

Evaluación del riesgo por deslizamientos y avenidas torrenciales

Guía para la gestión territorial



Ciencias



Universidad
de Medellín®
Ciencia y Libertad



POLITÉCNICO COLOMBIANO
JAIME ISAZA CADAVID



Evaluación del riesgo por deslizamientos y avenidas torrenciales

Guía para la gestión territorial



Ciencias



**Universidad
de Medellín**
Ciencia y Libertad



POLITÉCNICO COLOMBIANO
JAIME ISAZA CADAVID

Evaluación del riesgo por deslizamientos y avenidas torrenciales
Guía para la gestión territorial

1a edición: 2024

© Universidad de Medellín

© Blanca Adriana Botero Hernández

© César Augusto Hidalgo Montoya

© Nini Johana Marín Rodríguez

© Juan Camilo Parra Toro

Evaluación del riesgo por deslizamientos y avenidas torrenciales : guía para la gestión territorial / Blanca Adriana Botero Hernández ... [et al.]. -- 1ª ed. -- Medellín: Universidad de Medellín; Sello Editorial Universidad de Medellín, 2024.

28 p. ; 21 x 28 cm.

Incluye referencias bibliográficas

ISBN (electrónico): 978-958-5180-68-0

1. ADMINISTRACIÓN DE RIESGOS -- MANUALES. 2. EVALUACIÓN DE RIESGOS -- MANUALES. 3. DESPRENDIMIENTOS DE TIERRA. 4. INUNDACIONES -- DAÑOS Y PERJUICIOS. 5. PREVENCIÓN DE DESASTRES. 1. Botero Hernández, Blanca Adriana. 2. Universidad de Medellín. Sello Editorial Universidad de Medellín.

CDD 631.53

Catalogación bibliográfica - Universidad de Medellín. Biblioteca Eduardo Fernández Botero. Daissy Patricia Zea Mejía.

Sello Editorial Universidad de Medellín

selloeditorial@udemedellin.edu.co

Carrera 87 N.º 30-65

Teléfono: (+57+4) 590 45 00

Medellín, Colombia

Coordinador del Sello Editorial

Ricardo Gil Barrera

Analista editorial

Mayra Currea Enciso

Corrección de estilo

Álvaro Molina Monsalve

Beatriz Sánchez Pérez

Apoyo administrativo, gestora del Proyecto

Fotografías: César Augusto Hidalgo Montoya

AI IMAGINED

Diseño de portada y diagramación

Leonardo Sánchez Perea

Todos los derechos reservados.

Esta publicación no puede ser reproducida total o parcialmente por ningún medio inventado o por inventarse, sin el permiso previo y por escrito de la Universidad de Medellín.

Contenido

Introducción

Evaluación cualitativa y cuantitativa del riesgo por deslizamientos y avenidas torrenciales, y su incorporación en la gestión territorial	6
¿A quiénes está dirigida?	6
Temas que abordará	7

1. Entendiendo los deslizamientos: pérdidas económicas	8
1.1 ¿Qué es un deslizamiento?	8
1.2 ¿Cómo se evalúan las pérdidas por deslizamientos?	8
1.3 Aprendiendo del mundo y preparándonos	9
1.4 Consejos para niños	9

2. Aporte de la evaluación <i>ex post</i> para la construcción de curvas de daño por eventos de inundación lenta	10
2.1 Metodología general para estimar el riesgo de inundación	10
2.2 Recopilación de datos y evaluación <i>ex post</i>	11
2.3 Construcción de las curvas de daño	12
2.4 Aplicación para la gestión del riesgo	12
Mapa de pérdidas económicas estimadas	13
2.5 A tener en cuenta	13

3. Análisis de la incorporación en la gestión del riesgo. Una mirada a la delimitación de rondas hídricas en Colombia y evaluación del riesgo hídrico	14
3.1 La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH)	14
3.2 Evaluación del riesgo hidráulico en la delimitación de rondas	14
3.3 Incorporación de conceptos asociados al riesgo hidráulico en la Guía técnica para la delimitación de rondas hídricas en Colombia	15
3.4 Lecciones internacionales y mejores prácticas	16
3.5 Necesidades de mejora en la gestión del riesgo hidráulico	17
3.6 A tener en cuenta	17

4. Riesgo admisible o aceptable para diseño de obras y análisis de riesgo	18
4.1 ¿Riesgo aceptable o riesgo admisible?	18
4.1.1 Probabilidad de falla admisible	19
4.1.2 Cartas F-N (F-N Charts)	21
4.1.3 Percepción del riesgo	23
4.2 A tener en cuenta	25
Referencias	25

Conclusiones	26
---------------------	----

Autores	27
----------------	----

Introducción

Evaluación cualitativa y cuantitativa del riesgo por deslizamientos y avenidas torrenciales, y su incorporación en la gestión territorial

Esta cartilla está diseñada para proporcionar una visión sencilla sobre la gestión del riesgo de deslizamientos y avenidas torrenciales, dirigida tanto a gestores del territorio, autoridades locales, estudiantes y profesionales del medio ambiente, como a comunidades ubicadas en zonas de riesgo. Su objetivo principal es brindar herramientas claras y prácticas para la evaluación y mitigación de estos riesgos, con el propósito de dar una mayor seguridad y resiliencia en las áreas afectadas.

¿A quiénes está dirigida?

La cartilla es una guía práctica que puede ser utilizada por:

- **Profesionales en gestión del riesgo y planificación territorial**, quienes necesitan implementar estrategias de evaluación y mitigación del riesgo en sus territorios.
- **Autoridades locales y tomadores de decisiones**, responsables de diseñar e implementar políticas públicas de prevención de desastres.
- **Comunidades ubicadas en zonas de riesgo**, que deben entender los peligros asociados a deslizamientos e inundaciones y cómo prepararse para ellos.
- **Estudiantes y académicos** interesados en el estudio de desastres naturales y su prevención, que busquen una referencia clara y concisa sobre estos temas.

Temas que abordará

A lo largo de la cartilla se tratarán los siguientes temas:

1. Entendiendo los deslizamientos

Se explicará qué son los deslizamientos de tierra, cómo se producen y cuáles son sus principales causas, desde lluvias intensas hasta la inestabilidad del terreno. Se mirarán también las consecuencias económicas y sociales que estos fenómenos pueden causar, y se destacará la importancia de la prevención y la evaluación de riesgos a nivel comunitario e institucional.

2. Evaluación *ex post* y construcción de curvas de daño

Este apartado mostrará cómo la información recopilada tras un evento de inundación o deslizamiento puede ser utilizada para desarrollar herramientas útiles como las curvas de daño. Estas curvas permiten evaluar las pérdidas económicas futuras y son esenciales para la planificación de medidas preventivas y correctivas en zonas de riesgo.

3. Delimitación de rondas hídricas y evaluación del riesgo hidráulico

Se profundizará en la gestión del riesgo asociado a los cuerpos de agua mediante la delimitación de rondas hídricas, una estrategia clave para la conservación de los ecosistemas y la prevención de desastres. Además, se analizará cómo se introduce la evaluación del riesgo hidráulico en un mecanismo de gestión como son las rondas hídricas.

4. Riesgo admisible o aceptable en el diseño de obras

Se abordará la difícil tarea de definir niveles de riesgo aceptables para la construcción de obras en zonas montañosas. Se discutirán los criterios utilizados para determinar qué nivel de riesgo puede ser considerado aceptable o tolerable tanto para la seguridad de las personas como para la protección de los bienes e infraestructuras. Este apartado proporcionará ejemplos concretos y tablas de referencia para la toma de decisiones.

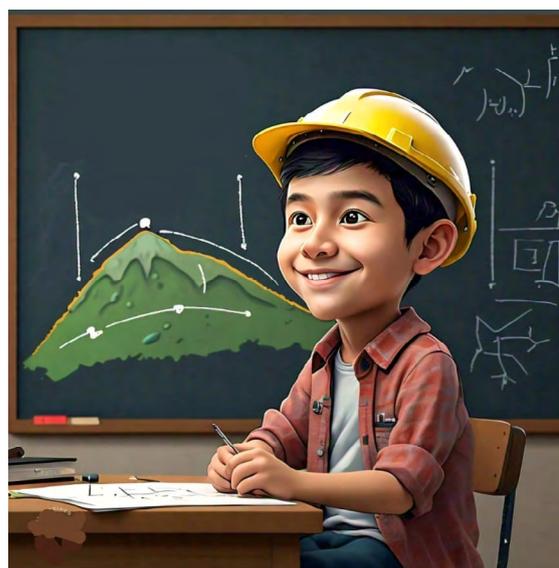
1. Entendiendo los deslizamientos: pérdidas económicas

Nini Johana Marín Rodríguez

¡Hola, amigos! Hoy vamos a aprender sobre un tema muy importante: los deslizamientos de tierra. Estos eventos pueden causar muchos problemas, pero si entendemos cómo ocurren y cómo prevenirlos, ¡podemos mantenernos seguros!

1.1 ¿Qué es un deslizamiento?

Es un movimiento de una gran cantidad de tierra, lodo o rocas que se desliza por una colina o montaña. Puede suceder cuando hay mucha lluvia, terremotos o cuando el suelo está débil. ¡Es como cuando haces un castillo de arena, y de repente, parte de la arena se desmorona! Los deslizamientos pueden ser peligrosos porque pueden destruir casas, caminos y afectar a las personas.



1.2 ¿Cómo se evalúan las pérdidas por deslizamientos?

Cuando ocurre un deslizamiento, los expertos tienen que calcular cuánto daño causó. Para hacer esto, usan dos tipos de costos: costos directos y costos indirectos. Los costos directos son los daños visibles, como casas rotas o caminos destruidos. Los costos indirectos son los efectos a largo plazo, como perder un trabajo o el costo de limpiar después del deslizamiento.



1.3 Aprendiendo del mundo y preparándonos



En el mundo, muchos países han aprendido a manejar los deslizamientos mejorando las leyes y enseñando a las personas cómo prepararse. Por ejemplo, han creado sistemas de alerta temprana para advertir a las personas antes de que ocurra un deslizamiento. También, han invertido en hacer sus comunidades más fuertes y seguras, con mejores edificios y planes de emergencia.

1.4 Consejos para niños

- Si vives en una zona montañosa, escucha siempre a los adultos cuando hablan de deslizamientos.
- Aprende a reconocer las señales de peligro, como grietas en el suelo o mucho lodo en el agua.
- ¡No juegues cerca de colinas empinadas después de una fuerte lluvia!
- Si estás en casa y escuchas una alerta, sigue las instrucciones de los adultos para evacuar de manera segura.



¡Recuerda! Aprender sobre los deslizamientos es importante para mantenerte seguro y ayudar a tu comunidad. Si todos conocemos qué hacer y cómo prepararnos, podemos reducir los daños y protegernos mejor en caso de un deslizamiento.

2. Aporte de la evaluación *ex post* para la construcción de curvas de daño por eventos de inundación lenta

Blanca Adriana Botero Hernández

Este capítulo se enfoca en cómo se puede aprovechar la información recopilada después de un evento de inundación (evaluación *ex post*) para desarrollar herramientas útiles llamadas *curvas de daño*, que ayudan a calcular las pérdidas económicas futuras que puede causar una inundación. Estas curvas son esenciales para la planificación y toma de decisiones, ya que permiten entender mejor el impacto de estos desastres en comunidades afectadas.

La metodología general recomendada para estimar el riesgo de inundación utilizando la información *ex post* la puedes encontrar en el siguiente apartado.

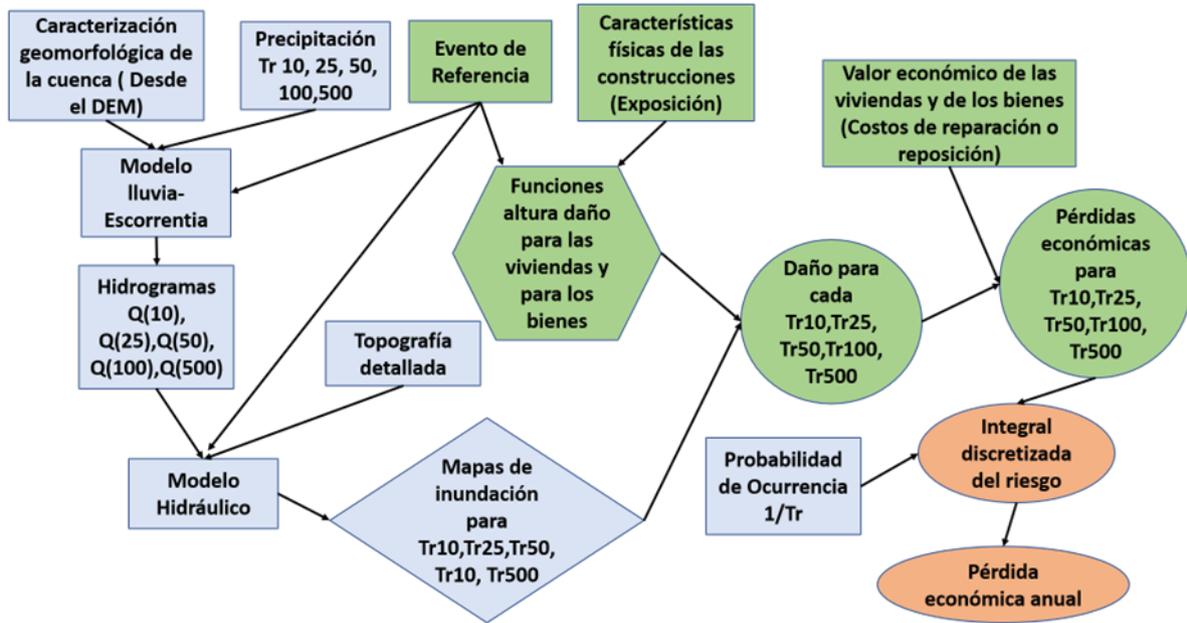
2.1 Metodología general para estimar el riesgo de inundación

Para evaluar el riesgo de una inundación y estimar las pérdidas económicas que podría causar, es necesario seguir tres pasos básicos:

- a) **Estimación de la amenaza.** Aquí se calcula la probabilidad y magnitud de las inundaciones utilizando modelos hidrológicos que simulan cómo sería el comportamiento del agua en diferentes escenarios de lluvia e inundación.
- b) **Estimación de la vulnerabilidad.** En este paso se evalúa qué tan vulnerables son los diferentes tipos de construcciones, bienes y personas que están expuestos a la inundación. Se recopila información sobre cómo las inundaciones han afectado en el pasado a viviendas y objetos valiosos, como muebles y electrodomésticos.
- c) **Evaluación del riesgo.** Una vez que se tienen los datos sobre la amenaza y la vulnerabilidad, se combinan para calcular las posibles pérdidas económicas que una inundación podría generar. Esto ayuda a identificar qué áreas requieren mayor atención para mitigar los riesgos.

Esta metodología se ilustra en la figura 1, en la que puedes observar los pasos clave para estimar el riesgo de inundación en términos de pérdidas económicas esperadas.

Figura 1
Metodología para estimar el riesgo de inundación



2.2 Recopilación de **datos** y **evaluación ex post**

Para llevar a cabo este tipo de análisis es fundamental contar con datos reales obtenidos después de que ocurre una inundación. En este caso, se aplican encuestas a las personas afectadas para obtener información sobre los daños sufridos (bienes dañados) y sobre el nivel del agua alcanzado. Estas encuestas permiten conocer de primera mano el impacto de la inundación en las viviendas y en los objetos de valor que contenían, lo que ayuda a construir las curvas de daño. Aquí te mostramos un ejemplo de estas encuestas:

¿Vivía usted en el barrio durante la inundación del año 2010?
¿Cuál fue la altura alcanzada por el agua en su vivienda durante la inundación más crítica del año 2010?, medida en centímetros
¿Cuánto tiempo tardaron las aguas en evacuar el área?, medido en días.
¿Por qué le empezó a entrar agua a la casa?
¿Qué electrodomésticos o utensilios se le dañaron totalmente?
¿Cuál de estos elementos de la estructura de la casa se le dañaron o afectaron? (aquí se describieron los 5 elementos principales y se consideró afectación desde las manchas generadas por los sedimentos en las estructuras.)
¿Cuánto se gastó limpiando y arreglando su casa? (en dinero efectivo)
¿En qué actividades específicas se gastó ese dinero?

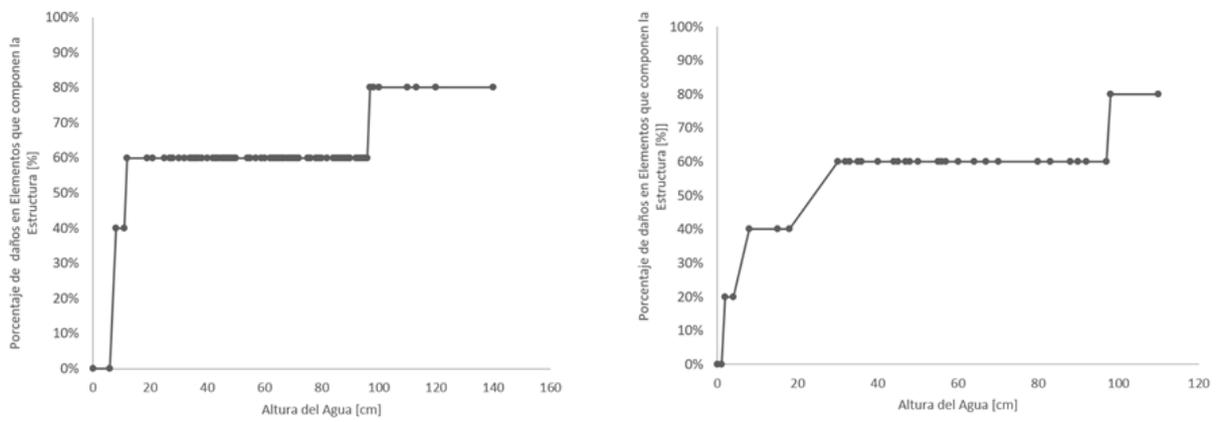
2.3 Construcción de las curvas de daño

Las curvas de daño son herramientas que permiten relacionar el nivel de inundación con el daño causado a diferentes tipos de viviendas y bienes. Mediante los datos obtenidos de las encuestas se pueden identificar patrones de daño y desarrollar curvas específicas para distintos tipos de construcciones (como viviendas de mampostería, madera o materiales no tradicionales). Estas curvas también son útiles para prever cómo serían los daños en futuros eventos de inundación.

Ejemplo de curva de daño

En la figura 2 se presenta un ejemplo de curva de daño para viviendas de madera, que muestra cómo el nivel del agua se relaciona con el daño causado en los elementos estructurales de las viviendas.

Figura 2
Curva de daño para viviendas de madera



2.4 Aplicación para la gestión del riesgo

El resultado final de este proceso es una estimación del riesgo en términos de pérdidas económicas, que puede variar según la frecuencia y magnitud de las inundaciones.

Con esta información es posible tomar decisiones más informadas sobre cómo priorizar acciones para reducir el riesgo, como la implementación de medidas preventivas o la mejora de infraestructuras.

Mapa de pérdidas económicas estimadas

La figura 3 muestra un mapa de las pérdidas económicas estimadas para un periodo de retorno de 10 años, lo que permite visualizar las áreas más afectadas y priorizar intervenciones en estas zonas.

Figura 3
Mapa del riesgo anual esperado



2.5 A tener en cuenta

Las evaluaciones *ex post* son una herramienta valiosa para construir curvas de daño que permiten evaluar cuantitativamente el riesgo de futuras inundaciones. Al recopilar información directamente de las áreas afectadas y analizar los daños, es posible desarrollar estrategias más precisas y efectivas para mitigar los efectos de las inundaciones en términos de pérdidas económicas.

3. Análisis de la incorporación en la gestión del riesgo. Una mirada a la delimitación de rondas hídricas en Colombia y evaluación del riesgo hídrico

Juan Camilo Parra Toro

La delimitación de rondas hídricas en Colombia es un proceso fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos. A través de la política nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), el país ha adoptado un enfoque integral que busca la protección de los cuerpos de agua y sus ecosistemas, al mismo tiempo que se mitigan riesgos como las inundaciones. Esta tarea está en manos de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), que deben acotar las áreas de protección alrededor de los cuerpos de agua en sus jurisdicciones con el fin de asegurar la conservación y prevenir riesgos para las comunidades y el medio ambiente.

3.1 La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH)

El concepto de la GIRH se basa en la idea de que todos los usos del agua están interrelacionados y, por lo tanto, deben gestionarse de forma conjunta para garantizar su sostenibilidad. En Colombia, la GIRH ha sido adoptada como estructura base de la política hídrica desde 2010. En este contexto, la delimitación de las rondas hídricas se convierte en una herramienta clave para la protección de los cuerpos de agua y la mitigación de riesgos como inundaciones, erosión o desbordamientos.

La Resolución 0957 de 2018, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece las guías técnicas para delimitar estas rondas e integra criterios que buscan la conservación ambiental y la prevención de desastres naturales.

3.2 Evaluación del riesgo hidráulico en la delimitación de rondas

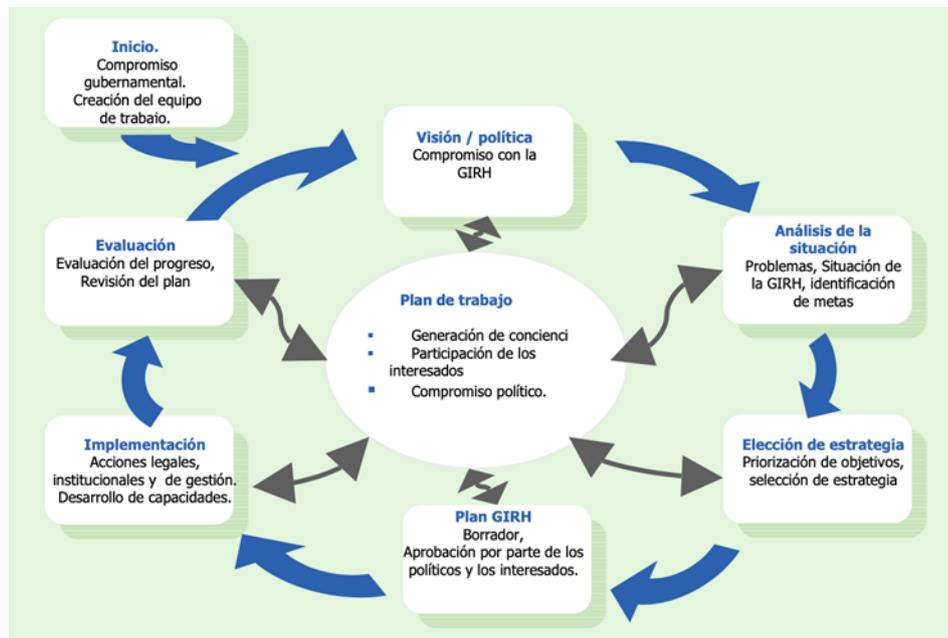
El riesgo hidráulico, asociado principalmente a las inundaciones, es un elemento crucial que debe tenerse en cuenta al delimitar las rondas hídricas.

Este riesgo puede derivarse de inundaciones lentas o rápidas y afecta a los ecosistemas acuáticos y a las comunidades que viven en las cercanías de los cuerpos de agua. En los estudios de delimitación es esencial analizar este riesgo y utilizar herramientas que permitan evaluarlo de manera precisa. La identificación de áreas susceptibles a inundacio-

nes ayuda a definir zonas de protección más estrictas, especialmente en ríos de montaña o en áreas geotécnicamente inestables. Las rondas deben incluir estos sectores en su planificación para evitar daños mayores a infraestructuras y pérdida de vidas humanas.

Por ejemplo, en la figura 1 se presenta un ciclo que explica cómo debe realizarse la gestión integrada del recurso hídrico, partiendo de una planificación que considere el uso sostenible del agua y la mitigación de riesgos hidráulicos. Este enfoque integral permite crear planes de acción ajustados a las necesidades de cada cuerpo de agua y sus áreas adyacentes.

Figura 1
Ciclo de la gestión integral del recurso hídrico



3.3 Incorporación de conceptos asociados al riesgo hidráulico en la Guía técnica para la delimitación de rondas hídricas en Colombia

La Guía Técnica para la Delimitación de Rondas Hídricas en Colombia establece como uno de sus principales objetivos la gestión del riesgo hidráulico, que está presente en las zonas cercanas a cuerpos de agua. Esto es clave para cumplir con las políticas ambientales nacionales, como la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico y la Política Nacional de Biodiversidad. Sin embargo, aunque la Guía menciona este riesgo en varias secciones, no siempre lo aborda con la profundidad y rigurosidad necesarias para garantizar una prevención efectiva de desastres como las inundaciones.

Un aspecto importante a mejorar es que aunque se reconoce que delimitar las rondas hídricas es una medida para reducir el riesgo de inundaciones, la metodología para evaluar ese riesgo no está claramente definida. Se hace alusión al riesgo en términos generales, pero la Guía no incluye un análisis detallado ni propone herramientas concretas para su

cuantificación. Además, al limitar los estudios de amenaza y riesgo a un periodo reciente de cinco años, puede ignorar datos valiosos sobre inundaciones que ocurrieron hace más tiempo, pero que siguen siendo relevantes para la planificación y prevención actual.

Otro punto que merece atención es la falta de integración más sólida entre los estudios técnicos y el conocimiento local. Si bien la Guía sugiere el uso de cartografía social, que recoge la percepción de las comunidades sobre los riesgos, sería beneficioso contar con un enfoque más equilibrado entre esta información comunitaria y los estudios sistemáticos. Este enfoque combinado permitiría tomar decisiones más informadas sobre cómo manejar los riesgos en las zonas de protección, especialmente en áreas geotécnicamente inestables, como los ríos de montaña.

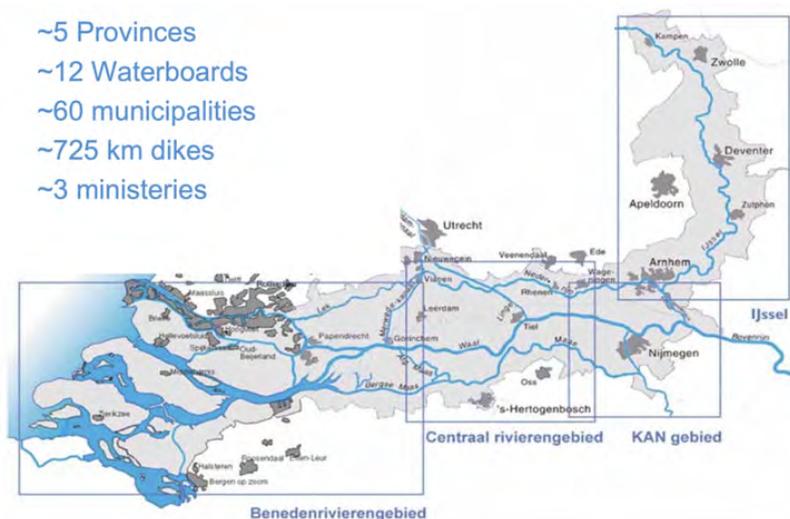
3.4 Lecciones internacionales y mejores prácticas

A nivel internacional, países como Holanda y España han desarrollado enfoques integrales que combinan la gestión del riesgo con la protección ambiental.

En Holanda, el enfoque holístico incluye la zonificación de áreas propensas a inundaciones y la aplicación de medidas que permitan incrementar la capacidad de los ríos, y así manejar mayores volúmenes de agua. En España se aplican metodologías que integran análisis geomorfológicos e históricos para delimitar zonas de riesgo y definir cauces naturales. Estas experiencias pueden servir como referencia para mejorar las prácticas de delimitación de rondas hídricas en Colombia.

La figura 2 ilustra un ejemplo de zonificación de áreas de conservación e intervención en cuerpos de agua de Holanda, donde se evidencia cómo las zonas inundables se gestionan de manera coherente con los objetivos de desarrollo y protección ambiental, de forma holística. Este tipo de planificación también puede ser aplicable a ríos y cuencas hidrográficas en Colombia porque los riesgos asociados a las inundaciones siguen siendo una preocupación importante.

Figura 2
Visión unificada del territorio desde el abordaje de varias regiones diversas unidas por una red hídrica



3.5 Necesidades de mejora en la gestión del riesgo hidráulico

Si bien la política colombiana ha avanzado en la delimitación de rondas hídricas, es necesario adoptar metodologías más detalladas y robustas para la evaluación del riesgo hidráulico. Actualmente, el enfoque se basa principalmente en evitar la exposición de áreas vulnerables, pero sería beneficioso incorporar herramientas que permitieran analizar de forma más precisa la fragilidad de los elementos expuestos, como infraestructuras y comunidades.

Es fundamental también incluir la influencia del cambio climático, que puede aumentar la frecuencia e intensidad de las inundaciones en algunas regiones. La creación de modelos predictivos más avanzados y la utilización de tecnologías de simulación podrían mejorar significativamente la capacidad de respuesta ante estos riesgos.

3.6 A tener en cuenta

La delimitación de rondas hídricas en Colombia es una herramienta clave para la gestión sostenible de los recursos hídricos y la prevención de desastres naturales. Sin embargo, se deben realizar esfuerzos adicionales para integrar de manera más profunda la evaluación del riesgo hidráulico en los estudios de delimitación. Esto implica la adopción de mejores prácticas internacionales, el uso de herramientas tecnológicas avanzadas y la actualización de las metodologías actuales para incluir escenarios de cambio climático. Estas acciones permitirán una mayor protección de las comunidades, infraestructuras y ecosistemas acuáticos, y se garantizará así una gestión más eficaz de los recursos hídricos del país.

4. Riesgo admisible o aceptable para diseño de obras y análisis de riesgo

César Augusto Hidalgo Montoya

Cuando se realiza un análisis o evaluación de riesgo, el objetivo es la toma de decisiones para mejorar la seguridad de las personas y sus bienes, pero cuando se llega al punto de tener que determinar si el riesgo está en niveles seguros, no existe un acuerdo sobre cuál es el criterio adecuado. Los criterios de aceptación en la mayoría de los países están basados en la aceptación de la amenaza y solo un pequeño número de países ha suscrito un criterio de aceptación de riesgo. En este capítulo se hace una revisión de los criterios existentes para determinar cuándo un determinado nivel de riesgo puede o no ser aceptado o tolerado y se propone un nivel de riesgo adecuado para el diseño de obras civiles en zonas montañosas. En este trabajo se presenta una síntesis del capítulo IV del libro Vulnerabilidad, Resiliencia y Riesgo de Desastres (Hidalgo, 2023)

4.1 ¿Riesgo aceptable o riesgo admisible?

En primer lugar, es importante establecer el concepto de riesgo de acuerdo con el cual se va a realizar la discusión en adelante. Para todos los efectos de este trabajo, se entenderá *riesgo* como la pérdida probable ante la ocurrencia de un evento amenazante. Dicha pérdida puede ser monetaria o la afectación a las personas, bien sea por heridas o la muerte.

Se entiende por riesgo aceptable aquel que un individuo o comunidad está dispuesta a aceptar sin invertir ningún recurso para mermarlo. Por otro lado, el riesgo admisible o tolerable es el nivel de riesgo que el individuo o comunidad están dispuestos a aceptar haciendo cierta cantidad de inversión. De acuerdo con las definiciones dadas por la Dirección de Salud y Seguridad del Reino Unido (HSE, por sus siglas en inglés), (Bowles, 2007), estos términos no son intercambiables.

Se puede decir que el riesgo aceptable depende del tipo de amenaza y otras variables como el plazo (corto, mediano, largo), alternativas existentes, posibles beneficios y perjuicios, percepción del riesgo, entre otras. En general, en la definición del riesgo admisible son considerados dos componentes: riesgo humano (individual y colectivo) y costos y beneficios directos, no obstante, también pueden ser consideradas variables y criterios como el riesgo involuntario y voluntario.



4.1.1 Probabilidad de falla admisible

En la mayoría de los casos, el nivel de riesgo aceptable acaba siendo una pregunta difícil de resolver y no existe consenso respecto a estos niveles debido a la gran cantidad de variables involucradas y depende en gran medida de la experiencia del profesional que realiza el análisis o de la práctica local. La tabla 1 presenta las recomendaciones del US Army Corps of Engineers (USACE) para evaluar los niveles de riesgo usando el índice de confiabilidad β y la probabilidad de ruptura o de falla asociada.

Tabla 1
Índices de confiabilidad y probabilidades de falla admisibles (USACE, 1999)

Nivel de desempeño esperado	β	$P[r]$
Alto	5	3×10^{-7}
Bueno	4	3×10^{-5}
Arriba de la media	3	10^{-3}
Abajo de la media	2.5	6×10^{-3}
Pobre	2.0	2.3×10^{-2}
Insatisfactorio	1.5	7×10^{-2}
Peligroso	1.0	1.6×10^{-1}

La contribución relativa de los diferentes modos de falla debe ser considerada a la hora de definir el valor de probabilidad de falla de referencia. Tomando como ejemplo una presa construida para una vida útil de 100 años y para la cual los datos históricos indican una probabilidad general de falla de 0.01. Si se divide esta probabilidad por la vida útil, se obtiene la probabilidad anual de falla de 10^{-4} , valor sugerido para presas,

pero dado que solo un tercio de las fallas en una presa son debidas a la inestabilidad de los taludes, resultaría razonable tomar como valor de referencia para el diseño una probabilidad anual de falla de 0.001.

En la tabla 1, $P[r]$ es la probabilidad de que el comportamiento no sea satisfactorio, esto es, que el desempeño se aproxime al estado límite o que un evento mayor que aquel considerado en los análisis pueda suceder. Por ejemplo, si la función de desempeño se define en términos de la estabilidad de taludes y $P[r]=0.023$, entonces 23 de cada 1000 taludes (o 23 m de cada 1000 m de talud) pueden presentar peligro de inestabilidad.

Por otro lado, tomando como referencia la propuesta del USACE e investigaciones sobre el desempeño de cimentaciones de torres de transmisión eléctrica, se propone que $\beta=3.2$, que corresponde a una probabilidad de falla de 0.03%, sea tomado como criterio para el diseño de este tipo de estructuras en la condición del estado último de falla, con lo cual se garantiza un comportamiento por encima del promedio según el criterio de la tabla 1. En el caso del estado límite de servicio, se considera que un índice de confiabilidad de 2.6 es adecuado; el hecho de que sea menor se justifica porque las consecuencias de la falla en este estado límite son sustancialmente diferentes a las esperadas en el caso del estado último. Sin embargo, la probabilidad de falla se puede decir que está en un nivel comparable con la del estado último. Se debe advertir que para el estado límite de servicio se requieren análisis más racionales que los empleados por ellos en su estudio.



A partir de retroanálisis de taludes estables y otros taludes fallados en minas de mineral de hierro, se ha propuesto una probabilidad de $2,3 \times 10^{-2}$ como valor mínimo de diseño para este tipo de proyectos. Esta probabilidad de falla corresponde a un índice de confiabilidad de 2, lo cual en general garantiza un desempeño adecuado.

No obstante, se advierte que para obras que no puedan presentar deformaciones considerables se deben adoptar otras consideraciones. Estos valores resultan demasiado altos para taludes de obras civiles, en los cuales los riesgos de pérdidas, principalmente económicos, son altos.

Se ha afirmado que el concepto de riesgo aceptable está estrechamente relacionado con la ubicación del talud o del área de deslizamiento y su proximidad a construcciones, las funciones y la vida operacional de esas construcciones. Igualmente, se considera que se deben tener en cuenta las consecuencias de la falla de los taludes mismos y de las obras cuya falla puede impactar a la hora de definir los niveles de riesgo aceptables. Esto incluye posibles impactos sobre la vida humana, otras formas de vida, propiedades, infraestructura, economía y medio ambiente. Así, la ubicación relativa respecto a asentamientos humanos y rutas de transporte es crítica. También se indica que se deben usar criterios acordes para diferentes situaciones, que dependen del tipo de deslizamiento, la velocidad de este, los agentes detonadores, la frecuencia y antecedentes históricos de tales agentes detonadores. Otros autores sugieren valores del índice de confiabilidad entre 1 y 3, y probabilidades de falla entre 15×10^{-2} y 10^{-3} como valores de referencia para el análisis de confiabilidad y la gestión de riesgo por deslizamiento.



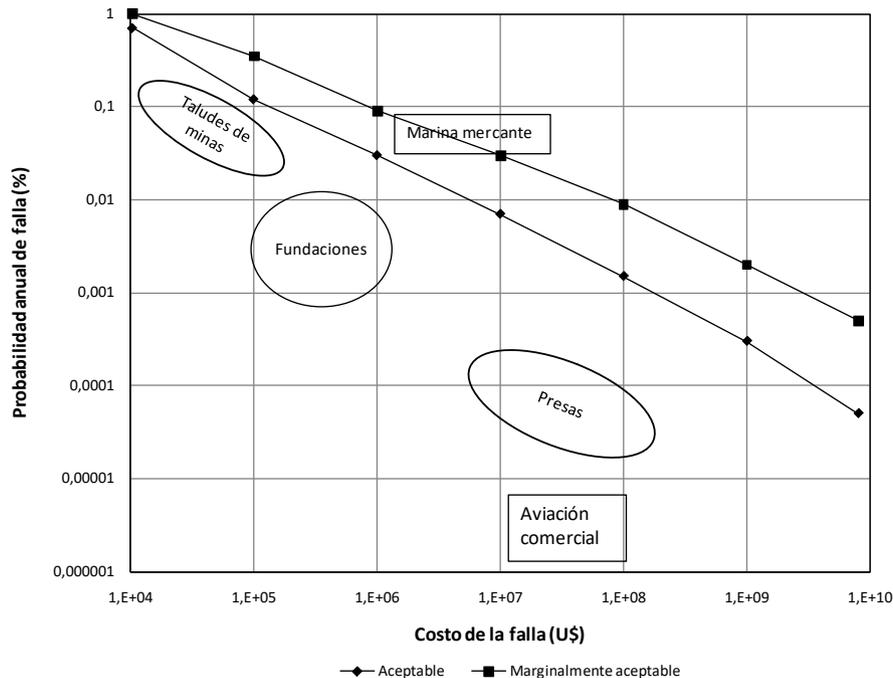
4.1.2 Cartas F-N (F-N Charts)

En ellas se grafica la probabilidad de ocurrencia de una falla en función de las consecuencias, como se muestra en la figura 1. Como se observa, en estas cartas se representa la probabilidad anual de falla en función de las consecuencias cuantificadas como costos (millones de dólares) y en pérdidas de vidas. Existe un umbral de aceptación y otro de aceptación marginal, y en la medida en que se incrementa la capacidad de causar consecuencias económicas o de pérdidas de vidas, la probabilidad

de ocurrencia se debe reducir para que el proyecto sea seguro. Aunque no aparecen explícitos en la carta, los taludes de obras civiles deberían estar localizados en una zona próxima de las fundaciones. No obstante, dado que en general las consecuencias económicas de un deslizamiento en ciertas obras como carreteras pueden ser mucho mayores que en la mayoría de las edificaciones, la probabilidad anual de falla debería ser del orden de 10^{-4} o 10^{-5} para garantizar un nivel de riesgo adecuado, pero esto depende del monto estimado para las pérdidas anuales.

Figura 1

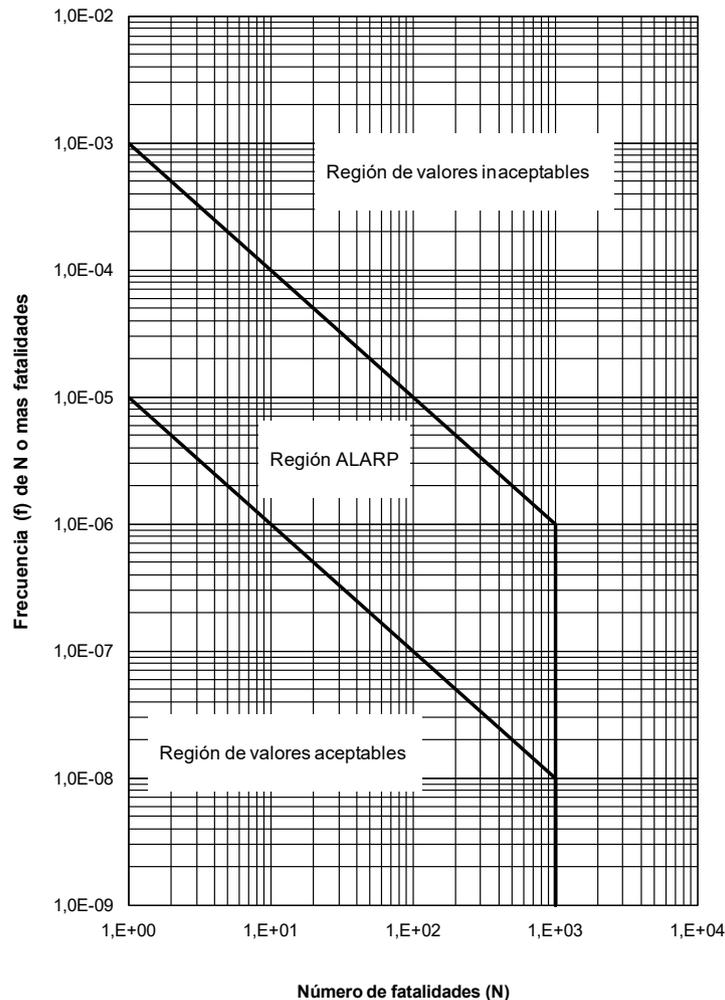
Carta F-N mostrando el riesgo promedio anual para una variedad de obras civiles tradicionales y otros proyectos de gran porte (Modificado de Christian, Ladd, & Baecher, 1994)



Algunos autores evitan definir un valor exacto como criterio de decisión y proponen disminuir el riesgo hasta el valor más bajo que sea razonable en la práctica, lo cual es denominado por ellos ALARP (As Low As Reasonably Practicable). El criterio ALARP ya había sido usado por otros autores y fue implementado en Hong Kong para determinar las situaciones en las cuales se deben hacer inversiones para mantener o reducir los niveles de riesgo. En la figura 2 se muestra la carta F-N usada en Hong Kong, en la cual se observan los valores aceptables de riesgo de ocurrir un evento, en función del número de víctimas esperadas. Son establecidos límites para el riesgo aceptado para la exposición individual de 10^{-5} y para la sociedad de 10^{-6} .

Figura 2

Carta F-N para el riesgo de la sociedad en Hong Kong (ERM, 1998)



Otros autores presentan criterios como Pérdida Potencial de Vidas (PLL, Potencial Lost of Life) y ALARP, pero los valores de probabilidad de falla aceptable, de nuevo son del orden de 10^{-4} - 10^{-6} por año y establecen que para definir criterios para otros escenarios con daños de otra naturaleza, deben ser realizados análisis de costo-beneficio.

4.1.3 Percepción del riesgo

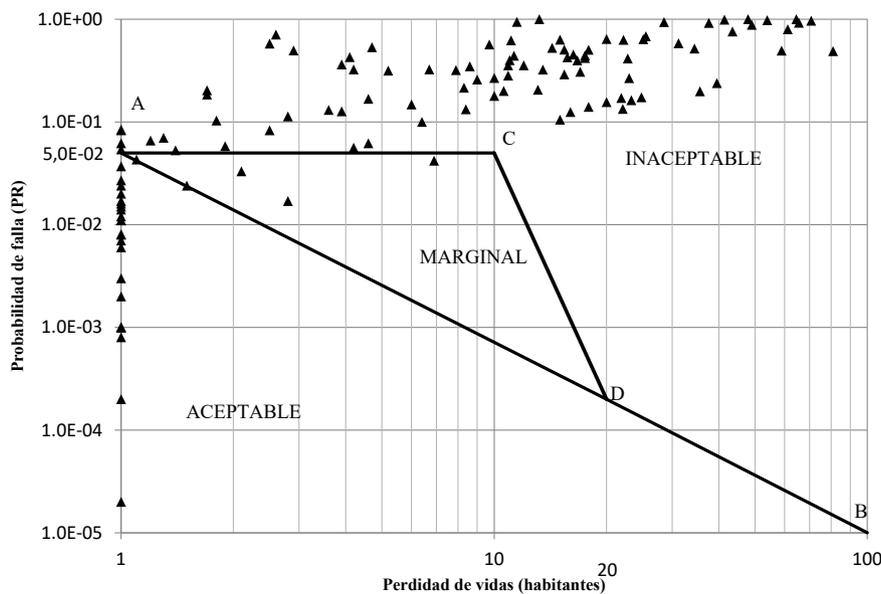
De acuerdo con varios autores, el público en general puede aceptar riesgos relativamente altos en taludes naturales y en otras situaciones. En cifras, se ha indicado que el público puede aceptar valores de 10^{-2} de riesgo anual específico de daños en sus propiedades y hasta 10^{-3} de la pérdida de vida. También se indica que en el caso de taludes construidos por el hombre, la aceptación pública del riesgo es menor y que una probabilidad de pérdidas de vidas no mayor que 10^{-5} o 10^{-6} puede ser lo esperado.

Una tendencia general es calcular el riesgo en términos de costos o ganancias, y muertes. Sin embargo, las personas tienen la tendencia de categorizar el riesgo por el

potencial catastrófico, controlabilidad, peligro para las próximas generaciones, familiaridad, equidad, nivel de entendimiento del riesgo y otros factores menos cuantitativos. En este ámbito, son importantes factores que permitan establecer si el riesgo es controlable o no y si puede ser observado o no.

En un trabajo de investigación se efectuaron evaluaciones de riesgo cuantitativo en 120 edificaciones ubicadas en el municipio de Medellín. El riesgo se estimó como la probabilidad de pérdidas de vidas y también en términos económicos. En la figura 3 se muestra la carta F-N que se elaboró en ese trabajo adaptando las cartas usadas en Hong Kong, y se establecieron tres áreas para el criterio de aceptación. El área de “aceptable” se definió considerando que no se pueden aceptar probabilidades de falla anuales mayores que 5% cuando hay al menos una vida en peligro si ocurre una falla (Punto A) y que cuando las fatalidades puedan ser 100 o más, la probabilidad de falla debe ser inferior a 0.001% (Punto B). Proyectos que se ubiquen en la zona ACD pueden ser aceptados con precaución. Igualmente, en la figura 3 se presentan los resultados obtenidos para los 120 proyectos (triángulos negros) y se observa que la mayoría se encuentran en la zona “inaceptable”.

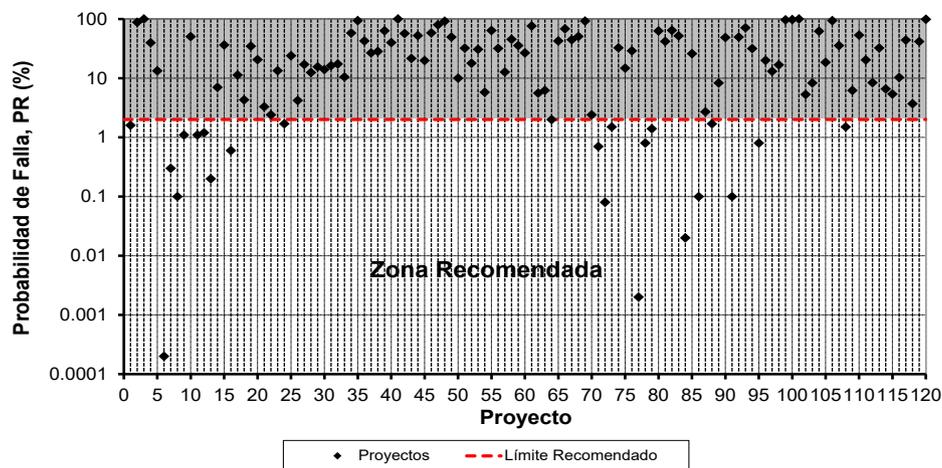
Figura 3
Propuesta para el riesgo social aceptable para estabilidad de taludes de proyectos inmobiliarios en la ciudad de Medellín (modificado de Isaza-Restrepo, Martínez, & Hidalgo, 2016)



Los resultados de probabilidad de falla de cada talud se presentan de forma gráfica en la figura 4 y se comparan con la probabilidad de falla del 2% que se considera un criterio de aceptación de acuerdo con los planteamientos del US ARMY Corps of Engineers. Como se observa, la mayor parte de los proyectos evaluados (81%) sobrepasan el 2% de probabilidad de falla, lo cual sugiere que el riesgo tolerable por movimientos en masa en la ciudad de Medellín es 2%.

Figura 4

Probabilidad de falla de taludes de proyectos residenciales en Medellín. La línea horizontal representa el valor de 2% para comparación (modificado de Isaza-Restrepo, Martínez, & Hidalgo, 2016).



4.2 A tener en cuenta

Los criterios propuestos para el riesgo aceptable pueden ser de utilidad para la planeación y estudios de mitigación contra fenómenos como deslizamientos e inundaciones y una ayuda para tomadores de decisiones para mejorar los servicios de gestión de riesgos y buscar una mejor planeación a los desarrollos urbanos.

En cuanto al riesgo admisible, en Colombia existe cierta claridad en cuanto al nivel de factor de seguridad aceptable para el diseño de obras de infraestructura y vivienda, sin embargo, no es igual en cuanto a la determinación del valor de referencia para la probabilidad de falla, y por tanto del riesgo. Obviamente, este no es un problema solo de Colombia, como se evidencia en la revisión presentada en este trabajo.

Referencias

- Bowles, D. (2007). Tolerable Risk For Dams: How Safe Is Safe Enough? *US Society on Dams Annual Conference*, (págs. 1-24). Philadelphia.
- Christian, J.T., Ladd, C.C., & Baecher, C.B. (1994). Reliability applied to slope stability analysis. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(12), 2180-2207.
- ERM. (1998). Landslide and Boulder Falls from Natural Terrain: Interim Risk Guidelines. GEO Report No. 75 (Vol. 75). (H. K. Geotechnical Engineering Office, Ed.) Hong Kong: ERM-Hong Kong Limited.
- Hidalgo, C.A. (2023). Riesgo admisible o aceptable para diseño de obras y análisis de riesgo. En P.A. Valencia, J.A. Vega y D. Valencia (Eds.), *Vulnerabilidad, Resiliencia y Riesgo de Desastres* (pp. 129-152). Medellín: Sello Editorial Universidad de Medellín.
- Isaza-Restrepo, P.A., Martínez, H.E., & Hidalgo, C.A. (2016, April). Methodology for quantitative landslide risk analysis in residential projects. *Habitat International*, 53, 403-412. doi: 10.1016/j.habitatint.2015.12.012

Conclusiones

Esta cartilla ha presentado un enfoque para dar a conocer el tema de la evaluación cualitativa y cuantitativa del riesgo por deslizamientos y avenidas torrenciales, y su incorporación en la gestión territorial. El ánimo de la cartilla es ayudar a comprender y gestionar los riesgos asociados a deslizamientos de tierra y avenidas torrenciales, con el objetivo de expandir el conocimiento y fortalecer la seguridad y la resiliencia en los territorios afectados.

A lo largo de la cartilla se han destacado los siguientes puntos clave:

- Comprender los deslizamientos y sus impactos. Es fundamental reconocer las causas de los deslizamientos y los daños económicos y sociales que generan. La preparación y la adopción de medidas preventivas a nivel comunitario e institucional son esenciales para minimizar las pérdidas y proteger a las personas y los bienes.
- Evaluación *ex post* y curvas de daño. El uso de datos recopilados después de un evento permite desarrollar herramientas como las curvas de daño, que son esenciales para estimar las pérdidas económicas y para planificar medidas preventivas más precisas. La evaluación *ex post* es una herramienta poderosa para anticipar los daños futuros y mejorar la gestión del riesgo.
- Delimitación de rondas hídricas y gestión del riesgo hidráulico. La delimitación de rondas hídricas es una estrategia crucial para la gestión del riesgo en áreas cercanas a cuerpos de agua. Sin embargo, es necesario mejorar la evaluación del riesgo hidráulico y su integración en las políticas de protección ambiental. El uso de herramientas más avanzadas y la incorporación de estudios de largo plazo permiten una gestión más eficaz de los riesgos en estos ecosistemas.
- Riesgo admisible o aceptable en obras de infraestructura. La cartilla también ha abordado la necesidad de definir criterios claros para aceptar o tolerar ciertos niveles de riesgo en el diseño de obras en zonas montañosas. El concepto de riesgo admisible y herramientas como las cartas F-N y el enfoque ALARP proporcionan un marco útil para la planificación y la evaluación de infraestructuras, y tienen en cuenta tanto la seguridad de las personas como las posibles pérdidas económicas.

Finalmente, esta cartilla hace un llamado a mejorar continuamente las herramientas de evaluación del riesgo mediante la incorporación de nuevas tecnologías y enfoques internacionales, y a fortalecer la colaboración entre instituciones y comunidades. La implementación efectiva de estos mecanismos es esencial para reducir el impacto de desastres naturales y garantizar un desarrollo territorial más seguro y sostenible.

Autores

César Augusto Hidalgo Montoya, Ph. D. Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín con doctorado y maestría en Geotecnia de Fundação Universidade de Brasília.

chidalgom@udemedellin.edu.co

Nini Johana Marín Rodríguez, Ph. D. Economista de la Universidad de Antioquia con doctorado en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, además cuenta con maestría en Economía de la Universidad de Antioquia.

njmarin@udemedellin.edu.co

Blanca Adriana Botero Hernández, Ph. D. Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín con doctorado en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.

babotero@udemedellin.edu.co

Juan Camilo Parra Toro, Ph. D. Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín con doctorado en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.

jcparra@elpoli.edu.co



Esta cartilla está diseñada para proporcionar una visión sencilla sobre la gestión del riesgo de deslizamientos y avenidas torrenciales, dirigida tanto a gestores del territorio, autoridades locales, estudiantes y profesionales del medio ambiente, como a comunidades ubicadas en zonas de riesgo. Su objetivo principal es brindar herramientas claras y prácticas para la evaluación y mitigación de estos riesgos, con el propósito de dar una mayor seguridad y resiliencia en las áreas afectadas.

Agradecimiento

El desarrollo de esta cartilla se enmarca dentro de los lineamientos y productos del programa de investigación “Vulnerabilidad, resiliencia y riesgo de comunidades y cuencas abastecedoras afectadas por fenómenos de deslizamientos y avalanchas”, código 1118-852-71251, proyecto “Funciones para estimación de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico debido a deslizamiento y avalanchas: Caso microcuencas piloto del suroeste Antioqueño”, **contrato 80740-492-2020** celebrado entre Fiduprevisora y la Universidad de Medellín, con recursos del Fondo Nacional de Financiamiento para la ciencia, la tecnología y la innovación, “Fondo Francisco José de Caldas”.