



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA

**Canada**



**FOREST  
TRENDS**

GUÍAS PARA ELABORAR ESTUDIOS DEFINITIVOS  
DE INFRAESTRUCTURA NATURAL (IN)  
CON ENFOQUE DE GESTIÓN DEL RIESGO  
DE DESASTRES (GRD)

# Guía para el diseño de sistemas de monitoreo de la efectividad



**Infraestructura  
Natural**  
para la Seguridad Hídrica



Imperial College  
London

#### Autores

Jorge D. Abad<sup>1</sup>, Lucas Domínguez<sup>1</sup>, Edgardo Latrubesse<sup>1</sup>, Tania Rojas<sup>1</sup>, Deisy Arriola<sup>1</sup> y Tainá Suizu<sup>1</sup>

#### Colaboradores

Javier Antiporta<sup>2/3</sup>, Vivien Bonnesoeur<sup>2/3</sup>, José Cuadros<sup>2/3</sup>, Zoila Yessica Armas Benites<sup>4</sup>, Abel Aucasime Orihuela<sup>4</sup>, Alex Roger Zambrano Ramírez<sup>4</sup>, Claudia Lebel Castillo, Boris F. Ochoa-Tocachi<sup>3/4/5</sup>, Francisco Román<sup>2/3</sup>, Gena Gammie<sup>4</sup> y Emerson Conrad Salinas Caparachin<sup>1</sup>

#### Supervisión editorial

Gabriel Rojas Guillén<sup>4</sup>

#### Cuidado de edición



#### Diseño y diagramación

Roger Ramirez Miranda

#### Corrección de estilo

Antonio Luya Cierzo

#### Foto de portada

Forest Trends

#### Forest Trends Association

RUC: 20603007396

Calle Los Ángeles 395, Miraflores

Lima, Perú

Desarrollo de contenidos: julio del 2021 a julio del 2023

Ira edición: julio del 2024

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú n.º 2025-00607

#### Afiliaciones

<sup>1</sup> Red YAKU, Lima - Perú

<sup>2</sup> Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN), Lima - Perú

<sup>3</sup> Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (iMHEA), Lima - Perú

<sup>4</sup> Forest Trends, Washington D. C. - Estados Unidos

<sup>5</sup> ATUK Consultoría Estratégica, Cuenca - Ecuador

#### Agradecimientos

Agradecemos la valiosa revisión de quienes ayudaron con sus aportes o gestión: Fernando Momiy<sup>4</sup> y Fernando León<sup>4</sup>.

Esta publicación ha sido posible gracias al apoyo del pueblo de los Estados Unidos de América a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y el Gobierno de Canadá. Los puntos de vista/opiniones de esta publicación son responsabilidad de Forest Trends y no reflejan necesariamente los de USAID, los del Gobierno de los Estados Unidos y el Gobierno de Canadá.



# Índice

## Presentación

---

### 1. Consideraciones generales

- 1.1. Objetivo
- 1.2. Alcance
- 1.3. Ámbito de intervención de la Autoridad para la Reconstrucción con Cambios
- 1.4. Lineamientos de la Reconstrucción con Cambios para la incorporación de la IN
  - 1.4.1. Consideraciones de la Reconstrucción con Cambios
  - 1.4.2. Medidas de intervención de IN en la RCC
- 1.5. Mecanismos biofísicos de las intervenciones de IN
  - 1.5.1. Aumento de capacidad de almacenamiento
  - 1.5.2. Aumento de la rugosidad del suelo
  - 1.5.3. Aumento de pérdidas de flujos de agua
  - 1.5.4. Desincronización de los caudales máximos de los flujos superficiales y tributarios
  - 1.5.5. Estabilización de pendientes
  - 1.5.6. Reducción de la velocidad y nivel de los flujos

### 2. Procesos de inundaciones, erosiones superficiales y movimientos de masa

- 2.1. Niveles de diseño de monitoreo
- 2.2. Metodología de evaluación del riesgo para medir la efectividad de las intervenciones de IN
  - 2.2.1. Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales (Cenepred)

### 3. Proceso metodológico de evaluación de la efectividad de las intervenciones bajo un enfoque de evaluación de riesgos

- 3.1. Fase 1: Revisión preliminar
  - 3.1.1. Recopilación de información preliminar y descripción de las características biofísicas de la cuenca
- 3.2. Fase 2: Visitas de campo
  - 3.2.1. Mapeo georreferenciado de actores locales
  - 3.2.2. Visita a las zonas de intervención y mapeo visual de las condiciones del entorno
  - 3.2.3. Informe de visita de inspección
- 3.3. Fase 3: Diseño del sistema de monitoreo
  - 3.3.1. Definición de mecanismos asociados a fenómenos y medidas de intervención
  - 3.3.2. Definición de variables asociadas a fenómenos e intervenciones
  - 3.3.3. Diseño experimental para evaluar efectividad
  - 3.3.4. Definición del equipamiento necesario por nivel de monitoreo
  - 3.3.5. Lineamientos para la identificación y distribución de sitios de monitoreo
  - 3.3.6. Determinación de la frecuencia de toma de datos
- 3.4. Fase 4: Evaluación de la efectividad de las intervenciones
  - 3.4.1. Adaptación de evaluación de riesgos y monitoreo de efectividad de las intervenciones (CENEPRED-IN)
  - 3.4.2. Componente cualitativo: percepción social
  - 3.4.3. Ejemplos de la guía CENEPRED-IN para inundaciones, erosiones superficiales y movimientos de masa

### 4. Sinergia con sistemas y estaciones de monitoreo existentes

- 4.1. Alcance de las sinergias en el sistema de monitoreo
- 4.2. Mapeo de instituciones involucradas en la generación de información y monitoreo de efectividad de las intervenciones de IN
- 4.3. Mapeo y diagnóstico de sistemas existentes de instituciones involucradas en la generación de información y monitoreo de efectividad de las intervenciones de IN

### 5. Aplicación de la guía en las etapas de inversión de proyectos

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

### ANEXOS

#### Anexo A. Cuenca saludable, conectividad y servicios ecosistémicos

- 1. Definición de cuenca saludable
- 2. Equilibrio y conectividad hidrosedimentológica
- 3. Línea de base a nivel de cuenca
  - 3.1. Hidrología
  - 3.2. Geomorfología
  - 3.3. Conectividad hidrosedimentológica
- 4. Servicios ecosistémicos de control de inundaciones y movimientos de masa

## BIBLIOGRAFÍA

---

### ANEXOS

#### Anexo B. Variables biofísicas y métodos de medición

- 1. Variables base y métodos de medición
  - 1.1. Cartografía
  - 1.2. Clima
  - 1.3. Cobertura y uso de la tierra
- 2. Variables por procesos y métodos de medición
  - 2.1. Inundaciones pluviales y fluviales
  - 2.2. Erosión superficial hídrica
    - 2.2.1. Procesos y mecanismos formativos
    - 2.2.2. Tipos de erosión hídrica: escalas hidrológicas y geomorfológicas
    - 2.2.3. Métodos de medición de erosión superficial
  - 2.3. Movimientos de masa: deslizamientos
    - 2.3.1. Procesos y mecanismos formativos
    - 2.3.2. Metodologías propuestas
    - 2.3.3. Métodos de medición
  - 2.4. Movimientos de masa: flujo de escombros o huacos

## Índice de figuras

---

**Figura 1.** Ámbito de intervención de intervenciones de IN en el Marco de la Formulación de las Soluciones Integrales de la Reconstrucción con Cambios

**Figura 2.** Prácticas de forestación con especies nativas

**Figura 3.** Uso de terrazas de piedra de formación lenta en las comunidades de Huancaya y Vitis, en la cuenca Cañete

**Figura 4.** Esquema conceptual de metodología

**Figura 5.** Resumen del método Cenepred (2015)

**Figura 6.** Matriz de riesgos sobre la base de la cuantificación de peligrosidad y intervenciones de IN para control de inundaciones y movimientos de masa

**Figura 7.** Flujo del proceso de evaluación y diseño de monitoreo de la efectividad de las intervenciones de IN para control de inundaciones y movimientos de masa

**Figura 8.** Mecanismos identificados por intervención de IN

**Figura 9.** Ejemplo de comparación de variables entre un (1) sitio impacto y dos (2) sitios de control

**Figura 10.** Propuesta conceptual del método CENEPRED-IN

**Figura 11.** Comparación directa entre el planteo de peligrosidad por parte del CENEPRED (2015) y CENEPRED-IN.

**Figura 12.** Comparación de riesgos sobre la base de la matriz propuesta por el CENEPRED (2015) para inundaciones. Izquierda: CENEPRED-IN, derecha: CENEPRED

**Figura 13.** Comparación de riesgos sobre la base de la matriz propuesta por el CENEPRED (2015). Erosión superficial. Izquierda: CENEPRED-IN, derecha: CENEPRED

**Figura 14.** Comparación de riesgos sobre la base de la matriz propuesta por el CENEPRED (2015). Izquierda: CENEPRED-IN, derecha: CENEPRED.

**Figura 15.** Comparación de riesgos sobre la base de la matriz propuesta por el CENEPRED (2015) para erosión superficial. Izquierda: CENEPRED-IN, derecha: CENEPRED

**Figura 16.** Aplicación de la guía metodológica en las etapas de la inversión

## Anexo A

---

**Figura 1.** Parámetros dominantes en una cuenca

**Figura 2.** Respuesta de una cuenca ante una lluvia

**Figura 3.** Controles en la geometría de entornos aluviales

**Figura 4.** Efecto de carga de sedimentos en la planimetría de ríos aluviales

**Figura 5.** Variables determinantes en la formación de la estructura aluvial

**Figura 6.** Estimación de la función de mitigación de inundaciones del ecosistema en la parte alta de la cuenca Yangtze

## Anexo B

---

**Figura 1.** Modelos Digitales de Elevación a diferentes resoluciones del Callejón Rojas

**Figura 2.** Patrones de drenaje controlados por rasgos de la estructura geológica y geomorfológica

**Figura 3.** Clasificación de la densidad del drenaje

**Figura 4.** Precipitación anual estimada por (a) HYBAM, (b) TMPA, (c) CMORPH y (d) PERSIANN sobre la región oeste de la cuenca amazónica para el periodo de 2003 a 2009

**Figura 5.** Pluviómetro clásico compuesto de embudo y estructura de almacenamiento

**Figura 6.** Señal de precipitaciones en cuenca Tambo en línea negra continua datos de campo y a trazos logrados a través de TRMM. Fuente: estación meteorológica con almacenamiento de datos

**Figura 7.** Estación pluviométrica basculante

**Figura 8.** Sistema conectado de medición de precipitaciones en el Reino Unido e Irlanda durante el 30 de octubre del 2000

**Figura 9.** Hidrogramas de caudal observados y simulados en la estación Requena (río Napo), de enero del 2003 a diciembre del 2009. Los datos alcanzados son comparados con diferentes fuentes: (a) datos de lluvias de HYBAM, (b) TMPA, (c) CMORPH y (d) PERSIANN y (e) ubicación de la cuenca del Napo

**Figura 10.** Mapa de precipitación acumulada diaria (mm/día) durante el huracán Katrina el 29 de agosto de 2005 de PERSIANN-CDR. Los píxeles negros y grises muestran bloqueos de radar y precipitación cero

**Figura 11.** Muestra de la NASA's Level 3 Integrated Multi-Satellite Retrievals para GPM

**Figura 12.** Red de estaciones a nivel nacional utilizadas para la elaboración de PISCO con porcentaje de información por estación durante el periodo 1981-2016

**Figura 13.** Estación meteorológica con conjunto de sensores integrados inalámbricos Davis Vantage Pro2

**Figura 14.** Diseño de tanque evaporímetro

**Figura 15.** Enlace entre las actividades antropogénicas y el uso y cobertura de suelo

**Figura 16.** Representatividad del porcentaje de cobertura de suelo, biomasa, infraestructura y deforestación presente en las cuencas fluviales del ecosistema de Cerrado

**Figura 17.** Caracterización de la cobertura de suelo en América del Sur, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos

**Figura 18.** Proceso metodológico para generar información de cobertura terrestres utilizando la leyenda Corine Land Cover

**Figura 19.** Reglas limnimétricas colocadas en una estación de medición de superficie de agua sobre la región de Pucallpa

**Figura 20.** Ajuste matemático de  $h$  vs  $Q$

**Figura 21.** Estación de medición con equipamiento láser

**Figura 22.** Estación de medición de niveles de crecida. Izquierda: esquema de estación, derecha: ejemplo de instalación en campo

**Figura 23.** Marca de crecida máxima alcanzada mediante el uso de la estación de cresta

**Figura 24.** Correntómetro Price AA

**Figura 25.** OTT correntómetro electromagnético

**Figura 26.** Velocímetro acústico Doppler (ADV), modelo FlowTracker 2

**Figura 27.** Resultados alcanzados mediante el uso de FlowTracker

**Figura 28.** Esquema de muestreo basado en el método de sección media. Siendo 1, 2 y 3 las verticales de medición,  $b_1$ ,  $b_2$  y  $b_3$  la distancia de la margen y  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$  profundidades en las verticales de medición

**Figura 29.** Medición mediante vadeo sobre la sección transversal de control

**Figura 30.** Dos (2) perfiladores de corriente acústica Doppler ampliamente usados. RD Instruments Rio Grande (izquierda) y SonTek S5 (derecha)

**Figura 31.** Mapa de velocidades medidas sobre un transecto con equipos ADCP río Grande

**Figura 32.** Trayectoria típica de un bote de medición con ADCP

**Figura 33.** Velocidades superficiales del flujo capturadas sobre un estribo mediante la técnica LSPIV

**Figura 34.** Vertedero triangular de pared delgada

**Figura 35.** Estación de aforo de caudal líquido y niveles  
**Figura 36.** Captura de sedimentos en suspensión: muestreador de sedimentos en suspensión USGS  
**Figura 37.** Mapa de concentraciones de sedimento en suspensión  
**Figura 38.** Procesos de erosión hídrica  
**Figura 39.** Fotografía ilustrativa de erosión laminar superficial en el distrito de Huancaya, cuenca Cañete  
**Figura 40.** Fotografía ilustrativa de erosión en surcos y ravinadas  
**Figura 41.** Fotografía ilustrativa de erosión en cárcavas en la cuenca media del río Cañete  
**Figura 42.** Formación de cárcavas y erosión retrógrada en el tiempo  
**Figura 43.** Tipos de cárcavas en cuanto a su posición en las pendientes a) conectada, b) no conectada, c) mixta  
**Figura 44.** Equipos fotográficos y drones para el relevamiento en campo y caracterización topográfica  
**Figura 45.** Demostración de la técnica de mediciones con altura de pines  
**Figura 46.** Parcela de captura de agua y sedimento  
**Figura 47.** Simulador de precipitaciones, caja de sedimentos puntos fijos y estructuras de concreto (puntos de referencia fijos)  
**Figura 48.** Localización de los seis (6) escáneres LiDAR en la estación de medición  
**Figura 49.** Esquema de parte de una cárcava  
**Figura 50.** Localización de posibles seguimientos de cárcavas  
**Figura 51.** Esquemas de conexión directa (derecha), indirecta (centro) y nula (izquierda)  
**Figura 52.** Zona de estudio del reciente trabajo. Uso de drones para el relevamiento  
**Figura 53.** Esquema ilustrativo de los diferentes tipos de movimiento de masa  
**Figura 54.** Deslizamiento traslacional en suelo, roca y tipo cuña  
**Figura 55.** Deslizamiento rotacional en suelo y roca  
**Figura 56.** Tipos de deslizamientos complejos  
**Figura 57.** Factores y riesgos asociados a cada uno de ellos  
**Figura 58.** Componentes del deslizamiento  
**Figura 59.** Variables que influyen en el comportamiento de las rocas.  
**Figura 60.** Esquemas del nivel freático en un talud según la permeabilidad y distribución de los materiales  
**Figura 61.** Metodología para la zonificación de los peligros geológicos  
**Figura 62.** Diagrama de instalación de un extensómetro horizontal  
**Figura 63.** Extensómetro vertical sencillo para medir el desplazamiento de la superficie de falla  
**Figura 64.** Esquema de la medición del desplazamiento en la superficie de falla, donde se emplea un extensómetro vertical  
**Figura 65.** Diagrama de un extensómetro multipunto  
**Figura 66.** Inclímetro portátil  
**Figura 67.** Tubo guía PVC para sonda inclinométrica  
**Figura 68.** Esquema de instalación e interpretación de mediciones con sonda de inclinómetro  
**Figura 69.** Principio de funcionamiento del dispositivo TDR de reflectometría  
**Figura 70.** Esquema del sistema TDR  
**Figura 71.** Esquema del cable coaxial del sistema TDR  
**Figura 72.** Piezómetro sencillo de cabeza abierta  
**Figura 73.** Piezómetros de cabeza abierta  
**Figura 74.** Piezómetro de Casagrande  
**Figura 75.** Piezómetro de hilo vibrátil  
**Figura 76.** Esquema de un tensiómetro

**Figura 77.** Esquema de fibra óptica patentado por FISO

**Figura 78.** Flujos de escombros y sus principales zonas

**Figura 79.** Pérdidas en la infraestructura del inadecuado ordenamiento territorial, que pone en riesgo la seguridad de las personas y los expone al impacto de los huacos en las quebradas de Chosica

**Figura 80.** Parámetros para monitorear en flujos de escombros

**Figura 81.** Mecanismos de transporte de sedimentos provocados por un cauce

**Figura 82.** Huaicos de 1987 en la zona de Chosica, río Rímac

**Figura 83.** Diferencias en mediciones topográficas en diferentes zonas (a, c y e: evento 2-evento 1; b, d y f: evento 3-evento 2)

**Figura 84.** (a) Cono de deposición en Brienz (Glyssibach, agosto 2005), (b) Cono de deposición en Glattbach (agosto 2005) y (c) Diferencia de mediciones continuas con LiDAR en la zona de deposición de Glattbach

**Figura 85.** Imágenes multitemporales de flujo de escombros en Iruya, Salta, Argentina (7 de febrero de 1999)

**Figura 86.** Ejemplos de mediciones de profundidad de flujos de escombros en Lattenbach (Austria) y Illgraben (Suiza)

**Figura 87.** Mediciones de profundidad del flujo de escombros en dos estaciones distintas

**Figura 88.** (a) Cuenca de Lattenbach (Austria), (b) equipos y vista de la quebrada intervenida, (c) vista en planta de la quebrada mostrando la evolución temporal de las velocidades superficiales (m/s), la profundidad del flujo (m) para el evento del 10 de septiembre del 2016

**Figura 89.** Velocidades superficiales usando la técnica de LSPIV para (a) frente, (b) medio, y (c) cola del flujo de escombros

**Figura 90.** Ejemplos de mediciones de sedimentos y del flujo de escombros (Jiangia Gou, China). Parámetros extraídos son: densidad de la mezcla, concentración de sedimentos y parámetros reológicos

## Índice de tablas

**Tabla 1.** Mecanismos identificados por intervención de IN

**Tabla 2.** Descripción resumen de las características de cada categoría de monitoreo.

**Tabla 3.** Niveles de monitoreo para inundaciones

**Tabla 4.** Niveles de monitoreo para procesos erosivos

**Tabla 5.** Niveles de monitoreo para deslizamientos

**Tabla 6.** Niveles de monitoreo de flujos de escombros

**Tabla 7.** Valoración de riesgos acorde a Cenepred (2015)

**Tabla 8.** Fuentes y enlaces de descarga de la información sugerida para descripción biofísica de la cuenca

**Tabla 9.** Variables base identificadas

**Tabla 10.** Variables identificadas por proceso y el tipo de intervención

**Tabla 11.** Niveles de monitoreo para terrazas de formación lenta

**Tabla 12.** Niveles de monitoreo para “Enriquecimiento de suelo”

**Tabla 13.** Niveles de monitoreo para construcción de zanjas de infiltración

**Tabla 14.** Niveles de monitoreo para “construcción de qochas”

**Tabla 15.** Niveles de monitoreo para forestación con especies nativas

**Tabla 16.** Niveles de monitoreo para “Revegetación con especies nativas”

**Tabla 17.** Niveles de monitoreo para diques de control de cárcavas

**Tabla 18.** Descripción de las tecnologías utilizadas en la medición y monitoreo de condiciones topográficas

**Tabla 19.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de terrazas de formación lenta

**Tabla 20.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de enriquecimiento del suelo

**Tabla 21.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de las zanjas de infiltración

**Tabla 22.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de construcción de qochas

**Tabla 23.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de Forestación con especies nativas

**Tabla 24.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de revegetación con especies nativas

**Tabla 25.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de diques para control de cárcavas

**Tabla 26.** Selección de descriptores para evaluar efectividad de intervenciones en inundaciones

**Tabla 27.** Comparación de objetivos esperados

**Tabla 28.** Selección de descriptores para evaluar efectividad de intervenciones en inundaciones

**Tabla 29.** Comparación de objetivos esperados

**Tabla 30.** Selección de descriptores para evaluar efectividad de intervenciones en deslizamientos

**Tabla 31.** Comparación de objetivos esperados

**Tabla 32.** Selección de descriptores para evaluar efectividad de intervenciones en inundaciones

**Tabla 33.** Comparación de objetivos esperados. Fuente: elaboración propia.

**Tabla 34.** Mapeo de principales instituciones gubernamentales relacionadas al monitoreo de efectividad de las intervenciones de IN

**Tabla 35.** Mapeo y diagnóstico de sistemas de información existentes relacionados al monitoreo de efectividad de las intervenciones sobre la IN

**Tabla 36.** Aplicación de la guía metodológica en las fases de la inversión

**Tabla 37.** Ejemplo: matriz de marco lógico para proyectos de IN-GRD

## Anexo B

---

**Tabla 1.** Clasificación de la textura y tamaño de partículas

**Tabla 2.** Variables identificadas por proceso

**Tabla 3.** Resumen de variables para caracterizar las inundaciones

**Tabla 4.** Cuadro tipo de identificación de cárcavas

**Tabla 5.** Impactos desarrollados por la presencia de cárcavas

**Tabla 6.** Clasificación de los tipos de fallas en laderas

**Tabla 7.** Resumen de los principales factores y riesgos asociados al esfuerzo y resistencia

**Tabla 8.** Coeficientes de seguridad a emplear en el análisis de taludes

**Tabla 9.** Factores que influyen en los deslizamientos

**Tabla 10.** Geometría promedio y características para la identificación del deslizamiento

**Tabla 11.** Métodos y técnicas para el estudio de deslizamientos

**Tabla 12.** Características de las técnicas topográficas clásicas

**Tabla 13.** Características generales de la instrumentación por piezómetros

**Tabla 14.** Descripción de las tecnologías utilizadas en la medición y monitoreo de condiciones topográficas

# Presentación

Después del evento de El Niño costero de 2016-2017, el Perú, a través de la Autoridad para la Reconstrucción con Cambios (ARCC), impulsa la ejecución de soluciones integrales con el objetivo de reducir el peligro de inundaciones y movimientos de masa en los ríos y quebradas más vulnerables. Dichas soluciones buscan involucrar intervenciones sobre la infraestructura natural (IN) para recuperar ecosistemas degradados donde se encuentran los factores desencadenantes de los peligros de inundaciones y movimientos.

El Proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica (proyecto NIWS) busca incorporar la IN en los planes y estrategias clave y el diseño de portafolios de proyectos de inversión con el objeto de emplear soluciones sostenibles para la seguridad hídrica y gestión del riesgo de desastres.

Es la primera vez en Perú que el gobierno nacional enfrenta el problema de riesgos de desastres y fenómenos naturales incorporando de manera técnica y sistemática los conceptos y datos relacionados a IN en complemento con obras de prevención de inundaciones tradicionales. Esta incorporación es un reto importante en el diagnóstico, la formulación y ejecución de intervenciones y, finalmente, el monitoreo para rendir cuentas sobre la efectividad del proyecto a reducir riesgos.

La presente guía tiene por objetivo presentar los lineamientos, criterios y recomendaciones para diseñar sistemas de monitoreo que permitan evaluar la efectividad de las intervenciones asociadas a IN en el ámbito de intervención de la Autoridad para la Reconstrucción con Cambios. Primero, se identifican los mecanismos asociados a las intervenciones de IN propuestas en los planes integrales de Reconstrucción con Cambios, que reducen los riesgos de inundaciones, erosiones superficiales y movimientos de masa. Luego, se establecen los criterios del diseño del monitoreo, tanto a nivel de intervenciones como por procesos (inundaciones, erosiones superficiales y movimientos de masa), a diferentes escalas espaciales (microcuenca, subcuenca y cuenca) y temporales (meses, años). Después, sobre la base del Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2.º versión, elaborado por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (Cenepred), se presenta una adaptación con la incorporación al ambiente de intervenciones de IN para evaluar su efectividad. Finalmente, también se describen algunos ejemplos conceptuales y casos donde se discuten los alcances y limitaciones del diseño, presentando un espacio de mejora continua. Asimismo, también se desarrolla una propuesta de sinergia con instituciones y sistemas existentes para la generación de información y monitoreo de efectividad de las intervenciones de IN, a cargo de la Autoridad Nacional de Infraestructura (ANIN), en el marco del acuerdo de Gobierno a Gobierno entre el Perú y el Reino Unido.



# Consideraciones generales

### 1.1. Objetivo

Orientar el proceso de diseño del sistema de monitoreo para medir la efectividad de los proyectos de infraestructura natural (IN) en el marco de la Gestión del Riesgo de Desastres.

### 1.2. Alcance

Esta guía está dirigida a los especialistas técnicos de las entidades públicas y privadas que se encargan de gestionar proyectos de infraestructura natural como parte de los procesos de elaboración de estudios de preinversión y en el desarrollo de estudios definitivos de proyectos de inversión para la recuperación de servicios ecosistémicos de regulación de riesgos naturales.

### 1.3. Ámbito de intervención de la Autoridad para la Reconstrucción con Cambios

La Autoridad para la Reconstrucción con Cambios (ARCC) busca impulsar la gestión del riesgo frente al cambio climático, fortalecer la resiliencia de las comunidades y posibilitar la mitigación y respuesta rápida frente al riesgo de inundación fluvial, aluvial y movimientos de masa futuros. La Figura 1 muestra las cuencas hidrográficas dentro del ámbito de intervención del Plan Integral de la Reconstrucción con Cambios (PIRCC) donde se ejecutarán obras de rehabilitación, reposición, reconstrucción y construcción de la infraestructura de uso público comprometida como consecuencia de El Niño costero (Ley n.º 30556).

Figura 1. Ámbito de intervención de intervenciones de IN en el Marco de la Formulación de las Soluciones Integrales de la Reconstrucción con Cambios



Fuente: Elaboración propia, sobre la base del Proyecto NIWS y el PIRCC



La mayoría de las intervenciones del PIRCC se concentran en las regiones de Piura, La Libertad, Lambayeque, Áncash y Lima, debido a la ocurrencia de mayores daños durante El Niño costero 2017, inclusive superando los daños y pérdidas ocasionados en 1982-83 y 1997-98. Por eso, el alcance del PIRCC es impulsar la adopción de enfoques de desarrollo urbano sostenible y de gestión de riesgo frente al cambio climático que sientan las bases para enfrentar futuros eventos. En primera instancia, el PIRCC incorpora proyectos que tienen por objetivo rehabilitar y reemplazar la infraestructura pública impactada, dañada o destruida como consecuencia de los embates de El Niño costero. Segundo, el PIRCC contempla proyectos orientados a evitar la futura reedición de los daños experimentados como consecuencia de El Niño costero. Estos últimos engloban iniciativas preventivas para la gestión del riesgo de desastres, como construcción de infraestructura de protección y mitigación para minimizar el riesgo de futuras inundaciones, erosión hídrica y movimientos de masa.

#### 1.4. Lineamientos de la Reconstrucción con Cambios para la incorporación de la IN

El Proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica (proyecto NIWS) busca incorporar la IN en los planes y estrategias clave y el diseño de portafolios de proyectos de inversión, con el propósito de emplear soluciones sostenibles para la seguridad hídrica y gestión del riesgo de desastres. De acuerdo con el D. S. n.º 017-2018-MINAM, se aprobaron los lineamientos para la incorporación de criterios sobre IN y gestión del riesgo en un contexto de cambio climático, en el marco de la Reconstrucción con Cambios (RCC). En general, las medidas de IN contribuyen a reducir el impacto de las inundaciones (regulación de caudales) y deslizamientos (control de la erosión del suelo), entre otros peligros naturales, y son complementarias entre sí y con otros tipos de infraestructuras.

##### 1.4.1. Consideraciones de la Reconstrucción con Cambios

La incorporación de la IN en las intervenciones del RCC busca promover el aumento de la resiliencia de la infraestructura física (gris) y las poblaciones en un contexto de

cambio climático. Se consideran las medidas de IN para la reducción y gestión de riesgos de inundaciones y movimientos de masa en el desarrollo de la infraestructura física de las intervenciones de reconstrucción mediante inversiones (IRI) e intervenciones de construcción (IC). Por un lado, la identificación e implementación de las medidas IRI es coordinada con el Cenepred y comunicada a la ARCC, el Ministerio del Ambiente y el ente rector del Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres (Sinagerd). Por otro lado, las medidas IC deben considerar el análisis de escenarios futuros de la variabilidad y cambio climáticos generados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi).

##### 1.4.2. Medidas de intervención de IN en la RCC

Según las orientaciones para el desarrollo de IN, el Reglamento del Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones indica que las intervenciones deben asegurar espacios de conservación de los beneficios y funciones de los ecosistemas a través de la provisión de servicios ecosistémicos, tales como el mantenimiento de la biodiversidad, la seguridad alimentaria, conservación de suelos, seguridad hídrica, recuperación de hábitats, mitigación de peligros, regulación hídrica y control de erosión de suelos. Entre las intervenciones planteadas se contempla la recuperación de la cobertura vegetal nativa, restauración de ecosistemas, implementación de sistemas sostenibles silvopastoriles y agroforestería y protección y manejo de cuerpos de agua, como lagunas y qochas, entre otras.

El D. S. n.º 017-2018-MINAM menciona las funciones que desempeña cada una de las intervenciones propuestas. La forestación y revegetación con especies nativas y la construcción de diques para control de cárcavas contribuyen a reducir la vulnerabilidad a la erosión y deslizamientos; las terrazas de formación lenta contribuyen a controlar el proceso erosivo del suelo e incrementar la infiltración del agua en el suelo; el enriquecimiento del suelo ayuda a mejorar la capacidad de retención de humedad en el suelo y atenuar los efectos de lluvias intensas y sequías; las zanjas de infiltración disminuyen la escorrentía del agua de lluvias, por ende, reducen la erosión hídrica del suelo; la construcción

de qochas (microreservorios permeables, también llamadas cochas) incrementan la disponibilidad de agua; y las barreras rompevientos reducen la erosión eólica del suelo, conservando la humedad del suelo, regulando las condiciones climáticas y mejorando el paisaje.

#### 1.5. Mecanismos biofísicos de las intervenciones de IN

Entre las estrategias para atenuar los riesgos y degradación ambiental se encuentran las aplicaciones de la ingeniería agrohidrológica (Gaspari *et al.*, 2013), donde estas medidas pueden ser de tipo activas (reducir procesos de inundación, erosión, sedimentación y demás) o pasivas (reducir o controlar las actividades degradativas). En general, sobre la base

del uso racional de los recursos naturales, como el agua y suelo, las intervenciones contemplan los siguientes objetivos (Mintegui Aguirre & Robredo Sánchez, 1994):

- La retención del suelo mediante el control de erosión.
- La regulación de avenidas y transporte de material provocado por las mismas, incluyendo la sedimentación consecuente.
- La provisión hídrica.

Como resultado de la revisión bibliográfica, la Tabla 1 describe los principales mecanismos mediante los que las intervenciones sobre la IN propuestas en los planes integrales de RCC, reducen los riesgos de inundaciones, erosión superficial y movimientos de masa.

Tabla 1. Mecanismos identificados por intervención de IN

Medida	Servicios de aporte	Mecanismos
Forestación <sup>1</sup> con especies nativas	Control de erosión de suelos Regulación hídrica	Aumento de la rugosidad del suelo Aumento de pérdidas de flujos de agua Estabilización de pendientes Reducción de la velocidad y nivel de los flujos
Revegetación con especies nativas	Control de erosión de suelos Regulación hídrica	Aumento de la rugosidad del suelo Aumento de pérdidas de flujos de agua
Diques para control de cárcavas	Control de erosión de suelos Regulación hídrica Control de movimientos de masa	Estabilización de pendientes Reducción de la velocidad y nivel de los flujos
Instalación de terrazas de formación lenta	Control de erosión de suelos	Desincronización de los caudales máximos de los flujos superficiales y tributarios Reducción de la velocidad y nivel de los flujos
Enriquecimiento del suelo	Control de erosión de suelos	Aumento de la rugosidad del suelo Aumento de pérdidas de flujos de agua
Construcción de zanjas de infiltración	Control de erosión de suelos Regulación hídrica	Aumento de pérdidas de flujos de agua Reducción de la velocidad y nivel de los flujos
Construcción de qochas	Regulación hídrica	Aumento de capacidad de almacenamiento Reducción de la velocidad y nivel de los flujos

<sup>1</sup> Establecimiento de cobertura forestal en forma de plantaciones o mediante la regeneración natural en zonas que en el pasado tuvieron o no bosques. Si en un pasado reciente existían bosques que fueron deforestados, hablamos de reforestación, sea con las mismas especies de árboles u de otras especies.

### I.5.1. Aumento de capacidad de almacenamiento

El aumento de la capacidad de almacenamiento de agua en los suelos puede lograrse a través de la modificación de la estructura particular y textura del suelo. Un mayor contenido de materia orgánica y el uso de plantas con raíces más profundas ayudará a reducir y a recuperarse de la compactación de los suelos. Además, la creación de un almacenamiento temporal, como estanques o *qochas* o reconectando llanuras de inundación activas, permitirá que se almacene agua de escorrentía o lluvia durante el evento, la cual se vaciará lentamente.

La mejora de la retención de humedad del suelo promueve la productividad del suelo agrícola y la retención de nutrientes. En el país, las prácticas ancestrales, como la siembra y cosecha de agua en las cabeceras de cuenca, promueven el aseguramiento de disponibilidad hídrica. Varias de estas prácticas están basadas en desviar el excedente de agua durante las estaciones lluviosas hacia el suelo, aprovechando y aumentando su capacidad de almacenamiento (Ochoa-Tochachi *et al.*, 2019). De esta manera, se controla el impacto de las inundaciones al reducir el flujo de agua.

### I.5.2. Aumento de la rugosidad del suelo

La rugosidad del suelo, definida como las irregularidades de la superficie del suelo debido a la textura de este, los agregados, los fragmentos de roca y la gestión de los suelos, juega un rol importante en la capacidad de almacenamiento superficial, la infiltración, el flujo superficial y, en última instancia, el desprendimiento y la erosión de sedimentos (Thomsen *et al.*, 2015). Las simulaciones de lluvia desarrolladas por Vermang *et al.* (2015) demostraron tiempos más largos para iniciar la escorrentía con un aumento de la rugosidad de la superficie del suelo, lo que se atribuye a una disminución de la descomposición de los elementos de rugosidad más grandes en superficies más rugosas, manteniendo alta la tasa de infiltración. Esto quiere decir que la alta rugosidad de la superficie del suelo reducirá la escorrentía; sin embargo, la rugosidad aleatoria solo es importante para influir en las tasas de escorrentía y el tiempo para iniciar esta, pero no para influir en la transferencia de sedimentos a través de las tasas de pérdida de suelo.

El estudio de Zhao *et al.* (2019) indicaron que el volumen de escorrentía y la carga de sedimentos en una parcela desnuda fueron mayores que en parcelas cubiertas de vegetación bajo intensidades de lluvia diferentes. Aquí, el uso de especies nativas mostró un mejor desempeño para el control de la pérdida de suelo, con una reducción del 87,88 % al 99,11 %. Por lo tanto, la cobertura vegetal representa un factor estabilizador ante mecanismos torrenciales, ya que contribuye a incrementar la infiltración (aumentando la porosidad del suelo) y disminuir la velocidad de la lámina de escorrentía (incrementando la rugosidad de la superficie donde escurre) (Gaspari *et al.*, 2013). Por tanto, las prácticas de forestación proporcionan una mayor rugosidad de la llanura aluvial que permitiría disipar la energía y el impulso de una ola de inundación, si se plantan para obstruir vías de flujo significativas.

### I.5.3. Aumento de pérdidas de flujos de agua

La vegetación actúa como una capa protectora y amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Las hojas y tallos absorberán parte de la energía de las precipitaciones y escorrentía, contribuyendo a la resistencia mecánica del suelo (Morgan, 1997). Las prácticas agrícolas que ayudan a mejorar la estructura del suelo, reducir la compactación del suelo y el aumento del contenido de materia orgánica, son actividades que generan un aumento de la cantidad de agua que se drena (infiltra) en el suelo o se pierde en la atmósfera a través de la evapotranspiración. Además, las medidas de gestión de las cabeceras agrícolas pueden ralentizar los flujos y ayudar a atrapar los sedimentos antes de que entren en un curso de agua (Figura 2).

Por otro lado, la construcción de zanjas de infiltración ayuda a contrarrestar la erosión de los suelos mediante la intercepción de la escorrentía superficial del agua.

### I.5.4. Desincronización de los caudales máximos de los flujos superficiales y tributarios

Disminuir la velocidad de un cauce tributario puede reducir significativamente la escorrentía y los picos de inundación aguas abajo. Evans (2006) evidenció que desviar los cursos de agua a los estanques de almacenamiento podría ayudar a reducir los problemas de inundaciones locales, aunque también se requiere de una adecuada gestión a largo plazo

Figura 2. Prácticas de forestación con especies nativas



debido a la acumulación de sedimentos. Es así como las terrazas, franjas aradas y crestas ayudan a reducir o desviar la escorrentía.

Las terrazas de formación lenta (Figura 3), constituidas por un camellón y un canal de tierra, ayudan a que el agua que escurre por el suelo sea interceptada permitiendo su infiltración y, en caso de lluvias, conduciendo hacia una depresión de terreno con una velocidad controlada y sin pérdidas de suelo

por erosión. Los andenes, los cuales se asemejan a las terrazas, pero son estructuras más complejas, construidas con rocas y muros y usualmente asociadas a sistemas de riego, son incluso más efectivos en favorecer la infiltración de agua hacia el suelo reduciendo la escorrentía y la erosión (Willems *et al.* 2021). Las terrazas y andenes permiten los mecanismos de ralentización del flujo y pérdidas de volumen, reduciendo los picos de descarga y aumentando la capacidad de retención del suelo contra la erosión (Gaspari *et al.*, 2013).

**Figura 3.** Uso de terrazas de piedra de formación lenta en las comunidades de Huancaya y Vitis, en la cuenca Cañete



#### I.5.5. Estabilización de pendientes

La plantación de árboles promueve no solamente la modificación de la rugosidad del suelo, también la estabilidad de la pendiente donde las raíces juegan un papel preponderante en el proceso de estabilización de los deslizamientos críticos en relación a las influencias mecánicas e hidrológicas de la vegetación y las variaciones de las propiedades de las plantas (alrededor de un 10 % en el factor de seguridad) (Campbell *et al.*, 2007; Norris & Greenwood, 2006), reduciendo la vulnerabilidad a deslizamientos (Grima *et al.*, 2020).

La construcción de terrazas de formación lenta y andenes ayuda a reducir drásticamente la pendiente del terreno y, por ende, disminuir los niveles de erosión laminar y mejorar los niveles de retención de la humedad del suelo. Por otro lado, los diques de control reducen la velocidad del agua y disipan la energía hidráulica. Asimismo, estas estructuras impiden la profundización de los cauces de las cárcavas y reducen el arrastre de material sólido, permitiendo así la fijación del perfil longitudinal del lecho, evitando así el

descenso erosivo. De esta manera, la construcción de varios diques consecutivos brinda al cauce una pendiente no erosionable, estabilizando los tramos del cauce o cárcava (Gaspari *et al.*, 2013).

#### I.5.6. Reducción de la velocidad y nivel de los flujos

Los diques son barreras que cruzan un curso de agua o concavidad formada por la erosión (cárcavas) que controlan el nivel y velocidad del flujo (agua o sedimentos). De esta manera, estas estructuras ayudan a resistir el desgaste del fondo de las cárcavas o quebradas por efecto del arrastre ejercido por el agua, estabilizar las pendientes del lecho en las cárcavas o quebradas, y reparar las condiciones para la plantación y la siembra en cárcavas o quebradas. Adicionalmente, los diques ofrecen condiciones favorables para el crecimiento de los árboles y la vegetación (Stokes *et al.*, 2014). La inmensa mayoría de los diques de retención se suelen construir de componentes porosos, ya que al permitir el paso de parte del agua reduce las tensiones sobre la estructura (Gómez Calero *et al.*, 2011).

**Procesos de inundaciones,  
erosiones superficiales y  
movimientos de masa**

### 2.1. Niveles de diseño de monitoreo

El diseño de monitoreo en campo está compuesto por datos a muestrear en espacio y tiempo a diferentes resoluciones, donde usualmente, mayor resolución requerirá mayor presupuesto. Estos datos son interpretados para entender los procesos naturales que se desarrollan a nivel de cuenca o procesos locales, pero siempre el diseño y la densidad de estaciones de monitoreo estarán asociados a una determinada zona de estudio (por ejemplo, cuenca, subcuenca, río o tramos de río, quebrada y parcela) y a diferentes capas de información (por ejemplo: hidrológicos, geomorfológicos, infraestructura e intervenciones), que se tienen que agrupar para un debido monitoreo.

La escala de monitoreo también dependerá de otros factores económicos y sociales; sin embargo, la presente guía plantea un diseño y densidad de monitoreo en campo con

un enfoque técnico y con el objetivo de responder preguntas técnicas científicas enfocadas en la capacidad de disminuir el riesgo de desastres que den una idea clara de la efectividad de la IN, evaluando los patrones hidrológicos, geológicos, geomorfológicos, de transporte de sedimentos y de calidad de agua.

En la Tabla 2 se describen los cuatro (4) niveles de diseño para monitoreo en campo propuestos: insuficiente, básico, adecuado y extendido. Sobre la base de estos niveles, se indican tablas estimativas de los tipos de instrumentales y órdenes de relevamientos para inundaciones (Tabla 3), erosiones (Tabla 4), deslizamientos (Tabla 5) y flujo de detritos (Tabla 6). Entiéndase que la categoría Insuficiente podría incluir desde ninguna actividad de monitoreo hasta algún esfuerzo, pero que es insuficiente para entender un proceso.

**Tabla 2.** Descripción resumen de las características de cada categoría de monitoreo.

Categoría	Insuficiente	Básico	Adecuado	Extendido
<b>Datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zona de estudio sin datos.</li> <li>Zona de estudio con ausencia de datos temporales o espaciales.</li> </ul>	Datos distribuidos espacial y temporal con mínima resolución que todavía permite definir el factor dominante del proceso o fenómeno.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Datos distribuidos espacial y temporal con una resolución que permita caracterizar el proceso o fenómeno.</li> <li>Monitoreo continuo y sistemático que describe algún proceso o fenómeno (fenómeno de El Niño, eventos extremos, efectos antrópicos adicionales a las intervenciones).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Datos distribuidos espacial y temporal con alta resolución.</li> <li>Monitoreo continuo que permite describir integralmente la respuesta de las intervenciones frente a factores externos (fenómeno de El Niño, eventos extremos y efectos antrópicos adicionales a las intervenciones).</li> </ul>

Categoría	Insuficiente	Básico	Adecuado	Extendido
<b>Procesos</b>	El conjunto de datos no posibilita describir el proceso.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conjunto de datos describen la escala dominante del proceso.</li> <li>Proceso en espacio y/o tiempo.</li> <li>El diseño debe ser mínimamente pensando en un monitoreo hidro-sedimentológico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conjunto de datos permite describir el proceso adecuadamente.</li> <li>Proceso en espacio y/o tiempo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conjunto de datos permite describir el proceso con alta resolución y explicación.</li> <li>Proceso en espacio y/o tiempo.</li> </ul>
<b>Costo de monitoreo</b>				
<b>Preguntas técnicas/científicas a responder</b>				
<b>Esfuerzos institucionales</b>	No contempla	Instituciones dedicadas a monitoreo (por ejemplo: Senamhi, IGP, DHN-Marina de Guerra del Perú, ANA, CONIDA, red iMHEA).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instituciones dedicadas a monitoreo (por ejemplo: Senamhi, Marina de Guerra del Perú, Autoridad Nacional del Agua, red iMHEA).</li> <li>Proyectos especiales con fondos del Estado dedicados a contribuir al monitoreo (por ejemplo: proyectos de ministerios).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instituciones dedicadas a monitoreo (por ejemplo: Senamhi, Marina de Guerra del Perú, Autoridad Nacional del Agua, red iMHEA).</li> <li>Proyectos especiales con fondos del Estado dedicados a contribuir al monitoreo (por ejemplo: Reconstrucción Con Cambios,</li> </ul>

Fuente: elaboración propia

\* Ver las tablas siguientes donde se expande cada una de las categorías indicando su forma de relevamiento, resultados, equipos, disponibilidad de datos, entre otros.

Categoría	Insuficiente	Básico	Adecuado	Extendido
<b>Esfuerzos institucionales</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Proyectos especiales con fondos privados (por ejemplo: fundaciones, ONG).</li> </ul>	<p>proyectos de ministerios).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Proyectos especiales con fondos privados (por ejemplo: fundaciones, ONGs).</li> <li>Proyectos especiales de empresas privadas que comparten datos (por ejemplo: minas o hidroeléctricas).</li> <li>Los datos del monitoreo deberían ser compartidos en formato original (raw) y procesados sobre la base de un control de calidad y de acuerdo con el requerimiento.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia

**Tabla 3.** Niveles de monitoreo para inundaciones

Categoría	N.º estimado de estaciones	Instrumentos	Disponibilidad de datos
<b>Insuficiente</b>	Al menos una estación sobre el sistema de estudio.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pluviómetro. Regla limnimétrica.</li> <li>No se realizan calibraciones ni mantenimiento.</li> </ul>	Datos no disponibles al público o sin acceso directo de los tomadores de decisión.
<b>Básico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Al menos una estación en todos los cauces troncales de la cuenca hidrográfica.</li> <li>Se cuenta con al menos una estación pluviométrica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pluviómetros. Regla limnimétrica, flotantes o sensores de presión. El sistema cuenta con una calibración.</li> <li>Se usan vertederos de pared delgada en algunos cauces principales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La información se encuentra disponible.</li> <li>Aunque no se cuenta con el dato crudo ni de las ecuaciones de ajuste (curvas de calibración altura/ caudal).</li> </ul>
<b>Adecuado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se cuenta con estaciones principales en todos los cauces troncales y secundarios del sistema.</li> <li>Se incorporan estaciones en estructuras de impacto social (toma de agua potable, puentes, entre otras).</li> <li>Se cuenta con estaciones pluviométricas suficientes por unidad hidrográfica en estudio.</li> <li>Se realizan mensualmente mediciones de caudal líquido y sólido, con el fin de evaluar el funcionamiento de las estaciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pluviómetro. Regla limnimétrica, flotantes o sensores de presión.</li> <li>El sistema cuenta con la calibración y se realiza una evaluación periódica de la misma.</li> <li>Mediciones con instrumentos acústicos, como velocímetros acústicos Doppler (ADV) y/o perfiladores acústicos de corriente Doppler (ADCP).</li> <li>Muestreadores de sedimento en suspensión y fondo.</li> </ul>	Los datos se encuentran públicamente disponibles y, en el caso de necesitar más información, es posible acceder a la misma fácilmente mediante solicitud.

Fuente: elaboración propia

Nota: También se pueden considerar pluviómetros y/o pluviógrafos para la medición de lluvias en el sector.

Categoría	N.º estimado de estaciones	Instrumentos	Disponibilidad de datos
<b>Extendido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se cuenta con una red de información de niveles y caudales.</li> <li>Las estaciones se localizan sobre los puntos de mayor interés, las cuales se refuerzan con estaciones tipo secundarias equis distanciadas unas de otras.</li> <li>Se emplean radares terrestres y tecnología satelital para la estimación de precipitaciones.</li> </ul>	<p>Se emplea todo lo indicado en el nivel previo. Adicionalmente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Información satelital y/o radares terrestres combinados con una red de alertas (pluviómetros y niveles) con transmisión de datos en tiempo real.</li> <li>Se han calibrado las imágenes satelitales para determinar el volumen de sedimento transportado en suspensión (fracción fina).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los datos se encuentran disponibles al público.</li> <li>Se puede acceder fácilmente al dato crudo del relevamiento para un análisis más detallado.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia

**Tabla 4.** Niveles de monitoreo para procesos erosivos

Categoría	Tipo de relevamiento	Instrumentos	Disponibilidad de datos
<b>Insuficiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Al menos el reconocimiento de procesos de erosión.</li> <li>Escasa información del ambiente en estudio (geotecnia, geomorfología, vegetación, entre otros).</li> </ul>	Cámara y reglas métricas.	Datos no disponibles públicamente.
<b>Básico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reconocimiento de los diferentes tipos de erosión que se encuentran en la cuenca de estudio.</li> <li>Se cuenta con una breve caracterización de los procesos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reglas métricas, entre otras herramientas de medición (distanciómetros, niveles y estaciones totales).</li> <li>Parcelas de medición, estacas de cuantificación de erosión.</li> </ul>	La información se encuentra disponible, aunque no se cuenta con disponibilidad del dato crudo.

Categoría	Tipo de relevamiento	Instrumentos	Disponibilidad de datos
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Sistema de Posicionamiento Global (GPS).</li> </ul>	
<b>Adecuado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relevamientos periódicos de cada uno de los fenómenos de erosión.</li> <li>Análisis de futuros eventos (peligrosidad, orden de afección a regiones aledañas).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relevamientos de fotogrametría periódicos.</li> <li>Drones, cámaras fotográficas y distanciómetros.</li> <li>Sistema de posicionamiento global (GPS).</li> </ul>	Los datos se encuentran públicamente disponibles y, en el caso de necesitar más información, es posible acceder fácilmente a la misma mediante solicitud.
<b>Extendido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se realiza un seguimiento continuo de las áreas con actividad erosiva.</li> <li>Cámaras fijas dispuestas para el seguimiento.</li> <li>Descripción detallada de cada uno de los procesos activos.</li> <li>Análisis estadísticos de ocurrencia de procesos.</li> <li>Análisis de futuros eventos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cámaras, reglas, drones, estacas y parcelas representativas de cada una de las cuencas.</li> <li>Estaciones fijas sobre áreas de mayor erosión.</li> <li>Sistemas LiDAR para el mapeo de parcelas de especial interés.</li> <li>Sistema de posicionamiento global con correcciones (DGPS) o RTK (<i>Real Time Kinetics</i>).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los datos se encuentran disponibles al público.</li> <li>Se puede acceder fácilmente al dato crudo del relevamiento para un análisis más detallado.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia

**Tabla 5.** Niveles de monitoreo para deslizamientos

Categoría	Medición de las propiedades de los materiales	Medición de la superficie de falla	Medición de la velocidad de movimiento
Insuficiente	Definir la consistencia del material	Observaciones de campo	GPS con baja precisión
		Observaciones en pozos de gran diámetro	
Básico	Medida de fosas y trincheras de prueba	Registro geotécnico detallado en pozos de sondeo	Métodos topográficos convencionales
			Instalación de marcadores y estacas
Adecuado	Ensayos de laboratorio	Mediciones en el interior de los pozos de sondeo	Mediciones en grietas de tensión y escarpas
	Pozos de sondeo	Excavaciones y pozos de prueba	Mediciones electrónicas
	Piezómetro de tubo abierto	Métodos sísmicos y eléctricos	Estación total
Extendido	Análisis de fondo	Georadar interferométrico	Cámara de deformación
	Piezómetros con sensor de presión	Inclinómetros y extensómetros	LiDAR terrestre o aéreo
	Métodos geofísicos (resistividad, refracción sísmica)	Tomografía eléctrica Sondeo eléctrico vertical	Análisis de imágenes de satélite (interferometría)
		Sistema de posicionamiento global (GPS)	Inclinómetros y extensómetros

Fuente: elaboración propia  
Nota: También se pueden considerar pluviómetros y/o pluviógrafos para la medición de lluvias en el sector.

**Tabla 6.** Niveles de monitoreo de flujos de escombros

Caracterización	Tipo de relevamiento	Flujo y patrones	Métodos de medición
Insuficiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>Solo una medición de la topografía de la quebrada.</li> <li>No se puede describir las fuentes de sedimentos.</li> </ul>	No existe evidencia de los patrones de flujo.	No aplica.
Básico	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mediciones repetidas de topografía (antes y después de un evento).</li> <li>Muestreo de sedimentos (antes y después de un evento).</li> </ul>	Reconstrucción del patrón de erosión y deposición, así como las principales variables geomorfológicas de un evento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fotogrametría con drones.</li> <li>Topografía con estación total y GPS RTK.</li> </ul>
Adecuado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mediciones repetidas de topografía, hidrología (antes y después de varios eventos).</li> <li>Muestreo de sedimentos (antes, durante y después de varios eventos).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reconstrucción del patrón de erosión y deposición, así como las principales variables geomorfológicas de varios eventos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fotogrametría con drones.</li> <li>Topografía con estación total y GPS RTK.</li> <li>LiDAR terrestre.</li> <li>Cámaras estacionarias para utilizar la técnica de velocimetría de partículas con imágenes a gran escala (LSPIV).</li> </ul>
Extendido	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mediciones repetidas de topografía, hidrología, suelos (antes y después de varios eventos).</li> <li>Muestreo de sedimentos (antes, durante y después de varios eventos).</li> </ul>	Reconstrucción del patrón de erosión y deposición, así como los detalles de los patrones en diferentes eventos, es decir, un monitoreo continuo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fotogrametría con drones.</li> <li>Topografía con estación total y GPS RTK.</li> <li>LiDAR terrestre y aéreo.</li> <li>Uso de radares, geófonos y láser.</li> <li>Combinación de cámaras estacionarias y móviles (drones) para la aplicación de la técnica LSPIV.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia

## 2.2. Metodología de evaluación del riesgo para medir la efectividad de las intervenciones de IN

### 2.2.1. Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales (Cenepred)

La peligrosidad de un fenómeno o proceso y su vulnera-

bilidad (susceptibilidad de la población, infraestructura y elementos socio económicos a sufrir daños por peligros o amenazas) son los factores que determinan el riesgo. El manual del CENEPRED (2015) define el Riesgo de esta manera como la intersección entre la Peligrosidad y Vulnerabilidad:

$$R_{(i,e,t)} = f(P_i, V_e)_t$$

Donde:

$R_{i,e,t}$  es el riesgo asociado

$P_i$  es el peligro con la intensidad mayor o igual a  $i$  durante un periodo de exposición  $t$

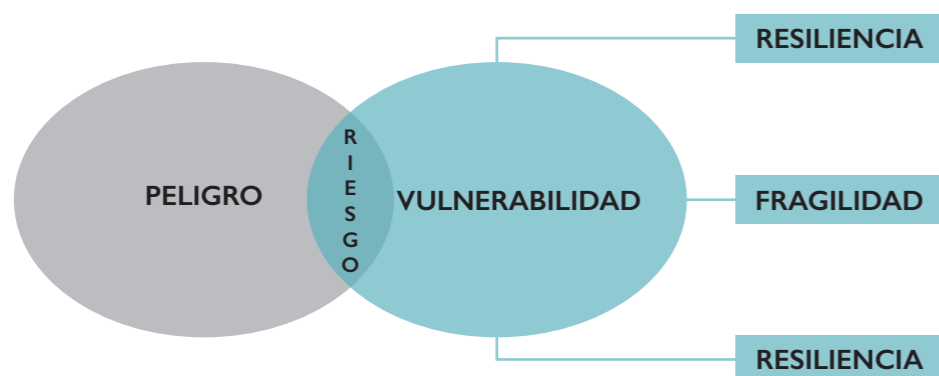
$V_e$  es la vulnerabilidad de un elemento expuesto

Asimismo, el manual cuenta con una serie de parámetros que describen peligrosidad, susceptibilidad y vulnerabilidad (esta última económica, social y ambiental), tal como se indica en la Figura 4.

El proceso metodológico que sigue el Cenepred (2015) para la evaluación del riesgo comprende los siguientes pasos:

1. Se selecciona el fenómeno a evaluar: terremoto, sequía, erosión pluvial, movimiento de masa o inundaciones, entre otros.
2. Se selecciona la escala de descriptores asociados al fenómeno correspondiente. Dichos descriptores son similares a los adoptados para el análisis de susceptibilidad donde se evalúan, en este caso los factores condicionantes y desencadenantes. Ambos focos de evaluación del peligro (vulnerabilidad y peligro) son valorados en base a la ponderación de los parámetros (Figura 3.2). Definidos el valor que representa al  $y$  a la Susceptibilidad, se suman ambos enfoques con pesos ponderados (el CENEPRED recomienda pesos iguales, es decir, 0.5).

Figura 4. Esquema conceptual de metodología



Fuente: adaptado de Cenepred (2015)

Figura 5. Resumen del método Cenepred (2015)

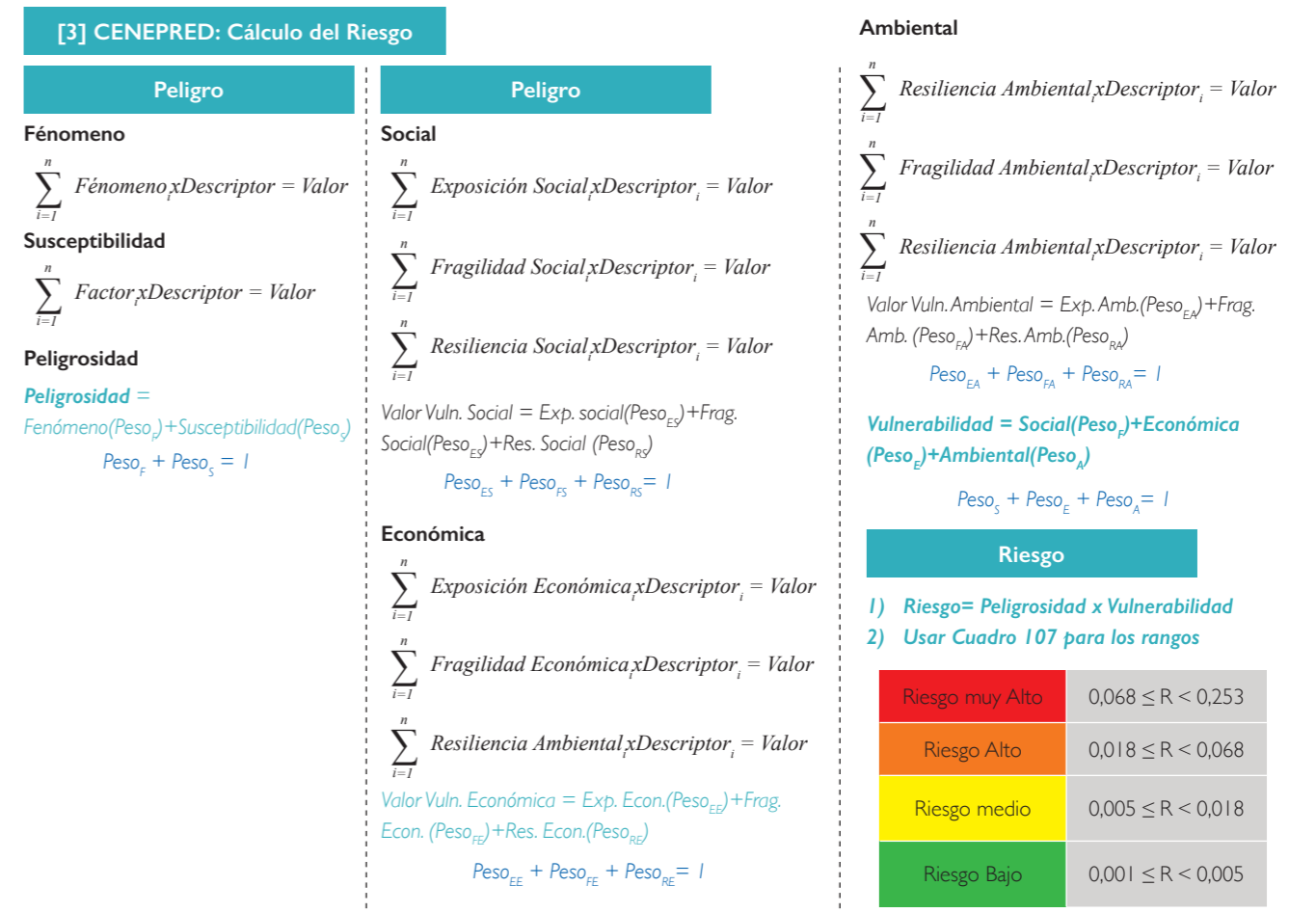


Figura 3.2 Resumen del método CENEPRED (2015) Susceptibilidad Peligrosidad Vulnerabilidad Social Económica Ambiental). Fuente: elaboración propia.

3. Respecto a la vulnerabilidad, el enfoque adoptado por el CENEPRED consiste en una visión desglosada en cada uno de estos focos, se analizan parámetros de exposición y el esquema de trabajo continúa determinando el valor representativo de vulnerabilidad sobre la base de los descriptores seleccionados en cada uno de estos nueve (9) parámetros resultantes (ponderan-

do cada parámetro). Por último, se realiza la ponderación de estos grandes enfoques (social, económico y ambiental) alcanzando el valor final de vulnerabilidad.

4. Con el valor de peligrosidad y vulnerabilidad determinados previamente se estima el riesgo introduciendo en la matriz de riesgos indicado en la Figura 6.



**Figura 6.** Matriz de riesgos sobre la base de la cuantificación de peligrosidad y vulnerabilidad

PMA	0,503	0,034	0,067	0,131	0,253
PA	0,260	0,018	0,035	0,068	0,131
PM	0,134	0,009	0,018	0,035	0,067
PB	0,068	0,005	0,009	0,018	0,034
	0,068	0,134	0,260	0,503	
	VB	VM	VA	VMA	

Fuente: Cenepred (2015)

- La valoración de riesgos propuesta por el Cenepred se presenta en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Valoración de riesgos acorde a Cenepred (2015)

Nivel	Rango
Riesgo muy alto no mitigable	$0.068 \leq R < 0.253$
Riesgo muy alto	
Riesgo alto	$0.018 \leq R < 0.068$
Riesgo medio	$0.005 \leq R < 0.018$
Riesgo bajo	$0.001 \leq R < 0.005$



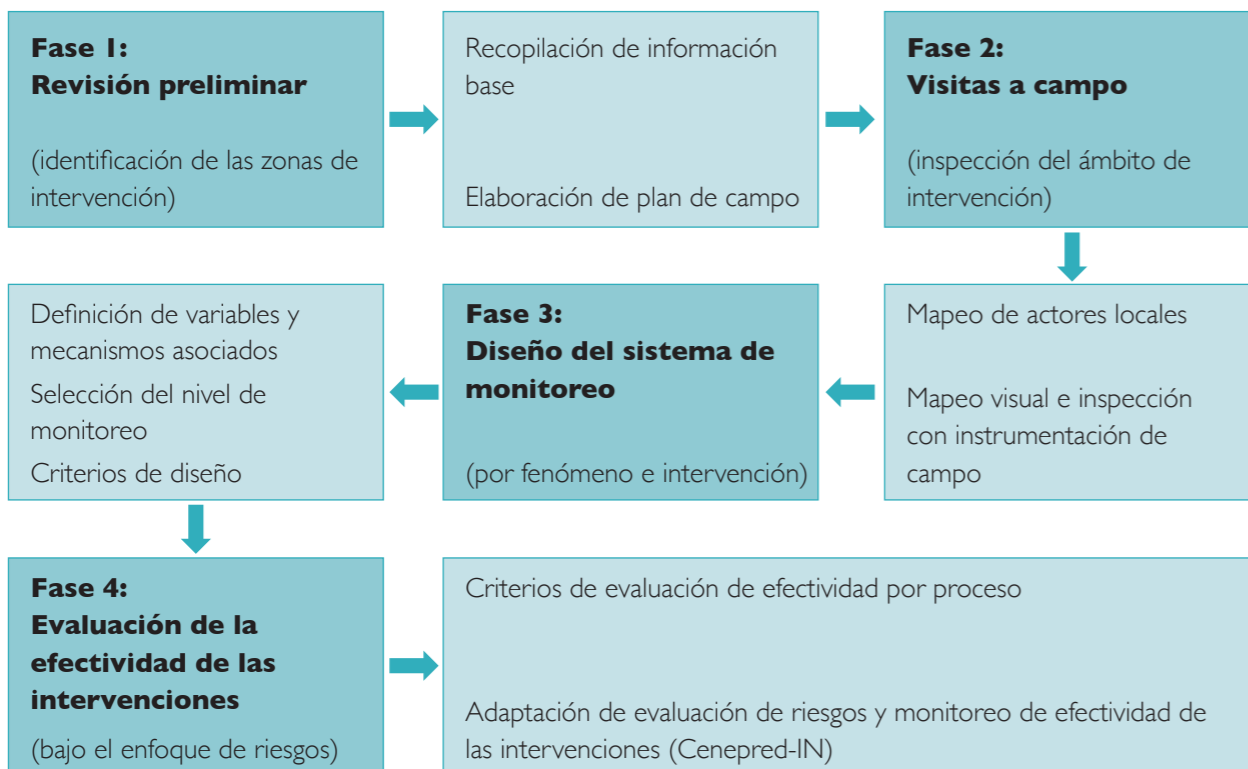
**Proceso metodológico de evaluación de la efectividad de las intervenciones bajo un enfoque de evaluación de riesgos**

En esta sección se presenta el proceso metodológico para la evaluación de la efectividad de las intervenciones de IN frente a la prevención y disminución de la ocurrencia de movimientos de masa e inundaciones.

La Figura 7 muestra las cuatro (4) fases de la metodología a seguir, que incorporan: (1) la revisión preliminar o recolección de información base para la identificación de las zonas de interés, (2) las visitas a campo para inspección y mapeo visual de la zona de la intervención, (3) el diseño del sistema de monitoreo de acuerdo al nivel de monitoreo y (4) los criterios de evaluación de la efectividad de las intervenciones, bajo un enfoque de riesgo y fenómenos asociados que se adapta de la evaluación de riesgos del Cenepred.

ción de información base para la identificación de las zonas de interés, (2) las visitas a campo para inspección y mapeo visual de la zona de la intervención, (3) el diseño del sistema de monitoreo de acuerdo al nivel de monitoreo y (4) los criterios de evaluación de la efectividad de las intervenciones, bajo un enfoque de riesgo y fenómenos asociados que se adapta de la evaluación de riesgos del Cenepred.

**Figura 7.** Flujo del proceso de evaluación y diseño de monitoreo de la efectividad de las intervenciones de IN para control de inundaciones y movimientos de masa



Fuente: elaboración propia

### 3.1. Fase I: Revisión preliminar

#### 3.1.1. Recopilación de información preliminar y descripción de las características biofísicas de la cuenca

En primer lugar, se procede a la recopilación de información preliminar y descripción de las características biofísicas de la cuenca. La Tabla 8 muestra un desglose de las principales fuentes de información sugeridas. La fase de revisión preli-

minar consiste en la búsqueda de información bibliográfica y herramientas técnicas con el fin de disponer de una base de datos preliminar de acuerdo con el estudio que realicen. La información técnica es recopilada de las instituciones técnicas oficiales, las mismas que por ley de transparencia brinda libre acceso y descarga al público usuario.

**Tabla 8.** Fuentes y enlaces de descarga de la información sugerida para descripción biofísica de la cuenca

Organismo público	Institución	Información	Descripción	Enlace de descarga
Presidencia del Consejo de Ministros - PCM	Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI	Límite departamental	Departamento o departamentos del Perú que abarca la cuenca.	<a href="http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download.aspx">http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download.aspx</a>
		Centro poblados del Perú	Distribución de centros poblados en la cuenca.	
Ministerio de Agricultura y Riego - MINAGRI	Autoridad Nacional del Agua - ANA	Cuenca	Ámbito que abarca la cuenca.	<a href="http://snirh.ana.gob.pe/ObservatorioSNIRH/">http://snirh.ana.gob.pe/ObservatorioSNIRH/</a>
		Unidades hidrográficas menores	Ámbito que abarcan las subcuencas.	
	Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestres - SERFOR	Áreas degradadas ROAM -	Oportunidades de restauración y conservación.	<a href="https://geo.serfor.gob.pe/visor/">https://geo.serfor.gob.pe/visor/</a>
	Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas - Sernanp	Áreas de conservación privada	Áreas donde se encuentran muestras representativas del ecosistema natural característico del entorno en que se ubican y, que por iniciativa propia y en forma voluntaria, son conservados.	<a href="http://geo.sernanp.gob.pe/visorsernanp/">http://geo.sernanp.gob.pe/visorsernanp/</a>
		Áreas de Protegidas Naturales	Áreas de importancia para la conservación de la diversidad biológica y otros valores asociados, a cargo del gobierno nacional.	
Áreas de Conservación Regional		Áreas con límites establecidos respaldadas por un régimen especial de protección.		
Zonas Reservadas	Áreas para considerar como Áreas Naturales Protegidas, que requieren de la realización de estudios complementarios para determinar, entre otras, la extensión y categoría que les corresponda como tales.			
Ecosistemas frágiles	Territorios de alto valor de conservación y vulnerables a consecuencia de las actividades antrópicas que ponen en riesgo los servicios ecosistémicos.			

Organismo público	Institución	Información	Descripción	Enlace de descarga
		Concesiones forestales (conservación reforestación maderera)	Permisos otorgados para el manejo y/o aprovechamiento forestal.	
Gobiernos Regionales	Gobiernos Regionales - GORE	Zonificación Ecológica y Económica	Identifica diferentes alternativas de uso sostenible del territorio, en función a sus potencialidades y limitaciones.	<a href="https://sinia.minam.gob.pe/informacion/mapas">https://sinia.minam.gob.pe/informacion/mapas</a>
Ministerio de Educación - MINEDU	Ministerio de Educación - MINEDU	Red de ríos y afluentes.	Red de ríos y afluentes que corresponden a la cuenca y subcuencas.	<a href="http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/">http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/</a>
Ministerio del Ambiente - MINAM	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI	Hidrología mensual 2019	Precipitación mensual en períodos del fenómeno de El Niño.	<a href="https://idesep.senamhi.gob.pe/geovisoridesep/go?accion=INICIO">https://idesep.senamhi.gob.pe/geovisoridesep/go?accion=INICIO</a>
	Ministerio del Ambiente - MINAM	Mapa de vulnerabilidad, física (vías existentes, terrestres y eléctricas)	Ubicación de vías en zonas propensas a inundaciones y deslizamientos frente a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos.	<a href="https://sinia.minam.gob.pe/informacion/mapas">https://sinia.minam.gob.pe/informacion/mapas</a> <a href="https://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/">https://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/</a>
		Centros afectados por inundaciones	Ubicación de los centros poblados en zonas propensas a inundaciones frente a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos.	
		Centros afectados por deslizamientos	Ubicación de los centros poblados en zonas propensas a deslizamientos frente a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos.	
Susceptibilidad física - áreas Inundables	Ubicación de áreas propensas a inundaciones frente a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos.			

Organismo público	Institución	Información	Descripción	Enlace de descarga
		Áreas degradadas	Condiciones de la cobertura vegetal.	
		Mapa Nacional de Ecosistemas	Identifica treinta y seis (36) ecosistemas continentales del territorio nacional.	
		Mapa de cobertura vegetal	Distribución geográfica y superficie de los diversos tipos de cobertura vegetal existentes en el país.	
Ministerio de Energía y Minas (MEN)	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET	Susceptibilidad física - movimientos de masa	Ubicación de áreas propensas a movimientos de masa frente a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos.	<a href="https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/">https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/</a>
		Hidrogeología Perú	Considera características geológicas e hidrológicas para conocer el nivel de permeabilidad.	
NASA	Alaska Satellite Facility - ASF	MDE (modelo digital de elevaciones)	Representación de la altura del terreno.	<a href="https://search.asf.alaska.edu/#/">https://search.asf.alaska.edu/#/</a>

Fuente: elaboración propia

### 3.2. Fase 2: Visitas de campo

#### 3.2.1. Mapeo georreferenciado de actores locales

Es importante que el mapeo preliminar sobre los mecanismos y las interacciones con IN sean compartidas con los actores locales. La información histórica y el conocimiento ancestral y local sobre los eventos y peligros naturales bajo un enfoque sociocultural son necesarios y deben ser incluidas en la definición final de las intervenciones (o cambios que se realicen sobre las mismas). Por lo tanto, para asegurar el compromiso y reconocimiento de los actores involucrados, se deberá elaborar un mapa georreferenciado de actores, comunidades, personas clave, instituciones gubernamentales y no gubernamentales, y organizaciones con participación relacionada a tanto la implementación de la medida de intervención como la prevención del riesgo de movimientos de masa e inundaciones.

#### 3.2.2. Visita a las zonas de intervención y mapeo visual de las condiciones del entorno

Como resultado de la Fase I, se contará con mapas temáticos de las zonas de intervención y el inventario de las zonas susceptibles a inundaciones, erosión superficial y movimientos de masa que se encuentran asociados a estas intervenciones (Tabla 2). En esta fase se realizará una visita de campo de verificación, registro fotográfico y mapeo visual de las condiciones del entorno, que ayudará en la definición de las metodologías e instrumentación para el monitoreo. A continuación, se describen las características que se deben observar durante la visita de inspección. Nótese que el personal técnico debe encontrarse capacitado o con formación adecuada en la puesta en marcha de tareas de campo, manejo de instrumental asociado y descripción de equipos de procesos.

**Características para observar en zonas inundables**

El trabajo de campo tiene como objetivo caracterizar las zonas vulnerables a los fenómenos de inundación aluvial o fluvial. Los objetivos buscados en las mismas son la definición de áreas preferenciales de escurrimiento, áreas bajas, referencia de zonas donde se hayan alcanzado niveles elevados basados en testimonios de actores locales, entre otros. Se deberá recabar la mayor descripción posible de los ambientes, cualquier cambio topográfico, la presencia de estructuras grises y la percepción de los pobladores. El uso de encuestas a personas locales, videos, fotografías o cualquier antecedente que tengan sobre los eventos de inundación es de gran importancia en este punto.

En la etapa de gabinete, previa a la salida de campo, se deberá realizar la recolección de los datos más relevantes, definición del objetivo general y específico, la planificación de las tareas diarias y la selección del instrumental adecuado sobre la base de los objetivos. En este punto es recomendable contar con una idea clara previa de los eventos y una localización de estos. Esto permitirá concentrarse en los sectores más afectados. Este análisis se puede realizar con la adecuación de mapas de afectación obtenidos en la fase I (o implementación de herramienta HIRO en el caso de que no se cuente con tal información; Román *et al.*, 2020). Se debe contar con equipo fotográfico, equipo de posicionamiento global, mapas topográficos e imágenes satelitales actualizadas, niveles, estacas y vehículos aéreos no tripulados (drones). Toda la información recopilada en campo se incorporará en un mapa georeferenciado en herramientas GIS.

**Características para observar en zonas de erosión superficial**

Las tareas de campo para la visualización de procesos de erosión superficial tienen el objetivo de identificar, evaluar, caracterizar, localizar e interpretar el motivo de la ocurrencia del fenómeno, como también realizar una evaluación de futuros eventos en la zona en caso fuese necesario. Además, reconocer áreas de afectación y grados respecto a infraestructuras locales.

El trabajo de campo consistirá en la caracterización del fenómeno mediante la descripción geométrica, captura de imá-

genes, definición de afección al medio ambiente, entre otros. La toma de muestra de sedimento superficial permitirá la descripción física, granulometría, presencia y forma del grano. Se recomienda la incorporación en mapas georeferenciados de toda la información generada de las herramientas GIS.

Por último, es importante destacar la participación ciudadana a través de encuestas, fotos y videos que sean de interés para la descripción del fenómeno o proceso.

**Características para observar en zonas de deslizamiento y flujos de escombros (huaicos)**

La visita de inspección tiene como propósito corroborar y reconocer todos los deslizamientos que afecten a infraestructuras (vías de comunicación), centros poblados, viviendas rurales y urbanas dentro del área de influencia.

Para el trabajo de campo se emplearán equipos básicos, como un GPS, una cámara fotográfica, un mapa topográfico o mapa satelital con las coordenadas geográficas de trabajo y una libreta de campo o formato de inventario impreso. También, se crearán estaciones de trabajo en zonas de deslizamiento, denominados puntos de observación o control geológico (POG). En cada POG se procede a realizar la toma fotográfica que contenga una vista frontal y transversal del deslizamiento; la foto debe tener ubicación de coordenadas geográficas en el sistema de trabajo y en referencia al norte geográfico. Finalmente, se registrará, como mínimo, el tipo de movimiento de masa, magnitud, tiempo de ocurrencia o de su reactivación y se dibujará la vista en planta del deslizamiento o flujo de escombros.

Actualmente, existen herramientas digitales de mapeo que optimizan tiempo y reducen el consumo de papel, como tabletas o smartphones que contengan GPS de alta precisión, estas trabajan con aplicaciones de funcionamiento sin necesidad de conexión a internet. Entre las aplicaciones más conocidas y utilizadas para las visitas de inspección se tienen a FieldMove Clino (<https://www.petex.com/products/move-suite/digital-field-mapping/>) y Collector for Arcgis (<https://www.esri.com/es-es/arcgis/products/collector-for-arcgis/overview>).

**3.2.3. Informe de visita de inspección**

Una vez concluida la visita de inspección, se elabora un informe ejecutivo de campo que detalla las actividades desempeñadas y especificadas por día; asimismo, evalúa en porcentaje el cumplimiento de los objetivos frente a las actividades planificadas como parte de una autoevaluación, la cual permite una mejora continua. Generalmente, este informe va acompañado con una breve descripción con lo más relevante de la inspección, junto con una base de datos y fotografías georeferenciadas.

**3.3. Fase 3: Diseño del sistema de monitoreo**

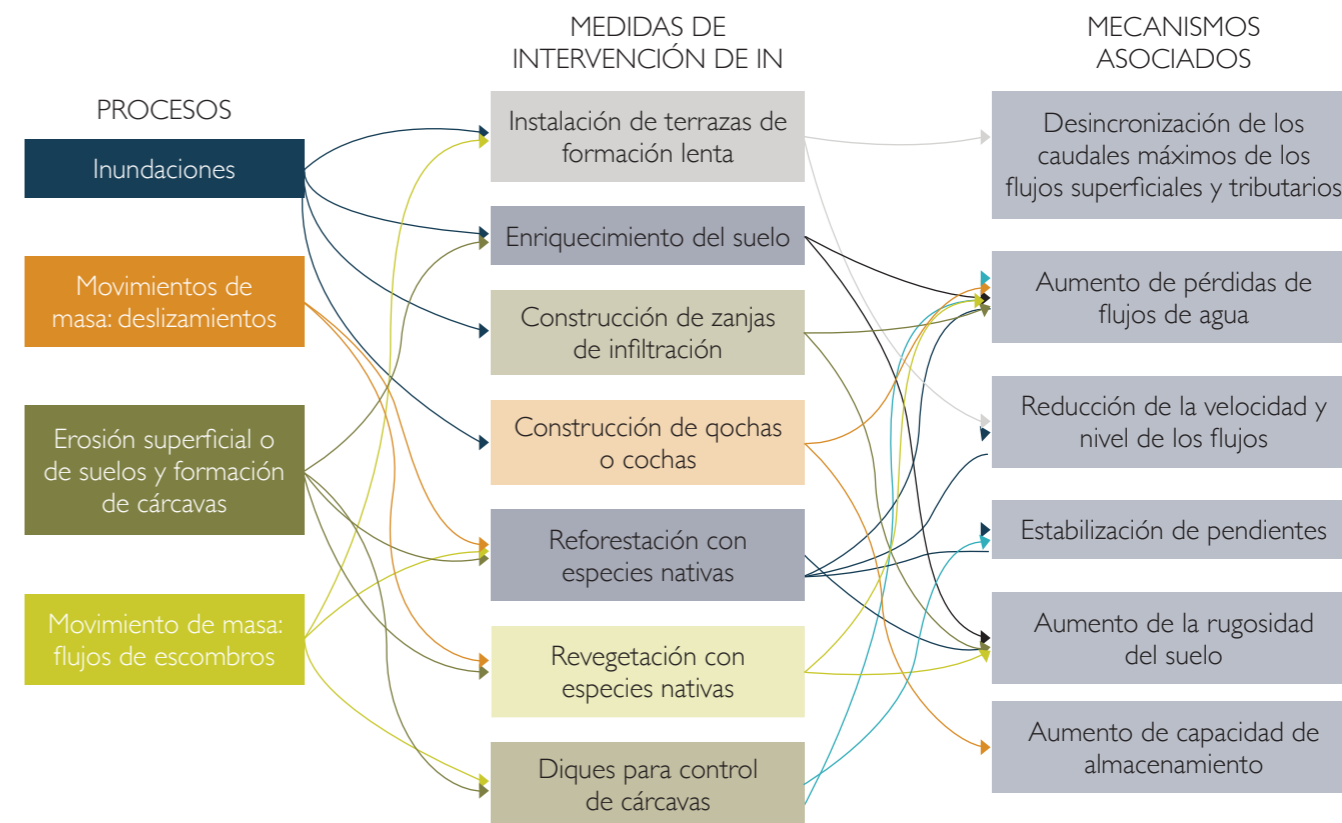
Una vez que el ámbito de cada intervención ha sido identificado y caracterizado, así como los fenómenos asociados, la siguiente fase corresponde al diseño del sistema de monitoreo. El diseño parte de la definición de mecanis-

mos asociados a procesos y medidas de intervención que servirán de base para identificar qué variables monitorear. Posteriormente, se determinará el nivel de monitoreo conforme a los objetivos de la evaluación, así como los sitios de muestreo, distribución espacial y la frecuencia de toma de datos.

**3.3.1. Definición de mecanismos asociados a fenómenos y medidas de intervención**

La Figura 8 muestra un diagrama para identificar los mecanismos biofísicos asociados a las intervenciones de IN que reducen los riesgos de inundaciones, erosiones superficiales y movimientos de masa. Cabe señalar que, si bien la identificación se hace por cada intervención, muchas de ellas comparten los mismos mecanismos y, por ende, se asocian a las mismas variables de medición.

**Figura 8. Mecanismos identificados por intervención de IN**



Fuente: elaboración propia

### 3.3.2. Definición de variables asociadas a fenómenos e intervenciones

Una vez definido el mecanismo, se identifican las variables biofísicas a caracterizar y monitorear. Estas variables parten de factores base naturales y cambiantes involucrados (clima, relieve y vegetación) y su relación con los principales procesos y mecanismos formativos, de movimientos de masa, erosión superficial, inundaciones y flujos de detritos, así como su influencia a nivel local y regional.

La Tabla 9 describe las variables base biofísicas a monitorear para todos los fenómenos e intervenciones. Los variables biofísicas describirán las condiciones del paisaje y entorno: suelos, terreno, clima, hidrología, flora y fauna nativas y la ubicación relativa a las comunidades, contribuyendo en diversos grados a la calidad de la tierra, en particular a la condición de la tierra relativa a los requerimientos del uso dado.

**Tabla 9.** Variables base identificadas

Factor base	Variables
Cartografía	Contenido de humedad Textura Contenido de materia orgánica Porosidad Consistencia o compacidad Drenaje Erodabilidad
Clima	Precipitación Temperatura Evaporación Evapotranspiración
Cobertura y uso de la tierra	Tipo de vegetación y distribución de vegetación Cambios temporales del uso de la tierra

Fuente: elaboración propia

La Tabla 10 muestra un desglose de las variables y su relación con cada tipo de intervención en IN. El marco conceptual de cada una de las variables se presenta en el Anexo B de esta guía, donde también se describen los métodos de medición por cada proceso (inundaciones, erosión superficial, movimientos de masa: deslizamientos y flujo de detritos). Estas variables pueden estar directamente relacionadas a un evento de inundación o de movimiento de masa de manera directa o indirecta. En el caso de las variables

directamente relacionadas, se trata principalmente de monitorear la frecuencia y magnitud (nivel de agua, volumen de suelo desplazado, entre otros) de las inundaciones o de los movimientos de masa en un ámbito específico. En el caso de las variables indirectas, son variables cuyo involucramiento en los mecanismos del evento y riesgo (sea positivo o negativo) está demostrado (por ejemplo, la tasa de infiltración de un suelo, el caudal pico aguas arriba de una zona vulnerable a inundación y demás).

**Tabla 10.** Variables identificadas por proceso y el tipo de intervención

Proceso	Variables	Tipo de intervención IN relacionada
Inundaciones	<b>Régimen hidrológico</b>  <b>Niveles de la superficie de agua.</b> Permite el control de los niveles de superficie libre máximos que un cauce puede transportar. <ul style="list-style-type: none"> <li>Cotas máximas y cotas de márgenes llenas (condición de desborde sección llena - <i>bankfull</i>).</li> </ul> <b>Caudal líquido.</b> Permite cuantificar el volumen líquido que se transporta en el cauce natural. <ul style="list-style-type: none"> <li>Caudales máximos.</li> <li>Caudal de desborde (<i>bankfull</i>).</li> <li>Caudal de inundación media anual.</li> </ul> <b>Coefficiente de escorrentía (RR).</b> Permite relacionar el volumen total de agua que atraviesa un cauce durante un año con el volumen total de la precipitación que ingresa a la cuenca en el mismo periodo. <ul style="list-style-type: none"> <li>Precipitación anual acumulada [mm].</li> <li>Caudal anual acumulado [mm].</li> </ul>	Instalación de terrazas de formación lenta  Enriquecimiento de suelo  Construcción de zanjas de infiltración  Construcción de <i>qochas</i>
	<b>Régimen sedimentario fluvial</b>  <b>Sedimentos:</b> disponibilidad de sedimento en cuenca. <ul style="list-style-type: none"> <li>Tipo y distribución de los sedimentos transportados, estimación de concentraciones de sedimentos transportados, caudal sólido de sedimento transportado en suspensión y fondo (o total).</li> <li>Qs, tasas de erosión y deposición durante una inundación.</li> <li>Cw: concentración de carga de lavado (washload).</li> <li>Css: concentración de sedimento suspendido.</li> <li>Qs: transporte total de sedimento.</li> <li>Qw: carga de lavado,</li> <li>Qss: transporte en suspensión.</li> <li>Qb: transporte por fondo.</li> <li>Diámetro medio D50 y característicos D16 y D84, distribución granulométrica y desvío del material de fondo y en suspensión.</li> </ul>	
	<b>Morfología</b>  <b>Modelo digital de terreno (MDT)</b> del fondo de los cauces y planicie aluvial.	
Erosión superficial o de suelos y formación de cárcavas	<b>Geometría:</b> ancho, largo, profundidad, densidad de drenaje, pendientes y morfología de las pendientes.  <b>Factores:</b> factor de erosión por lluvias (R), factor de erodabilidad del sedimento (K) y factor de gestión de cultivos (C).	Enriquecimiento de suelo  Forestación de especies nativas

Proceso	Variables	Tipo de intervención IN relacionada
		Revegetación de especies nativas Diques para control de cárcavas
Movimientos de masa: deslizamientos	<b>Factor de seguridad (F):</b> resistencia del material a romperse o desplazarse / fuerzas que promueven el esfuerzo. <b>Morfología:</b> zonas de deslizamientos y producción sedimentaria.	Forestación de especies nativas Revegetación de especies nativas
Movimientos de masa: flujo de escombros	<b>Morfología:</b> zonas de erosión y deposición. Caracterización geomorfológica del flujo de escombros. <b>Flujo:</b> profundidad máxima, evolución de la profundidad, velocidad promedio, velocidades superficiales, esfuerzos normales y cortantes, presión de poros, fuerza de impacto. <b>Sedimentos:</b> distribución espacial y temporal de la producción y transporte de sedimentos.	Instalación de terrazas de formación lenta Forestación de especies nativas Diques para control de cárcavas

Fuente: elaboración propia

### 3.3.3. Diseño experimental para evaluar efectividad

De manera general, el diseño experimental o muestral es fundamental en la ciencia para demostrar rigurosamente relaciones de causa-efecto. En particular, el diseño experimental se utiliza para mostrar relaciones (sean causales o no) entre una intervención en el ecosistema y sus potenciales consecuencias ecológicas e hidrológicas. En efecto, si está bien hecho, permite mostrar (o no) que las observaciones ecológicas o hidrológicas no son el producto del azar o de un proceso externo que no sería medido (p. ej. las variables de confusión<sup>2</sup>), sino que son productos de una intervención. Vale aclarar que en el contexto de RCC, la intervención, sea de conservación o recuperación, realizada en el ecosistema sería lo que en lenguaje científico es la *experimentación* en sí. Sin embargo, a diferencia de un estudio científico experimental donde los investigadores controlan plenamente los factores de la experimentación y la manera de medirlos, los encargados del monitoreo en

RCC tienen un control muy limitado sobre los factores de la intervención en sí (p. ej. ¿dónde se realiza? O ¿cuándo se realiza?). Por ello, es imprescindible que los encargados del monitoreo puedan tener un alto nivel de control del muestreo de las variables identificadas, como relevantes en el tiempo y el espacio, para que el monitoreo pueda responder a la pregunta: la intervención, ¿cumplió sus objetivos? Y así ser considerado un monitoreo exitoso.

Los diseños experimentales o muestrales siempre buscan comparar diferentes situaciones para hacer inferencias. Existe una clasificación de ellos (p. ej. Nichols *et al.*, 2011) y podemos citar los más comunes:

**Antes / Después.** Diseño con un solo sitio, monitoreado antes y después de la intervención. Por *después de la intervención* se entiende una vez que la fase de ejecución del proyecto sea terminada, en términos de normatividad

peruana del ciclo de inversión pública. A menudo, el monitoreo antes es usualmente llamado *línea base*.

**Control / Impacto.** Diseño con por lo menos dos (2) sitios (sean parcelas o cuencas) considerados como similares, excepto que el sitio *impacto* ha recibido la intervención y el sitio control no. Los dos (2) sitios son monitoreados al mismo tiempo después de la intervención. Por ejemplo, el diseño privilegiado en la red iMHEA (Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos, Ochoa-Tocachi *et al.*, 2018), con el uso de “cuencas pares” (SUNASS, 2020).

**Antes / Después / Control / Impacto.** Este diseño combina los diseños mencionados anteriormente. Por lo menos dos (2) sitios considerados como similares excepto que el sitio *impacto* ha recibido la intervención y el sitio *control* no. Ambos sitios son monitoreados al mismo tiempo, antes y después de la intervención. Este tipo de diseño es considerado como muy robusto, por limitar considerablemente la influencia de variables de confusión.

**Dosis / Respuesta.** Este tipo de diseño busca cuantificar la asociación entre un agente causal y las respuestas del sistema a un gradiente de exposición al agente causal. Típicamente se establece con varios sitios que tendrán un gradiente en las variables relevantes para el monitoreo. Por ejemplo, para investigar el impacto de la deforestación sobre la ocurrencia de inundaciones aguas abajo, un diseño dosis-respuesta buscaría encontrar varias cuencas similares, pero con tasa de deforestación contrastadas (por ejemplo, 0, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %).

**Impacto solamente.** Agrupa uno o varios sitios donde solamente se monitorea variables después de la in-

tervención y sin tener un sitio control. En este caso, la comparación con una situación de referencia es muy débil y solamente se puede hacer con valores de la literatura científica o con estándares (p. ej., sería el caso de valores de turbidez de agua tomados después de una intervención y que serían comparados a los estándares de calidad ambiental). Lamentablemente, a pesar de ser el diseño experimental menos robusto, se encuentra frecuentemente en el diseño de monitoreo de proyectos de inversión pública en el Perú.

Vale aclarar que el concepto de diseño experimental es independiente de la escala de análisis. En el caso de la RCC, puede ser aplicable desde sitios de algunos m<sup>2</sup> (p. ej. parcelas o *plots*) hasta microcuencas o cuencas enteras (~100 km<sup>2</sup>).

Un diseño experimental mal pensado o diseñado no puede ser corregido o compensado con el uso de equipos de alta tecnología o resolución, y es difícilmente corregible ulteriormente con el monitoreo de nuevas variables o en nuevos sitios inicialmente no previstos.

### 3.3.4. Definición del equipamiento necesario por nivel de monitoreo

Luego de definir las variables a monitorear, se seleccionará el nivel de monitoreo de acuerdo con los objetivos de la evaluación. Las tablas a continuación plantean los niveles de monitoreo (ver Tabla 2) para cada IN, describiendo las actividades y equipos necesarios. Nótese que cada categoría cuenta con el tipo de instrumentos y relevamientos de la categoría más baja.

Se puede encontrar mayor detalle acerca de las variables a medir y métodos de medición de cada una de estas, en el Anexo B: Variables biofísicas y métodos de medición.

<sup>2</sup> Son variables de especial interés en el diseño de sistemas de monitoreo. Durante la selección de variables, se debe identificar claramente qué otras variables podrían afectar un proceso de inferencia de impacto. Esto es necesario en sistemas ec hidrológicos en los que las condiciones de borde son altamente cambiantes por propiedades del mismo sistema (p. ej. estacionalidad de precipitación marcada) o un proceso que coocurre en el diseño experimental y no es el objetivo de inferencia en el diseño (p. ej. cambio climático o cambio de uso de tierra).

**Tabla 11.** Niveles de monitoreo para terrazas de formación lenta

Categoría	Tipo de relevamiento	Instrumentos	Frecuencia de monitoreo
Insuficiente	Al menos una tarea de campo de tipo cualitativa.	Reglas y cámaras fotográficas. Equipos GPS. Computadoras de campo.	Una salida de campo para medidas puntuales al menos una vez al año.
Básico	Se realizan periódicamente tareas de campo cuantitativas/ cualitativas de medición de velocidad de movimiento de masa y erosión superficial.	Métodos topográficos convencionales, calicatas e instalación de sensores de humedad de suelo y estudios de laboratorio.	Al menos un muestreo en campo en época de estiaje y uno en época húmeda.
Adecuado	Se cuenta con estaciones fijas de cuantificación del movimiento y erosión superficial. Adicionalmente se incorporan sensores de humedad de suelo previamente calibrados.  Se realizan vuelos con vehículos no tripulados (drones) de relevamiento periódicos.  Se realizan mapeos periódicos LiDAR con estaciones fijas.	Estaciones con cámara fílmica calibradas.  Sensores de humedad de suelo.  Drones acoplados a sistemas de alta resolución espacial Global Position System Real Time Kinematics (GPS-RTK).  Equipos LiDAR terrestres.	Las estaciones fílmicas toman datos cada hora. Los sensores de humedad toman datos cada ocho (8) horas.  Al menos un vuelo en época de estiaje y uno en época húmeda.  Al menos un mapeo en época de estiaje y uno en época húmeda.
Extendido	Se cuenta con estaciones fijas en tiempo real que informan las tasas de erosión superficial y movimiento de masa.  Se cuenta con una red de medición de humedad de suelo con sensores calibrados.  Imágenes satelitales de alta resolución.  Vuelos de LiDAR multihaz.	Estaciones con cámaras fílmicas calibradas.  Sensores de humedad de suelo (fijos en la zona).  Drones con equipo LiDAR multibeam y sistema de posición de alta resolución GPS-RTK.	Las estaciones fílmicas toman datos cada 5 min.  Los sensores de humedad toman datos cada 5 min.  Al menos un vuelo en época de estiaje y uno en época húmeda.

Fuente: elaboración propia

**Tabla 12.** Niveles de monitoreo para “Enriquecimiento de suelo”

Categoría	Tipo de relevamiento	Instrumentos	Frecuencia de monitoreo
Insuficiente	Al menos una tarea de campo de tipo cualitativa, que permite la descripción de la zona.	Reglas y cámaras fotográficas. Equipos GPS. Computadoras de campo.	Una evaluación en campo para medidas puntuales al menos una vez al año.
Básico	Se realizan periódicamente tareas de campo cuantitativas/ cualitativas de tasas de infiltración de agua. Se llevan a cabo muestreos del sedimento para su caracterización física.  Se realizan aforos de caudal líquido.	Sensores de infiltración de agua. Humedad de suelo. Equipo para la captura de sedimentos.  Vertederos de pared delgada.	Al menos una toma de muestras para sedimentos en época de estiaje y una en época húmeda.  Se realizan aforos por lo menos trece (13) veces durante el año hidrológico. Los sensores de nivel toman datos cada quince (15) min.
Adecuado	Se cuenta con una red de medición de humedad de suelo con sensores calibrados.  Se realizan aforos de caudal líquido y se cuenta con mediciones de niveles superficiales de agua que transforman estos datos en caudal diariamente.  Imágenes satelitales y tratamiento de índices para la determinación de humedad de suelo.	Red automatizada de sensores de humedad de suelo. Vertederos delgados (ejemplo triangulares o trapezoidales).	Los sensores de humedad toman datos cada cinco (5) min.  Se realizan aforos por lo menos trece (13) veces durante el año hidrológico. Los sensores de nivel toman datos cada cinco (5) min.  Se utilizan imágenes satelitales de al menos dos (2) momentos del año: una en época de estiaje y una en época húmeda.
Extendido	Se cuenta con estaciones fijas que en tiempo real informan las tasas de infiltración de agua.  Sistemas automatizados de medición de caudales líquidos y sólidos.  Se realizan periódicamente relevamientos LiDAR con equipos fijos.	Estaciones de niveles (con equipos ópticos o sonido) de medición de niveles de superficie libre (correlación con caudales).  Equipos LiDAR terrestre.  Georadares.	Los sensores de nivel toman datos cada cinco (5) min.  Los sensores de nivel toman datos cada cinco (5) min.  Al menos dos (2) relevamientos al año: uno en época de estiaje y uno en época húmeda

Fuente: elaboración propia

**Tabla 13.** Niveles de monitoreo para construcción de zanjas de infiltración

Categoría	Tipo de relevamiento	Instrumentos	Frecuencia de monitoreo
Insuficiente	Al menos una tarea de campo de tipo cualitativa, que permite la descripción de la zona.	Reglas y cámaras fotográficas. Equipos GPS. Computadoras de campo.	Una evaluación en campo para medidas puntuales al menos una vez al año.
Básico	Se realizan periódicamente tareas de campo cuantitativas/ cualitativas de tasas de infiltración de agua. Se llevan a cabo muestreos del sedimento para su caracterización física.  Se realizan aforos de caudal líquido.	Sensores de infiltración de agua. Humedad de suelo.  Equipo para la captura de sedimentos.  Vertederos de pared delgada.	Al menos un muestreo en campo en época de estiaje y uno en época húmeda.  Al menos una toma de muestras para sedimentos en época de estiaje y una en época húmeda.  Se realizan aforos por lo menos trece (13) veces durante el año hidrológico. Los sensores de nivel toman datos cada quince (15) min.
Adecuado	Se cuenta con una red de medición de humedad de suelo con sensores calibrados.  Se realizan aforos de caudal líquido y se cuenta con mediciones de niveles superficiales de agua que transforman estos datos en caudal diariamente.  Imágenes satelitales y tratamiento de índices para la determinación de humedad del suelo.	Red automatizada de sensores de humedad del suelo.  Vertederos delgados (ejemplo triangulares o trapezoidales).	Los sensores de humedad toman datos cada cinco (5) min.  Se realizan aforos por lo menos trece (13) veces durante el año hidrológico. Los sensores de nivel toman datos cada cinco (5) min.  Se utilizan imágenes satelitales de al menos dos (2) momentos del año: una en época de estiaje y una en época húmeda.
Extendido	Se cuenta con estaciones fijas que en tiempo real informan las tasas de infiltración de agua.  Sistemas automatizados de medición de caudales líquidos y sólidos.  Se realizan periódicamente relevamientos LiDAR con equipos fijos.	Estaciones de niveles (con equipos ópticos o sonido) de medición de niveles de superficie libre (correlación con caudales).  Equipos LiDAR terrestre. Georadares.	Los sensores de nivel toman datos cada cinco (5) min.  Los sensores de nivel toman datos cada cinco (5) min.  Al menos dos (2) relevamientos al año.

Fuente: elaboración propia

**Tabla 14.** Niveles de monitoreo para “construcción de qochas”

Categoría	Tipo de relevamiento	Instrumentos	Frecuencia de monitoreo
Insuficiente	Al menos una tarea de campo de tipo cualitativa, que describa la condición de la intervención.	Cámaras fotográficas. Equipos GPS.	Una evaluación en campo para medidas puntuales al menos una vez al año.
Básico	Se realizan mediciones de volúmenes de precipitación.  Se realizan medición de tasas de erosión hídrica.  Se realizan relevamientos topobatimétricos de las qochas.	Estaciones pluviométricas de lectura manual.  Estacas de erosión, cámaras fotográficas y equipos drones. Computadoras de campo.  Estaciones totales con GNSS (GPS).  Ecosondas y embarcaciones hidrográficas (si es necesario).	Lectura diaria de los pluviómetros.  Al menos una medición en época de estiaje y una en época húmeda.  Un levantamiento topobatimétrico al año.
Adecuado	Se mide automáticamente precipitaciones y niveles de superficie libre de las qochas.  Se realizan relevamientos topobatimétricos periódicos. Se conoce con alta resolución de los volúmenes de almacenamiento de qochas.  Se cuantifica la erosión superficial de la zona.	Estaciones pluviométricas automáticas.  Estaciones de niveles de superficie automáticas.  Estaciones totales con GNSS (GPS).	Descarga mensual de datos del pluviómetro.  Los sensores de nivel toman datos cada cinco (5) min.  Al menos uno en época de estiaje y uno en época húmeda.
Extendido	Sistemas automáticos de niveles y caudales con alta resolución temporal.  Mensualmente se releva el volumen de las qochas.  Se realizan vuelos drones con LiDAR <i>multibeam</i> para calcular la erosión superficial y volúmenes de qochas.	Estaciones pluviométricas automáticas.  Estaciones de niveles de superficie.  Ecosondas.  Equipos drones con LiDAR <i>multibeam</i> y GPS RTK.	Descarga mensual de datos del pluviómetro. Los sensores de nivel toman datos cada cinco (5) min.  Monitoreo una vez al mes  Monitoreo una vez al mes

Fuente: elaboración propia



**Tabla 15.** Niveles de monitoreo para forestación con especies nativas

Categoría	Tipo de relevamiento	Instrumentos	Frecuencia de monitoreo
Insuficiente	Una visita de campo de tipo cualitativa.	Cámara fotográfica	Una evaluación en campo para medidas puntuales al menos una vez al año.
Básico	Supervisión periódica de las tareas de campo cuantitativas/ cualitativas de medición de materiales y superficie de falla. Se llevan a cabo muestreos del sedimento para su caracterización física.	Métodos topográficos convencionales,  Instalación de marcadores y estacas y estudios de laboratorio.	Al menos una toma de muestras para sedimentos en época de estiaje y una en época húmeda.
Adecuado	Se cuenta con estaciones fijas que informan la variabilidad según la velocidad de movimiento de la superficie de falla.  Imágenes satelitales de alta resolución. Tratamiento de imágenes para determinación de movimiento y desplazamiento (NDVI, NDWI, entre otros).  Vuelos de LiDAR <i>multibeam</i> .  Se mide las tasas de crecimiento de vegetación.	Mediciones en grietas de tensión y escarpa.  Mediciones electrónicas  Estación total  Cámaras fotográficas  GNSS (GPS)  Estaciones pluviométricas lejanas	Se utilizan imágenes satelitales de al menos dos (2) momentos del año: una en época de estiaje y una en época húmeda.  Al menos un vuelo en época de estiaje y un vuelo en época húmeda.  Al menos una medición en época de estiaje y uno en época húmeda.
Extendido	Sensores automáticos, mediante el uso de equipos de grabación continua los cuales se calibran para tales objetivos e informan a un sistema interconectado considerando la evolución y crecimiento de las especies.	Estaciones pluviométricas, georadar interferométrico, LiDAR terrestre, cámara de deformación, estación total, GNSS (GPS).	

Fuente: elaboración propia

**Tabla 16.** Niveles de monitoreo para “Revegetación con especies nativas”

Categoría	Tipo de relevamiento	Instrumentos	Frecuencia de monitoreo
Insuficiente	Una visita de campo de tipo cualitativa.	Cámara fotográfica.	Una evaluación en campo para medidas puntuales al menos una vez al año.
Básico	Supervisión periódica de las tareas de campo cuantitativas/ cualitativas de medición de materiales y superficie de falla. Se llevan a cabo muestreos del sedimento para su caracterización física.	Métodos topográficos convencionales, instalación de marcadores y estacas y estudios de laboratorio.	Al menos una toma de muestras para sedimentos en época de estiaje y una en época húmeda.
Adecuado	Se cuenta con estaciones fijas que informan la variabilidad según la velocidad de movimiento de la superficie de falla.  Imágenes satelitales de alta resolución. Tratamiento de imágenes para determinación de movimiento y desplazamiento (NDVI, NDWI, entre otros).  Vuelos de LiDAR <i>multibeam</i> .  Se mide las tasas de crecimiento de vegetación.	Mediciones en grietas de tensión y escarpa.  Mediciones electrónicas.  Estación total.  Cámaras fotográficas.  GNSS (GPS). Estaciones pluviométricas.	Se utilizan imágenes satelitales de al menos dos (2) momentos del año: una en época de estiaje y una en época húmeda.  Al menos un vuelo en época de estiaje y un vuelo en época húmeda.  Al menos una medición en época de estiaje y uno en época húmeda.
Extendido	Sensores automáticos, mediante el uso de equipos de grabación continua los cuales se calibran para tales objetivos e informan a un sistema interconectado considerando la evolución y crecimiento de las especies.	Estaciones pluviométricas automáticas. Georadar Interferométrico. Cámara de deformación. Equipos UAV con LiDAR <i>multibeam</i> en grietas de tensión. Drones con cámaras fílmicas. Muestreo de sedimento aguas arriba de la cárcava.	

Fuente: elaboración propia

**Tabla 17.** Niveles de monitoreo para diques de control de cárcavas

Categorías	Tipo de relevamiento	Instrumentos	Frecuencia de monitoreo
Insuficiente	Al menos una tarea de campo de tipo cualitativa.	Cámaras fotográficas. Equipos GPS manuales.	Una evaluación en campo para medidas puntuales al menos una vez al año.
Básico	Fosas y trincheras de prueba. Topobatemetría de la zona de la obra de control.	Instalación de marcadores y estacas. Estaciones totales (incluyendo GNSS). Ecosondas.	Al menos una topobatemetría anual de control.
Adecuado	Relevamientos LiDAR con estaciones terrestres. Relevamiento de niveles de superficie libre. Aguas arriba y abajo de la cárcava.	LiDAR terrestres. Estaciones fijas de medición de niveles con reglas limnimétricas.	Al menos un relevamiento al en época de estiaje y uno en época húmeda.
Extendido	Relevamientos LiDAR <i>multibeam</i> . Estaciones hidrométricas automáticas que informen la variación de niveles (caudales). Medición de caudales líquidos con métodos no intrusivos (LSPIV y LSPTV). Estimación aproximada del transporte de sedimentos.	Equipos UAV con LiDAR multihaz. Estaciones fijas automáticas con sensores ópticos o sonido. Drones con cámaras filmicas. Muestreo de sedimento aguas arriba de la cárcava.	Sensores de nivel toman datos cada cinco (5) min.  Al menos una toma de muestras para sedimentos en época de estiaje y una en época húmeda.

Fuente: elaboración propia

### 3.3.5. Lineamientos para la identificación y distribución de sitios de monitoreo

En la práctica, el ámbito de estudio puede contemplar diferentes combinaciones de IN, así como diferentes mecanismos asociados a estas intervenciones. Para determinar la efectividad de las intervenciones, la planificación de un diseño de monitoreo debe realizarse siguiendo estas consideraciones:

#### Sobre el diseño de monitoreo

- Familiarización con el diseño y el tipo de proyecto, la estratigrafía del suelo y las propiedades inherentes de los materiales (pruebas de laboratorio según el tipo de material), las condiciones del agua subterránea (uso de piezómetros), el estado de las estructuras cercanas u otras instalaciones, condiciones ambientales y el método de construcción previsto.

- El tipo de diseño experimental es independiente de las escalas de análisis y la decisión sobre las escalas relevantes, por lo que deberá tomar en cuenta otras consideraciones. Una consideración importante tiene que ver con la *dilución* de impactos de una intervención a medida que la superficie relativa de la intervención disminuye en cuanto a la superficie total de la cuenca. Aún si una intervención podría ser muy eficiente en disminuir el caudal pico o la erosión localmente, su impacto aguas abajo podría ser totalmente despreciable (e incluido en el error de medición), donde la superficie de la intervención solo representaría un porcentaje mínimo de la superficie de la cuenca. Como regla empírica para escoger las escalas de análisis correctas, una intervención debería ocupar al menos un 20 % de la superficie de la cuenca para poder generar un impacto suficientemente fuerte y observable a nivel de indicadores a la salida de la cuenca.

- Un diseño antes/después es particularmente sensible a la influencia del clima (precipitación y en menor medida, evapotranspiración) y, de manera general, a los flujos de entrada y salida de agua en el sistema a monitorear. Un problema típico es poder evaluar la efectividad de una intervención entre un (1) año hidrológico antes y un (1) año hidrológico después de la intervención, cuando los dos (2) años de monitoreo son contrastados en términos de clima (p. ej. el año antes es lluvioso y el año después es seco). La manera más robusta de limitar este problema es contar con largas series de datos (~10 años) antes y después, con el supuesto que es menos probable que los años antes de la intervención sean sistemáticamente diferentes a los años después. Sin embargo, esto puede ser difícil de aplicar (mantener un sistema de monitoreo por veinte años es muy complejo y costoso) y, además, el cambio climático aumenta la probabilidad de tener tendencias significativas en el régimen de lluvia o de evapotranspiración que debilitan este tipo de diseño. Un elemento de solución complementario es poder estandarizar las variables relevantes de flujos, por los flujos de agua entrantes (como la precipitación y los ríos) y salientes (como la evapotranspiración). Por estandarizar, nos referimos a considerar la relación entre una

variable relevante y los flujos de agua involucrados en el sistema. Por ejemplo, el rendimiento hídrico específico ( $m^3 s^{-1} km^{-2}$ ) de una cuenca puede ser estandarizado por el volumen de precipitación en un (1) año, lo que corresponde al coeficiente de escorrentía ( $mm mm^{-1}$ ). Por supuesto, existen diferentes maneras de estandarizar las variables y esto debe ser bien pensado. En el caso de eventos de lluvias fuertes, probablemente es relevante considerar indicadores que van a caracterizar la intensidad de la lluvia en los días anteriores al caudal. Por otra parte, en ecosistemas donde la entrada de agua ocurre más por escorrentía que por lluvia directa, como es el caso de los bofedales, la estandarización debería considerar estas entradas de aguas adicionales. Es típicamente el caso de diseños añadidos, donde se monitorea el agua entrando y saliendo del sistema, y donde se espera que la intervención cambiará el ratio entre los dos (2).

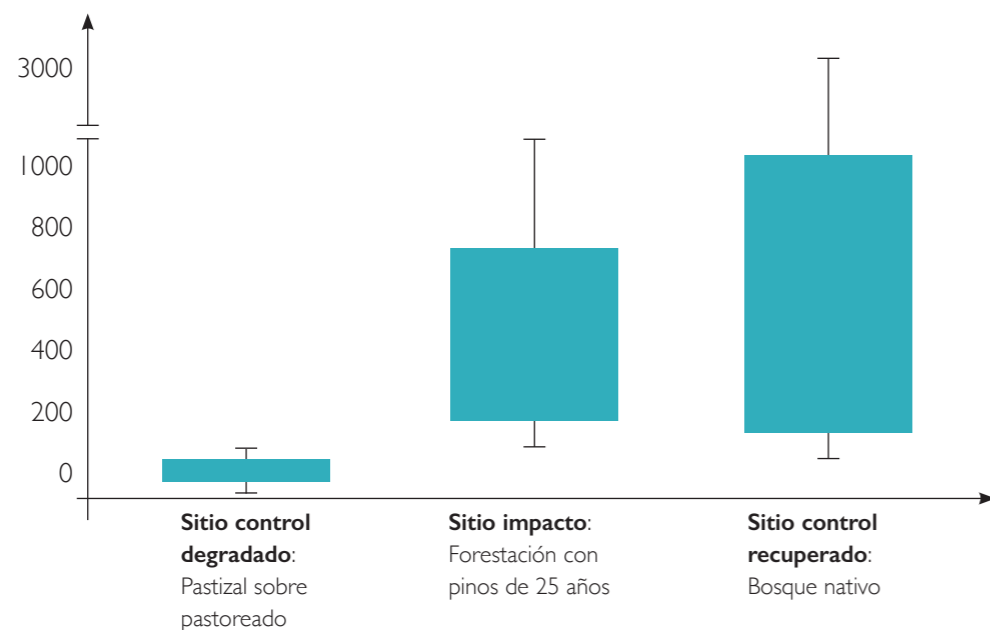
- Un diseño antes/después tiene un problema adicional cuando se trata de monitorear eventos de lluvias fuertes o extremas. En efecto, la magnitud de un evento es inversamente proporcional a su frecuencia: los eventos extremos son poco frecuentes. Esto agudiza el problema de tener series de datos suficientemente largas antes y después de la intervención para encontrar eventos de lluvias fuertes *similares*. Es particularmente el caso por las variables con un vínculo directo con el riesgo (tal como el nivel de agua en la inundación, o la cantidad de deslizamientos), mientras que, para las variables con un vínculo indirecto con el riesgo, el problema es mucho menor.
- A priori*, los diseños experimentales tipo control/impacto son menos sensibles a las diferencias climatológicas, tal como lo son los diseños antes/después. Sin embargo, los diseños control/impacto, para ser convincentes, tienen que demostrar sus similitudes, lo que puede ser complejo para las variables edáficas o geológicas. La manera más simple de controlar esto es a través de la proximidad geográfica entre el sitio de control y el sitio de la intervención, lo que es en general factible a escala de parcelas, pero que puede ser más complejo cuando la

unidad de análisis son cuencas. Aún así, dada la gran variabilidad espacial que puede existir en variables del suelo, es importante demostrar las similitudes a través del análisis del suelo entre el sitio de control e impacto, en cuanto a variables *a priori* más sensibles a la geología que a las intervenciones de restauración o conservación (tal como la textura del suelo, su profundidad, entre otros). Un aspecto quizás clave que considerar, es de comprobar que el sitio antes de la intervención tenía niveles de degradación similares al sitio control. Si la elección del sitio control y sitio impacto se realizan antes de la intervención, es relativamente fácil de acordar indicadores de degradación (tales como el % de materia orgánica de los horizontes superficiales del suelo o el % de suelo desnudo) y elegir sitios comparables sobre la base de estos indicadores. Sin embargo, ocurre también que la elección del sitio de control se hace después de la intervención y, en este caso, es mucho más delicado de asegurar que su nivel de degradación sea similar al nivel de degradación del sitio *impacto* antes de la intervención. Si bien se puede tratar de *reconstruir* el nivel de degradación gracias

a imágenes satelitales antes de la intervención, es muy recomendable evitar esta situación que debilita mucho las conclusiones del monitoreo. Otro desafío del diseño control/impacto es la duplicidad en los costos de instrumentalización, operación, manejo y mantenimiento del monitoreo. Si bien se reduce el tiempo total de monitoreo, los costos son mayores durante este periodo más corto que el de monitorear un solo sitio antes/después.

- En el caso de las intervenciones que buscan la recuperación de un ecosistema, puede ser muy relevante tener dos (2) sitios de control, el primero siendo un control *degradado* y el segundo siendo un control *recuperado*. El contraste entre el sitio *impacto* con el sitio de control *degradado* permite mostrar cómo la intervención ha mejorado las variables relevantes y, últimamente, cómo ha disminuido el riesgo. El contraste entre el sitio *impacto* y el sitio de control *recuperado* permite mostrar qué tan lejos están las variables de un estado *óptimo* (Figura 9). En general, se suele usar un sitio no perturbado como sitio de control *recuperado*.

**Figura 9.** Ejemplo de comparación de variables entre un (1) sitio impacto y dos (2) sitios de control



Fuente: adaptado de Zimmermann et al., 2009.

- Por experiencia, en Perú es difícil de monitorear antes de la intervención (principalmente por la falta de fondos disponibles antes de la ejecución del proyecto) y diseños control/impacto pueden ser más fáciles de ejecutar. Sin embargo, cualquier medición de variables que puede ocurrir antes de la intervención es muy valiosa y permite acercarse a un diseño antes/después/control/impacto. Es particularmente importante por la capacidad de comprobar que los niveles de degradación son similares entre el sitio de control y el sitio impacto.

*Sobre los equipos de monitoreo*

- Verificar constantemente la calibración de la instrumentación y equipos a utilizarse.
- Dentro de los parámetros a controlar se encuentran las mediciones de presión, deformación, carga, tensión, y temperatura, las cuales son influenciadas por las condiciones dentro de una zona muy pequeña y, por lo tanto, dependen de las características locales de esa zona. A menudo son esencialmente mediciones puntuales, sujetas a cualquier variabilidad en las características geológicas o de otro tipo más grande, representan las condiciones en una escala mayor para definir la verdadera afectación. En el caso de tener un gran número de puntos de medición debe responder directamente a la frecuencia de movimientos dentro de una zona amplia y representativa, por lo tanto, datos proporcionados por un solo instrumento pueden ser significativos y, generalmente, las mediciones de deformación son las más fiables y menos ambiguas.
- Realizar predicciones en el cambio de las magnitudes. Las predicciones son necesarias para que los rangos de los instrumentos y la sensibilidad de los instrumentos se puedan seleccionar con una estimación del máximo valor posible, o el máximo valor de interés, que conduce a una selección del rango del instrumento. Esta estimación a menudo requiere de un criterio ingenieril, sin embargo, en ocasiones se puede hacer con un cálculo sencillo, como es el caso con la presión de poros máxima en una base de arcilla debajo del eje central del terraplén.

- Tener instrumentos de alta precisión va de la mano con delicadeza y fragilidad, la fragilidad puede ser necesaria cuando los pequeños cambios en las medidas de las variables tienen un significado importante, o donde solo un corto periodo de tiempo se encuentra disponible para evaluar la tendencia a cierto comportamiento.
- La fiabilidad es la máxima simplicidad y, generalmente, en los transductores se puede colocar en el siguiente orden decreciente, según simplicidad y fiabilidad: óptico, mecánico, hidráulico, neumático y eléctrico.
- El costo más bajo de un instrumento no debe ser el factor determinante para su selección. El instrumento menos costoso (básico) probablemente no sea el que finalmente defina el proceso de instrumentación. Tampoco el instrumento más costoso es necesariamente el que proporcionará los mejores resultados para un caso de evaluación específica. En la evaluación económica existen instrumentos alternativos, cuyo costo total de la adquisición, calibración, instalación, mantenimiento, monitoreo y procesamiento de datos deben ser comparados. Sin embargo, la tecnología y el trabajo remoto y automático de algunos puede significar ahorro de tiempo y mano de obra (extendido).

A continuación, se brindan recomendaciones para identificar los sitios de muestreo y monitoreo y su distribución, también la frecuencia de toma de datos, de las intervenciones sobre la base de sus mecanismos frente a los fenómenos de inundación, erosión superficial y movimiento de masa.

**Monitoreo en zonas propensas a inundaciones**

Para evaluar el fenómeno de inundación y las implicancias en zonas de IN es recomendable caracterizar el fenómeno a nivel de geología, geomorfología, meteorología, hidrología e hidrografía. Esto permite tener una idea básica de las posibles zonas inundables. Para el caso de las inundaciones, la variable o agente principal son las precipitaciones que desencadenan las inundaciones. Se recomienda ver la Tabla 3 para seleccionar la categoría de monitoreo e identificar el tipo de instrumental y metodología a aplicar.

La selección final del equipo de medición se encontrará regida a diferentes factores económicos, sociales, de accesibilidad, entre otros. Dado que las inundaciones involucran una serie de parámetros de medición, como se expresan en las Tabla 9 y Tabla 10, todas deben ser analizadas y evaluadas. Ver Anexo A y B para un detalle en los tipos de equipo a implementar métodos de aplicación. A continuación, se recomiendan algunas consideraciones para la medición de precipitaciones.

El uso de estaciones pluviométricas de colección de datos es una opción adecuada para contar con un registro continuo de datos de precipitación. Este tipo de estaciones ofrece la posibilidad del seguimiento del evento y cuantificación, logrando capturar precipitaciones intensas y de corta duración prácticamente en tiempo real. SUNASS (2020) indica que para cuencas de estudio de extensiones entre 1 y 10 km<sup>2</sup>, se recomienda la instalación de entre dos (2) y cuatro (4) puntos de monitoreo. De esta manera se asegura el registro pluviográfico continuo. En cuanto a su ubicación, las mismas deben cubrir la variabilidad altitudinal si la cuenca presenta cambios topográficos abruptos o zonas de mesetas. Esta condición podría evitar que se alcance una buena representatividad del evento y el impacto en el medio que se desarrolla. Además, se recomienda el uso de estaciones transitorias que permitan la calibración de las estaciones fijas o la cuantificación de variables específicas. A diferencia de las permanentes estas pueden ser reubicadas.

Las variables deberán monitorearse de manera continua, con frecuencia relativamente corta de toma de datos (SUNASS, 2020), especialmente cuando se trata de eventos cortos o zonas de gran variabilidad climática. En todos los casos se recomienda el muestreo temporal que permita la mejor representación del evento, es decir, si el evento presenta una variación horaria es necesario tomar al menos tres (3) muestras durante la realización de este.

Dado que los cauces son los elementos fisiográficos en donde se transportan grandes volúmenes de agua y sedimento, en particular durante los eventos de grandes precipitaciones. Es prioritario la cuantificación del volumen

de agua que atraviesa por los mismos. La WMO N.º 168 (2008) establece el instrumental básico de medición como se ha discutido en las secciones previas. Estos pueden ser utilizados en estaciones de medición principales y secundarias. Se destaca que se llaman principales aquellas que capturan un aforo permanente y continuo, mientras las secundarias son móviles y permiten la calibración de las principales, como también proveer información específica sobre uno o más sitios.

Las estaciones principales deben relevar los niveles diarios, a los cuales hay que relacionarlos con aforos periódicos de caudal líquido y sólido (carga de sedimento suspendido y fondo). Estas últimas variables es recomendable medirlas semanalmente y, salvo excepciones (grandes aportes repentinos de material sólido en suspensión), reducir su periodicidad. La estación de medición de caudales y niveles de superficie libre ideal debe seguir los criterios definidos por la ISO 1100-1:

- El tramo de control no debe estar afectado por condiciones externas que perturben la superficie libre.
- El flujo debe ser concentrado en el tramo de control evitando la presencia de corrientes subterráneas.
- La zona de medición no debe contar con vegetación acuática.
- Las márgenes deben ser permanentes y no friables.
- Se pueden usar secciones de control naturales o artificiales.
- Se recomienda la construcción de una estructura de uniformización del flujo, que permita medir las condiciones bajas y sea capaz de capturar cualquier cambio significativo que se produzca en el caudal.
- Las estaciones deben estar lo suficientemente alejadas de la zona de confluencia con cauces tributarios.
- Se debe dejar un tramo de control cercano a la estación para la realización de aforos periódicos.
- El sitio debe ser de fácil acceso para la instalación y operación de la estación de medición.

- El sitio debe encontrarse cerca de un sistema de telemetría para la transferencia de datos.
- La estación debe contar con espacio suficiente para el instrumental y su estructura de protección sobre todo en periodos de inundación.
- El instrumental debe contar con el rango adecuado de medición para cubrir mínimos y máximos posibles y condiciones ambientales extremas.

Además, nótese que de las consideraciones para la determinación de las variables de precipitación y caudal líquido (con brevedad indicadas anteriormente), es necesario contar con parámetros que describan la topografía, geología, vegetación y geotecnia, entre otras, para la descripción del fenómeno de inundación (en particular para la IN en estudio). Es por lo que se recomienda la lectura de los Anexos A y B y WMO (2010), donde se detallan el tipo de equipo, ventajas y desventajas de su aplicación, como también algunos métodos de implementación.

#### Monitoreo en zonas propensas a erosión superficial

Respecto a los eventos de erosión superficial y dado que los mismos se producen debido a la acción erosiva de las gotas que impactan sobre la superficie terrestre o a la esorrentía que se desarrolla, contar con los datos de precipitación intensidad, periodicidad, duración, entre otros, permite tener una idea preliminar de las regiones más vulnerables a dichos procesos. Además, el uso de métodos de predicción de pérdidas de suelo, como USLE, MUSLE o RUSLE, permite la caracterización de los procesos erosivos superficiales. Cabe resaltar que tareas de campo y reconocimiento son de alta prioridad para la descripción de procesos erosivos cuando se trata de eventos que se desarrollan en áreas relativamente pequeñas comparada con la región de estudio.

El primer paso que se recomienda seguir es definir sobre la base de características hidrológicas, litológicas y sedimentológicas, áreas que sean mayormente vulnerables a procesos erosivos superficiales. Parte de esos estudios pueden surgir del tratamiento de información hidrológica que se haya desarrollado previamente y que forman parte de la línea base de la cuenca de estudio.

El monitoreo de erosión superficial se puede realizar mediante dos métodos, ambos a escalas espaciales diferentes. El primero es a través de tareas de campo que comprenden la adquisición de imágenes del fenómeno y la descripción de este, como también la cuantificación de geometrías más relevantes altura-anchos de erosión o cambios geométricos. La limitante de este tipo de monitoreo radica en la reducida escala espacial de cobertura, dado que el observador solo puede describir cada uno de los procesos. Este método resulta más difícil de llevar a cabo cuando las áreas de erosión son extensas, en este punto es posible pasar a relevamientos a través de la definición de transectos. El segundo método es la fotogrametría y, recientemente, mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (drones). Estas dos (2) metodologías permiten barrer con áreas más extensas, aunque al costo se incrementa; por otro lado, la pérdida de detalles en los procesos erosivos o la imposibilidad de capturarlo (p. ej., erosión laminar). La selección de uno u otro enfoque o la combinación de ambos dependerá de los objetivos buscados y de la disponibilidad de recursos.

Se recomienda la lectura de los Anexos A y B del presente informe, donde se detallan instrumentos y métodos clásicos y modernos para la estimación de erosión superficial.

#### Monitoreo en zonas propensas a deslizamientos y flujos de escombros

El monitoreo en zonas de deslizamientos consiste en la recolección de datos en determinados puntos de control ubicados sobre las laderas; donde se mide el desplazamiento relativo de grietas de tensión y escarpas en función del tiempo y espacio del deslizamiento con movimiento actual, se obtiene la velocidad, la dirección, situación de los planos de rotura, presiones de agua, entre otros. Mikkelsen (1996) describió la clasificación de métodos para monitoreo de deslizamiento en monitoreo de movimientos de la superficie, monitoreo de la presión de poros dentro del deslizamiento, y monitoreo del desplazamiento del terreno. La Tabla 18 señala las especificaciones para las diferentes tecnologías empleadas en el monitoreo de deslizamientos y flujos de escombros.

**Tabla 18.** Descripción de las tecnologías utilizadas en la medición y monitoreo de condiciones topográficas

Tecnología	Georadar terrestre	LiDAR Terrestre	Cámara de deformación	Estación total	GNSS (GPS)	Georadar (satélite)
Tipo	Medición remota en 2D	Medición remota en 2D	Medición remota en 2D	Medición de puntos remotos	Medición de puntos locales	Medición remota en 2D
Precisión	Por debajo de los mm	A pocos cm	A pocos cm	A pocos mm	Alrededor de 1 cm	mm-cm
Cobertura	Rango: hasta 5 km Cobertura: muchos km <sup>2</sup>	Rango: hasta 4 km Cobertura: muchos km <sup>2</sup>	Rango: hasta 5 km Cobertura: muchos km <sup>2</sup>	Rango: muchos km Cobertura: muchos km <sup>2</sup>	Lo que sea necesario. Grandes áreas requieren muchas unidades GPS	Muchos km <sup>2</sup> al este y pendientes orientadas al oeste
Efectividad	Siempre (día/noche, lluvia, nieve, niebla), rápida instalación	Solo en buen clima (no lluvia, nieve o niebla), rápida instalación	Solo en buena visibilidad (buen clima, durante el día), rápida instalación	Visibilidad requerida (buen clima, día o noche)	Siempre (día/noche, lluvia, nieve, niebla)	Dependiendo del intervalo de retorno del satélite, los datos archivados están disponibles
Tipo de operación	Continua o periódica	Periódica	Continua o periódica	Continua o periódica	Continua o periódica	Periódica
Limitaciones	Vegetación, nieve, reflexión (p. ej., en la red de desprendimientos de rocas)	Análisis automatizado difícil, complicado para mediciones continuas, nieve	Se requiere una capa de nieve de alto contraste, no adecuada para inestabilidades agudas	Los espejos de medición puntual en un área inestable, la medición puede ser imposible cuando la situación cambia, nieve	Solo la medición de puntos se requiere acceso al área en movimiento, la visibilidad por satélite puede ser complicada en valles estrechos	La cobertura puede ser problemática, los intervalos de retorno demasiado largos para inestabilidades agudas, nieve, vegetación

Fuente: GEOPREVENT (2019)

### 3.3.6. Determinación de la frecuencia de toma de datos

Con algunos instrumentos, se asume que la lectura obtenida es directamente correcta, mientras que con otros instrumentos es necesaria su calibración para reducir efectos de agentes internos y externos que podrían introducir errores en el parámetro a cuantificar. La selección de la frecuencia de datos estará limitada por el instrumento de medición y la caracterización del fenómeno sobre la base de las categorías anteriormente descritas (ver Tabla 2). Además, los equipos de telemetría condicionarán la transferencia de información o la accesibilidad a la fuente.

Para el caso de los movimientos de masa, un enfoque práctico para la selección de ubicaciones de instrumentos implica las siguientes consideraciones:

**En primer lugar,** se identifican las zonas de especial interés, como las zonas estructuralmente débiles, las zonas de mayor carga o zonas donde se prevé más presión de poros. Se hace una selección de zonas normalmente con secciones transversales donde el comportamiento predicho se considera representativo de toda la zona.

**En segundo lugar,** cuando se consideran las zonas representativas, las variaciones en la geología y los procedimientos de construcción también deben ser considerados. Estas secciones se consideran como principales secciones instrumentadas y los instrumentos se encargan de suministrar datos completos de comportamiento. Generalmente hay por lo menos dos (2) secciones primarias instrumentadas.

**En tercer lugar,** porque la selección de zonas representativas puede ser incorrecta, los instrumentos deben ser instalados en un número de secciones secundarias instrumentadas, para servir como índices de comportamiento comparativo. Los Instrumentos de estas secciones secundarias deben ser la mayor cantidad posible, también se deben instalar en las secciones principales para realizar las comparaciones.

Generalmente, los lugares deben ser seleccionados de manera que los datos pueden ser obtenidos tan pronto como

sea posible durante el proceso de construcción; la variabilidad inherente del suelo y la roca es aconsejable confiar en un solo instrumento como indicador. Normalmente, el uso de instrumentos implica mediciones relativas a las causas y, por lo tanto, los registros completos y los diarios se deben mantener todos los factores que podrían causar cambios en los parámetros medidos.

Se recomienda la lectura de los Anexos A y B y de los reportes WMO 2008 y 2010.

### 3.4. Fase 4: Evaluación de la efectividad de las intervenciones

#### 3.4.1. Adaptación de evaluación de riesgos y monitoreo de efectividad de las intervenciones (CENEPRED-IN)

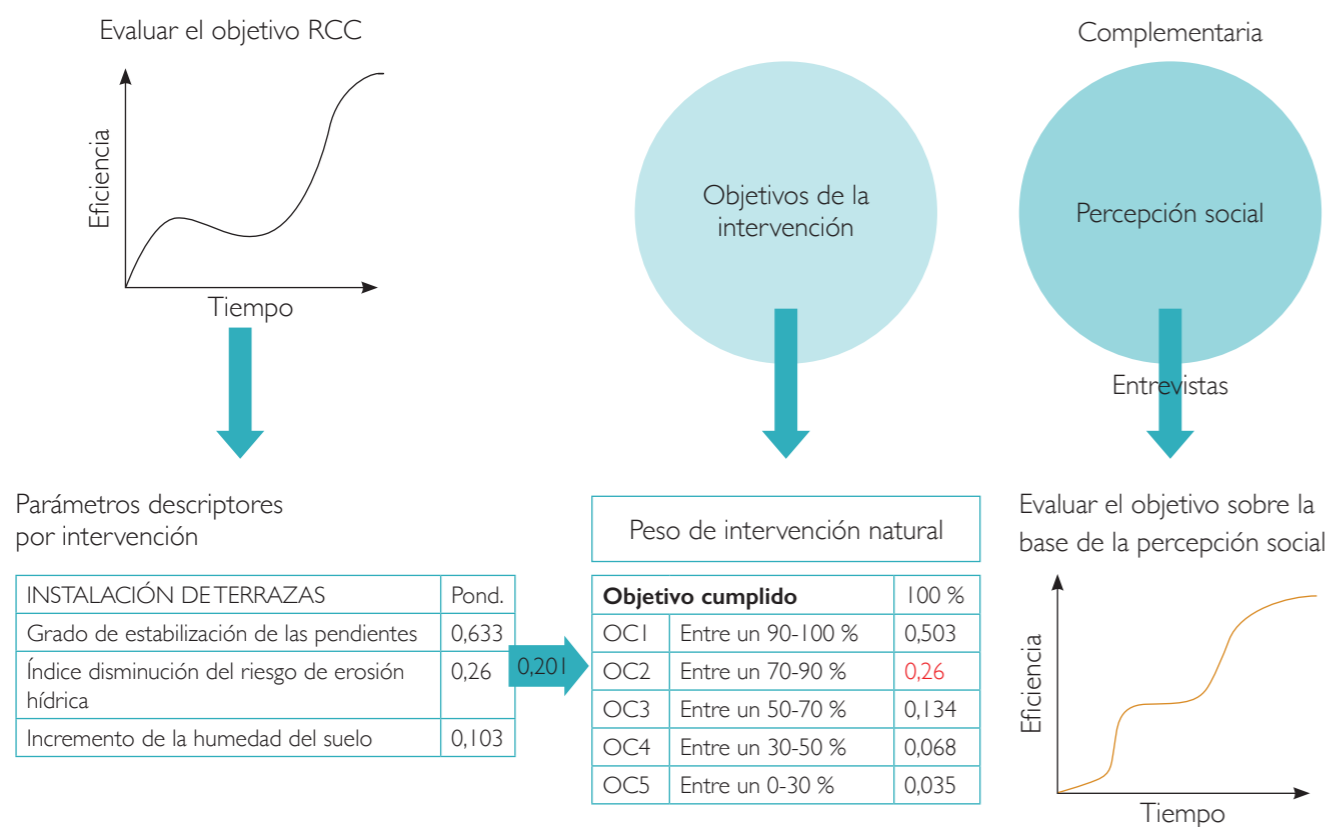
La evaluación de la efectividad de las intervenciones puede requerir de capacidades científicas del equipo a cargo del monitoreo y la interpretación de los datos. Esto para proceder al análisis estadístico que resulta de los datos recolectados a través de un diseño experimental robusto, tal como lo planteado en las secciones 3.3.

#### Modelo conceptual de inclusión de intervenciones

El modelo que se presenta se basa en la metodología propuesta por el manual del CENEPRED (2015), la que se ha adaptado para la incorporación de las intervenciones de IN, denominada a partir de ahora como CENEPRED-IN. Esta nueva propuesta metodológica, resumida en la Figura 10, incluye la incorporación de intervenciones que reducen el peligro de un proceso particular; como inundación, erosión superficial, deslizamientos, entre otros.

La metodología propone el uso de una serie de descriptores básicos para el monitoreo de las intervenciones. Sin embargo, esos factores de carácter indicativo y de control expedito, no reemplazan la necesidad del uso de un sistema detallado de monitoreo de las intervenciones, lo cual involucra una serie de técnicas y métodos específicos, que fueron descritos y sintetizados en las fases anteriores. Una vez evaluados los descriptores, el evaluador obtiene una aproximación semicuantitativa básica de la intervención evaluada.

**Figura 10.** Propuesta conceptual del método CENEPRED-IN



Fuente: CENEPRED, 2015

El siguiente paso es la adecuación y ponderación de esos resultados en función del objetivo esperado para la intervención en cuestión. Por ejemplo, usando el caso anterior, la intervención de enriquecimiento del suelo contemplaba una mejora en 20 % en cinco (5) años a una tasa de mejora de 5 %. Si durante el año uno (1) el monitoreo indica un enriquecimiento de igual o mayor que 5 %, entonces el objetivo de la intervención en ese periodo parcial de tiempo fue alcanzado en 100 %. Para la definición final/integral de la efectividad de la intervención, se recomienda una estrategia dual que incluya la evaluación de los objetivos técnicos junto a la percepción generada de la intervención en el ambiente social que se implanta.

El primer enfoque consiste en la evaluación de la eficiencia de las medidas de intervención en el control del riesgo, en tiempo y espacio, planteado y definido como objetivo en el proyecto original de intervención. El segundo enfoque es la evaluación a través de cuestionarios participativos de la población local sobre su percepción con respecto a la eficiencia de la intervención. Dicha actividad se plantea de manera complementaria y no involucra los resultados de tipo cuantitativo.

Si bien el enfoque técnico será prioritario en la evaluación del impacto, se entiende que la percepción social permitirá de manera complementaria darle un respaldo a la eva-

luación técnica. Cabe recordar que la variable tiempo será incorporada, dado que se planeará el cumplimiento de los objetivos sobre la base del tiempo considerado para lograrlos. La metodología aquí propuesta tiene los mismos pasos procedimentales que la planteada por el CENEPRED (2015), la diferencia principal es la inclusión de la intervención natural como una resta de la peligrosidad. Es decir, el valor de peligro será disminuido por la presencia de intervenciones sobre la infraestructura natural. La Figura 11 plantea la comparación de ambos métodos en el cálculo de peligrosidad. A futuro, es posible que el manual CENEPRED (2015) sea actualizado, lo que implicaría que la metodología CENEPRED-IN también se modifique. Por tanto, hay que considerar que las ponderaciones y variables podrían variar en consecuencia.

Se destaca que entre las ventajas que ofrece la metodología propuesta es su sencilla implementación. Esto se debe a que la metodología CENEPRED (2015) ya se encuentra en funcionamiento (con algunas mejoras incorporadas posteriormente), por lo que un gran número de técnicos y especialistas conocen su aplicabilidad y su puesta en marcha. Este punto facilita enormemente la etapa de difusión y perfeccionamiento de los técnicos que llevarán las tareas de campo y la selección de los descriptores que mejor representen el fenómeno a evaluar. El segundo punto es que los descriptores asociados son similares a los ya definidos por CENEPRED (2015), por lo tanto, la interpretación de estos y la selección final no involucra un nuevo proceso de aprendizaje.

**Figura 11.** Comparación directa entre el planteo de peligrosidad por parte del CENEPRED (2015) y CENEPRED-IN

Peligrosidad

$$\text{SIN infraestructura natural (CENEPRED)}$$

$$\text{Peligrosidad} = \text{Fenómeno (Peso}_f\text{)} + \text{Susceptibilidad (Peso}_s\text{)}$$

$$\text{Peso}_f + \text{Peso}_s = 1$$

$$(\text{Peso}_f = 0,5 \parallel \text{Peso}_s = 0,5)$$

$$\text{CON infraestructura natural (CENEPRED-IN)}$$

$$\text{Peligrosidad} = \text{Fenómeno (Peso}_f\text{)} + \text{Susceptibilidad (Peso}_s\text{)} - \text{V Infraestructura Natural (Peso}_{IN}\text{)}$$

$$\text{Peso}_f + \text{Peso}_s + \text{Peso}_{IN} = 1$$

$$(\text{Peso}_f = 0,33 \parallel \text{Peso}_s = 0,33 \parallel \text{Peso}_{IN} = 0,33)$$

Fuente: CENEPRED, 2015

Parámetros, descriptores y pesos ponderados para las intervenciones  
Las tablas a continuación indican los parámetros, descrip-

tores y pesos ponderados por cada tipo de intervención que se utilizará en el cálculo.

**Tabla 19.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de terrazas de formación lenta

Instalación de terrazas de formación lenta		Ponderación
Grado de estabilización de las pendientes		63,3 %
VDT1	Sin movimiento – extremadamente lenta/reptación (estable)	0,503
VDT2	Flujos lentos – reptación – soliflucción	0,260
VDT3	Movimientos de masa velocidad moderada ( $V = 3,009 \times 10^{-4}$ m/s)	0,134
VDT4	Movimientos de masa rápidos ( $V = 0,05$ m/s)	0,068
VDT5	Movimientos de masa velocidad muy rápidos ( $V = 5$ m/s)	0,035
Índice disminución del riesgo de erosión hídrica		26 %
IET1	Sin riesgo	0,503
IET2	Bajo (menor o igual a 0,10)	0,260
IET3	Moderado (0,11-0,30)	0,134
IET4	Alto (0,31-0,60)	0,068
IET5	Muy alto (mayor a 0,60)	0,035
Incremento de la humedad del suelo		10,6 %
IHS1	Muy alto (70-100 %)	0,503
IHS2	Alto (50-70 %)	0,260
IHS3	Moderado (25-50 %)	0,134
IHS4	Bajo (10-25 %)	0,068
IHS5	Muy bajo (Menor que 10 %)	0,035

Fuente: elaboración propia

**Tabla 20.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de enriquecimiento del suelo

Enriquecimiento del suelo		Ponderación
Incremento del grado de enriquecimiento del suelo (fertilidad- textura)		63,3 %
CS	Muy alto (70-100 %)	0,503
CS	Alto (50-70 %)	0,260
CS	Moderado (25-50 %)	0,134
CS	Bajo (10-25 %)	0,068
CS	Muy bajo (menor que 10 %)	0,035
Índice disminución del riesgo de erosión hídrica		26,0 %
IET1	Sin riesgo	0,503
IET2	Bajo (menor o igual a 0,10)	0,260
IET3	Moderado (0,11-0,30)	0,134
IET4	Alto (0,31-0,60)	0,068
IET5	Muy alto (mayor a 0,60)	0,035
Índice disminución de erosión laminar		10,6 %
EL-G1	Grado 1 - Normal (menor a 0,5)	0,503
EL-G2	Grado 2 - Ligera (0,5-5)	0,260
EL-G3	Grado 3 - Moderada (5-15)	0,134
EL-G4	Grado 4 - Severa (15-50)	0,068
EL-G5	Mayor o igual a grado 5 (mayor a 50)	0,035

Fuente: elaboración propia

**Tabla 21.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de las zanjas de infiltración

Construcción de zanjas de infiltración		Ponderación
Incremento de la humedad del suelo		63,3 %
IHS1	Muy alto (70-100 %)	0,503
IHS2	Alto (50-70 %)	0,260
IHS3	Moderado (25-50 %)	0,134
IHS4	Bajo (10-25 %)	0,068
IES5	Muy bajo (menor que 10 %)	0,035
Índice disminución del riesgo de erosión hídrica		26,0 %
IET1	Sin riesgo	0,503
IET2	Bajo (menor o igual a 0,10)	0,260
IET3	Moderado (0,11-0,30)	0,134
IET4	Alto (0,31-0,60)	0,068
IET5	Muy alto (mayor a 0,60)	0,035
Porcentaje de área con plantaciones sobre camellones		10,3 %
PAR1	Mayor 90 %	0,503
PAR2	66-90 %	0,260
PAR3	33-66 %	0,134
PAR4	10-33 %	0,068
PAR5	Menor a 10 %	0,035

Fuente: elaboración propia

**Tabla 22.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de construcción de *qochas*

Construcción de <i>qochas</i>		Ponderación
Tiempo de retención del pico de caudal		63,3 %
TR1	Más de 6 veces el tiempo base de la cuenca	0,503
TR2	Entre 4 y 5 veces el tiempo base del hidrograma característico de la cuenca	0,260
TR3	Entre 3 y 4 veces el tiempo base del hidrograma característico de la cuenca	0,134
TR4	Entre 2 y 3 veces el tiempo base del hidrograma característico de la cuenca	0,068
TR5	Hasta 2 vez el tiempo base del hidrograma característico de la cuenca	0,035
Índice disminución del riesgo de erosión hídrica		26 %
IET1	Sin riesgo	0,503
IET2	Bajo (menor o igual a 0,10)	0,260
IET3	Moderado (0,11-0,30)	0,134
IET4	Alto (0,31-0,60)	0,068
IET5	Muy Alto (mayor a 0,60)	0,035
Volumen de llenado de la <i>qocha</i>		10,3 %
VLL1	Hasta 10 %	0,503
VLL2	Entre 10-30 %	0,260
VLL3	Entre 30-60 %	0,134
VLL4	Entre 60-80 %	0,068
VLL5	Entre 80-100 %	0,035

Fuente: elaboración propia



**Tabla 23.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de Forestación con especies nativas

Forestación con especies nativas		Ponderación
Porcentaje de área en recuperación/recuperada		63,3 %
PAR1	Mayor 90 %	0,503
PAR2	66-90 %	0,260
PAR3	33-66 %	0,134
PAR4	10-33 %	0,068
PAR5	Menor a 10 %	0,035
Índices de correlación con índices de vegetación acorde a la forestación instalada		26 %
IV1	Mayor 90 %	0,503
IV2	66-90 %	0,260
IV3	33-66 %	0,134
IV4	10-33 %	0,068
IV5	Menor a 10 %	0,035
Grado de intensidad de la erosión hídrica		10,3 %
G1	Sin erosión hídrica	0,503
G2	Ligera (menor a 10)	0,260
G3	Moderada (10-50)	0,134
G4	Alta (50-200)	0,068
G5	Muy alta (mayor a 200)	0,035

Fuente: elaboración propia

**Tabla 24.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de revegetación con especies nativas

Revegetación con especies nativas		Ponderación
Porcentaje de área en recuperación/recuperada		63 %
PAR1	Mayor 90 %	0,503
PAR2	66-90 %	0,260
PAR3	33-66 %	0,134
PAR4	10-33 %	0,068
PAR5	Menor a 10 %	0,035
Índices de correlación con índices de vegetación acorde a la forestación instalada		26 %
IV1	Mayor 90 %	0,503
IV2	66-90 %	0,260
IV3	33-66 %	0,134
IV4	10-33 %	0,068
IV5	Menor a 10 %	0,035
Grado de intensidad de la erosión hídrica		10,3 %
G1	Sin erosión hídrica	0,503
G2	Ligera (menor a 10)	0,260
G3	Moderada (10-50)	0,134
G4	Alta (50-200)	0,068
G5	Muy alta (mayor a 200)	0,035

Fuente: elaboración propia

**Tabla 25.** Definición de descriptores y pesos ponderados para evaluación de diques para control de cárcavas

Diques para control de cárcavas		Ponderación
Tasa media anual de erosión linear-retrocedente		63 %
G1	Sin erosión retrocedente	0,503
G2	Ligera (menor o igual a 10 %)	0,26
G3	Moderada (10-20 % la longitud de la cárcava original)	0,134
G4	Alta (20-50 % la longitud de la cárcava original)	0,068
G5	Muy alta (mayor a 50 % la longitud de la cárcava original)	0,035
Grado de efectividad del dique en el freno de la erosión linear y captura de sedimentos		0,26 %
DC1	Muy alta (90-100 %)	0,503
DC2	Alta (66-89 %)	0,260
DC3	Moderada (33-66 %)	0,134
DC4	Baja (15-33 %)	0,068
DC5	Muy baja (0-14 %)	0,035
Porcentaje de área con cobertura vegetal natural, forestada-revegetada y cultivo favorable en la cuenca de erosión		10,3 %
CAF1	Mayor 90 %	0,503
CAF2	66-90 %	0,260
CAF3	33-66 %	0,134
CAF4	10-33 %	0,068
CAF5	Menor a 10 %	0,035

Fuente: elaboración propia

### 3.4.2. Componente cualitativo: percepción social

El segundo frente de evaluación contempla la percepción de los habitantes locales sobre la efectividad de las obras de intervención, particularmente en regiones de escaso de-

sarrollo donde la actividad agrícola-ganadera y minera son la actividad económica principal. Este tipo de modelos ha sido utilizado en áreas de erosión acelerada y condiciones rurales de África del Este (Meshesha & Birhanu, 2015). Las

entrevistas son realizadas a través de cuestionarios donde los habitantes locales adultos consideran su percepción de los efectos de las intervenciones sobre la e la fertilidad de los suelos, procesos erosivos, calidad del agua, percepción del riesgo (inundaciones, erosión o movimientos de masa), forestación, efecto de las intervenciones sobre su situación económica-productiva u otros beneficios, grado de satisfacción sobre su participación en el manejo de cuencas con intervención. Es común que en habitantes locales exista un vacío entre la percepción estacional de la erosión y sus consecuencias a largo plazo. La participación de la comunidad es importante para evaluar el nivel de adecuación de la obra a la realidad y necesidad local.

Por tanto, el diseño de monitoreo deberá considerar la percepción del riesgo de las comunidades locales, a fin de garantizar la sostenibilidad del monitoreo, desde el cuidado de la instrumentación y las facilidades logísticas para acceder a las zonas de intervención hasta las gestiones para la consolidación de arreglos institucionales.

### 3.4.3. Ejemplos de la guía CENEPRED-IN para inundaciones, erosiones superficiales y movimientos de masa

#### Inundaciones

A continuación, se describe un ejemplo conceptual de implementación de la metodología de evaluación. Se plantean dos (2) escenarios: el primero con la ponderación de la IN sobre el riesgo final (como se propone en este documento) y el segundo sin la IN, donde el cálculo de riesgo final sigue la metodología descrita por el CENEPRED (2015).

El planteo procedimental del método aquí propuesto puede ser resumido de la siguiente manera:

1. Conocimiento de los objetivos planteados para las IN que se implementaron o se pretenden implantar.
2. Análisis de los parámetros asociados a la intervención a evaluar (ver tablas de descriptores).
3. Selección de los descriptores asociados correspondiente a la IN y al fenómeno (esto debe realizarlo un equipo técnico especializado).
4. Evaluación de los objetivos técnicos planteados y alcanzados en un tiempo determinado.
5. Realización de entrevistas para la evaluación de la percepción social alcanzada. Opcional.
6. Estimación de la peligrosidad, incluyendo la reducción de esta debido a la intervención.
7. Análisis de vulnerabilidad (similar al planteado por el CENEPRED, 2015).
8. Definir el riesgo sobre la base de la ponderación de la peligrosidad y vulnerabilidad.

Para el caso de inundaciones es posible la puesta en marcha de diferentes intervenciones naturales. En este ejemplo, se cuenta con dos (2) intervenciones: instalación de terrazas de formación lenta y enriquecimiento de suelo. Ambas cuentan con los objetivos planteados por la entidad RCC y conocidos por el personal técnico. Para el ejemplo se considerará que el personal técnico ha realizado las tareas de campo y seleccionó las siguientes ponderaciones para los descriptores de los procesos (Tabla 26).

**Tabla 26.** Selección de descriptores para evaluar efectividad de intervenciones en inundaciones

Instalación de terrazas de crecimiento lento	Ponderación	Descriptor seleccionado
Grado de estabilización de pendientes	63,3 %	0,260
Índice de disminución del riesgo de erosión hídrica	26 %	0,260
Incremento de la humedad del suelo	10,3 %	0,503
Enriquecimiento de suelo	Ponderación	Descriptor seleccionado
Incremento del grado de enriquecimiento del suelo (fertilidad/textura)	63,3 %	0,503
Índice disminución del riesgo de erosión hídrica	26 %	0,260
Índice de disminución de erosión laminar	10,3 %	0,260

Fuente: elaboración propia

El valor del peso de la intervención natural por objetivo alcanzado en el cálculo de peligrosidad será calculado como sigue:

$$V_{INOA} = (0,63 * 0,26 + 0,26 * 0,26 + 0,103 * 0,503) * 0,5 + (0,633 * 0,503 + 0,26 * 0,26 + 0,103 * 0,26) * 0,5 = 0,348$$

El valor previo calculado servirá para evaluar los objetivos técnicos sobre la base de una comparación de los objetivos iniciales planteados para las intervenciones. Debe quedar claro que los objetivos deben encontrarse evaluados sobre la base del tiempo de desarrollo de la intervención. Es decir, si el objetivo se propone a cinco (5) años el porcentaje de avance en los años previos debe ser bien definido. Resulta indispensable conocer los objetivos de la IN, porque dado que los mismos son diferentes para los fenómenos en estudio (y hasta el lugar de aplicación del IN) la definición del tiempo y cumplimiento estará fuertemente correlacionado a cada IN. Se propone inicialmente (y de manera genérica) la Tabla 27 para ello.

**Tabla 27.** Comparación de objetivos esperados

Parámetro (OA)	Objetivo alcanzado con relación al objetivo esperado para la intervención para un tiempo x.		
Descriptor	OA1	OA2	OA3
	Mayor 90 %	66-89 %	33-66 %
	0,503	0,260	0,134
	10-33 %	Menor a 10 %	0,068
			0,035

Para estar de lado de la seguridad, se escoge el valor de 0,260, resultando este inferior al calculado de 0,348. El valor resultante de las intervenciones naturales será:

$$V_{IN} = 0,260$$

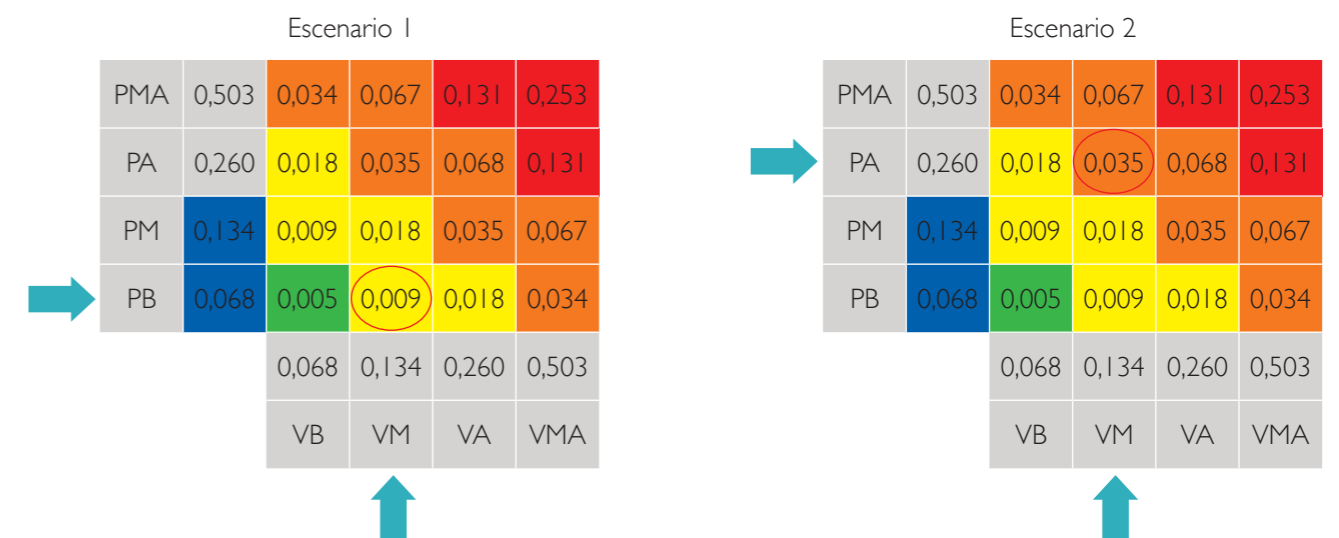
Suponiendo un valor de peligrosidad alta de 0,260 y uno de susceptibilidad media de 0,134 (extraído de la aplicabilidad de CENEPRED, 2015). El valor final de peligrosidad para el escenario 1 será:

$$Peligrosidad_{IN} = 0,260 * 0,33 + 0,134 * 0,33 - 0,26 * 0,33 = 0,044$$

Luego, se plantea la condición del escenario 2 (sin la intervención natural). En este caso la peligrosidad sería calculada sobre la base del método de CENEPRED (2015), como: Para finalizar, se calculará el riesgo para ambos escenarios. Suponiendo una vulnerabilidad media (0,134) y adoptando del cálculo previo un valor de peligrosidad baja PB (0,068) para el escenario 1 y peligrosidad alta PA (0,26) para el escenario 2, se obtienen los siguientes índices de riesgo (ver Figura 12). Nótese que se seleccionan valores finales de peligrosidad superiores a los calculados en ambos escenarios.

$$Peligrosidad_{\square} = 0,260 * 0,5 + 0,134 * 0,5 = 0,197$$

**Figura 12.** Comparación de riesgos sobre la base de la matriz propuesta por el CENEPRED (2015) para inundaciones. Izquierda: CENEPRED-IN, derecha: CENEPRED



Fuente: elaboración propia

Si bien el ejemplo previo es un planteo conceptual del fenómeno inundación y los resultados son hipotéticos, es claro que la incorporación y planteo conceptual de las intervenciones desarrolla en la metodología una clara reducción del valor del riesgo.

### Erosión superficial

En esta sección se presenta un ejemplo de implementación de la guía propuesta en este informe para el fenómeno de erosión superficial. El ejemplo sigue la misma lí-

nea de evaluación propuesta en la subsección previa con dos (2) escenarios (1: con IN, 2 sin IN). Consideremos que deseamos evaluar la implementación de IN y para ello se seleccionará la siguiente solución para el control de la erosión superficial: enriquecimiento de suelo. Ambas intervenciones cuentan con los objetivos planteados por la entidad RCC y conocidos por el personal técnico. Supongamos ahora que de las IN y las tareas de campo los descriptores seleccionados son los señalados en la Tabla 28.

**Tabla 28.** Selección de descriptores para evaluar efectividad de intervenciones en inundaciones

Enriquecimiento de suelo	Ponderación	Descriptor seleccionado
Incremento del grado de enriquecimiento del suelo (fertilidad/textura)	63,3 %	0,260
Índice disminución del Riesgo de Erosión hídrica	26,0 %	0,134
Índice de disminución de erosión laminar	10,3 %	0,260

Fuente: elaboración propia

El valor del peso de la intervención natural por objetivo alcanzado en el cálculo de peligrosidad será calculado de la siguiente forma:

$$V_{NOA} = 0,633 * 0,26 + 0,26 * 0,134 + 0,103 * 0,26 = 0,226$$

El último valor servirá para evaluar los objetivos técnicos planteados para las intervenciones. Se propone inicialmente sobre la base de una comparación de los objetivos iniciales la Tabla 29 para ello.

**Tabla 29.** Comparación de objetivos esperados

Parámetro (OA)	Objetivo alcanzado con relación al objetivo esperado para la intervención para un tiempo x.				
Descriptores	OA1	OA2	OA3	OA4	OA5
	Mayor 90 %	66-89 %	33-66 %	10-33 %	Menor a 10 %
	0,503	0,260	0,134	0,068	0,035

Fuente: elaboración propia

El valor resultante de las intervenciones naturales será:

$$V_{IN} = 0,134$$

Recuérdese que en este punto se cuenta con la opción de realizar entrevistas sociales participativas, lo que permite otro enfoque complementario de la evaluación del impacto de la intervención natural (Meshesha & Birhanu, 2015).

Suponiendo un valor de peligrosidad muy alta de 0,503 y uno de susceptibilidad alta de 0,260, el valor final de peligrosidad para el escenario 1 será:

$$Peligrosidad_{IN} = 0,503 * 0,33 + 0,26 * 0,33 - 0,134 * 0,33 = 0,208$$

Luego, se plantea la condición del escenario 2 (sin la intervención natural). En ese caso, la peligrosidad será calculada

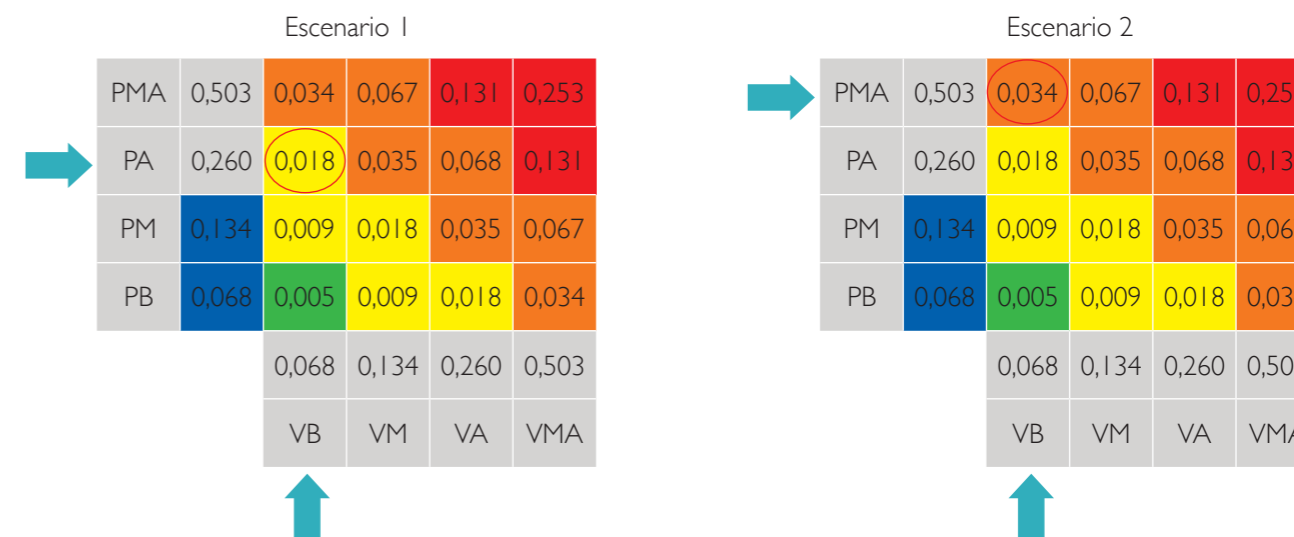
sobre la base del método de CENEPRED (2015), como:

$$Peligrosidad_{\square} = 0,503 * 0,5 + 0,26 * 0,5 = 0,382$$

Para finalizar, se calculará el riesgo para ambos escenarios. Suponiendo una vulnerabilidad baja (0,068) y adoptando del cálculo una peligrosidad baja PB (0,26) para el escena-

rio 1 y peligrosidad muy alta PMA (0,503) para el escenario 2, se obtienen los siguientes índices de riesgo (ver Figura 13).

**Figura 13.** Comparación de riesgos sobre la base de la matriz propuesta por el CENEPRED (2015). Erosión superficial. Izquierda: CENEPRED-IN, derecha: CENEPRED



Fuente: elaboración propia

*Movimientos de masa: deslizamientos*

Para el caso de deslizamientos es posible la puesta en marcha de diferentes intervenciones naturales. Supongamos que para la aplicación que tenemos implantado en nuestro proceso se plantean dos (2) soluciones, como i) forestación de especies

nativas y ii) revegetación de especies nativas. Ambas intervenciones cuentan con los objetivos planteados por la entidad RCC y conocidos por el personal técnico. La evaluación de la zona donde se implementó la IN y las tareas de campo de los descriptores seleccionados son los mostrados en la Tabla 30.

**Tabla 30.** Selección de descriptores para evaluar efectividad de intervenciones en deslizamientos

Forestación con especies nativas	Ponderación	Descriptor seleccionado
Porcentaje de área en recuperación/recuperada	63,3 %	0,260
Índices de correlación con índices de vegetación acorde a la forestación instalada	26,0 %	0,134
Grado de intensidad de la erosión hídrica	10,3 %	0,068
Revegetación con especies nativas	Ponderación	Descriptor seleccionado
Porcentaje de área en recuperación/recuperada	63,3 %	0,134
Índices de correlación con índices de vegetación acorde a la forestación instalada	26,0 %	0,134
Grado de intensidad de la erosión hídrica	10,3 %	0,260

Fuente: elaboración propia

El valor del peso de la intervención natural por objetivo alcanzado en el cálculo de peligrosidad será calculado como sigue:

$$V_{INOA} = (0,633 * 0,26 + 0,26 * 0,134 + 0,103 * 0,068) * 0,5 + (0,633 * 0,134 + 0,26 * 0,134 + 0,103 * 0,26) * 0,5 = 0,176$$

El último valor servirá para evaluar los objetivos técnicos planteados para las intervenciones. Se propone inicialmente sobre la base de una comparación de los objetivos iniciales la Tabla 31 para ello.

**Tabla 31.** Comparación de objetivos esperados

Parámetro (OA)	Objetivo alcanzado con relación al objetivo esperado para la intervención para un tiempo x.		
Descriptores	OA1	Mayor 90 %	0,503
	OA2	66-89 %	0,260
	OA3	33-66 %	0,134
	OA4	10-33 %	0,068
	OA5	Menor a 10 %	0,035

Fuente: elaboración propia

Se utiliza el valor de 0,134 resultando este inferior al cálculo de 0,176. El valor resultante de las intervenciones naturales será:

$$V_{IN} = 0,176$$

Considerando un valor de peligrosidad alta de 0,260 y uno de susceptibilidad alta de 0,260. El valor final de peligrosidad para el escenario 1 será:

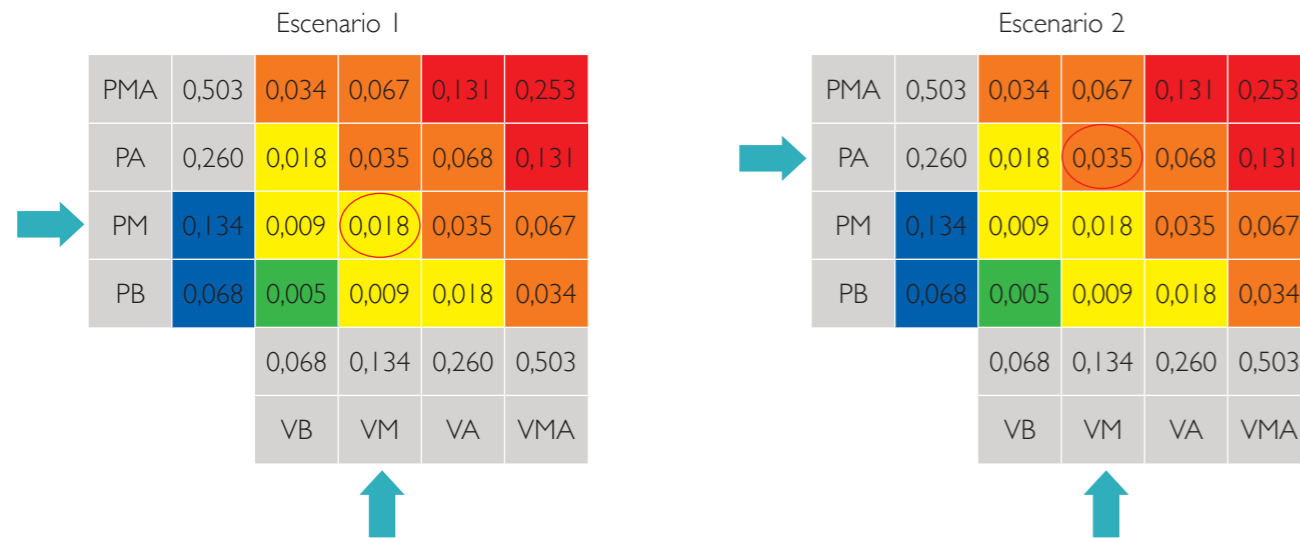
$$Peligrosidad_{IN} = 0,260 * 0,33 + 0,260 * 0,33 - 0,134 * 0,33 = 0,127$$

Para la condición del escenario 2 (sin la intervención natural), la peligrosidad será calculada sobre la base del método de CENEPRED (2015), como:

$$Peligrosidad_{\square} = 0,260 * 0,5 + 0,260 * 0,5 = 0,260$$

Para finalizar, se calculará el riesgo para ambos escenarios. Suponiendo una vulnerabilidad media (0,134) y un valor del cálculo previo de peligrosidad media PM (0,134) para el escenario 1 y peligrosidad alta PA (0,26) para el escenario 2 se obtienen los siguientes índices de riesgo (ver Figura 14).

**Figura 14.** Comparación de riesgos sobre la base de la matriz propuesta por el CENEPRED (2015). Izquierda: CENEPRED-IN, derecha: CENEPRED.



Fuente: elaboración propia

Nuevamente, la incorporación y planteo conceptual de las intervenciones desarrolla en la metodología una clara reducción del valor del riesgo.

*Movimientos de masa: flujo de detritos*

El siguiente es un ejemplo de cómo se implementó la guía propuesta en el presente informe para el caso de flujo de detritos. El planteo del ejemplo sigue la misma línea de evaluación propuesta en la subsección previa con dos escena-

rios (1: con IN, 2 sin IN). Se desea evaluar la implementación de IN y para ello se seleccionan las siguientes dos (2) soluciones para el control del flujo de detritos: i) instalación de terrazas de formación lenta, ii) forestación de especies nativas y diques para control de cárcavas. Estas intervenciones cuentan con los objetivos planteados por la entidad RCC y conocidos por el personal técnico. Supongamos ahora que de las IN y las tareas de campo los descriptores seleccionados son los mostrados en la Tabla 32.

**Tabla 32.** Selección de descriptores para evaluar efectividad de intervenciones en inundaciones

Instalación de terrazas	Ponderación	Descriptor seleccionado
Grado de estabilización de las pendientes	63,3 %	0,260
Índice disminución del riesgo de erosión hídrica	26 %	0,260
Incremento de la humedad del suelo	10,3 %	0,134
Forestación con especies nativas	Ponderación	Descriptor seleccionado
Porcentaje de área en recuperación/recuperada	63,3 %	0,260
Índices de correlación con índices de vegetación acorde a la forestación instalada	26 %	0,134
Grado de intensidad de la erosión hídrica	10,3 %	0,260
Forestación con especies nativas	Ponderación	Descriptor seleccionado
Tasa media anual de erosión linear-retrocedente	63,3 %	0,260
Grado de efectividad del dique en el freno de la erosión linear y captura de sedimentos	26 %	0,503
Porcentaje de área con cobertura vegetal natural, forestada-revegetada y cultivo favorable en la cuenca de erosión	10,3 %	0,26

Fuente: elaboración propia

El valor del peso de la intervención natural por objetivo alcanzado en el cálculo de peligrosidad será calculado como sigue:

$$V_{INO.A} = (0,633 * 0,260 + 0,26 * 0,26 + 0,103 * 0,134) * 0,33 + (0,633 * 0,26 + 0,26 * 0,134 + 0,103 * 0,26) * 0,33 + (0,633 * 0,26 + 0,26 * 0,503 + 0,103 * 0,26) * 0,33 = 0,262$$

El último valor sirve para evaluar los objetivos técnicos sobre la base de una comparación de los objetivos iniciales planteados para las intervenciones. Se propone inicialmente la Tabla 33 para ello.

**Tabla 33.** Comparación de objetivos esperados. Fuente: elaboración propia

Parámetro (OA)	Objetivo alcanzado con relación al objetivo esperado para la intervención para un tiempo x.		
OA1	Mayor 90 %	0,503	
OA2	66-89 %	0,260	
OA3	33-66 %	0,134	
OA4	10-33 %	0,068	
OA5	Menor a 10 %	0,035	

Fuente: elaboración propia

Se utiliza el valor de 0,26 resultando este inferior al calculado de 0,262. El valor resultante de las intervenciones naturales será:

$$V_{IN} = 0,26$$

Suponiendo un valor de peligrosidad muy alta de 0,503 y uno de susceptibilidad muy alta de 0,503. El valor final de peligrosidad para el escenario 1 será:

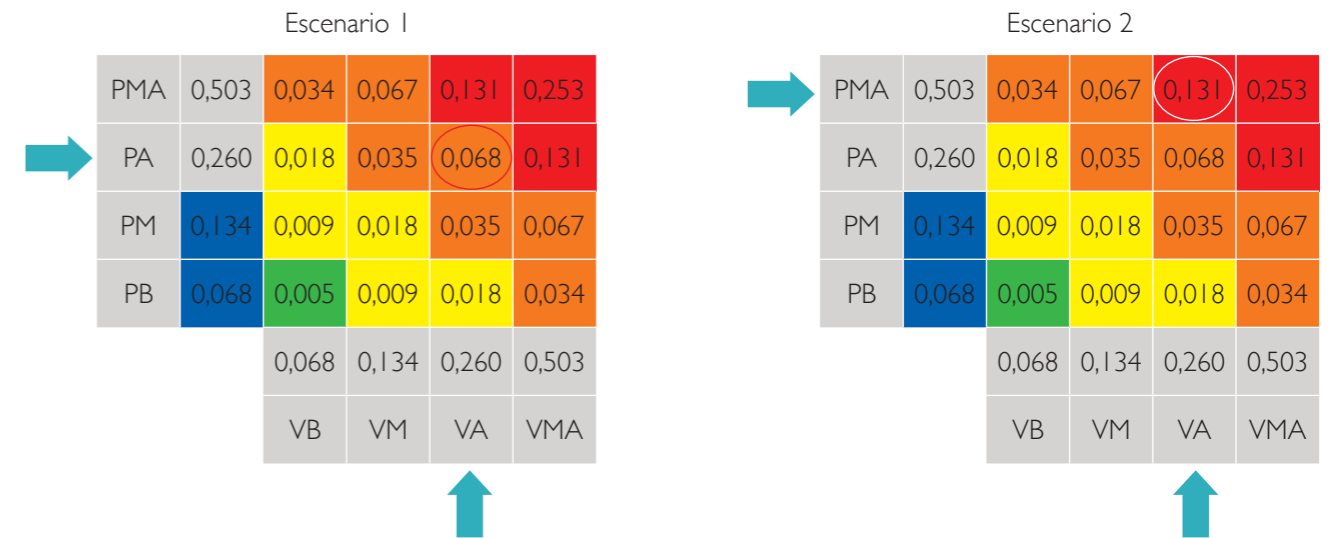
$$Peligrosidad_{IN} = 0,503 * 0,33 + 0,503 * 0,33 - 0,260 * 0,33 = 0,246$$

Para la condición del escenario 2 (sin la intervención natural), la peligrosidad será calculada sobre la base del método de CENEPRED (2015), como:

$$Peligrosidad_{\square} = 0,503 * 0,5 + 0,503 * 0,5 = 0,503$$

Para finalizar, se calcula el riesgo para ambos escenarios. Suponiendo una vulnerabilidad alta (0,260) y determinando (del cálculo previo) un valor de PA (0,26) para el escenario 1 y PMA (0,503) para el escenario 2 se obtienen los siguientes índices de riesgo (ver Figura 15).

**Figura 15.** Comparación de riesgos sobre la base de la matriz propuesta por el CENEPRED (2015) para erosión superficial. Izquierda: CENEPRED-IN, derecha: CENEPRED



Fuente: elaboración propia

Este es un planteamiento conceptual de un flujo de detritos y los resultados son hipotéticos, es claro que la incorporación y planteo conceptual de las intervenciones desarrolla en la metodología una clara reducción del valor del riesgo.

# INVT

## Sinergia con sistemas y estaciones de monitoreo existentes

Foto: Condesan

En las últimas décadas, el costo de los desastres ha aumentado significativamente en el mundo, por lo que para reducir las vulnerabilidades y los riesgos de amenazas se necesitan esfuerzos más estratégicos y sistemáticos a nivel mundial y nacional (Shah *et al.*, 2020). El manejo del riesgo de desastres es considerado como una de las principales responsabilidades del gobierno, donde las necesidades legales y políticas involucran la configuración de arreglos institucionales que permiten construir la capacidad de respuesta de los sectores sociales (Ahrens & Rudolph, 2006). En el Perú, diferentes organismos gubernamentales trabajan por brindar herramientas y dar seguimiento a la ocurrencia e impacto de fenómenos naturales, como el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), los cuales trabajan en conjunto con otros actores académicos e institucionales en los procesos de estimación, prevención y reducción del riesgo, así como de reconstrucción. En secciones anteriores se presentó el tipo de información necesaria para la evaluación y monitoreo de efectividad de intervenciones sobre la infraestructura natural, incluyendo las variables y métodos de medición asociados. En esta sección, se brindará un diagnóstico de los sistemas de información existentes y disponibles para la implementación, operación y mantenimiento del sistema de monitoreo de la efectividad de las intervenciones sobre la IN en la mitigación de movimientos de masa e inundaciones.

### 4.1. Alcance de las sinergias en el sistema de monitoreo

Las intervenciones en IN tienen la finalidad de la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos, mediante la regulación hídrica y el control de la erosión. Por otro lado, la RCC indica que la solución integral en una cuenca está compuesta por una combinación de infraestructura gris y natural; sin embargo, recae en el planteamiento que las cuencas hidrográficas deberían ser controladas, para proveer abastecimiento hídrico y reducir la ocurrencia de inundaciones, erosión y movimientos de masa.

La implementación, operación y mantenimiento del sistema de monitoreo de la efectividad de las medidas de interven-

ción de IN deben promoverse y respaldarse de acuerdo con los siguientes alcances:

- Complementariedad o compatibilidad de las medidas de intervención con los objetivos de los programas y planes institucionales.
- Transparencia y eficacia de las estructuras de planificación, implementación y gestión existentes.
- Respeto de los conocimientos y los derechos de los miembros de las comunidades locales.
- Participación plena y efectiva de las partes interesadas, en particular de las comunidades locales.
- Acciones para hacer frente a los riesgos por movimientos de masa e inundaciones.
- Acciones para reducir la ocurrencia e impacto de los movimientos de masa e inundaciones.

### 4.2. Mapeo de instituciones involucradas en la generación de información y monitoreo de efectividad de las intervenciones de IN

Se realizó una revisión e identificación de las instituciones gubernamentales que tienen un potencial vínculo con la generación de información para el monitoreo de efectividad de las intervenciones sobre la IN de movimientos de masa, erosión superficial e inundaciones. Las instituciones fueron clasificadas como:

**Usuarios de información**, aquellos que demandan o requieren de información de tipo ambiental, económica, social y otras, relacionada al monitoreo de efectividad de las intervenciones de IN.

**Proveedores de información**, aquellas instituciones que generan información primaria de tipo ambiental, económica, social y demás, y que sirve de fuente para el desarrollo del sistema de monitoreo de efectividad de las intervenciones sobre la infraestructura natural.

El desglose del mapeo de instituciones gubernamentales se indica en la Tabla 34.



**Tabla 34.** Mapeo de principales instituciones gubernamentales relacionadas al monitoreo de efectividad de las intervenciones de IN

Institución/Entidad	Objetivos y alcance	Clase
Autoridad para la Reconstrucción con Cambios (ARCC)	El Plan Integral para la Reconstrucción con Cambios (PIRCC) contempla un plan de acción de construcción con enfoque de prevención y gestión de riesgos de desastres, donde las intervenciones tienen como objetivo prevenir daños que podrían causar los movimientos de masa e inundaciones, y están referidas a soluciones integrales (definidas en el producto 2) de corto, mediano y largo plazo. Además, uno de los componentes del PIRCC es el desarrollo de acciones para fortalecer la capacidad de las entidades ejecutoras.	Usuario
Sistema Nacional de Defensa Civil (SINADECI)	Conjunto interrelacionado de organismos del sector público y no público, normas, recursos y doctrinas, orientado a la protección de la población en caso de desastres de cualquier índole u origen. Este actúa en concordancia con la política y planes de la defensa nacional.	Usuario
Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN)	Monitorea, evalúa y analiza la información proveniente de las instituciones técnico- científicas nacionales e internacionales, sobre fenómenos que puedan ocasionar emergencias o desastres. Sobre la base de esta información, el COEN presenta reportes y boletines de divulgación.	Usuario
Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED)	Coordina, facilita y supervisa la formulación e implementación de la Política Nacional y el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, en los procesos de estimación, prevención y reducción del riesgo, así como de reconstrucción.	Usuario
Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD)	Sistema creado para identificar y reducir los riesgos asociados a peligros o minimizar sus efectos, evitar la generación de nuevos riesgos, así como de la preparación y atención ante situaciones de desastre mediante el establecimiento de principios, lineamientos de política, componentes, procesos e instrumentos de la gestión del riesgo de desastres.	Usuario
Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS)	Responsable de emitir disposiciones destinadas a promover, diseñar e implementar mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos, así como herramientas para que las empresas prestadoras ejecuten el monitoreo de las intervenciones, los posibles impactos y mejora de las acciones de conservación hídrica.	Usuario
Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (Sedapal)	Encargado de la elaboración de los estudios de inversión y ejecución de los proyectos de saneamiento básico rural y garantizar la sostenibilidad del servicio, mediante acciones que aporten a la provisión de agua, mejoramiento de la calidad del agua y recarga de acuíferos.	Usuario
Programa Subsectorial de Irrigaciones (PSI)	Entidad rectora del subsector riego a nivel nacional, fomentando y promoviendo el uso eficiente y sostenible del agua para el riego en la agricultura, además de mejorar las condiciones operativas de los sistemas de riego mediante obras de mejoramiento y rehabilitación.	Usuario

Institución/Entidad	Objetivos y alcance	Clase
Ministerio del Ambiente (MINAM)	A través de los "Lineamientos para la Formulación de Proyectos de Inversión Pública en Diversidad Biológica y Servicios Ecosistémicos", busca el relacionamiento de proyectos de infraestructura con la diversidad biológica y los servicios ecosistémicos, como la regulación del ciclo hidrológico y el control de la erosión de suelos.	Usuario
Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)	Organismo técnico especializado que brinda información sobre el pronóstico del tiempo, asesoría y estudios científicos en las áreas de hidrología, meteorología, agrometeorología y asuntos ambientales.	Proveedor
Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)	Institución cuya labor es la investigación de la geología básica, los recursos del subsuelo, los riesgos geológicos y el geoambiente.	Proveedor
Autoridad Nacional del Agua (ANA)	Organismo técnico especializado que desarrolla el aprovechamiento multisectorial y sostenible de los recursos hídricos en las cuencas hidrográficas, monitorea y construye el inventario de glaciares y lagunas a través de la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos.	Proveedor
Instituto Geofísico del Perú (IGP)	Organismo público descentralizado encargado de la detección de desastres naturales de magnitud destructiva (terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, huaicos, sequías, deslizamientos, entre otros).	Proveedor
Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (Conida)	Promueve, investiga, desarrolla y difunde ciencia y tecnología espacial, generando productos y servicios relacionados a geomática, astrofísica e instrumentales.	Proveedor
Instituto del Mar del Perú (IMARPE)	Organismo técnico especializado orientado al estudio y conocimiento del mar peruano y sus recursos. Dentro de sus direcciones generales se encuentran las investigaciones oceanográficas y cambio climático.	Proveedor

Además de las instituciones del Estado listadas en la Tabla previa, también se cuenta con información administrada por redes de investigación, instituciones académicas y programas no gubernamentales, tales como la Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (IMHEA, Ochoa-Tocachi *et al.*, 2018), la cual busca incrementar y fortalecer el conocimiento sobre la hidrología de ecosistemas andinos para la mejora de la gestión integral de recursos hídricos a nivel de la región andina (<http://imhea.org/>).

#### 4.3. Mapeo y diagnóstico de sistemas existentes de instituciones involucradas en la generación de información y monitoreo de efectividad de las intervenciones de IN

Actualmente, existen diversas plataformas públicas y privadas de información sobre geología y geomorfología, hidrología, uso y tipo de suelo, hidrografía, vegetación, información semiintegrada de proyectos en ejecución local y regional que desarrollan estudios preliminares. Como se puede ob-

servar, la información está esparcida en diferentes instituciones, con diferentes resoluciones espaciales y temporales, y muchas de ellas sin conexión interinstitucional. En este estudio se recomiendan diferentes escalas de monitoreo (desde básico ha extendido) y, de acuerdo con los presupuestos destinados, un solo proyecto o una sola institución quizás no pueda ser capaz de monitorear en forma extendida, por ello es importante que, a nivel del Estado, se puedan dar las normativas que ayuden a mirar de una manera integrada la gestión de información, que sea multisectorial, multidisciplinaria y multiobjetivo (Abad, 2021).

Se desarrolló un mapeo de los sistemas de información que evidencia el tipo de información que las entidades proveen, la frecuencia en que se recoge o actualiza la información, la escala de la información, el carácter de la informa-

ción (de acceso público o restringido), y si el sistema está vinculado o asociado a otros sistemas. La Tabla 35 muestra el desglose de este diagnóstico. Cabe mencionar que solo se han mapeado instituciones que manejan información disponible para cuencas costeras.

De acuerdo con el mapeo, se evidencia que existe una necesidad de centralizar información correspondiente a las características biofísicas de los ecosistemas y la relacionada a los peligros, vulnerabilidad y riesgos de desastres. Si bien esta tabla señala diferentes fuentes de información oficiales que pueden servir de insumo para el monitoreo de efectividad, es relevante mencionar que solo pocas plataformas se encuentran activas, actualizando la base de datos constantemente o se integran con otros sistemas de información.

**Tabla 35. Mapeo y diagnóstico de sistemas de información existentes relacionados al monitoreo de efectividad de las intervenciones sobre la IN**

Institución que administra	Sistema o Portal de información	Tipo de información	Frecuencia	Escala de la información	Carácter de la información	Vinculamiento con otros sistemas	Enlace
SIGRID	Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres	Información relacionada a los peligros, vulnerabilidades y riesgos de desastres.	Actualizado al 2018	Nacional, local, regional	Público	CENEPRED	<a href="https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/mapa">https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/mapa</a>
Autoridad Nacional del Agua (ANA)	Observatorio del Agua del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH)	Caracterización de las cuencas, estado situacional de los recursos hídricos, oferta hídrica, calidad del agua, demanda y usos del agua, factores de presión sobre los recursos hídricos, visor geográfico.	Diaria, mensual y anual	Nacional, local, regional	Público	Integra información de la ANA y el SENAMHI	<a href="http://snirh.ana.gob.pe/observatorio">http://snirh.ana.gob.pe/observatorio</a>
MINAM	Geoservidor	Cobertura y uso de tierra; capas base (límites provinciales y departamentales); redes hidrográficas; servicios zonificación	Diaria, mensual, actualizadas al 2019	Nacional, local, regional	Público	Las herramientas de monitoreo de territorio utilizan datos satelitales Landsat, TRMM, MODIS (NDVI)	<a href="https://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/">https://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/</a>

Institución que administra	Sistema o Portal de información	Tipo de información	Frecuencia	Escala de la información	Carácter de la información	Vinculamiento con otros sistemas	Enlace
		ecológica y económica; escenarios de riesgos; deforestación.					
INGEMMET	Geocatmin	Sistema de Información geográfica que cuenta con más de cuarenta (40) capas de información geológica y catastral minera.	Anual, mensual	Nacional	Público	No aplica	<a href="https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/">https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/</a>
INDECI	Reporte de emergencias	Plataforma que brinda datos sobre las incidencias sobre los fenómenos en el Perú, así como un registro histórico de ocurrencia de eventos y ubicación geográfica de los mismos.	Anual	Nacional	Público	No aplica	<a href="https://app.powerbi.com/view?r=eyJrjoiMDMxOGYwNWItYmI0Yy00YWl2LTlhNzYtMTYlYTdjNjhiYWE3liwiZCI6IjNlZW5kMjZlLTlhNTUtNDg4M040DEyLWVzMGZjZGU3OGEyZCj9&amp;pageName=ReportSectioncd99edcca07a5ff10551">https://app.powerbi.com/view?r=eyJrjoiMDMxOGYwNWItYmI0Yy00YWl2LTlhNzYtMTYlYTdjNjhiYWE3liwiZCI6IjNlZW5kMjZlLTlhNTUtNDg4M040DEyLWVzMGZjZGU3OGEyZCj9&amp;pageName=ReportSectioncd99edcca07a5ff10551</a>
SENAMHI	PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations)	Producto grillado de precipitación de alta resolución espacial (aprox. 5 x 5 km), con serie temporal desde el 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre del 2016.	Diaria y mensual	Nacional	Público	Las herramientas utilizan datos de TRMM y CHIRPS	<a href="https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/SENAMHI/HSR.PISCO/index.html?Set-Language=es">https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/SENAMHI/HSR.PISCO/index.html?Set-Language=es</a>
	Datos hidrometeorológicos a nivel nacional	Nivel promedio; diario del río; temperatura máxima y mínima diaria; temperatura horaria; precipitación; velocidad de viento; dirección del viento; humedad.	Horaria, diaria	Nacional	Público	ANA	<a href="https://www.senamhi.gob.pe/servicios/?p=estaciones">https://www.senamhi.gob.pe/servicios/?p=estaciones</a>
Instituto Geográfico Nacional	Infraestructura de datos espaciales del Perú	Agricultura; cartas nacionales; ecosistemas; conflictos ambientales; áreas costeras o	No hay información	Nacional	Público, algunos datos son de pago	No aplica	<a href="https://www.geoidep.gob.pe/">https://www.geoidep.gob.pe/</a>

Institución que administra	Sistema o Portal de información	Tipo de información	Frecuencia	Escala de la información	Carácter de la información	Vinculamiento con otros sistemas	Enlace
		ribereñas; aguas interiores (ríos y lagunas); fotografías aéreas.					
Proyecto Especial Regional Pasto Grande	Reportes de volúmenes descargados	Volumen descargado en la represa Pasto Grande para atender la demanda de los valles de Torata, Moquegua e Ilo.	Mensual, diario	Local	Público	No aplica	<a href="http://www.pastogrande.gob.pe/volumen-descargado/">http://www.pastogrande.gob.pe/volumen-descargado/</a>
Proyecto Especial Jequetepeque-Zaña	Informes técnicos	Reportes técnicos sobre el proceso de sedimentación de Gallito Ciego; vaciado de túnel de descarga; instalación de los servicios de medición y control de agua para riego.	Mensual	Local	Público	No aplica	<a href="http://www.pejeza.gob.pe/informes_tecnicos.php">http://www.pejeza.gob.pe/informes_tecnicos.php</a>
Servicio Aerofotográfico Nacional	Base de datos de productos aerofotográficos	Datos de sensores aerofotográficos digitales, topografía automatizada y fotogrametría digital.	Anual	Local	Restringido, de pago	No aplica	<a href="https://www.facebook.com/SANDIVRA/">https://www.facebook.com/SANDIVRA/</a>

Fuente: elaboración propia



**Aplicación de la guía en las etapas de inversión de proyectos**

Este capítulo busca guiar al usuario en la aplicación de la presente guía metodológica en las diferentes fases de inversión de acuerdo con el sistema peruano de inversión pública, recomendando qué secciones de la guía podrían ser utilizadas en la elaboración de los documentos necesarios para que los proyectos puedan ser ejecutados. Sobre la base del actual ciclo de inversiones se han determinado las siguientes etapas:

- Idea de proyecto
- Ficha de proyecto

- Perfil de proyecto
- Expediente técnico
- Ejecución física
- Operación y mantenimiento

En la Tabla 36 se proponen las secciones que los usuarios de esta guía deberían revisar y utilizar para adaptar los contenidos de acuerdo con cada etapa de inversión, reconociendo que cada una de estas necesita un nivel de esfuerzo particular conforme se avance en el ciclo de inversiones.

**Tabla 36.** Aplicación de la guía metodológica en las fases de la inversión

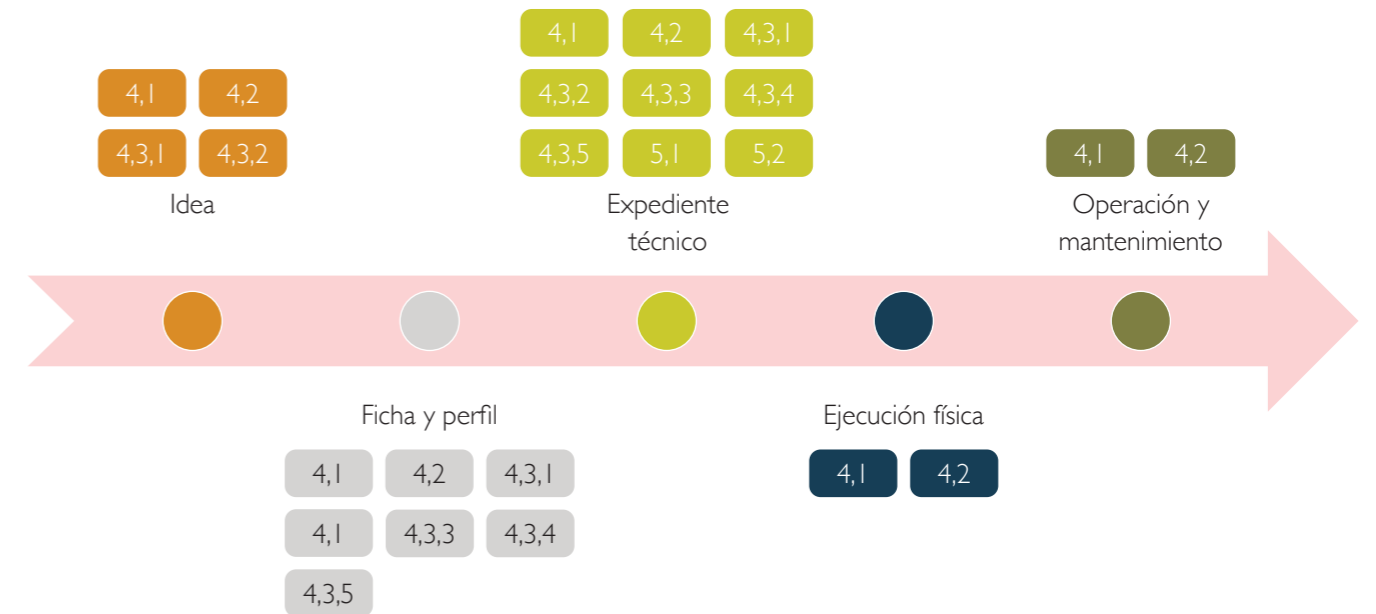
Etapas de inversión	Secciones de la guía metodológica
Idea	3.1. Fase 1: Revisión preliminar 3.2. Fase 2: Visitas de campo 3.3.1. Definición de mecanismos asociados a fenómenos y medidas de intervención 3.3.2. Definición de variables asociadas a fenómenos e intervenciones
Ficha y perfil	3.1. Fase 1: Revisión preliminar 3.2. Fase 2: Visitas de campo 3.3.1. Definición de mecanismos asociados a fenómenos y medidas de intervención 3.3.2. Definición de variables asociadas a fenómenos e intervenciones 3.3.3. Diseño experimental para evaluar efectividad 3.3.4. Definición del equipamiento necesario por nivel de monitoreo
Expediente técnico	3.1. Fase 1: Revisión preliminar 3.2. Fase 2: Visitas de campo 3.3.1. Definición de mecanismos asociados a fenómenos y medidas de intervención 3.3.2. Definición de variables asociadas a fenómenos e intervenciones 3.3.3. Diseño experimental para evaluar efectividad 3.3.4. Definición del equipamiento necesario por nivel de monitoreo 3.3.5. Lineamientos para la identificación y distribución de sitios de monitoreo 3.3.6. Determinación de la frecuencia de toma de datos 4.1. Alcance de las sinergias en el sistema de monitoreo 4.2. Mapeo de instituciones involucradas en la generación de información y monitoreo de efectividad de las intervenciones de IN
Ejecución física	3.4.1. Adaptación de evaluación de riesgos y monitoreo de efectividad de las intervenciones (CENEPRED-IN) 3.4.2. Componente cualitativo: percepción social
Operación y mantenimiento	3.4.1. Adaptación de evaluación de riesgos y monitoreo de efectividad de las intervenciones (CENEPRED-IN) 3.4.2. Componente cualitativo: percepción social

Fuente: elaboración propia

En la Figura 16 se presenta un esquema, a manera de resumen, de las secciones a la que los usuarios deben recurrir

dependiendo de la etapa de inversión a la que estén respondiendo.

**Figura 16.** Aplicación de la guía metodológica en las etapas de la inversión



Fuente: elaboración propia

Asimismo, en la Tabla 37 se presenta un ejemplo de marco lógico de un proyecto de IN con enfoque de GRD. En la matriz (Tabla 37) se pueden observar ejemplos de indica-

dores con valores referenciales para este tipo de proyecto. Estos indicadores son específicos y deben ser identificados y definidos para cada proyecto en particular.

**Tabla 37.** Ejemplo: matriz de marco lógico para proyectos de IN-GRD

	Descripción	Indicadores	Medio de verificación
Fin	Disminución de la afectación de poblaciones y medios de vida vulnerables a los peligros de inundación y movimientos de masa.	Al año 20-25 disminuye el costo evitado de reconstrucción de las UP afectadas por peligros de inundaciones y movimientos de masa en eventos extremos.	Reporte de evaluación de costos evitados elaborado para el periodo de evaluación.
Propósito	Recuperación de los servicios ecosistémicos de regulación de riesgos naturales en ecosistemas y áreas susceptibles a peligros de inundaciones y movimientos de masa en la unidad hidrográfica.	Al año 20-25 de culminada la inversión se recupera el SERRN en, por lo menos, 20 % del área total susceptible en la unidad hidrográfica ante inundaciones y movimientos de masa intervenida con IN GRD.	Sistematización de reportes de monitoreo en parcelas de control/ intervención y de evaluación del estado del ecosistema.
Componentes	Recuperación de los ecosistemas de interés para el servicio de SERRN.	Al año 3-5 de culminada la inversión, los ecosistemas degradados cuentan con las condiciones para la recuperación de la cobertura vegetal considerando un 75 % de supervivencia.	Estudio de evaluación del estado del ecosistema (guías de evaluación).
		Al año 20-25 de culminada la inversión se atenúa el caudal hídrico máximo (m <sup>3</sup> /s) en un rango de 5 a 15 % en el punto de confluencia de las medidas de IN.	Reportes de monitoreo de caudal y extrapolación a modelo hidrológico.
	Control de erosión e inestabilidad de suelos por alteraciones de la precipitación en zonas de interés para el SERRN.	A partir del año 10-15 de culminada la inversión se reduce de 1,2 a 3,1 veces la generación de sedimentos en Tn/ha/año en el área de intervención de las medidas de IN.	Reportes de monitoreo en parcelas de control/ intervención.
		Al año 20-25 de culminada la inversión se reduce el número de eventos de movimientos de masa en la zona de intervención.	Reportes de monitoreo en parcelas de control/ intervención.
	Adecuada gestión del ecosistema.	Al año 3-5 de culminada la inversión el 100 % de las ha recuperadas y las medidas de IN cuentan con acciones de mantenimiento.	Informes de mantenimiento de la IN.

\*Los valores de los indicadores mostrados en esta tabla son referenciales y no deben ser tomados para una aplicación directa.

# Bibliografía

Abad, J. D. (2021). La Hidráulica y su importancia en el desarrollo de proyectos de infraestructura sostenibles. Ingeniería Nacional, Revista Oficial del Colegio de Ingenieros del Perú, Edición Bicentenario, Año 11, No. 28, 52: 59, <https://www.cip.org.pe/publicaciones/revista-digital/revista-digital-ingenieria-nacional-edicion-28.pdf>

Ahrens, J., & Rudolph, P. M. (2006). The importance of governance in risk reduction and disaster management. Journal of contingencies and crisis management, 14(4), 207-220.

Brooks, K. N, P.F. Ffolliott, and J. A. Magner. (2013). Hydrology and the management of watersheds. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Campbell, SDG, Shaw, R., Sewell, R.J. and Wong, JCF. (2007). Guidelines for Bioengineering Applications on Natural Terrain Landslide Scars. Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, The Government of Hong Kong Special Administrative Region, Hong Kong, PR China, GEO report 227

CENEPRED (2015). Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales – 2da Versión. Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). Dirección de Gestión de Procesos (DGP) - Subdirección de Normas y Lineamientos (SNL). Lima, Perú

Evans, R. (2006). Land use, sediment delivery and sediment yield in England and Wales. In Soil Erosion and Sediment Redistribution in River Catchments: Measurement, Modelling and Management (ed. P.N. Owens and A.J. Collins), pp. 70-84. Wallingford: CABI Publishing

Gaspari, F. J., Rodriguez, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Besteiro, S. I. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. Libros de cátedra, Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires, Argentina.

GEOPREVENET (2019). Technology guide for monitoring of gravitational natural hazards. Zurich, Suiza.

Gómez Calero, J. A., Taguas, E.V., Vanwallegem, T., Giráldez, J.V., Sánchez Barrera, F., Ayuso, J. L., ... & Mora Jordano, J. (2011). Criterios técnicos para el control de cárcavas, diseño de muros de retención y revegetación de paisajes agrarios. Manual del operador en inversiones no productivas.

Grima, N., Edwards, D., Edwards, F., Petley, D., & Fisher, B. (2020). Landslides in the Andes: Forests can provide cost-effective landslide regulation services. Science of the total environment, 745, 141128.

NIWS (2019). HIRO: Herramienta de Identificación Rápida de Oportunidades para la infraestructura natural en la gestión del riesgo de desastres. Guía metodológica, Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica.

Meshesha, Y.B. and Birhanu, B.S. (2015) Assessment of the Effectiveness of Watershed Management Intervention in Chena Woreda, Kaffa Zone, Southwestern Ethiopia. Journal of Water Resource and Protection, 7, 1257-1269. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2015.715102>

Mikkelsen PE (1996), Field Instrumentation. in: Turner AK, Schuster RL (eds). Landslides investigation and mitigation; Special report 247, National Academy Press, Washington D.C., pp. 278-316.

Morgan, R.P.C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 343 pp.

Nichols, S., Webb, A., Norris, R., & Stewardson, M. (2011). Eco Evidence analysis methods manual: A systematic approach to evaluate causality in environmental science (eWater Cooperative Research Centre, Canberra).

Norris, J.E. and Greenwood, J.R. (2006). Assessing the role of vegetation on soil slopes in urban areas. In IAEG2006: Engineering Geology for Tomorrow's Cities – Proceedings of the 10th IAEG International Congress, Nottingham, UK. The Geological Society of London, London, UK, IAEG paper 744 (CD-ROM).

Ochoa-Tocachi, B., Buytaert, W., Antiporta, J. et al. (2018). High-resolution hydrometeorological data from a network of headwater catchments in the tropical Andes. Scientific Data, 5, 180080.

Ochoa-Tocachi, B.F., Bardales, J.D., Antiporta, J., Pérez, K., Acosta, L., Mao, F., Zulkafli, Z., Gil-Ríos, J., Angulo, O., Grainger, S., Gammie, G., De Bièvre, B., & Buytaert, W. (2019). Potential contributions of pre-Inca infiltration infrastructure to Andean water security. Nature Sustainability, 2, 584–593.

Román, F., Estévez, G., Aste, N., Moles, A. (2020). HIRO : Herramienta de Identificación Rápida de Oportunidades para la Infraestructura Natural en la Gestión del Riesgo de Desastres. Guía Metodológica. Proyecto "Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica", Forest Trends, Lima, Perú.

Shah, I., Elahi, N., Alam, A., Dawar, S., & Dogar, A. A. (2020). Institutional arrangement for disaster risk management: Evidence from Pakistan. International Journal of Disaster Risk Reduction, 51, 101784.

Stokes, A., Douglas, G. B., Fourcaud, T., Giadrossich, F., Gillies, C., Hubble, T., ... & Walker, L. R. (2014). Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. Plant and Soil, 377(1), 1-23.

Sunass. (2020). Guía de diseño de sistemas de monitoreo hidrológico para evaluar el impacto de los mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos hídricos. Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS). Lima, Perú

Thomsen, L. M., Baartman, J. E. M., Barneveld, R. J., Starkloff, T., & Stolte, J. (2015). Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model. Soil, 1(1), 399-410.

Vermang, J., Norton, L. D., Huang, C., Cornelis, W. M., Da Silva, A. M., & Gabriels, D. (2015). Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall. Soil Science Society of America Journal, 79(3), 903-916.

Willems B., Leyva-Molina WM, Taboada-Hermoza R., Bonnesoeur V., Román F., Ochoa-Tocachi BF, Buytaert W., Walsh D., 2021. Impactos de andenes y terrazas en el agua y los suelos: ¿qué sabemos? Resumen de políticas, Proyecto "Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica", Forest Trends, Lima, Perú.

World Meteorological Organization - WMO. (2008). Guide to Hydrological Practices, Vol. I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. Sixth edition. Geneva, Switzerland: WMO No 168.

World Meteorological Organization - WMO. (2010). MANUAL ON STREAM GAUGING. WMO N° 1044.

Zhao, B., Zhang, L., Xia, Z., Xu, W., Xia, L., Liang, Y., & Xia, D. (2019). Effects of rainfall intensity and vegetation cover on erosion characteristics of a soil containing rock fragments slope. Advances in Civil Engineering, 2019.

Zimmermann, B., & Elsenbeer, H. (2009). The near-surface hydrological consequences of disturbance and recovery: a simulation study. Journal of Hydrology, 364(1-2), 115-127.

# Anexo

## Anexo A. Cuenca saludable, conectividad y servicios ecosistémicos

### I. Definición de cuenca saludable

En muchas partes del planeta, debido al desarrollo de las ciudades y al uso generalizado y mal planificado de los recursos, muchas cuencas fluviales han sido ambientalmente deterioradas. Durante décadas, agencias estatales tradicionalmente estuvieron a cargo del levantamiento de datos hidrológicos e hidrosedimentológicos con fines de planificación del uso del recurso hídrico, como la demanda de consumo, el potencial hidroeléctrico, la gestión de riesgos de inundaciones, entre otros. Sin embargo, debido a la pérdida de calidad de los sistemas hídricos por las actividades antrópicas, los paradigmas sobre la funcionalidad fluvial comenzaron a ser repensados en la década del setenta. En ese contexto, se crearon agencias nacionales para la preservación y restauración de las cuencas. Mediante el 1972 Clean Water Act de los Estados Unidos de Norteamérica, se fundó la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés). EPA (2012) describió que las cuencas son sistemas acoplados sociales y ecológicos, donde el bienestar de la población y de la cuenca están relacionados, por lo que el objetivo principal de la EPA fue restablecer las condiciones de equilibrio de ese acoplamiento. EPA (2012) también reconoció el concepto de cuenca saludable (*healthy watershed*), el cual es definido como una cuenca que, bajo condiciones naturales del paisaje, soportan procesos hidrológicos y geomorfológicos en un rango natural de variabilidad, los cuales influyen en los hábitats, la conectividad y la calidad del agua.

EPA (2012) describió seis (6) componentes con sus respectivos indicadores para el análisis de la cuenca saludable: condiciones del paisaje (patrones de cobertura natural del terreno, regímenes de variaciones naturales, conectividad longitudinal y lateral acuática, continuidad de procesos a nivel de paisaje), geomorfología (estructuras geomorfológicas sobre la base de una dinámica natural), hidrología (régimen hidrológico, incluyendo las variaciones naturales del flujo, conectividad hidrológica superficial y de agua subterránea), hábitat (conectividad hidrológica, hábitat en estuarios, en riberas, en las planicies de inundación, lagos y márgenes costeros), calidad de agua (características físico-químicas del agua) y condición biológica (diversidad biológica, composición y abundancia relativa de especies). Basados en la

propuesta integral de EPA (2008, 2012), ELI y TNC (2014), se establecieron mecanismos y guías de conservación y restauración a nivel de cuenca, algo que muchos estados de Estados Unidos (como Washington, Michigan, Vermont y Wyoming) adoptaron en sus agencias ambientales. Es importante recordar los componentes de cuenca saludables en aras de tratar de restaurar ecosistemas perturbados o degradados, como es el caso de muchas cuencas en el Perú, y para evitar que otras cuencas vayan hacia la degradación continua y sean no saludables. Como se observa, este concepto de cuenca saludable incluye seis (6) aspectos mínimos; sin embargo, nos vamos a focalizar más en los componentes de condición del paisaje, hidrología y geomorfología, por ende, debemos entender las condiciones y características bajo las cuales una cuenca evoluciona naturalmente y cuáles podrían ser los procesos dominantes que lo modifican y, aún más importante, cómo monitorearlo y tomar acciones respectivas.

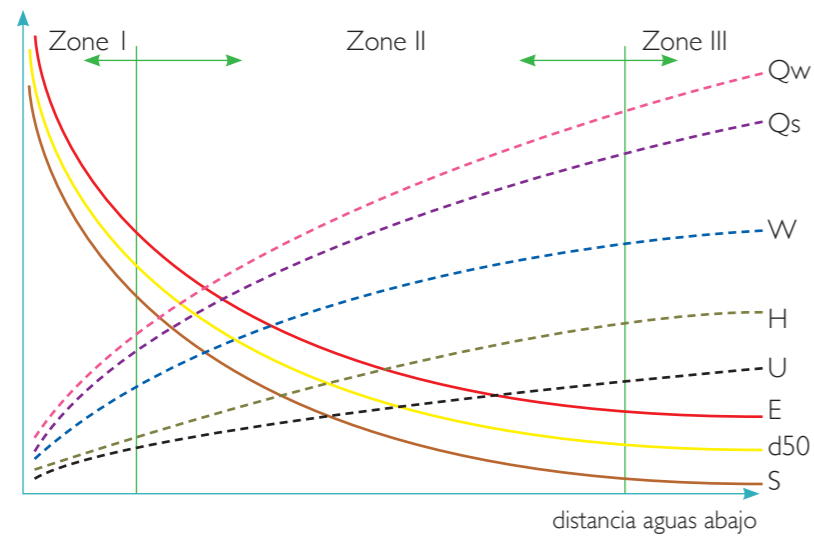
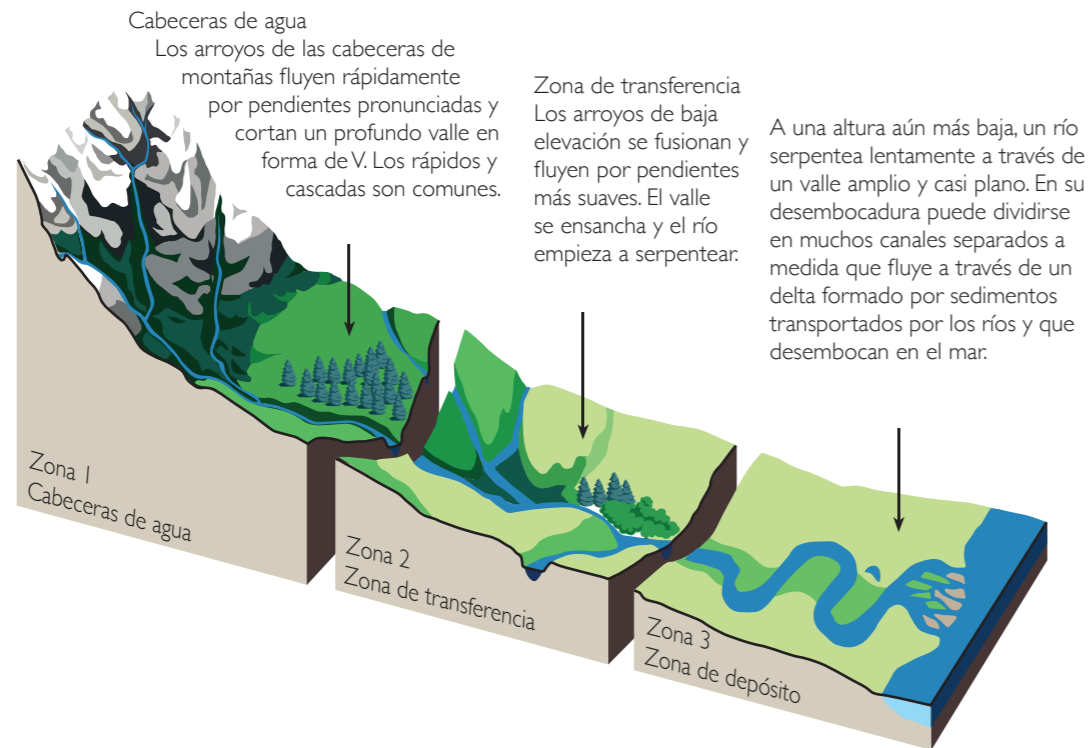
### 2. Equilibrio y conectividad hidrosedimentológica

Como fue descrito anteriormente, el significado de cuenca saludable envuelve diferentes componentes, pero los factores físicos como el ciclo del agua y los sedimentos refuerzan la idea de establecer claramente cómo es la conectividad hidrosedimentológica a nivel de cuenca y de qué manera se desarrollan los estados de equilibrio dentro de ella. Comúnmente, los estudios de cuencas se concentran en el componente hidrológico sin considerar que el agua es también el principal modelador de la superficie terrestre, que causa la erosión y deposición, y consecuentemente existe el transporte de sedimentos.

Schumm (1977) describió a la cuenca compuesta por tres (3) zonas íntimamente ligadas a la variable hidrosedimentaria: i) aporte hídrico dominante y producción de sedimentos (*sediment supply*); ii) transferencia de sedimentos (*transfer zone*) y iii) deposición de sedimentos (*delta*). La capacidad erosiva (E), el diámetro medio (d50) y la pendiente, disminuyen a lo largo de la dirección longitudinal; sin embargo, el caudal de agua (Qw) y sedimentos (Qs), el ancho (W), la profundidad (H), y la velocidad (U) aumentan en la dirección longitudinal (Figura 1). Es indudable que cada cuenca

tiene variaciones propias de estos parámetros, de acuerdo con las características físicas de la misma. Por tanto, a medida que se introducen perturbaciones en el sistema, estas curvas de línea base pueden sufrir cambios importantes.

**Figura 1. Parámetros dominantes en una cuenca**



izquierda: Extraído de Miller (1990); Derecha: Elaboración propia en base a Schumm (1977)

El manejo de la cuenca obedece al concepto de ordenamiento territorial, el cual comprende la interacción de la sociedad-naturaleza mediante el cual el hombre planifica y desarrolla sus actividades socioeconómicas y productivas bajo un entorno físico (Gaspari *et al.* 2013). Es así como, Dourojeanni *et al.* (2002) describieron la importancia del manejo de cuencas hidrográficas indicando la integración e interdependencia entre los sistemas físicos, bióticos y el sistema socioeconómico que ahí se desarrolla.

### 3. Línea de base a nivel de cuenca

Como se describió anteriormente, una cuenca envuelve diferentes procesos (físicos, biológicos, ecológicos, sociales y económicos) con diferentes grados de interdependencia. Es así como se debería realizar la línea de base integral, desarrollando diversos inventarios de suelos, hidrológicos, socioeconómicos, de infraestructura, de especies, entre otros, y así generar los respectivos diagnósticos asociados a estos inventarios (Gaspari *et al.*, 2013). Sin embargo, considerando que la gestión del riesgo en un contexto de cambio climático y las medidas necesarias de IN para la reducción de desastres son factores prioritarios para la Autoridad para la Reconstrucción con Cambios (ARCC), se focaliza la guía sobre los componentes físicos; es decir, en los procesos hidrológicos e hidro-sedimentológicos a nivel de cuenca y sus riesgos asociados.

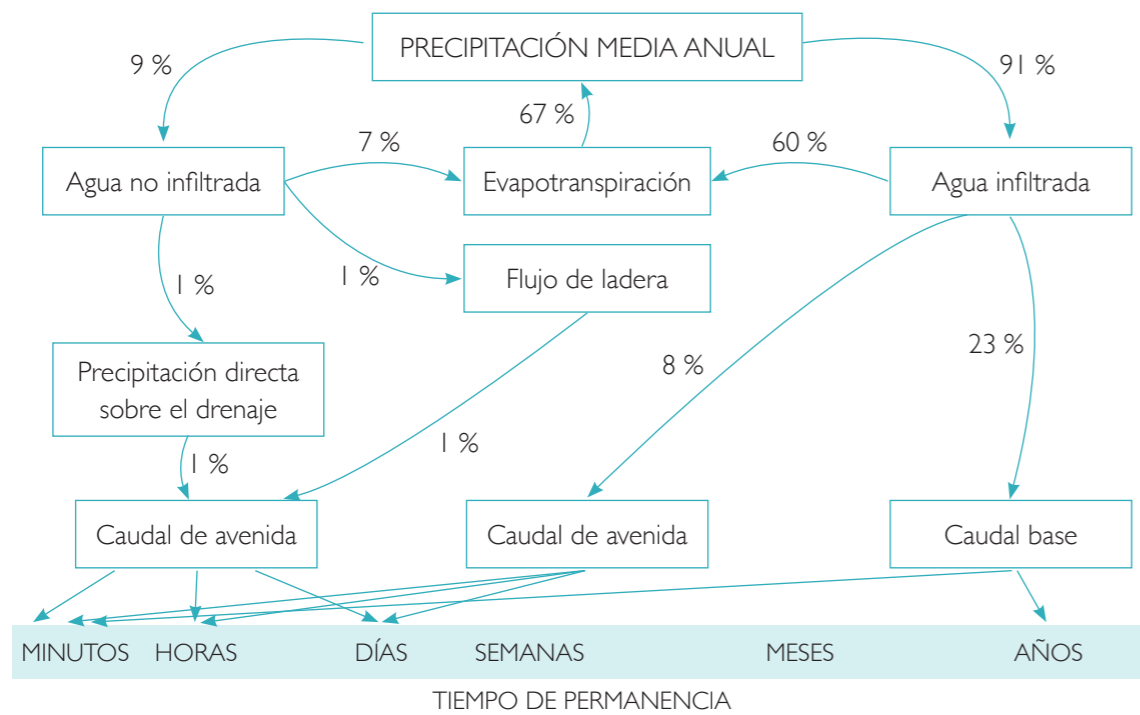
### 3.1. Hidrología

El ciclo hidrológico o ciclo del agua demuestra la interacción entre la evapotranspiración, el caudal de escorrentía, la capacidad de almacenamiento del suelo y el cambio de almacenamiento de aguas subterráneas y los aportes de glaciares. Gaspari *et al.* (2013) describen la respuesta de una cuenca ante precipitaciones y qué porcentaje de la lluvia es asignado a los diferentes procesos de acuerdo con una escala temporal de minutos a años (Figura 2). Esta respuesta hidrológica de la cuenca ante precipitaciones frecuentes varía de acuerdo con la heterogeneidad de los suelos y sus usos, cobertura vegetal, geografía y otras variables de los inventarios anteriormente mencionados. Además, estos pueden variar para eventos extremos, como el fenómeno de El Niño y para las distintas zonas hidrogeomorfológicas de cuencas que existen en el país. Por ende, es necesario entender cuál es la respuesta típica y extrema de las cuencas fluviales para cada región hidrográfica del Perú. Además, cuando se desarrollan intervenciones como infraestructura gris o natural, estas respuestas pueden variar. Por ejemplo, las reforestaciones pueden tener escalas temporales de hasta tres (3) años posteriores a la intervención para que la respuesta se ajuste a nuevos porcentajes de distribución (Bruijnzeel, 1997).





**Figura 2.** Respuesta de una cuenca ante una lluvia



Extraído de Hewlet (1982) en Gaspari et al. (2013)

### 3.2. Geomorfología

Para caracterizar una cuenca y los sistemas de canales, usualmente se utilizan diferentes parámetros morfométricos (que son resultados de procesos geomorfológicos):

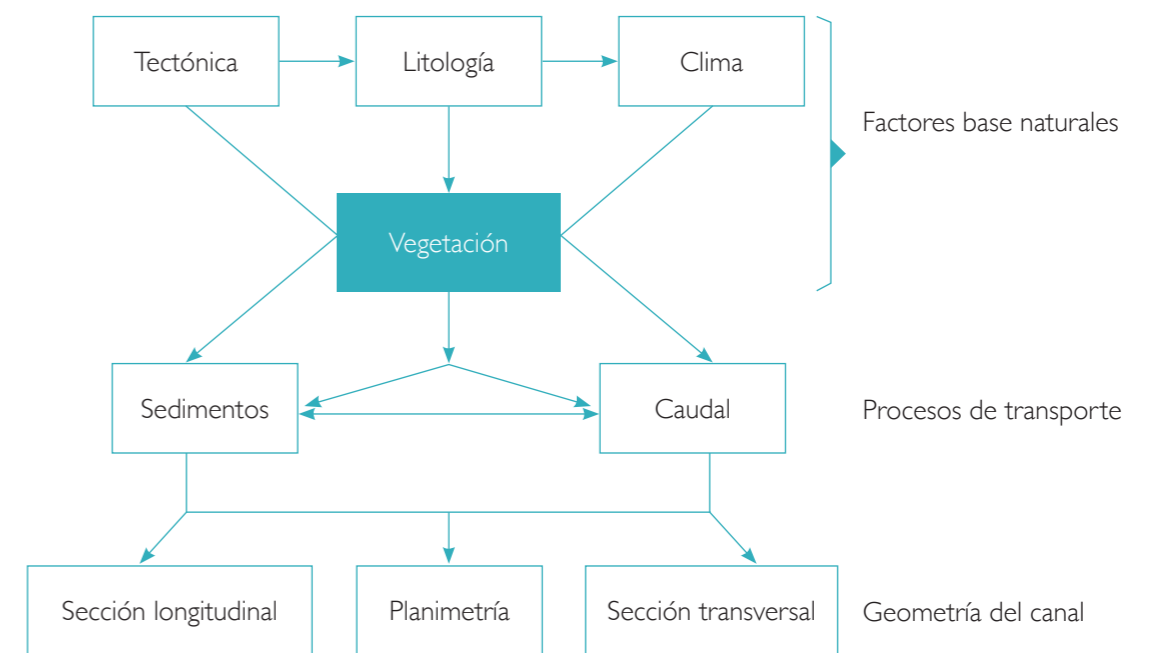
**Forma:** perímetro, longitud axial, área, ancho promedio, factor de forma, coeficiente de compacidad de Gravelius, entre otros.

**Relieve:** curva hipsométrica, curva hipsométrica adimensional, índice de relieve, perfil longitudinal, entre otros.

**Drenaje:** densidad de drenaje, longitud del cauce principal, pendiente media del cauce, tiempo de concentración, ordenamiento de los cursos de agua, coeficientes de disección y demás.

Sin embargo, en una línea de base geomorfológica a nivel de cuenca, es fundamental entender los procesos dominantes y los patrones geomorfológicos existentes y emergentes de la naturaleza. Mangelsdorf et al. (1990) describió cómo es la evolución de los patrones longitudinales, planimétricos y de secciones transversales sobre la base de factores naturales, a su interacción y a las dos variables más importantes que son monitoreadas: transporte de agua y sedimentos. Es sobre la base del diagrama de interacciones (ilustrado en la Figura 3) que cada cuenca produce patrones de ríos. Los ríos de montaña suelen ser encajados en lechos rocosos y, cuando los ríos fluyen a lo largo de una llanura aluvial (en valles montanos con relleno aluvial o en llanuras), se denominan ríos aluviales. Los patrones de cauce de estos ríos se clasifican fundamentalmente en función de su configuración bidimensional (morfología en planta) en combinación con otros factores métricos y/o morfodinámicos.

**Figura 3.** Controles en la geometría de entornos aluviales

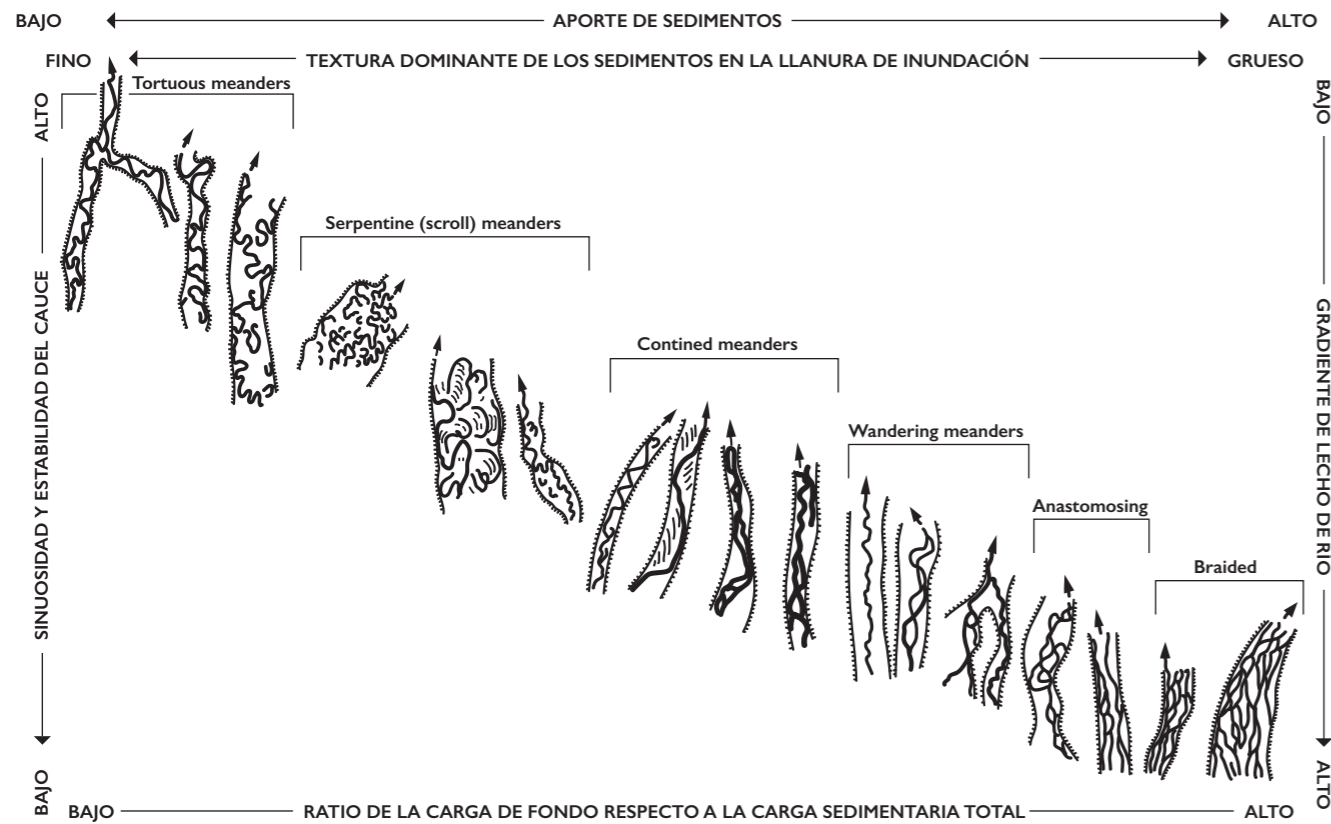


Adaptado de Mangelsdorf et al. (1990)

Selby (1985) mostró que la carga de sedimentos, la tasa de sedimentos suspendidos y de fondo y la pendiente en los ríos producen planimetrías diferentes, ríos aluviales como canales rectos, meándricos, con barras y algunas veces islas, entrelazados o multicanales con islas (Figura 4). Es decir, una cuenca puede albergar diferentes tipos de ríos y la caracterización de los cauces se debería realizar bajo este criterio de caracterización geomorfológica planimetría y altimetría (secciones transversales). Este criterio es importante, pues tradicionalmente los estudios se enfocan en las mediciones de precipitaciones (hietogramas), de descarga de agua (hi-

drogramas) y sedimentos (sedimentogramas), sin entender que esa combinación produce patrones geomorfológicos que dominan las funcionalidades de los ecosistemas. Además, es importante notar que estos patrones de ríos responden a condiciones hidroclimatológicas a largo plazo; sin embargo, eventos hidrológicos o de intervención en la carga de agua y sedimentos importantes podrían modificar la configuración planimetría y altimetría de los ríos. En un estudio de línea de base es necesario entender si estos procesos o intervenciones ya vienen modificando este equilibrio dinámico o están construyendo otro equilibrio adaptativo.

**Figura 4.** Efecto de carga de sedimentos en la planimetría de ríos aluviales



Adaptado de Selby (1985)

En función de lo expuesto anteriormente, el estudio del río principal debe ser complementado con el concepto de llanura aluvial o llanura de inundación, la cual se puede definir desde el punto de vista hidrológico-ingenieril o desde la perspectiva geomorfológica-genética. Una llanura de inundación es el área aluvial (depositada por el mismo río) adyacente al canal que se inunda, por lo menos parcialmente por inundaciones ordinarias y que mantiene relaciones hidrológicas, ecológicas y sedimentológicas con la dinámica fluvial. En ambientes ingenieriles, se simula la faja inundable con una recurrencia determinada (por ejemplo 100 años),

pero esta definición no es adecuada porque no se trata de un valor de área específico (depende de la recurrencia elegida y como ella fue estadísticamente determinada) y no considera que la llanura de inundación sea una faja edificada por el mismo río con sus aluviones.

Entre otras ventajas, el uso de una definición geomorfológica permite determinar que la llanura de inundación es una unidad física mapeable, es decir, se identifica en el espacio un contacto litológico y geomorfológico cartografiable que discrimina los depósitos aluviales de la llanura aluvial de otras

unidades geológicas o geomorfológicas del valle. Siendo que la llanura de inundación es un sistema físico natural con historia, su arquitectura morfosedimentaria es un archivo o mosaico que puede contener depósitos aluviales recientes y otros de varios miles de años, pero que continúan y pueden ser afectados por la dinámica de inundación del sistema.

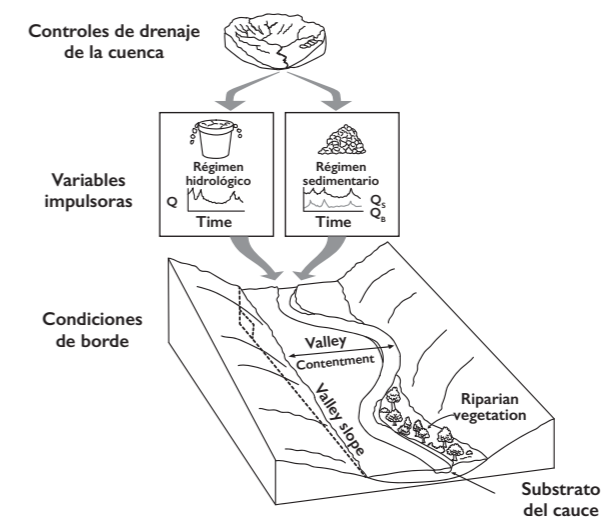
Las llanuras aluviales prestan un enorme servicio a la humanidad. La llanura aluvial es un elemento amortiguador de energía del sistema. En un estado de equilibrio dinámico, la llanura actúa como un *buffer* energético ante eventos extraordinarios, permitiendo el consumo de energía por erosión de sus aluviones, o la consecuente deposición en eventos posteriores y su almacenamiento temporario durante periodos de menor energía. Además, su relieve plano, vecindad a los cursos de agua y la renovación de nutrientes en sus suelos durante los ciclos de inundaciones hacen que sean tierras ideales para la actividad agrícola. Extensas y complejas llanuras de inundación, como las de los ríos amazónicos, también cumplen servicios ecológicos fundamentales, como sostener hábitats para la reproducción de peces y una diversidad de otras especies. En el caso de los sistemas costeros y montañosos andinos, particularmente en las zonas áridas del Perú, la mayoría de los cultivos se concentra en las llanuras aluviales.

Complementando los parámetros morfométricos de cuencas discutidos previamente, se hace necesario también caracterizar una serie de parámetros del sistema canal-llanura aluvial, entre los cuales se encuentran: patrones de canales, métricos de la llanura aluvial, métricos del canal (geometría hidráulica, batimetrías, tasas de migración, sinuosidad, índices multicanal o índice de estabilidad), métricos y caracterización del material aluvial, materiales del lecho, entre otros.

### 3.3. Conectividad hidrosedimentológica

Una cuenca fluvial puede considerarse como un sistema físico abierto con continua transferencia de materia y energía. Aquí, agua y sedimentos son transferidos a través de un sistema de canales interconectados o red de drenaje. Este enfoque permite generar modelos conceptuales y cuantificables. El régimen de flujo de agua y el régimen de sedimentos se consideran como las variables de entrada. A lo largo de su recorrido, el cauce se ajusta en función de las condiciones de borde (*boundary conditions*) que le son impuestas, tales como la pendiente del valle, la llanura aluvial, la presencia de rocas en el lecho, la naturaleza litológica de las barrancas, la vegetación riparia, la disponibilidad de energía y el calibre del sedimento. La Figura 5 presenta un esquema de las variables de entrada y las de borde que influyen la morfología y geometría del canal.

**Figura 5.** Variables determinantes en la formación de la estructura aluvial



A lo largo de las cuencas, existen distintas fuentes de sedimentos, desde ríos pequeños hasta quebradas que aportan diferentes tamaños y cantidades de sedimentos a los ríos principales. Por eso es importante monitorear esas fuentes de sedimentos y entender la magnitud y dominancia en términos de patrones geomorfológicos planimétricos y altimétricos aguas abajo de la zona de aporte. Ffolliott *et al.* (2013) describieron que para determinar el exceso de sedimentos en una cuenca es primordial entender que la erosión de suelos y los procesos de sedimentación ocurren naturalmente y pueden tener una característica heterogénea espacial y temporalmente distribuidos. Además de la erosión hídrica, la denudación de una cuenca se da por combinaciones complejas de procesos de meteorización y erosión, de las cuales la erosión hídrica representa uno de los diversos factores a ser considerados. En cuencas de montañas, procesos de erosión glacial, periglacial y, sobre todo, de movimientos de masa, pueden contribuir en algunos casos con más del 75 % de los aportes sedimentarios de la cuenca fluvial.

Por otro lado, la erosión y movilización de sedimentos a lo largo de la cuenca (laderas y valles tributarios) no necesariamente es sinónimo de conectividad sedimentológica con el río colector. Existen pérdidas de transmisión y mecanismos temporales de almacenamiento de sedimentos en valles, quebradas y planicies aluviales. A esto debemos sumarle las presiones antrópicas sobre la cuenca. Las obras de infraestructura y el uso generalizado de la tierra alteran las condiciones naturales de los procesos de conectividad hidrosedimentológicas de la cuenca. Ejemplos típicos de obras que alteran la conectividad hidrofísica son los reservorios, obras de confinamiento lateral y defensas para inundaciones (obras de encauzamiento), terrazas de agricultura, entre otros.

El estudio de procesos de conectividad hidrosedimentaria es particularmente relevante en los ríos peruanos por múltiples razones. Primero, por razones lógicas y acorde a las condiciones geográficas y ambientales del Perú, los mayores riesgos estudiados e identificados como prioritarios son el riesgo de inundaciones y de movimientos de masa.

Sin embargo, poco se conoce todavía sobre procesos de conectividad, el rol de la erosión hídrica, la capacidad de transporte de los sistemas y su capacidad de ajuste y recuperación de funcionalidad a cierta escala temporal como respuesta a eventos extremos como El Niño o sequías. Otro de los mayores errores es considerar que el régimen hidrológico y el sedimentario trabajan espacialmente en fase en una cuenca. Contrariamente, es común ver que en ríos montañosos existe un *decoupling* espacial entre estos dos factores. Para esto se requiere estimar y evaluar lo siguiente:

- Mosaico hidrogeomorfológico del sistema.
- Balance hidrológico e hidrosedimentario.
- Diagnóstico y cuantificación de los procesos de conectividad fluvial (hidrosedimentaria).
- Diagnóstico y cuantificación de los procesos de "discontinuidad" hidrosedimentaria debido a condiciones antrópicas y/o naturales.
- Diagnóstico del rol de eventos hidroclicmáticos extremos sobre los mecanismos de conectividad (El Niño o sequías extremas).

El enfoque presentado sobre conectividad también nos permite optimizar significativamente tanto el entendimiento del funcionamiento de las cuencas como el análisis de riesgo. El riesgo inmediato producido por eventos hidroclicmáticos extremos, la transmisión de los procesos de inundación y el transporte de sedimentos es prioritario para ARCC. El peligro de un proceso depende de sus características morfodinámicas (magnitud y duración) y contempla también el material involucrado. No es lo mismo una inundación de aguas "claras" con una velocidad determinada, que un evento con la misma energía, pero con carga sedimentaria que produce impactos sobre la infraestructura, sedimentación de áreas urbanas e infraestructura y que, dependiendo de la energía y del tamaño del sedimento, puede producir daños materiales adicionales y/o cambios en los patrones de inundaciones. El peligro de una inundación torrencial con sedimentos limosos es menor que una con la misma energía, pero con gravas y bloques que poseen mayor capacidad destructiva. Sin embargo, también es contraproducente eliminar la conectividad hi-

drosedimentaria con estrategias que disminuyan el aporte sedimentario al sistema (por ejemplo, centrales hidroeléctricas o barreras atrapa sedimentos). La falta de sedimentos produce un deterioro de la funcionalidad del sistema y pueden generar reacciones muy negativas. Por ejemplo, es una práctica común disminuir el aporte sedimentario de las quebradas hacia los ríos, el remover (descolmar) los sedimentos del lecho de los ríos para tener una mayor sección hidráulica y en donde la deposición de nuevos sedimentos no conlleve a mayor inundación; sin embargo, de acuerdo con lo descrito anteriormente, los sedimentos y la geomorfología juegan un papel importante para la definición de una cuenca saludable. Por ende, es necesario que los proyectos de intervención en los ríos contemplen un análisis de potenciales impactos geomorfológicos, el río es el resultado de la existencia de agua y sedimentos en un ambiente heterogéneo distribuido longitudinal y transversalmente, por ende, se deberían analizar las consecuencias de la intervención.

Otro elemento para considerar es la escala temporal de los procesos involucrados. Por ejemplo, la reactivación de procesos de laderas y conectividad pueden sobrecargar un sistema fluvial, produciendo bloqueos temporales del curso, agradación en algunos segmentos del cauce o la transferencia de ondas de sedimentos aguas abajo a lo largo de décadas, y afectando las obras grises de infraestructura mucho tiempo después de que el proceso detonador inicial haya sucedido.

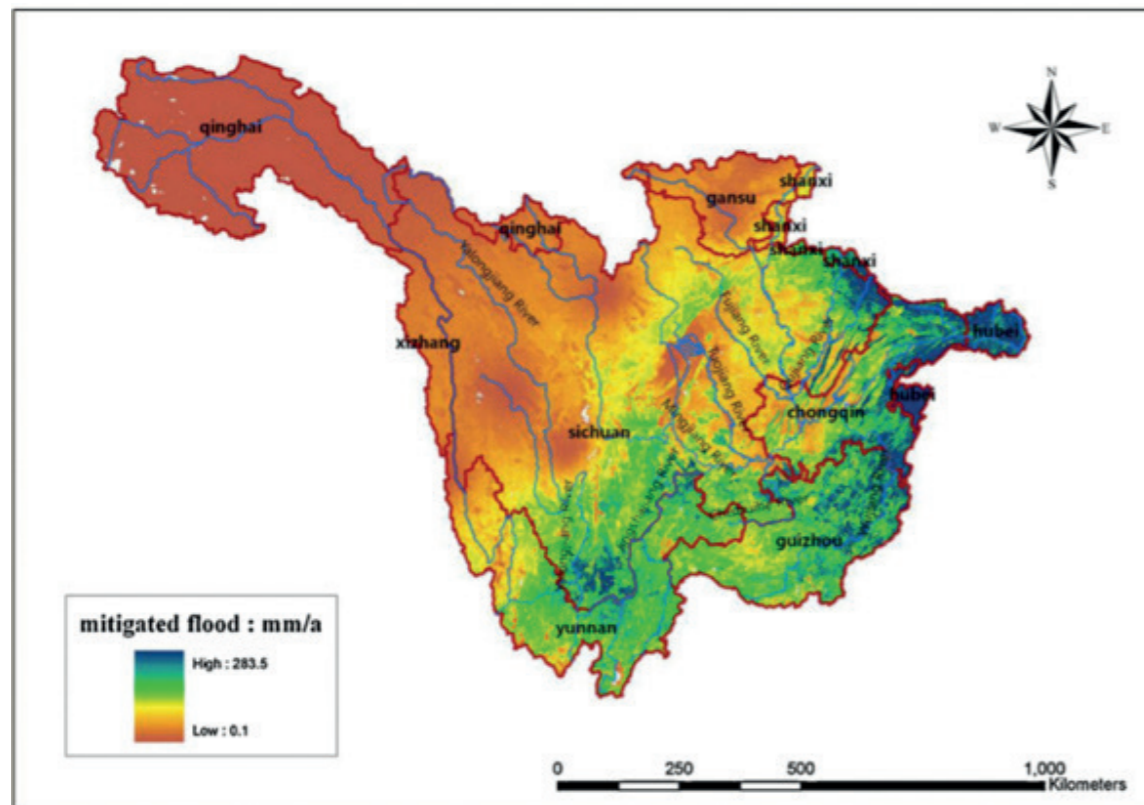
#### 4. Servicios ecosistémicos de control de inundaciones y movimientos de masa

A nivel de cuenca, los ecosistemas juegan un papel importante en la provisión y regulación de servicios ecosistémicos, como el control de inundaciones y la regulación hídrica. De acuerdo con el Millenium Ecosystem Assessment (2005), se definen a los servicios ecosistémicos como beneficios y contribuciones para el ser humano, mientras que las funciones o mecanismos son los procesos que generan los servicios. Estos últimos están relacionados a los atri-

butos y variables biofísicas, ecológicas e hidrológicas del ecosistema. Actualmente, los servicios ecosistémicos se encuentran bajo una presión de uso y aprovechamiento impulsados por actividades socioeconómicas y culturales, afectando la capacidad de ofrecer beneficios. Entre los principales factores que amenazan los servicios ecosistémicos se encuentran los peligros físicos, los pasivos ambientales y los conflictos de uso de tierra y socioambientales. Es por ello por lo que los tomadores de decisiones y organismos involucrados han planteado un portafolio de intervenciones en la infraestructura natural que buscan recuperar y conservar los servicios ecosistémicos degradados, especialmente los de mitigación de inundaciones y movimientos de masa que atenúan los efectos de las lluvias y caudales pico. Dichas intervenciones abordan la comprensión de los factores condicionantes y determinantes en la generación del servicio ecosistémico.

Las medidas efectivas de gestión de inundaciones incorporan las funciones de mitigación de inundaciones de los ecosistemas naturales, pero no se comprenden claramente las funciones y los efectos exactos de los bosques, los pastizales y otros ecosistemas en la mitigación de las inundaciones (Fu *et al.*, 2013). En el caso del servicio ecosistémico de mitigación de inundaciones, esta se caracteriza por medio del potencial de escorrentía del ecosistema manteniendo las variaciones del flujo de agua constantes, los tipos de suelo hidrológicos y potencial de retención de suelo, este último dependiente de las propiedades edáficas y vegetacionales (Fu *et al.*, 2013; Parra *et al.*, 2017). Los servicios de regulación hídrica comprenden el almacenamiento de agua en épocas de avenida y su posterior liberación en época seca, proporcionando un balance natural de los caudales en diferentes estaciones. De esta manera, se puede estimar la extensión de superficies permeables que permitan la absorción de las precipitaciones. Se han planteado diversas metodologías para estimar la capacidad de los ecosistemas para mitigar inundaciones, como el desarrollado por Fu *et al.* (2013) y que se basa en el número de curva y el método SCS (*Soil Conservation Service*) (Figura 6).

**Figura 6.** Estimación de la función de mitigación de inundaciones del ecosistema en la parte alta de la cuenca Yangtze



Extraído de Fu et al. (2013)

El servicio de control de erosión consiste en la capacidad del ecosistema para reducir las fuerzas que provocan el desprendimiento de las partículas del suelo, principalmente las fuerzas de erosión generadas por el agua (Dongo, 2021). Aquí, la cobertura vegetal ayuda a minimizar la exposición del suelo a la meteorización o acción de las lluvias, escorrentía y el viento. La capacidad del ecosistema de mitigación de movimientos de masa se determina sobre la base de la susceptibilidad de riesgo geológico (por ejemplo, deslizamiento de tierras o flujos de detritos) y la modificación de los eco-

sistemas (por ejemplo, cambio de uso de suelo). Para ello, es necesario conocer la estructura geomorfológica del ecosistema, las formaciones geológicas y trazas que corresponden a depósitos aluviales, fluviales, remoción en masas antiguas (deslizamientos) y recientes (flujos de detritos) y escombros depositados en las laderas de las quebradas y cerros (Lara, 2007). Finalmente, la estimación de alcance e intensidad de los eventos en el ecosistema se basa sobre el manejo topográfico de los cambios de pendiente, morfología de las laderas y en el registro histórico de eventos en la zona.

## Bibliografía

Bruijnzeel, L.A. (1997). Hydrology of forest plantations in the tropics. In Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests. Editors: E. K. Sadanandan Nambiar and Alan G. Brown. CSIRO Canberra Australia. 571 p.

Dongo, G. (2021). Infraestructura natural para recuperación de servicios ecosistémicos con fines de mitigación de riesgos de inundación y movimientos de masa. *Ciencia Y Práctica*, 1(1), 15–35. <https://doi.org/10.52109/cyp2021110>

Dourojeanni, A., Jouralev, A., Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. División de Recursos Naturales e Infraestructura, CEPAL, Naciones Unidas.

ELI & TNC (2014). Watershed Approach Handbook: Improving Outcomes and Increasing Benefits Associated with Wetland and Stream Restoration and Protection Projects, Environmental Law Institute & The Nature Conservancy, 188p.

EPA (2012). Identifying and Protecting Healthy Watersheds. Concepts, Assessments and Management Approaches. EPA 841-B-11-002, Environmental Protection Agency, EEUU.

Ffolliott, P. F., Brooks, K. N., Neary, D. G., Pizarro, R., García, P. (2013). Soil erosion and sediment production on watershed landscapes: processes and control. PHI-VII / Documento técnico 32, International Hydrological Programme for Latin America and the Caribbean, UNESCO.

Fu, B., Wang, Y. K., Xu, P., & Yan, K. (2013). Mapping the flood mitigation services of ecosystems—A case study in the Upper Yangtze River Basin. *Ecological engineering*, 52, 238-246.

Gaspari, F. J., Rodríguez, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Besteiro, S. I. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. Libros de cátedra, Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires, Argentina.

Lara, M. (2007). Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar el grado académico de magíster en Ciencias Mención Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystems and human well-being: Synthesis. United States of America: Island press.

Selby, M. J. (1985): *Earth's Changing Surface: An Introduction to Geomorphology*, Oxford University Press, 480p.

Schumm, S. (1977). *The Fluvial system*. New York, John Wiley, 338p.



# Anexo

## Anexo B. Variables biofísicas y métodos de medición

En secciones anteriores se han descrito de qué manera se desarrollan los procesos y mecanismos de movimientos de masa, erosión superficial, inundaciones y flujos de detritos, así como su influencia a nivel local y regional. Sobre la base de ello, se han identificado las siguientes variables a caracterizar y monitorear a partir de factores base naturales y cambiantes (clima, relieve y vegetación), así como de los procesos, en sí, de movimientos de masa, erosión e inundaciones. Esta información sirve de insumo para determinar la efectividad de las intervenciones de IN.

La selección del método apropiado para la cuantificación de una variable se encuentra basado en la necesidad de la gestión del agua y los requisitos de la red hidrológica que se desea plantear, como también de las características climatológicas y fisiográficas. Los requerimientos, las condiciones intrínsecas impuestas por el sistema, limitaciones logísticas y otra diversidad de factores, limitan la selección y, en general, el propósito específico de la variable a medir y monitorear. Es decir, si se desea realizar una obra, por ejemplo, un embalse en un lugar específico es necesario realizar un seguimiento del comportamiento hidrosedimentológico de la cuenca y contar con una resolución espacial y temporal que sea adecuada a este tipo de proyectos.

Sobre la base de los objetivos de la presente propuesta se requiere plantear el proceso que se desea cuantificar, asociar las variables e identificar las características climatológicas y fisiográficas de la región para optimizar el estudio hídrico que garantice la continuidad de la información con la finalidad de alcanzar el objetivo propuesto sin incurrir en gastos y esfuerzos innecesarios, por ejemplo: la adquisición y uso de equipos y estaciones costosas, entre otras limitantes. Para todo tipo de intervenciones se necesita monitorear la línea base, en muchos casos a nivel de cuenca o de un tramo específico.

### I. Variables base y métodos de medición

Para categorizar los fenómenos de inundaciones, erosión superficial y movimiento de masa (deslizamientos y flujo de escombros), este estudio se enfocará en cada uno de ellos y se describirán las variables que permiten su caracte-

rización y las metodologías que son ampliamente aplicadas. Los métodos de cuantificación de una variable determinada normalmente siguen las etapas clásicas de selección de fenómeno a evaluar, variable y región a medir, resolución espacial y temporal, entre otros puntos.

#### I.1. Cartografía

##### Caracterización biofísica

La identificación de las características biofísicas se realiza sobre la base del conocimiento histórico del entorno geológico, geomorfológico e hidrogeográfico. Esta información se obtiene del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, la cual es publicada y actualizada mediante la plataforma de Sistema de Información Geográfica GEOCATMIN <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>.

**Geología:** características de la zona de estudio, como formaciones geológicas, unidades morfotectónicas, riesgos geológicos y geotécnicos (actividad sísmica y volcánica, subsidencias, entre otros).

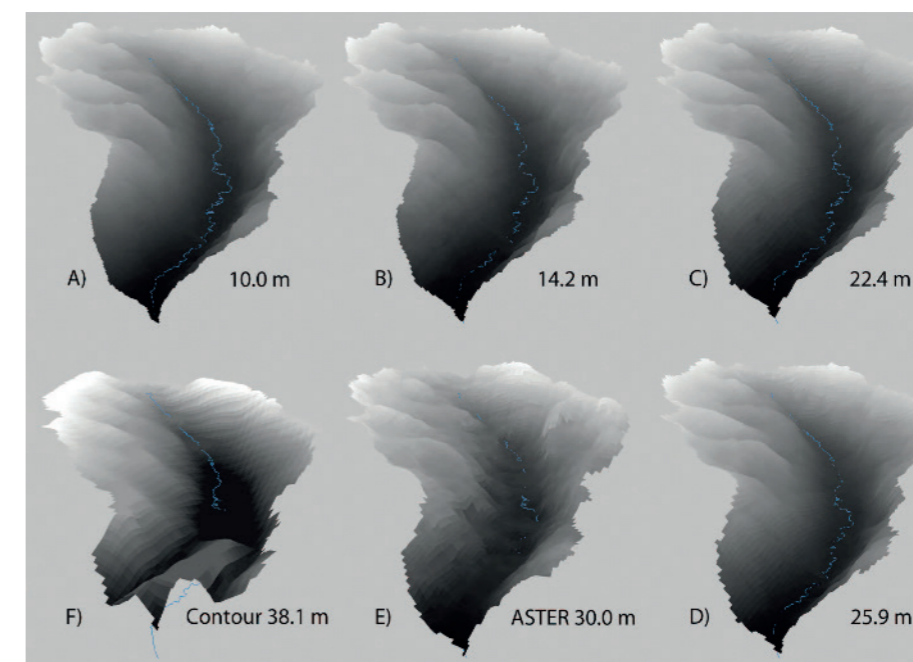
**Geomorfología:** características y clasificación del terreno, identificación de los procesos modeladores de la superficie (fluviales, movimientos de masa, glaciares, periglaciares, costeros y otros), mecanismos de erosión y transporte de sedimentos y riesgos hidrogeomorfológicos (inundaciones, erosión hídrica, huaicos, deslizamientos y demás).

**Hidrografía:** características de la red de drenaje, obras realizadas en los cauces, tipos de usos de suelo, entre otros.

##### Modelos digitales de elevación (DEM)

Un modelo de elevación digital (DEM) es una representación de la superficie topográfica del suelo desnudo de la Tierra, excluyendo árboles, edificios y cualquier otro objeto de la superficie. La construcción de los DEMs se realiza a través de los relevamientos topográficos, estudios de fotogrametría y diversos productos derivados de sensores remotos (principalmente radar), tales como el *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), ALOS PALSAR, entre otros de distinta resolución y, actualmente, se ha incorporado la tecnología LiDAR, lo cual incrementa notablemente la resolución final de los mismos (Figura 1).

Figura 1. Modelos Digitales de Elevación a diferentes resoluciones del Callejón Rojas



Fuente: Fry et al. (2014)

### Áreas inundables, peligro, vulnerabilidad y riesgo

Las inundaciones suceden cuando un canal fluvial ve superada su capacidad de escurrimiento y se produce un transbordamiento a zonas aledañas, las cuales, en sistemas aluviales, es la llanura de inundación. Esta situación extrema se produce fundamentalmente como respuesta a eventos hidroclimáticos extremos (lluvias muy intensas de corta duración, periodos extendidos de temporadas de lluvias por encima de la media) y como consecuencia del colapso de estructuras (roturas de presas naturales y artificiales), efecto de remanso (*backwater*) en los cursos bajos de los ríos en zonas costeras por temporales y efecto del viento (*storm surges*), entre otros. Por estadística, tradicionalmente se ha considerado que los ríos igualan o exceden la inundación media anual cada 2,33 años (Leopold et al. 1964). Sin embargo, ese número es altamente variable y depende de las condiciones climatológicas, geográficas y otras características de las cuencas.

Las actividades humanas pueden contribuir a mitigar o exacerbar el riesgo de inundaciones. Por ejemplo, la expansión agrícola y urbana en zonas de riesgo, como las llanuras de inundación, pueden ser protegidas con intervenciones ingenieriles que proporcionan medidas preventivas. Sin embargo, no obstante, las intervenciones se perciben como seguras, las mismas que pueden incrementar la vulnerabilidad potencial y el riesgo. También, las modificaciones de las redes de drenaje urbanas y la impermeabilización del terreno de cuencas han exacerbado, en muchos casos, los riesgos de inundación en centros urbanos.

Actualmente, existen muchas herramientas para caracterizar el potencial o registro de inundabilidad mediante registros históricos. Por ejemplo, el Global Surface Water Explorer (<https://global-surface-water.appspot.com/#data>) es una nueva base de datos de acceso libre generada a partir de imágenes Landsat (bandas 5, 7 y 8) que muestra

dónde y cuándo se produjo el agua superficial durante los años 1984 y 2015 (Pekel et al. 2016). No obstante, las limitaciones que este tipo de plataformas ofrece, no dejan de ser un punto de partida útil al iniciar estudios sobre áreas inundables. Un esfuerzo peruano recae en el Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres (<http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/>), que desarrolló una plataforma de visualización de libre acceso para analizar y monitorear la información relacionada a los peligros, vulnerabilidades y riesgos originados por fenómenos naturales. Esta información ha sido facilitada por las entidades técnico-científicas y entidades públicas del país relacionadas a la gestión de riesgos.

#### Contenido de humedad

El contenido de humedad es la relación que existe entre el peso de agua contenida en la muestra en estado natural y el peso de la muestra después de ser secada en el horno a una temperatura entre los 105-110 °C. Se expresa en forma de porcentaje y puede variar de 0 cuando está perfectamente seco hasta un máximo determinado que no necesariamente es el 100 %. La importancia del contenido de agua que presenta un suelo es una de las características más importantes para explicar el comportamiento de este; por ejemplo, cambios de volumen, cohesión o estabilidad mecánica.

En el 2009, la Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó la misión SMOS, dedicada a tomar medidas directas de alta calidad de la humedad almacenada en las capas superficiales del suelo. Los datos de SMOS se utilizan principalmente para la predicción meteorológica, en estudios hidrológicos y para mejorar la gestión de los recursos hídricos. Esta misión también proporciona datos prácticamente en tiempo real a un gran número de servicios operacionales. Para hacer frente a esta carencia de datos históricos, de gran utilidad para los estudios climáticos, la ESA ha apoyado el desarrollo de un archivo de datos sobre la humedad del suelo a escala global, sobre la base de las medidas realizadas en el pasado por una serie de satélites europeos y estadounidenses. Los datos pueden ser obtenidos mediante el siguiente enlace: [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/SMOS/Mapping\\_moisture](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/SMOS/Mapping_moisture)

#### Textura

La textura se define como el conjunto de relaciones espaciales intergranulares y de características morfológicas (tamaño y forma) de los componentes (esencialmente granos y/o agregados minerales) de rocas, sedimentos y suelos. Las denominaciones texturales y los criterios utilizados varían según el tipo de material considerado. En ingeniería, hay dos (2) sistemas de clasificación de suelos: AASHTO, usado en construcción de carreteras, y SUCS, usado en ingeniería geotécnica.

La más utilizada es la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (*Unified Soil Classification System-USCS*), la cual fue presentada por Arthur Casagrande para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se puede clasificar suelos menores de tres (3) pulgada. Se representa mediante un símbolo con dos (2) letras, conforme a lo expuesto en la Tabla 1.



**Tabla 1.** Clasificación de la textura y tamaño de partículas

Divisiones mayores			Símbolo del grupo	Nombre del grupo
<b>Suelos granulares gruesos</b> El 50 % o más se retuvo en el tamiz n.º 200 (0,075 mm)	<b>Grava</b> < 50 % de la fracción gruesa que pasa el tamiz n.º 4 (4,75 mm)	Grava limpia menos del 5 % pasa el tamiz n.º 200	GW	Grava bien graduada, de fina a gruesa
			GP	Grava pobremente graduada
		Grava con más de 12 % de finos pasantes del tamiz n.º 200	GM	Grava limosa
			GC	Grava arcillosa
	<b>Arena</b> ≥ 50 % de fracción gruesa que pasa el tamiz n.º 4	Arena limpia menos del 5 % pasa el tamiz n.º 200	SW	Arena fina a gruesa
			SP	Arena pobremente graduada
Arena con más de 12 % de finos pasantes del tamiz n.º 200		SM	Arena limosa	
		SC	Arena arcillosa	
<b>Suelos de grano fino</b> Más del 50 % de la muestra pasa el tamiz n.º 200 (0,075 mm)	<b>Limos y arcillas</b> límite líquido < 50	Inorgánico	ML	Limo
			CL	Arcilla
		Orgánico	OL	Limo orgánico, arcilla orgánica
	<b>Limos y arcillas</b> límite líquido ≥ 50	Inorgánico	MH	Limo de alta plasticidad, limo elástico
			CH	Arcilla de alta plasticidad
		Orgánico	OH	Arcilla orgánica, limo orgánico
<b>Suelos altamente orgánicos</b>			Pt	Turba

Fuente: ASTM (1985)

#### Contenido de materia orgánica

La materia orgánica (residuos de plantas y restos animales) está compuesta por carbohidratos, ligninos y proteínas. Los microorganismos descomponen la materia orgánica en dióxido de carbono y los residuos más resistentes en humus, almacenando los nutrientes en el suelo. También mejoran su estructura, sueltan suelos de arcilla, ayudan a prevenir la erosión y mejoran la capacidad de retención de nutrientes y agua de suelos arenosos o toscos.

La cantidad de materia orgánica del suelo depende de la vegetación, el clima, la textura del suelo, el drenaje de este y de su laboreo. Los suelos minerales con mayor contenido de materia orgánica son normalmente los suelos de praderas vírgenes. Los suelos de bosques y aquellos de climas cálidos tienen una menor cantidad de materia orgánica.

**Porosidad**

Es el porcentaje de volumen de poros o espacio poroso que puede contener fluidos en un sedimento, suelo o roca. La porosidad puede ser un relictos de la depositación (porosidad primaria, tal como el espacio existente entre los granos que no fueron completamente compactados) o puede desarrollarse a través de la alteración de las rocas (porosidad secundaria, tal como sucede cuando los granos de feldespato o los fósiles se disuelven preferentemente a partir de las areniscas). La porosidad puede generarse por procesos secundarios como los procesos de meteorización y por el desarrollo de fracturas, en cuyo caso se denomina porosidad de fractura.

**Consistencia o compacidad**

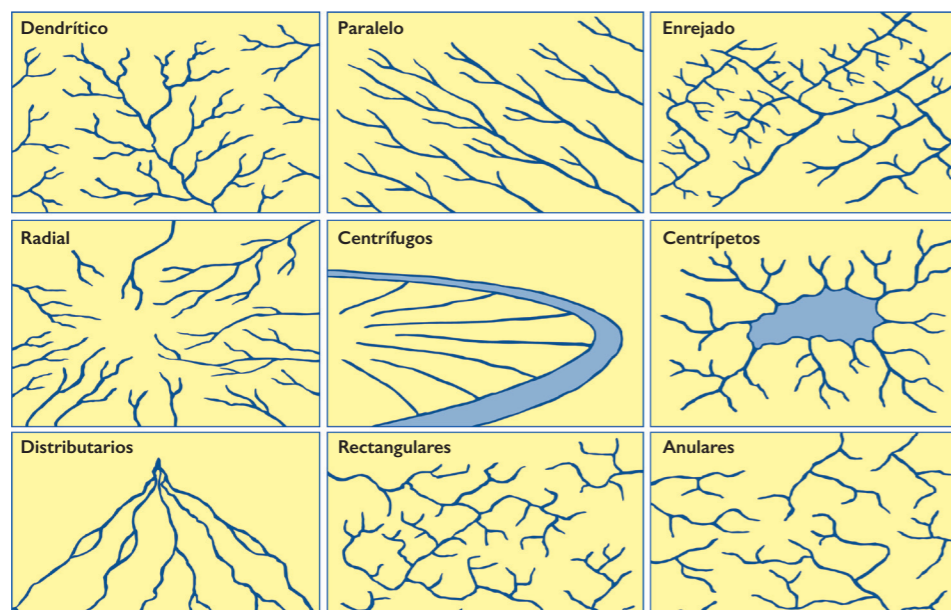
Una propiedad reológica de la materia relacionada con la cohesión de las partículas individuales de un determinado material, su capacidad para deformarse y su resistencia al flujo. La consistencia del suelo se mide por muestras de suelo mojado, húmedo y seco. En los suelos mojados se

expresa como adhesividad y plasticidad. Esta variable puede medirse mediante ensayos manuales o en laboratorio utilizando los límites de Atterberg.

**Drenaje**

El patrón de drenaje se refiere al diseño espacial que presenta la red de drenaje. Los distintos patrones resultan de las interacciones impuestas sobre la red fluvial por el sustrato (litológico) y las estructuras (tectónica). Una serie de patrones representativos se presentan en la Figura 2. Las redes de drenaje caracterizan fundamentalmente las geoformas erosivas (valles). Es el sistema de información global sobre el agua de la FAO, desarrollado por la División de Tierras y Aguas, la cual es la fuente más citada sobre estadísticas globales del agua (<https://data.apps.fao.org/aquamaps/>). En Perú se tiene la Autoridad Nacional del Agua que es la rectora técnica-normativa que establece procedimientos para la gestión integrada, sostenible y multisectorial de los recursos hídricos (<http://snirh.ana.gob.pe/ObservatorioSNIRH/>).

**Figura 2.** Patrones de drenaje controlados por rasgos de la estructura geológica y geomorfológica

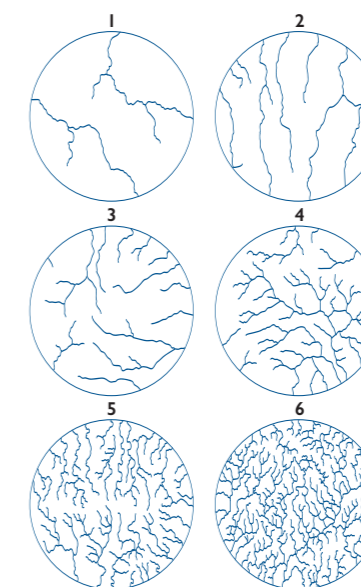


Fuente: <https://geologiaweb.com/geologia-general/patrones-drenaje/>

La densidad de drenaje (Figura 3) es un indicador de la longitud total de canales en una red de drenaje particular por unidad de área y se calcula como  $Dd = \Sigma C / Ad$ , donde C es la sumatoria de la longitud total de la red de canales y Ad es el área de drenaje. Las clases de densidad se establecen

empíricamente para una región determinada o un área de proyecto. En la Guía para la descripción de suelos de la FAO (2009), se definen valores de densidad de drenaje potencial sobre la base del número de píxeles receptores dentro de una ventana de 10 x 10 píxeles (Zinck, 1988).

**Figura 3.** Clasificación de la densidad del drenaje



Adaptado de Meijerink (1988)

La densidad de drenaje es un buen indicador 2-D de la erosión fluvial en una zona con determinado sustrato (relieve, tipo de rocas y suelos), cobertura vegetal y uso, pero no es un buen indicador de la disección/incisión, ya que no mide la componente vertical de la erosión. La densidad de drenaje también tiene cierto nivel de correlación con el régimen de precipitaciones/clima. Para un mismo tipo de sustrato, por ejemplo, la densidad es baja en climas muy áridos, aumenta en climas semiáridos y subhúmedos y decrece en climas más húmedos.

**Erodabilidad**

Indica la susceptibilidad de los suelos a ser erosionados, así como la cantidad de erosión, por unidad de índice de erosión obtenida de parcelas unitarias localizadas en dicho

suelo. Su determinación está en función del porcentaje (%) de arena más limo, el porcentaje de arena, el porcentaje de materia orgánica, la estructura del suelo y la permeabilidad.

**1.2. Clima**

**Precipitación**

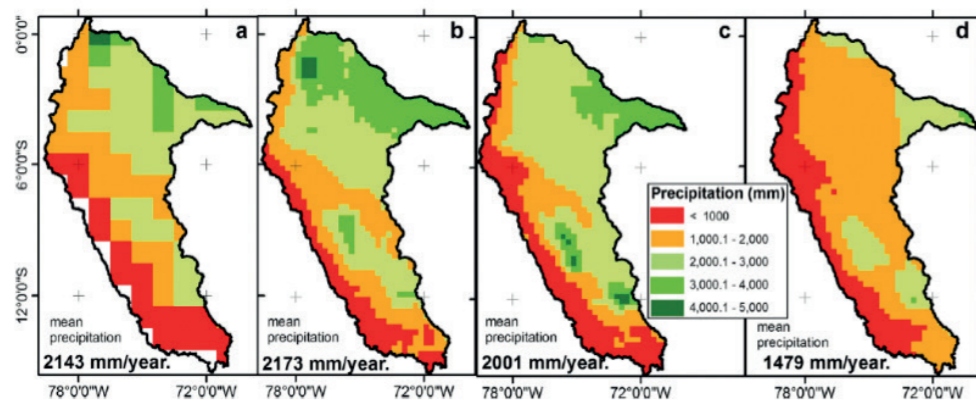
Las precipitaciones afectan en cantidad, tiempo, distribución espacial y calidad del agua sobre una cuenca, y se consideran los principales agentes desencadenantes de eventos extraordinarios, como inundaciones. Así, si se producen intensas y/o prolongadas lluvias es posible que se desarrolle una inundación de tipo pluvial o fluvial. El origen de estas se debe a la acción conjunta de diferentes factores meteorológicos y, por lo tanto, se encuentran fuera del control humano (Brooks et al., 2013; Zubieta et al., 2015). Actualmen-



te, se ha incrementado las metodologías disponibles que permiten la determinación de probabilidad de ocurrencia, intensidad y duración (Figura 4). Si bien su cuantificación

todavía es compleja, existen métodos que de manera directa o indirecta permiten la estimación del volumen de agua caída.

**Figura 4.** Precipitación anual estimada por (a) HYBAM, (b) TMPA, (c) CMORPH y (d) PERSIANN sobre la región oeste de la cuenca amazónica para el periodo de 2003 a 2009



Fuente: Zubieta et al. (2015)

La cantidad de agua que alcanza el suelo durante un periodo de tiempo determinado suele ser medida sobre la base de la profundidad que alcanza a cubrir una superficie horizontal en la superficie de la tierra. El principal objetivo de la medición de una precipitación es obtener una muestra representativa de la lluvia caída sobre una superficie. Dado que es un parámetro esencial para el diseño hidrológico debe ser cuidadosamente obtenido (selección del sitio, efectos del medio, evaporación, entre otros)<sup>3</sup>.

El pronóstico de fenómenos extraordinarios de grandes precipitaciones debe ser estimado (en lo posible) en tiempo real. Los radares permiten determinar la intensidad y cantidad de lluvias en un área extensa que puede alcanzar distancias radiales de 200 km (Brooks et al., 2013). Estos equipos costosos suelen estar correlacionados con las mediciones clásicas, aunque su calibración puede incor-

porar grandes errores (Sauvageot, 1994)<sup>4</sup>. De todos modos, existe una serie de equipos y sistemas de medición que permiten parcialmente suplir esta tecnología con un menor costo, como se cuenta a continuación.

#### Estaciones automáticas

La mayoría de las variables climatológicas puede medirse mediante instrumentación automática. Para la cuantificación de eventos de precipitación o estudios hidrológicos se ha masificado el uso de estaciones en puntos de interés sobre la cuenca de estudio. El método más utilizado es una estación de forma cilíndrica de unos 20 cm de diámetro, donde se almacena una muestra de la precipitación caída (Figura 5) (Brooks et al., 2013). Existen, sin embargo, al menos dos (2) tipos de estaciones con y sin almacenamiento de datos. Las últimas de un costo menor que las primeras.

3 Para más detalles ver WMO n.º 168, 2008.

4 Para más detalles ver <http://www.srh.noaa.gov/mrx/research/precip/precip.php>.

**Figura 5.** Pluviómetro clásico compuesto de embudo y estructura de almacenamiento

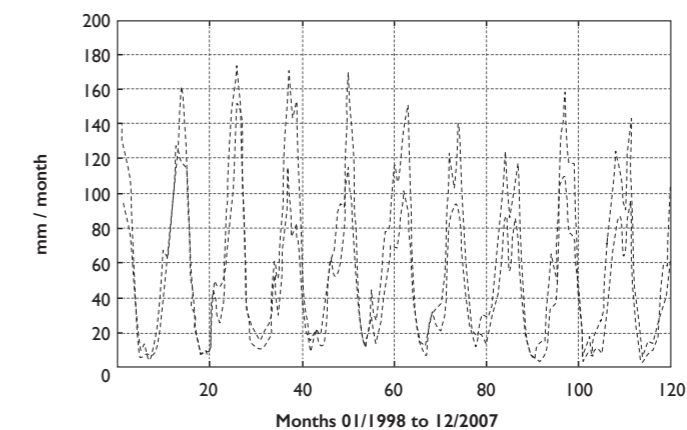


Fuente: <https://www.tutiempo.net/meteorologia/i/articulos/n10/Imagen9.jpg>

Las estaciones sin almacenamiento de datos son muy usadas en el ámbito de la hidrología y meteorología, las mismas consisten en un receptáculo abierto (tipo embudo) de eje vertical. Los métodos de medición más comunes de estaciones de precipitación son dos (2): un cilindro o una regla de graduados sumergida. Las estaciones estándar de lectura diaria normalmente son un colector tipo embudo. Las principales

especificaciones se indican en la WMO n.º 168 (2008). Los pluviómetros para uso en lugares donde no se pueden realizar lecturas semanales o mensuales son similares a los ya indicados, aunque con receptores de mayor capacidad y de materiales más resistentes. Las lecturas son leídas por observadores calificados, que pueden determinar el volumen, peso o altura de agua dependiendo del tipo de pluviógrafo (Figura 6).

**Figura 6.** Señal de precipitaciones en cuenca Tambo en línea negra continua datos de campo y a trazos logrados a través de TRMM. Fuente: estación meteorológica con almacenamiento de datos



Fuente: Lavado et al. (2009)

Los errores asociados a la lectura de los datos recolectados comparados con las incertidumbres de la exposición del instrumento son notablemente menores. La principal fuente de error en este punto es el uso inadecuado de reglas graduadas, derrames a la hora de transferir el agua desde el receptor al medidor o la imposibilidad de poder transferir toda el agua (a otro instrumento de medición). La pérdida por evaporación puede ser otro factor importante en la pérdida de volumen de muestreo. Existen métodos que permiten corregir los errores sistemáticos debido al efecto del viento, humedad, evaporación, entre otros (WMO, 1982).

Las estaciones de almacenamiento de datos permiten una medición continua del fenómeno con un costo económico superior a la previa. Existen al menos cinco (5) grandes tipos de estaciones de almacenamiento de datos de precipitación: las de pesado, las con flotantes, con recipientes basculante, distanciómetros y equipos acústicos. Estas dos (2) últimas son solo aptas para determinadas regiones o sistemas fluviales.

Las **estaciones de pesado** registran el peso del volumen capturado de forma continua, ya sea mediante un sistema de mecanismo de resorte o con un sistema de contrapeso. Por lo tanto, toda la precipitación que cae puede ser capturada a medida que alcanza la estación.

Las **estaciones flotantes** son alimentadas en el evento de precipitación a un compartimento específico el cual contiene un flotante. Cuando el nivel se modifica, el movimiento del flotante es transmitido mecánicamente a un gráfico.

Las **estaciones con sistema basculante** tienen un funcionamiento sencillo. Estas cuentan con un recipiente metálico ligero dividido en dos (2) compartimentos que mantienen un equilibrio inestable sobre el eje horizontal. Cuando se produce el evento, se inicia el llenado de uno de esos recipientes hasta que desciende. Una vez que desciende se inicia el llenado del otro recipiente. Este movimiento es registrado mediante un sistema mecánico.

**Figura 7.** Estación pluviométrica basculante



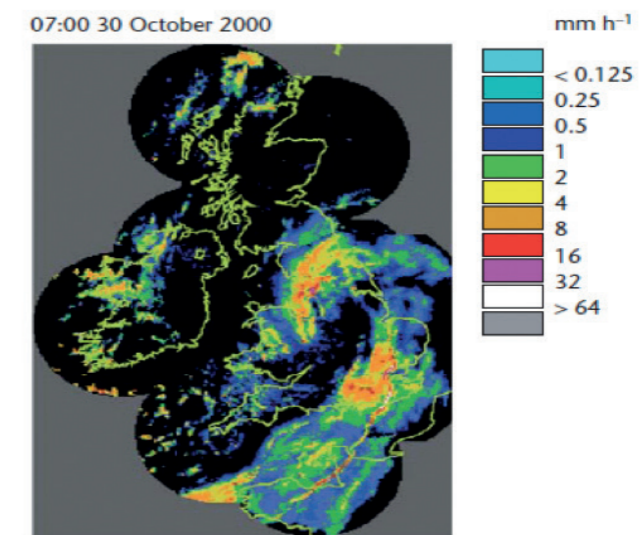
Fuente: <https://www.tequipment.net/HOBO-by-Onset/S-RGE-M002/Weather-Measurement/>

#### Uso de radares y fuentes remotas

Los radares permiten observar regiones de precipitación y estimar el volumen potencial de precipitación que puede caer (Bringi & Chandrasekar, 2001) en tiempo real (Figura 8B). Su limitante se encuentra asociado al elevado costo de estos y al rango de cobertura variable entre 40 a 200 km radiales, dependiendo de las características del instrumental

y la región de implantación. Los equipos presentan diferentes configuraciones. La selección del equipo con longitud de onda adecuada depende de las condiciones climáticas y de los pronósticos que se pretenda brindar. Cuando las precipitaciones son más abundantes se produce una fuerte atenuación del haz de onda emitido, mientras que los radares de onda larga pueden no llegar a detectar las lluvias de baja intensidad.

**Figura 8.** Sistema conectado de medición de precipitaciones en el Reino Unido e Irlanda durante el 30 de octubre del 2000



Fuente: WMO 168 (2010)

Cabe resaltar que los radares de monitoreo terrestre combinado con las estaciones convencionales han sido utilizados en las últimas décadas para mejorar el pronóstico de los primeros. El radar terrestre se usa ampliamente como un medio informal de alerta inicial de inundaciones inminentes, utilizando las imágenes en movimiento que proporcionan los sistemas de tormentas. Sin embargo, el uso cuantitativo de datos de radar es mucho menos común y está limitado por la precisión, especialmente en áreas montañosas y en momentos en que los efectos de banda brillante son evidentes (WMO, 1998). Recientemente, se han publicado los primeros resultados de una campaña climática con radares en Perú (Valdivia *et al.*, 2021). La campaña fue llevada a cabo por el Instituto Geofísico de Perú en la región de Lima sobre una zona desértica. El objetivo fue estudiar la ocurrencia de lluvias durante el verano del 2018.

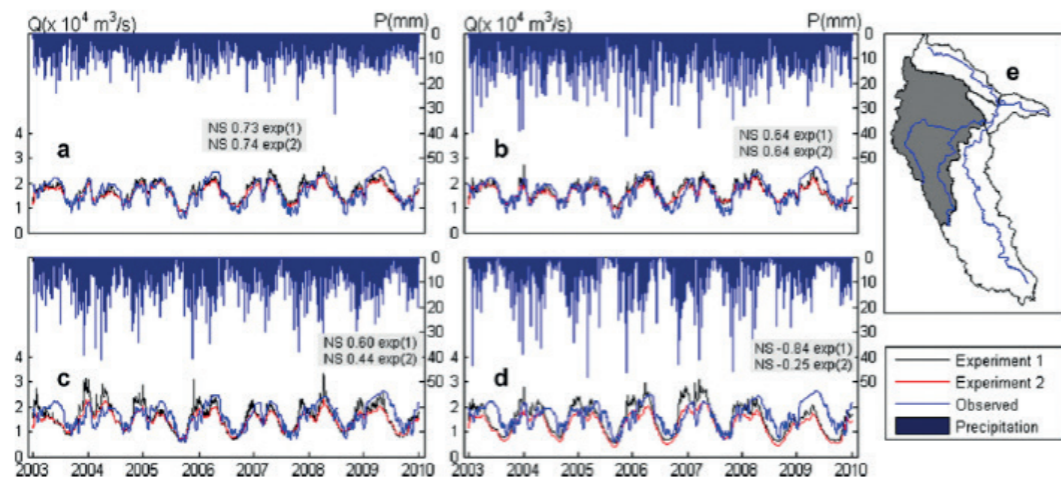
#### Observación satelital

Dado el gran número de satélites, la proyección de estos ofrece la capacidad de relevar grandes extensiones y las importantes mejoras técnicas en los instrumentos de captura.

Actualmente, se está haciendo masivo el uso de información remota para la estimación de las precipitaciones desde el espacio. El método de manera resumida se basa en la cuantificación de la cantidad de radiación que se refleja y emite a través de las cimas de las nubes. La mayor parte de la radiación no penetra profundamente en las regiones de nubes que contienen partículas de tamaño similar o mayor que la longitud de onda de la radiación. Por lo tanto, a excepción de las longitudes de onda más largas, la mayor parte de la radiación proviene de las regiones superiores de las nubes precipitantes y, por lo tanto, solo puede relacionarse indirectamente con la lluvia en la superficie. Actualmente, ya se encuentra en funcionamiento una serie de misiones para tales fines, como las siguientes:

**Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).** Es una misión conjunta, iniciada en 1997, entre la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial (NASDA) de Japón y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de los Estados Unidos. La misión fue diseñada para estudiar lluvias tropicales entre 35° N y 35° S (Zubieta *et al.*, 2015).

**Figura 9.** Hidrogramas de caudal observados y simulados en la estación Requena (río Napo), de enero del 2003 a diciembre del 2009. Los datos alcanzados son comparados con diferentes fuentes: (a) datos de lluvias de HYBAM, (b) TMPA, (c) CMORPH y (d) PERSIANN y (e) ubicación de la cuenca del Napo

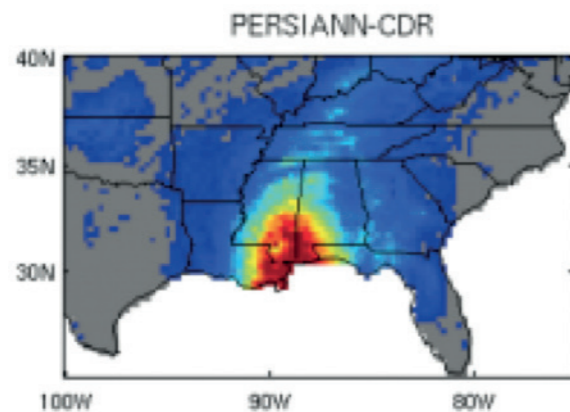


Fuente: Zubieta et al. (2015)

**Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN).** PERSIANN es un sistema automatizado para

estimar las precipitaciones mediante información remota usando Redes Neuronales, que combinan información de varios canales y observaciones de sensores múltiples (Hsu et al., 1997; Sorooshian et al., 2000).

**Figura 10.** Mapa de precipitación acumulada diaria (mm/día) durante el huracán Katrina el 29 de agosto de 2005 de PERSIANN-CDR. Los píxeles negros y grises muestran bloqueos de radar y precipitación cero

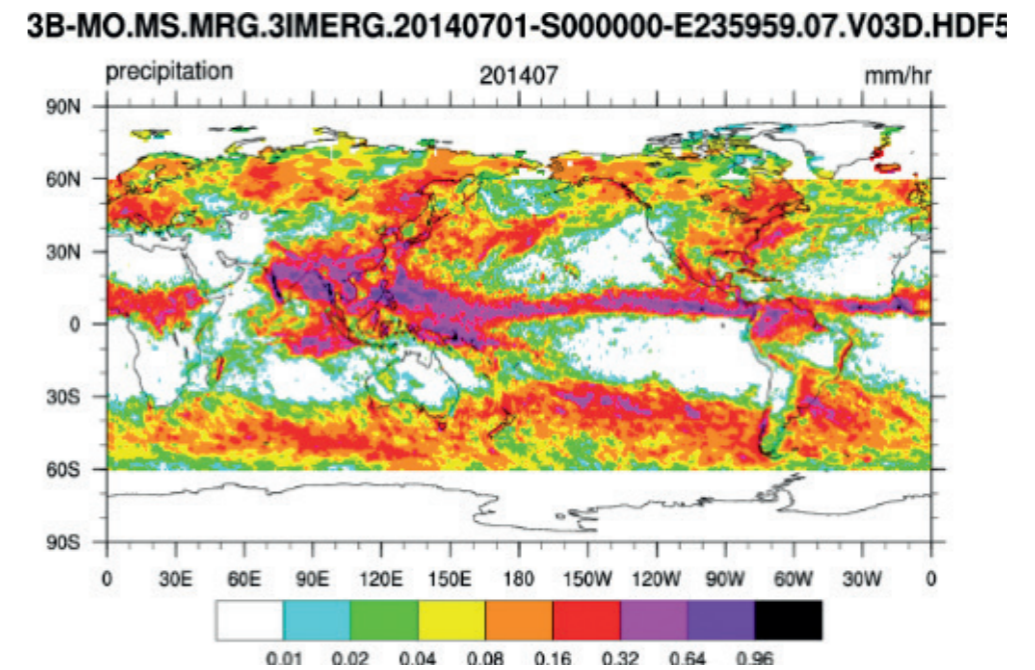


Fuente: Ashouri et al. (2020)

**Global Precipitation Measurement (GPM).** La misión GPM es una red internacional de satélites que proporciona las observaciones globales de lluvia y nieve de nueva generación para mejorar nuestra comprensión del ciclo del agua y la energía de la Tierra, mejorar el pronóstico de eventos

extremos y proporcionar información precisa y oportuna para beneficiar directamente a la sociedad. Para acceder a la base de datos y detalles del procesamiento, visitar el siguiente enlace: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/GPM/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/main/index.html).

**Figura 11.** Muestra de la NASA's Level 3 Integrated Multi-Satellite Retrievals para GPM

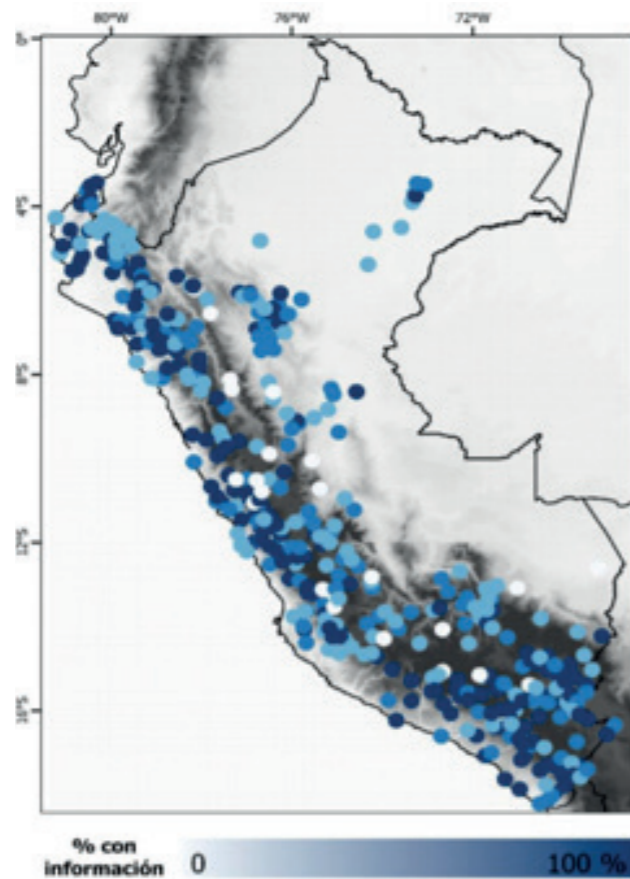


Fuente: National Center for Atmospheric Research (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpm-global-precipitation-measurement-mission>)

**Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations (PISCO).** Es una base de datos grillada de precipitaciones diarias y mensuales generada por el SENAMHI, que combina datos de estaciones meteorológicas y productos satelitales. Estos datos grillados alcanzan una resolución espacial de hasta 5 x 5 m y abarcan una serie tem-

poral del 1 de enero de 1981 hasta el 31 de diciembre del 2016. Para más información sobre los usos de PISCO, revisar la nota técnica 001-SENAMHI-DHI-2017: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-8.pdf>. Para acceder a los datos, visitar el siguiente enlace: <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/SENAMHI/HSR/PISCO/index.html?Set-Language=es>

**Figura 12.** Red de estaciones a nivel nacional utilizadas para la elaboración de PISCO con porcentaje de información por estación durante el periodo 1981-2016



Fuente: SENAMHI, Nota técnica 001-SENAMHI-DHI-2017

#### Temperatura

Para estudios meteorológicos, la temperatura atmosférica (a varias alturas) es la más utilizada. Las mediciones de temperatura están relacionadas al aire cerca de la superficie de la Tierra y a la superficie del suelo. Asimismo, estas mediciones deben ser continuamente registradas a diferentes intervalos de tiempo, ya que pueden estar afectos a lo siguiente:

- Condiciones del entorno ambiental
- Vegetación
- Presencia de construcciones u otros objetos
- Cobertura del suelo

- Condiciones o cambios en la radiación
- Cambios y modificaciones en la instrumentación

A su vez, los registros de temperatura deben contemplar las circunstancias en las que se toman las medidas en forma de metadatos. Los principales instrumentos para medir temperaturas son los termómetros meteorológicos, que contienen mercurio en su interior y cuyo volumen irá cambiando conforme a la temperatura ambiental. Normalmente, estos se encuentran incorporados en estaciones meteorológicas (Figura 13).

**Figura 13.** Estación meteorológica con conjunto de sensores integrados inalámbricos Davis Vantage Pro2



Fuente: <https://www.scientificsales.com/6322-Davis-Vantage-Pro2-Integrated-Sensor-Suite-p/6322.htm>

#### Evaporación

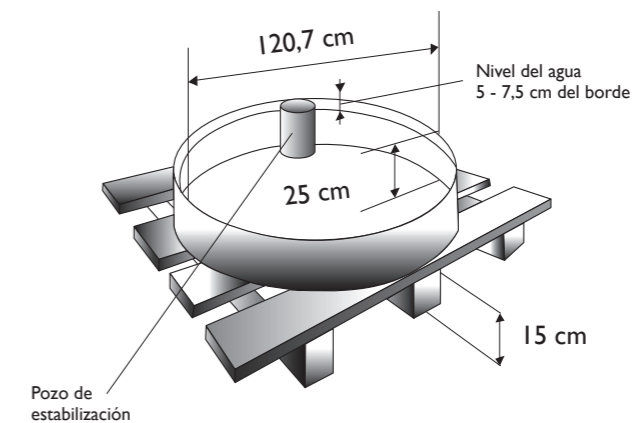
La evaporación es el proceso por el cual el agua cambia de estado líquido o sólido a gaseoso a través de la transferencia de energía calórica. Para una referencia general de mediciones e instrumentos se recomienda la lectura de la Guía Metodológica de Instrumentos y Observaciones (WMO n.º 8). De manera resumida se puede mencionar la existencia de métodos directos e indirectos de medición. Un ejemplo de los primeros es el receptáculo (cuba) de observación, que cuenta con una regla métrica y dimensiones dependiendo de las condiciones climáticas de la región. Lo que se mide de este receptáculo es el nivel de agua, en par-

ticular su descenso. Existen métodos indirectos de medición, como son los de radiación solar, radiación de grandes ondas, temperatura del aire, temperatura de la superficie del agua, humedad o presión de vapor en el aire y viento (ver: WMO n.º 168, 2010).

#### Evapotranspiración

El término evapotranspiración se define como el vapor de agua producido desde una cuenca como resultado del crecimiento de la vegetación. La evapotranspiración incluye la transpiración por la vegetación y la evaporación de superficies libres, suelo, nieve, hielo y vegetación.

**Figura 14.** Diseño de tanque evaporímetro



Fuente: Proyecto Especial Chavimochic

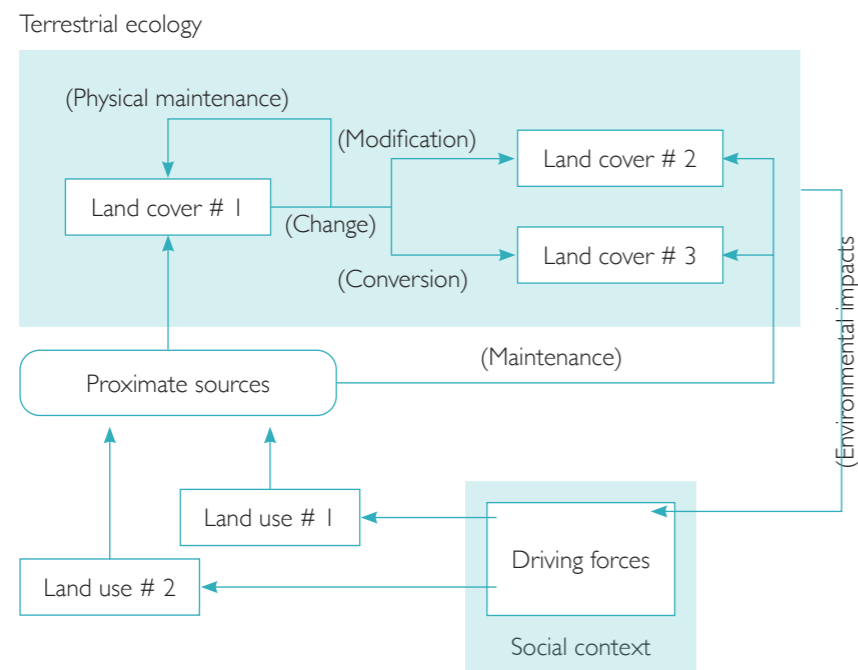
La evapotranspiración se puede estimar mediante el uso de evaporímetros y lisímetros de suelo, analizando el balance de masa o calor; por medio de difusión turbulenta o fórmulas empíricas sobre la base de datos meteorológicos. El uso de evaporímetros (Figura 14) y lisímetros de suelo permite la medición de la evapotranspiración de diferentes superficies terrestres y la evaporación del suelo entre plantas cultivadas. Estos instrumentos son simples y exactos si se han cumplido todos los requerimientos para la instalación y medición. Cabe destacar que es posible estimar tanto la evaporación como la evapotranspiración a través de métodos de sensoramiento remoto (por ejemplo, Schultz y Engman, 2000).

### 1.3. Cobertura y uso de la tierra

El uso y la cobertura del suelo (LULC, por sus siglas en inglés) son fuerzas impulsoras que potencialmente ejercen presiones sobre los ecosistemas acuáticos; sin embargo, aún es un desafío detectar los impulsores que surgen del cambio de paisaje y cómo estos influyen en los servicios ecosistémicos (Teixeira et al., 2014). Se sugiere que los factores

estresantes o presiones sobre el paisaje y, consecuentemente, sobre los servicios ecosistémicos, sean caracterizados a nivel local (Rojas et al., 2021) y regional (Brauman et al., 2014) para ser evaluados por los tomadores de decisiones y partes interesadas, de manera que se implementen los mecanismos necesarios para su gestión y manejo. Es importante reconocer que tanto los procesos biofísicos como los antropogénicos pueden ser graduales y lentos (fuerzas tectónicas, domesticación de plantas silvestres) o pueden actuar con bastante rapidez y ser inmediatas (fenómenos meteorológicos extremos) (Lambin et al., 2008). Por tanto, la identificación de los factores causales del LULC requiere comprender cómo las personas toman decisiones sobre el uso de la tierra y cómo varios factores (incluido el entorno biofísico y los cambios en el mismo) interactúan en contextos específicos a escala local, regional o global para influir en la toma de decisiones sobre el uso de la tierra. La Figura 15 muestra un esquema de los vínculos entre las actividades humanas y el cambio de uso y cobertura de suelo, sobre la base de Turner et al. (1993) y Ojima et al. (1994).

**Figura 15.** Enlace entre las actividades antropogénicas y el uso y cobertura de suelo



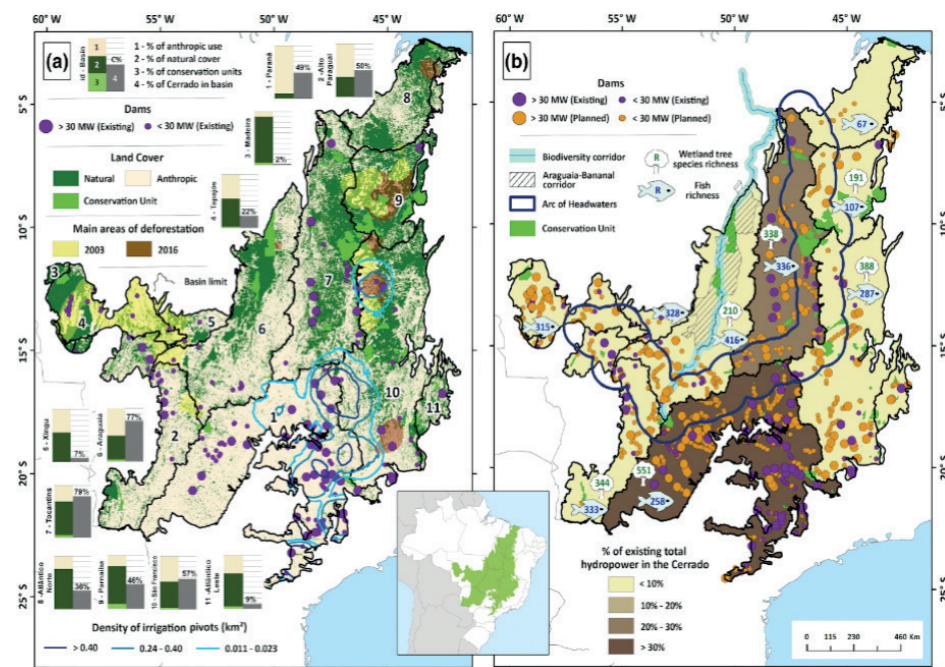
Extraído de Lambin et al. (2008) en base a Ojima et al. (1994).

La cuenca es una unidad de gestión territorial que involucra la integridad de los aspectos biológicos y socioeconómicos, donde interactúan biofísica y socioeconómicamente el ser humano y el medio ambiente en torno al agua (Jiménez, 2009). Es necesario caracterizar las fuerzas impulsoras de los cambios de LULC dominantes, a partir de la presencia de las clases (características físicas, tipo de cobertura) y los procesos de transición a otros usos, como fuentes de estrés con efectos potenciales sobre la condición del cuerpo de agua o el paisaje (Teixeira et al., 2014). Esta caracterización debe considerar las peculiaridades y características de los distintos tipos de ecosistemas presentes en la región, respecto no solamente a las condiciones y características ambientales, sino también a su porcentaje de representatividad a nivel de cuenca (Figura 16).

El uso de la tierra es la suma de las causas próximas del cambio de la cobertura terrestre, es decir, las actividades humanas o las acciones inmediatas que se originan a partir

de la manipulación intencionada de la cobertura terrestre (Lambin et al., 2008). Las causas directas involucran una acción física sobre la cobertura del suelo y, generalmente, se limitan a un conjunto recurrente de actividades como la agricultura (o expansión agrícola), la silvicultura (o extracción de madera) y la construcción de infraestructura (o la extensión de la estructura edificada). Generalmente, las causas directas operan a nivel local, por ejemplo, comunidades (Lambin et al., 2003; Mather 2006a). Estos se consideran "impulsores directos" del cambio del ecosistema, junto con otros factores inmediatos, como la introducción o eliminación de especies. Por su lado, las causas indirectas operan de una manera más difusa, a menudo alterando una o más causas directas. Las causas indirectas están conformadas por un conjunto de variables sociales, políticas, económicas, demográficas, tecnológicas, culturales y biofísicas (Brookfield, 1999), que constituyen las condiciones estructurales o sistémicas en las relaciones entre el hombre y el medio ambiente, y pueden originarse a nivel regional o mundial (Mather, 2006b).

**Figura 16.** Representatividad del porcentaje de cobertura de suelo, biomasa, infraestructura y deforestación presente en las cuencas fluviales del ecosistema de Cerrado



Extraído de Latrubesse et al. (2019)

La cobertura de la tierra está constituida por todos los elementos biofísicos observables de la superficie terrestre, incluso la asociada a infraestructura antrópica.

*Tipo y distribución de vegetación*

El Ministerio del Ambiente desarrolló el Mapa Nacional de Cobertura Vegetal, el cual está conformado por unidades espaciales definidas y clasificadas sobre la base de criterios

geográficos, fisonómicos, condición de humedad y florísticos (MINAM, 2015). Asimismo, se describe la distribución geográfica, superficie y características biofísicas de los diferentes tipos de cobertura vegetal que cubre el país. La identificación del tipo y distribución de la vegetación también se puede desarrollar mediante trabajo de campo a través de unidades de muestreo a lo largo de las gradientes altitudinales (Ramos et al. 2015).

**Figura 17.** Caracterización de la cobertura de suelo en América del Sur, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos



Fuente: <https://www.usgs.gov/media/images/south-america-land-cover-characteristics-data-base-version-20>

Por otro lado, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) desarrolló el producto de cobertura terrestre *Global Land Cover Characterization* (GLCC), que clasifica la cobertura mediante el método de clasificación no supervisada de 1 km de resolución (Figura 17). Las fuentes de datos auxiliares incluyeron datos digitales de elevación, interpretación de ecorregiones y mapas de cobertura de vegetación y suelo a nivel nacional o regional.

*Caracterización multitemporal de uso y cambio de suelo*

El cambio de cobertura y uso actual de las tierras se pueden obtener de diferentes fuentes secundarias. El proyecto "Dinámicas de Cambio de Cobertura de la Tierra en

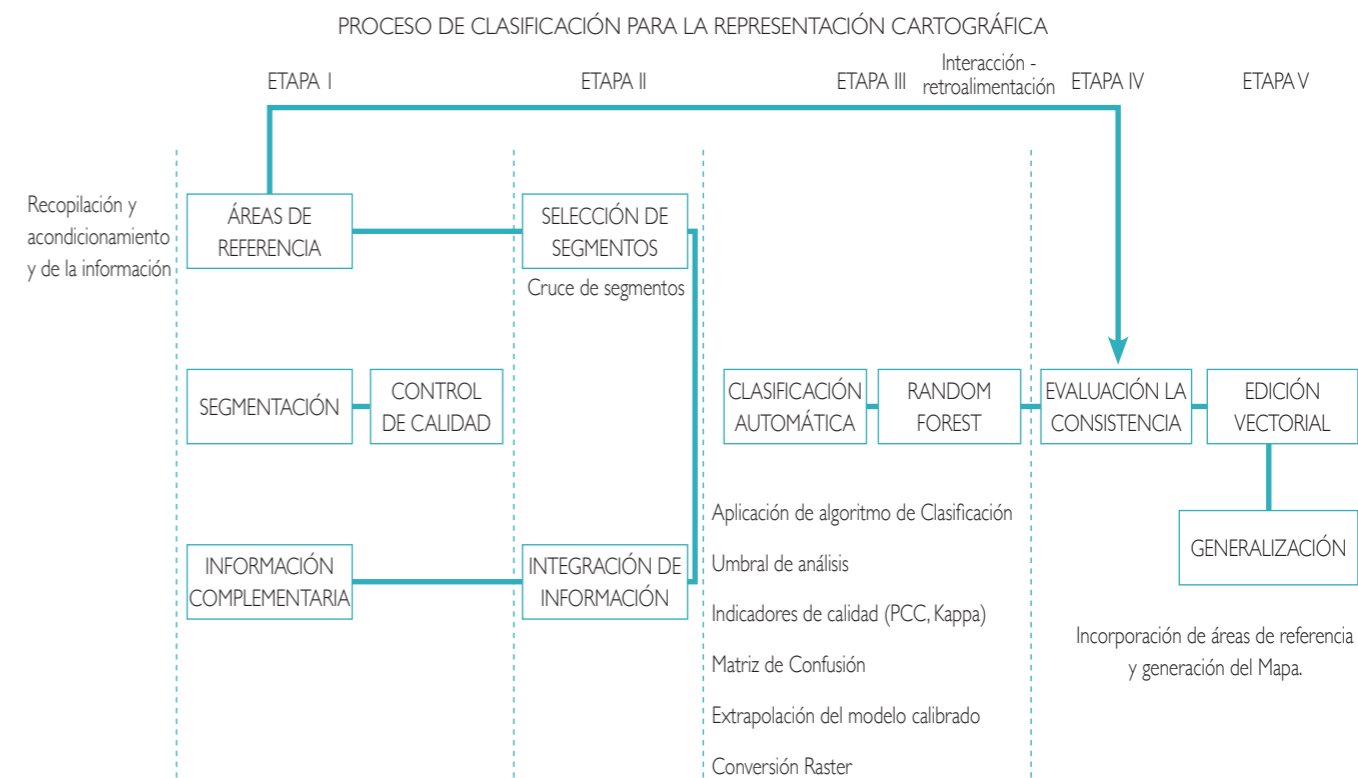
la Comunidad Andina" (liderado por Comunidad Andina y CONDESAN) desarrolló una leyenda para representar los patrones de cobertura de tierra y diversidad biológica, de acuerdo con el esquema de clasificación Corine Land Cover (IDEAM et al. 2008). Esta metodología emplea diferentes niveles jerárquicos a la par de detalles temáticos (Figura 18).

Los cambios de uso y cobertura de suelo también se pueden analizar aplicando técnicas de teledetección, empleando indicadores como el índice de vegetación de diferencia normalizada (*Normalized difference vegetation index - NDVI*) a partir de datos Landsat o MODIS (Usman et al. 2015).

La cartografía de la cobertura y el uso de la tierra de forma precisa y eficaz a través de la teledetección requiere buenos métodos de clasificación de imágenes. Desafortunadamente, existen numerosos factores (por ejemplo, resolución de imagen y condición atmosférica) que podrían

afectar la efectividad y precisión de los algoritmos de clasificación (Lam, 2008). Actualmente, se cuentan con métodos de clasificación diseñados para mejorar el proceso de clasificación, tales como los descritos por Jensen (2005) y Gong (2006).

**Figura 18.** Proceso metodológico para generar información de cobertura terrestres utilizando la leyenda Corine Land Cover



Fuente: <https://geoservidor.minam.gob.pe/monitoreo-y-evaluacion/cambio-de-cobertura-y-uso-actual-de-las-tierras/>

**2. Variables por procesos y métodos de medición**

Las variables para tener en cuenta en la evaluación de efectividad de las intervenciones también se encuentran asociadas a la determinación de los parámetros modeladores hidrológicos, sedimentológicos y morfológicos. Debido a diferentes mecanismos presentes, existen distintos mecanismos de cuantificación, por ejemplo: la aplicación de formulaciones teóricas, métodos de muestreo clásicos (Edwards y Glysson, 1997) y métodos recientes acústicos (Latosinski et al., 2017; Szupiany et al., 2019).

En esta sección se describen los métodos, equipos e instrumentos que se utilizan típicamente para mapear y monitorear las variables en cada uno de los procesos: inundaciones, erosiones superficiales y movimientos de masa (deslizamientos y flujo de escombros). Algunas de las variables obedecen a una descripción base que incluye mayor extensión que propiamente la intervención, por ende, se deberán seguir monitoreando, no solamente para definir la eficiencia de la intervención natural, también para comprender el grado de alteración que podría sufrir el ecosistema. El monito-

reos a escala de intervención recae en variables dominantes que tienen una tendencia base (antes de la intervención), que comienzan a cambiar (durante la intervención) y que seguramente alcanzarán un nivel de equilibrio (después de la intervención), por ello es importante prever que el monitoreo tiene que ser prolongado.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de las variables por procesos y los métodos de medición aplicables a diferentes tipos de entornos. Estas metodologías permiten caracterizar cada una de las zonas de estudio integrando el comportamiento local e integral de cada una de las zonas, adaptándose a las características propias de cada una de ellas.

**Tabla 2.** Variables identificadas por proceso

Proceso		Variables
Inundaciones	Régimen hidrológico	<b>Niveles de superficie de agua.</b> Permite el control de los niveles de superficie libre máximos que un cauce puede transportar. <ul style="list-style-type: none"> <li>Cotas máximas y cotas de márgenes llenas (condición de desborde sección llena - <i>bankfull</i>).</li> </ul>
		<b>Caudal líquido.</b> Permite contar con el conocimiento del volumen líquido máximo que es capaz de transportar un cauce natural. <ul style="list-style-type: none"> <li>Caudales máximos</li> <li>Caudal de desborde (<i>bankfull</i>)</li> <li>Caudal de inundación media anual</li> </ul> Nota: es recomendable medir el caudal base (Q <sub>b</sub> ) para entender potenciales cambios de acuerdo con las intervenciones.
		<b>Coefficiente de escorrentía (R<sub>c</sub>).</b> Permite relacionar el volumen total de agua que atraviesa un cauce durante un año con el volumen total de la precipitación que ingresa a la cuenca en el mismo periodo. <p>Precipitación anual acumulada [mm] Caudal anual acumulado [mm]</p>
	Régimen sedimentario fluvial	<b>Sedimentos.</b> Disponibilidad de sedimento en cuenca. <ul style="list-style-type: none"> <li>Tipo y distribución de los sedimentos transportados, estimación de concentraciones de sedimentos transportados, caudal sólido de sedimento transportado en suspensión y fondo (o total) Q<sub>s</sub>, tasas de erosión y deposición durante una inundación.</li> <li>C<sub>w</sub> concentración de carga de lavado</li> <li>C<sub>ss</sub> concentración de sedimento suspendido</li> <li>Q<sub>s</sub> transporte total de sedimento</li> <li>Q<sub>w</sub> carga de lavado</li> <li>Q<sub>ss</sub> transporte en suspensión</li> <li>Q<sub>b</sub> transporte por fondo</li> <li>Diámetro medio D<sub>50</sub> y característicos D<sub>16</sub> y D<sub>84</sub>, distribución granulométrica y desvío del material de fondo y en suspensión.</li> </ul>
	Morfología	<b>Modelo digital de terreno (MDT).</b> Fondo de los cauces y planicie aluvial.

Proceso	Variables
Erosión superficial o de suelos y formación de cárcavas	<b>Geometría.</b> Ancho, largo, profundidad, densidad de drenaje, pendientes y morfología de las pendientes. <b>Factores.</b> Factor de erosión por lluvias (R), factor de erodabilidad del sedimento (K) y factor de gestión de cultivos (C).
Movimientos de masa: deslizamientos	<b>Factor de seguridad.</b> F = Resistencia del material a romperse o desplazarse / Fuerzas que promueven el esfuerzo. <b>Morfología.</b> Zonas de deslizamientos y producción sedimentaria.
Movimientos de masa: flujo de escombros	<b>Morfología.</b> Zonas de erosión y deposición. Caracterización geomorfológica del flujo de escombros. <b>Flujo.</b> Profundidad máxima, evolución de la profundidad, velocidad promedio, velocidades superficiales, esfuerzos normales y cortantes, presión de poros, fuerza de impacto. <b>Sedimentos.</b> Distribución espacial y temporal de la producción y transporte de sedimentos.

### 2.1. Inundaciones pluviales y fluviales

Diferentes procesos son los encargados de modificar la dinámica de equilibrio en una cuenca. Uno de ellos se produce debido a la acción de eventos normales a extraordinarios de precipitaciones, los cuales actúan inundando regiones bajas de la cuenca. Normalmente estas inundaciones se producen porque el suelo alcanza su límite máximo de infiltración y, por ende, son anegados. Las inundaciones son responsables de los desastres e impactan directamente en la vida diaria de los sectores urbanizados. Entonces, el principal parámetro modelador de este tipo de eventos son las precipitaciones, las cuales deben ser evaluadas en intensidad y duración. Además, se destaca que conocer el régimen hidrológico y sedimentológico de los sistemas fluviales permite contar con un conocimiento general de la capacidad de transportar caudal líquido y sólido. Parámetros de uso de suelo, cobertura vegetal, índices de urbanización, infraestructuras grises, entre otros, son indicadores adicionales de relevancia para el buen manejo de una cuenca, en particular durante un evento extremo.

#### Procesos y mecanismos formativos

El proceso de inundación se puede dar por un fenómeno de inundación pluvial, dado por el anegamiento de un gran volumen de precipitación en una región en particular.

Este volumen de agua, dependiendo de la toponimia de la cuenca, puede almacenarse o transportarse a través de los cursos naturales presentes en la misma. De esto último se desprende el concepto de inundaciones fluviales, las cuales se producen cuando el cauce se ve excedido en su capacidad de transportar un volumen elevado de agua, por lo tanto, inunda las regiones aledañas al mismo. Este evento suele estar vinculado con la ocurrencia de precipitaciones extremas (de gran intensidad o de larga duración), que elevan el volumen de caudal líquido a ser transportado, en comparación con el régimen normal del sistema. Como el cauce presenta una limitación morfológica, este mismo derrama el exceso de volumen que no puede transportar.

En ríos de montaña, las inundaciones también pueden suceder cuando estos se encuentran temporalmente represados, por un movimiento de masa, que tiempo después se rompe, generando una inundación rápida y catastrófica aguas abajo. Aunque la principal causa de las inundaciones son las intensas precipitaciones, su efecto puede ser exacerbado por un mal manejo de la cuenca, en algunas ocasiones favorecido por los cambios en el uso de la tierra y la cobertura vegetal original, obras de ingeniería mal diseñadas y la ocupación humana mal planificada o invasión urbana en áreas de riesgo.

### Zonificación

Diferentes procesos se desarrollan a lo largo de una cuenca asociados directa o indirectamente a su localización y, en este sentido, la zonificación puede permitirnos diferenciarlos. La condición hidrológica de una cuenca no es el único parámetro determinante para un buen manejo, también conocer las condiciones naturales locales permiten abordar la problemática de manera integral. Es así como se da lugar a la necesidad de una caracterización detallada en zonas o cuencas de estudio. Es decir, la posibilidad de distinguir el comportamiento sectorizado, de manera de poder contar con una descripción detallada, entre otras cosas, los balances hídricos locales que se producen en cada uno de ellos (tiempos de concentración, recurrencia y demás). A su vez, conocer sus limitantes relacionadas a capacidad de absorción, cobertura vegetal y otras variables. Todo esto permite contar con una mayor y un mejor entendimiento del equilibrio dinámico de una cuenca.

### Métodos de medición para monitorear inundaciones

Existen múltiples formas de monitorear zonas inundables en tiempo próximo al real a través del uso individual o combinado de productos de sensores remotos. Por ejemplo, el Dartmouth Flood Observatory compila, procesa y ofrece imágenes y metadatos de inundaciones en escala global derivados de productos satelitales de múltiples agencias internacionales (<http://floodobservatory.colorado.edu/>). Métodos aplicando índices de detección de agua o indicadores de humedad en el terreno son la principal fuente. Por ejemplo, en China, Chao et al. (2019) sintetiza la precisión del monitoreo de áreas inundables donde se utilizaron los índices NDWI (*Normalized differential Water Index - NDWI*, Mcfeeters, 1996), MNDWI (NDWI mejorado; Xu, 2006), AWEI (*Automated water extraction index*, Feyisa et al. 2014) y SAR (*Synthetic aperture radar*; Leng and Li, 2017) e información de satélite y radar a diferentes resoluciones (de 8 m a 248 m). Además de la identificación de áreas inundables, existen métodos directos de medición de flujos de agua en sistemas fluviales. A continuación, la Tabla 3 presenta las variables necesarias para caracterizar las inundaciones.

**Tabla 3.** Resumen de variables para caracterizar las inundaciones

Variable	Equipos
Precipitaciones	Estación pluviométrica con recolectores Radares y radares terrestres Imágenes satelitales
Niveles	Regla limnimétrica y otros sistemas Medidor de cresta o máximo Equipos no intrusivos (ópticos, radar, entre otros)
Caudal líquido	Vertedero de pared delgada Correntómetros. Perfiladores de corriente acústicos, electromagnéticos y ópticos
Relieve y topografía	Inclinómetros Extensómetros Tiltómetros Piezómetros Instalación de marcadores y estacas Mediciones eléctricas GPS diferencial Hitos topográficos Imágenes satelitales Vehículo aéreo no tripulado (drone)

### Métodos de mediciones instrumentales en cursos de agua

#### Niveles de agua

Existen numerosos instrumentos disponibles para observar, detectar, grabar y transmitir datos de los niveles de la superficie libre del agua sobre un curso fluvial o planicie de inundación. Dicha instrumentación va desde la simple visualización de una regla limnimétrica hasta los más sofisticados sensores de nivel, equipos de muestreo electrónico y sistemas de telemetría, como los DCP satelitales, entre otros (WMO n.º 168, 2008). De la misma manera que con la precipitación, es posible encontrar estaciones con almacenamiento o no de datos, siendo las primeras las de mayor costo.

El equipo básico es la regla limnimétrica (Figura 19), que se instala referenciada para realizar la lectura periódica sobre la misma de los niveles del cauce (cota o altura h). El propósito de estas estaciones es estimar el caudal líquido que atraviesan por las mismas y, para ello, existe una gran variedad de métodos. El más utilizado es la correlación de aforos de caudal líquidos con las lecturas de altura realizadas. Para ello es posible llevar a cabo una correlación gráfica mediante el ajuste matemático de una curva altura/caudal. Queda claro que dicha curva debe cubrir la mayor variabilidad hidrológica, por lo que es necesario no solo realizar mediciones en condiciones medias, también durante eventos extremos y de sequías; mínimamente entre 12 y 14, recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization - WMO*).

**Figura 19.** Reglas limnimétricas colocadas en una estación de medición de superficie de agua sobre la región de Pucallpa



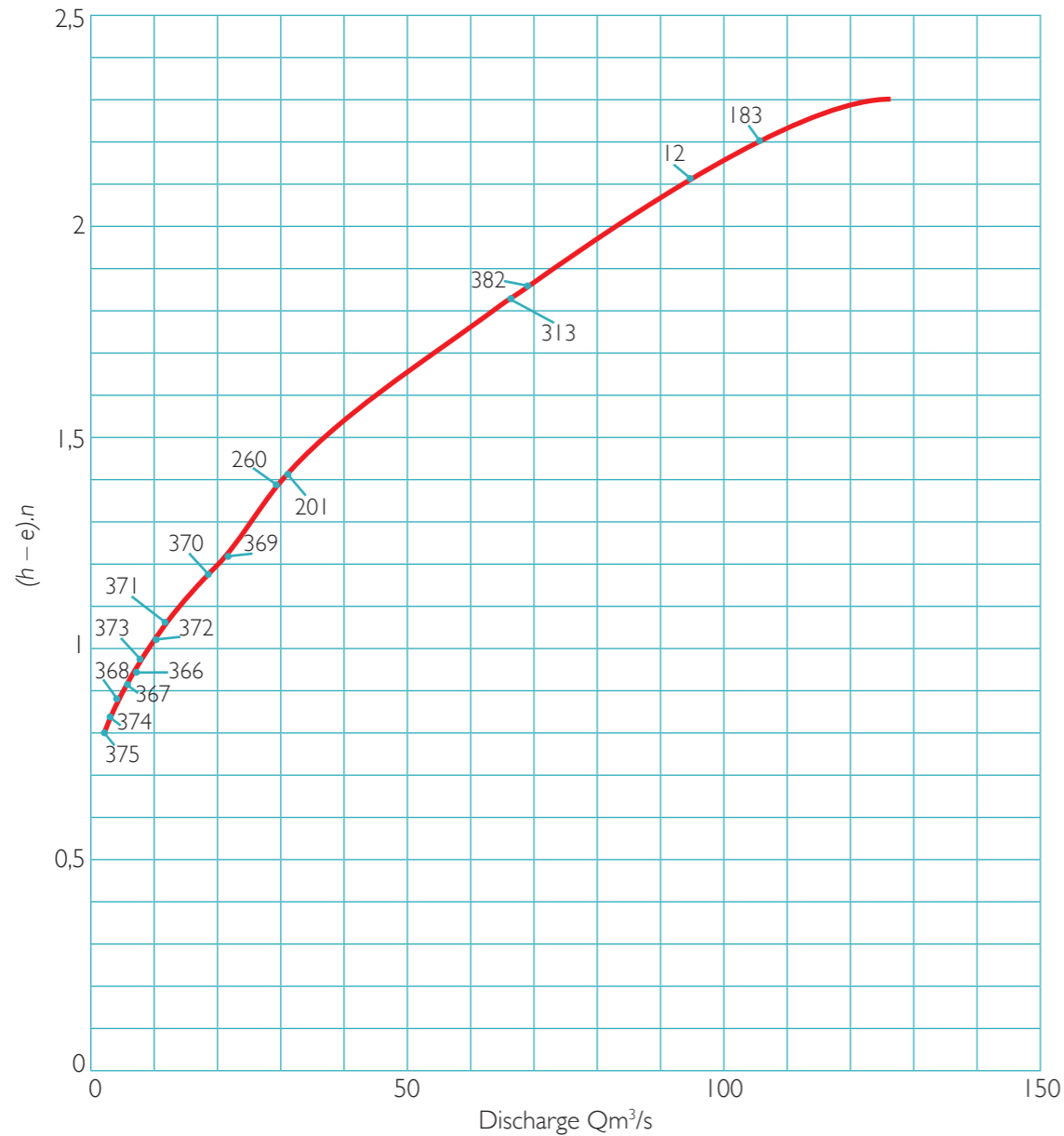
Fuente: Diagnóstico de Navegabilidad del Río Ucayali Pucallpa-Atalaya

Para más información de los pasos seguidos en las recomendaciones respecto de la localización de reglas limnimétricas, como la construcción de la curva altura/caudal, se recomienda

la lectura de WMO n.º 1044 vol. II (2010). Una vez definida la curva es posible transformar las lecturas de niveles a caudal líquido. La Figura 20 muestra un ejemplo de curva de ajuste.



**Figura 20.** Ajuste matemático de  $h$  vs  $Q$



Fuente: WMO (2010)

Además de las mediciones directas de una regla limnimétrica por medio de un observador, existen sensores que permiten obtener y almacenar los datos de variabilidad de cota ( $h$ ). Existen cinco (5) categorías básicas de sensores: (a)

sensores accionados por flotador; (b) medidor de burbujas con transductor de presión no sumergible, (c) sensor de presión sumergible, (d) sensores sumergibles de ultrasonido y (e) sensores de niveles ópticos. Esta última tecnología

permite una determinación de niveles de alta resolución temporal aun en variaciones muy reducidas (Figura 21). Es por lo que se implanta en regiones donde se producen cambios relevantes de niveles en corta duración temporal; es necesario contar con una gran exactitud del evento (inundaciones, zonas influenciadas por marea y viento). Actualmente, su uso es masificado dada el mayor número de equipos con resoluciones milimétricas y de variada amplitud en la captura de datos, como también el de más fácil acceso en el mercado (Paul *et al.*, 2020).

Queda claro que las mediciones con regla limnimétricas dependen de la correcta lectura del observador, mientras estas últimas estaciones son completamente automatizadas. Su registro puede ser de alta resolución temporal, mientras que los registros manuales suelen ser diarios. Estas diferencias son relevantes cuando se quiere cuantificar un evento de crecida, aunque impactan directamente en los costos desde la implantación de los equipos, la transferencia de datos y el mantenimiento de estos.

**Figura 21.** Estación de medición con equipamiento láser

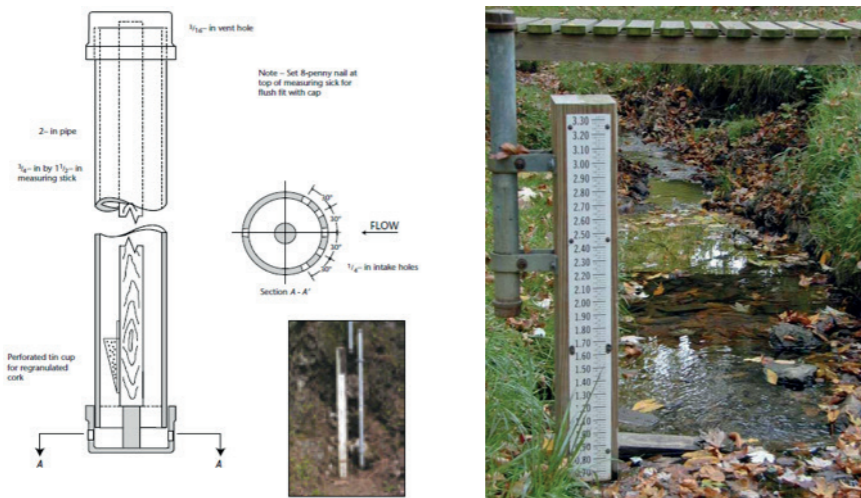


Fuente: <http://www.xylem-analytics.com.au/>

Los medidores de cresta son estaciones simples y económicas fácilmente instalables para obtener el máximo nivel de una crecida (Figura 22 y Figura 23). El medidor de cresta de mayor uso es el que cuenta con una pieza vertical de tubo galvanizado de 2 pulgadas, que contiene una vara de madera o aluminio en una posición fija que se encuentra correlacionada con el datum. La tapa inferior tiene seis (6) orificios de entrada ubicados alrededor de la circunferencia, cinco (5) de ellos orientados hacia aguas arriba y uno (1) hacia aguas abajo. Esta disposición permite medir niveles aún con velocidades de hasta 3 m/s. Para más información ver: Friday (1965) y Carter y Gamble (1963).

La tapa inferior o taza de estaño perforada o cobre cribado en forma de copa unido al extremo inferior de la vara contiene corcho granulado. Cuando el agua sube dentro de la tubería el corcho flota en su superficie. Cuando el agua alcanza su punto máximo y comienza a retroceder el corcho se adhiere al bastón dentro de la tubería, por lo que conserva la cresta de la inundación. La altura del pico se determina entre el punto de referencia y el máximo que se encuentra una vez que el corcho asciende y se mantiene fijo.

**Figura 22.** Estación de medición de niveles de crecida. Izquierda: esquema de estación, derecha: ejemplo de instalación en campo



Fuente: WMO N° 168 (2008) y Froehlich & Dhawan (2017)

**Figura 23.** Marca de crecida máxima alcanzada mediante el uso de la estación de cresta



Fuente: USGS

### Estimaciones de caudales líquidos

Dado que los cauces concentran gran parte del volumen de agua precipitada, son los elementos del ambiente natural a los cuales se les debe realizar un seguimiento. Sobre los mismos es posible calcular el volumen de agua que atraviesa, la cual llamamos caudal líquido ( $Q$ ). El caudal líquido se define como la tasa de volúmenes de flujo sobre un cauce. Usualmente el caudal es expresado en  $m^3/s$ . Dado que es complejo definir el caudal directamente, se estiman otras variables que permiten inferir en el mismo, como ancho, profundidad o velocidad del flujo. Es así como el término de medición de caudales suele aplicarse al resultado final del cálculo (WMO n.º 10044, 2010). La definición de caudal puede ser alcanzada con una simple relación entre altura y caudal o en función de otras variables, como pendiente, variación de la altura, entre otros. Las mediciones de caudal suelen realizarse de manera periódica, usualmente en intervalos mensuales o en eventos extremos o sequías (WMO n.º 1044, 2010).

Existe un gran número de equipos y métodos para la cuantificación de caudales. Desde los más simples, como estructuras fijas y correntómetros, hasta los más complejos, como los equipos acústicos. Un correntómetro es un instrumento de precisión calibrado para medir la velocidad de un curso. Existe un gran número de este tipo de instrumental disponible para su uso, incluyendo aquellos de funcionamiento mecánico, electromagnético, acústico y óptico (Figura 24).

El principio de operación de los instrumentos mecánicos es la rotación de un elemento, que se encuentra calibrada para traducir este movimiento en velocidad del flujo. La operación, construcción, calibración y mantenimiento de dicho instrumental se encuentran perfectamente indicados en la norma ISO 2537.

**Figura 24.** Correntómetro Price AA



Fuente: Froehlich y Dhawan (2017)

Por otra parte, un correntómetro electromagnético se basa en el principio de conducción del agua, es decir, movimiento a través de un campo magnético que produce una corriente eléctrica proporcional a la velocidad del flujo. El diseño, selección y uso de un correntómetro se encuentra disponible en ISO 15768 (2000). Las ventajas que ofrecen

estos equipos se encuentran que no tienen partes en movimiento, la lectura directa de la velocidad y la posibilidad de medir velocidades bajas menores a la de los correntómetros clásicos. Dos correntómetros muy utilizados son el Marsh-McBirney 2000 por el USGS y el OTT por la comunidad europea (Figura 25).

**Figura 25.** OTT correntómetro electromagnético



Fuente: <https://www.ott.com/applications/flow-discharge-4/>

Existen correntómetros acústicos conocidos como velocímetros acústicos Doppler (ADV). Estos equipos miden el cambio de frecuencia de una onda de sonido, la cual varía con la velocidad de la fuente y la observada. Esto es conocido como efecto *doppler*. Actualmente, este instrumento se encuentra fuerte-

mente aplicado a diferentes áreas de estudio. La captura de la emisión de una onda de sonido conocida, que es interceptada por las partículas que viajan en el flujo, determina la velocidad de este y, mediante la estimación de la profundidad, puede determinar los caudales (WMO n.º 1044, 2010).

**Figura 26.** Velocímetro acústico Doppler (ADV), modelo FlowTracker 2

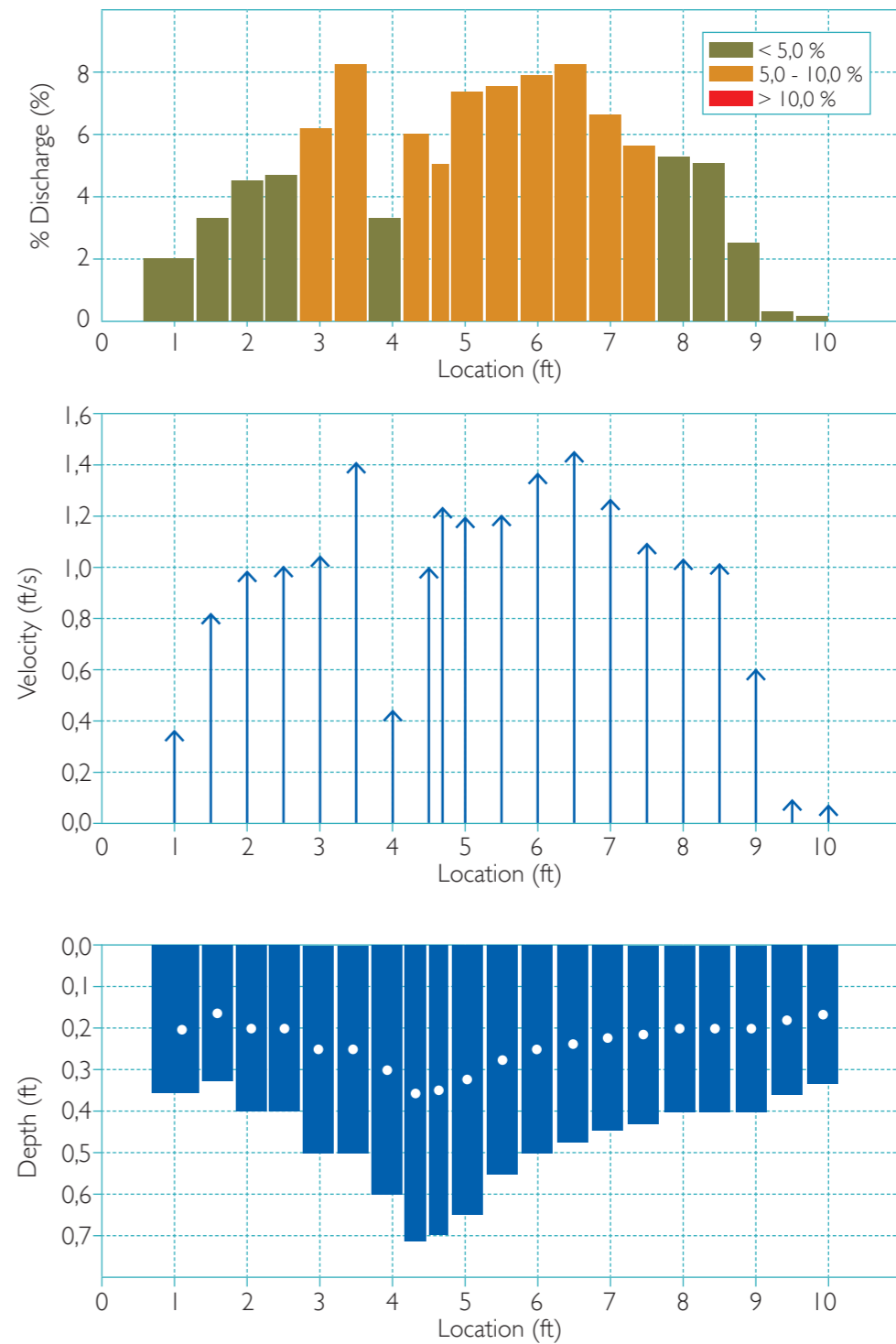


Fuente: <https://www.sontek.com/flowtracker2>

Los ADVs son equipos más costosos que los correntómetros, aunque con mayor resolución temporal, practicidad y precisión. Entre las principales ventajas destacan que tampoco cuentan con partes que se mueven, perturban mínimamente el flujo, las velocidades de medición pueden ser muy bajas cercanas a 0,0015 m/s y la profundidad mínima de operación ronda los 3 cm. Los ADV son manufacturados por diferentes empresas, incluyendo Sontek

y Nortek Corporations. Existen de diferentes frecuencias y su selección depende de las características del cauce en estudio. El Flowtracker (Figura 26 y Figura 27) está diseñado para medir caudal usando las mismas metodologías empleadas para los correntómetros que brevemente se citan a continuación. Buenas prácticas de aplicación pueden ser encontradas en el portal web del USGS (Simpson & Oltman, 1990).

**Figura 27.** Resultados alcanzados mediante el uso de FlowTracker

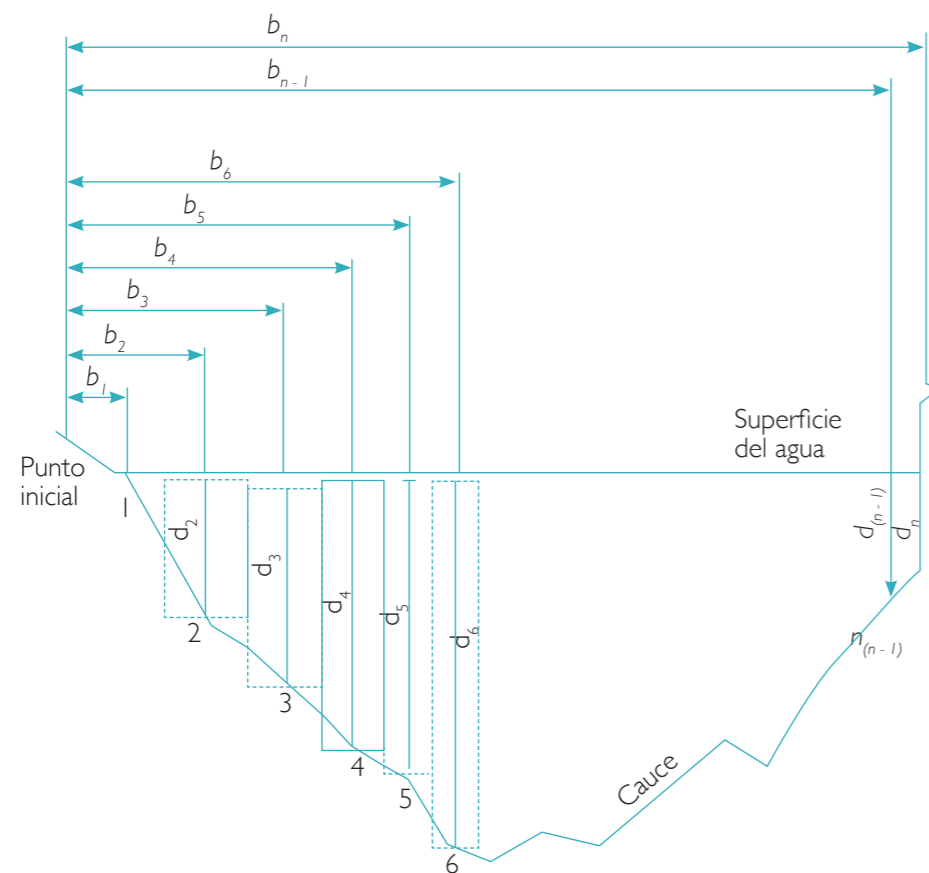


Fuente: USGS

El método comúnmente aplicado para la determinación de caudales mediante la implementación de los equipos indicados previamente es a través del cálculo de velocidades y estimación de áreas. Este método consiste en la selección de verticales sobre la sección de control. Sobre estas verticales se miden las velocidades en diferentes alturas de manera de representar el perfil de velocidad y capturar de la mejor manera la velocidad media junto a la profundidad

(Ver WMO n.º 1044, 2010). Es importante destacar que existen diferentes métodos para la representación del perfil de velocidades (1 punto, 2 puntos, 3 puntos y 4 puntos en la vertical). Para la selección de las verticales a medir existen dos criterios básicos, el de sección media (*midsection*, Figura 27) y el criterio del promedio de sección (*mean-section method*). Existen otros métodos (Figura 28), como los gráficos y el plano horizontal descrito en ISO 748 (2007).

**Figura 28.** Esquema de muestreo basado en el método de sección media. Siendo 1, 2 y 3 las verticales de medición, b1, b2 y b3 la distancia de la margen y d1, d2 y d3 profundidades en las verticales de medición



Fuente: WMO N° 1044 (2010)

Conociendo la vertical de medición se puede llevar a cabo la misma con el instrumental anteriormente indicado. Una vez capturado el parámetro de velocidad, o en el caso de

los ADV mientras se realiza la medición, se puede estimar el caudal implementando la siguiente ecuación:

$$Q = \sum_{i=1}^n a_i v_i$$

Siendo  $Q$  el caudal líquido total en ( $m^3/s$ ),  $a_i$  área de la sección transversal de los  $n$  segmentos y  $v_i$  la velocidad capturada por el correntómetro ( $m/s$ ).

**Figura 29.** Medición mediante vadeo sobre la sección transversal de control



Fuente: Tunispeed & Sauer (2010)

Existen otros instrumentos acústicos, como los perfiladores de corriente Doppler acústico (*Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP*), los cuales utilizan el principio acústico de los ADV. Estos son equipos que miden la velocidad del flujo y estiman el caudal líquido que atraviesa una sección de control. La principal diferencia con los ADVs es que, mien-

tras estos últimos pueden medir sobre un volumen de control reducido, los ADCPs capturan la velocidad sobre toda una vertical. Su uso masificado es acoplado a un bote orientado en sentido vertical, que al moverse barre la sección de estudio y puede capturar la velocidad sobre toda esta (Figura 29).

**Figura 30.** Dos (2) perfiladores de corriente acústica Doppler ampliamente usados. RD Instruments Rio Grande (izquierda) y SonTek S5 (derecha)

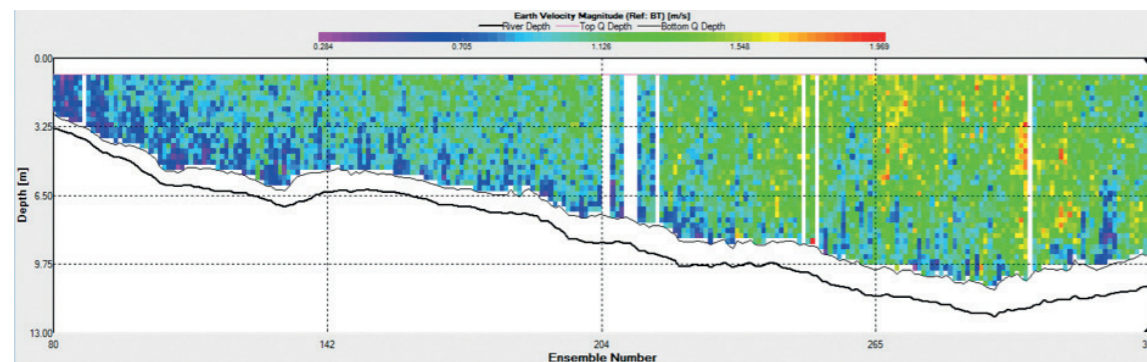


Fuente: USGS, Mueller et al. (2013)

Otro método de medición es a través del uso de estaciones cable carril o en estructuras fijas como puentes. Además, se están implementando ADCPs orientados de manera horizontal y de toma continua de datos. Este tipo de instrumento alcanza una alta resolución no solo espacial, sino temporal de los cambios de velocidades

(y, por ende, caudal) que se desarrollen sobre un cauce (Figura 31). Existen diferentes tipos de ADCPs, la selección del más apropiado depende directamente de las características geométricas-hidráulicas del área en estudio, como de la resolución espacio/temporal que se requiera.

**Figura 31.** Mapa de velocidades medidas sobre un transecto con equipos ADCP río Grande

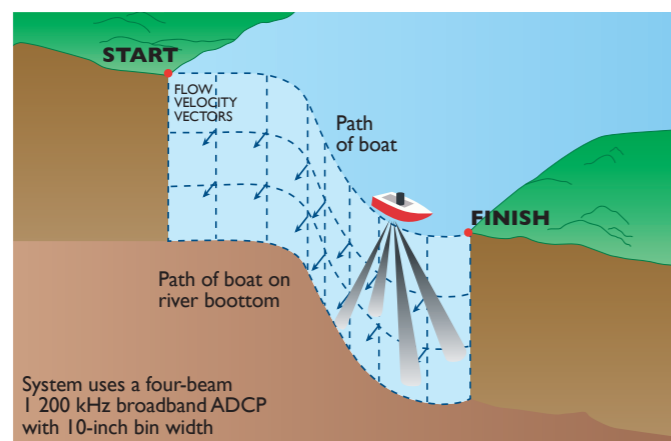


Fuente: Imagen extraída del software Winriver II

Para más información de recomendaciones para la puesta en marcha de mediciones con equipos ADCP en movimiento (selección de sección transversal, número de transectos, entre otros (Figura 32), se recomienda la lectura

de las buenas prácticas recopiladas por el USGS (Mueller et al., 2013). Cabe resaltar que los equipos acústicos son más costosos que los correntómetros.

**Figura 32.** Trayectoria típica de un bote de medición con ADCP

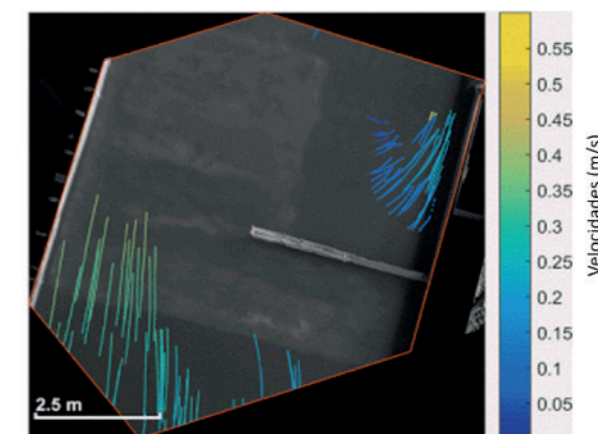


Fuente: USGS, Mueller et al. (2013)

Las técnicas más recientes, como estaciones fijas o mediciones con equipos Drone de tramos de cursos con métodos, como la velocimetría de grandes partículas por imágenes (LSPIV, Large Scale Particle Image Velocimetry) o por el seguimiento de partículas (Large Scale Particle Tracking Velocimetry - LSPTV), son herramientas de bajo costo y de gran desarrollo en las últimas décadas. La técnica se basa en la captura fotográfica que

permita la cuantificación del movimiento superficial del agua. Conociendo la forma de la sección transversal del curso, es posible determinar el caudal que atraviesa. Más información se puede encontrar en: <https://my.usgs.gov/confluence/display/SurfBoard/Surf+Board+Home> o en trabajos científicos como (Figura 32) (Patalano et al., 2017) y con aplicaciones ciudadanas: como: <https://www.cazadoresdecrecidas.unc.edu.ar/>.

**Figura 33.** Velocidades superficiales del flujo capturadas sobre un estribo mediante la técnica LSPIV



Fuente: Patalano et al (2017)

#### Estructuras fijas

La medición de caudal líquido a través de estructuras fijas, como vertederos de pared delgada, es una práctica habitual dado su bajo costo, fácil operación y mantenimiento (Figura 33). Si bien existe una serie de aforadores, hablaremos de aquellos de pared delgada, dejando en claro que existen otros como los de cresta ancha, canaleta Parshall y de onda estacionaria. Para más información se recomienda la lectura

de WMO n.º 1044 (2010). El caudal a través de estas estructuras es estimado indirectamente de la lectura de la altura de agua que sobrepasa el vertedero. Para esto, los vertederos son calibrados de manera para alcanzar la expresión que transforme altura en caudal. Este tipo de vertederos ofrecen resultados confiables aún para caudales bajos (WMO n.º 168, 2010). La expresión recomendada para el cálculo de caudales en este tipo de vertederos es la siguiente:

$$Q = 8/15 \sqrt{2g} C_D \tan \theta / 2h_c^{(5/2)}$$

Donde  $Q$  es el caudal líquido,  $C_D$  es el coeficiente de descarga (calibrado),  $\theta$  es el ángulo de vertedero,  $g$  la aceleración gravitatoria y  $h_c$  la altura de agua que sobrepasa el ver-

tedero. El coeficiente  $C_D$  varía desde 0,608 en  $h_c = 0,5$  m a 0,585 en 0,381 m para un ángulo de 90°.

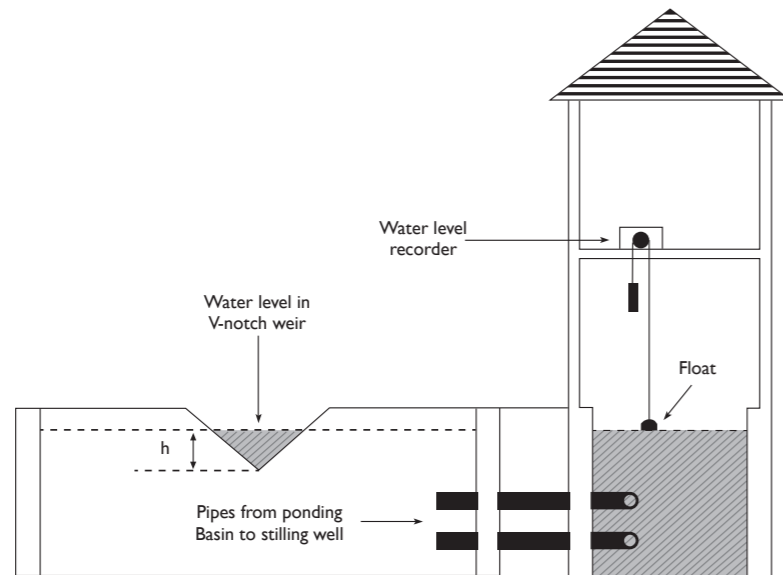
**Figura 34.** Vertedero triangular de pared delgada



Fuente: <https://www.openchannelflow.com/>

Normalmente, este tipo de vertedero se correlaciona a niveles y es habitual encontrar con casillas laterales de nivel, como se muestra en la Figura 35.

**Figura 35.** Estación de aforo de caudal líquido y niveles



Fuente: Brooks et al. (2013)

Otros vertederos de pared delgada implementados son los de sección rectangular; estos permiten la cuantificación de volúmenes mayores, aunque con una menor exactitud que

los previos. La ecuación que permite la medición del caudal que atraviesa los mismos es:

$$Q = C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} b h_c^{3/2}$$

Donde b es el ancho del vertedero.

*Régimen sedimentario fluvial*

De la misma manera que se definió el caudal líquido es posible indicar la cuantificación del volumen de sedimento que viaja en un curso fluvial. En este caso, denominamos caudal sólido (Qs). Normalmente sus unidades son kg/s. Queda claro que existen diferentes mecanismos de transporte de sedimento (por fondo, en suspensión y carga de lavado), actualmente es posible realizar una estimación, aunque la puesta en marcha de campañas que permitan una medición adecuada del sedimento (Edwards y Glysson, 1999; García et al., 2008a y b) (Figura 35), resulta normalmente muy costosa y en algunos casos imposibles (en grandes cauces). La posibilidad de realización se encuentra fuertemente correlacionada al tamaño de los cauces, al tipo de sedimento,

a la carga o volumen de sedimento esperado, condiciones geométricas y otros. El USGS se encuentra mejorando los métodos de estimación de transporte, pero de manera resumida consta en la captura de agua y sedimento para el caso de transporte en suspensión posterior a la separación del agua y determinación del peso del sedimento, que en ocasiones es fraccionado en material fino (carga de lavado < 0,063 mm) o grueso (> 0,063 mm) (Latosinski et al., 2014). Estos procesos se llevan a cabo en laboratorio, donde además se suele realizar la granulometría y descripción sedimentológica del material en suspensión. El transporte de material de fondo también puede ser capturado mediante muestreadores y su posterior caracterización en laboratorio. Aun así, hoy en día se están implementando nuevas técnicas, como el seguimiento de las partículas que se mueven cercanas al fondo (Bottom Tracking; Latosinski et al., 2017).

**Figura 36.** Captura de sedimentos en suspensión: muestreador de sedimentos en suspensión USGS



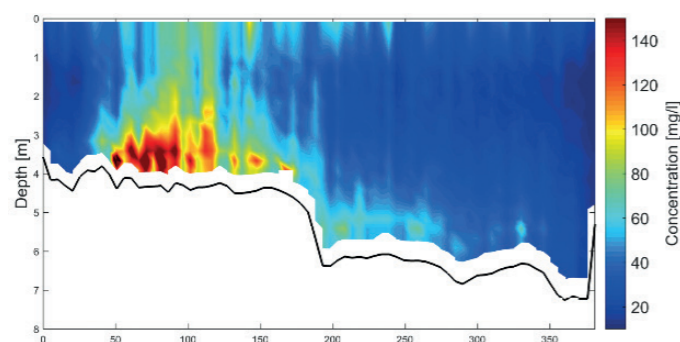
Fuente: <https://ca.water.usgs.gov/projects/baydelta/photos.html>

Normalmente, la selección de los equipos e instrumental adecuado se asocia al tipo de sedimento transportado. Un detalle de muchas experiencias se presenta en Edwards & Glysson (1999), IAEA (2005), García *et al.* (2008b) y Muste *et al.* (2017), entre otros.

Cabe resaltar que nuevas técnicas que involucran datos recopilados con equipos acústicos permiten la estimación tanto del transporte de sedimento suspendido (Szupiany *et al.*, 2019; Domínguez Ruben *et al.*, 2020; Figura 36) como tam-

bién del transporte de fondo (Latosinski *et al.*, 2017). Ambas tecnologías son aplicadas en grandes cauces, aunque recientemente se están desarrollando adaptaciones para cauces de menor jerarquía ([https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/sediment-acoustics?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/sediment-acoustics?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)). Esta tecnología acústica no solo permitiría capturar las concentraciones del sedimento transportado, sino que además las velocidades del flujo como se indicó previamente. Ambas variables permiten el cálculo del transporte de sedimento Qs.

**Figura 37.** Mapa de concentraciones de sedimento en suspensión



Fuente: Domínguez Ruben *et al.* (2020)

Por último, se destaca en recientes estudios (Pereira *et al.*, 2019; Tiara Sutari, 2019) el uso de las imágenes satelitales para la estimación del transporte de sedimentos en suspensión de manera cualitativa o cuantitativa. Para ello se utilizaron las imágenes satelitales (Landsat o Sentinel), que, mediante la calibración con datos de campo, se pueden inferir en tasas de transporte. Estos métodos necesitan de una buena base de datos en campo y de la correcta calibración de estos, y cada una de las calibraciones solo puede ser aplicada a su región de estudio.

### 2.2. Erosión superficial hídrica

El proceso de erosión superficial se debe a la acción de las precipitaciones que impactan sobre la superficie expuesta y genera el desprendimiento del material y posterior transporte y deposición. Si bien este proceso se puede producir debido a la acción eólica o hidráulica, nos centraremos en

esta última en el presente informe. En este sentido, existen diferentes procesos o acciones hídricas sobre una cuenca, desde la conformación laminar a surcos hasta la formación de cárcavas.

#### 2.2.1. Procesos y mecanismos formativos

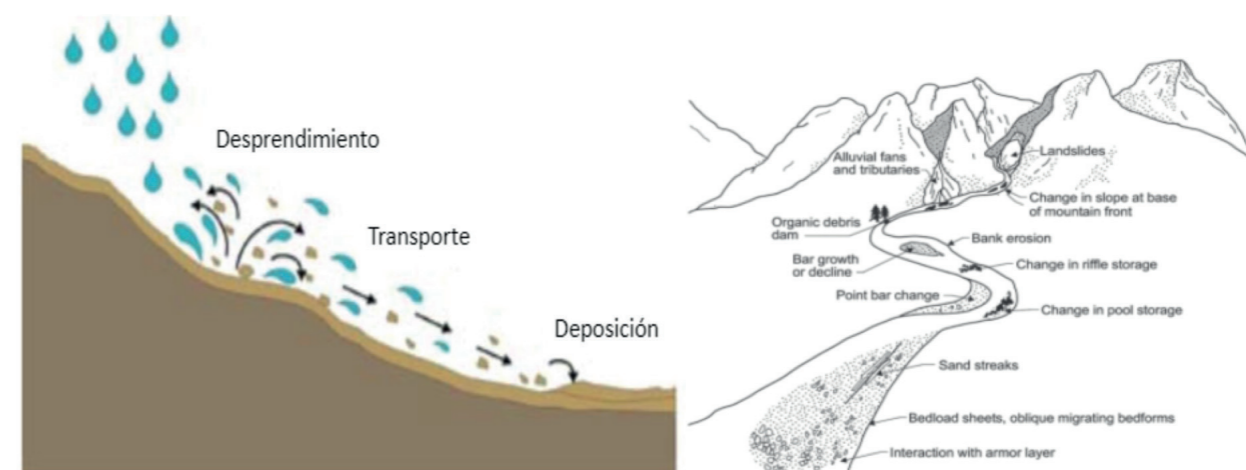
La acción del impacto sobre la superficie del suelo de las gotas de lluvia impacta en la estructura del suelo, usualmente se reduce la infiltración y, de este modo, aumenta la escorrentía superficial (Figura 37). Una vez generada la escorrentía superficial, la remoción del manto superficial del terreno (*sheet wash*) produce erosión de tipo laminar sobre la superficie. La tendencia natural del agua es concentrarse en canales autogenerados. Entonces, las primeras geoformas en aparecer son los surcos y, luego, pequeños-grandes cauces, con aumento de la velocidad en turbulencia y, por lo tanto, en capacidad de transportar sedimento en suspen-

sión y fondo. La intensidad de la turbulencia es producto de la profundidad, la velocidad, la pendiente y rugosidad de la superficie por la que el agua fluye. A medida que aumenta la energía cinética, también lo hace la capacidad del flujo para mover y transportar sedimentos de mayor tamaño (Brooks *et al.*, 2013). Este último fenómeno se desarrolla en cauces naturales, los cuales, dependiendo de su capacidad de transporte y del tipo y tamaño del sedimento, tendrán mayor o menor capacidad de transporte (en tamaño de las partículas, total transportado y distancia del transporte).

En regiones con altas pendientes despejadas y con lluvias intensas, la pérdida de suelo puede ser de volúmenes con-

siderables. Al aumentar la pendiente y longitud de esta, se acelera el flujo y, por ende, aumenta la pérdida de suelo por unidad de longitud, hasta alcanzar una tasa relativamente constante. Para un determinado caudal y tipo de suelo, la pérdida por erosión aumenta a medida que la inclinación de la superficie también se incrementa. En este sentido, tramos largos con elevadas pendientes permiten la concentración del flujo de agua y, por lo tanto, son factores importantes en la aceleración de la erosión y en incentivar la concentración de los flujos superficiales y generar canales de mayor porte. Así, al ganar el flujo y aumentar la capacidad erosiva, comienzan a generarse cárcavas, cuyo desarrollo es favorecido en zonas de poca cobertura vegetal.

**Figura 38.** Procesos de erosión hídrica



Arriba: UBC Wiki [http://wiki.ubc.ca/LFS:SoilWeb/Soil\\_Management/Soil\\_Erosion](http://wiki.ubc.ca/LFS:SoilWeb/Soil_Management/Soil_Erosion) y transporte de sedimento a través de un cauce fluvial. Abajo: García (2008b).

En resumen, se puede decir que la erosión superficial es controlada por el clima (duración e intensidad de precipitación), litología y características del regolito/manto de meteorización (que condicionan la capacidad de infiltración y la naturaleza de las partículas), topografía (inclinación y longitud de las pendientes), cobertura vegetal (tipo y densidad) y uso del suelo (suelo cubierto o descubierto, impermeabilización).

#### 2.2.2. Tipos de erosión hídrica: escalas hidrológicas y geomorfológicas

##### Laminar

La erosión laminar es un tipo de erosión hídrica que ocurre cuando una capa poco profunda de agua erosiona la capa superficial del suelo (Figura 38). Este proceso se inicia cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la infiltración y se forma un flujo hortoniano. A medida que el flujo superficial

se profundiza, su poder erosivo aumenta tomando mayor relevancia en los procesos de erosión en las pendientes. Conforme la tensión cizallante aumenta a lo largo de la pendiente y supera la tensión de resistencia del suelo, se produce la erosión. La erosión del flujo hortoniano depende, además de la inclinación y longitud del tramo y de su morfología. Además, la pendiente de morfologías convexas tiende a pro-

ducir flujos divergentes y difusos, mientras que las vertientes cóncavas producen flujos concentrados de alta erosividad y pueden generar las primeras formas de tipo acanalado (pequeñas erosiones y surcos). En pendientes mixtas cóncava/convexas, el inicio de la formación de formas erosivas acanaladas se da en el punto de inflexión de perfil donde ocurre la transición de la ladera cóncava/convexa.

**Figura 39.** Fotografía ilustrativa de erosión laminar superficial en el distrito de Huancaya, cuenca Cañete



Fuente propia

**Surcos y ravinatas**

La formación de surcos se inicia cuando la concentración del flujo erosivo forma pequeños canales incipientes llamados surcos y ravinatas (Figura 40), que pueden tener algunos centímetros de profundidad y ancho. Es común en-

contrarlos en laderas, colinas o montañas y se desarrollan particularmente en suelos fácilmente erosivos, sedimentos friables, rocas sedimentarias de granulometría fina y poca consolidación, o saprolitos de rocas altamente meteorizadas químicamente.

**Figura 40.** Fotografía ilustrativa de erosión en surcos y ravinatas



Fuente propia

**Cárcavas**

A medida que se jerarquiza la erosión hídrica se conforman canales llamados cárcavas, que pueden variar desde algunos decímetros de profundidad y ancho hasta más de 100 m

de ancho y 20 m de profundidad. Las pendientes convexas favorecen el desarrollo de cabeceras de cuencas y la formación de cárcavas (Figura 41).

**Figura 41.** Fotografía ilustrativa de erosión en cárcavas en la cuenca media del río Cañete

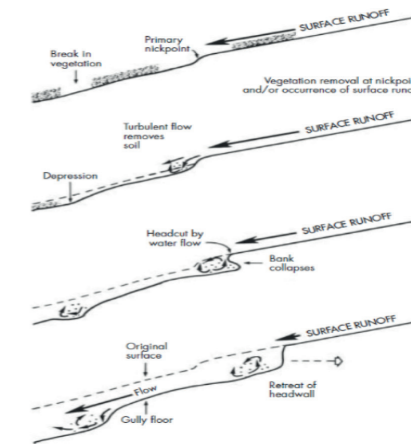


Fuente propia

Como se mencionó con anterioridad al definir erosión hídrica superficial, el proceso de construcción de una cárcava típicamente se produce cuando la escorrentía se concentra sobre un punto de quiebre en la pendiente (Figura 42), el cual genera una diferencia en la tasa de erosión aguas arriba y abajo de este. Esto resulta en un cambio de la litología del

canal. El proceso continúa hasta que se produce la caída del frente del salto y se desarrolla una erosión retrógrada hacia aguas arriba. Este proceso suele continuar hasta que alcanza un equilibrio producto del balance entre el sedimento aportado (o provisto por la cuenca) y el sedimento desplazado.

**Figura 42.** Formación de cárcavas y erosión retrógrada en el tiempo



Extraído de Heede (1967) y Harvey et al. (1985)



2.2.3. Métodos de medición de erosión superficial  
El proceso de erosión superficial se debe a la acción de las precipitaciones que impactan sobre la superficie expuesta y genera el desprendimiento del material y posterior transporte y deposición. Existen diferentes procesos o acciones hídricas sobre una cuenca, desde la conformación de erosión laminar a surcos hasta la formación de cárcavas.

Los procesos de erosión superficial del suelo normalmente son evaluados bajo diferentes métodos y resoluciones (particularmente espaciales). Aún así, es posible indicar algunos métodos ampliamente usados que permiten la construcción de una línea base. Normalmente, para regiones reducidas, las erosiones superficiales son medidas usando parcelas de estudio y evaluando el sedimento que es transportado por las mismas, estacas de medición o tareas de campo y descripción de los procesos. En el caso de grandes extensiones de medición se suele realizar mediciones repetidas

en yacimientos sobre un transecto o a través de trazadores (Morgan, 1995) o el uso de fotogrametría o relevamiento con drones (Guan et al., 2021). El objetivo en todos los enfoques metodológicos es medir cuánto sedimento se ha desplazado; para ello a continuación se presenta un resumen de estos métodos.

#### Caracterización del paisaje natural

Este último método es similar a los previos, aunque usando elementos naturales implantados fijos en el medio del estudio. Estas pueden ser regiones con pedestales, donde es posible medir periódicamente la acción erosiva y que no modifique el objeto de referencia. Elementos naturales útiles para llevar a cabo este método son las raíces de los árboles o la colocación de una estaca en el tronco del árbol de manera de medir la superficie del suelo respecto a este nivel de referencia. El equipamiento básico normalmente consiste en equipo fotográfico cámaras o drones (Figura 44).

**Figura 44.** Equipos fotográficos y drone para el relevamiento en campo y caracterización topográfica



Fuente: Páginas web de Canon y DJI

#### Estacas de erosión

El uso de estacas o pines insertados en el suelo puede ser una alternativa para conocer la erosión y deposición de sedimentos. Este sistema consta de una barra de metal que se inserta en el suelo, la cual en ocasiones se encuentra graduada y permite la lectura de las distancias desde la parte superior hasta el punto de contacto de esta con el suelo

(Figura 45). Las estacas deben encontrarse correctamente ubicadas y referidas a un punto fijo de manera de poder modificar su ubicación si fuese necesario.

Este método es sencillo y económico, aunque resulta más difícil convertir las observaciones en pérdidas reales de suelo en toneladas por hectárea.

**Figura 45.** Demostración de la técnica de mediciones con altura de pines



Fuente: Hart et al. (2017)

#### Parcelas de muestreo de erosión

El método de muestreo de erosión superficial en parcelas es muy utilizado para cuantificar las tasas de erosión superficial. Consta en medir la cantidad de suelo que se erosiona de una parcela de control (Figura 46) la cual es delimitada. Para ello se coloca una estructura compuesta por conductos plásticos, metal o concreto, que se incorpora al sedimento superficial y captura el sedimento y agua dirigiéndose a tanques de almacenamiento. Las técnicas y objetivos

de la medición definen el tamaño de la parcela. Las parcelas pueden variar entre 1 a 2 m<sup>2</sup> en condiciones estándar.

Áreas de estudio más extensas permiten una mejor cuantificación, ya que representan de manera más realista el efecto de acumulación e incremento de escorrentía o velocidad. La dificultad de estas se basa en los volúmenes almacenados. Para este último caso es habitual separar sedimento y agua previo al almacenamiento.

**Figura 46.** Parcela de captura de agua y sedimento



Fuente: <http://www.desire-his.eu/images>

El uso reciente de la tecnología LiDAR para el mapeo de la superficie terrestre se encuentra en desarrollo. En particular la medición de erosión con esta tecnología se está masificando a nivel mundial. Un reciente estudio (Li et al., 2020) realiza una experiencia de simulación artificial de lluvias y mapeo continuo de la superficie con instru-

mental LiDAR (Figura 47 y Figura 48). El ensayo examina la posibilidad del uso de la tecnología LiDAR para la medición de erosión (en campo) de pequeñas parcelas con una alta resolución. Para ello se llevaron a cabo escaneo multitemporal usando seis (6) estaciones LiDAR en una parcela de 12 m<sup>2</sup>.

**Figura 47.** Simulador de precipitaciones, caja de sedimentos puntos fijos y estructuras de concreto (puntos de referencia fijos)

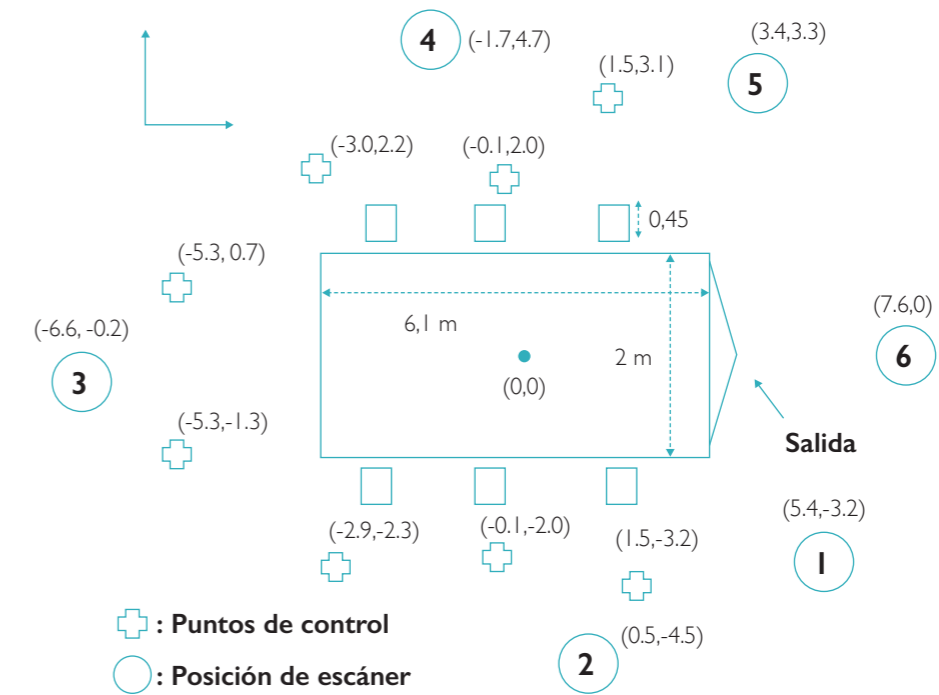


Fuente: Li et al. (2020)

La evaluación de la erosión se llevó a cabo mediante el mapeo de la superficie y la recolección de muestra de agua y sedimento (como realiza el método convencional de la parcela). Este volumen se comparaba con los resultados de cada uno del escáner. Los resultados arrojaron las siguientes conclusiones: la precisión del registro LiDAR se encontraba en el orden de 1 mm y de valores medios de 2,2 mm. Para evaluar la pendiente de la parcela de sedimento se

modificó la misma y se realizó otra serie de relevamientos. Se determinó que cuanto mayor era la pendiente, mayores errores se detectaban en la medición. Se determinó que la densidad del material, el número de escáner y dimensiones de la grilla de 10 mm fue apropiada para la escala medida. La conclusión más relevante del estudio es que es posible llevar a cabo este tipo de mediciones a las escalas de estudio (12 m<sup>2</sup>).

**Figura 48.** Localización de los seis (6) escáneres LiDAR en la estación de medición

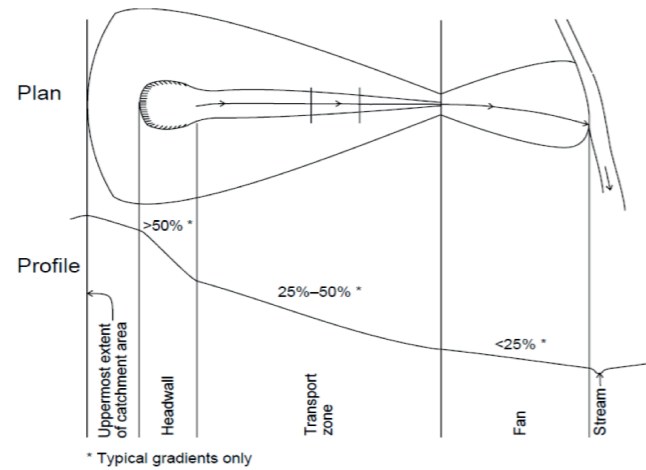


Fuente: Li et al. (2020)

Cabe destacar que existen otros métodos que permiten predecir el volumen de sedimento de una cuenca en particular, entre los que se encuentran: Ecuación Universal de pérdida de suelo (USLE, *Unified Soil Loss Equation*), el método USLE modificado (MUSLE, *Modified Unified Soil Loss Equation*) y el método USLE revisado (RUSLE, *Revised Unified Soil Loss Equation*). Todos estos métodos permiten la estimación de volúmenes de sedimento y para su aplicación involucra una serie de variables características de la zona de estudio.

Para el caso de las cárcavas, dada la extensión que desarrollan y la presencia de geometrías diversas, el mapeo e identificación de estas puede llevarse a cabo por lo menos de dos (2) maneras (Figura 49). La primera a través de las tareas de campo, que permite analizar una serie de cárcavas y, la otra, mediante el relevamiento aerofotográfico o el uso reciente de drones.

**Figura 49.** Esquema de parte de una cárcava

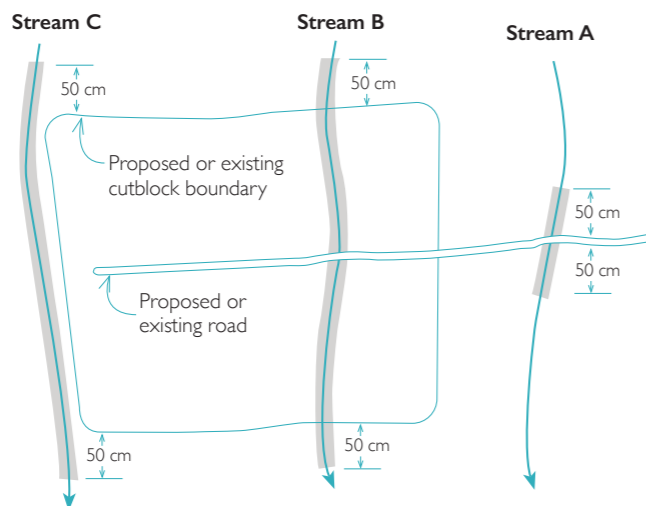


Fuente: British Columbia. Ministry of Forests. (2001)

El manual *Gully Assessment Procedure Guidebook* (British Columbia. Ministry of Forests, 2001) recomienda el seguimiento de todas las cárcavas independiente del tamaño. Las cárcavas deben ser relevadas sobre los cauces que fluyen sobre bloques de corte, cauces que fluyen

adyacentes a los bloques de corte o cauces que atraviesan carreteras. La evaluación de las cárcavas puede llegar a extenderse al menos 50 m aguas arriba y 50 m aguas abajo de todas las posibles zonas de falla o de interés (Figura 50).

**Figura 50.** Localización de posibles seguimientos de cárcavas



Fuente: British Columbia. Ministry of Forests (2001).

El seguimiento de cárcavas comienza con la recopilación de información mediante el llenado de formularios de campo, como el indicado en la Tabla 6. Cada una de las partes de la cárcava debe ser descrita. Las tareas de campo buscan además preguntarse la posibilidad de peligros potenciales. Esta evaluación de peligros permite seleccionar una estrategia de gestión adecuada. El objetivo de la tarea de campo es además

evaluar posibles áreas de afectación hacia aguas abajo de la cárcava o hacia aguas arriba determinado el posible alcance. La información puede plasmarse en mapas, fotografías aéreas e información adicional. La identificación de la cárcava o sistema de cárcavas debe estar correctamente definida dentro de la cuenca hidrográfica. Una opción es enumerar a los sistemas de cárcava. Se recomienda seguir el formato de la Tabla 4.

**Tabla 4.** Cuadro tipo de identificación de cárcavas

Cuenca:	Corte n.º:	Fecha (m/d/a):
Cárcava n.º:	Carretera n.º:	Grabado el:
Cauce n.º:	Distancia (inicio/fin): [en m]	Foto n.º:

Fuente: British Columbia. Ministry of Forests (2001)

Cabe recordar que cada abanico aluvial, zona de transporte de sedimento y cabecera debe tener una consistencia física y características de materiales similares. Las características físicas incluyen ancho de cauce, gradiente, grado de incisión del cauce y distancia a la cabecera. Las características del material incluyen tipo y distribución de sedimentos.

ta es considerada un impacto elevado. De otra manera es considerada moderada.

El impacto aguas abajo puede ser evaluado para entender los recursos posibles afectados debido a la acción erosiva de la cárcava (Tabla 5). Así, se pueden indicar los siguientes tipos de afección:

**Viviendas y grandes instalaciones de servicios.** El potencial impacto de flujos que se desarrollen debido al desprendimiento de material en sistemas de cárcavas se considera alto si la seguridad de cualquier desarrollo, como viviendas o instalaciones relevantes, están en riesgo. Por el contrario, el potencial riesgo se considera bajo, si no existen estructuras aguas abajo. Ejemplos de instalaciones relevantes son: carreteras, tuberías de gas, tomas de agua, o torres de líneas eléctricas.

**Conexión a una cuenca local.** Muchos sistemas de cárcavas pueden afectar la calidad del agua en comunidades cercanas. Si la cárcava afecta el recurso de manera direc-

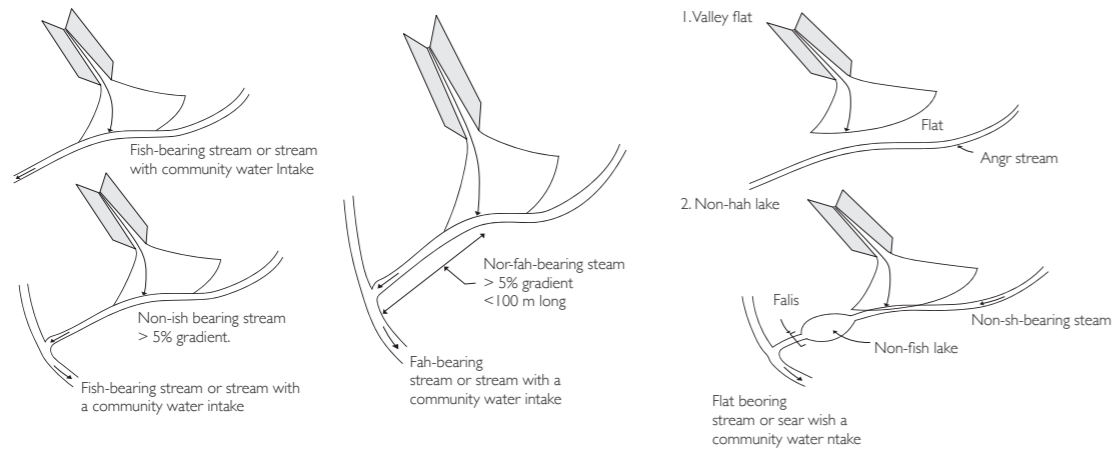
**Conexión con arroyos o lagos** que presentan actividad ictícola o zonas marinas sensibles.

**Tabla 5.** Impactos desarrollados por la presencia de cárcavas

Impacto hacia aguas abajo	Baja	Moderada	Alta
Conexión con comunidades aguas abajo	Ninguna	Indirecta	Directa
Conexión con estructuras, instalaciones relevantes	No	-	Sí
Conexión con cauces que cuentan con presencia de vida acuática	Ninguna	Indirecta	Directa

Cada uno de estos impactos puede ser directo, indirecto o sin conexión. Estos se presentan gráficamente en la Figura 51.

**Figura 51.** Esquemas de conexión directa (derecha), indirecta (centro) y nula (izquierda)

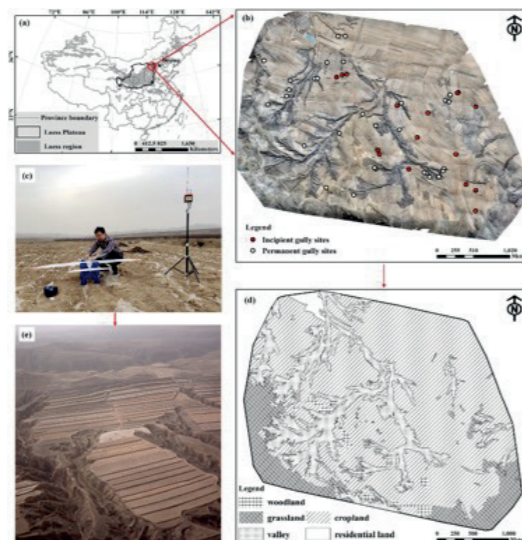


Fuente: British Columbia. Ministry of Forests (2001)

Recientemente, estudios hacen referencia a la posible implementación de métodos intermediados para el relevamiento de sistemas de cárcavas, es decir, entre el uso de fotografías aéreas y relevamiento en campo puntuales. Guan *et al.* (2021) proponen el uso de drones para la captura de características geométricas de sistemas de cárcavas, como también factores ambientales (Figura 52). El estudio per-

mite la identificación de las cárcavas permanentes en un área aproximada de 9,1 km<sup>2</sup>. Además, permite estimar las tasas de desplazamiento de las cárcavas, así como los cambios geométricos que sufren las mismas. El estudio destaca la facilidad que desarrolla el relevamiento con drones, que permite analizar una gran extensión areal con una alta resolución espacial.

**Figura 52.** Zona de estudio del reciente trabajo. Uso de drones para el relevamiento



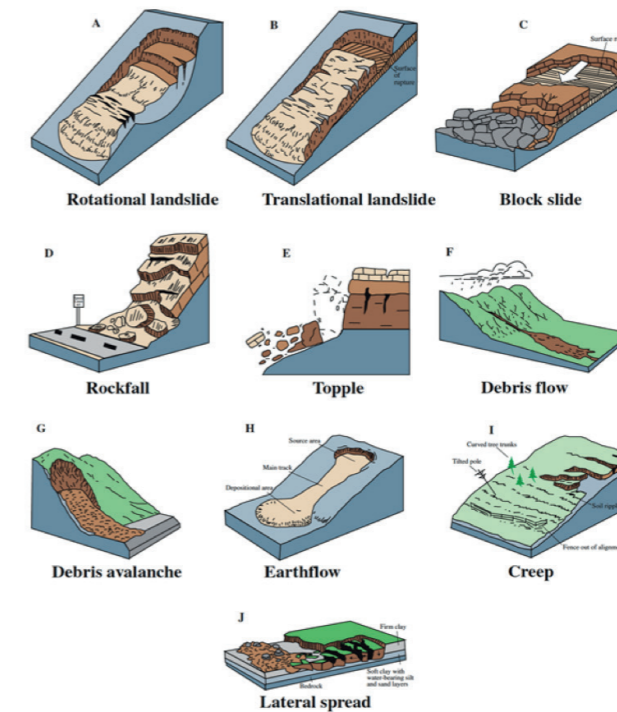
Fuente: Guan *et al.* (2021)

### 2.3. Movimientos de masa: deslizamientos

El movimiento de masa se produce debido al desplazamiento de un volumen finito de masa, de rocas, sedimentos o regolito (suelos y escombros), desencadenados por la acción de la fuerza de gravedad (Figura 53). Los movimientos de masa se desarrollan en zonas donde la pendiente promueve la movilización del material, cuando el compo-

nente gravitacional es mayor que las fuerzas de resistencia específica del material. La velocidad de estos movimientos puede variar desde muy lentos (cm/año) hasta muy rápidos (más de 100 km por hora). La masa de material involucrada también es altamente variable, pudiendo afectar desde algunos centímetros de regolito a grandes macizos rocosos y enormes volúmenes de detritos.

**Figura 53.** Esquema ilustrativo de los diferentes tipos de movimiento de masa



Extraído de Highland y Bobrowsky (2008)

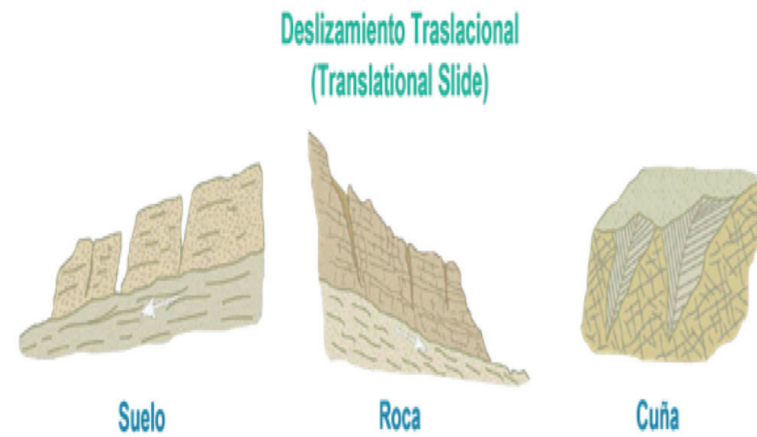
#### Deslizamiento tipo traslacional (*translational*)

Denominado también como deslizamiento planar, es un tipo de deslizamiento donde la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada, los movimientos suelen ser superficiales y, a lo largo de discontinuidades, como planos de fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo residual. En un macizo rocoso, está asociada a una discontinuidad geológica, con una dirección paralela a la de la cara del talud y buza

hacia esta con un ángulo mayor que el ángulo de fricción. La velocidad de los movimientos traslacionales puede variar desde rápida a extremadamente rápida.

El deslizamiento en cuña (*wedge slide*) es un tipo de movimiento donde el cuerpo del deslizamiento está delimitado por dos (2) planos de discontinuidad que se intersecan entre la cara de la ladera o talud, por lo que el cuerpo se desplaza bien siguiendo la dirección de la línea de intersección de ambos planos, o el buzamiento de uno de ellos.

**Figura 54.** Deslizamiento traslacional en suelo, roca y tipo cuña

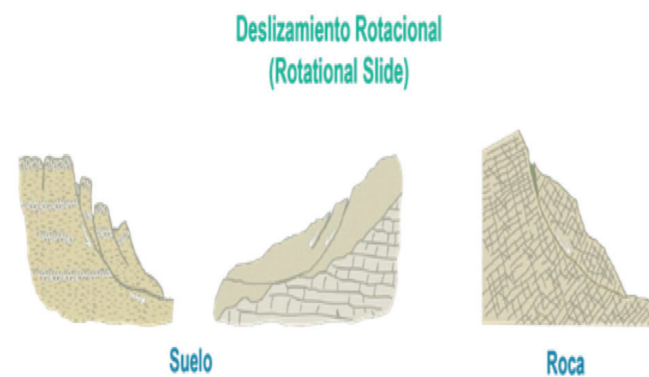


**Deslizamiento tipo rotacional (rotational)**

Es un tipo de deslizamiento donde la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava, muestra una morfología distintiva y caracterizada por un escarpe principal pronunciado y un contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal. La deformación interna de la masa desplazada

es usualmente muy poca. Debido a que el mecanismo rotacional es autoestabilizante, y este ocurre en rocas poco competentes, la tasa de movimiento es con frecuencia baja, excepto en presencia de materiales altamente frágiles, como las arcillas sensitivas. Los deslizamientos rotacionales pueden ocurrir lenta a rápidamente, con velocidades menores a 1 m/s.

**Figura 55.** Deslizamiento rotacional en suelo y roca



**Deslizamientos complejos (complex slides)**

Fueron definidos por Hutchinson (1988) como un control estructural, resultando en superficies de ruptura irregulares de complejidad variable. El tipo más común de deslizamiento

compuesto incluye movimiento rotacional a lo largo de un escarpe principal, seguido de un desplazamiento a lo largo de una superficie de debilidad casi horizontal, usualmente paralela a la estratificación en rocas sedimentarias.

La superficie de ruptura se desarrolla a lo largo de planos de plegamiento, o por la intersección de varias discontinuidades planares o por la combinación de superficies de ruptura y de planos de debilidad de la roca. El movimiento a lo largo de superficies de deslizamiento compuestas no es cinemáticamente posible sin que ocurra cizalla interna significativa en el cuerpo del deslizamiento.

Usualmente los deslizamientos compuestos se caracterizan por pequeños escarpes y la formación de estructuras de Graben o fosa, que los diferencia morfológicamente de los deslizamientos rotacionales. Estos pueden ser:

- Deslizamiento simple o *tipo slump* tiene un movimiento rotacional o traslacional de una masa individual a lo largo de una superficie de ruptura particular.
- Deslizamiento *múltiple* es el movimiento de una (1) o más masas con el mismo tipo de movimiento a lo largo de dos (2) o más superficies de ruptura distintas.
- Deslizamiento *sucesivo* se llama a aquel que desarrolla un movimiento múltiple a lo largo de un periodo de tiempo.

**Figura 56.** Tipos de deslizamientos complejos



2.3.1. Procesos y mecanismos formativos

La estabilidad del material sólido suele ser evaluada por el factor de seguridad (F), que es:

$$F = \frac{\text{(Resistencia del material a romperse o desplazarse)}}{\text{(Fuerzas que promueven el esfuerzo)}}$$

Las fuerzas que promueven el movimiento se encuentran asociadas a la inclinación o incremento de la pendiente y peso del material. La presencia de planos de estratificación, clivajes o fracturas en una litología son un factor debilitante que favorece la inestabilidad de estas. Fenómenos como

sismos o actividades antrópicas, que producen vibraciones como la construcción civil y explosiones, son fuentes externas que pueden fomentar el movimiento de masa. Por otra parte, en materiales friables y rocas de baja resistencia a la deformación, la cohesión del material y la resistencia a

la fricción son los mayores factores que aumentan la resistencia del material.

Un concepto fundamental para considerar es el de la presión de poros. La presión de los poros se desarrolla cuando el agua rellena los espacios porosos entre las partículas. Esto produce una pérdida de la fuerza de resistencia intrínseca del material (*shear strength*), haciendo que el material se torne inestable. Este concepto es muy importante porque

explica que no es necesaria la saturación hídrica de todo el material involucrado en un movimiento de masa, sino saturación hasta cierto punto crítico (umbral) en zonas específicas de debilidad.

Los principales mecanismos de los movimientos de masa son las caídas, reptaciones, deslizamientos y flujos. Una clasificación general de los procesos de movimiento de masa se presenta en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Clasificación de los tipos de fallas en laderas

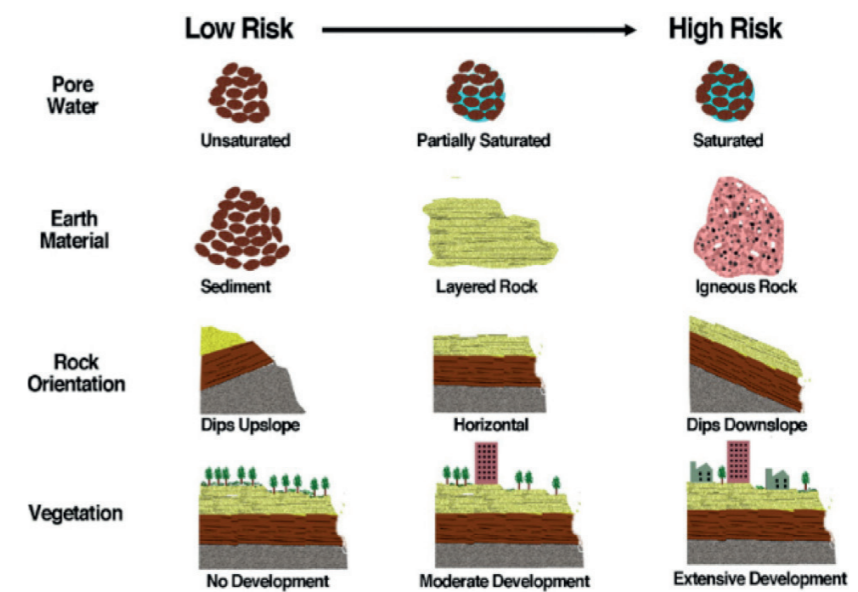
Tipo	Descripción	Favorecimiento	Causa
<b>Fallas</b>	Movimiento a través del aire, balanceo, rodamiento, caída, muy rápido.	Pendientes pronunciadas, roca muy fracturada, falta de vegetación de retención.	Remoción de soporte, acuñaamiento y palanca, sobrecarga.
<b>Deslizamientos</b>	Material en movimiento que no se ha deformado completamente, movimiento a lo largo de la planicie; lento a rápido.	Masivo sobre la zona débil, presencia de lechos permeables o incompetentes, sedimentos mal cementados o no consolidados.	Sobreempinamiento, reducción de la fricción interna.
<b>Flujos</b>	Se mueven como fluidos viscosos (deformación interna continua); lento a rápido.	Material no consolidado, sedimentos finos impermeables y permeables alternativos en el lecho rocoso.	Reducción de la fricción interna debido al contenido de agua.
<b>Fluencia</b>	Movimiento lento cuesta abajo, hasta varios cm por año.	Altos rangos de temperatura diaria, periodos alternos de lluvia y sequía, ciclos frecuentes de congelamiento y descongelamiento.	Balanceo de árboles, acuñaamiento y palanca, socavación.
<b>Escombros</b>	Movimiento rápido de agua con carga sedimentaria, rocas y material orgánico en los cauces fluviales.	Canales empinados, capa delgada de material no consolidado sobre el lecho de roca dentro del canal; las partículas de arcilla en capas (arcillas lacustres) forman un plano de deslizamiento cuando están húmedas.	Descarga de alto caudal, suelos saturados, a menudo provocados por avalanchas de escombros; la deforestación acelera la ocurrencia.

Extraído de Swanston and Swanson (1980)

Es necesario considerar los principales factores que contribuyen a la inestabilidad de las pendientes y tener en cuenta que muchos movimientos de masa son activados por fuerzas que temporariamente alteran la pendiente de equilibrio

de las laderas. La Figura 57 y la Tabla 7 presentan una síntesis de los principales factores que deben ser considerados y su papel en el análisis de riesgo.

**Figura 57.** Factores y riesgos asociados a cada uno de ellos



**Tabla 7.** Resumen de los principales factores y riesgos asociados al esfuerzo y resistencia

Factores que aumentan el esfuerzo de corte	Factores que disminuyen el esfuerzo de corte
Remoción del soporte lateral <ul style="list-style-type: none"> <li>Erosión</li> <li>Actividad humana</li> </ul> Adición de masa <ul style="list-style-type: none"> <li>Natural</li> <li>Antropogénica</li> </ul> Terremotos                     Inclinación regional                     Remoción del soporte subyacente <ul style="list-style-type: none"> <li>Natural (meteorización)</li> <li>Antropogénica (minería)</li> </ul> Presión lateral <ul style="list-style-type: none"> <li>Natural (adición de agua)</li> </ul>	Meteorización y otras reacciones físico-químicas <ul style="list-style-type: none"> <li>Desintegración (reduce la cohesión)</li> <li>Hidratación (reduce la cohesión)</li> <li>Intercambios base</li> <li>Soluciones</li> <li>Secado</li> </ul> Agua de los poros <ul style="list-style-type: none"> <li>Flotabilidad</li> <li>Tensión capilar</li> </ul> Cambios estructurales <ul style="list-style-type: none"> <li>Remoldeo</li> <li>Fracturamiento</li> </ul>

Fuente: Varnes (1958)

Se denomina deslizamiento a la rotura o desplazamiento de una masa de suelo o roca con dirección ladera abajo, ocurre a lo largo de una superficie de falla o una delgada zona de gran deformación cortante. El desplazamiento puede ser lento o rápido, con o sin atenuante aparente.

*Factor de seguridad*

El factor de seguridad, también conocido como coeficiente de seguridad, es el cociente resultante entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real al que se verá sometido. Por este motivo, se trata de un número mayor que uno, que indica la capacidad de exceso que tiene el sistema sobre sus requerimientos. Sin embargo, existen diferentes factores que influyen y son parte de

las fuerzas desestabilizadoras, entre las que tenemos los factores condicionantes, como la masa deslizante y la resistencia de corte del terreno en la superficie de deslizamiento, a las cuales se le suman otras fuerzas, como las sobrecargas de estructuras o el empuje del agua en las grietas, las mismas que forman parte de los factores desencadenantes.

Actualmente, existen varias normativas nacionales e internacionales ampliamente aceptadas en Perú, en las que se regula el coeficiente de seguridad a emplear. La elección de dicho coeficiente debe realizarse considerando la temporalidad de la obra (provisional o definitiva) y la situación de cálculo (estática o sísmica). La Tabla 8 indica los coeficientes de seguridad a utilizar para el análisis de taludes.

**Tabla 8.** Coeficientes de seguridad a emplear en el análisis de taludes

Normativa	Talud temporal		Talud permanente	
	Estática	Sísmica	Estática	Sísmica
AASHTO LRFD*	1,33-1,53	1,1	1,33-1,53	1,1
NAVAFAC-DM7	1,-1,25	1,2-1,15	1,5	1,2-1,15
FHWA-NHI-11-032	-	1,1	-	1,1
CE.020	-	-	1,5	1,25

Fuente: AASHTO

Nota: La AASHTO, en situación estática, determina que, si no existen cargas estructurales próximas al talud, o los reconocimientos geotécnicos realizados son confiables, debe emplearse un factor de seguridad de 1,33; en caso contrario, se emplea el de 1,53.

Los factores condicionantes y detonantes son aquellos que influyen y condicionan el tipo de rotura a lo largo de una o varias superficies; además, hace posible el movimiento de

cierto volumen de masa. De acuerdo con la Tabla 9, se tienen en cuenta los factores geológicos, geométricos, hidrogeológicos y geotécnicos.

**Tabla 9.** Factores que influyen en los deslizamientos

Tipo	Factores
Factores geológicos	Estratigrafía Litología Estructuras geológicas Discontinuidades
Factores geométricos	Altura del talud Inclinación del talud
Factores hidrogeológicos	Presencia de agua
Factores geotécnicos	Comportamiento mecánico de las rocas Comportamiento mecánico de los suelos Resistencia Deformabilidad

Fuente: Suárez (2012)

*Factores condicionantes o pasivos*

Son aquellos que se relacionan con los factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos; además, se considera que son intrínsecos a los materiales naturales, estos factores son:

**Relieve y geometría.** Para que se produzca cualquier movimiento de masa gravitacional es necesario tener una determinada pendiente, por eso las regiones montañosas son más propensas a estos fenómenos. Además, para su estudio y monitoreo se requieren ciertos datos, como la inclinación del talud. Para conocer el relieve y la geometría es importante definir las características y partes de un deslizamiento:

- **Corona.** El material que aún permanece en su lugar, prácticamente no desplazado y adyacente a las partes más altas del escarpe principal.
- **Superficie original del terreno.** Es la superficie inclinada o talud de una ladera antes de que ocurra el movimiento o deslizamiento.
- **Hombro.** Es la zona que se encuentra en la transición de la superficie inclinada o talud de una ladera y la corona.

- **Pie de la ladera.** Parte más baja de la ladera.
- **Pie de la superficie de falla.** La línea de intersección (en ocasiones cubierta) entre la parte inferior de la superficie de falla y la superficie original del terreno.
- **Escarpe principal de falla.** Es el escalón o superficie abrupta localizada en la parte superior de la ladera y contigua a la corona; resultante del movimiento del talud pendiente abajo y forma parte de la superficie de falla.
- **Superficie de falla o de ruptura.** Zona o lugar geométrico donde se rompe o pierde el equilibrio de una porción de los materiales que componen una ladera y se deslizan ladera abajo por la acción de la gravedad, separándose de la ladera remanente.
- **Cuerpo principal.** Aquella parte del material desplazado sobre la superficie de ruptura; en ocasiones, ese material permanece sobre la superficie de deslizamiento (falla contenida), pero otras veces se “vacía” totalmente, dando como resultado los flujos.
- **Flanco.** El costado de un deslizamiento de tierras. Se indica derecho o izquierdo, refiriéndose al deslizamiento observado desde la corona.

- **Zona de acumulación o base.** El área dentro de la cual el material desplazado queda encima de la superficie original del terreno; esto es el área cubierta por el material fallado, abajo del pie de la superficie de falla.
- **Plataforma.** Porción superior del talud más allá de la corona.
- **Puntapié o uña.** El punto de la base del deslizamiento que se encuentra más distante de la corona.

**Figura 58.** Componentes del deslizamiento

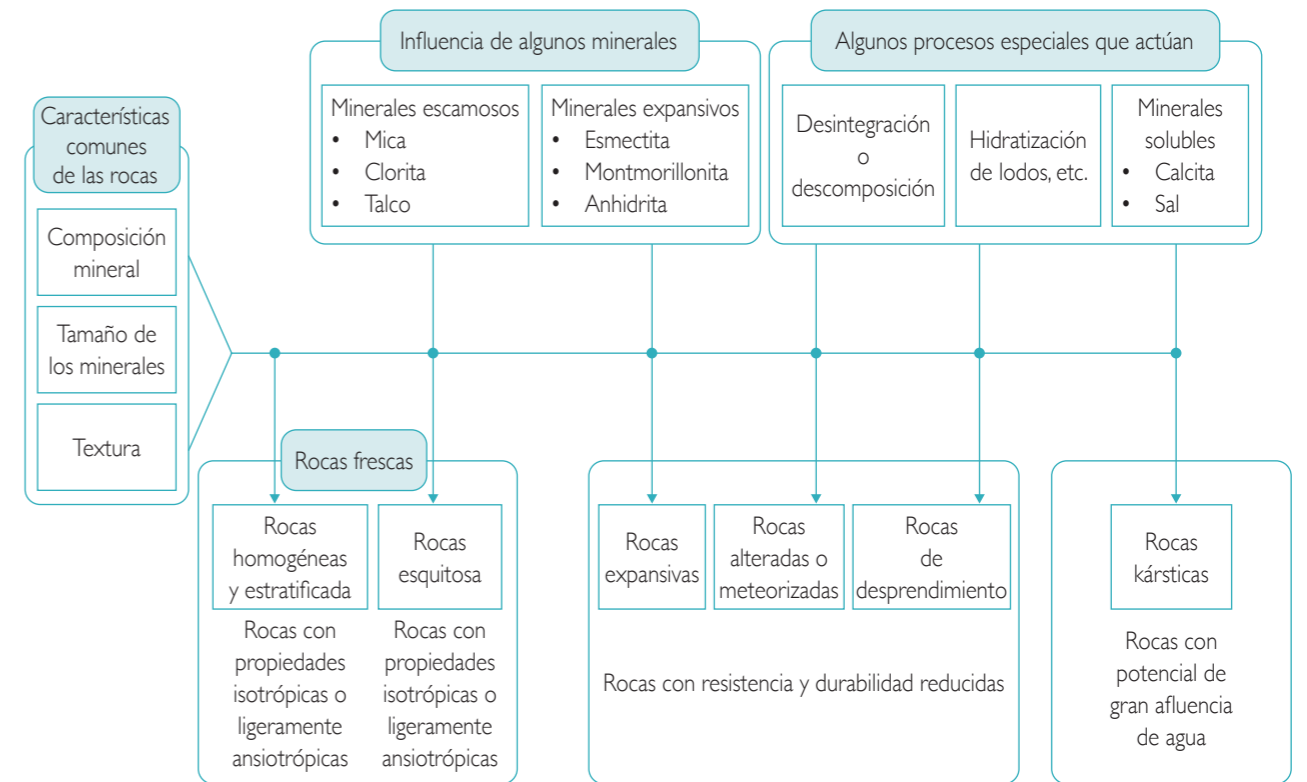


Fuente: <https://docplayer.es/docs-images/64/51318926/images/26-1.jpg>

**Estratigrafía y litología.** La naturaleza del material que forma un talud o una ladera está íntimamente relacionada con el tipo de inestabilidad que este puede sufrir, dependiendo de la litología (composición mineralógica, tamaño de minerales y textura) es el grado de susceptibilidad a deslizamientos en rocas y suelos (Figura 59). La alternancia

de materiales de diferente litología, competencia y grado de alteración o la presencia de capas de material blando o de estratos duros, controlan los tipos y la disposición de las superficies de rotura, que tienden a orientarse, por ejemplo, por las zonas superiores de roca alterada o por zonas de suelos más o menos homogéneos.

**Figura 59.** Variables que influyen en el comportamiento de las rocas.



**Las estructuras geológicas y discontinuidades.** La combinación de los elementos estructurales con los parámetros geométricos del talud (altura e inclinación) y su orientación nos permiten reconocer y clasificar los deslizamientos. Estos factores son más influyentes en macizos rocosos que en suelos. No obstante, también los suelos

pueden estar afectados por fallas y discontinuidades (estratificación). En 1978, Varnes efectuó la primera clasificación de deslizamientos, dividiéndolos en deslizamientos traslacionales y rotacionales, los cuales fueron diferenciados según la forma de la superficie de falla por la que se desplaza el material (Tabla 10).



**Tabla 10. Geometría promedio y características para la identificación del deslizamiento**

Tipo de movimiento	Cabeza y parte superior de la pendiente	Parte inferior de la pendiente	Geometría
Deslizamientos rotacionales	Grietas de tensión curvada y cóncavas a la pendiente. Escarpas curvas con estrías que pueden ser verticales más arriba. Superficies de estanqueidad inclinadas. Vegetación de contraste. Malas condiciones del terreno y depresiones de estanqueidad.	Depósitos convexos y lobulados. Lechos de ríos desviados.	Gradientes entre 20 y 40. $D/L < 0,3-0,1$
Deslizamientos traslacionales	Grietas de tensión verticales paralelas a la pendiente. Escarpa vertical poco profunda. Material fracturado en bloques con grandes grietas entre ellos. No hay estanqueidad entre ellos. Drenaje desordenado o inexistente.	Cauces de ríos desviados. Acumulaciones ocasionales de material en forma de lóbulo.	Gradientes uniformes. $D/L < 0,1$

Fuente: Hutchinson (1988)

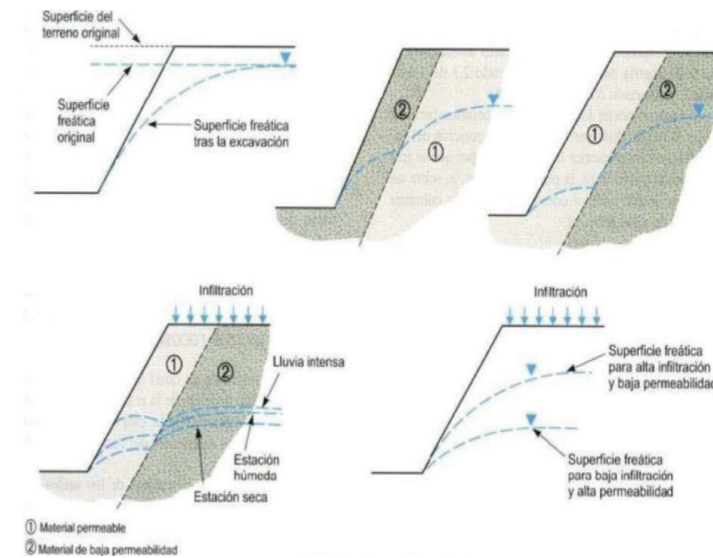
**Condiciones hidrogeológicas.** La mayor parte de las roturas se producen por los efectos del agua en el terreno, como la generación de presiones intersticiales, o los arrastres y erosiones, superficiales o internas, de los materiales que forman el talud o la ladera. En general, puede decirse que el agua es el mayor enemigo de la estabilidad de los taludes (además de las acciones antrópicas, cuando se realizan excavaciones sin criterios geotécnicos). La presencia de agua en un talud o ladera reduce su estabilidad al disminuir la resistencia del terreno y aumentar las fuerzas tendientes a la inestabilidad. Sus efectos más importantes son:

- Reducción de la resistencia al corte de los planos de rotura al disminuir la tensión normal efectiva.
- La presión ejercida sobre grietas de tracción aumenta las fuerzas que tienden al deslizamiento.

- Aumento del peso del material por saturación.
- Erosión interna por flujo subsuperficial o subterráneo.
- Meteorización y cambios en la composición mineralógica de los materiales.
- Apertura de discontinuidades por agua.

La forma de la **superficie freática** en un talud o ladera depende de la permeabilidad de los materiales, la geometría o forma del talud y las condiciones de contorno (Figura 59). En taludes en suelos, la estructura geológica y la permeabilidad de los materiales tienen una gran influencia en la disposición del nivel freático y, por lo tanto, en la distribución de las presiones intersticiales sobre cualquier superficie potencial de deslizamiento en un talud.

**Figura 60. Esquemas del nivel freático en un talud según la permeabilidad y distribución de los materiales**



Fuente: Gonzales de Vallejo (2002)

El efecto más importante de la influencia del agua es la presión ejercida por la misma y definida por la altura del nivel piezométrico.

Los aspectos más importantes que deben conocerse para evaluar la magnitud y la distribución de las presiones intersticiales en taludes y laderas debido a los efectos del agua son:

- Comportamiento hidrogeológico.
- Presencia de niveles freáticos y piezométricos.
- Flujo de agua en el talud.
- Parámetros hidrogeológicos de interés: coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica, gradiente hidráulico, transmisividad, entre otros.

Dentro de las propiedades geomecánicas de los suelos está la resistencia al corte y esta resistencia depende del material, cohesión y fricción.

**Efectos de la meteorización.** En determinados tipos de suelos y los procesos de meteorización juegan un papel importante en la reducción de sus propiedades resistentes, dando lugar a una alteración y degradación intensas al ser expuestos los materiales a las condiciones ambientales

como consecuencia de una excavación. Esta pérdida de resistencia puede dar lugar a la caída del material superficial y, si afecta a zonas críticas del talud, como su pie, puede generar roturas generales, sobre todo en condiciones de presencia de agua.

*Factores desencadenantes o activos*

Se considera factores externos que actúan sobre los suelos o macizos rocosos, cambiando las características, propiedades y condiciones de equilibrio, provocando la rotura cuando se cumple las condiciones. Estos factores son:

- Sobrecargas estáticas y cargas dinámicas, como la desintegración gradual de la estructura del suelo.
- Precipitaciones y condiciones climáticas generan aumento de las presiones intersticiales debido a filtraciones de agua.
- Condiciones antrópicas debido a excavaciones o socavamientos que debilitan el pie del talud.

**2.3.2. Metodologías propuestas**

En la Tabla 11 se muestran los alcances del estudio en áreas inestables y en deslizamientos. Específicamente para desli-

zamientos se identificaron seis (6) etapas donde se describen los métodos y técnicas mínimas requeridas, cuya finalidad permite cumplir con la metodología de investigación de manera adecuada.

**Tabla 11. Métodos y técnicas para el estudio de deslizamientos**

Alcance	Fases	Métodos y técnicas	Finalidad
Investigación de áreas inestables	Estudios preliminares	Revisión de la información existente y elaboración de los mapas preliminares. Interpretación de fotos aéreas y teledetección.	Identificar procesos y tipos de movimientos. Identificar los factores condicionantes. Evaluación general de estabilidad del área usando métodos heurísticos y/o probabilísticos.
	Encuestas generales	Observaciones sobre el terreno. Mapa de procesos. Mapa de factores.	
Investigación de deslizamientos específicos	Estudio de procesos y factores causales	Salida de campo.	Describir y clasificar procesos/materiales. Análisis de susceptibilidad basado en los procesos existentes y la concurrencia de factores condicionantes.
		Investigación preliminar del subsuelo: métodos geofísicos.	
		Observaciones y mediciones en afloramientos.	Describir y clasificar los movimientos. Recoger datos morfológicos, geológicos, hidrogeológicos y geomecánicos.
	Investigación detallada	Sondeos, métodos geofísicos, pruebas <i>in situ</i> , muestreo.	
Pruebas de laboratorio.			
Investigación de áreas estables	Monitoreo	Inclinómetros, extensómetros, tiltómetro, piezómetros, entre otros.	Recolección de datos sobre la velocidad, la dirección, situación de los planos de rotura y presiones de agua.
	Análisis de estabilidad	Métodos de equilibrio límite. Modelos numéricos de tensión-deformación.	Definir los mecanismos de modelo y los mecanismos de falla. Evaluar la estabilidad. Diseñar medidas correctivas, ya sea en infraestructura natural o gris.

Dentro de todos los métodos y técnicas descritas previamente, a continuación, se desarrollarán los estudios preliminares, debido a la relevancia en todo el proceso.

*Mapas preliminares*

La elaboración de la zonificación e identificación de los movimientos de masa depende de la escala de trabajo, donde la aplicación cambia de análisis determinísticos a probabilísticos si es un detalle 1:2000.

- La cartografía básica a la misma o proporcional escala, dentro de insumos considerados en este ítem son:
  - Mapas geológicos en unidades de geología para ingeniería (INGEMMET)
  - Mapas geomorfológicos (INGEMMET)
  - Mapas de cobertura y uso de suelo (MINAM, MINAGRI)
- El modelo digital del terreno es básico para definir el detalle del trabajo y las características de adquisición.
- La escala de trabajo está condicionada a la resolución de las imágenes adquiridas de los sensores remotos.
- El inventario o catálogo de movimientos de masa, que contenga puntos de observación geológica con una dis-

tribución espacial y temporal, y su relación con factores detonantes.

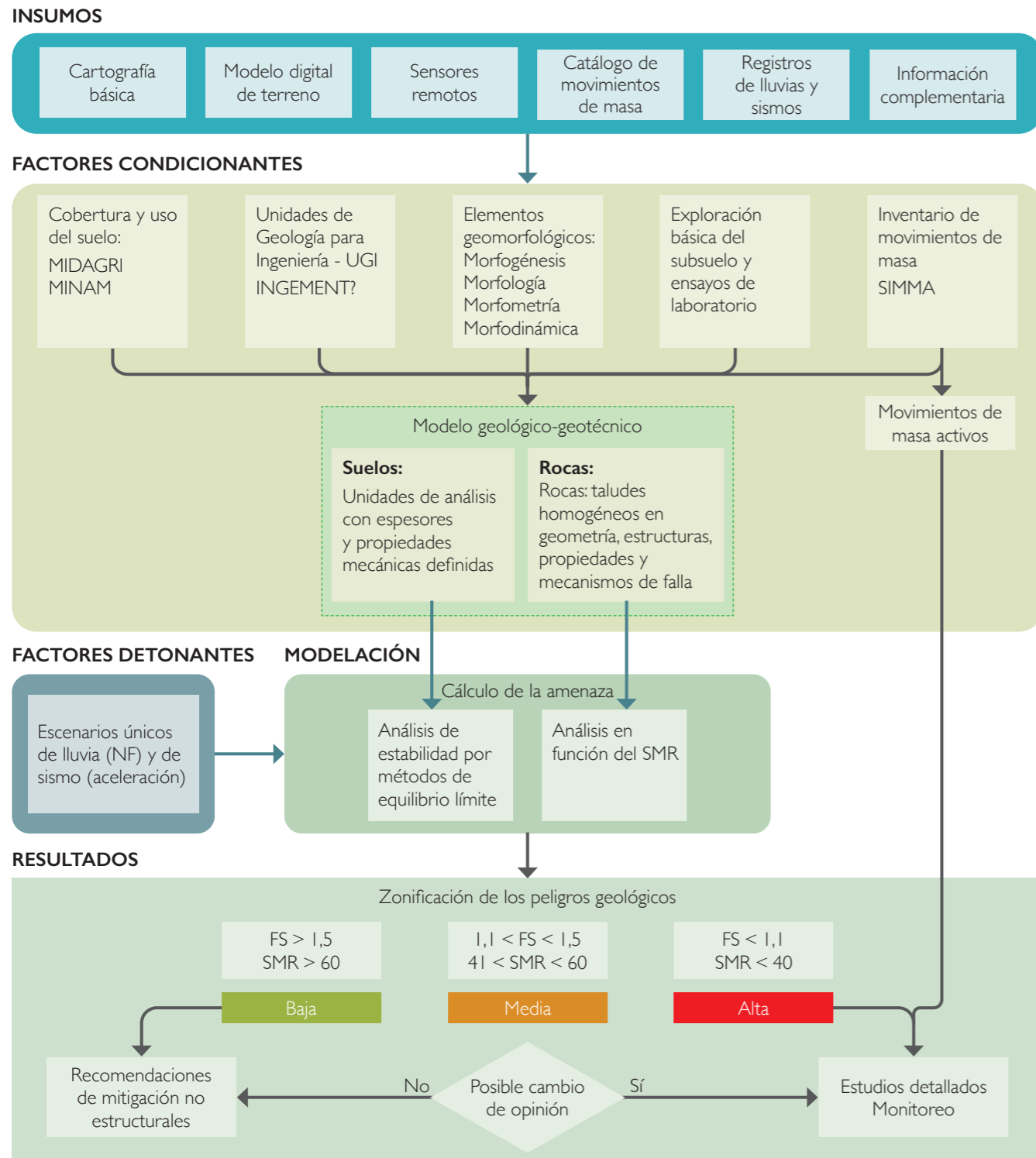
Buscar un registro histórico de factores detonantes, como registros de sismos o fallas regionales, lluvias y precipitaciones extraordinarias, las cuales provocan la activación de los movimientos de masa debido a la infiltración, saturación del suelo y activación de deslizamientos o flujos de escombros. Entre la información complementaria se encuentra reportes técnicos de ensayos de laboratorio, informes, boletines y demás.

La información de cobertura y uso del suelo se obtiene de los levantamientos de cartografía básica y considera el análisis de la intervención antrópica e identifica los cortes de terreno, taludes, rellenos y demás accidentes del terreno que intervienen en la estabilidad.

Con los insumos, se establece un modelo geológico-geotécnico (Figura 60), que requiere caracterizar geotécnicamente los materiales del subsuelo y efectuar un análisis determinístico de estabilidad en suelos, que se hace por medio de un modelo de talud infinito y, para el caso de taludes en roca, mediante modelos convencionales de estabilidad de macizos rocosos, según lo establezca el experto.



**Figura 61.** Metodología para la zonificación de los peligros geológicos



Fuente: SGC (2016)

Respecto al modelo de talud infinito se requiere una distribución espacial de los espesores de suelo y de sus características mecánicas, además de una posición del nivel freático y una aceleración sísmica, con lo cual se procede a calcular, por métodos de equilibrio límite, los factores de seguridad en diferentes celdas o columnas de suelo para hallar su distribución espacial.

Con este procedimiento, el factor de seguridad es el dato discriminante para establecer las categorías de peligro. Para taludes en roca, la zonificación de amenaza se basa en el método SMR (Romana, 1985), que tiene en cuenta las características geométricas del talud, las características estructurales del macizo y las propiedades mecánicas de las rocas. Las áreas de peligro alto definidos en los estudios básicos en los que se identifiquen elementos expuestos, áreas urbanizadas ocupadas o edificadas, así como aquellas en las que

se encuentren edificaciones indispensables y líneas vitales, se consideran áreas en condición de riesgo y se priorizan para llevar a cabo estudios detallados. Por su parte, las zonas desocupadas categorizadas como de peligros medio y alto, y clasificadas como suelo urbano, de expansión urbana o centro poblado rural, se consideran zonas con condición de peligro y también se deben evaluar en estudios detallados.

### 2.3.3. Métodos de medición

#### Control topográfico de puntos determinados

Para el monitoreo de los movimientos de masas inestables los métodos sobre la base de la medición de referencias topográficas permiten conocer con exactitud la velocidad y magnitud de los movimientos superficiales de una masa de suelo o roca. La Tabla 12 resume las características típicas de las técnicas topográficas.

**Tabla 12.** Características de las técnicas topográficas clásicas

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
Nivelación trigonométrica o por pendientes	Variación de la altitud	dZ	Variable	20 mm
Nivelación geométrica o por alturas	Variación de la altitud	dZ	Variable	± 1 mm/km
Nivelación geométrica de precisión	Variación de la altitud	dZ	Variable	± 0,1 mm/km
Triangulación topográfica	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	< 300-1000 m	5-10 mm
Itinerario topográfico (poligonal)	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	Variable	5-10 mm
Distanciómetro electroóptico (MED)	Desplazamiento de blancos móviles	dD	1-10 km	7 mm ± 1-5 ppm

Fuente: Castillón C. y Quintero F., 2012.

Su fundamento se basa en la medida de las variaciones de las coordenadas durante un determinado intervalo de tiempo. Para ello se han de repetir las medidas de las coordenadas (-X, -Y, -Z) de los puntos de control varias veces en diferentes instantes, para determinar si se ha producido o no variación en cualquiera de las tres (3) direcciones del sistema de referencia.

#### GPS diferencial

El GPS utiliza una estación base para hacer las correcciones y refinamientos de una o varias estaciones móviles. Todas las estaciones emplean el mismo sistema satelital. El GPS relaciona observaciones a estaciones móviles desconocidas, con observaciones simultáneas en la estación base conocida. A medida que las señales son monitoreadas, los errores pueden sugerir que la estación base se está moviendo, pero lo que realmente está ocurriendo son los movimientos de las estaciones móviles. Dunnycliff (1993) afirma que cuando la necesidad de instrumentación es adecuada y establecida correctamente, y cuando

el programa está correctamente planificado, el ahorro en los costos puede ser un resultado directo.

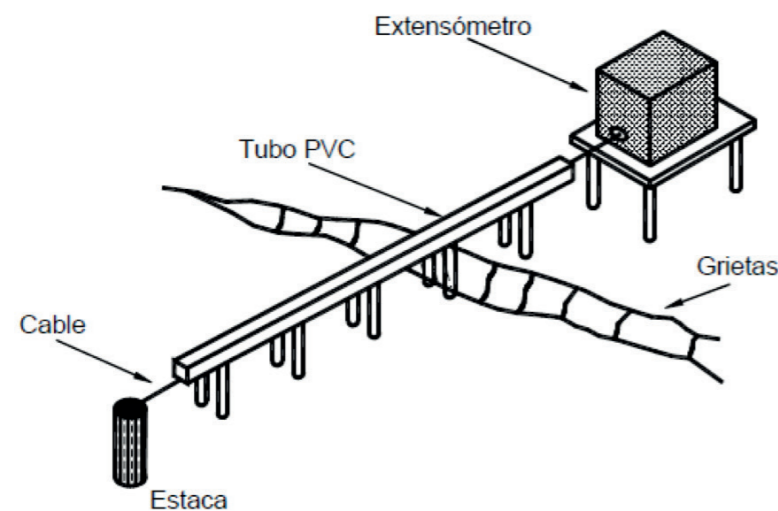
#### Extensómetros superficiales

Una técnica para el monitoreo superficial de grietas consiste en colocar dispositivos electromecánicos, que permitan medir desplazamientos relativos entre masas. La colocación de estos dispositivos resulta muy conveniente cuando la zona que se desea monitorear es de difícil acceso y/o cuando se requiere establecer un monitoreo continuo y automático del movimiento del terreno, para determinar la posibilidad de un deslizamiento en una ladera o un talud.

#### Extensómetros horizontales

El extensómetro horizontal es utilizado para medir el movimiento relativo comparando la distancia entre dos (2) puntos de una forma manual o automática y deformaciones en general de la masa de suelo. Los extensómetros (Figura 62) miden movimientos relativos entre la boca del sondeo y uno o varios puntos situados en el interior:

Figura 62. Diagrama de instalación de un extensómetro horizontal



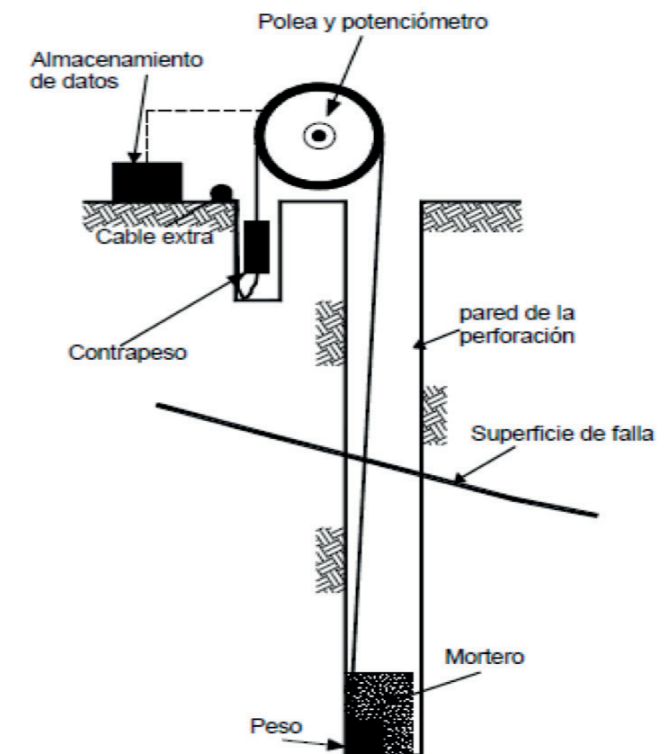
Fuente: <https://www.erosion.com.co/>

Generalmente, los extensómetros se instalan a través del escarpe principal y en terraplenes a través de las grietas para determinar su movimiento y deformación. Colocando una serie de extensómetros interconectados desde el escarpe principal hasta la punta del deslizamiento, se puede determinar en forma clara el movimiento de bloques individuales dentro del movimiento general. Las mediciones deben tener una precisión de al menos 0,2 mm y deben relacionarse con los datos de lluvia diaria. Además, tienen la ventaja de no ser afectado por la humedad, densidad o presión atmosférica.

#### Extensómetros verticales

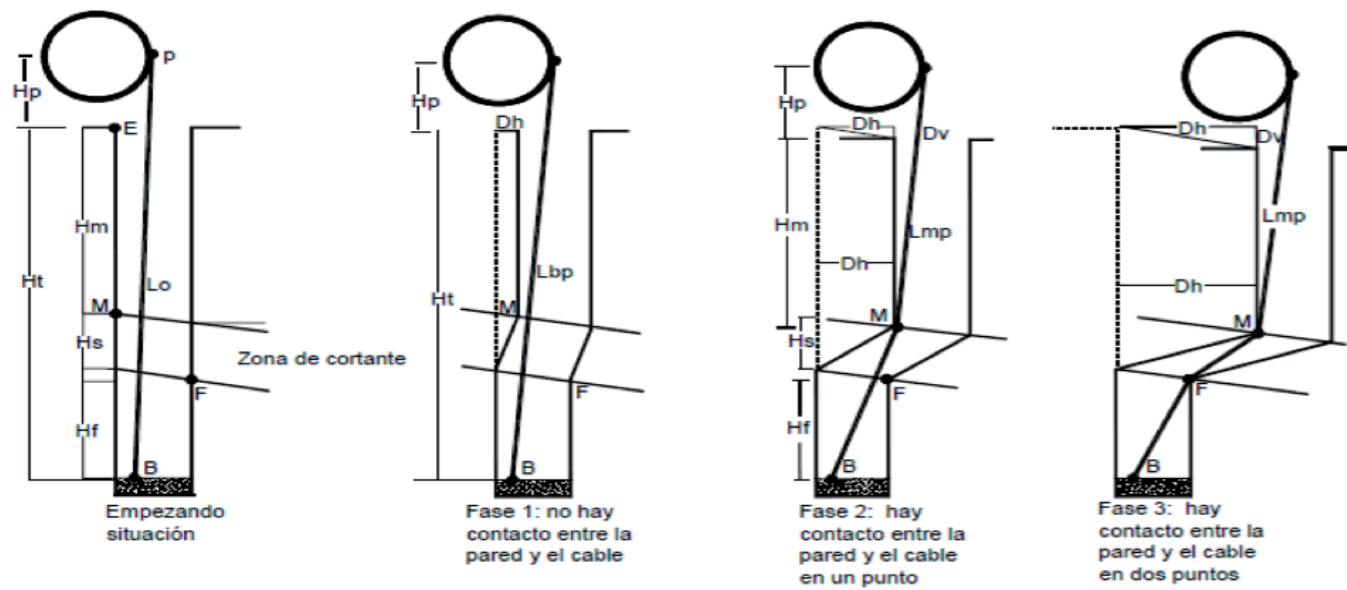
Los extensómetros verticales (o medidores de deformación vertical) miden el aumento o disminución de la longitud de un cable que conecta varios puntos anclados dentro de una perforación y cuya distancia de separación es conocida aproximadamente. Generalmente, se colocan unos pesos para mantener la tensión en los cables. El fondo del cable debe estar en el suelo o en roca dura y estable (Figura 63 y Figura 64).

Figura 63. Extensómetro vertical sencillo para medir el desplazamiento de la superficie de falla



Fuente: Corominas et al. (2000) y <https://www.erosion.com.co/>

**Figura 64.** Esquema de la medición del desplazamiento en la superficie de falla, donde se emplea un extensómetro vertical

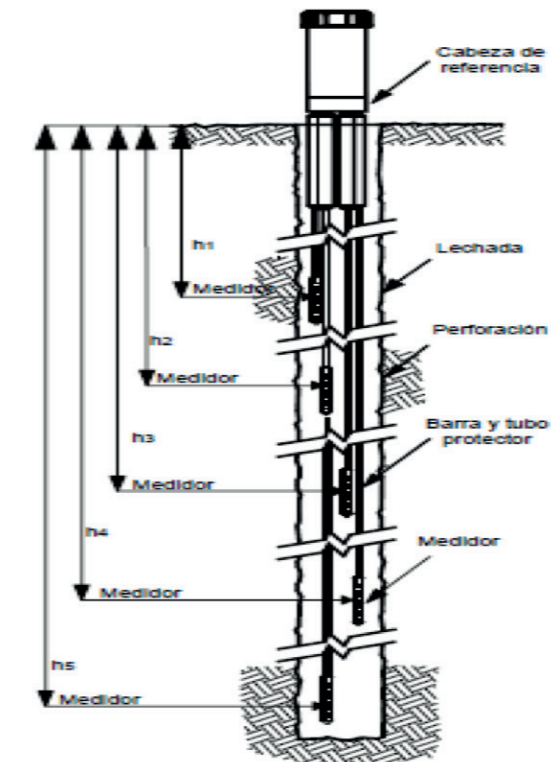


Fuente: Corominas et al. (2000) y <https://www.erosion.com.co/>

Los extensómetros verticales se utilizan cuando la superficie de falla cuando las deformaciones son mayores de cinco centímetros, los inclinómetros no se pueden utilizar por la imposibilidad de la entrada del equipo medidor; al tubo del inclinómetro. El sistema es simple y permite mediciones frecuentes con facilidad.

Los extensómetros pueden ser sencillos o multipunto (Figura 65). La instalación de éstos últimos es compleja y se requiere calibrar las tensiones para una medición correcta. El movimiento relativo puede medirse en forma mecánica o en forma eléctrica. La mayoría de los extensómetros multipunto contienen hasta cinco (5) sensores, estos se encuentran conectados a un cable multi-conductor; el cual permite las lecturas desde la superficie.

**Figura 65.** Diagrama de un extensómetro multipunto



Fuente: Abramson et al. (2002) y <https://www.erosion.com.co/>

**Inclinómetro**

Ayala & Andreu (2006) describen que los inclinómetros permiten medir movimientos horizontales a lo largo de la vertical de un sondeo y, por lo tanto, detectar la zona de movimientos más altos por su evolución y la velocidad de desplazamiento.

Los inclinómetros deben alcanzar la zona estable situada debajo del plano de rotura más profundo. Estos aparatos constan de un torpedo que baja por una tubería especial previamente instalada en el interior del sondeo. El torpedo permite medir (por ejemplo, cada 50 cm) el ángulo que

forma la tubería, lo que multiplicado por la distancia medida los desplazamientos horizontales a lo largo del sondeo, integrando las lecturas de abajo a arriba. Al atravesar la zona de rotura, esta suele quedar definida por cambios en los desplazamientos horizontales, permitiendo realizar el análisis correspondiente; si los desplazamientos son importantes, el tubo puede quedar cortado e impedir las medidas. Los inclinómetros (Figura 66) miden la desviación (inclinación) del sondeo en dos (2) direcciones ortogonales, proporcionando curvas de desplazamientos cuya inflexión denota la situación de los planos.

**Figura 66.** Inclinómetro portátil



Fuente: Juan David Quintero Franco, obra Valle Sur Arquitectura y Concreto

**Figura 67.** Tubo guía PVC para sonda inclinométrica



Fuente: Juan David Quintero Franco, obra Valle Sur Arquitectura y Concreto

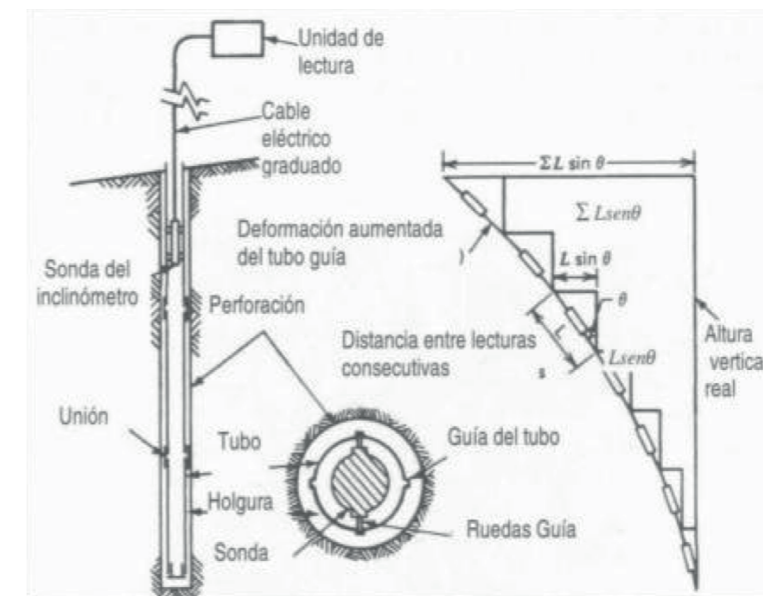
Según Castrillón & Quintero (2012), un sistema de inclinómetro está compuesto por cuatro (4) componentes principales:

- Un tubo guía de plástico, acero o aluminio, instalado dentro de una perforación. Este tubo tiene unas guías longitudinales para orientar la unidad sensora. Generalmente, se utilizan diámetros de tubo entre 1,5 y 3,5 pulgadas (Figura 66).
- Un sensor portátil montado sobre un sistema de ruedas que se mueven sobre la guía del tubo. El inclinómetro incorpora dos (2) servo-acelerómetros con fuerzas balanceadas para medir la inclinación del instrumento (Figura 67).
- Un cable de control que baja y sube el sensor y transmite señales eléctricas a la superficie. Generalmente, el cable está graduado para el control superficial. El cable tiene un núcleo de acero para minimizar las deforma-

ciones; los cables eléctricos se encuentran espaciados alrededor y unidos al núcleo. La cubierta exterior es de neopreno y permanece siempre flexible. El cable tiene unas marcas para medir profundidades. Estas medidas están relacionadas hasta la mitad de la altura del torpedo. Superficialmente, el cable se maneja con una polea, que tiene unas tenazas para sostenerla. Se recomienda siempre trabajar con la polea para evitar el riesgo de que el cable pueda torcerse al sostenerlo.

- Un equipo de lectura en la superficie (que sirve de proveedor de energía) recibe las señales eléctricas, presenta las lecturas y, en ocasiones, puede guardar y procesar los datos. El equipo de lectura es compacto y está sellado contra la humedad. La memoria puede guardar hasta cuarenta (40) mediciones completas. La unidad también puede realizar chequeos y revalidar la información. Los datos del inclinómetro se descargan en un computador.

**Figura 68.** Esquema de instalación e interpretación de mediciones con sonda de inclinómetro



Fuente: Dunnycliff (1993) e "Instrumentación orientada a registrar efectos y/o causas de inestabilidad de laderas" (<http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc15771/doc15771-2.pdf>)

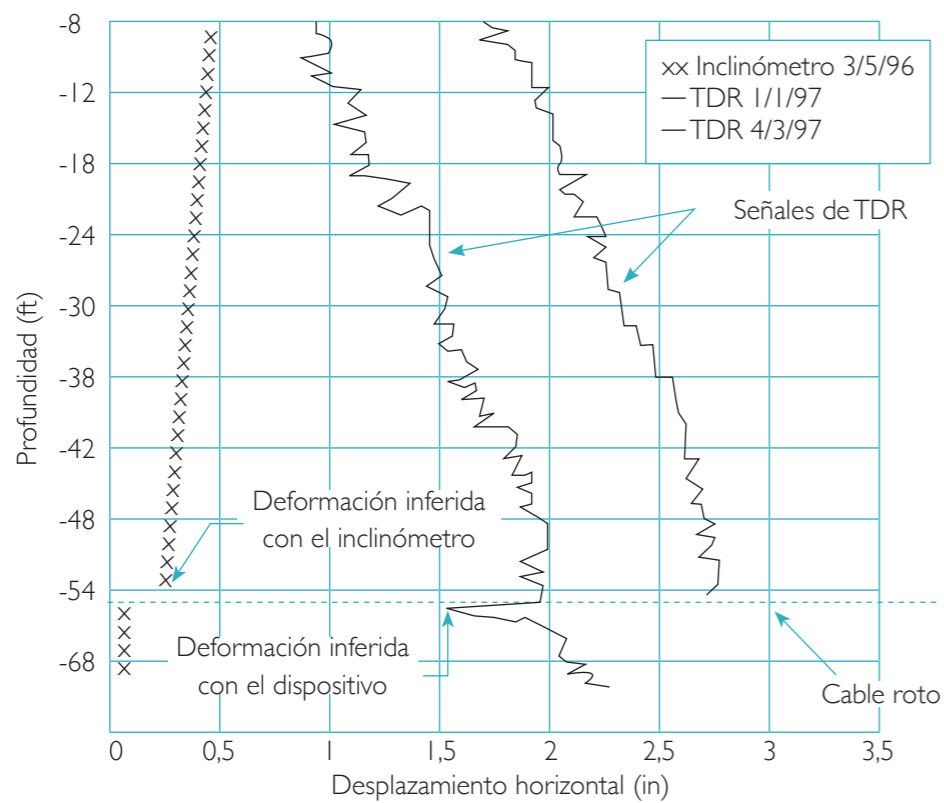
### Reflectometría

Instrumentación orientada a registrar efectos y/o causas de inestabilidad de laderas, se encuentra que el sistema TDR (*Time Domain Reflectometry*) es un dispositivo relativamente nuevo que se utiliza para monitorear los movimientos laterales a profundidad en laderas inestables (Figura 68). Su instalación requiere de la perforación de un pozo de 2' a 4' de diámetro, a lo largo del cual se inserta un cable coaxial fijándolo a la base de la perforación por medio de un contrapeso y llenando el pozo con una lechada pobre de suelo/cemento. El TDR se puede utilizar tanto en suelos duros o firmes como en suelos blandos. Como en el caso del incli-

nómetro, otra de sus ventajas es que permite detectar con precisión la profundidad de los movimientos laterales del terreno respecto a un eje vertical.

El principio básico del funcionamiento del TDR es similar al que se muestra en la Figura 69. Se coloca un cable coaxial dentro del deslizamiento y se ensaya el cable enviando pulsos de voltaje en forma de ondas, las cuales se reflejan. Este procedimiento resulta muy sencillo, ya que solo toma algunos segundos en hacer la conexión y el disparo, para que la gráfica de resultados se muestre casi instantáneamente.

**Figura 69.** Principio de funcionamiento del dispositivo TDR de reflectometría

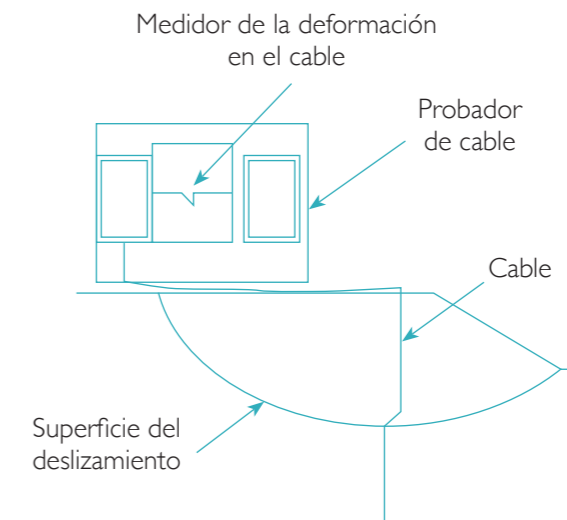


Fuente: Instrumentación orientada a registrar efectos y/o causas de inestabilidad de laderas (<http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc15771/doc15771-2.pdf>)

La medición de la reflexión permite identificar roturas o esfuerzos en el cable, el sistema TDR requiere de mediciones para determinar las condiciones del cable a través del tiempo, el movimiento del terreno deforma el cable y

cambia la impedancia (relación entre tensión e intensidad de corriente) de este. El cambio en la impedancia puede ser monitoreado para localizar la superficie de falla y los movimientos del terreno como se indica en la Figura 70.

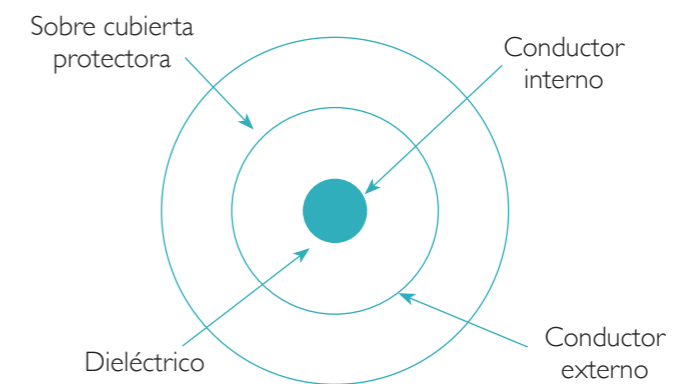
**Figura 70.** Esquema del sistema TDR



Fuente: Suarez Diaz (2012)

Los cables coaxiales que se utilizan (Figura 71) en el sistema TDR tienen una impedancia característica, determinada por el espesor y el tipo de material aislante.

**Figura 71.** Esquema del cable coaxial del sistema TDR



Fuente: Suarez Diaz (2012)

El material aislante puede ser hecho de cualquier material no conductor, como PVC, teflón o aire. Si el cable se deforma, la distancia entre el conductor interno y el externo cambia y, por lo tanto, cambia la impedancia en ese punto. El medidor de TDR determina la localización de las deformaciones a lo largo del cable.

El sistema TDR es utilizado con frecuencia en los Estados Unidos y, especialmente, por el Departamento de Carreteras de California. El sistema TDR tiene una gran cantidad de ventajas sobre los inclinómetros, ya que generalmente es más económico y las mediciones son más rápidas y sencillas. Entre las desventajas del sistema TDR se encuentra que no es posible determinar la dirección y la magnitud de los movimientos; sin embargo, la tecnología del sistema podría mejorar en el futuro.

### Piezómetros

Suárez Díaz (2012) enfatiza la importancia de monitorear la presión de poros utilizando excavaciones de observación o piezómetros, los cuales pueden ser de tubo abierto, neumáticos o de cable vibratorio. El tipo de piezómetro

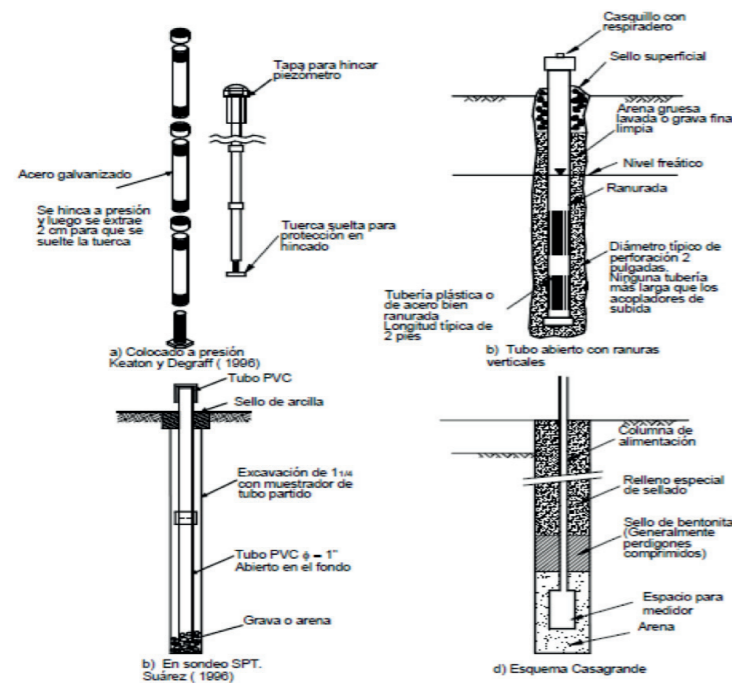
a seleccionar para cada estudio específico depende de las características de funcionamiento del piezómetro y de su precisión.

### Sondeo abierto

Consiste en perforaciones abiertas en las cuales se coloca un tubo perforado (Figura 72 y Figura 73), su función principal es establecer un promedio del nivel freático. La profundidad del nivel de agua se puede medir por medio de un cable y un elemento detector (que bien puede ser un medidor eléctrico o un simple objeto metálico). Una cubierta de protección impide la entrada del agua lluvia.

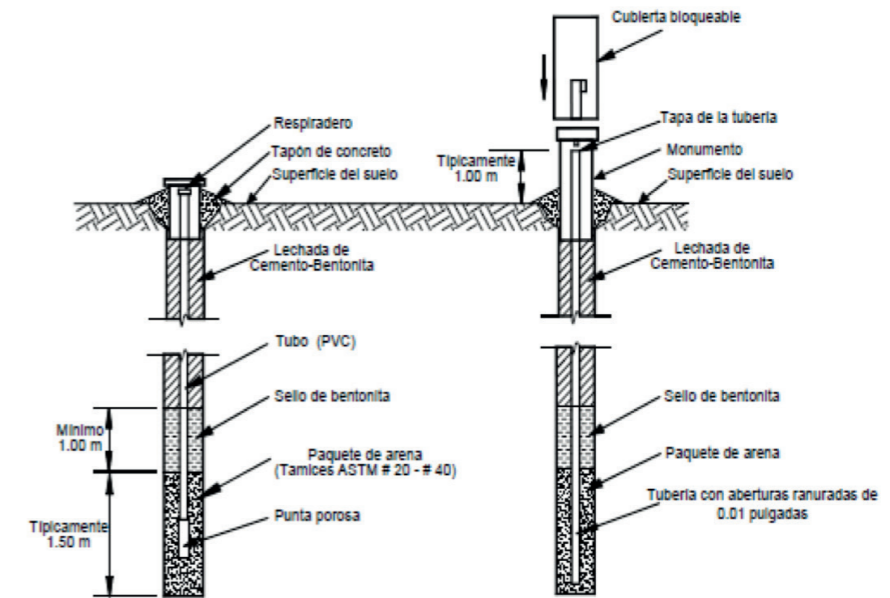
Si el sondeo abierto se encuentra en una formación de suelo homogéneo con solo un nivel de agua presente, este sistema es válido para obtener información de las variaciones del nivel freático. Generalmente, su precisión es buena, pero como la perforación tiene comunicación con todos los estratos, no se puede especificar la presión del agua en un sitio determinado. El nivel del agua que se obtiene corresponde a la cabeza de presión en la zona más permeable y esto puede prestarse para errores en el análisis.

Figura 72. Piezómetro sencillo de cabeza abierta



Fuente: <http://erosion.com.co/>

Figura 73. Piezómetros de cabeza abierta



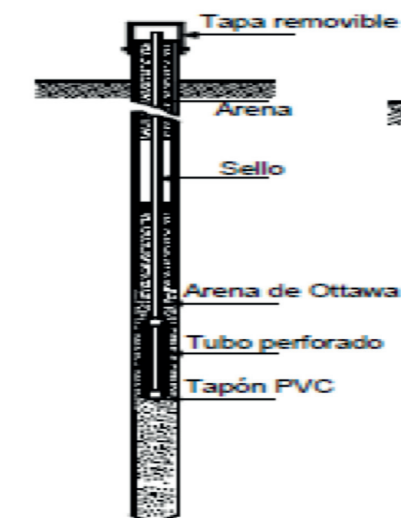
Fuente: <http://erosion.com.co/>

### Piezómetro de cabeza abierta

Uno de estos piezómetros es el tipo Casagrande (Figura 74), que es muy similar al tubo abierto con un filtro y con la colocación de sellos de bentonita, permite especificar el sitio de la lectura, eliminando el factor de error. Gene-

ralmente, se coloca un filtro o un elemento poroso para determinar el sitio específico de la medición. Los piezómetros de cabeza abierta son considerados por los ingenieros como los más confiables.

Figura 74. Piezómetro de Casagrande



Fuente: <http://erosion.com.co/>



Algunas de las ventajas de los piezómetros de cabeza abierta son los siguientes (Abramson y otros, 2002):

- Son simples y fáciles de interpretar.
- Su durabilidad y permanencia en el tiempo es muy buena.
- Son fáciles de mantener.
- Se pueden utilizar unidades de medida portátiles.
- Se puede muestrear el agua freática.
- Se pueden utilizar para medir la permeabilidad del suelo.

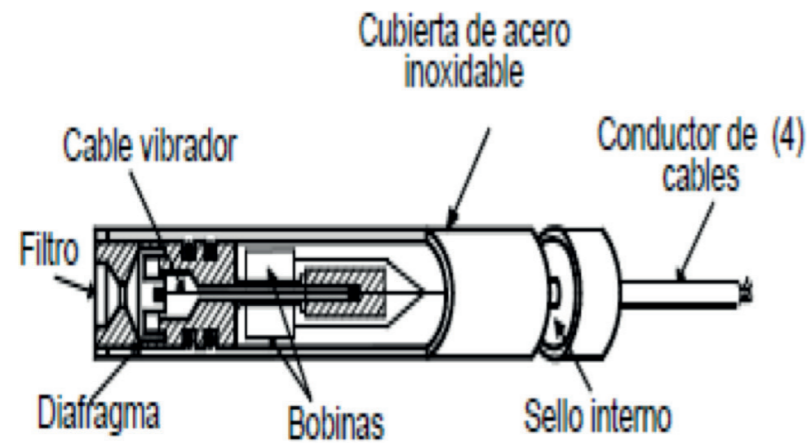
Entre las limitaciones de los piezómetros de cabeza abierta se puede mencionar que son de respuesta lenta con el tiempo y que los filtros pueden taparse con la entrada repetida de agua; sin embargo, la limitación más importante es

que no permite medir los niveles pico de presión durante tormentas cuando los piezómetros se encuentran instalados en arcillas (Cornforth, 2005).

#### Piezómetro de hilo vibrátil

Consisten en un diafragma metálico que separa la presión del agua del sistema de medida, un filtro poroso que actúa de material permeable y que permite el paso del agua desde el exterior al interior del piezómetro, un cable tensionado que está unido al punto central de un diafragma que puede ser metálico o de cauchos especiales. Las deflexiones del diafragma ocasionan cambios en la tensión del cable, la cual es medida y convertida en presión (Figura 75).

Figura 75. Piezómetro de hilo vibrátil



Fuente: Cornforth (2005) y <http://erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-an%C3%A1lisis-geot%C3%A9cnico.htm>

Con frecuencia, la utilización de piezómetros de hilo vibrátil origina errores por el comportamiento del piezómetro a través del tiempo (Abramson et al., 2002). Son muy comunes los problemas de corrosión por falta de hermeticidad de la cavidad sellada.

Otra dificultad relativamente común de los piezómetros de hilo vibrátil es la deformación o *creep* a largo plazo, lo cual modifica la tensión del cable y la precisión de las

medidas. Igualmente, el sensor es susceptible a daños por la acción de los rayos durante las tormentas eléctricas. El cable metálico enterrado en el piso actúa como un elemento que atrae los rayos.

Entre las ventajas del piezómetro de hilo vibrátil se encuentra la facilidad de lectura y la poca interferencia para la colocación de terraplenes. Igualmente, puede utilizarse para medir presiones negativas de agua cuando se cuenta

con filtro poroso adecuado con una presión de entrada de aire entre 0,1-1,5 MPa. El principal uso de los piezómetros de hilo vibrátil se relaciona con la facilidad para incorporarlos a los sistemas automáticos de adquisición de datos y la posibilidad de transmitirlos a grandes distancias.

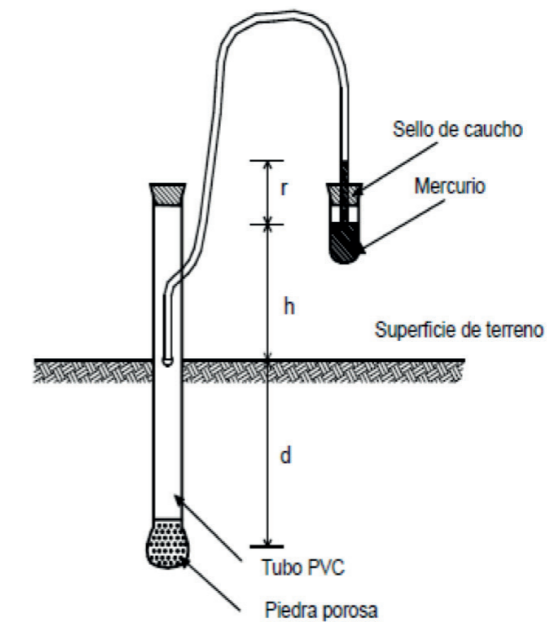
#### Tensiómetros

Los tensiómetros miden la presión de poros negativa en materiales no saturados y, generalmente, son capaces

de medir presiones desde 0 hasta menos una atmósfera (Abramson, 1996).

El instrumento tiene una piedra porosa de entrada de aire en un extremo de un tubo metálico lleno de agua. Una válvula de vacíos se coloca al otro extremo del tubo. Cuando la punta porosa está en contacto con el suelo, existe una tendencia del agua a salir del tubo y entrar al suelo. El potencial de salida de agua del tubo es una medida de la succión o presión negativa (Figura 76).

Figura 76. Esquema de un tensiómetro



Fuente: <http://erosion.com.co/>

Típicamente, un tensiómetro es instalado con la punta porosa a la profundidad de medida y el resto queda sobre la superficie del terreno; pero, en ocasiones, los tensiómetros son enterrados dentro del suelo (Figura 75). Se requiere un mantenimiento permanente de los tensiómetros, especialmente durante los periodos secos en los cuales la entrada de aire produce difusión a través del agua.

Este aire debe ser removido para asegurarse de que la presión medida por el transductor representa la presión real de poros en el suelo y no la presión del aire dentro del tubo (Gasmó, 1997). Para medir la succión del suelo más allá del rango de los tensiómetros, se puede utilizar los sicómetros; no obstante, la precisión de los sicómetros es dudosa (Abramson et al., 2002).

### Sensores y unidades de lectura de fibra óptica

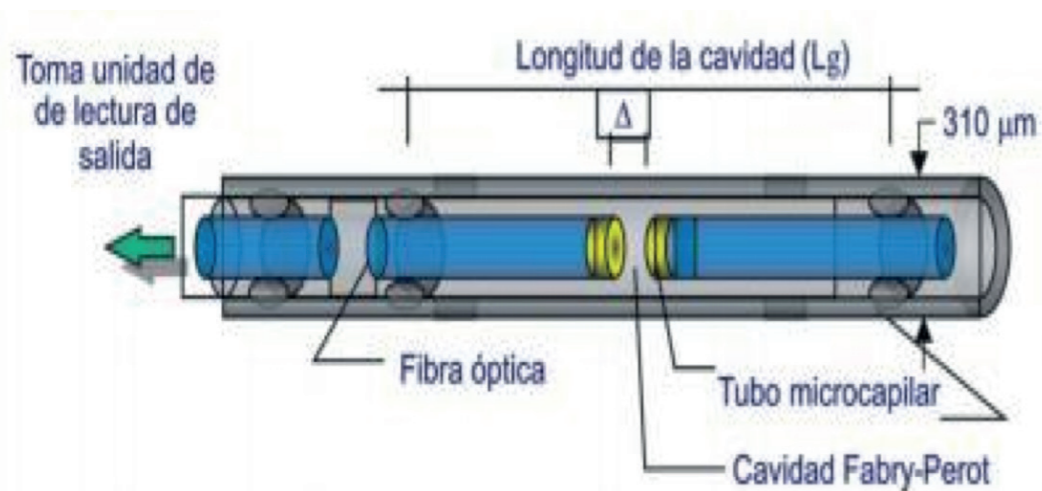
Uno de los más recientes y novedosos desarrollos en el campo de la instrumentación para ingeniería civil, especialmente en la instrumentación geotécnica y estructural, son los sensores de fibra óptica. Este nuevo tipo de sensores crea un fuerte interés en investigación y desarrollo. Varias tecnologías basadas en los diferentes principios, como interferometría de Fabry-Pérot, redes Bragg y polarimetría, están bien documentadas en la bibliografía (Udd, 1995; Culshaw & Dakin, 1996). En este caso nos centraremos en la interferometría de Fabry-Pérot (FPI), principio en el que se basan los sensores de fibra óptica de FISO, empresa canadiense creada en 1994, pionera en el desarrollo de este sistema de lectura. Básicamente, la FPI consiste en dos (2) espejos colocados uno contra el otro; al espacio que los separa se le llama longitud de la cavidad. La luz reflejada en el FPI se modula en longitud de onda en concordancia exacta con la longitud de la cavidad. Como los sensores basados en FPI convierten tensión, temperatura, carga o presión en varia-

ciones de la longitud de la cavidad, el objetivo se reduce a conseguir una manera práctica de alcanzar mediciones lo más precisas posible de la longitud de la cavidad de Fabry-Pérot.

### Sensores de presión y piezómetros

El diseño de los sensores de presión de fibra óptica, a partir de los cuales se fabrican los piezómetros, se basan en la medición sin contacto del desvío del diafragma de acero inoxidable, en contraposición a la medición de la deformación del diafragma, que es más convencional. La presión aplicada al diafragma de acero inoxidable produce un desvío en su superficie brillante. Este desvío causa una variación en el espacio, entre la superficie brillante del diafragma y la punta fija de la fibra óptica. El espacio entre la fibra óptica y el diafragma de acero se convierte en una cavidad Fabry-Pérot. La geometría y el material del transductor se seleccionan para obtener una relación lineal entre el desvío del diafragma y la presión aplicada (Figura 77).

Figura 77. Esquema de fibra óptica patentado por FISO



Fuente: [http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2\\_TH/lib106/pdf/lib106/in\\_7.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_TH/lib106/pdf/lib106/in_7.pdf) (pág. 232-233)

### Uso de los piezómetros en el estudio de los deslizamientos

Generalmente, los piezómetros se instalan como parte de las investigaciones del sitio y se implementan durante la construcción del proyecto como durante la vida útil del mismo (Tabla 13). Cabe anotar que los piezómetros descri-

tos anteriormente son para verificar y hacer seguimiento progresivo a la posición del nivel freático. Según sea el caso en estudio, es importante que la punta de los piezómetros se encuentre muy cerca o en la superficie de falla. Igualmente, es importante que se puedan medir las presiones del agua subterránea durante largos periodos de tiempo.

Tabla 13. Características generales de la instrumentación por piezómetros

Tipo	Sistema de medida	Observaciones
Pozo de observación	Tubo ranurado instalado en el interior de un sondeo cuyo nivel de agua se mide con una sonda.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medidas de niveles freáticos en terrenos permeables.</li> <li>No se deben utilizar cuando existan niveles colgados o capas artesianas.</li> <li>Tiempo de respuesta largo principalmente en terrenos poco permeables.</li> <li>Movimientos grandes pueden dañar los tubos e impedir las medidas.</li> </ul>
Piezómetro abierto	Tubo ranurado en su extremo inferior, instalado en un sondeo. El extremo inferior se sella para evitar transmisión de presiones intersticiales en el interior del tubo. La medida del nivel se realiza con una sonda.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medida de presiones intersticiales en terrenos permeables.</li> <li>Bajo costo.</li> <li>Solamente se puede instalar en un punto del sondeo.</li> <li>Tiempo de respuesta grande, principalmente en suelos poco permeables.</li> <li>Movimientos grandes pueden dañar los tubos e impedir las medidas.</li> </ul>
Piezómetro cerrado	Sensor que detecta la presión intersticial en un punto mediante un transductor que da una señal proporcional a los cambios de presión. El transductor puede ser neumático, de resistencia eléctrica o de cuerda vibrante.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permiten el control de presiones intersticiales en varios puntos de un sondeo.</li> <li>Mayor costo.</li> <li>Tiempo de respuesta corto aún en terrenos poco permeables.</li> <li>Poco afectados por los movimientos que se puedan producir en el talud.</li> <li>Los de cuerda vibrante son precisos y fiables.</li> <li>Los de resistencia eléctrica pierden precisión con variaciones de temperatura y pierden su estabilidad, a largo plazo, por señales de distancia.</li> <li>Los neumáticos son aconsejables para distancias menores de 200 m.</li> </ul>

Fuente: Auscultación de taludes, instrumentación. <http://www.galeon.com/geomecnica/cap15.pdf>

El piezómetro debe estar por encima de la superficie de falla para que no se dañe en el proceso de movimiento. Si el sensor se encuentra muy profundo, este, los tubos o los cables, pueden dañarse o ser destruidos al moverse la masa activa. Igualmente, si el piezómetro se introduce en la roca o suelo duro, o muy profundo, las presiones de poros son generalmente menores que las del deslizamiento. Si el sensor se encuentra muy superficial, las mediciones de presión de aguas pueden ser incorrectas; incluso, pueden ser mayores que la presión en la superficie de movimiento.

Otra decisión importante es definir el tipo de piezómetro, que puede ser de respuesta rápida como el piezómetro de hilo vibrátil o el neumático, o de respuesta lenta como el de cabeza abierta. El piezómetro de cabeza abierta generalmente es el más utilizado en suelos granulares de alta permeabilidad, y los de hilo vibrátil o neumáticos son más complejos, y se recomiendan para suelos cohesivos de baja permeabilidad.

Finalmente, la Tabla 14 describe las tecnologías modernas y su cobertura, eficacia, tipo de operación y limitaciones.

**Tabla 14.** Descripción de las tecnologías utilizadas en la medición y monitoreo de condiciones topográficas

Tecnología	Georadar terrestre	LiDAR terrestre	Cámara de deformación	Estación total	GNSS (GPS)	Georadar (satélite)
Tipo	Medición remota en 2D	Medición remota en 2D	Medición remota en 2D	Medición de puntos remotos	Medición de puntos locales	Medición remota en 2D
Precisión	Por debajo de los mm	A pocos cm	A pocos cm	A pocos mm	Alrededor de 1 cm	mm-cm
Cobertura	Rango: hasta 5 km Cobertura: muchos km <sup>2</sup>	Rango: hasta 4 km Cobertura: muchos km <sup>2</sup>	Rango: hasta 5 km Cobertura: muchos km <sup>2</sup>	Rango: muchos km Cobertura: muchos km <sup>2</sup>	Lo que sea necesario. Grandes áreas requieren muchas unidades GPS	Muchos km <sup>2</sup> al este y pendientes orientadas al oeste.
Efectividad	Siempre (día/noche, lluvia, nieve, niebla), rápida instalación.	Solo en buen clima (no lluvia, nieve o niebla), rápida instalación.	Solo en buena visibilidad (buen clima, durante el día), rápida instalación.	Visibilidad requerida (buen clima, día o noche).	Siempre (día/noche, lluvia, nieve, niebla).	Dependiendo del intervalo de retorno del satélite, los datos archivados están disponibles.
Tipo de operación	Continua o periódica	Periódica	Continua o periódica	Continua o periódica	Continua o periódica	Periódica
Limitaciones	Vegetación, nieve, reflexión (por ejemplo, en la red de desprendimientos de rocas).	Análisis automatizado difícil, complicado para mediciones continuas, nieve.	Se requiere una capa de nieve de alto contraste, no adecuada para inestabilidades agudas.	Los espejos de medición puntual deben montarse en un área inestable, la medición puede ser imposible cuando la situación cambia, nieve.	Solo la medición de puntos, se requiere acceso al área en movimiento, la visibilidad por satélite puede ser complicada en valles estrechos.	La cobertura puede ser problemática, los intervalos de retorno demasiado largos para inestabilidades agudas, nieve, vegetación.

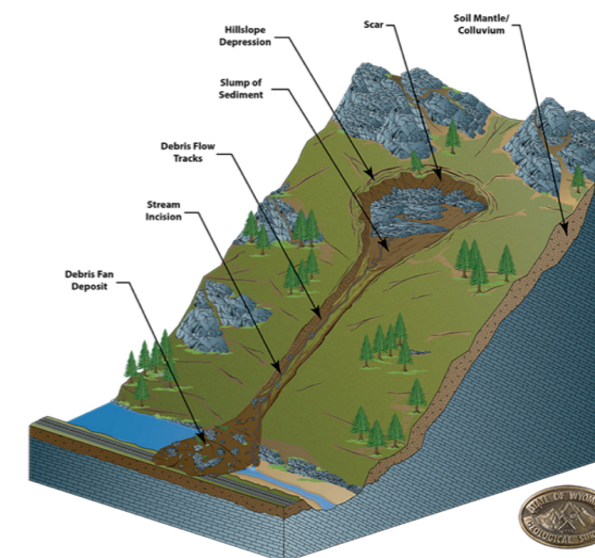
Fuente: GEOPREVENT (2019)

#### 2.4. Movimientos de masa: flujo de escombros o huaicos Procesos y mecanismos formativos

Dependiendo de la intensidad de precipitaciones en las partes altas de las cuencas, se pueden presentar erosiones importantes que describen la iniciación de los flujos de lodo y escombros en quebradas, siempre y cuando exista material disponible para movilizarse (Armanini *et al.*, 2005). Estos flujos, a medida que se desplazan, comienzan a interactuar con el lecho inicial de la quebrada y con los sedimentos superficiales (finos y gruesos), en zonas con gradientes importantes (Takahashi, 1991), para luego incrementar esa interacción a los sedimentos subsuperficiales (Figura 77). Los sedimentos gruesos describen mecanismos de colisión

entre partículas (disminución de la energía donde los esfuerzos de dispersión son importantes), haciendo que las partículas más grandes y pequeñas se encuentren más cerca de la superficie y cerca del lecho, respectivamente, mientras que los sedimentos finos se encuentran mezclados en la columna de agua. Los flujos de lodo (tamaño de sedimentos menor a 0,0625 mm) y escombros (material granular y ramas que presentan variaciones de propiedades de densidad y viscosidad, y comportamientos, flujos supercríticos y turbulentos), espacial y temporalmente distribuidos, son coloquialmente denominados huaicos. Los huaicos se presentan en muchas regiones del Perú y muy poco o casi nada se sabe de los procesos físicos que dominan su formación.

**Figura 78.** Flujos de escombros y sus principales zonas



Fuente: USGS

En el huaico, el flujo de lodo es turbulento (velocidades menores a 15 m/s) y la resistencia está controlada por el lecho de la quebrada (García *et al.*, 2008a). Usualmente, estos flujos pueden viajar distancias largas y ayudan a transportar materiales más gruesos, como material granular (García *et al.*, 2008a), además de representar una mezcla de estos y otros materiales, como restos de árboles, considerándose como flujos no cohesivos. Rickermann (1991) describió

que cuando la densidad y viscosidad del fluido (agua y sedimentos) se incrementan en flujos hiperconcentrados, la tasa de transporte de fondo también se incrementa. La fenomenología de estos flujos recae en parámetros como dilatación, fricción interna y cohesión, fluidización y segregación de partículas (Hutter *et al.*, 1996). Para mayor descripción acerca de la reología y comportamiento cinemático de estos flujos, referirse a García *et al.* (2008).

En el mundo, algunos modelos reológicos para predecir el comportamiento de estos flujos se encuentran disponibles (O'Brien *et al.*, 1985, 1993; Hutter *et al.*, 1996; Medina *et al.*, 2008; Pudasini, 2012; Pastor, *et al.*, 2014), pero el entendimiento físico de estos procesos (mecanismos que dominan la iniciación de huaicos en pendientes altas, la trayectoria de las partículas granulares y del flujo de lodo, y su consecuente deposición en zonas de baja pendiente) y la disponibilidad y cantidad de datos necesarios para la calibración/validación hace indispensable enfocarse en este estudio para determinar los parámetros físicos necesarios antes, durante y después del huaico (Martini *et al.*, 2009), logrando así un entendimiento físico de los procesos de mecánica de fluidos, transporte de sedimentos finos y gruesos y su consecuente formación de morfología.

En las zonas de competencia de la ARCC, como por ejemplo en la cuenca del río Rímac (más específico en el distrito de Chosica), se ha identificado que existen muchas quebradas que se activan constantemente (INDECI, 2005; Chien-Yuan *et al.*, 2005) durante las épocas de lluvia de gran intensidad (enero-marzo) y también durante los eventos de El Niño (Quinn *et al.*, 1987). De acuerdo con la pendiente de las quebradas, la carga de sedimentos se incrementará (García *et al.*, 2008a), lo que se traduce en una mayor vulnerabilidad y peligro para las personas que ahí habitan (INDECI, 2005). Se estima que luego de la ocurrencia de El Niño costero 2017 (Figura 79), alrededor de 822 puentes, 700 hospitales y casi 9000 km de carreteras fueron dañadas en todo el Perú, lo que equivale a alrededor de US\$ 4 millones en pérdidas, de acuerdo con el Informe Situación Perú de abril del 2017 (BBVA Research, 2017).

**Figura 79.** Pérdidas en la infraestructura del inadecuado ordenamiento territorial, que pone en riesgo la seguridad de las personas y los expone al impacto de los huaicos en las quebradas de Chosica



Fuente: <https://diariocorreo.pe/ciudad/huaicos-una-historia-que-se-repite-cada-ano-575776/>

Medina *et al.* (2008) describieron que una de las deficiencias en la aplicación de modelos reológicos para la predicción de huaicos es la falta de datos, tanto de la caracterización de los sedimentos del cauce antes de la ocurrencia del huaico, como de las propiedades de estos fluidos. A la fecha, no existe un banco de datos sistematizado en monitoreo de sedimentos producidos por las quebradas, ni tampoco se comprende la geodinámica alrededor de estos flujos. Por tanto, surge la necesidad de monitorear las quebradas a escala natural para describir patrones hidrosedimentarios, concentraciones de sedimentos, trayectorias lagrangianas de partículas gruesas y los escombros, y patrones de interacción con infraestructura, como puentes, muros y carreteras.

El estudio de la dinámica temporal y espacial de los flujos de lodos y escombros (huaicos) es una herramienta útil en los planes de reordenamiento de las comunidades y asentamientos humanos que se ubican en los alrededores de las quebradas en zonas vulnerables, especialmente las que potencialmente ocasionan los huaicos cuando se activan (INDECI, 2005).

#### Variables generales de caracterización de flujos de escombros

Los flujos de escombros o flujos de lodos se presentan en dominios muy complejos, que se activan rápidamente ante el incremento de las lluvias, por ende, existen variables dominantes hidrológicas, sedimentológicas, geomorfológicas, que podrían verse modificadas por proyectos ingenieriles (de acuerdo con la infraestructura desarrollada). Un ejemplo de la evaluación de la potencial ocurrencia de flujos de escombros fue presentado por Tiranti *et al.* (2018), donde se combina información geotécnica, geológica, conectividad de sedimentos y los diferentes procesos (canalización) que puedan ocurrir, para luego aplicar un modelo matemático que permite estimar escenarios de potencial ocurrencia de flujo de escombros.

#### Variables hidrológicas e hidráulicas

**Parámetros previos o formativos a los flujos de escombros.** Desde la hidrología, se tienen los siguientes parámetros:

- Intensidad de lluvia
- Lluvia acumulada
- Lluvia histórica

**Parámetros durante la ocurrencia de flujo de escombros.** Arattano y Marchi (2008) describieron parámetros hidráulicos del flujo de escombros, como:

- Profundidades promedio del flujo en la zona formativa y en la zona de deposición. Además, es importante conocer la variación temporal de estas variables.
- Caracterización del frente del flujo de escombros: durante la iniciación del flujo de escombros es importante reconocer las características del flujo (velocidad del frente, altura del frente), así como cuánto tiempo tarda para establecer un flujo promedio y cuáles son las zonas erosionables y de deposición que permitan correlacionar el flujo y la consecuente geomorfología.
- Caracterización del flujo medio: es importante conocer las velocidades superficiales y promedias del flujo de escombros, con ello podremos entender las capacidades erosivas y formativas. De ser posible, se deberían monitorear los esfuerzos cortantes que ayudarían a entender la capacidad erosiva del flujo.
- Viscosidad del flujo de escombros.
- Presión de poros.
- Fuerza de impacto.

#### Variables geomorfológicas y sedimentológicas

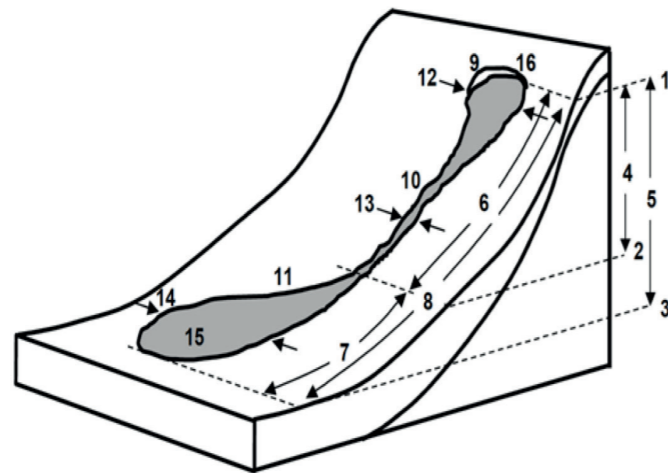
Durante la ocurrencia de flujos de escombros, se deben realizar mediciones temporales y espaciales de la composición del flujo de escombros. La distribución de sedimentos es necesaria para entender los procesos hidrosedimentológicos de las quebradas. Es por ello por lo que se definen a continuación los parámetros a monitorear:

**Parámetros durante la ocurrencia de flujo de escombros**

- Distribución espacial y temporal de los sedimentos
- Zonas de erosión y deposición

**Parámetros geomorfológicos post-flujo de escombros.** Lorente *et al.* (2003) describieron los parámetros a monitorear post flujos de escombros (ver Figura 80).

**Figura 80.** Parámetros para monitorear en flujos de escombros



Extraído de Lorente et al. (2003)

Estas variables para monitorear son:

- |  |   |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ALTSCAR: la altitud a nivel del mar de la parte más alta del flujo de escombros (m).</li> <li>2. ALTBASE: la altitud a nivel del mar donde comienza la zona de deposición del flujo de escombros (m).</li> <li>3. ALTDEP: la altitud a nivel del mar donde el cono de deyección (m).</li> <li>4. Dh: diferencia en altura (m) entre ALTSCAR y ALTBASE.</li> <li>5. DhTOT: diferencia en altura (m) entre ALTSCAR y ALTDEP.</li> <li>6. LONGITUD FORMATIVA: longitud total (m) del flujo de escombros desde la parte superior hasta el inicio de la zona de deposición.</li> <li>7. LONGITUD DE DEPOSICIÓN: longitud (m) de la zona de deposición, usualmente se conoce como RUNOUT.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>8. LONGITUD TOTAL: LONGITUD FORMATIVA + LONGITUD DE DEPOSICIÓN.</li> <li>9. SCAR: gradiente promedio (grados) del talud no erosionado en la parte superior.</li> <li>10. CANAL: gradiente promedio (grados) del canal de formación.</li> <li>11. BASE: gradiente promedio (grados) de la zona de deposición.</li> <li>12. SCAR2: ancho promedio (m) de la zona inicial de erosión.</li> <li>13. CANA2: ancho promedio (m) del canal formativo.</li> <li>14. BASE2: ancho promedio (m) de la zona de deposición.</li> <li>15. VOLUMEN: volumen estimado (m<sup>3</sup>) de material movilizad de acuerdo con la geometría de la erosión superior (SCAR).</li> </ol> |
|--|---|

16. SOIL: profundidad promedio (m) de la zona erosiva superior:

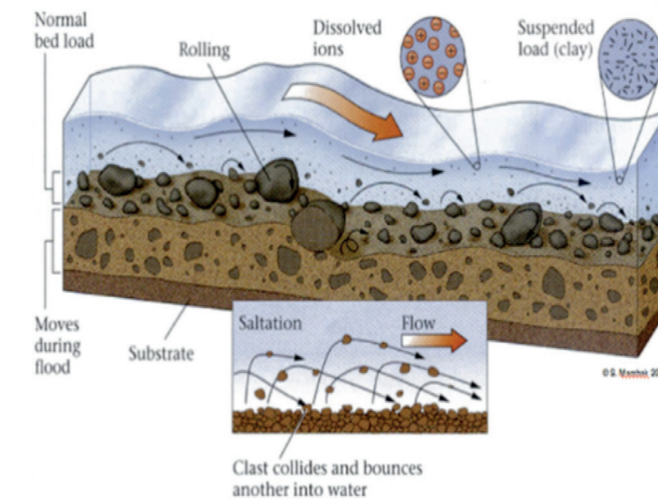
**Transporte de sedimento sobre cauces naturales**

La cantidad de sedimento que es erosionado, transportado y depositado en cauces, ríos, lagos o reservorios es sumamente importante en el manejo de cuencas. El excesivo suministro de material transportado por los sistemas fluviales es un indicativo de las altas erosiones que se producen en la cuenca y la generada por estos. En este sentido, la deposición excesiva puede tener un impacto negativo en la dinámica evolutiva del cauce. El transporte de sedimento en cauces es la tasa de sedimento transportado sobre una sección transversal, usualmente medida en (mg/l) o partes por millón (ppm). Dependiendo de la capacidad de energía

del cauce (velocidades, pendiente de superficie, pendiente del fondo, disponibilidad de sedimento), la presencia de otros aportes o fuentes de sedimento, la carga posible a transportar será variable.

Entonces se iniciará el movimiento del sedimento que se encuentra en el lecho del cauce cuando la hidrodinámica presente y ejerza un esfuerzo superior al que lo mantiene en su lugar. Una vez en movimiento, el sedimento permanecerá suspendido o mantendrá contacto permanente o impermanente con el fondo. Es así cómo se pueden distinguir tres (3) mecanismos de transporte de sedimento en un cauce fluvial: (i) carga de lavado (washload), (ii) transporte en suspensión (suspended load) y (iii) transporte por fondo (bed load) (Figura 81).

**Figura 81.** Mecanismos de transporte de sedimentos provocados por un cauce



Adaptado de Marshak (2005)

La carga de lavado se produce cuando se movilizan partículas de tamaños menores a los 0,0625 mm (limos y arcillas). Este tipo de transporte se caracteriza por recorrer grandes extensiones, dado que pueden mantenerse en movimiento aun con velocidades muy bajas. La particularidad de este transporte se encuentra en que la presencia del sedimento

puede no deberse a la condición energética local, sino al suministro de sedimento aguas arriba. El transporte en suspensión se produce en partículas de tamaños superiores a los 0,0625 mm (arenas finas, medias, gruesas y gravas). Este tipo de transporte suele interactuar con el fondo del cauce, ya que puede ser depositado o resuspendido dependiendo

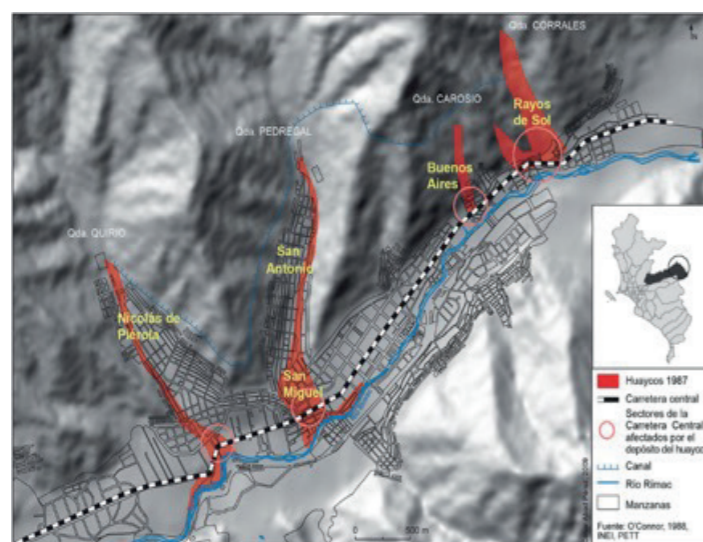
fuertemente de las condiciones locales de energía del cauce. Por último, el mecanismo de transporte de fondo se produce debido al arrastre, rodamiento o saltación del material sedimentológico que conforma el fondo de los cauces.

Cuando la condición energética del cauce se reduce o cambia abruptamente, debido a una expansión, laguna o delta, se desarrolla una desaceleración del flujo y el sedimento transportado es depositado desde las partículas de mayor a menor tamaño. Esto desarrolla una zona compuesta de un material nuevo que puede potenciar el crecimiento de la vegetación, dado los nutrientes transportados por el cauce.

### Métodos de medición

La iniciación de los flujos de escombros está relacionada a los patrones de precipitación y la capacidad erosiva de sedimentos en las quebradas. En la Figura 82 se muestran los huacos que se presentaron el año 1987 en la zona de Chosica, río Rímac. Se observa que esta zona es bastante activa y que tiene una producción sedimentaria importante para el equilibrio hidrosedimentológico del río Rímac. No solamente es importante el mapeo de la cantidad de sedimentos de entrega, también es importante las zonas de erosión y deposición, pues podrían cambiar las condiciones hidrogeomorfológicas locales en el río.

**Figura 82.** Huaicos del 1987 en la zona de Chosica, río Rímac



Fuente: Abad (2020)

Es importante combinar estaciones pluviométricas puntuales con información espacial de teledetección (por ejemplo, PISCO) para entender las intensidades y duraciones de los eventos de lluvia, y determinar los umbrales bajo los cuales se desarrollan los flujos de escombros; obviamente considerando las características geológicas y geomorfológicas de la zona (Pan *et al.*, 2018). Los equipos e instrumentos para el monitoreo de flujo de escombros son amplios; sin

embargo, una buena revisión de ellos se presenta en Itakura *et al.* (2005). En este informe se presentan algunos estudios realizados para entender el proceso de flujo de escombros.

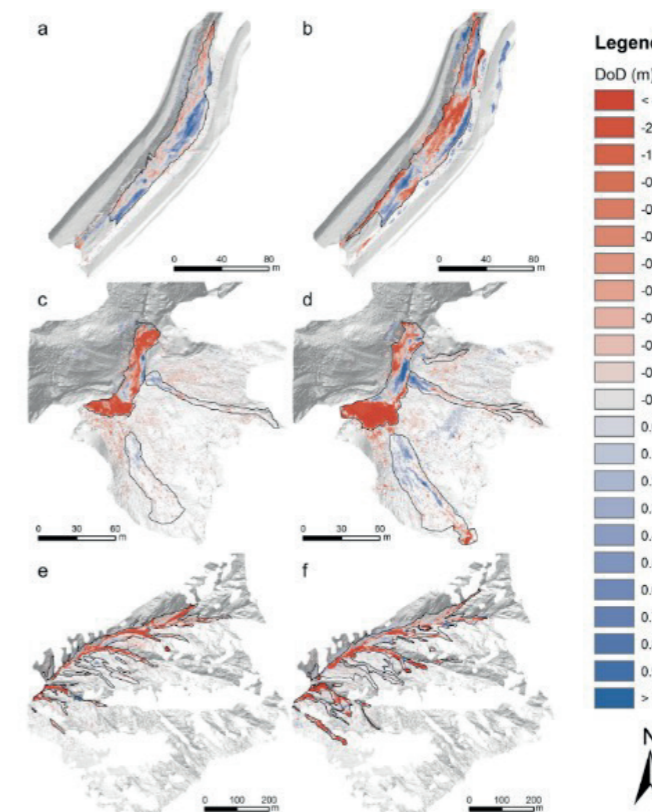
### Morfología y producción sedimentaria

Son recomendables las mediciones topográficas utilizando estación total, drones (para fotogrametría) y levantamiento LiDAR para describir el relieve, eso antes y después de los

eventos de flujo de escombros; con estas mediciones repetidas se pueden estimar las fuentes de sedimentos, el volumen de sedimentos producidos y transportados en un evento o una serie de eventos. Idealmente, también se deberá recopilar información del material que se transporta, de la tasa de transporte y la concentración de sedimentos finos. Jaboyedoff *et al.* (2012) presentó una revisión del uso de LiDAR para las investigaciones en deslizamientos con aplicaciones en 1) detección y caracterización de movimientos de masa,

2) evaluación de peligros y susceptibilidad cartográfica, 3) modelamiento y 4) monitoreo del proceso. Es así como los estudios donde se utiliza LiDAR se han masificado y son parte cotidiana de ellos (Morino *et al.*, 2018). Blasone *et al.* (2014) delimitaron la fuente de sedimentos en una quebrada a través de mediciones continuas (usando tecnología LiDAR) para detectar cambios en la geomorfología ocurridas después de tres (3) eventos de flujo de escombros en la zona de Moscardo, Alpes italianos (Figura 83).

**Figura 83.** Diferencias en mediciones topográficas en diferentes zonas (a, c y e: evento 2-evento 1; b, d y f: evento 3-evento 2)

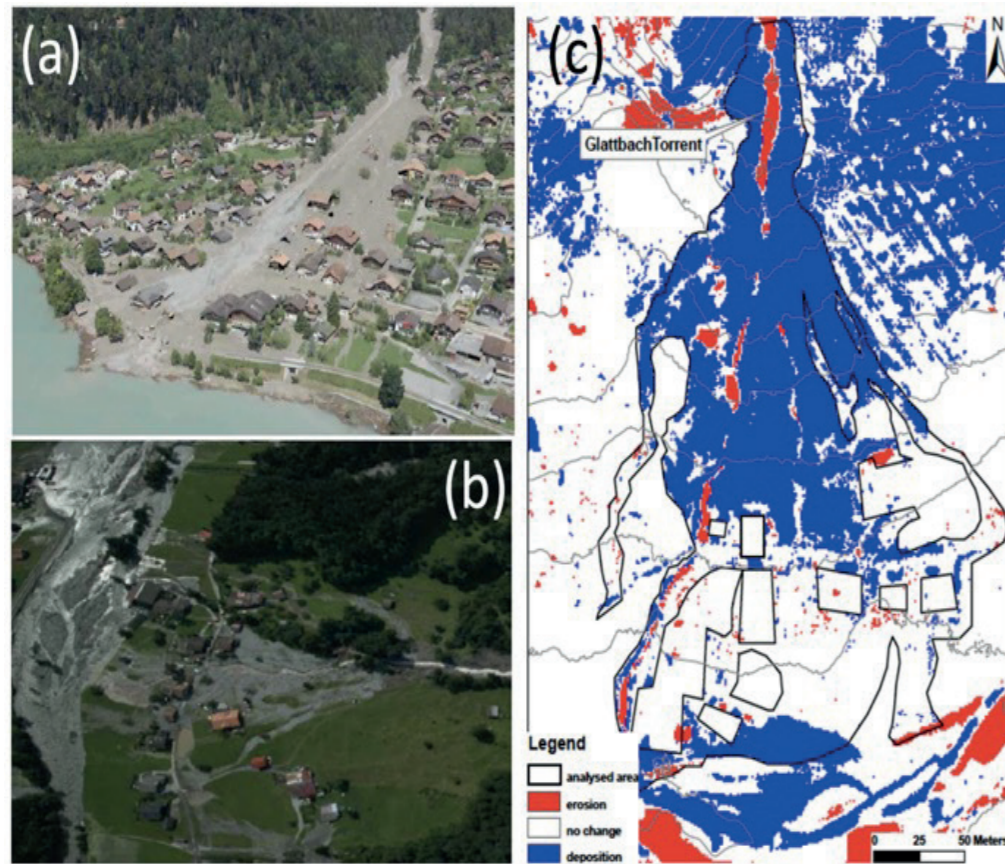


Fuente: Blasone *et al.* (2014)

Scheidt *et al.* (2008) presentaron el uso de LiDAR aéreo para estimar los volúmenes de deposición basado en la comparación de mediciones del terreno en dos (2) tem-

poradas distintas en la zona de Berne, Suiza (ver Figura 84), donde se pudieron observar zonas de erosión, deposición y donde no ha existido cambio debido al flujo de escombros.

**Figura 84.** (a) Cono de deposición en Brienz (Glyssibach, agosto 2005), (b) Cono de deposición en Glattbach (agosto 2005) y (c) Diferencia de mediciones continuas con LiDAR en la zona de deposición de Glattbach



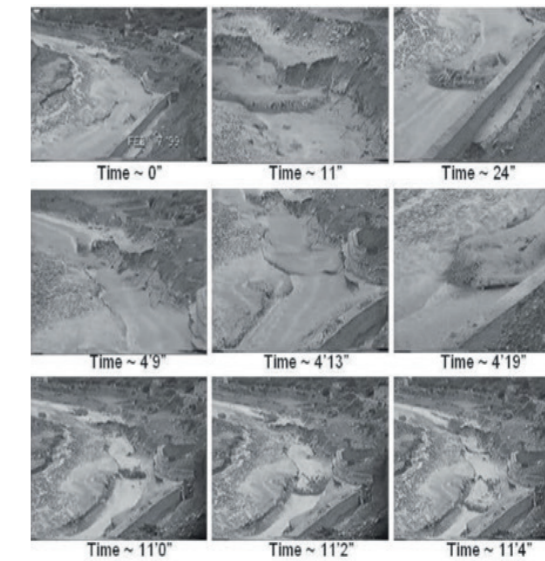
Fuente: Scheild et al. (2008)

### Dinámica del flujo de escombros

Los flujos de escombros se desarrollan abruptamente y, en muchas aplicaciones se busca monitorear la iniciación del proceso, sobre todo las características del frente (profundidad, velocidad), esto para los sistemas de alerta temprana (Hurliman et al., 2016); sin embargo, una vez que el flujo es continuo también es necesario monitorear para caracteri-

zar las zonas de alcance del flujo, zonas de deposición, así como la cantidad de sedimentos producidos y transportados durante todo el evento. La Figura 85 muestra el flujo de escombros y lodos en la zona de Iruya, Argentina, y cómo el frente se desplaza en minutos, aunque el evento puede llegar a durar horas (por ejemplo, 2,5 horas en la cuenca Faucon, Alpes, Francia; Remaitre et al., 2005).

**Figura 85.** Imágenes multitemporales de flujo de escombros en Iruya, Salta, Argentina (7 de febrero de 1999)



Fuente: García et al. (2008a)

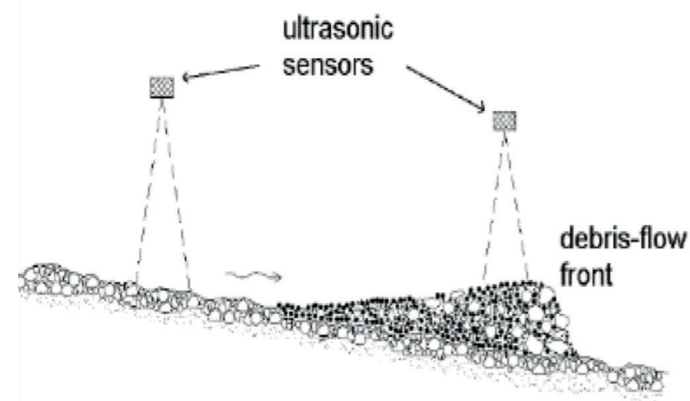
Mikos et al. (2014) describen las diversas tecnologías (Acústicas, Radar, Láser) para monitorear (no intrusivamente) estos flujos complejos. Las Figura 86 y Figura 87 muestran algunas configuraciones de equipos utilizados en Austria y Suiza.

**Figura 86.** Ejemplos de mediciones de profundidad de flujos de escombros en Lattenbach (Austria) y Illgraben (Suiza)



Fuente: Mikos et al. (2014)

**Figura 87.** Mediciones de profundidad del flujo de escombros en dos estaciones distintas

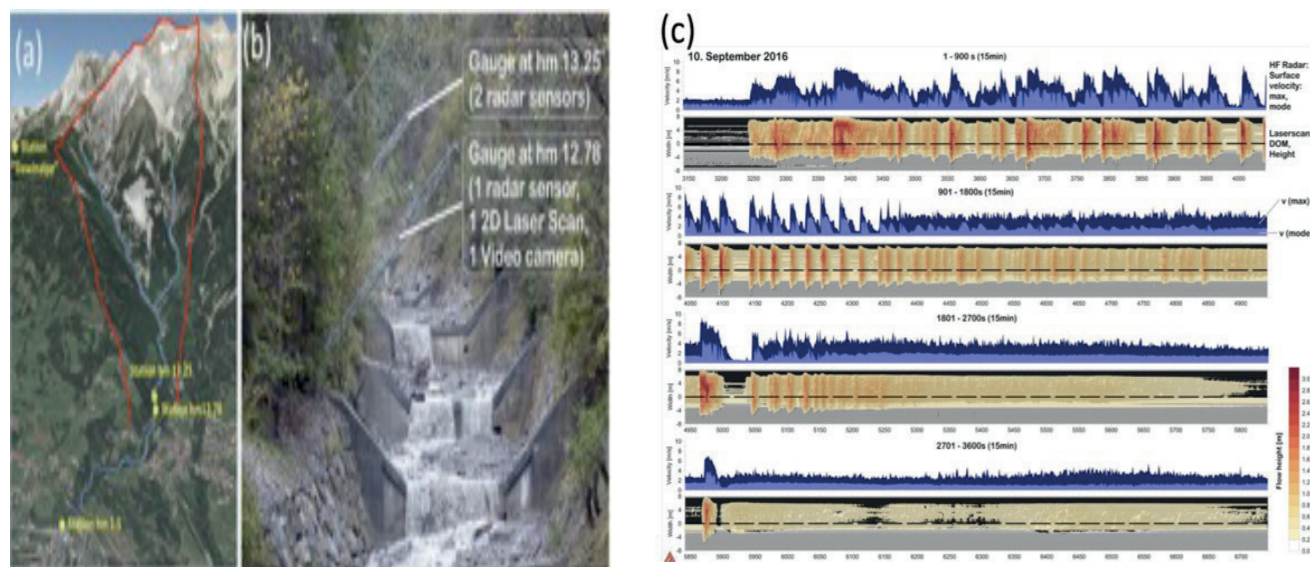


Fuente: Arattano & Marchi (2008)

Hubl *et al.* (2018) presentaron un estudio en la zona de Lattenbach (Austria) en el cual existe una intervención (diques transversales) en la quebrada y se monitorea con una serie de sensores. La Figura 88 muestra la zona de estudio

(a), la zona de intervención y los equipos instalados (b), así como mediciones continuas de velocidades superficiales, profundidad del flujo de escombros para el evento del 10 de septiembre del 2016.

**Figura 88.** (a) Cuenca de Lattenbach (Austria), (b) equipos y vista de la quebrada intervenida, (c) vista en planta de la quebrada mostrando la evolución temporal de las velocidades superficiales (m/s), la profundidad del flujo (m) para el evento del 10 de septiembre del 2016

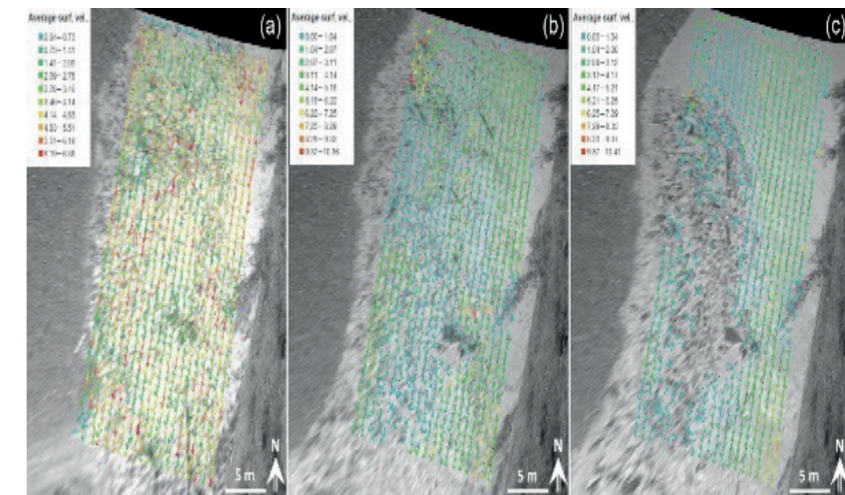


Fuente: Hubl *et al.* (2018)

Similarmente, Thuele *et al.* (2018) describieron el uso de la técnica de LSPIV (*large-scale particle image velocimetry*) para monitorear un evento de flujo de escombros en la cuenca de Gatria, en los Alpes italianos. La Figura 89 muestra las

velocidades superficiales en tres (3) zonas del flujo (frente, cuerpo medio y cola). Con esta técnica se puede monitorear en tiempo real, previa calibración, la dinámica de flujos de escombros.

**Figura 89.** Velocidades superficiales usando la técnica de LSPIV para (a) frente, (b) medio, y (c) cola del flujo de escombros



Fuente: Thuele *et al.* (2018)

Además, al mapeo de las fuentes de sedimentos, del flujo complejo durante el evento, es importante obtener muestras de los sedimentos transportados y luego depositados. Mikos *et al.* (2014) presentan en la Figura 90 una aplicación de equipos para extraer sedimentos durante un evento, es importante conocer la concentración y propiedades de los sedimentos.

al. (2014) presentan en la Figura 90 una aplicación de equipos para extraer sedimentos durante un evento, es importante conocer la concentración y propiedades de los sedimentos.

**Figura 90.** Ejemplos de mediciones de sedimentos y del flujo de escombros (Jiangia Gou, China). Parámetros extraídos son: densidad de la mezcla, concentración de sedimentos y parámetros reológicos



Fuente: Mikos *et al.* (2014)



## Bibliografía

Abad, C. (2020). , Huaicos en 1987 en el distrito de Lurigancho-Chosica (Lima-Perú), Bulletin de l'Institut français d'études andine, 38 (3), URL : <http://journals.openedition.org/bifea/2272>; DOI: <https://doi.org/10.4000/bifea>.

Abramson L.W., Lee T.S., Sharma S, Boyce G.M. (2002) "Slope Stability and Stabilization Methods" Second Edition. John Wiley & Sons Inc. New York. pp. 702

Armanini, A., Fraccarollo, L., Larcher, M. (2005). Debris flow, Encyclopedia of Hydrological Sciences, Edited by M. G. Anderson: 2173-2185.

Ashouri, Hamed, Gehne, Maria & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 06 Nov 2020. "The Climate Data Guide: PERSIANN-CDR: Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Climate Data Record." Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/persiann-cdr-precipitation-estimation-remotely-sensed-information-using-artificial>

ASTM (1985). Classification of Soils for Engineering Purposes: Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials.

BBVA Research (2017). Informe Situación Perú: abril 2017. <https://peru21.pe/economia/dano-ocasionado-fenomeno-ni-no-seria-us-4-016-millones-73520>

Blasone, G., Cavalli, M., Marchi, L., Cazorzi, F. (2014). Monitoring sediment source areas in a debris-flow catchment using terrestrial laser scanning, Catena 123: 23-36.

Brauman, K.A., Van Der Meulen, S., & Brils, J. (2014). Ecosystem services and river basin management. In Risk-Informed Management of European River Basins (pp. 265-294). Springer, Berlin, Heidelberg.

Bringi, V.N. and V. Chandrasekar. (2001). Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications. Cambridge University Press.

British Columbia. Ministry of Forests. (2001). Gully assessment procedure guidebook. 4th ed., Version 4.1. For. Prac. Br., Min. For., Victoria, Forest Practices Code of British Columbia Guidebook.

Brookfield, H. (1999). Environmental damage: distinguishing human from geophysical causes. Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards, 1(1), 3-11.

Brooks, K. N, P.F. Ffolliott, and J. A. Magner. (2013). Hydrology and the management of watersheds. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Carter, J.R., and Gamble, C.R., (1963), Tests of crest-stage gauge intakes. United States Geological Survey open-file report, Water Resources Division, Washington D.C.

Castrillón Torres, C., & Quintero Franco, J. D. (2012). Guía de instrumentación en taludes intervenidos por un proyecto vial (Bachelor's thesis, Universidad de Medellín).

Cornforth, D. H. (2005). Landslides in practice. Investigation, Analysis and Remedial/Preventive Options in Soil, 14-15.

Chien-Yuan, C., Tien-Chien, C., Fan-Chieh, Y., Wen-Hui, Y., Chun-Chieh, T. (2005). Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring. Environmental Geology, 47: 715-724.

Corominas, J., Gili, J. A., & Rius, J. (2000). Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. *Engineering geology*, 55(3), 167-192.

Domínguez Ruben, L., Szupiany, N., Latosinski, F., Lopez Weibel, C., Wood, M., Boldt J., (2020). Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET): A software package for calibrating and processing TRDI ADCP data to compute suspended-sediment transport in sandy rivers. *Computers & Geosciences*, 140, 104499, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104499>.

Dunncliff, J. (1993). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. John Wiley & Sons.

Edwards, T. K., and Glysson, G. D. (1999). Field methods for measurement of fluvial sediment. *Techniques of water resources investigations of the U.S. Geological Survey, Book 3, Applications of Hydraulics, C2*, U.S. Geological Survey, Washington, D.C.

Feyisa GL, Meilby H, Fensholt R, Proud SR. (2014). Automated water extraction index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sens Environ.* 140: 23–35.

Friday, John, (1965) Tests of crest-stage intake systems. United States Geological Survey open-file report.

Froehlich, D. & Dhawan. (2017). Guidelines for Instrumentation of Large Dams. Report number: Doc. No. CDSO\_GUD\_DS\_02\_v1.0.

Fry, M., Ponette-González, A., y Young, K, (2014), A Low-Cost GPS-Based Protocol to Create High-Resolution Digital Elevation Models for Remote Mountain Areas, *Mountain Research and Development*, 35(1):39-48. DOI: <http://dx.doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00065.1>.

García, M. H., MacArthur, R. C., French, R., Miler, J., Bradley, J., Grindeland, T., Hadley, H. (2008a). Sedimentation Hazards, Chapter 19, *ASCE Sedimentation Manual* (M.H. Garcia, Eds).

García, M. H., P. Diplas, R. Kuhnle, J. Gray, D. Glysson, and T. Edwards, H. (2008b). Sediment Transport Measurements, Chapter 5, *ASCE Sedimentation Manual* (M.H. Garcia, Eds)

Gasmo, J. (1997). Stability of unsaturated residual soil slopes as affected by rainfall (Doctoral dissertation, Nanyang Technological University, School of Civil and Structural Engineering).

Gong, P. (2006) Information extraction. In: M Ridd, JD Hipple (eds), *Remote sensing of human settlements*. ASPRS, Bethesda, MD, pp 275–334

Gonzales de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid

Guan, Y., Yang, S., Zhao, C., Lou, H., Chen, K., Zhang, C., Wu, B (2021), Monitoring long-term gully erosion and topographic thresholds in the marginal zone of the Chinese Loess Plateau, *Soil and Tillage Research*, <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104800>.

Hart, E. A., Mills, H. H., & Li, P. (2017). Measuring erosion rates on exposed limestone residuum using erosion pins: a 10-year record. *Physical Geography*, 38(6), 541-555.

Heede, B. H. (1967) The fusion of discontinuous gullies: A case study. *Bull. Int. Assoc. Hydrol. Sci.* 12(4):4250.

Hubl, J., Schimmel, A., Koschuch, R. (2018). Evaluation of different methods for debris flow velocity measurements at the Lattenbach Creek. *Symposium Proceedings of the INTERPRAENENT*, p 2-8.

Hutchinson, J. N. (1988). General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In *International symposium on landslides*. 5(pp. 3-35).

Hutter, K., Svendsen, B., & Rickenmann, D. (1994). Debris flow modeling: A review. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 8(1), 1-35.

IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA. (2010). Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CO-RINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del Río Grande de La Magdalena. Bogotá, D.C., 200p

International Atomic Energy Agency (IAEA) (2005), *FLUVIAL SEDIMENT TRANSPORT: ANALYTICAL TECHNIQUES FOR MEASURING SEDIMENT LOAD* IAEA, VIENNA, 2005 IAEA-TECDOC-1461.

Itakura, Y., Inaba, H., Sawada, T. (2005). A debris-flow monitoring devices and methods bibliography. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5: 971-977.

Jensen J (2005) *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*, 3rd ed. Prentice-Hall, New Jersey

Jiménez, F. 2009. Introducción al manejo y gestión de cuencas. En *Curso de Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas* I. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 31 pp

Lam, N. S. N. (2008). Methodologies for mapping land cover/land use and its change. In *Advances in land remote sensing* (pp. 341-367). Springer, Dordrecht.

Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual review of environment and resources*, 28(1), 205-241.

Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., Garcia, C. M., Guerrero, M. y Amsler, M. L. (2014), Estimation of concentration and load of suspended sediment in a large river by means of Doppler technology, *Journal of Hydraulic Engineering*, DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000859, 140(7), 04014023.

Latosinski, F., Szupiany, R. N., Guerrero, M., Amsler, M., y Vionnet, C. (2017), The ADCP's bottom track capability for bedload prediction: Evidence on method reliability from sandy river applications, *Flow Measurement and Instrumentation*, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.01.005>.

Latosinski, F., Szupiany, R., Guerrero, M., Amsler, M., Vionnet, C., (2017), The ADCP's bottom track capability for bedload prediction: Evidence on method reliability from sandy river applications, *Flow Measurement and Instrumentation*, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.01.005>.

Latrubesse, E. M., Arima, E., Ferreira, M. E., Nogueira, S. H., Wittmann, F., Dias, M. S., Dagosta, F. C. P. & Bayer, M. (2019). Fostering water resource governance and conservation in the Brazilian Cerrado biome. *Conservation Science and Practice*, 1(9), e77.

Leopold, L.B., Wolman, M.G., and Miller, J.P. (1964). *Fluvial processes in geomorphology*: San Francisco, W.H. Freeman and Co., 522 p.

Li, L., Nearing, M. A., Nichols, M. H., Polyakov, V. O., and Cavanaugh, M. L. (2020) Using terrestrial LiDAR to measure water erosion on stony plots under simulated rainfall. *Earth Surf. Process. Landforms*, 45: 484– 495. <https://doi.org/10.1002/esp.4749>.

Lorente, A., Begueria, S., Bathurst, J.C., Garcia-Ruiz, J. M. (2003). Debris flow characteristics and relationships in the Central Spanish Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 1-9.

Mather, A.S. (2006a). Proximate causes. In: Geist HJ (ed.) *Our Earth's changing land: An encyclopedia of land-use and land-cover change*, vol. 2 (L-Z). Greenwood Press, Westport, London, pp 490-495

Mather, A.S. (2006b). Driving forces. In: Geist HJ (ed.) *Our Earth's changing land: An encyclopedia of land-use and land-cover change*, vol. 1 (A-K). Greenwood Press, Westport, London, pp 179-185

Mcfeeters SK. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int J Remote Sens.* 17(7):1425-1432.

Medina, V., Hurlimann, M., Bateman, A. (2008). Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula. *Landslides*, 5: 127-142.

Meijerink, A. M. J. (1988). Data acquisition and data capture through terrain mapping units. *ITC-Journal* (Netherlands).

Mikos, M., Macek, M., Sodnik, J. (2014). Practice Guideline on monitoring and warning technology for debris flows. Geological Survey of Slovenia,

MINAM (2015). Mapa nacional de cobertura vegetal : memoria descriptiva / Ministerio del Ambiente, Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural. Lima.

Morgan, R. P. C. (1995), Soil erosion and conservation. Longman Group Limited, Essex, England.

Morino, C., Conway, S. J., Balme, M. R., Hillier, J., Jordan, C., Saemundsson, P., Argles, T. (2018). Debris-flow release processes investigated through the analysis of multi-temporal LiDAR datasets in north-western Iceland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44: 144-159.

Mueller, D.S., Wagner, C.R., Rehmel, M.S., Oberg, K. A., and Rainville, Francois, 2013, Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat (ver. 2.0, December 2013): U.S. Geological Survey Techniques and Methods, <http://dx.doi.org/10.3133/tm3A22>.

Muste, M., Aberle, J., Rennie, C., & Admiraal, D. (Eds.). (2017). *Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management: Volume II: Instrumentation and Measurement Techniques* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315158921>.

O'Brien, J. S., Julien, P.Y. (1985). Physical processes of hyperconcentrated sediment flows. Proceedings of the ASCE Specialty Conference on the Delineation of Landslides, Floods, and Debris Flow Hazards in Utah, Utah, Water Research Laboratory, Series UWRL/g-85/03: 260-279.

O'Brien, J. S., Julien, P.Y., Fullerton, W.T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 119 (2): 244-261.

Ojima, D. S., Galvin, K. A., & Turner, B. L. (1994). The global impact of land-use change. *BioScience*, 44(5), 300-304.

Pan, H., Jiang, Y-J., Wang, J., Ou, G-Q. (2018). Rainfall threshold calculation for debris flow early warning in areas with scarcity of data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18: 1395-1409.

Pastor, M., Quecedo, M., Gonzalez, E., Herreros, M. I., Fernandez Merodo, J. A., Mira, P.A (2014). Simple approximation to bottom friction for Bingham fluid depth integrated models. *Journal of Hydraulics*

NDECI (2005). Mapa de peligros y plan de usos de suelo y medidas de mitigación antes desastres en la ciudad de Chosica. Resumen ejecutivo. Proyecto INDECI-PNUD PER/02/051 Ciudades sostenibles. [http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios\\_CS/Region\\_Lima/lima/chosica\\_R.pdf](http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_Lima/lima/chosica_R.pdf). *lic Engineering*, 130 (2): 149-155.

Patalano, A., García, C. M. y Rodríguez, A. (2017), Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV), *Computers & Geosciences*, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.009>.

Paul, J. D., Buytaert, W., & Sah, N. (2020). A technical evaluation of lidar-based measurement of river water levels. *Water Resources Research*, 56, e2019WR026810. <https://doi.org/10.1029/2019WR026810>.

Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422.

Pereira, F.J.S., Gomes Costa, C.A., Foerster, S., Brosinsky, A. de Araújo, J. C. (2019), Estimation of suspended sediment concentration in an intermittent river using multi-temporal high-resolution satellite imagery, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.02.009>.

Pudasini, S. (2012). A general two-phase debris flow model. *Journal of Geophysical Research*, 117, F03010, doi:10.1029/2011JF002186.

Quinn, W. H., Neal, V.T. (1987). El Niño occurrences over the past four and a half centuries. *Journal of Geophysical Research*, 92 (C13): 14449-14461.

Ramos, D., Castro, V., & Sánchez, E. (2015). Caracterización de la vegetación a lo largo de una gradiente altitudinal en la comunidad de Cochahuaco, cuenca media del río Lurín, Lima. *Ecología Aplicada*, 14(1), 11-25.

Remaitre, A., Malet, J-P., Maquaire, O. (2005). Morphology and sedimentology of a complex debris flow in a clay-shale basin. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 339-348.

Rickenmann, D. (1991). Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117 (11): 1419-1439.

Rojas, T.V., Bartl, K., & Abad, J. D. (2021). Assessment of the potential responses of ecosystem services to anthropogenic threats in the Eten wetland, Peru. *Ecosystem Health and Sustainability*, 7 (1). <https://doi.org/10.1080/20964129.2021.1942224>

Romana, M. (1995). The geomechanical classification SMR for slope correction. In 8th ISRM Congress. OnePetro.

Sauvageot, H. (1994) Rainfall measurement by radar: A review. *Atmospheric Res.* 35:27-54.

Scheidl, C., Rickenmann, D., Chiari, M. (2008). The use of airborne LiDAR data for the analysis of debris flow events in Switzerland, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8: 1113-1127.

SGC (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Servicio Geológico Colombiano-SGC.

Simpson, M. & Oltmann, R. (1990). Acoustic Doppler discharge-measurement system, Hydraulic Engineering - Proceedings of the 1990 National Conference.

Stevaux, J. C., & Latrubesse, E. M. (2017). Geomorfología fluvial. Oficina de Textos.

Suárez Díaz, J. (2012). Estabilización de suelos. Universidad Industrial de Santander-Bucaramanga-Colombia.

Suárez, Jaime. Deslizamiento: Análisis geotécnico. Capítulo 12: Instrumentación y monitoreo. <http://erosion.com.co/>

Swanston, D.N. & Swanson, F.J. (1980). Soil mass movement. In An approach to water resources evaluation, nonpoint silvicultural sources, V.1-V.49. Athens, GA: Environmental Protection Agency Res. Lab., EPA-600/880012.

Szupiany, R. N., López Weibel, C., Guerrero, M., Latosinski, F., Wood, M., Domínguez Rubén, L., & Oberg, K. (2019) Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions. *Earth Surf. Process. Landforms*, 44: 1295– 1308. <https://doi.org/10.1002/esp.4572>.

Szupiany, R., López Weibel, C., Guerrero, M., Latosinski, F., Wood, M., Domínguez Ruben, L., and Oberg, K. (2019), Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions, *Earth Processes and Landforms*, DOI: 10.1002/esp.4572.

Takahashi, T. (1991). Debris flow, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13: 57-77.

Teixeira, Z., Teixeira, H., & Marques, J. C. (2014). Systematic processes of land use/land cover change to identify relevant driving forces: Implications on water quality. *Science of the Total Environment*, 470, 1320-1335.

Thuele, J. I., Crema, S., Marchi, L., Cavalli, M., Comiti, F. (2018). Exploiting LSPIV to assess debris-flow velocities in the field. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18: 1-13.

Tiara Sutari, C.A (2019), Monitoring of suspended sediment concentration in the Rhine River using Landsat (Google Earth Engine), Master Science Thesis. Utrecht University.

Tiranti, D., Crema, S., Cavalli, M., Deadgeli, C. (2018). An integrated study to evaluate debris flow hazard in Alpine Environment. *Frontiers in Earth Science*, 6 (60): 1-14.

Turnipseed, D.P., and Sauer, V.B., (2010), Discharge measurements at gaging stations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods book 3, chap. A8, 87 p.

Turner, B.L. II, Hyden, G., Kates, R.W. (eds). (1993). Population growth and agricultural change in Africa. University Press of Florida, Gainesville.

Usman, M., Liedl, R., Shahid, M.A., & Abbas, A. (2015). Land use/land cover classification and its change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Journal of Geographical Sciences*, 25(12), 1479-1506.

Valdivia, J. M., Scipión, D. E., Milla, M., Prado, J. J., Espinoza, J. C., Cordova, D., Saavedra Huanca, Miguel, Villalobos Puma, Elver Edmundo, Callañaupa Gutiérrez, Stephany Magaly & Silva, Y. (2021). Dataset on the first weather radar campaign over Lima, Perú. Data in Brief, 35, 106937. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106937>.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. Special report, 176, 11-33.

LAVADO, W.S., LABAT, D., GUYOT, J. L., RONCHAIL, J. y ORDOÑEZ, J.J. (2009), TRMM rainfall data estimation over the Peruvian Amazon-Andes basin and its assimilation into a monthly water balance model, *New Approaches to Hydrological Prediction in Data-sparse Regions (Proc. of Symposium HS.2 at the Joint IAHS & IAH Convention, Hyderabad, India, September 2009)*. IAHS Publ. 333.

World Meteorological Organization, 1982: Concepts and Techniques in Hydrological Network Design (M.E. Moss). Operational Hydrology Report No. 19, WMO No. 580, Geneva.

World Meteorological Organization - WMO. (1998). Requirements and Applications of Weather Radar Data to Hydrology and Water Resources (R.J. Moore). Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 70, WMO/TD-No. 934, Geneva.

World Meteorological Organization - WMO. (2008). Guide to Hydrological Practices, Vol. I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. Sixth edition. Geneva, Switzerland: WMO No 168.

World Meteorological Organization - WMO. (2010). MANUAL ON STREAM GAUGING. WMO N° 1044.

Xu H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int J Remote Sens.* 27(14):3025–3033.

Zinck, J.A. (2012). Geopedología: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. ITC.

Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J. C., & Lavado, W. (2015). Impacts of satellite-based precipitation datasets on rainfall-runoff modeling of the Western Amazon basin of Peru and Ecuador. *Journal of Hydrology*, 528, 599–612. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.06.064.



Foto: Condesan

[www.infraestructuranatural.pe](http://www.infraestructuranatural.pe)

El proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica promueve la conservación, restauración y recuperación de los ecosistemas a nivel nacional, formando alianzas con organizaciones públicas y privadas para reducir los riesgos hídricos como sequías, inundaciones y contaminación del agua.

El proyecto es promovido y financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y el Gobierno de Canadá y liderado por Forest Trends, junto a sus socios CONDESAN, la Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA), e investigadores del Imperial College London.



<https://www.forest-trends.org/publications/serie-guias-IN-para-GRD>

