



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)

Localización de áreas de intervención



**Infraestructura
Natural**

para la Seguridad Hídrica



**Imperial College
London**

Autores

Alex Roger Zambrano Ramírez¹, Hubert Orlando Portuguez Yactayo², Zoila Yessica Armas Benites¹, Claudia Lebel Castillo¹ y Abel Aucasime Orihuela¹

Colaboradores

Héctor León Hinostraza² y Eber Rostaing Risco Sence²

Supervisión editorial

Gabriel Rojas Guillén¹

Cuidado de edición



Diseño y diagramación

Roger Ramirez Miranda

Corrección de estilo

Antonio Luya Cierzo y Ximena Basadre Málaga

Foto de portada

Julio Reaño

Forest Trends Association

RUC: 20603007396

Calle Los Ángeles 395, Miraflores

Lima, Perú

Desarrollo de contenidos: abril 2021 a noviembre del 2022

1ra edición: julio del 2024

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N.º 2025-00593

Afiliaciones

¹ Forest Trends, Washington D. C. - Estados Unidos

² Experto temático

³ Reserva Paisajística Nor Yauyos-Cochas, Junín - Perú

⁴ Proyecto Especial Jequetepeque-Zaña, Trujillo - Perú

Agradecimientos

Agradecemos la valiosa revisión de quienes ayudaron con sus aportes y/o gestión: Fernando Momi¹, Gena Gammie¹, Fernando León¹ y Emerson Salinas². Asimismo, agradecemos el apoyo y coordinación para los trabajos en campo a Alberto Marquina², César Carpio³ y Tito Rioja³ del Proyecto Especial Jequetepeque-Zaña (Pejeza); la Junta de Usuarios del distrito de Riego del Valle Zaña y a Abdías Villoslada⁴ y Hulfer Lázaro⁴ de la Reserva Paisajística Nor Yauyos-Cochas (RPNYC).

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.





Foto: Condesan

Siglas y acrónimos

ANA	Autoridad Nacional del Agua
ARCC	Autoridad para la Reconstrucción con Cambios
DEM	Modelo digital de elevaciones
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
Geocatmin	Sistema de Información Geológico y Catastral Minero
GIS	Sistema de información geográfica
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IGP	Instituto Geofísico del Perú
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
Ingemmet	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico
Midagri	Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego
Minam	Ministerio del Ambiente
Minem	Ministerio de Energía y Minas
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
Senamhi	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
Sernarp	Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado

Índice

Presentación

I. Consideraciones generales

- I.1. Objetivo
- I.2. Alcance
- I.3. Definiciones importantes

II. Localización

- 2.1. PASO 1. Revisión de antecedentes
- 2.2. PASO 2. Acondicionamiento y generación de información
 - a. Localización de áreas susceptibles a peligros priorizados con poca cobertura vegetal
 - Recopilación de información cartográfica
 - Construcción de mapa de susceptibilidad priorizados
 - Selección de variables y acondicionamiento cartográfico
 - Clasificación y ponderación de las variables
 - Superposición y análisis multivariable
 - Estimación del estado de la cobertura vegetal
 - Series de tiempo usando imágenes satelitales
 - Mapas de áreas susceptibles a peligros priorizados con poca cobertura vegetal
 - b. Localización de áreas potencialmente erosionables e inestables con indicios de degradación
 - Recopilación de información cartográfica
 - Identificación de áreas degradadas en ecosistemas
 - Cambio de uso de la tierra
 - Pérdida de productividad
 - Identificación de áreas de erosionables, pérdida de suelos
 - Identificación de áreas inestables
 - Mapas de áreas inestables y erosionables con indicios de degradación
- 2.3. PASO 3. Afinamiento de áreas

Bibliografía

Anexos

Índice de mapas

Mapa 1. Esquema de acondicionamiento de la información temática

Mapa 2. Ejemplo de valoración de la variable cobertura y uso actual de la tierra

Mapa 3. Integración multivariable para el Modelo de Susceptibilidad a procesos de erosión y remoción en masa

Mapa 4. Áreas susceptibles a peligros priorizados con poca cobertura vegetal

Mapa 5. Áreas potencialmente erosionables con indicios de degradación

Mapa 6. Áreas potencialmente inestables con indicios de degradación

Mapa 7. Identificación de áreas donde se presenta los problemas de interés y que tiene potencial de ser atendidos por el proyecto

Índice de gráficos

Gráfico 1. Geoprocesamiento para localización de áreas susceptibles a peligros priorizados con poca cobertura vegetal

Gráfico 2. Geoprocesamiento para localización de áreas potencialmente erosionables con indicios de degradación

Gráfico 3. Localización de áreas potencialmente inestables con indicios de degradación

Índice de tablas

Tabla 1. Categorías de ponderación

Tabla 2. Ejemplo de rangos de niveles de susceptibilidad

Tabla 3. Ejemplo de rangos de clasificación de NDVI

Presentación

El Perú, megadiverso y vulnerable al cambio climático, debe integrar en su desarrollo un enfoque de Reducción del Riesgo de Desastres (RRD) hidrometeorológicos, alineando políticas y compromisos internacionales de Gestión del Riesgos de Desastres (GRD) y promoviendo la conservación de la biodiversidad para aprovechar los servicios ecosistémicos. La Autoridad Nacional de Infraestructura (ANIN), en el marco del acuerdo de Gobierno a Gobierno entre el Perú y el Reino Unido, se encarga de la ejecución de proyectos para reducir riesgos en diecisiete (17) cuencas vulnerables del Perú.

Forest Trends, a través del Proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica (NIWS por sus siglas en inglés), brinda asistencia técnica para elaborar estudios definitivos de infraestructura natural. Ante la falta de metodologías, Forest Trends ha desarrollado guías para orientar estos procesos, disponibles en la *Serie de Guías para la Elaboración de Estudios Definitivos de Infraestructura Natural con Enfoque en Gestión de Riesgos de Desastres*.

En 2009, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (Ingemmet) marcó un hito significativo al concluir el inventario de peligros geológicos en el Perú, presentando el *Mapa de Susceptibilidad por Movimientos de Masa*. Esta herramienta esencial traza un modelo preciso de las zonas más propensas a estos fenómenos, proporcionando una base dinámica para la gestión de riesgos en el país.¹

Entre 2011 y 2015, el Ministerio del Ambiente (Minam) intensificó sus esfuerzos en la identificación de áreas susceptibles a peligros, con una perspectiva nacional y un enfoque detallado en las características ambientales. De esta labor surgieron valiosas herramientas, como el *Mapa de Vulnerabilidad Física del Perú* y el *Mapa de Susceptibilidad Física a Inundaciones y Deslizamientos en la costa y sierra*, diseñados para enfrentar eventos hidrometeorológicos extremos. El devastador fenómeno de El Niño del 2017 impulsó la creación de IRMA, una herramienta de evaluación rápida de las condiciones territoriales para proponer medidas preventivas y mitigadoras.

En 2019, el proyecto NIWS introdujo la Herramienta de Identificación Rápida de Oportunidades para la Infraestructura Natural en la Gestión del Riesgos de Desastres (HIRO - GRD). Esta innovadora herramienta permite localizar áreas prioritarias para intervenciones en cuencas, integrando medidas de infraestructura natural sobre la base de sistemas de información geográfica y teledetección.

A partir de estas experiencias, se ha desarrollado una metodología para identificar y seleccionar áreas propensas a movimientos de masa e inundaciones, en donde se desarrollarán proyectos de infraestructura natural para la gestión del riesgo de desastres en atención a la pérdida de cobertura vegetal y la erosión de suelos, que ha sido validada en las cuencas de los ríos Piura, Cañete y Zaña.

El presente documento orienta la aplicación de esta metodología en la elaboración de estudios definitivos, guiando los proyectos de inversión pública que forman parte de los planes integrales de control de inundaciones y movimientos de masa.

¹ Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú. Ingemmet, 2012.





Consideraciones generales

Sobre el propósito, relevancia, principios y conceptos esenciales referidos a la localización de áreas de intervención.

1.1. Objetivo

El objetivo de esta guía es proporcionar directrices para elaborar estudios de localización de áreas de intervención en zonas susceptibles a inundación y movimientos de masa y en zonas para el control de la erosión e inestabilidad de laderas, como parte del proceso de elaboración de proyectos de infraestructura natural con enfoque de gestión del riesgo de desastres (GRD).

1.2. Alcance

Esta guía está destinada a ser utilizada por especialistas técnicos de entidades públicas y privadas que promuevan y desarrollen intervenciones en infraestructura natural con un enfoque en la gestión de riesgos. Específicamente, se enfoca en proyectos de inversión dirigidos a intervenir en zonas de origen de peligros de origen hidrometeorológico como inundación y movimientos de masa donde las medidas de infraestructura natural sean viables y efectivas.

1.3. Definiciones importantes

La guía requiere el conocimiento y uso de algunos conceptos esenciales, los cuales se desarrollan a continuación para facilitar la obtención e interpretación de los resultados:



Movimientos de masa, según el *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales*, publicado por CENEPRED²; "son procesos de movilización lenta o rápida que involucran suelo, roca o ambos, causados por exceso de agua en el terreno y/o por efecto de la fuerza de gravedad. Los deslizamientos consisten en un descenso masivo o relativamente rápido, a veces de carácter catastrófico, de materiales, a lo largo de una pendiente. El deslizamiento se efectúa a lo largo de una superficie de deslizamiento, o plano de cizalla, que facilita la acción de la gravedad. La pérdida de cobertura vegetal y forestal favorece a la meteorización y el consecuente desplazamiento mecánico del material por factores desencadenantes" (p. 68).



Erosión es considerado otro peligro de origen hidrometeorológico, según el *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales*, "se encuentran los producidos por erosión de capa superficial de suelos o rocas debido a la acción de factores desencadenantes naturales como la lluvia y el viento, los que afectan la erodabilidad o vulnerabilidad de los factores condicionantes" (p. 89).



Susceptibilidad, al igual que en los conceptos anteriores, es abordado en el *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales*, y "está referida a la mayor o menor predisposición a que un evento suceda u ocurra sobre determinado ámbito geográfico (depende de los factores condicionantes y desencadenantes del fenómeno y su respectivo ámbito geográfico)" (p. 106).



Inundación es definida por el *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales* como producto de "lluvias intensas o continuas sobrepasan la capacidad de campo del suelo, el volumen máximo de transporte del río es superado y el cauce principal se desborda e inunda los terrenos circundantes. Las llanuras de inundación (franjas de inundación) son áreas de superficie adyacente a ríos o riachuelos, sujetas a inundaciones recurrentes. Debido a su naturaleza cambiante, las llanuras de inundación y otras áreas inundables deben ser examinadas para precisar la manera en que pueden afectar al desarrollo o ser afectadas por él" (p. 74).



Degradación de ecosistemas, según la resolución ministerial N.º 178-2019-MINAM, es la "pérdida total o parcial de algunos de sus factores de producción (componentes esenciales), que altera su estructura y funcionamiento, disminuyendo, por tanto, su capacidad de proveer servicios ecosistémicos".

² Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (2014). *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales*, 2.ª versión. Disponible en https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf



Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI) “es un índice normalizado que le permite generar una imagen que muestra el verdor, también conocida como biomasa relativa. Este índice aprovecha el contraste de características entre dos bandas de un conjunto de datos ráster multiespectral: la absorción de pigmento de clorofila en la banda roja y la alta reflectividad del material de las plantas en la banda infrarroja cercana”³.



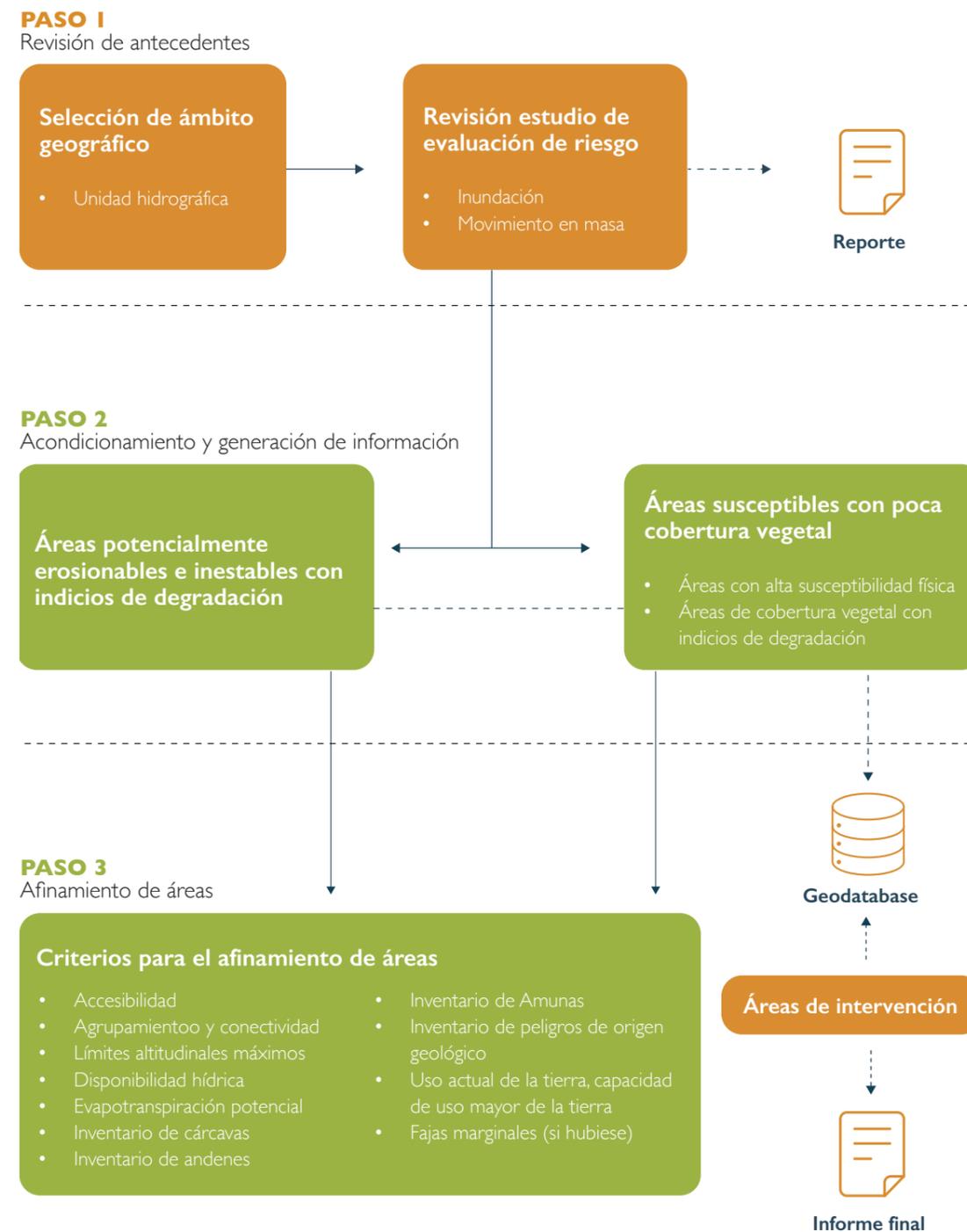
3 ESRI, Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI). Disponible en <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/help/analysis/raster-functions/ndvi-function.htm>



Localización

Sobre el propósito, relevancia, principios y conceptos esenciales referidos a la localización de áreas de intervención.

Para la localización de áreas de intervención se seguirá el siguiente flujo:



2.1. PASO 1. Revisión de antecedentes

Previo a la recopilación, procesamiento y generación de información, es necesario conocer los antecedentes del proyecto, lo que requiere revisar los documentos pertinentes y si es que se encuentra en la fase de elaboración de estudio definitivo. El ámbito geográfico debe estar descrito en los documentos del proyecto de inversión; y, si fuera el caso de encontrarse en la fase de formulación, es necesario seleccionar el ámbito geográfico de análisis. En ambos casos, el contexto es gestionar el riesgo de desastres de manera integral, por lo que es necesario pensar en la unidad hidrográfica como ámbito geográfico en donde se realizará el análisis, pues es donde se ubican los ecosistemas que

presentan factores condicionantes y ocurren los procesos geodinámicos, así como confluyen actores sociales relevantes para la problemática.

En el contexto de la Reconstrucción con Cambios, existen planes integrales y proyectos en cada unidad hidrográfica (cuenca) a intervenir, realizándose estudios de evaluación del riesgo conforme a lo establecido por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), en los cuales justifican la necesidad de intervención y priorizan intervenciones ante los peligros de inundación y movimientos en masa, por lo que es necesario revisar dicho estudio ante de proseguir con el Paso 2.

Nombre del recurso	URL
Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Perú	https://www.ana.gob.pe/normatividad/delimitacion-y-codificacion-de-unidades-hidrograficas-del-peru-0
Plan Integral para la Reconstrucción con Cambios (PIRCC)	https://www.rcc.gob.pe/2020/main-home/plan-integral/alcance-general/
Invierte.pe – Consulta de inversiones	https://ofi5.mef.gob.pe/invierte/consultapublica/consultainversiones

Fuente: Forest Trends

Como resultado de este paso, debe obtenerse un reporte sintetizando la información revisada y, si fuese el caso, la información geoespacial en formato digital, del ámbito geográfico seleccionado y los peligros priorizados.

Adicionalmente, de ser necesario, incluir hallazgos que puedan influir en el resultado final del proceso, a fin de tomar las medidas necesarias

2.2. PASO 2. Acondicionamiento y generación de información

Para localizar las áreas de intervención en el ámbito geográfico seleccionado y los peligros priorizados, se requiere

recopilar, acondicionar y, en algunos casos, generar información en formato geoespacial, el cual puede ser presentado en uno o varios mapas. Para lograrlo, se requiere identificar y cartografiar lo siguiente:



a. Áreas susceptibles a peligros priorizados con poca cobertura vegetal.



b. Áreas potencialmente erosionables e inestables con indicios de degradación

a. Localización de áreas susceptibles a peligros priorizados con poca cobertura vegetal

Consiste en identificar y cartografiar aquellas áreas que presentan características físicas y biológicas que las predisponen a originar y a ser susceptibles a los peligros de inundación y movimiento en masa. Además, que se encuentran indicios de degradación del ecosistema, afectando la densidad y vigorosidad de la cobertura vegetal natural.

Recopilación de información cartográfica

Debe considerarse la información cartográfica y geoespacial disponible de entidades nacionales e internacionales, tales como:

a. Imágenes de alta resolución espacial: con sensores remotos aerotransportados o satelitales, ya sean de libre acceso (Bing Maps, Google Earth u otra) o de pago (Pléiades, Spot, Kompsat, SuperView, GeoEye, WorldView, Quickbird y otras). En el Anexo I se muestran las características de los principales sensores satelitales disponibles hasta la fecha de elaboración de la presente guía.

b. Cobertura y uso actual de la tierra: usualmente no existe información a escala y detalle requerido, es recomendable trabajar con escalas entre 1:25 000 a 1:10 000, por lo que será necesario generarla con el apoyo de imágenes satelitales de alta resolución, ya sean de libre acceso o de pago, tomando como referencia el *Mapa nacional de cobertura vegetal* (Minam, 2015), la *Guía de inventario de la flora y vegetación* (Minam, 2016), *Mapa nacional de ecosistemas del Perú* (Minam, 2018) y la información producida por Ministerio del ambiente del Perú (MINAM) e Instituto del Bien Común (IBC)⁴ respecto a las coberturas de la tierra. Este grado de detalle no solo se refiere a la escala de mapeo, también a los niveles de porcentaje de cobertura de copa (ralo, semidenso o denso) y a condiciones de humedad

(árido, semiárido o subhúmedo), en particular cuando se trata de los bosques estacionalmente secos. La verificación en campo permitirá definir con mayor exactitud los límites de los tipos de cobertura vegetal y del uso actual de la tierra (agricultura, forestería, áreas desnudas, andenería, entre otros) existentes en el área de interés.

c. Geomorfología/Fisiografía: se podrá utilizar información fisiográfica o geomorfológica secundaria. Una fuente posible es la zonificación ecológica económica, disponible en algunos departamentos, que debe ajustarse con el apoyo de imágenes satelitales de alta resolución, como las ya mencionadas; la escala recomendada debe ser ente 1:25 000 a 1:10 000. De no existir información, deberá elaborarse a partir de las imágenes satelitales y el rango de escala antes mencionada.

d. Litología: la información litológica se obtendrá de los mapas de geología existentes en el repositorio Sistema de Información Geológico y Catastral Minero (Geocatmin)⁵ del Ingemmet, que contiene los estándares de la carta geológica nacional (la base de datos GIS de 840 mapas geológicos en formato digital integrados a escala 1:50 000, divididos en tres zonas WGS UTM: 17S, 18S y 19S), de requerir ajustes estos pueden realizarse con el apoyo de imágenes satelitales de alta resolución, como las mencionadas antes, la escala recomendada debe ser ente 1:50 000 a 1:10 000.

e. Pendiente: el modelo digital de pendiente puede obtenerse mediante las herramientas de los sistemas de información geográfica, como un derivado del modelo digital de elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés), a partir del modelo digital de elevaciones, tales como SRTM⁶, ALOS Palsar⁷ u otro de mejor resolución espacial disponible para la zona de interés.

4 Ministerio del Ambiente (2020). Primera versión en gabinete de coberturas de la tierra de costa y andes (cuena del Pacífico y Titicaca), integrados a datos de IBC – MapBiomias. Primera colección - Andes y segunda colección - Amazonía, ambos en la cuena del Atlántico, año 2011-2015-2017.

Disponible en https://geoservidorminam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/Documento-de-Trabajo_Cobertura_CUT_2011_2017.pdf

5 Disponible en <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>

6 USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. Disponible en <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archi-ve-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1>

7 ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30m (AW3D30)". Disponible en https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm

f. Precipitación anual: puede obtenerse a partir los datos *Peruvian Interpolated Data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations*⁸ (PISCO), generados por el Senamhi, o de las estaciones pluviométricas ubicadas dentro y cerca de la unidad hidrográfica objeto de análisis. Utilizando covariables (como la altitud) para realizar la predicción espacial, se deberá generar, en la medida de lo posible, sobre la base de un registro histórico de treinta años (que representa un clima) o, de lo contrario, sobre la base del mayor número de años disponible en las estaciones pluviométricas.

g. Otros estudios específicos de la zona de interés.

Construcción de mapa de susceptibilidad priorizados

Consiste en identificar y cartografiar áreas con niveles de susceptibilidad física (Minam, 2011⁹) del territorio, a fin de contar con determinado número de áreas potenciales de mayor riesgo de sufrir movimientos en masa y de niveles altos de erosión, con el objeto de poder realizar las intervenciones relacionadas con el control de dicho proceso. Esta actividad comprende la generación de un mapa de susceptibilidad física de la unidad hidrográfica, relacionado

con los peligros priorizados (inundación y movimientos de masa) dentro del límite geográfico ya definido, para lo cual se deberán seguir los pasos que se reseñan a continuación:

- **Selección de variables y acondicionamiento cartográfico**
Para la selección de las variables biofísicas y su análisis, se toma como referencia la *Memoria descriptiva del mapa de vulnerabilidad física del Perú* (Minam, 2011a)⁹, documento donde se utilizan las siguientes variables: fisiografía, litología, cobertura y uso, pendiente y precipitación.

Para contar con información estandarizada es necesario desarrollar procedimientos de adecuación y ajuste cartográfico entre los mapas digitales y sus respectivas bases de datos, con el objetivo de eliminar las inconsistencias geométricas (corrección topológica) y tabulares de cada uno de los mapas temáticos considerados para el análisis de susceptibilidad ante la remoción en masa. Este acondicionamiento cartográfico involucra la homogeneización de la información cartográfica y tabular; la congruencia entre los datos geométricos y el establecimiento de la base de datos de atributos para cada uno de los mapas acondicionados (ver Mapa 2).

Una vez homogeneizada la información cartográfica y temática, se diseña una estructura digital de datos con información sobre la distribución geográfica y las propiedades de los aspectos biofísicos de la unidad hidrográfica sujeta a análisis, con base en los principios de orden y jerarquía de datos, lenguaje sencillo y simple para comparar y compatibilidad de la información almacenada; de esta manera se constituye una plataforma de información para el desarrollo de diferentes modelos espaciales sobre la base del uso de sistemas de información geográfica. Esta base de datos tiene por finalidad:

- Organizar los datos para mostrar la relación lógica entre los resultados de las diferentes variables seleccionadas.
- Almacenar los datos digitales de forma adecuada para su posterior uso.

- Recuperar los datos para examinar la información y difundirla a las instituciones pertinentes.
- Manipular y transformar los datos para obtener nueva información a partir de los ya almacenados.
- Analizar los datos para responder la pregunta: ¿cuáles son las zonas que, por características biofísicas y condiciones naturales, son más propensas a la ocurrencia de inundación y movimiento en masa?

- **Clasificación y ponderación de las variables**
Culminado el proceso de homogeneización cartográfica de las variables, se continúa con un análisis univariable para valorar las unidades cartográficas de acuerdo con sus características de información sobre las condiciones de susceptibilidad física del movimiento en masa. Se establecen cuatro (4) categorías cuyo valor va de 1 a 4, extremos que señalan, respectivamente, la menor y la mayor susceptibilidad física:

Tabla 1. Categorías de ponderación

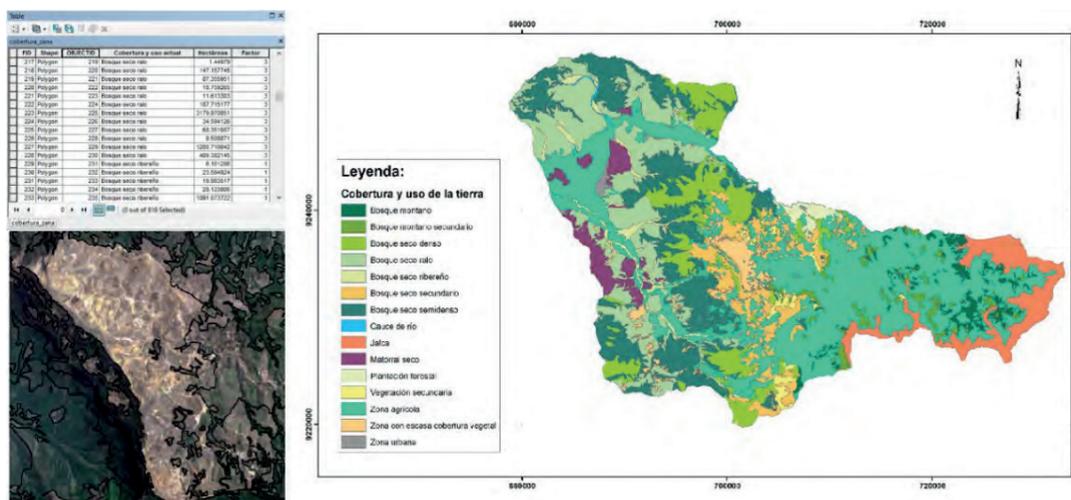
Categorías	Valor
Baja	1
Media	2
Alta	3
Muy alta	4

Fuente: Forest Trends

De este modo, se procede a asignar una valoración a las unidades cartográficas en cada una de las variables seleccionadas, como se muestra en el Mapa 2 a manera de ejemplo para la variable cobertura y uso actual,

donde la clase 1 (color amarillo) y la clase 4 (color rojo) representan, respectivamente, baja y muy alta susceptibilidad física. De similar forma se procede con las demás variables.

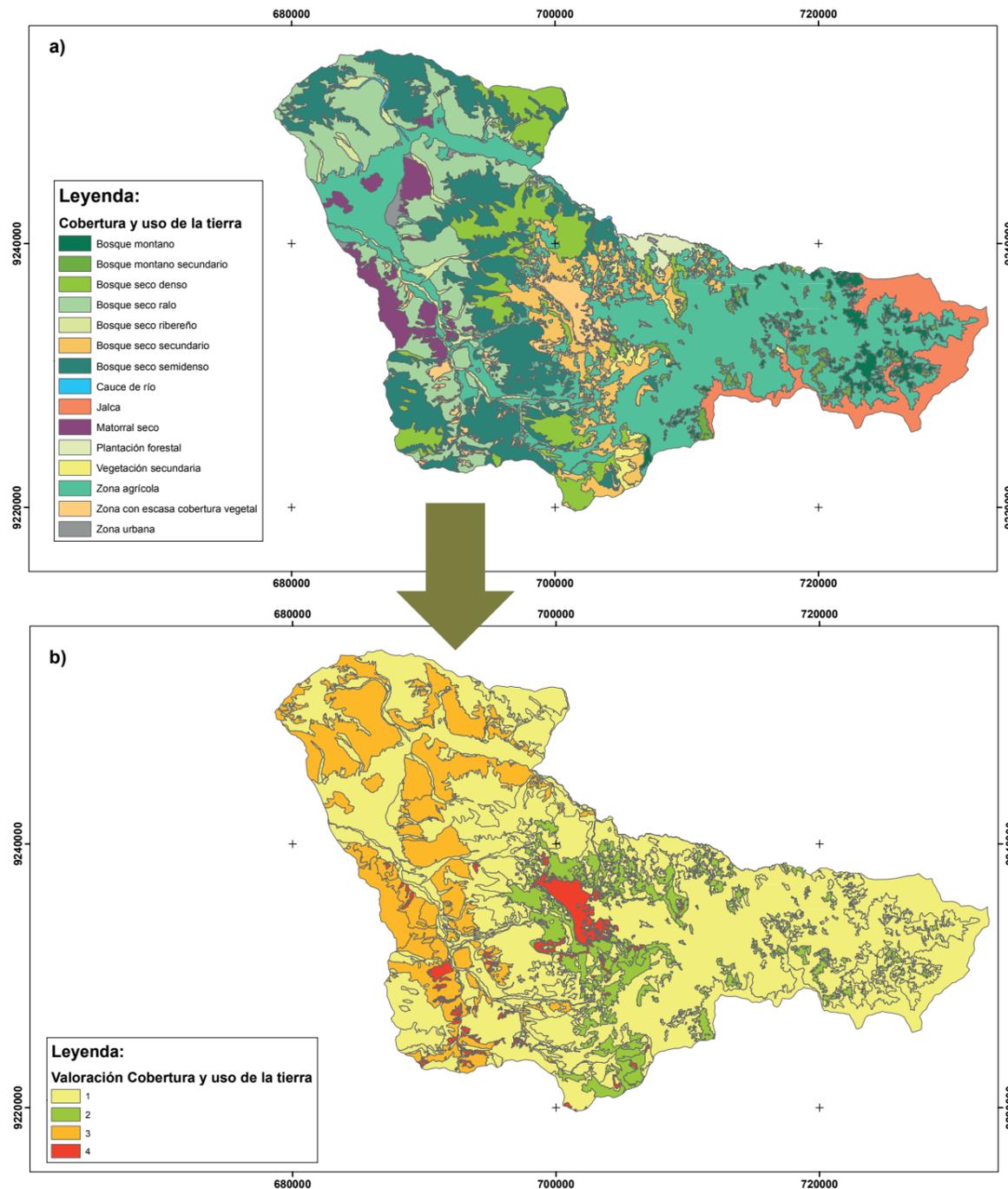
Mapa 1. Esquema de acondicionamiento de la información temática



Fuente: Forest Trends

⁸ <https://hllaica.github.io/posts/2023-06-04-quarto-blogs/#:~:text=The%20Peruvian%20Interpolated%20data%20of,catchments%20with%20Ecuador%20and%20Colombia.>
⁹ Senamhi, PISCO <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/index.html?Set-Language=es>

Mapa 2. Ejemplo de valoración de la variable cobertura y uso actual de la tierra



Si bien existen modelos de base física para evaluar los procesos de movimiento en masa y erosión, requieren información detallada y observada que, muchas veces, no existe o es escasa para la zona que se evalúa. Considerando que el objetivo es zonificar las áreas susceptibles a la ocurrencia de procesos antes mencionados, se ha adoptado un modelo de sistema de información geográfica ponderativo basado en el Mapa de vulnerabilidad física del Perú (Minam, 2011a).

Debido a la escasez o a la inexistencia de datos de ocurrencia de movimientos en masa, se plantea el desarrollo de un modelo heurístico recurriendo a herramientas de los sistemas de información geográfica (SIG) de álgebra de mapas (Mapa 2). Las valoraciones asignadas a cada unidad cartográfica dentro de cada variable y los pesos de las variables generan niveles de susceptibilidad que deben verificarse mediante trabajos de campo a fin de ajustarlos, de ser necesario, para que representen en forma adecuada la susceptibilidad de remoción en masa en la unidad hidrográfica objeto de análisis.

El modelo propuesto permitirá zonificar, de acuerdo con el grado de susceptibilidad física ante la ocurrencia de movimientos en masa, los diferentes niveles de susceptibilidad. Matemáticamente, y considerando el principio de parsimonia, el modelo se representa de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^n P_i V_{i,j}$$

P_i representa el peso de la variable en el modelo; la sumatoria de todos los pesos debe ser igual a 1; y

V_{i,j} representa la puntuación de la unidad cartográfica j de la variable i; este valor varía de 1 a 4, con 1 como el puntaje de menor susceptibilidad física y 4 el de mayor susceptibilidad física.

• **Superposición y análisis multivariable**

Este procedimiento efectúa el análisis integrado de las variables físicas y biológicas con el objetivo de obtener el índice de vulnerabilidad. Aplicando el modelo matemático, se analizan los valores asignados a cada variable para encontrar el valor más representativo sobre la base de la simulación con diversos pesos (iteraciones). El análisis multivariable determina en qué grado y con qué peso contribuye cada una de las variables en el resultado final de la susceptibilidad de ocurrencia de remoción en masa¹⁰.

Los pesos de cada variable y las valoraciones de cada unidad cartográfica dentro de las variables deberán verificarse mediante el trabajo de campo efectuado en diversos puntos de muestreo dentro de la unidad hidrográfica objeto de estudio. Posteriormente, estos pesos y valoraciones de las unidades cartográficas se pueden reajustar para obtener los pesos y las valoraciones finales de las unidades cartográficas y las variables seleccionadas.

El análisis multivariable determina en qué grado y con qué peso contribuye cada una de las variables en el resultado final de la susceptibilidad ante los movimientos en masa y formación de cárcavas en la unidad hidrográfica. Esta asignación de pesos entre variables puede variar según la naturaleza o los tipos de ecosistema. Este procedimiento permite construir una matriz integrada a partir de la base de datos, con información cartográfica y tabular:

La clasificación de niveles de susceptibilidad se deberá realizar de acuerdo con la distribución de los valores obtenidos del modelo. Así, se generan cuatro (4) clases, las cuales pueden utilizar cuantiles. Si bien cada unidad hidrográfica tiene características propias, una propuesta aproximada podría contener los puntos de corte mostrados en la Tabla 1.

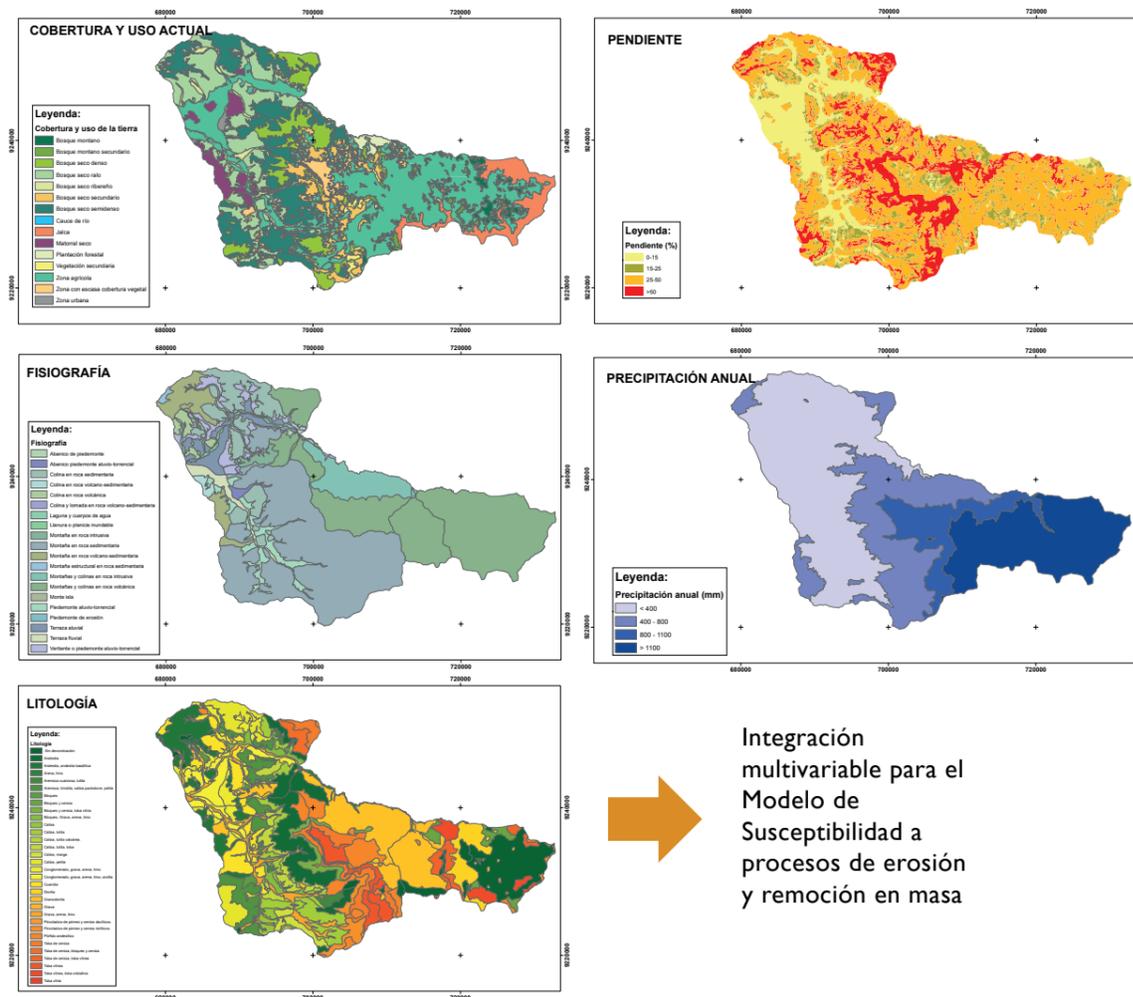
¹⁰ Memoria descriptiva del mapa de vulnerabilidad física del Perú. Minam, 2011.

Tabla 2. Ejemplo de rangos de niveles de susceptibilidad

Susceptibilidad	Valor
Bajo	Menor de 2,4
Medio	De 2,4 a 2,9
Alto	Mayor de 2,9 a 3,4
Muy alto	Mayor de 3,4

Fuente: Forest Trends

Mapa 3.



Estimación del estado de la cobertura vegetal

Para estimar el estado de la cobertura vegetal en áreas tan extensas es necesario usar índices de vegetación derivados a partir de imágenes satelitales, específicamente el Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI). Este es el que ha sido más utilizado en estudios globales de seguimiento y evaluación de la dinámica vegetal, gracias a su facilidad de cálculo e interpretación (Chuvieco, 2002).

“El cálculo de NDVI siempre resulta en un número dentro del rango de -1 a +1. Hojas cloróticas o amarillentas son valores cercanos a cero (0). El cero indica que no existe actividad fotosintética, y valores cercanos a +1 (0.8~0.9) indican la más alta densidad posible de hojas verdes. Las imágenes de un campo dado, producidas por la radiación infrarroja (IR) y roja (R) son procesadas según la ecuación 1, para obtener una imagen con valores de NDVI que muestren la existencia de biomasa y su condición” (Yarlequé, C. et al., 2007).

Serie de tiempo usando imágenes satelitales

Una serie de tiempo es un arreglo de observaciones ordenadas cronológicamente. En el monitoreo de ecosistemas, los datos de sensores remotos (como las imágenes de satélite) son de mucha utilidad, usualmente los datos provienen de sensores una mediana resolución espacial, pero de alta y moderada resolución temporal; por ejemplo, las imágenes de los sensores MODIS, LANDSAT y Sentinel¹¹.

Analizar series de tiempo de imágenes satelitales nos permite identificar tendencias, variaciones estacionales y anomalías en los procesos naturales o cambios ocasionados por fenómenos naturales o actividades antropogénicas en los ecosistemas. “Un aspecto importante para poder analizar estas variables como series de tiempo, es su disponibilidad de procesamiento en la plataforma gratuita de uso público Google Earth Engine¹². La cual permite extraer para áreas específicas, información sobre diversos productos derivados de diferentes sensores” (Vega-Araya, M. & Alvarado-Barrantes, R., 2019).

Para fines de la guía, en el Anexo 2 se propone un script para la plataforma Google Earth Engine, la cual permite establecer la mediana de la cobertura vegetal entre los años 2000 al 2021, usando una combinación de los sensores Landsat 5, 7 y 8, con lo cual se puede identificar áreas con poca cobertura vegetal. Esta capa contendrá los valores del comportamiento medio (NDVI) de la vegetación. Una vez obtenida esta capa, es necesario clasificar rangos que nos permitan su posterior análisis. En la siguiente tabla se propone una clasificación práctica.

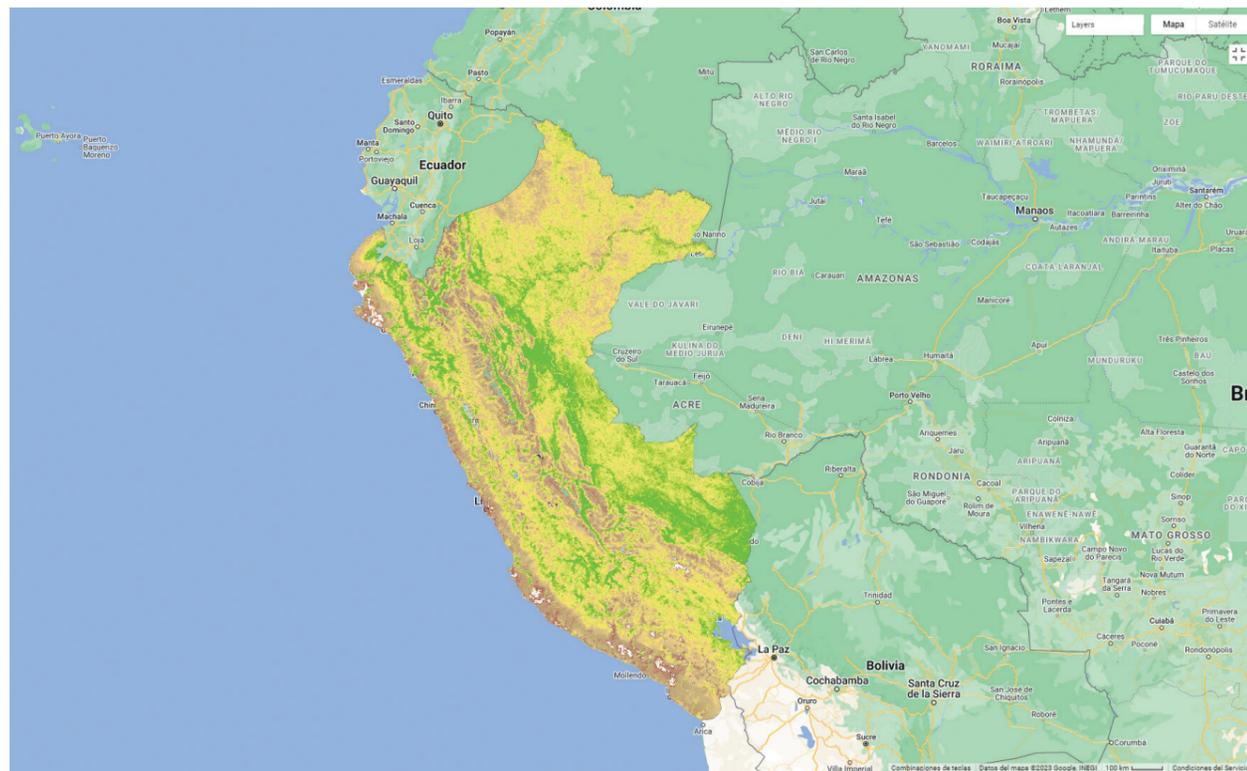
$$NDVI = \frac{(IR - R)}{(IR + R)}$$

11 https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/m_ecosistemas/analisis-series-tiempo
 12 <https://earthengine.google.com/>

Tabla 3. Ejemplo de rangos de clasificación de NDVI

Rango NDVI	Clase (actividad fotosintética)	Descripción
-1.0 - 0.1	Nula o muy baja	Áreas sin cobertura vegetal o ecosistemas desérticos
0.1 - 0.3	Baja	Ecosistemas con poca cobertura vegetal
0.3 - 0.5	Media	Ecosistemas con poca cobertura vegetal
0.5 - 0.7	Alta	Ecosistemas con cobertura vegetal densa
0.7 - 1.0	Muy alta	Ecosistemas con cobertura vegetal muy densa

Fuente: Forest Trends



Mapas de áreas susceptibles a peligros priorizados con poca cobertura vegetal

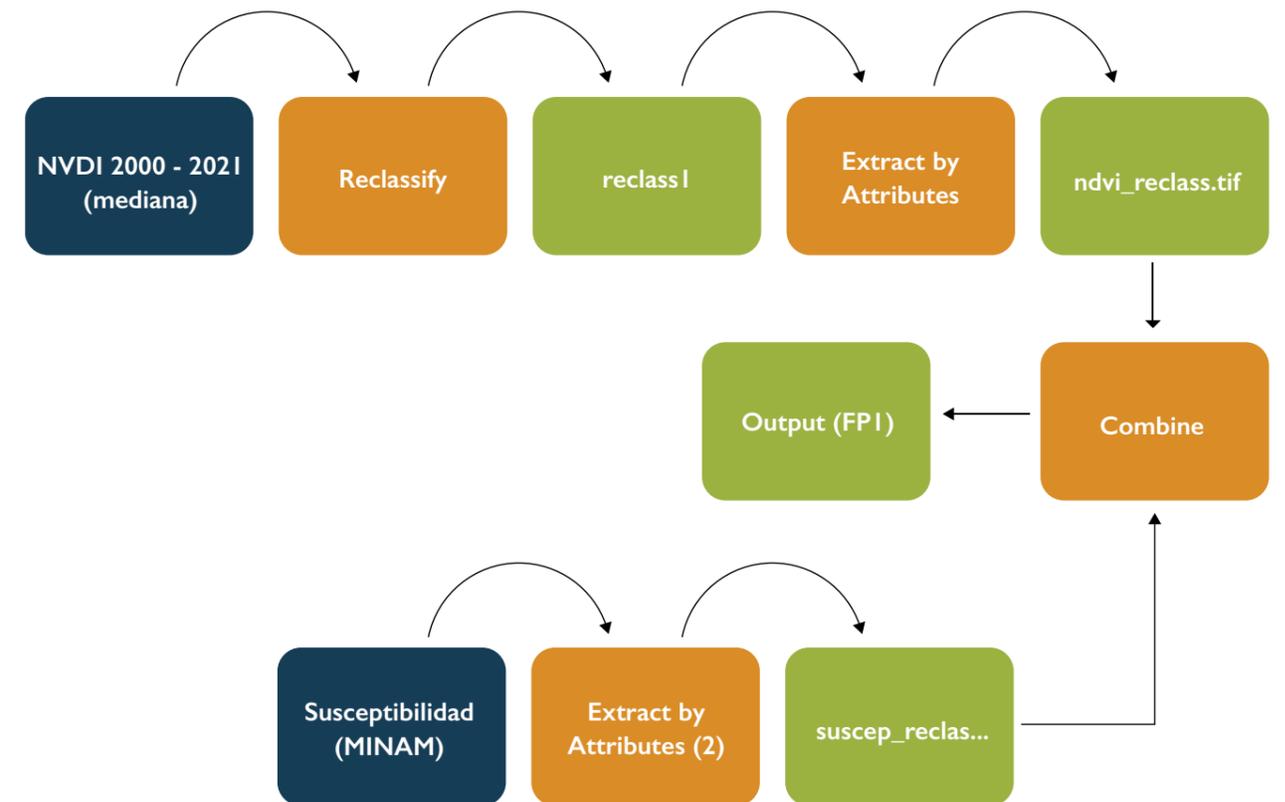
Una vez que se cuenta con todos los insumos descritos en los ítems anteriores, se procede a realizar el análisis geoespacial con la ayuda de sistemas de información geográfica para determinar:

Áreas susceptibles con poca cobertura vegetal, es decir, superficies con alta, muy alta susceptibilidad y con vegetación

rala o poco densa. Para su determinación será necesario utilizar las capas de susceptibilidad seleccionando aquellas categorías de alta y muy alta susceptibilidad a los peligros de movimiento en masa e inundación, superponiendo a las áreas con vegetación de poca o mala densidad (valor de NDVI entre 0,1 a 0,3).

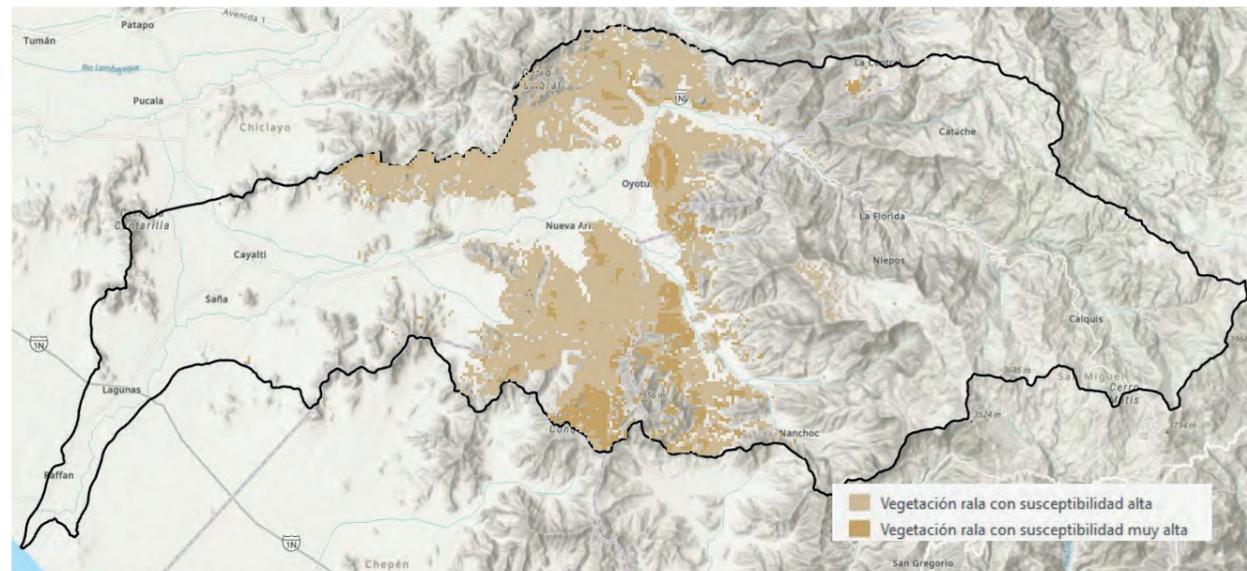
En el siguiente gráfico se esquematiza este proceso:

Gráfico 1. Geoprocesamiento para localización de áreas susceptibles a peligros priorizados con poca cobertura vegetal



Fuente: Forest Trends

Mapa 4. Áreas susceptibles a peligros priorizados con poca cobertura vegetal



Fuente: Forest Trends

b. Localización de áreas potencialmente erosionables e inestables con indicios de degradación

Consiste en identificar y cartografiar aquellas áreas que se encuentran en condiciones de inestabilidad y/o erosión, trayendo como consecuencia una alta producción de sedimentos y pérdida de suelo. Estas áreas se encuentran asociadas a procesos de degradación de ecosistemas, principalmente cambios en el uso de la tierra y pérdida de la productividad primaria de la cobertura vegetal.

Recopilación de información cartográfica

Debe considerarse información cartográfica y geoespacial disponible de entidades nacionales e internacionales, tales como:

a. Imágenes de alta resolución espacial, con sensores remotos aerotransportados o satelitales, ya sean de libre acceso (Bing Maps, Google Earth u otra) o de pago (Pléiades, Spot, Kompsat, SuperView, GeoEye, WorldView, Quickbird y otras).

b. Áreas degradadas en ecosistemas terrestres, es difícil encontrar información al respecto y que tenga consistencia en el tiempo. Existen conjuntos de datos desde el 2015 en el Geoservidor; tal como *Áreas de degradación por ecosistemas*¹³ y *Procedimiento metodológico para la identificación, categorización y priorización de áreas degradadas en ecosistemas terrestres*¹⁴ del Ministerio del Ambiente, que pueden ayudar al análisis. En esta última se puede encontrar *scripts* para el software R y la plataforma de Google Earth Engine para mejorar la identificación de áreas degradadas.

13 Ministerio del Ambiente (2022), Degradación de los ecosistemas. Disponible en <https://geoservidor.minam.gob.pe/monitoreo-y-evaluacion/restauracion-de-areas-degradadas/>
 14 Ministerio del Ambiente (2022), Procedimiento metodológico para la identificación, categorización y priorización de áreas degradadas en ecosistemas terrestres. Disponible en https://geoservidor.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2022/03/Procedimiento-metodológico-parala-identificación_categorización-y-priorización-de-áreas-degradadas-en-ecosistemas-terrestres.pdf

c. La erosión y la consecuente pérdida de suelos puede ser encontrarse en el Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú¹⁵. Otra fuente de información útil es el Proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica¹⁶.

d. Cambios en la cobertura y uso de la tierra y los modelos de elevación digital han sido recopilados y/o generados en la localización de áreas susceptibles a peligros priorizados con poca cobertura vegetal (ítem a de esta guía), para mantener la consistencia de la información deben usarse los mismos.

e. Otros estudios específicos de la zona de interés

Identificación de áreas degradadas en ecosistemas

El *Mapa Nacional de Áreas Degradadas en Ecosistemas Terrestres*¹⁷, del Ministerio del Ambiente, profundiza en los diversos conceptos de degradación en los ecosistemas y lo sintetiza en cómo aquellos que han sufrido pérdida total o parcial de alguno de sus factores de producción (componentes esenciales) que alteran su estructura y funcionamiento, disminuyendo su capacidad de proveer bienes y servicios, en concordancia con sus lineamientos para la formulación de proyectos de inversión en las tipologías de ecosistemas, especies y apoyo al uso sostenible de la biodiversidad.

La metodología usada en el *Mapa Nacional de Áreas Degradadas en Ecosistemas Terrestres* utiliza el enfoque de la neutralidad de la degradación de las tierras, el cual tiene 3 indicadores:

- a.** Cobertura de la tierra, cuantificada como cambio en la cubierta terrestre;
- b.** Productividad de la tierra, estimada a partir de la productividad primaria neta, incorpora un nuevo indicador; y
- c.** Fragmentación de bosques, estimada a partir de patrones espaciales morfológicos.

Para los objetivos de esta guía, solo se utilizan los indicadores de *cobertura de la tierra* y *productividad de la tierra*, pues son de especial importancia en la determinación de áreas a intervenir; por lo que se detallan a continuación:

• **Cambio de uso de la tierra**

El uso del suelo o la tierra puede ser definido como la expresión cultural de las prácticas de apropiación del territorio. El “*cambio del uso del suelo o tierra*” se refiere a la dinámica de las prácticas de apropiación del territorio (Velázquez, 2015).

Para la clasificación de los diferentes tipos de uso identificados puede emplearse el sistema de clasificación World Land Use System (WLUS), de la Unión Geográfica Internacional (UGI), o el Sistema de CORINE Land Cover, desarrollado y promovido por la Comunidad Europea.

Para la estimación de cambios en el uso, debe considerarse para análisis al menos dos fechas, en años distintos¹⁸ y, de preferencia, en épocas similares (por ejemplo, época seca) para evitar errores de interpretación. Es importante mencionar que mientras más datos (fechas) existan se podrá crear una serie de tiempo, que permitirá un análisis más robusto; sin embargo, los costos y tiempos para el procesamiento de la información pueden incrementarse.

Se recomienda elaborar y acondicionar el material cartográfico de la cobertura y uso actual de la tierra utilizando sensores de alta resolución. Este debe ser el principal insumo para identificar las áreas que han cambiado de uso.

• **Pérdida de productividad**

La degradación también puede considerarse en términos de componentes específicos de la tierra que se ven afectados. Por ejemplo, la degradación de la vegetación implica

15 Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2017), *Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Perú*. Disponible en https://idesep.senamhi.gob.pe/portaldesep/files/tematica/atlas/erosion_de_suelo/Atlas_Erosion_Suelos_por_Regiones_Hidrologicas_Peru.pdf
 16 Herramienta de Identificación Rápida de Oportunidades para la Infraestructura Natural. Disponible en <https://hiro.condesan.org/>
 17 Ministerio del Ambiente (2019), *Mapa Nacional de Áreas Degradadas en Ecosistemas Terrestres*. Disponible en <https://geoservidor.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2020/02/Mapa-Nacional-de-Áreas-Degradadas-Terrestres.pdf>
 18 Debido a que la disponibilidad de imágenes de satélite en cada lugar del territorio es muy variable no se pudo dar un número de años mínimo o máximo.

la reducción de la productividad, disminución de la diversidad de especies y la degeneración del valor nutricional de las poblaciones vegetales para la fauna. La degradación del suelo implica el deterioro de su calidad y fertilidad. Estos cambios pueden ser provocados por muchos factores (erosión, contaminación, deforestación y otros). Una vez más, la degradación de la tierra se puede considerar con respecto a sus aspectos físicos, refiriéndose a los cambios en la composición del suelo, especialmente la pérdida de materia orgánica y estructura del suelo, como la compactación o la formación de costras y el anegamiento; aspectos químicos, relacionados con los cambios en la composición química del suelo, como resultado de la lixiviación, salinización o acidificación; y degradación biológica, referida a la reducción de la biodiversidad del suelo (Yengoh, et al., 2015).

Como punto de partida puede considerarse el documento a, del ítem Recopilación de información cartográfica, elaborado por Minam. Asimismo, si se estima necesario generar información a mayor detalle, es muy útil considerar el "Procedimiento metodológico para la identificación, categorización y priorización de áreas degradadas en ecosistemas terrestres"¹⁹. Debido a que la generación de esta información advierte procesar gran cantidad de información se requiere conocimientos en programación y herramientas de procesamiento digital de imágenes en la nube.

Identificación de áreas de erosionables, pérdida de suelos Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación la Agricultura (FAO), la erosión del suelo significa la eliminación de su capa superior, la más fértil del suelo. Implica que sus minerales y nutrientes se depositen en otros lugares, degradando a menudo los ecosistemas tradicionales. Además, los sedimentos depositados pueden acumularse en embalses o anegar ríos y arroyos, privando a la gente de los recursos y la energía que les aportan. Una herramienta importante para la estimación de la erosión es la ecuación universal de pérdida de suelo y sus variantes.

La cartografía elaborada por Senamhi es una fuente de información inicial relevante. Asimismo, si se estima necesario generar información a mayor detalle se pueden mejorar los insumos y replicarse metodológicamente para el límite geográfico máximo.

Identificación de áreas inestables

Actualmente hay una buena disponibilidad de datos topográficos, es decir, modelos de elevación digital, en el párrafo d del ítem Recopilación de información cartográfica. La extracción de características topográficas a partir de estos modelos son procesos muy comunes en diversas herramientas para la gestión y procesamiento de datos geoespaciales, tales como los softwares especializados de sistemas de información geográfica o procesamiento digital de imágenes.

Para los fines de esta guía, la característica topográfica más importante es la pendiente. Pueden utilizarse los datos procesados en la localización de áreas inestables potenciales; las pendientes mayores a 50 % de empinado se consideran potencialmente inestables.

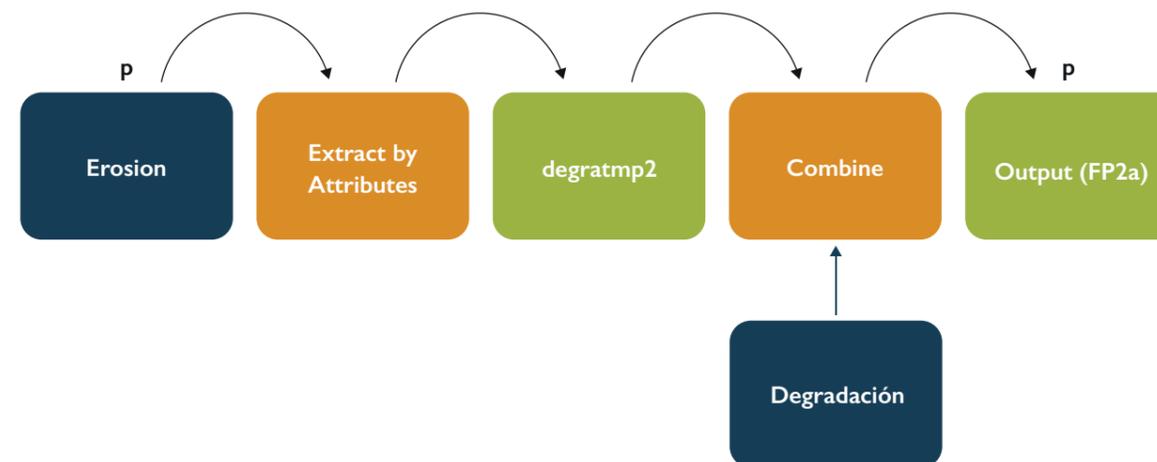
Mapas de áreas inestables y erosionables con indicios de degradación

Una vez que se cuenta con todos los insumos descritos en los ítems anteriores se procede a realizar el análisis geoespacial con la ayuda de sistemas de información geográfica para determinar:

Áreas potencialmente erosionables con indicios de degradación, con alta o muy alta producción de sedimentos y baja productividad. Para su determinación será necesario utilizar las capas de información de erosión, seleccionando aquellas que hayan sido categorizadas como alta (por ejemplo, 50 a 100 Tn/ha/año) y muy alta (por ejemplo, mayor a 100 Tn/ha/año), superponiendo a aquellas áreas degradadas en donde se haya evidenciado la pérdida de productividad.

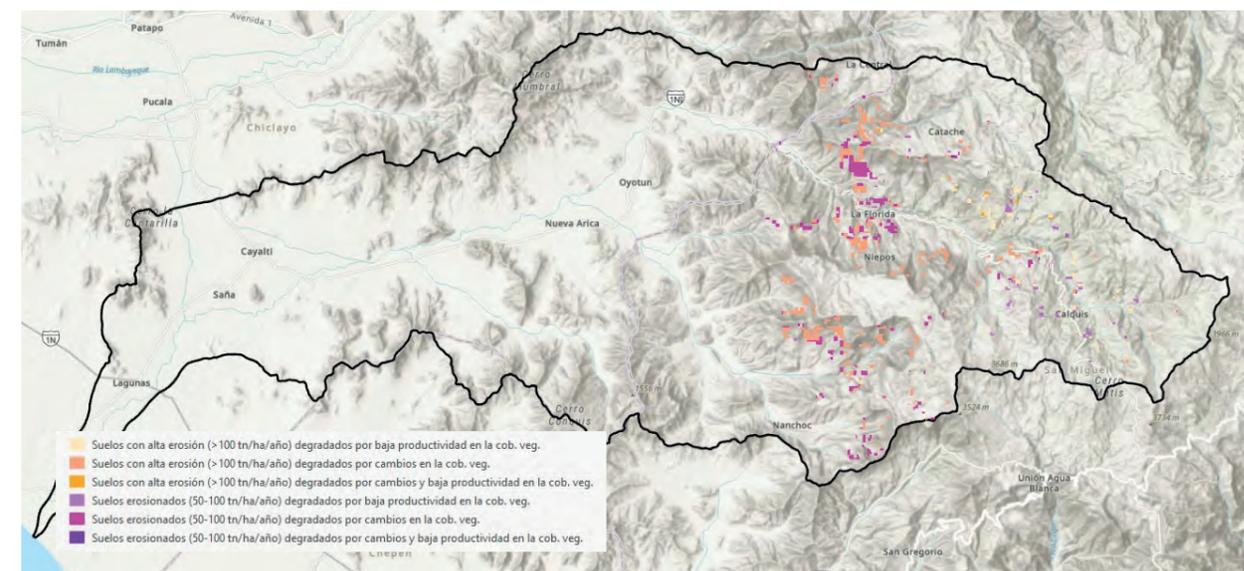
En el siguiente gráfico se esquematiza el proceso:

Gráfico 2. Geoprocesamiento para localización de áreas potencialmente erosionables con indicios de degradación



Fuente: Forest Trends

Mapa 5. Áreas potencialmente erosionables con indicios de degradación



Fuente: Forest Trends

¹⁹ Ministerio del Ambiente (2022). Procedimiento metodológico para la identificación, categorización y priorización de áreas degradadas en ecosistemas terrestres. Disponible en https://geoservidor.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2022/03/Procedimiento-metodologicopara-la-identificación_categorización-y-priorización-de-áreas-degradadas-en-ecosistemas-terrestres.pdf

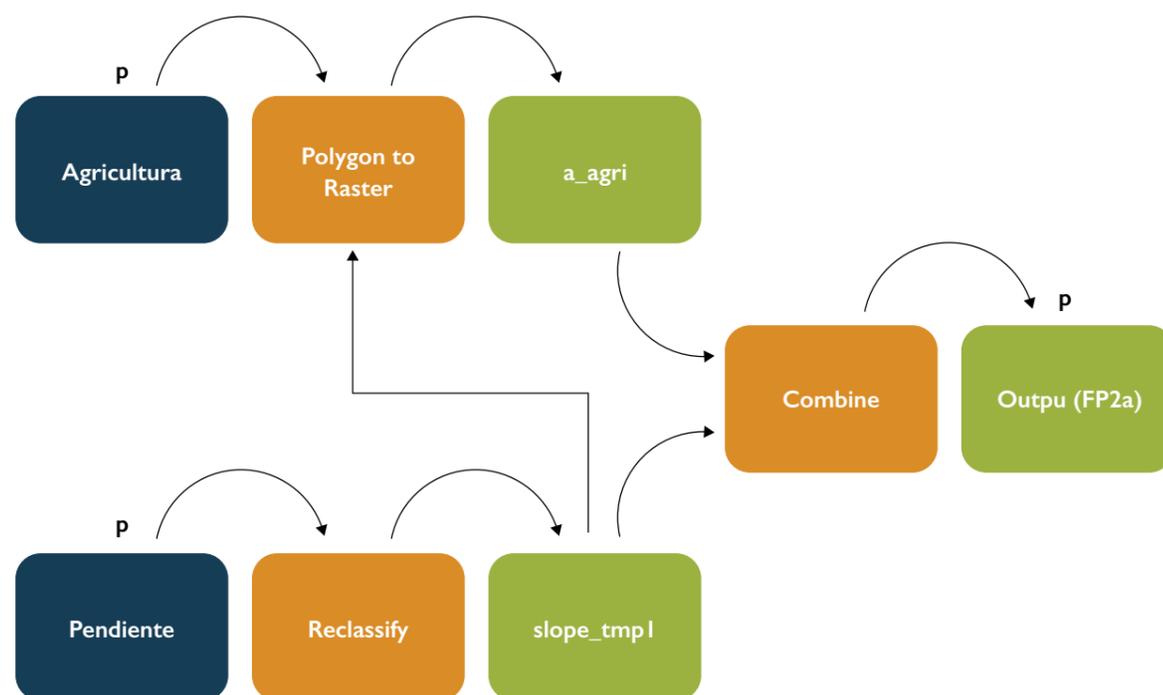


Foto: Forest Trends

Áreas potencialmente inestables afectadas por cambio de uso, con alta o muy alta pendiente con cambios de uso. Para su determinación será necesario utilizar las capas de información de pendientes, seleccionando aquellas que

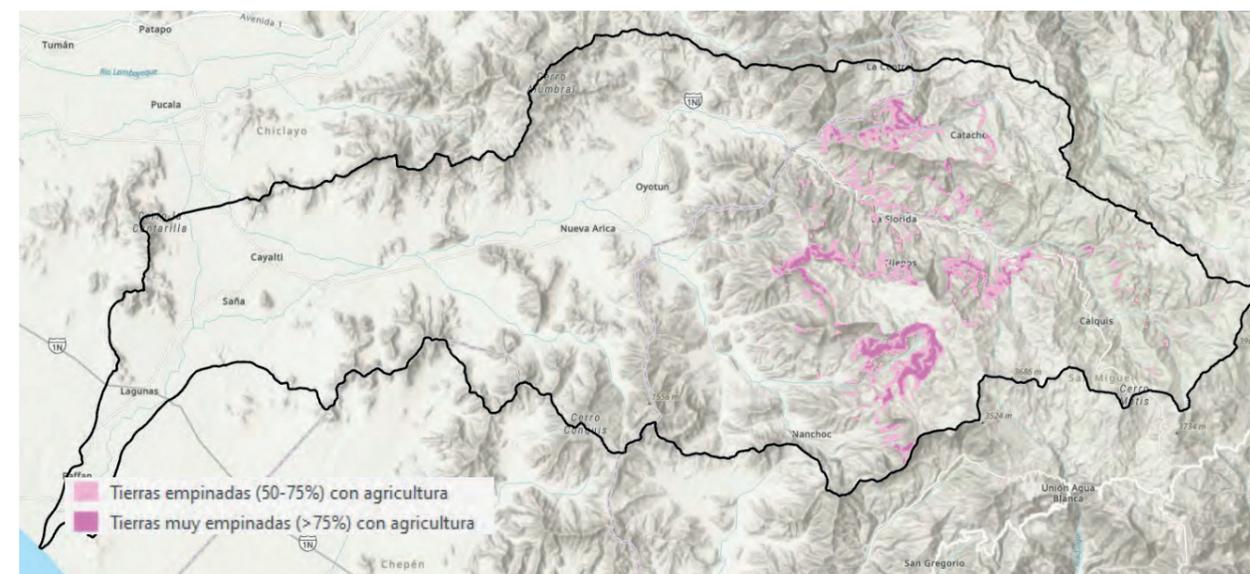
hayan sido categorizadas como alta (50 a 75 %) y muy alta (mayor a 75 %), superponiendo a aquellas que se han sufrido un cambio de uso. En el siguiente gráfico se esquematiza el proceso:

Gráfico 3. Localización de áreas potencialmente inestables con indicios de degradación



Fuente: Forest Trends

Mapa 6. Áreas potencialmente inestables con indicios de degradación



Fuente: Forest Trends

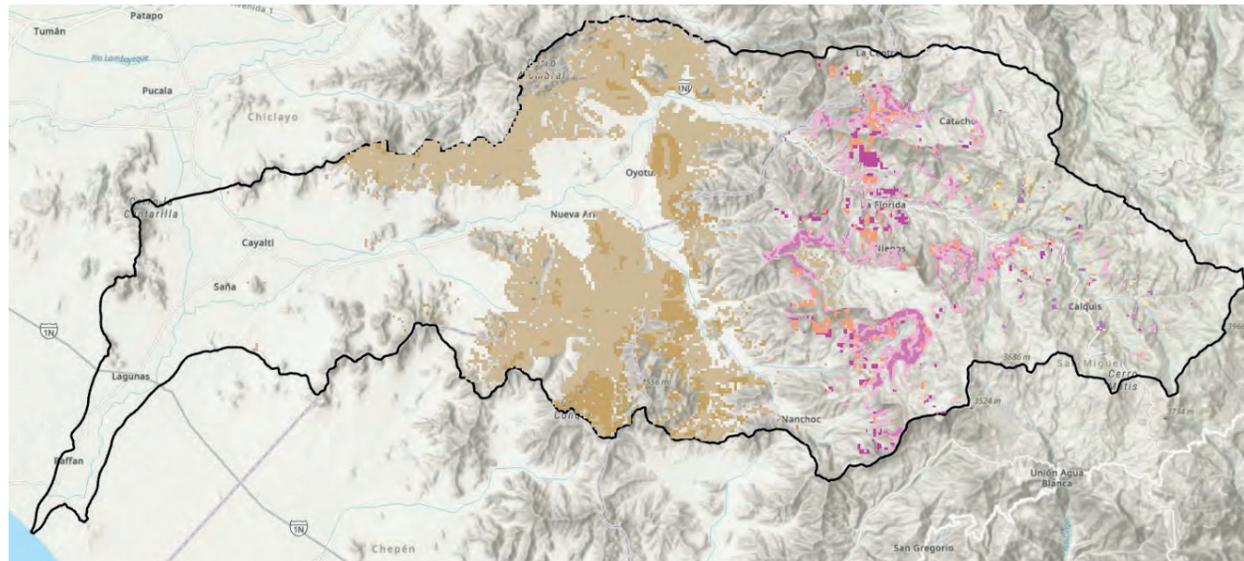
El resultado de este paso es la identificación de áreas donde se presentan los problemas de interés y que tiene potencial de ser atendidos por el proyecto. Esta información debe estar en formato geoespacial, es decir, una base de datos con soporte geoespacial comúnmente llamada geodataba-

se. También, pueden ser archivos en formato intercambiable y legible por la mayoría de los softwares de sistemas de información geográfica (GIS por sus siglas en inglés) como el formato shapefile. Asimismo, debe contener un informe detallado de los pasos seguidos y presentando los resultados.



Foto: Forest Trends

Mapa 7. Identificación de áreas donde se presenta los problemas de interés y que tiene potencial de ser atendidos por el proyecto



Fuente: Forest Trends

2.3 PASO 3. Afinamiento de áreas

Teniendo identificadas las áreas con potencial de ser atendidas por el proyecto, es necesario aplicar criterios que permitan mejorar la delimitación o eliminación de los polígonos resultantes del paso anterior; en algunos casos será necesario la incorporación de polígonos. Los criterios a considerar pueden evaluarse preliminarmente en gabinete mediante el uso de sistemas de información geográfica; sin embargo, es obligatorio su corroboración en campo.

A continuación, se describen los criterios más importantes a considerar:

Accesibilidad: se refiere a la facilidad que tienen las áreas con potencial a ser dotadas de insumos para poder implementar las medidas de infraestructura natural, es decir, cercanía a centros poblados que permitan disponer de recurso humano, vías de comunicación que permitan el traslado de materiales, entre otros servicios.

Agrupamiento y conectividad: usualmente se encontrarán áreas pequeñas y dispersas que pueden tener un efecto marginal al momento de implementar una medida de infraestructura natural, por lo que es necesario buscar su agrupamiento y conectividad con un enfoque ecológico y de paisaje.

Límite altitudinal: es necesario considerar que, por encima de los 4000 a 4500 m s. n. m. es muy reducida la supervivencia de especies vegetales. Excepcionalmente, algunas especies nativas bien adaptadas sobreviven, por lo que requiere analizar caso por caso aquellos polígonos (o parte de ellos) que superen dicho umbral. Por tanto, medidas de infraestructura natural asociadas a la cobertura vegetal superior a esta altitud tendrán poca oportunidad.

Inventario de cárcavas: dentro de las áreas potenciales es probable que se encuentren procesos de erosión hídrica (surcos y cárcavas) y, considerando que en la fase de dise-

ño será necesario contar con información más detallada de estas, es necesario generar un inventario; por ello, se sugiere considerar en el GIS una entidad tipo línea a lo largo de la cárcava y resaltar los atributos más importantes.

Inventario de andenes y/o terrazas: es probable que por la escala e insumos utilizados no se haya podido mapear áreas en donde ya existen andenes. Sin embargo, si hubiera en las áreas potenciales o cerca a ellas son una buena oportunidad para incorporarlas como áreas a intervenir con medidas de infraestructura natural asociadas a la conservación de suelos. Esta información será de suma importancia para la fase de diseño. Se sugiere considerar una entidad en el GIS tipo polígono que los agrupe y resaltar los atributos más importantes.

Inventario de amunas: similar al caso de andenes, si dentro de áreas potenciales o cercanas a ellas se encuentran amunas son una buena oportunidad para incorporarlas como áreas a intervenir con medidas de infraestructura natural. Esta información será de suma importancia para la fase de diseño. Se sugiere considerar una entidad en el GIS tipo línea a lo largo del canal.

Inventario de peligros de origen geológico: la necesidad de conocer los peligros de origen geológico es para descartar polígonos en su totalidad o parcialmente en donde, debido al peligro identificado, la infraestructura natural no tenga una contribución significativa (por ejemplo, fallas activas).

Uso actual de la tierra y capacidad de uso mayor de la tierra: si bien es cierto forman parte de insumos para localizar las áreas potenciales, en esta etapa es necesario actualizar los límites de los polígonos mediante un reconocimiento en campo considerando aspectos del uso actual y capacidad de uso mayor.

Fajas marginales: es una zona de especial interés para identificar áreas potenciales inundables en la unidad hidrográfica (cuenca) media y alta. Su consideración es opcional, de existir una delimitación deben ser incorporadas.

Una vez que se cuenta con las áreas potenciales de ser atendidas por el proyecto, se requiere identificar en campo la posible medida de infraestructura natural basado en la problemática y la inspección visual en campo. A priori, por los insumos utilizados se sugiere:

- En áreas identificadas como susceptibles a peligros priorizados con poca cobertura vegetal se espera la predominancia de medidas asociadas o que favorezca la cobertura vegetal, tales como reforestación, revegetación, barreras forestales o vivas y clausura de praderas.
- En áreas identificadas como potencialmente erosionables e inestables con indicios de degradación se espera medidas que ayuden a la conservación del suelo, tales como control de cárcavas, zanjas de infiltración, terraza de formación lenta, restauración de andenes y restauración de amunas.

El resultado de este paso es la identificación preliminar de la medida de infraestructura natural, la cual servirá como insumo y analizada en las fases siguientes para ser confirmada o replanteada. Esta identificación se debe hacer por cada polígono y debe incluirse como un atributo en la geodatabase o *shapefile* correspondiente.

Bibliografía

Chuvieco, E. (2002). Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Madrid: Ariel.

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2011a). Memoria descriptiva del Mapa de vulnerabilidad física del Perú. Herramienta para la gestión de riesgo. Lima: MINAM.

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2011b). Inventario y evaluación del patrimonio natural en la reserva paisajística Nor Yauyos Cochas. Lima: Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural/MINAM.

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2015). Mapa nacional de cobertura vegetal. Memoria descriptiva. Lima: Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural/MINAM.

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2016). Guía de inventario de la flora y vegetación (segunda edición). Lima: Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural/ MINAM.

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2018). Mapa nacional de ecosistemas del Perú. Lima: MINAM.

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2019). Mapa Nacional de Áreas Degradadas en Ecosistemas Terrestres. Lima: MINAM.

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2022). Procedimiento metodológico para la identificación, categorización y priorización de áreas degradadas en ecosistemas terrestres. Lima: MINAM.

Velázquez *et al.* (2015). Cambio de uso de suelo. (PDF) Cambio de uso del suelo (researchgate.net)

Yarlequé, C. *et al.* (2007). Reconstrucción de datos de precipitación pluvial en series de tiempo mediante transformadas de wavelet con dos niveles de descomposición. Centro Internacional de la Papa (CIP).

Yengoh, G. *et al.* (2015). Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales. Current Status, Future Trends, and Practical Considerations. DOI <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-24112-8>

Vega-Araya, Mauricio, & Alvarado-Barrantes, Ricardo. (2019). Análisis de las series de tiempo de variables biofísicas para cuatro ecorregiones de Guanacaste, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(2), 60-96. <https://dx.doi.org/10.15359/rca.53-2.4>



Anexos

Anexo I

Principales características de imágenes satelitales de alta resolución espacial.

N°	Sensor plataforma	Bandas espectrales	Resolución espacial	Enlace web (catálogo)
01	WorldView-1	Pancromática	0.5 m	https://discover.maxar.com/
02	WorldView-2	Pancromática Multiespectral de 8 bandas	0.46 m 1.85 m	
03	WorldView-3	Pancromática Multiespectral de 8 bandas	0.31 m 1.24 m	
04	WorldView-4	Pancromática Multiespectral de 4 bandas	0.31 m 1.24 m	
05	GeoEye-1	Pancromática Multiespectral de 4 bandas	0.41 m 1.65 m	
06	Quickbird	Pancromática Multiespectral de 4 bandas	0.60 m 2.4 m	
07	Ikonos	Pancromática Multiespectral de 4 bandas	0.80 m 3.2 m	https://imagehunter.apollomapping.com/
08	KOMPSAT-2	Pancromática Multiespectral de 4 bandas	1 m 4 m	
09	KOMPSAT-3	Pancromática Multiespectral de 4 bandas	0.7 m 2.8 m	
10	KOMPSAT-3A	Pancromática Multiespectral de 4 bandas	0.55 m 2.2 m	
11	Pléiades 1A/1B	Pancromática Multiespectral de 4 bandas	0.7 m 2.8 m	
12	SuperView-1	Pancromática Multiespectral de 4 bandas	0.5 m 2.0 m	
13	GaoFen-1	Pancromática Multiespectral de 4 bandas	2.0 m 8.0 m	
14	GaoFen-2	Pancromática Multiespectral de 4 bandas	0.8 m 3.2 m	
15	ZY-3	Pancromática Multiespectral de 4 bandas	2.1 m 5.8 m	

Anexo 2

Script en Google Earth Engine para calcular NDVI.

```
#####CONFIGURACIÓN#####  
//Nombre de la cuenca a analizar  
var cuenca = 'Cuenca Cañete';  
  
//Intervalo de tiempo y umbral de nubosidad para estimar NDVI  
var yearstart = 2000;//Año de inicio  
var yearend = 2021;//Año de fin  
var max_cloud = 20;//Umbral maximo de nubosidad  
  
#####FIN DE CONFIGURACIÓN#####  
//Conjuntos de datos  
var roi = Cuenca_ARCC.filterMetadata('NOMBRE','EQUALS',cuenca);  
  
#####VEGETACIÓN#####  
//Collecciones LANDSAT a incluir  
var L4 = 'LANDSAT/LT04/C01/T1_SR';  
var L5 = 'LANDSAT/LT05/C01/T1_SR';  
var L7 = 'LANDSAT/LE07/C01/T1_SR';  
var L8 = 'LANDSAT/LC08/C01/T1_SR';  
  
var bands_L457 = ['B1','B2','B3','B4','B5','B7','B6','pixel_qa'];  
var bands_L8 = ['B2','B3','B4','B5','B6','B7','B10','pixel_qa'];  
var nbands = ['blue','green','red','nir','swir1','swir2','thermal','pixel_qa'];  
  
//Función de enmascaramiento de nubes de imagenes LANDSAT  
var cloudMaskL457 = function(image) {  
  var qa = image.select('pixel_qa');  
  // If the cloud bit (5) is set and the cloud confidence (7) is high  
  // or the cloud shadow bit is set (3), then it's a bad pixel.  
  var cloud = qa.bitwiseAnd(1 << 5)  
  .and(qa.bitwiseAnd(1 << 7))  
  .or(qa.bitwiseAnd(1 << 3));  
  // Remove edge pixels that don't occur in all bands  
  var mask2 = image.mask().reduce(ee.Reducer.min());  
  return image.updateMask(cloud.not()).updateMask(mask2);  
};
```

```
//Funcion para caluclar NDVI en todas las imagenes de una coleccion  
var ND = function(image) {  
  return image.addBands(image.normalizedDifference(['nir','red']).rename('ndvi')).float();  
  //return imageND;  
};  
var dateini = yearstart+'-01-01';  
var dateend = yearend+'-12-31';  
  
//Filtrado de colecciones por cuenca y tiempo  
var collectionL4 = ee.ImageCollection(L4).select(bands_L457,nbands)  
  .filterMetadata('CLOUD_COVER','less_than',max_cloud)  
  .filterBounds(roi)  
  .filterDate(dateini,dateend)  
  .map(cloudMaskL457)  
  .map(ND);  
  
var collectionL5 = ee.ImageCollection(L5).select(bands_L457,nbands)  
  .filterMetadata('CLOUD_COVER','less_than',max_cloud)  
  .filterBounds(roi)  
  .filterDate(dateini,dateend)  
  .map(cloudMaskL457)  
  .map(ND);  
  
var collectionL7 = ee.ImageCollection(L7).select(bands_L457,nbands)  
  .filterMetadata('CLOUD_COVER','less_than',max_cloud)  
  .filterBounds(roi)  
  .filterDate(dateini,dateend)  
  .map(cloudMaskL457)  
  .map(ND);  
  
var collectionL8 = ee.ImageCollection(L8).select(bands_L8,nbands)  
  .filterMetadata('CLOUD_COVER','less_than',max_cloud)  
  .filterBounds(roi)  
  .filterDate(dateini,dateend)  
  .map(cloudMaskL457)  
  .map(ND);  
  
//Collecciones unificadas  
var collection = ee.ImageCollection(collectionL4)  
  .merge(collectionL5)  
  .merge(collectionL7)  
  .merge(collectionL8)
```

```
.sort('DATE_ACQUIRED');  
//.aside(print);  
  
var ndvi_median = collection.select('ndvi').median().rename('ndvi').clip(roi);  
  
//Paletas de color  
var p_ndvi = ['#ff0000','#ffa75c','#d0ff12','#0cff2a','#56b844'];  
  
//Salidas en el visor  
Map.centerObject(roi); //Centrado de pantalla  
Map.addLayer(ndvi_median,{bands:'ndvi',palette:p_ndvi,min:0.1,max:0.4},'NDVI',false,1);  
  
//Descargas  
Export.image.toDrive({  
  image: ndvi_median,  
  region: roi,  
  crs:'EPSG:32718',  
  folder:'GEE',  
  description:'NDVI_'+cuenca.replace(/ /g,''),  
  scale:30  
});
```

El script puede encontrarse en el siguiente vinculo:
<https://code.earthengine.google.com/51d71affc45554902289d9630781b6ec?noload=true>





Foto: Forest Trends

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>

