crítica  $h_{crit}$  sobre la superficie potencial de ruptura. La presión intersticial también aumentaría proporcionalmente hasta un valor crítico  $\mu_{crit}$ , lo que implicaría la modificación del equilibrio estable entre la resistencia al corte  $\tau R$  y el esfuerzo cortante  $\tau E$ .

Eventualmente se induciría la reducción del factor de seguridad hasta  $FS \leq 1,0$  (condición inestable, crítica) a lo largo de la superficie potencial de ruptura, como se muestra en la figura 12. Si el escenario del aumento progresivo de la disponibilidad hídrica se verifica en el futuro, bajo la influencia del CGA y por consecuencia ascienden los niveles de saturación y cantidad de agua en los acuíferos, el nivel inicial del nivel freático ya no estaría en  $h_0$ , sino en alturas cada vez mayores  $h_{cga}$ . Esto induciría una presión intersticial también incremental  $\mu_{cga}$  sobre la superficie potencial de ruptura. La condición estable futura y su correspondiente presión intersticial  $\mu_{cga}$  serían progresivamente más elevadas y requeriría una lluvia relativamente cada vez menor para alcanzar la altura crítica  $h_{crit}$  sobre la superficie potencial de ruptura; el valor crítico de la presión intersticial  $\mu_{crit}$  ( $FS \leq 1,0$ ) también se alcanzaría más rápidamente.

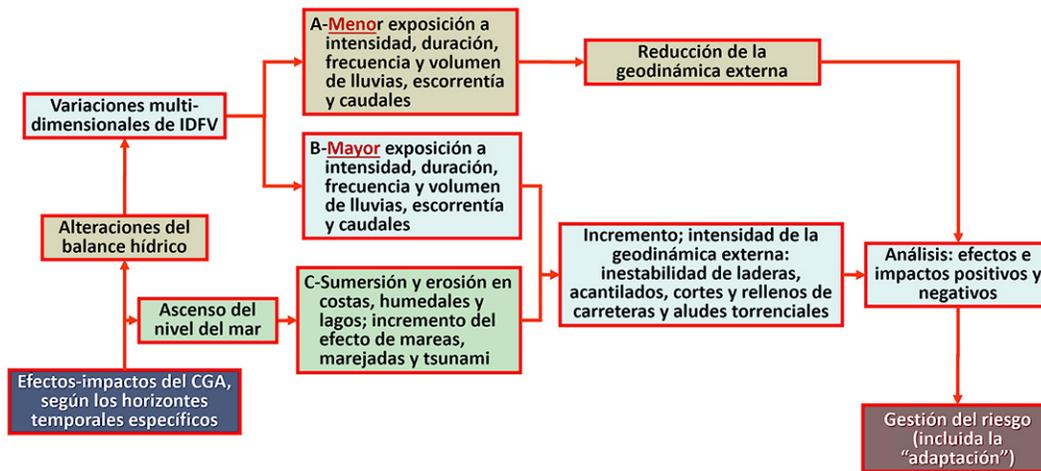


Fig. 11: Escenarios para la evaluación y descripción de la amenaza derivada de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas impulsadas por el CGA y cómo podrían influir sobre la variabilidad de la lluvia (IDFV), contenido de humedad del suelo y AIL según los horizontes temporales específicos (Mora, 2021).

Una vez definido el escenario asociado al CGA, el paso siguiente es asignarle una función IDFV nueva para modelar la influencia de la lluvia y la evolución de la presión intersticial  $\mu$  correspondiente. A partir de la condición inicial “en reposo” (Fig. 12):

$$\mu_0 = \gamma_w \cdot h_0$$

... en donde  $\mu_0$  es la presión intersticial inicial,  $h_0$  es la altura del nivel freático sobre la superficie potencial de ruptura y  $\gamma_w$  es el peso volumétrico del agua. Entonces, para un suelo de varias capas y en condición de ruptura ( $FS \leq 1,0$ ):

$$\mu_{crit} = R_\mu \cdot \sum_i h_i \cdot \gamma_i$$

... lo cual representa la presión intersticial crítica, de acuerdo con las condiciones del nivel freático y la distribución de las lluvias (IDFV<sub>crit</sub>), para un período de recurrencia específico  $Tr_x$ . Dado que  $\mu_{crit}$  es la presión intersticial que conduce a la ruptura ( $FS \leq 1,0$ ),  $R_\mu$  es la sumatoria del coeficiente de presión intersticial, según la posición del nivel freático sobre la superficie potencial de ruptura, en todas las capas del terreno;  $h_i$  es el espesor y  $\gamma_i$  es el peso volumétrico saturado del suelo (Fig. 12).

## Evolución de la humedad, en el terreno, inducida por CGA: Influencia sobre el factor de seguridad

La evolución de la humedad que conduce hacia la transición desde la condición estable hacia la metaestable y eventualmente conducente a la ruptura dependerá, en primera instancia, del equilibrio límite en los estados de esfuerzos y deformaciones y del grado inicial y evolutivo de la saturación del terreno. Tomando en cuenta los escenarios descritos anteriormente, las condiciones locales de inestabilidad pueden evolucionar, progresivamente, desde una etapa inicial en donde la posición del nivel freático aumente a medida que el régimen y los patrones de lluvia (IDFV) también evolucionen bajo la influencia del CGA y a lo largo del tiempo. Esta situación puede conducir hacia la reducción progresiva y proporcional de la diferencia entre las presiones intersticiales iniciales y acercarse paulatinamente a la condición crítica de la ruptura. Entonces, la relación:

$$\Delta_{\mu_{crit}} = \mu_{crit} - \mu_0$$

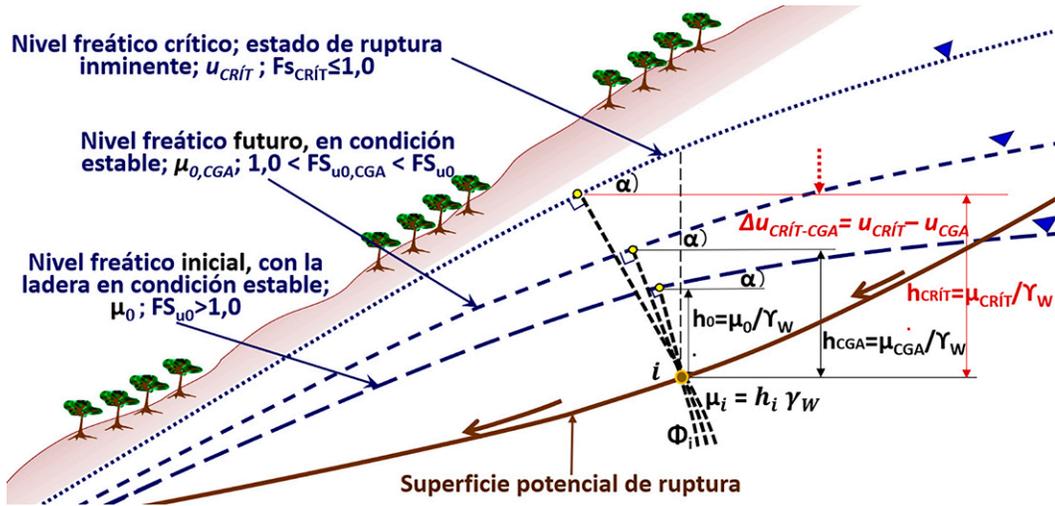


Fig. 12: Escenario simplificado de una ladera constituida por suelo cohesivo en condición no drenada. Ascenso progresivo del nivel freático influenciado por el CGA durante un plazo específico. La saturación del suelo se transferiría directamente a la presión intersticial en y sobre la superficie de ruptura. El nivel freático coincide con la línea superior del flujo hidrodinámico.  $\Phi_i$ : cualquier equipotencial que cruce la superficie de ruptura;  $\alpha$ : ángulo entre la línea de flujo y la equipotencial;  $h_w$ : altura del nivel freático desde la superficie potencial de ruptura;  $\gamma_w$ : peso unitario del agua; FS: factor de seguridad;  $h_0$ : altura del nivel freático original;  $\mu_0$ : presión intersticial generada por  $h_0$  ( $FS > 1,0$ );  $\mu_{CGA}$ : presión intersticial generada por el nivel freático influenciado por el CGA ( $FS > 1,0$ );  $\mu_{crit}$ : presión intersticial crítica ( $FS \leq 1,0$ ). Modificado de Salcedo y Rodríguez (Comunicación escrita, julio de 2021) y Mora (2021).

... traduce el cambio neto de la presión intersticial original entre el estado estable inicial ( $FS > 1,0$ ;  $\mu_0$ ) y el de ruptura ( $FS \leq 1,0$ ;  $\mu_{crit}$ ), según sus grados de saturación y posiciones respectivas del nivel freático sobre la superficie potencial de ruptura ( $NF_0, NF_{crit}$ ). A partir de esta situación:

$$\Delta\mu_{crit-cga} = \mu_{crit} - \mu_{cga}$$

... será el cambio neto de la presión intersticial, desde la condición estable, modificada por el CGA ( $FS > 1,0$ ;  $\mu_{cga}$ ) y la condición de ruptura ( $FS \leq 1,0$ ;  $\mu_{crit}$ ). En este caso se asume que no cambian los grados de saturación ni la configuración de los niveles freáticos ( $\mu_{cga}, \mu_{crit}$ ). Bajo estas condiciones se habrán establecido los escenarios de precipitación y períodos de recurrencia nuevos ( $IDFV_{cga}, Tr_{cga}$ ), por lo que:

$$\mu_{cga} = R\mu \cdot \sum_i [(h_{i/cga} \cdot \gamma_i)] \cdot \Delta t$$

... será la sumatoria de las presiones intersticiales en todas las capas del suelo ( $R$ ) sobre la superficie potencial de ruptura, según la modificación progresiva ( $\Delta t$ ) causada por el CGA ( $FS > 1,0$ ). Se trata de los escenarios en donde cambian la pluviosidad y su período de recurrencia ( $IDFV_{cga}, Tr_{cga}$ ). Entonces:

$$\Delta\mu_{cga-0} = \Delta(h_{i/cga-0} \cdot \gamma_i) \cdot \Delta t$$

... representará el cambio progresivo de la presión intersticial bajo la influencia del CGA después de transcurrido el horizonte temporal escogido, en cuyo caso  $\mu_{cga} > \mu_0$  y así,  $\Delta h_{i/cga-0}$  será la altura adicional añadida progresivamente al nivel freático inicial y bajo la influencia del CGA. Entonces y bajo estas condiciones cambiantes, se requeriría un evento pluviométrico cada vez "más pequeño" para que el nivel freático ascienda hasta la altura de referencia  $h_{crit}$  sobre la superficie potencial de ruptura, para inducir el estado crítico de presión intersticial  $\mu_{crit}$  que induzca la inestabilidad de la ladera ( $FS \leq 1,0$ ).

El período de recurrencia ( $Tr_x$ ), asociado a la precipitación crítica específica ( $IDFV_x$ ) que genera  $\mu_{crit}$ , se reduciría ( $Tr_{cga}$ ) como consecuencia de la influencia del CGA después del horizonte temporal transcurrido. Por lo tanto, la precipitación requerida

para alcanzar la inestabilidad sería cada vez menor (i.e.  $IDFV_x < IDFV_{cga}$ ), es decir  $Tr_x > Tr_{cga}$ , lo que implica que  $\mu_0 < \mu_{cga}$ . La evolución de la influencia de la presión intersticial  $\mu$  y cómo afecta al factor de seguridad (FS) podría abordarse de acuerdo con el criterio del equilibrio límite de Mohr-Coulomb, en el cual la resistencia al corte se define por:

$$\tau_R = c' + (\sigma_n - \mu_0) \cdot \tan\phi'$$

De producirse una elevación mayor del nivel freático sobre la superficie potencial de ruptura, causada por un aumento de la lluvia futura y bajo la influencia del CGA, la presión intersticial crítica  $\mu_{crit}$  se alcanzaría más rápidamente. Este escenario debería corresponder con los  $IDFV_{cga}$  y  $Tr_{cga}$  respectivos, después de un determinado horizonte temporal  $\Delta t_{cga}$ . Por lo tanto, AIL podría materializarse más rápida y extensamente debido a la reducción progresiva de la resistencia al corte en el terreno:

$$\tau_{Rega} = c' + (\sigma_n - \mu_{cga}) \cdot \tan\phi' ; \text{ para } \mu_{cga} > \mu_0$$

Bajo estas circunstancias, el esfuerzo cortante crítico de movilización y que conduce hacia la ruptura, podría evolucionar según:

$$\tau_{Ecrit} = \tau_R / FS = (1/FS) \cdot [c' + \sigma_n - \mu_{crit-cga}] \cdot \tan\phi'$$

Para simplificar el razonamiento, se supone que la evolución del FS es lineal, pues se derivada del incremento de la presión intersticial, dependiente a su vez del incremento de las lluvias inducidas por el CGA. Además, se supone que los parámetros geomecánicos básicos de los suelos cohesivos, en condición no drenada, permanecerán constantes a lo largo del horizonte temporal establecido. Esta simplificación permite estimar la probabilidad de ruptura, por ejemplo, en el caso de suelos residuales. Un escenario así es difícil de predecir debido a las incertidumbres involucradas en la evolución de las propiedades geomecánicas del terreno y del clima a través del tiempo. Evidentemente, será necesaria la elaboración de modelos para otras condiciones geomecánicas, estratigráficas, hidrogeológicas y geométricas.

## Evaluación de AIL en áreas con datos insuficientes

### Información hidrometeorológica y climática

En la mayoría de los países en desarrollo es común realizar estudios con datos e información escasos y poco confiables. Esto induce, por supuesto, un mayor grado de incertidumbre epistémica, pues la búsqueda y aplicación de los datos se convierten en un enigma. La opción es la aplicación transitoria de métodos determinísticos y heurísticos simplificados, con indicadores *proxy* (indirectos) y grandes cantidades de juicio ingenieril, sentido común y experiencia. El desafío se vuelve aún más intenso cuando se intenta realizar un pronóstico con escenarios futuros influenciados por el CGA (Cardona et al., 2020). Al menos se sabe que tomando en cuenta las tendencias actuales (Wilby, Mora, Abdallah y Ortiz 2010) y bajo parámetros IDF (intensidad, duración, recurrencia) constantes, los factores que controlan el CGA pueden inducir la reducción del período de recurrencia e intensificar los extremos de la VC.

La figura 13 ilustra, esquemáticamente, el cambio (“delta”) de la intensidad, duración y recurrencia de las lluvias, impulsado por la influencia del CGA.

De acuerdo con Saborío et al., (2018), es probable que el incremento de IDF pueda ser del orden del 5 al 10% con respecto a las condiciones actuales, a lo largo de horizontes temporales de 30 y 50 años, respectivamente. Si se adoptan estos incrementos relativos se puede simular el efecto del CGA, al menos hasta que haya datos más adecuados, precisos y confiables para que el análisis probabilístico sea robusto.

Entonces, es admisible incrementar los valores de las funciones IDF, según un período de recurrencia determinado ( $Tr_{cga}$ ), para esquematizar la influencia del CGA.

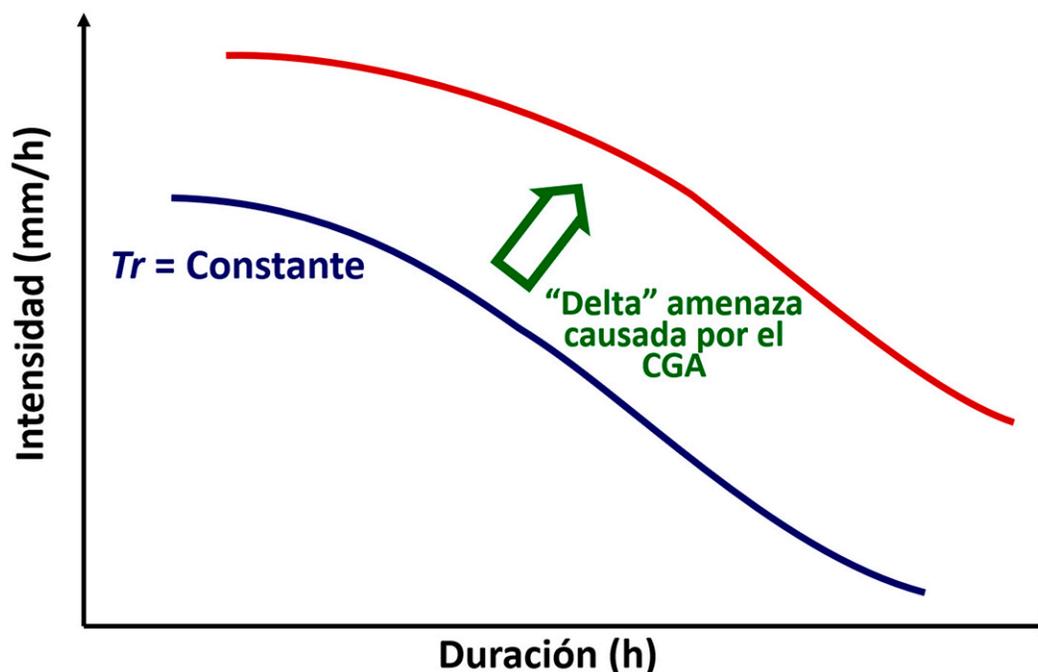


Fig. 13: Hipótesis de la influencia del CGA sobre la intensidad, duración y reducción del período de recurrencia  $Tr$  (IDF) de las lluvias “críticas”; “delta amenaza” (modificado de Saborío et al. [2018]).

Entonces, la figura 14 se muestra la relación de la intensidad y duración de las lluvias registradas en el pluviómetro de Puntarenas, Costa Rica. Para los fines del análisis, las lluvias con  $Tr = 50$  años se incrementaron 5% y 10% para simular el efecto del CGA en los horizontes temporales respectivos a 30 y 50 años (Saborío et al., 2018).

## Distribución espaciotemporal de la amenaza de la inestabilidad de laderas

En el ámbito regional se puede representar AIL mediante procedimientos heurísticos de macrozonificación. Para los propósitos de este análisis se eligió el método Mora-Vahrson (Mora y Vahrson, 1994; Saborío et al., 2015).

Un ejemplo de la aplicación de este procedimiento se aprecia en la figura 15 sobre un mapa a escala 1: 50.000 y mediante el modelo numérico de elevación con un píxel de 12 m, disponible en la Municipalidad de Esparza, provincia de Puntarenas, Costa Rica (Saborío et al., 2018). También hay disponible un inventario limitado de deslizamientos, el cual se comparó con estos resultados. La cartografía geológica también está disponible a escala 1: 50.000.

Dado que no existe un pluviómetro dentro del área, la curva IDF de la lluvia ( $Tr = 50$  años) utilizada se obtuvo a partir de la estación del puerto de Puntarenas, unos 15 km al oeste del centroide del área analizada (Fig. 14).

### *Escenarios de la AIL bajo influencia del CGA*

En la figura 16 se observa el resultado de la aplicación de las extrapolaciones que incorporan un aumento del 10%, en la función multidimensional IDF ( $Tr_{\text{cga}} = 50$  años) sobre el resultado de la figura 14 (Saborío et al., 2018). La intención fue simular el aumento de los factores  $Sh$  y  $Dp$  del método Mora-Vahrson luego de un plazo de 50 años de horizonte temporal.

Los resultados indican que si el CGA produce más lluvias en un área específica, la AIL aumentará en intensidad y extensión espacial: más zonas con amenaza moderada a muy elevada; menos zonas con amenaza baja a muy baja.

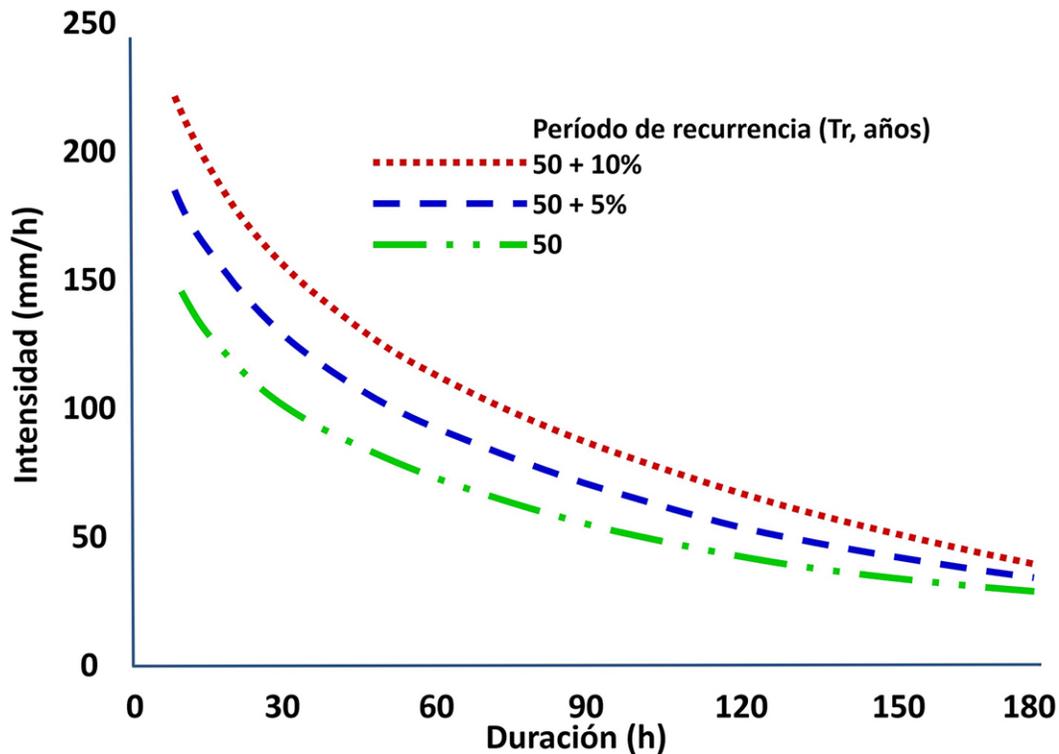


Fig. 14: Incremento del 5% y 10% en los factores multidimensionales de intensidad y duración para simular la influencia creciente del CGA en el patrón de lluvias, Puntarenas, Costa Rica. Período de recurrencia constante:  $Tr=50$  años (Saborío et al; 2018).

Es evidente que la inestabilidad de laderas aumentaría significativamente en acantilados, laderas pronunciadas y terrenos con materiales de baja resistencia. El mapa también muestra que, si se verifica la hipótesis de una amenaza incrementada y si la vulnerabilidad mantiene su crecimiento al ritmo constante actual, el riesgo también aumentará.

Se puede agregar la advertencia de que la utilidad de estos mapas (e.g. GdR, ordenamiento territorial) depende de la precisión y calidad de los datos utilizados en el análisis. Los casos se construyeron con datos mensuales de lluvia y temperatura disponibles (promedios, máximos, mínimos) (Fig. 16).

Los escenarios RCP 2.6 y 8.5 (IPCC, 2021), a 50 años, ofrecen correlaciones entre las condiciones optimista y pesimista de emisiones de gases, vapores y partículas a efecto de invernadero, pero deben calibrarse *in situ*. Los factores  $Sh$  y  $Dp$  del método Mora-Vahrson adquirirían, de esta manera, certidumbre adicional. Debe tomarse en cuenta que, debido a la escala, la resolución y precisión de estos mapas hace que su utilidad sea cuestionable, más allá de los fines ilustrativos y comunicación social, en la planificación del uso de la tierra y gestión del riesgo. Los planes de acción, procesos de toma de decisiones e investigación en sitios y proyectos, deberán apoyarse en instrumentos de mayor resolución (Cardona et al., 2020).

## Adaptación al CGA en la gestión del riesgo: Enfrentar la inestabilidad de laderas

La GdR, incluida la adaptación al cambio climático (un mejor término debería ser “adaptación al CGA”), para enfrentar la AIL en el caso de que se incremente en el futuro, debe comenzar por definir el horizonte temporal del caso (e.g. 30, 50, 100 años). El diagrama de flujo de la figura 17 muestra algunos de los criterios que deben ser tomados en cuenta para tal fin. Los escenarios y modelos hidrometeorológicos deben postular, establecer y aclarar las tendencias hacia las condiciones futuras impulsadas por el CGA. Deberá considerarse si su evolución conduce hacia climas más secos o húmedos que los actuales

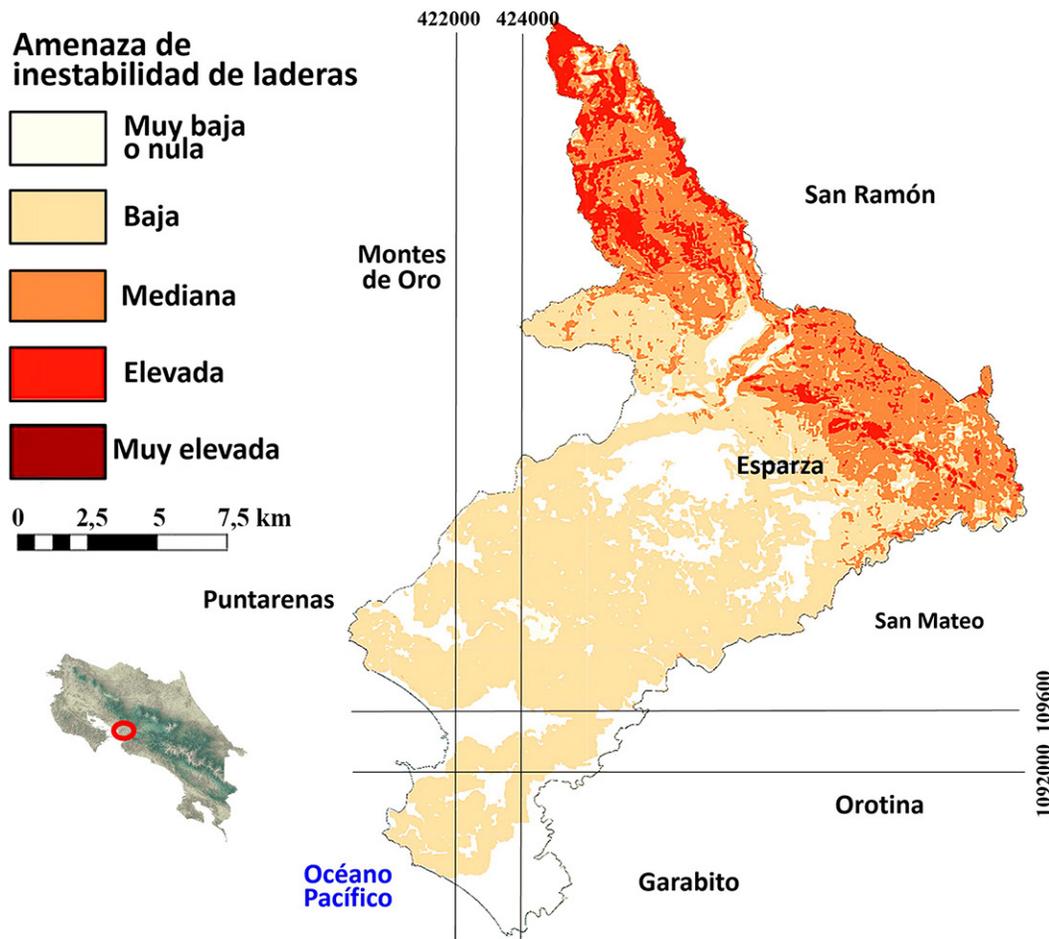


Fig. 15: Amenaza de la inestabilidad de laderas (método Mora-Vahrson, 1994) en el Cantón de Esparza, Puntarenas, Costa Rica (Saborío et al. [2018]). Aplicación del método Mora-Vahrson (Mora y Vahrson, 1994; Saborío et al., 2018). El período de recurrencia de la lluvia es  $T_r=50$  años.

a través de los modelos globales, proyecciones, reducción de las escalas y su distribución espaciotemporal respectiva. El siguiente paso consiste en verificar cómo las condiciones nuevas afectarían los procesos de inestabilidad de laderas en cada área. En el caso de un incremento (delta) del riesgo, su gestión deberá considerar, al menos, tres tipos de criterios para orientar el proceso de toma de decisiones (Fig. 17):

1. Medidas correctivas estructurales, transitorias, para ganar tiempo mientras se aplican soluciones más sostenibles; entre otras: Obras de ingeniería, dispositivos de estabilización, drenaje, control de erosión, revegetación, protección contra el aumento del nivel del mar.

2. Medidas proactivas sostenibles, no estructurales: Planificación territorial (uso de la tierra) para reducir la exposición y vulnerabilidad; protección financiera, retención y transferencia del riesgo; gestión ambiental, de las cuencas y recursos naturales; recuperación y reconstrucción segura, mejorada, con planes de acción que no reproduzcan las condiciones previas de la vulnerabilidad. Se incluye, también, la implantación de sistemas y protocolos para la gestión de emergencias y desastres: alerta, alarma, respuesta, continuidad operativa económica, social y empresarial.

3. No se toman acciones preventivas: Esta es, desafortunadamente, una política común en el mundo en desarrollo. En tal caso, el riesgo “aceptado” debe justificarse como “aceptable” y/o “tolerable”, pero la cobertura de los daños y pérdidas deberá garantizarse, al igual que cómo lidiar con los pasivos contingentes, la responsabilidad social y el riesgo residual (Fig. 17).

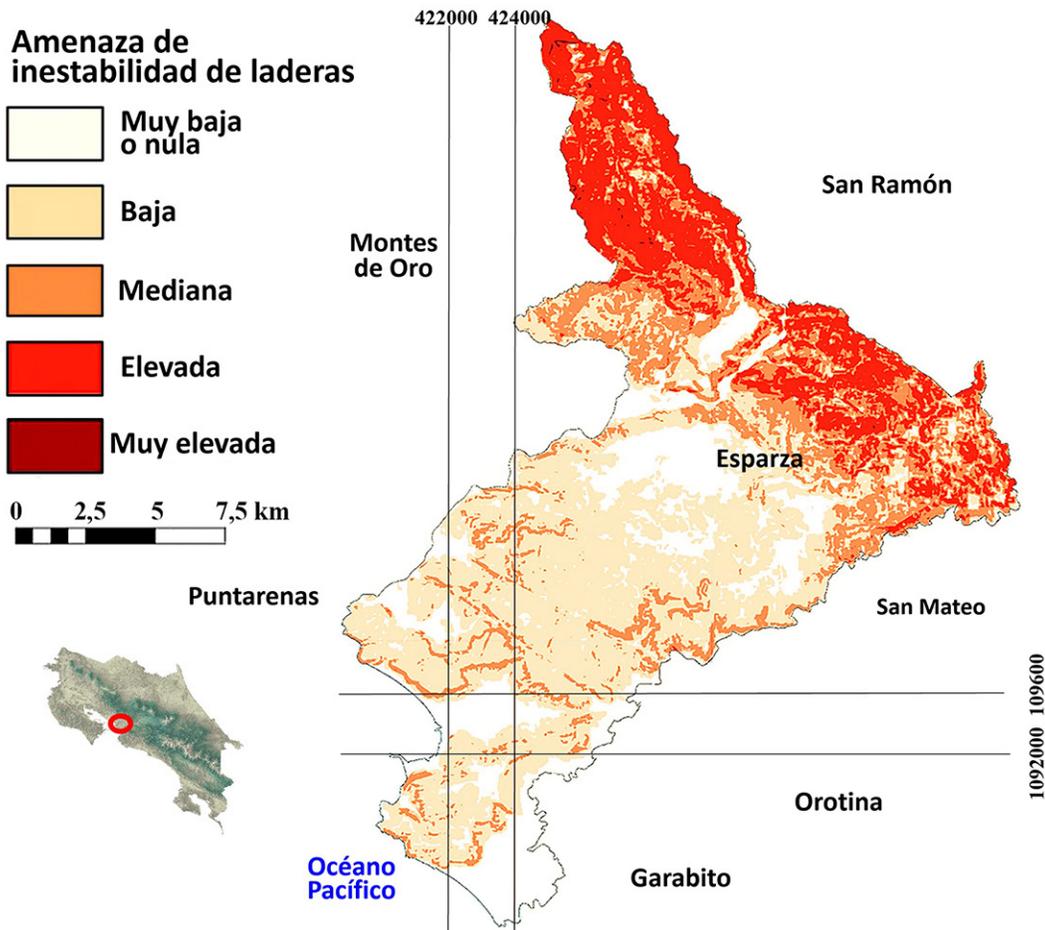


Fig. 16: Amenaza de la inestabilidad de laderas (método Mora-Vahrson, 1994), modificada mediante un escenario con incremento del 10% en la relación multidimensional IDF, para simular la influencia del CGA a lo largo de un horizonte temporal de 50 años (Saborío et al., 2018).

## Vigilancia, alerta, alarma, advertencia y respuesta para enfrentar emergencias derivadas de AIL

En adelante se describen las ideas básicas de la propuesta para el establecimiento de un sistema de observación, vigilancia, alerta, alarma, advertencia y respuesta (SIOVAR), para enfrentar la AIL. El sistema se fundamenta en la aplicación de la metodología Mora-Vahrson. Su visión incorpora acciones, tanto anticipadas como en “tiempo real”. Un avance de este proceso se ilustra en la figura 18 y en los párrafos siguientes. El concepto toma en cuenta la susceptibilidad intrínseca de las laderas: litología, relieve, humedad prevalente del terreno e influencia de los factores desencadenantes externos y dinámicos: sismicidad y pluviometría. Según todo ello, se pueden prever dos circunstancias posibles:

- “Ex ante”: En el caso de tormentas pronosticables (e.g. volúmenes acumulados en 24 a 72 horas) o lluvias estacionales se pueden utilizar, con anticipación, las isoyetas, hietogramas y funciones IDFV correspondientes, para observar cómo se acercan y eventualmente superan los umbrales de disparo. Si hay recursos tecnológicos disponibles para tal diagnóstico en tiempo real (i.e. radar meteorológico, imágenes satelitales), el pronóstico a corto plazo puede ser un beneficio adicional.

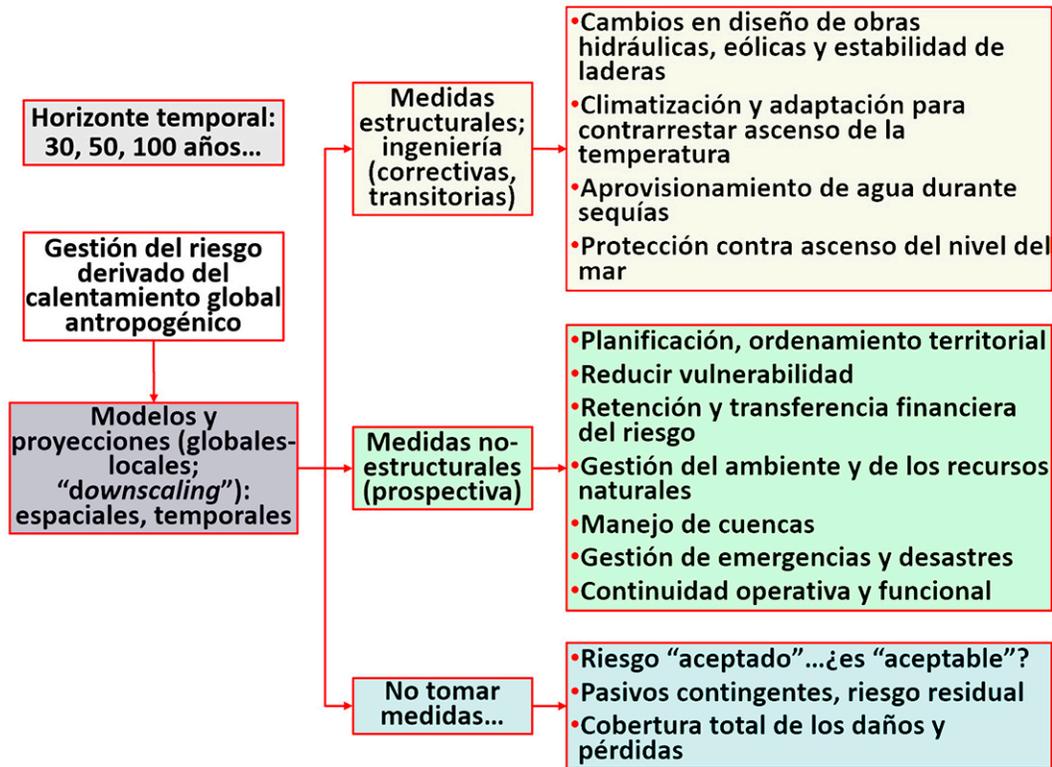


Fig. 17: Gestión del riesgo; acciones, orientaciones y adaptación al CGA para enfrentar la AIL en el futuro (Modificado de Mora, 2021).

- “Ex post”, en el caso de que no se disponga de suficientes instrumentos predictivos:

- Tormentas de lluvias intensas recientemente sucedidas y registradas: Mediante el aporte, rápidamente, del mismo tipo de información descrita en el caso anterior (e.g. intensidad y distribución espacial reales), registradas durante y/o inmediatamente después del evento.

- Justo después de un terremoto intenso, actualmente imposible de pronosticar, se pueden aplicar rápidamente los datos e información disponibles de las intensidades (Mercalli Modificada, aceleraciones pico, aceleraciones espectrales) y otros parámetros disponibles.

Si se dispone de datos e información, a tiempo, sería posible obtener una distribución confiable, en el espacio y tiempo, de los incidentes de inestabilidad de laderas. Entonces, sería factible orientar los procesos de toma de decisiones, para la gestión de emergencias y desastres, de una manera informada: respuesta, rescate, rehabilitación, reconstrucción, continuidad operativa y funcional (Fig. 18).

## Conclusiones y recomendaciones

El análisis de la influencia del calentamiento global antropogénico (CGA) es un factor clave para enfrentar la amenaza de la inestabilidad de laderas (AIL) y para orientar la gestión del riesgo (GdR), el ordenamiento territorial y las inversiones en proyectos de desarrollo e infraestructura.

Los datos e información, con suficiente confiabilidad y resolución espaciotemporal, no siempre están disponibles y no permiten evaluaciones probabilísticas robustas de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo derivado de la AIL. Este problema se

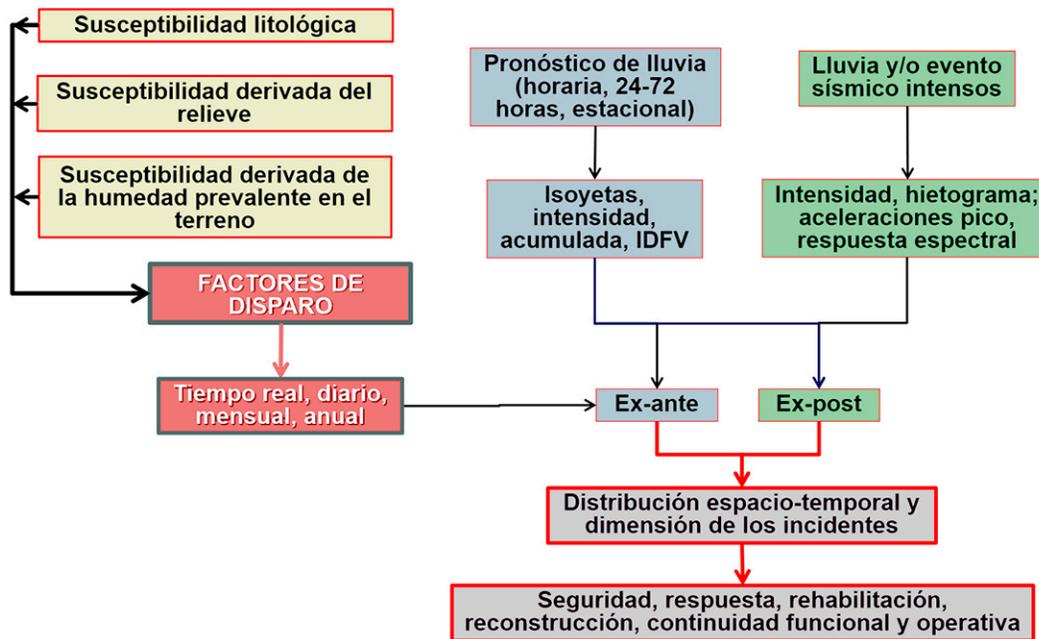


Fig. 18: Principios y criterios para establecer un sistema de observación, vigilancia, alerta, alarma, advertencia, respuesta y continuidad operativa (SIOVAR) para enfrentar las emergencias derivadas de la materialización de los eventos de la inestabilidad de laderas; basado en la metodología Mora-Vahrson (Saborío et al., 2018).

magnífica por el hecho de que las disciplinas analíticas aplicadas al cambio climático (CC) y CGA aún no han gestado modelos y escenarios de evaluación con suficiente precisión para realizar estudios en las escalas de los proyectos.

Las causas, características, dinámicas y posibles consecuencias respectivas sobre la inestabilidad de laderas requieren de afinar la certidumbre estadística. Este desafío debe superarse si se pretende alcanzar un diagnóstico cuantitativo y eventualmente, un pronóstico capaz de orientar los procesos de comunicación social y toma de decisiones.

En la mayoría de los países en desarrollo la GdR derivado de la AIL y la solución de su vulnerabilidad respectiva aún no es una prioridad en la política pública ni privada, aunque es claramente la causa de daños y pérdidas significativas.

La GdR sigue siendo considerada como un costo, no como una inversión y las acciones requeridas se ven obstruidas por la pasividad. Se requiere una actitud proactiva para cambiar este paradigma. A menos de que esto cambie, la naturaleza y el CC seguirán siendo excusas y chivos expiatorios cómodos para explicar y justificar cualquier desastre futuro.

Mientras tanto, se considera una oportunidad valiosa la utilización y aplicación de metodologías de macrozonificación heurística para disponer de herramientas racionales, sencillas y útiles para asistir los procesos de toma de decisiones, al menos hasta que se disponga de bases de datos y modelos probabilísticos suficientemente robustos.

En cuanto al análisis en sitios específicos, se recomienda abordarlos calibrando de la variación progresiva de los parámetros multidimensionales de la IDFV de las lluvias y su influencia sobre la evolución de las condiciones del equilibrio límite en las laderas, en particular en áreas con microclimas en donde incidiría, con intensidad, el CGA a lo largo de un horizonte temporal específico.

Sobre la base del conocimiento actual y bajo la creación de escenarios prácticos en las áreas en donde el CGA causará el incremento de los parámetros multivariables de la IDFV, sería posible evaluar y cuantificar si será forzado, también, un ascenso progresivo de los niveles freáticos y, por lo tanto, un aumento de las presiones intersticiales. Si esto se verifica, es probable que el efecto general induzca a que, progresivamente, se requieran lluvias cada vez menos intensas para desencadenar eventos de inestabilidad de laderas en el futuro.

Con todos los demás parámetros constantes habría una reducción progresiva del período de recurrencia y otros parámetros de la IDfV, de las tormentas críticas que producen los desequilibrios hídricos en el terreno que conducirían hacia las condiciones propicias para la ruptura de las laderas. Dado que estos parámetros son variables aleatorias, entre muchas otras, los análisis de los factores de seguridad, influidos por el CGA, requerirán de una revisión minuciosa, con enfoques probabilísticos y dinámicos, en el espacio y el tiempo.

## Agradecimientos

El autor agradece los aportes, correcciones y sugerencias de Daniel Salcedo, Nelson Rodríguez, Rosalba Barrios Díaz, Percy Denyer y Gustavo Barrantes, quienes contribuyeron sustancialmente para mejorar este texto.

## Referencias bibliográficas

- Bernal, G., y Cardona, O. (2018). *Next generation CAPRA software*. Presentado en el 16<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering. Thessaloniki, Greece. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/326274760\\_NEXT\\_GENERATION\\_CAPRA\\_SOFTWARE](https://www.researchgate.net/publication/326274760_NEXT_GENERATION_CAPRA_SOFTWARE)
- Cardona, O. (1986). Estudios de Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo Sísmico: Planificación Física y Urbana en Áreas Propensas. *Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica*, 69(2), 26-46.
- Cardona, O., Ordaz, M., Reinoso, E., Yamín, L., y Barbat, A. (2012). *CAPRA - Comprehensive approach to probabilistic risk assessment: International Initiative for Disaster Risk Management Effectiveness*. Presentado en 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Portugal. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/259598259\\_CAPRA\\_-\\_Comprehensive\\_Approach\\_to\\_Probabilistic\\_Risk\\_Assessment\\_International\\_Initiative\\_for\\_Risk\\_Management\\_Effectiveness](https://www.researchgate.net/publication/259598259_CAPRA_-_Comprehensive_Approach_to_Probabilistic_Risk_Assessment_International_Initiative_for_Risk_Management_Effectiveness)
- Cardona, O., Carreño, M., Mendes, K., Alcántara, I., y Saito, S. (2020). Inestabilidad de laderas - deslizamientos. En J. M. Moreno, C. Laguna-Defior, V. Barros, E. Calvo Buendía, J. A. Marengo y U. Oswald Spring (Eds.), *Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos. Informe RIOCCADAPT* (pp. 419-458). Madrid: McGraw-Hill.
- Hungr, O., Leroueil, S., y Picarelli, L. (2014). Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167–194. doi: 10.1007/s10346-013-0436-y
- Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC). (2021). Summary for Policymakers. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu. y B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. England: Cambridge University Press. Recuperado de [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf)
- Marulanda, M., Carreño, M., Cardona, O., Ordaz, M., y Barbat, A. (2013). Probabilistic earthquake risk assessment using CAPRA: Applications to Barcelona, Spain. *Natural Hazards*, 90(71), 70-83. doi: 10.1007/s11069-013-0685-z
- Mora, S. (2021). *Space-time slope instability hazard analysis, including global warming, in areas with scarce data*. Presentado en 13<sup>th</sup> International Symposium on Landslides. Cartagena, Colombia. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/349463187\\_Space-time\\_slope\\_instability\\_hazard\\_analysis\\_including\\_global\\_warming\\_in\\_areas\\_with\\_scarce\\_data](https://www.researchgate.net/publication/349463187_Space-time_slope_instability_hazard_analysis_including_global_warming_in_areas_with_scarce_data)
- Mora, S., y Vahrson, G. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Bulletin of Association of Engineering Geology*, 1(31), 49-58. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/275971541\\_Macrozonation\\_methodology\\_for\\_landslide\\_hazard\\_determination](https://www.researchgate.net/publication/275971541_Macrozonation_methodology_for_landslide_hazard_determination)

- Mora, S., y Ghesquiere, F. (2010). Effectiveness-improvement of risk management in developing countries. En A. L. Williams, G. M. Pinches, C. Y. Chin, T. J. McMorran, C. I. Massey (Eds), *Geologically Active* (11<sup>th</sup> International Congress; International Association of Engineering Geology and the Environment, pp. 1355-1363). Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/275970806\\_Effectiveness\\_and\\_improvement\\_of\\_risk\\_management\\_in\\_developing\\_countries](https://www.researchgate.net/publication/275970806_Effectiveness_and_improvement_of_risk_management_in_developing_countries)
- Saborío, J., Saborío, M., y Mora, S. (2015). *Normas y elementos básicos para la gestión municipal del riesgo, su control y regulación territorial*. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, Sistemas Geoespaciales. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/283420939\\_Normas\\_y\\_elementos\\_basicos\\_para\\_la\\_gestion\\_municipal\\_del\\_riesgo\\_su\\_control\\_y\\_regulacion\\_territorial](https://www.researchgate.net/publication/283420939_Normas_y_elementos_basicos_para_la_gestion_municipal_del_riesgo_su_control_y_regulacion_territorial)
- Saborío, J., Saborío, M., y Mora, S. (2018). *Guía de procedimientos SIG para el cantón de Esparza. Proyecto: diseño de acciones para la adaptación en el contexto del ordenamiento territorial en el ámbito de los Gobiernos Locales en Costa Rica*. San José: Consorcio OIKOLOGICA-ECOPLAN, Secretaría Técnica Nacional del Ambiente. Manuscrito inédito.
- Salgado-Gálvez, M., Zuloaga, D., Bernal, G., y Cardona, O. (2014). Comparación de resultados del riesgo sísmico en dos ciudades con los mismos coeficientes de diseño sismorresistente. *Revista de Ingeniería*, 41. doi: 10.16924%2Fria.v0i41.384
- Wilby, R., Mora, S., Abdallah, A., y Ortiz, A. (2010). Confronting climate variability and change in Djibouti through risk management. En A. L. Williams, G. M. Pinches, C. Y. Chin, T. J. McMorran, C. I. Massey (Eds), *Geologically Active* (11<sup>th</sup> International Congress; International Association of Engineering Geology and the Environment, pp. 511-522). Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/275960222\\_Confronting\\_climate\\_variability\\_and\\_change\\_in\\_Djibouti\\_through\\_risk\\_management](https://www.researchgate.net/publication/275960222_Confronting_climate_variability_and_change_in_Djibouti_through_risk_management)