PERÚ | Ministerio del Ambiente

IGP Instituto Geofísico del Perú

DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE LOS SUELOS E IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL DISTRITO DE LIRCAY

(Provincia de Angaraes, región Huancavelica)

Informe Técnico n.° 016-2026/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima-Perú
Julio, 2026

CRÉDITOS

Nelly Paredes del Castillo
Ministra del Ambiente

Hernando Tavera
Jefe institucional del IGP

Juan Carlos Gómez
Director de la Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida del IGP

Diagnóstico de la erosión hídrica de los suelos e identificación de fuentes de producción y transporte de sedimentos en el distrito de Lircay
Informe técnico

Sergio Morera
Jhon Orrillo
Shirley Contreras
Jorge Laura
Michael Sánchez
Kithner Espinoza
Jhon Villanueva
Diana Díaz
Deysi Yana
Jennifer Ruiz
Fernando Prudencio
Autores

César Huincho
Coordinador administrativo

Hernando Tavera
Jorge Concha
Edición de contenido

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Este documento incluye figuras, tablas, ecuaciones y material cartográfico elaborado por el equipo técnico del PP 0089-IGP, excepto que se indique explícitamente lo contrario.

Este informe ha sido elaborado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP)
Calle Badajoz 169, Mayorazgo, Ate, Lima
Teléfono: +5113172300

Accede libremente al Repositorio Geofísico Nacional (REGEN) para descargar este informe:
https://repositorio.igp.gob.pe/

REGEN

Lima, julio de 2026

Programa Presupuestal 0089
REDUCCIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS AGRARIOS

Actividad presupuestal
Generación de información de levantamiento de suelos, de zonificación agroecológica y de medición del deterioro del suelo

Tarea
Medición de la degradación de los suelos agrarios por erosión

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las personas y actores institucionales que colaboraron en el desarrollo del presente estudio:

- La Municipalidad Provincial de Angaraes-Lircay (MPAL), en la región Huancavelica, por el apoyo logístico y la convocatoria para el inicio y cierre de las investigaciones científicas.
- El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), por el fortalecimiento tecnológico mediante el Proyecto PER5033 "Application of Nuclear Techniques for Assessing Soil Erosion and Sedimentation in Mountain Agricultural Catchments".
- El Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), por el financiamiento de proyectos científicos complementarios.
- El Laboratory for Sciences of Climate and Environment (LSCE), de Francia, por su cooperación en análisis complementarios de muestras de suelo.

DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE LOS SUELOS E IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL DISTRITO DE LIRCAY

(Provincia de Angaraes, región Huancavelica)

Lima, Perú
Julio de 2026

RESUMEN

El distrito de Lircay presenta predominancia de diez tipos de suelos según su origen: depósitos de bofedales, glaciofluviales y glaciares. Entre 1987 y 2022, la superficie agrícola se incrementó de 24 a 35 km², mientras que los humedales se redujeron de 13 % a 11 %. Asimismo, la vegetación herbácea natural constituye la cobertura dominante del distrito, con el 66 % del territorio (546 km²), mientras que el suelo desnudo representa el 18 % (149 km²) sobre una superficie que se encuentra por encima de los 4000 m s. n. m.

La respuesta hidrosedimentológica ante eventos de precipitación fue evaluada en los principales cultivos y usos del suelo mediante 30 microparcelas para el ciclo 2022–2023. Los resultados revelan una degradación crítica en zonas agrícolas, con tasas de pérdida de 20 y 18 t/ha/año para arveja y haba, respectivamente, lo que representa una pérdida de suelo hasta 20 veces mayor que en coberturas naturales como el ichu (1 t/ha/año). Un hallazgo clave es el comportamiento del suelo desnudo, que registró tasas bajas (4.5 t/ha/año) debido a un proceso de encostramiento y sellado superficial que incrementa la escorrentía neta y transfiere el potencial erosivo aguas abajo de la cuenca.

Para comprender el movimiento histórico del suelo a lo largo de las laderas en los últimos 60 años, se usó el trazador radioisotópico de Cs-137. A esta escala temporal, los suelos desnudos registraron las mayores tasas (22 t/ha/año), seguidas por las plantaciones de pino (7 t/ha/año) y pajonales (4 t/ha/año). En contraste, los bofedales actúan como sumideros que interrumpen la conectividad de los suelos erosionados hacia los cauces, acumulando en promedio 2 t/ha/año. Se concluye que las coberturas naturales redujeron las tasas de erosión en 94 % respecto a los suelos expuestos sin cobertura.

La representación espacial a escala de cuenca mediante WaTEM/SEDEM conserva la diferenciación de tasas entre subcuencas. Se estimaron rangos de erosión de 3–110, 3–95 y 6–67 t/ha/año, así como promedios de 18, 9 y 6 t/ha/año para las subcuencas de Coliscancha (177 km²), Ajohuarina (404 km²) y Pircamayo (104 km²), respectivamente. Aproximadamente el 72 % del distrito presenta tasas superiores a 10 t/ha/año. Más del 60 % del territorio se ubica entre 20 y 45 t/ha/año, correspondiente a categorías de moderada a alta severidad. Las tasas superiores a 45 t/ha/año alcanzan cerca del 20 % en Coliscancha y menos del 4 % en Ajohuarina y Pircamayo. En conjunto, la erosión a escala de cuenca muestra un predominio de categorías fuerte (12.5–20 t/ha/año) y muy fuerte (20–30 t/ha/año) en Ajohuarina y Pircamayo, donde ambas clases concentran más del 60 % del área. En contraste, Coliscancha presenta la mayor proporción de categorías severa a extrema (>30 t/ha/año), que en conjunto representan cerca del 49 % de la subcuenca.

La procedencia de sedimentos es consistente con los patrones espaciales del modelado. Entre el 82 % y el 94 % del material transportado proviene de suelos desnudos, cárcavas y bancos de río. Estas fuentes, pese a ocupar solo el 18 % del territorio, dominan la carga sedimentaria fluvial. En contraste, los suelos cultivados y con cobertura nativa, aunque presentan altas tasas de erosión a escala de ladera, aportan menos del 13 % en eventos de crecida, lo que evidencia que la mayor parte del sedimento generado en ladera no se exporta. El aporte a los ríos está condicionado por su conexión con la red de drenaje.

CONTENIDO

4 Agradecimientos

6 Resumen

9 Siglas, acrónimos y convenciones

11 Glosario de términos clave y conceptos fundamentales

13 Introducción

13 Los suelos a escala global y regional

13 Antecedentes del distrito

14 Instrumentación y laboratorio

14 Redes de monitoreo e instrumentación

14 Competencia técnica y analítica

19 Análisis del sistema físico-territorial

19 Relieve y geología

21 Clima e hidrología

22 Uso del suelo en las últimas décadas

24 Diagnóstico de la erosión

24 Historia de los últimos 60 años

30 Dinámica y monitoreo de la erosión actual

35 Procedencia y dinámica de los sedimentos

35 Caracterización de los sedimentos

36 Zonas críticas de aporte de sedimentos

41 Mapeo de las tasas y la severidad de erosión

41 Construcción del modelo espacial de erosión

42 Espacialización de la severidad de pérdida de suelo

45 Conclusiones y recomendaciones para la gestión

45 ¿Qué nos dicen los isótopos, las trampas y el modelado?

45 ¿En qué situación se encuentra Lircay respecto a la cordillera de los Andes?

46 Prioridades para la gestión

46 Capacidad técnica y tecnológica del laboratorio MoSSARD

47 Referencias

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y CONVENCIONES

USOS DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL	
Agr	Áreas agrícolas heterogéneas / Frontera agrícola.
AHu	Áreas húmedas continentales.
Arb	Áreas con vegetación arbustiva.
BPl	Bosques plantados.
Gla	Área glaciar.
Hrb	Áreas con vegetación herbácea natural.
Min	Áreas de extracción minera.
PFo	Cobertura forestal.
SVg	Área altoandina con escasa o sin vegetación.
Urb	Áreas urbanizadas.

VARIABLES BIOFÍSICAS, HIDROLÓGICAS Y EDÁFICAS	
C	Factor de cobertura vegetal.
Ch	Altura del cultivo evaluado en campo.
CSS	Concentración de sedimentos en suspensión.
D	Deposición bruta.
E	Energía cinética de la lluvia (en modelo TEST).
Ec30	Energía cinética de la lluvia acumulada en los 30 minutos de mayor intensidad del evento.
Ero	Costras de erosión.
Fa	Fracción de agregados libres del suelo.
I_{30}	Intensidad máxima en 30 minutos.
K	Factor de erodabilidad del suelo.
LS	Factor de longitud y pendiente.
Mt	Humedad antecedente del suelo.
P	Factor de prácticas de conservación.
PP	Precipitación total acumulada por evento.
Q	Caudal.
R	Factor de erosividad.
Rc	Coeficiente de escorrentía.
Res	Fracción de residuos vegetales sobre la superficie del suelo.
Rn	Rugosidad superficial del suelo.
Ro	Escorrentía superficial generada ante eventos de precipitación.
SDR	Relación de entrega de sedimentos (implícito).
SL	Pérdida de suelo por evento (*Soil Loss*).
SPI	Índice de potencia de corriente.
TWI	Índice de humedad topográfica.
Vc	Cobertura vegetal total sobre la superficie del suelo (en modelo PLS-R).

RADIOISÓTOPOS Y TRAZADORES	
^{137}Cs	Cesio-137.
$^{210}Pb_{ex}$	Plomo-210 en exceso.

INSTITUCIONES	
IGP	Instituto Geofísico del Perú.
INDECI	Instituto Nacional de Defensa Civil.
MIDAGRI	Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.
MoSSARD	Laboratorio de Monitoreo de Suelos, Sedimentos y Agua ante Riesgos de Desastres.

NORMAS Y MÉTODOS	
DEM	Modelo de elevación digital.
ISO	Organización Internacional de Normalización.
LD	Límite de detección.
POE	Procedimiento operativo estándar.
NTP	Normas Técnicas Peruanas.
TEST	Erosión en terrazas y transporte de sedimentos.
TXRF	Espectrometría de fluorescencia de rayos X por reflexión total.
VBP	Valor bruto de la producción.
VIP	Importancia de la variable en la proyección, índice del análisis PLS-R que jerarquiza los factores según su influencia sobre la pérdida de suelo.
WaTEM/SEDEM	Modelo de erosión y transporte de sedimentos en cuencas.

GLOSARIO DE TÉRMINOS CLAVE Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Erosión hídrica	Proceso de degradación donde el impacto de la lluvia y el flujo del agua desprenden y transportan la capa superficial del suelo.
Escorrentía superficial	Agua de lluvia que no se infiltra y corre por el terreno; es el principal motor de transporte masivo de sedimentos en el distrito.
Cárcavas y caminos	Zanjas profundas y vías no pavimentadas que mantienen conexión directa con los cauces, concentrando entre el 65 % y el 67 % de la carga sedimentaria fluvial del distrito.
Saturación del suelo	Estado en el que el suelo ya no puede absorber más agua (alcanzado en marzo con niveles de 28–31 %), lo que dispara la erosión inmediata.
Trazadores isotópicos	Átomos (^{137}Cs y $^{210}Pb_{ex}$) que permiten reconstruir la "memoria" del suelo y cuantificar las tasas de erosión o sedimentación ocurridas en los últimos 60 a 100 años.
Carbono orgánico (CO)	Indicador del estado de conservación del suelo; niveles inferiores al 1 % reducen la cohesión entre partículas e incrementan la susceptibilidad a la erosión.
Sedimentos en suspensión (CSS)	Cantidad de partículas sólidas arrastradas por el río.
Conectividad sedimentaria	Capacidad física de una cuenca para trasladar el suelo erosionado desde las laderas altas hasta los cauces de los ríos.
WaTEM/SEDEM	Modelo computacional distribuido utilizado para zonificar y predecir el riesgo de erosión en los 829 km² del área de estudio.
Quinual (*Polylepis*)	Especie forestal nativa utilizada como solución basada en la naturaleza, con tasas de pérdida de suelo de 4 t/ha/año, las más bajas registradas en el distrito.



Paisaje altoandino del distrito de Lircay, región Huancavelica, con laderas agrícolas, cobertura vegetal y sectores de suelo expuesto.

1. Introducción

1.1 Los suelos a escala global y regional

La erosión hídrica es el factor de degradación del suelo más grave a nivel mundial. Este proceso reduce la productividad agrícola y compromete la seguridad alimentaria. En las tierras de cultivo, se pierden anualmente 36 000 millones de toneladas de suelo (Borrelli et al., 2017). La pérdida de suelo por actividades humanas es hasta 100 veces más rápida que su formación natural (Montgomery, 2007). Estas cifras adquieren mayor relevancia en regiones de montaña como los Andes (Borrelli et al., 2021), donde las fuertes pendientes y lluvias intensas favorecen el arrastre de la capa fértil. En este contexto, la morfología del relieve incrementa la energía del flujo superficial, generando efectos severos sobre la estabilidad del territorio (O'Neal et al., 2005).

En los Andes, la conversión de vegetación natural en cultivos de ladera altera la calidad del suelo. Esta transformación reduce la materia orgánica y debilita la cohesión entre partículas (Lal, 2003; Bronick & Lal, 2005). El pastoreo intensivo también deteriora la estructura del suelo mediante la compactación por pisoteo del ganado. Un suelo compactado reduce su porosidad, limitando la infiltración de agua (Centeri, 2022) y favoreciendo el incremento del flujo superficial (Ochoa-Tocachi et al., 2016). Bajo estas condiciones, la reducción de la cobertura vegetal incrementa significativamente las tasas de erosión en laderas, convirtiendo los suelos en fuentes activas de sedimentos que son transportados hacia ríos y quebradas durante eventos de lluvia de alta intensidad (Gyssels et al., 2005; Tao et al., 2017; Morera et al., 2017; Bracken et al., 2013).

El análisis detallado a nivel distrital permite vincular los procesos físicos con la gestión territorial. Este enfoque resulta clave para promover sistemas agrícolas sostenibles frente al cambio climático (Dittmer et al., 2023) y orientar estrategias de conservación del patrimonio natural y productivo andino (Zimmerer, 2014; Zubieta et al., 2021). El presente estudio diagnostica la erosión hídrica en el distrito de Lircay, identificando fuentes, estimando la producción de sedimentos y analizando su transporte a escala de cuenca.

1.2 Antecedentes del distrito

El distrito de Lircay, ubicado en la provincia de Angaraes (Huancavelica), representa un sistema altoandino con alta presión antrópica sobre el suelo. Según el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI, s. f.), presenta una superficie agropecuaria de 34 668 ha gestionada por más de 3300 productores, con una población pecuaria de 625 574 ovinos y 270 053 alpacas, además de caprinos y vacunos. De acuerdo con las estimaciones y proyecciones de población del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2025), la población del distrito de Lircay se estimó en 24 808 habitantes al 30 de junio de 2024. Esta presión se ve reforzada por una estructura productiva en la que la actividad pecuaria aporta el 58.3 % del Valor Bruto de la Producción (VBP) y registró una reducción del 12.7 % entre 2015 y 2019 (MIDAGRI, s. f.). La actividad agrícola se concentra en cultivos como la papa (4475 ha; >41 200 t) y la cebada (2900 ha), desarrollados en laderas con limitada implementación de prácticas de conservación, lo que favorece la escorrentía superficial, la movilización de sedimentos y la degradación del suelo.

A nivel nacional, el Programa Presupuestal PP0089 ha identificado como problema el deficiente aprovechamiento del recurso suelo en el ámbito agrario. A partir de un análisis multicriterio de bases de datos oficiales, se estimó una población objetivo de 3 701 600 ha de suelos degradados severamente, concentrados en 52 distritos de 8 departamentos, lo que representa el 32 % de la población potencial (11 519 206 ha). No obstante, la ausencia de estimaciones locales de tasas de erosión y la limitada evaluación de prácticas de manejo restringen el diseño de estrategias efectivas. Esta limitación se ve reforzada por enfoques que analizan la erosión a una sola escala, sin considerar la interacción entre generación, redistribución y exportación de sedimentos. En consecuencia, resulta necesario adoptar enfoques multiescala que permitan caracterizar con mayor precisión la degradación del suelo en cuencas altoandinas.

2. Instrumentación y laboratorio

2.1 Redes de monitoreo e instrumentación

Para caracterizar la respuesta hidrológica y el transporte de sedimentos en el distrito de Lircay, se implementó el monitoreo hidrosedimentológico y meteorológico distribuido en las zonas alta, media y baja del área de estudio. La red integra una estación hidrometeorológica en la microcuenca Tambraico, representativa de cuencas de cabecera (Capítulo 4.2), una estación meteorológica en Jatumpata para el análisis de la precipitación (Figura 2.1.1; Capítulo 3.2.2) y una estación hidrosedimentológica en la microcuenca Allato, ubicada aguas abajo del sistema, donde se integran los aportes de las subcuencas superiores (Figura 2.1.1; Capítulo 5.1). Esta configuración permite capturar la generación de escorrentía en cabeceras y su respuesta integrada a escala de cuenca, y constituye la base del análisis hidrosedimentológico del distrito.

Como parte del monitoreo para la técnica de radioisótopos, se recolectaron 120 muestras de suelo en campo, de las cuales 73 (61 %) presentaron señal detectable de Cs-137, mientras que 47 muestras registraron actividad por debajo del límite de detección (Capítulo 4.1). Por su parte, para la técnica de *fingerprinting*, se filtraron y validaron un total de 9 muestras provenientes de fuentes de sedimento en el cauce de la red hídrica del distrito de Lircay, empleadas para la identificación de fuentes y rutas de transferencia de sedimentos (Capítulo 5.2).

2.2 Competencia técnica y analítica

2.2.1 Capacidades analíticas y tecnologías de alta resolución

Las matrices ambientales recolectadas en el distrito de Lircay fueron procesadas en el Laboratorio de Monitoreo de Suelos, Sedimentos y Agua ante Riesgos de Desastres (MoSSARD) del Instituto Geofísico del Perú (IGP). El laboratorio constituye una infraestructura analítica avanzada de alta resolución, caracterizada por la convergencia de instrumentación analítica de alta complejidad y precisión (Figura 2.2.1), metodologías validadas (Tabla 2.2.1) y personal científico especializado. Dicha capacidad permite que los datos generados constituyan el sustento técnico-científico necesario para la aplicación de metodologías de modelización de la erosión hídrica a escala distrital.

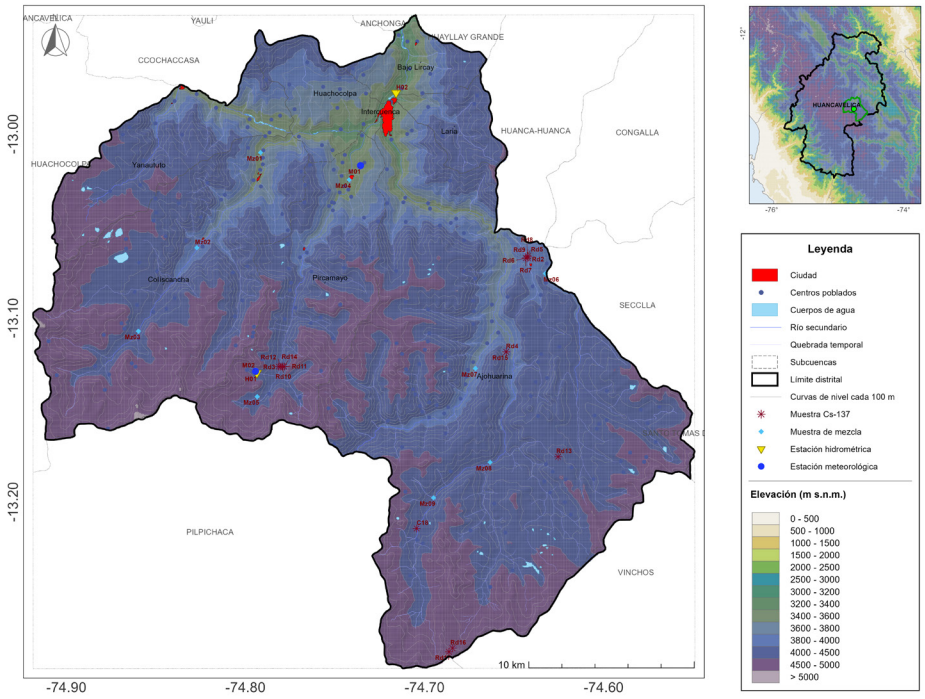


Figura 2.1.1. Mapa de ubicación geográfica del distrito de Lircay.

Para garantizar que los estudios en el distrito de Lircay sean exactos, el laboratorio MoSSARD utiliza sistemas de soporte analítico necesarios para el estricto cumplimiento de los procedimientos de preparación, acondicionamiento y análisis de las muestras. La gestión y operación del laboratorio tienen un enfoque de estándar internacional (ISO/IEC 17025[1]), norma de calidad que rige la competencia técnica y la validez de los resultados. Asimismo, los métodos y análisis aplicados se alinean con otras normativas internacionales (ISO) específicas, seleccionadas según la complejidad de la técnica empleada.

El empleo de instrumentos con trazabilidad metrológica internacional, el cumplimiento de protocolos normalizados y el uso de materiales de referencia certificados (MRC) consolidan la integridad técnica de los procedimientos operativos estándar (POE). Este rigor metodológico garantiza que los resultados obtenidos posean los niveles de incertidumbre, repetibilidad y confiabilidad exigidos para el diagnóstico técnico de alta montaña.



Figura 2.2.1. Instrumentación analítica de alta complejidad en el laboratorio MoSSARD-IGP.

Tabla 2.2.1. Métodos y alcance técnico de la infraestructura analítica.

Ítem	Métodos	Aplicación
1	Granulometría por Difracción láser	Caracterización de partículas en un rango de 0.01 µm a 3500 µm, permitiendo una discriminación precisa de fracciones finas (arcillas y limos) con una repetibilidad superior al 99 %.
2	Colorimetría de Precisión	Cuantificación del espacio de color (CIELAB) con una resolución de $\Delta E < 0.1$, facilitando la diferenciación estadística de fuentes de aporte con un nivel de confianza del 95 %.
3	Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (TXRF)	Cuantificación multielemental simultánea con límites de detección en el orden de ppb (partes por billón) o µg/L, asegurando una sensibilidad analítica ultratraza.
4	Espectrometría de Rayos Gamma	Enfocada en la identificación y cuantificación de radionúclidos ambientales y la datación de procesos erosivos mediante trazadores radioisotópicos. Determinación de radionúclidos (^{210}Pb y ^{137}Cs) con un límite de detección mayor a 0.1 Bq/kg e incertidumbres menores a 30 %.

[1] Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Organización Internacional de Normalización / Comisión Electrotécnica Internacional.

2.2.2 Gestión de la trazabilidad y aseguramiento de la calidad

En 2023, el Laboratorio MoSSARD-IGP gestionó un flujo analítico compuesto por 1529 matrices sólidas y 3351 matrices líquidas. Específicamente, para el diagnóstico técnico del distrito de Lircay (Tabla 2.2.2), se procesaron y validaron 361 muestras sólidas y 1401 líquidas, lo que aseguró la representatividad estadística para el estudio de erosión y transporte de sedimentos.

La integridad de este volumen de información se sustenta en protocolos estrictos de cadena de custodia, los cuales permiten el control bidireccional del inventario y la supervisión técnica de las muestras desde su recepción. Una vez ingresadas al sistema, se ejecuta la planificación operativa del flujo analítico, donde se determinan los procedimientos específicos y la secuencia de técnicas fisicoquímicas aplicables según los objetivos del estudio.

2.2.3 Procesamiento especializado y caracterización multianalítica

El pretratamiento constituye una fase crítica de transformación, ejecutada mediante protocolos diferenciados según la matriz y el estado físico de las muestras recolectadas *in situ*. Esta etapa se rige por los procedimientos operativos estándar (POE) y la adopción de normativas ISO, lo que garantiza la homogeneidad y representatividad de las alícuotas destinadas al análisis. El flujo de procesos generales para matrices sólidas y líquidas se detalla en el diagrama de la Figura 2.2.2.

En cuanto al procesamiento de muestras sólidas (Figura 2.2.3), se generan productos específicos para la determinación de contenido de materia orgánica, granulometría por tamizaje, firmas colorimétricas y espectrometría de rayos gamma. Por su parte, el tratamiento de muestras líquidas (Figura 2.2.4) permite la cuantificación de la concentración de sedimentos en suspensión (CSS), provenientes tanto del cauce principal del río como de las trampas experimentales instaladas estratégicamente en diversas unidades de cultivo.

El cronograma de pretratamiento y análisis para las muestras del distrito de Lircay (Figura 2.2.5) responde a una gestión operativa optimizada, cuya ejecución está condicionada por la naturaleza de la matriz (humedad, carga orgánica y granulometría) y por los estrictos protocolos de la infraestructura analítica avanzada de alta resolución.

Tabla 2.2.2. Inventario consolidado de muestras y distribución analítica para el distrito de Lircay.

Ítem	Grupos	Matriz	Tipo de muestra	Cantidad de muestras
1	0001_COD	Sólido	Suelos y sedimentos	241
2	0002_COD	Sólido	Testigos de suelo	120
3	0003_COD	Líquido	Sedimentos en suspensión	1401

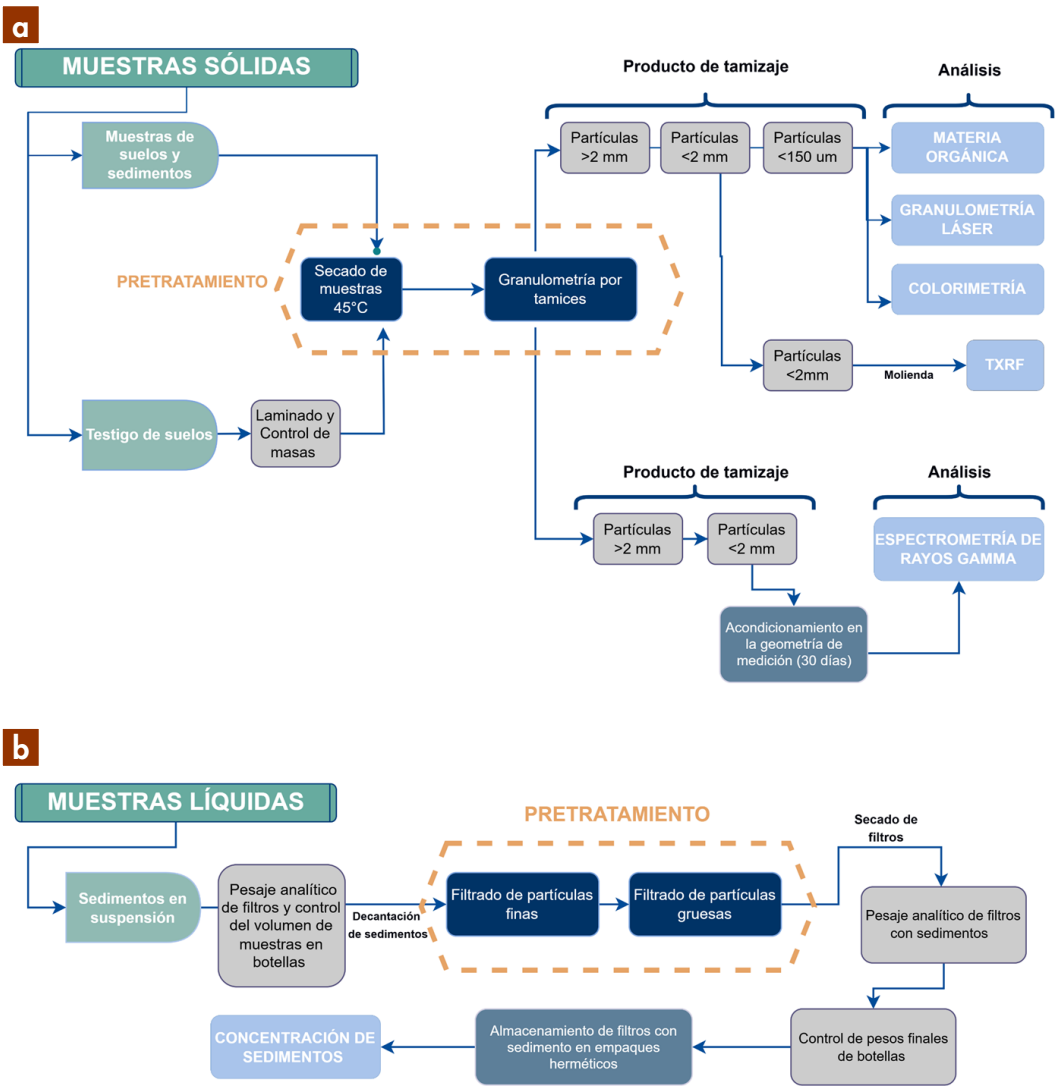


Figura 2.2.2. Flujo analítico de pretratamiento. a) Secuencia de procesamiento y obtención de derivados para matrices sólidas; b) sistema de separación de fases para la cuantificación de sedimentos en suspensión.

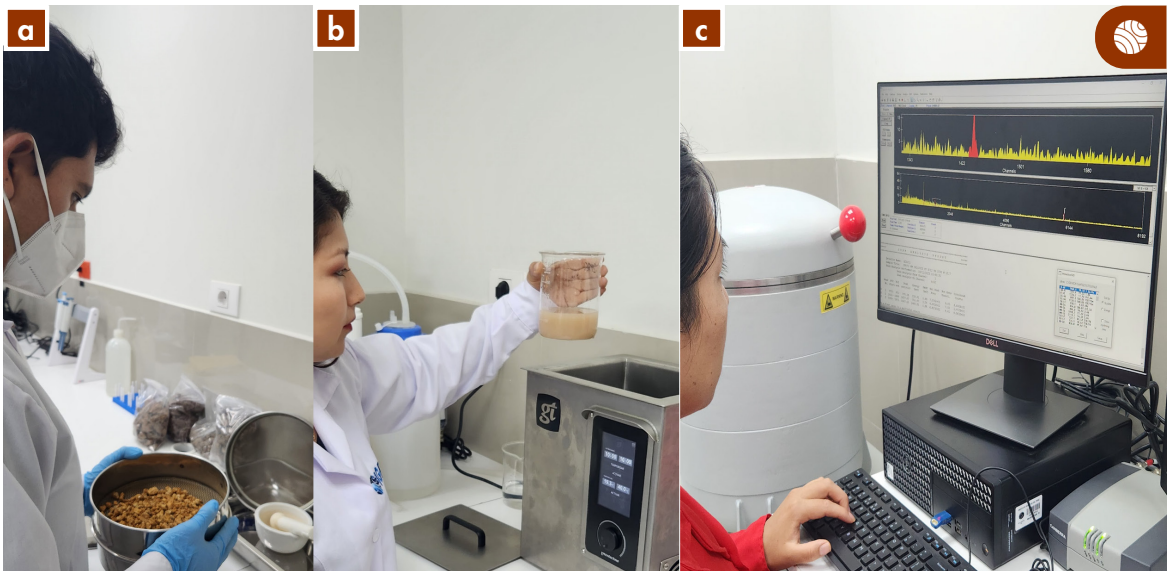


Figura 2.2.3. Procesamiento para matrices sólidas: a) Clasificación granulométrica por tamizaje; b) Acondicionamiento de muestras para difracción láser; y c) Preparación de geometría para espectrometría de rayos gamma.

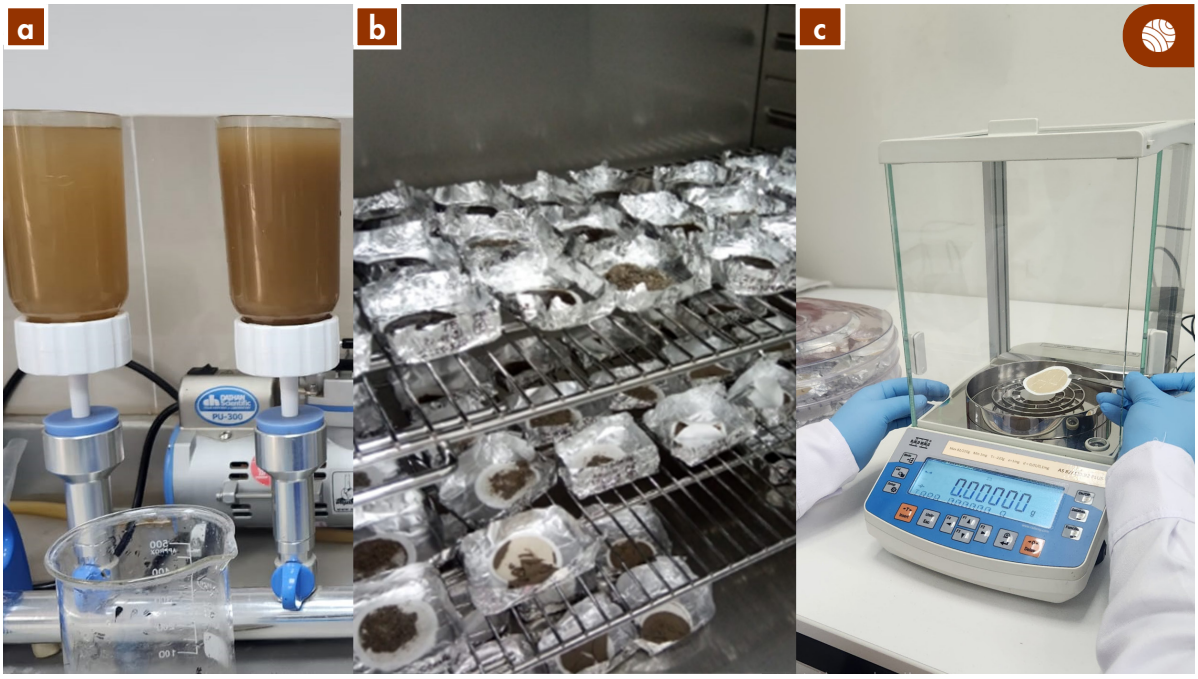


Figura 2.2.4. Procesamiento de matrices líquidas para el cálculo de concentración: a) sistema de separación de fases por filtración al vacío; b) deshidratación controlada de muestras; y c) pesaje analítico bajo estándares de precisión.

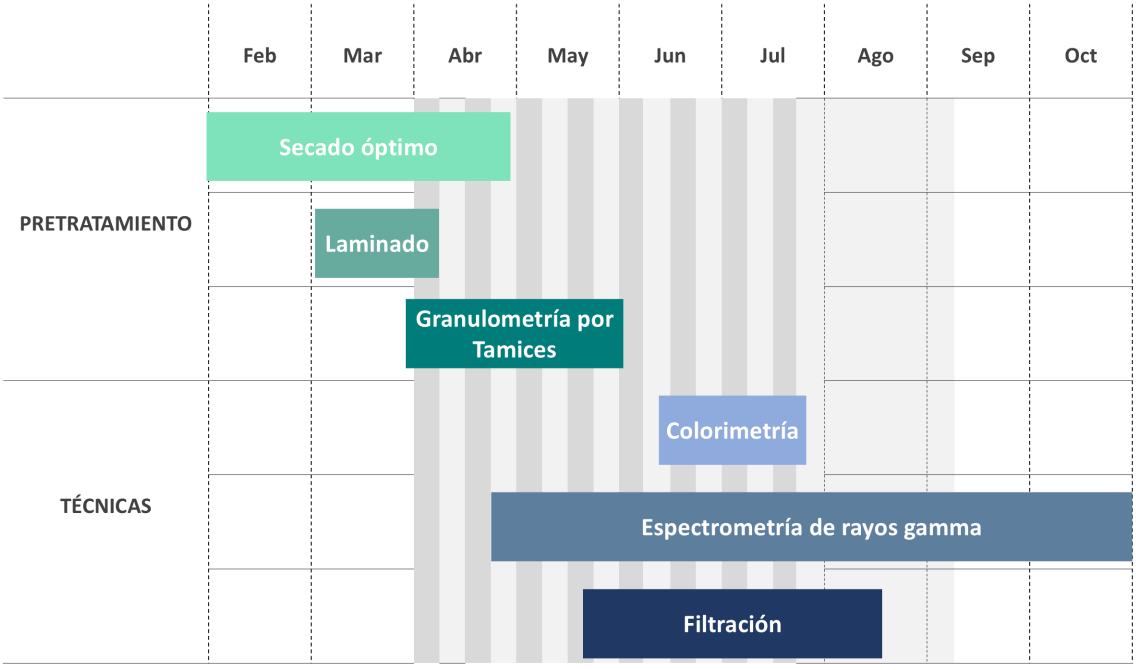


Figura 2.2.5. Balance de tiempos de respuesta y rendimiento analítico ejecutado para el distrito de Lircay en 2023.

3. Análisis del sistema físico-territorial

3.1 Relieve y geología

3.1.1 Geología

El distrito de Lircay se desarrolla en un contexto geológico complejo cuya columna estratigráfica abarca desde el Paleozoico hasta el Cuaternario reciente (Figura 3.1.1). Las unidades más antiguas corresponden al Grupo Ambo y a secuencias de lutitas, areniscas y calizas del Carbonífero-Pérmico inferior. Durante el Mesozoico (Triásico superior-Cretácico inferior) se depositaron formaciones calcáreas como los grupos Copacabana, Pucará y Goyllarisquizga, posteriormente deformadas por plegamientos asociados a la orogenia andina. En el Paleógeno se emplazaron las formaciones volcánicas Tantará y Sacsaquero, junto con la Formación volcanosedimentaria Rumichaca. La fase tectónica Quechua I (Mioceno-Plioceno) introdujo el último episodio de deformación compresiva, mientras que la fase Quechua II dio inicio al volcanismo explosivo del Grupo Huachocolpa. Finalmente, los depósitos cuaternarios, particularmente morrenas glaciares, configuran la geomorfología reciente del territorio y controlan la forma actual del relieve.

Como expresión de esta evolución geodinámica, en el distrito de Lircay se identifican diez tipos de suelos según su origen y distribución espacial (Figura 3.1.2). Los depósitos de bofedales abarcan aproximadamente 117 km² (14 %) y presentan predominancia de limos y arenas con alto contenido de materia orgánica, pH ácido, textura gravosa, drenaje imperfecto e infiltración moderadamente lenta. Estas características se asocian a ambientes fríos con ciclos de congelación y descongelación que favorecen su alta capacidad de retención hídrica. Los suelos glaciofluviales cubren cerca de 52 km² (6 %) y presentan gravas y arenas en matriz limoarenosa con materiales no consolidados, formando terrazas relativamente estables y moderadamente resistentes a la erosión, lo que favorece actividades agrícolas. Asimismo,

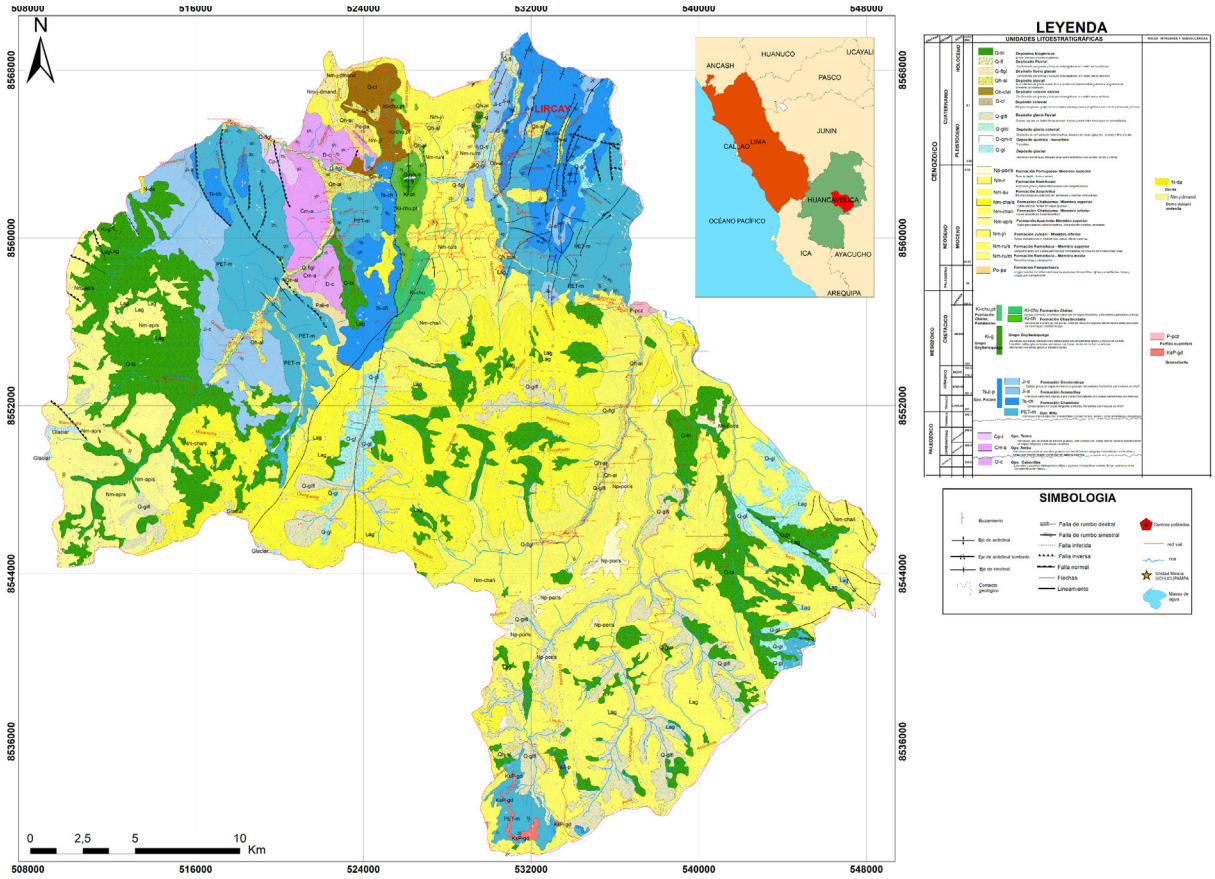


Figura 3.1.1. Mapa geológico del distrito de Lircay a escala 1:20 000.

se identifican suelos moderadamente profundos con drenaje moderado, baja susceptibilidad a la erosión y contenidos elevados de materia orgánica. Por otro lado, los suelos glaciares abarcan aproximadamente 18 km² (2 %), constituidos por depósitos morrénicos con bloques angulosos en matrices finas, con baja fertilidad y limitada capacidad productiva. En conjunto, esta heterogeneidad edáfica refleja el control de los procesos glaciares y sedimentarios sobre las propiedades físicas del suelo, condicionando su comportamiento hidrológico y su susceptibilidad a la erosión.

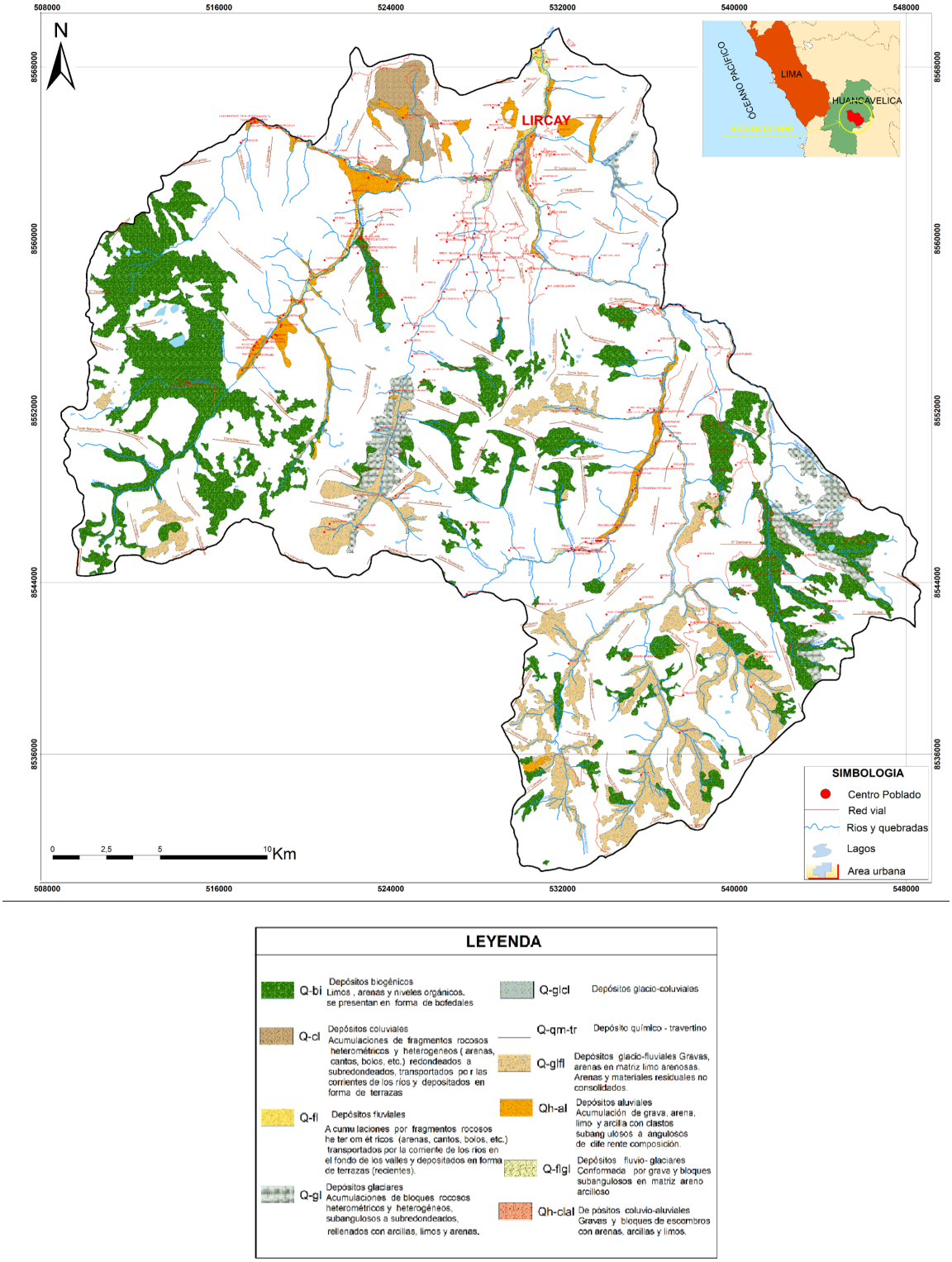


Figura 3.1.2. Mapa de suelos según su origen del distrito de Lircay a escala 1:20 000.

3.1.2 Morfometría y análisis de pendiente

El análisis morfométrico del distrito de Lircay se realizó a partir de un modelo de elevación digital (DEM) de alta resolución (5 m) proporcionado por CONIDA, el cual fue remuestreado a 20 m para garantizar consistencia espacial con las variables empleadas en el modelamiento. A partir de este insumo se derivó la pendiente del terreno, cuya distribución espacial se presenta en la Figura 3.1.3.

Como se observa, el 54 % del territorio se ubica en el rango de 0° a 15°, concentrado en fondos de valle y superficies de acumulación, donde la baja energía del flujo favorece la deposición de sedimentos. En contraste, el 29 % del área presenta pendientes entre 15° y 25°, definiendo el umbral de transición hacia condiciones de inestabilidad, donde se activan procesos de erosión laminar y en surcos. Asimismo, el 17 % del territorio supera los 25°, configurando sectores de alta criticidad geomorfológica, donde la aceleración del flujo superficial favorece la erosión concentrada y el transporte eficiente de sedimentos.

En conjunto, la Figura 3.1.3 evidencia que el 46.13 % del territorio presenta pendientes mayores a 15°, lo que configura un sistema con alta capacidad potencial de generación de sedimentos. No obstante, esta capacidad depende de la conectividad con la red de drenaje y de la presencia de zonas de almacenamiento en áreas de menor pendiente. Este patrón morfométrico constituye la base estructural del factor LS en el modelamiento de erosión y explica la distribución espacial de las tasas estimadas a escala de subcuenca.

3.2 Clima e hidrología

3.2.1 Respuesta hidrológica

La serie de caudales registrada en la estación hidrosedimentológica Allato comprende el periodo 24/02/2023–05/06/2023, con 90 293 observaciones a resolución de 1 minuto. Durante este intervalo, el caudal medio fue 9 m^3/s y la mediana 4 m^3/s, lo que confirma una distribución asimétrica positiva. El caudal mínimo

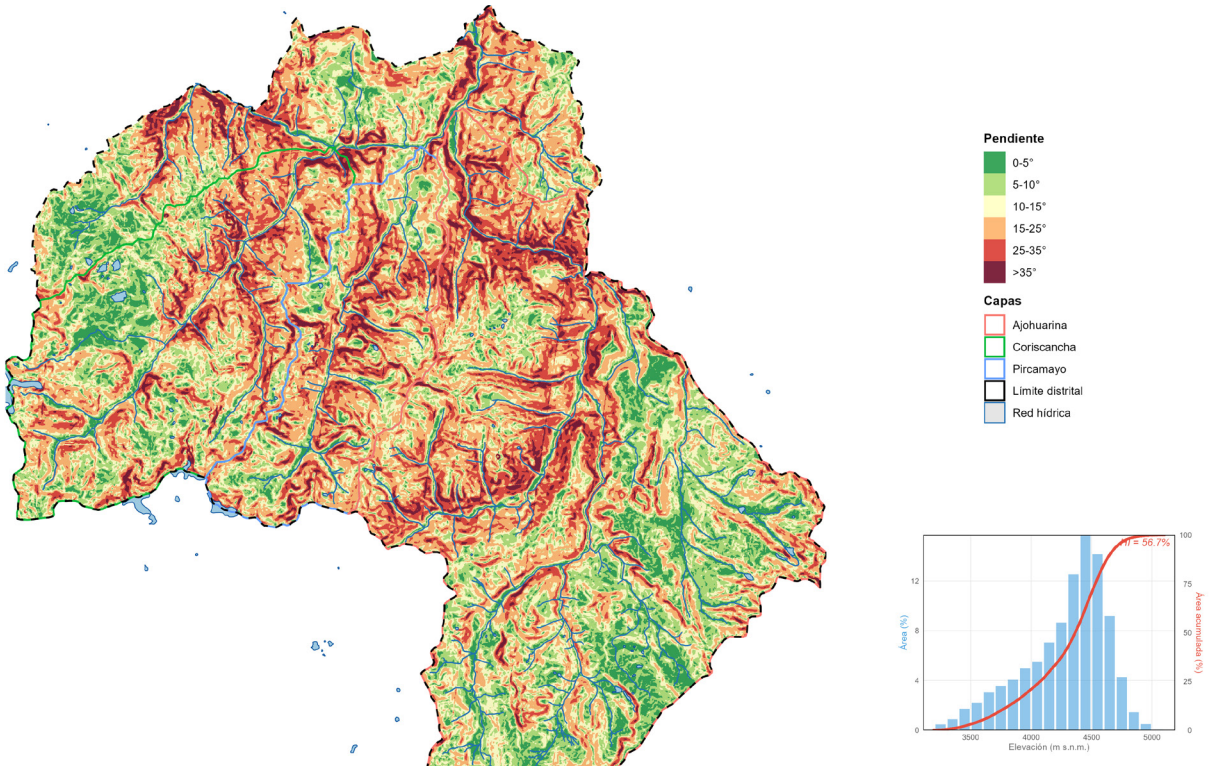


Figura 3.1.3. Mapa de pendientes del distrito de Lircay a escala 1:20 000.

registrado fue 3 m^3/s y el máximo alcanzó 89 m^3/s, con un rango intercuartílico entre 4 m^3/s y 9 m^3/s. Los percentiles superiores muestran una marcada concentración de eventos intensos (Q90 = 25 m^3/s; Q95 = 39 m^3/s; Q99 = 63 m^3/s). Bajo el umbral de crecida Q95 se identificaron 135 eventos independientes, con una duración media de 33 minutos y magnitud promedio de 40 m^3/s. El 53 % de las crecidas ocurrió en horario diurno y el 47 % en horario nocturno, sin predominancia temporal marcada. La magnitud específica máxima de 107 $L/s/km^2$ (A = 829 km^2) es coherente con respuestas hidrológicas intensas en cuencas andinas de régimen pluvial.

3.2.2 Régimen de la precipitación

La precipitación anual en el distrito de Lircay presenta una media de 821 mm/año, calculada a partir de los datos grillados del producto RAIN4PE para el periodo histórico de referencia 1981–2015. Este periodo evidencia una desviación estándar de 125 mm y un coeficiente de variación de 15 %, lo que indica una variabilidad interanual moderada típica de sistemas pluviométricos. El rango anual oscila entre 582 mm y 1051 mm, configurando una amplitud interanual de 469 mm y evidenciando la ocurrencia de años marcadamente húmedos y secos. A escala intraanual, la distribución de la precipitación evidencia una marcada estacionalidad, con una concentración de las lluvias en los meses húmedos (octubre-marzo) y un periodo seco bien definido (abril-septiembre) (Figura 3.2.1). En conjunto, el comportamiento interanual puede considerarse relativamente estacionario, aunque condicionado por episodios extremos que modulan la disponibilidad hídrica y la dinámica hidrológica del distrito.

3.3 Uso del suelo en las últimas décadas

Durante las últimas cuatro décadas, la evolución del paisaje en el distrito de Lircay ha estado marcada por una relativa estabilidad estructural, con transformaciones graduales y de baja magnitud en comparación con otros territorios andinos del país. Mientras que en la cuenca del río Maschón, en el norte del Perú, se ha documentado un cambio agresivo en la cobertura y uso del suelo, Lircay presenta una dinámica más conservadora, sin alteraciones abruptas en su matriz territorial (Figura 3.3.1).

3.3.1 Dinámica multitemporal en el distrito de Lircay (1987–2022)

El análisis multitemporal del distrito de Lircay evidencia que el uso del suelo se ha mantenido relativamente estable durante el periodo

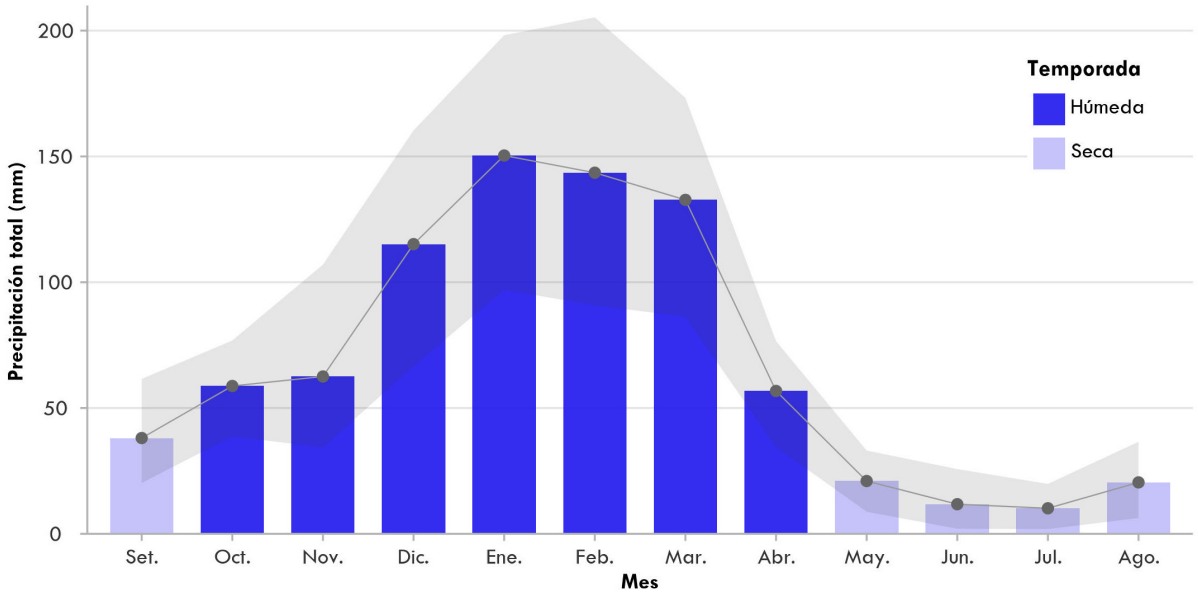


Figura 3.2.1. Régimen intraanual de precipitación y estacionalidad húmeda-seca en el distrito de Lircay. Fuente: Elaboración propia con datos del producto RAIN4PE.

1987–2022 (Figura 3.3.1), con cambios puntuales asociados principalmente a la expansión de actividades antrópicas y a la reducción de ecosistemas sensibles. Por ejemplo, la agricultura (Agr) ha experimentado un aumento del 3 % al 4 % (36 km²) desde 1987 hasta 2022. El suelo desnudo o con cobertura estacional (SVg) se mantiene en 18 % ± 2 % (149 km²), la vegetación herbácea natural (Hrb) se mantiene estable en 65 % ± 1 % (546 km²), los humedales (AHu) han disminuido de 13 % a 11 % (91 km²), los bosques forestales (PFo) alcanzan aproximadamente 4 km², mientras que el área urbana (Urb) cubre cerca de 1 km². Ambas coberturas se mantienen como componentes marginales del territorio. En cuanto al uso minero (Min), debido a la resolución espacial empleada, se confundió con la cobertura de suelo desnudo.

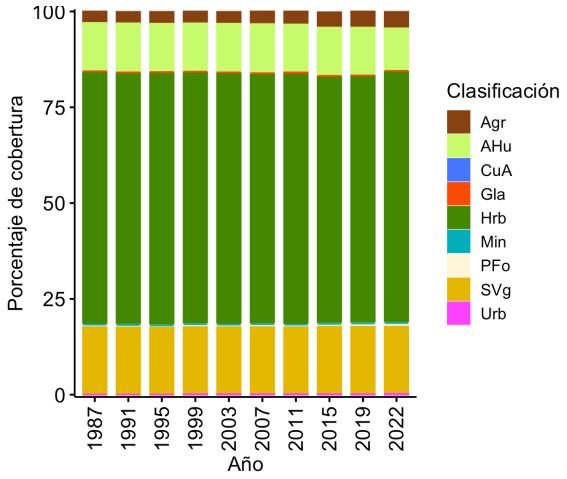


Figura 3.3.1. Dinámica de la cobertura vegetal y uso del suelo en el distrito de Lircay, durante los últimos 35 años.

3.3.2 Análisis altitudinal del cambio (3150–4000 m s. n. m.)

A partir del producto generado, se extrajeron las zonas bajas (3150 m s. n. m.) hasta la cuenca media (4000 m s. n. m.), con el objetivo de analizar con mayor precisión el cambio del uso del suelo en este rango altitudinal (Figura 3.3.2). Dentro de este sector, el incremento agrícola se manifiesta con una expansión de 24 a 35 km², lo que evidencia la presión de la actividad agrícola en áreas de menor pendiente y mayor accesibilidad. Este crecimiento ocurre principalmente en reemplazo de la vegetación herbácea natural (Hrb) y, en menor medida, de áreas de pajonal y cobertura arbustiva, lo cual es consistente con los procesos de transformación de uso del suelo en sistemas altoandinos.

Asimismo, el análisis de distribución altitudinal indica que el suelo desnudo altamente erosionable (SVg) y la vegetación herbácea natural (Hrb) se concentran mayoritariamente en las cotas superiores a 4000 m s. n. m. Específicamente, en el rango por debajo de los 4000 m s. n. m., solo se distribuyen 0.3 km² del área total de suelo desnudo, 3 km² de humedales (AHu) y 145 km² de vegetación herbácea (Hrb). Esta distribución confirma que las zonas de mayor susceptibilidad a la erosión y los ecosistemas sensibles se encuentran en las partes altas de la cuenca.

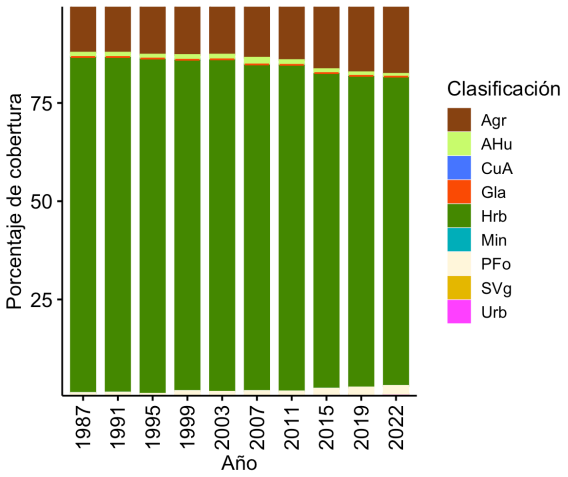


Figura 3.3.2. Dinámica de la cobertura vegetal y uso del suelo en el distrito de Lircay durante los últimos 35 años, entre los 3150 y 4000 m s. n. m.

4. Diagnóstico de la erosión

4.1 Historia de los últimos 60 años

En el Perú, la falta de registros históricos continuos de erosión limita la capacidad para entender cómo ha cambiado el territorio en el largo plazo. Para superar esta brecha en el distrito de Lircay, se recurrió al uso de técnicas nucleares mediante el trazador radiactivo cesio-137 (Cs-137).

La cantidad de Cs-137 presente en el suelo no representa riesgos para el ambiente. El Cs-137 proviene de los ensayos nucleares realizados desde mediados del siglo XX (1950–1980). Este trazador permite reconstruir la historia de los últimos 60 años. Al comparar la cantidad de Cs-137 en una ladera frente a un sitio de referencia (suelo sin perturbación), es posible calcular cuánto suelo se ha movido.

4.1.1 Validación científica: ¿qué tan confiable es nuestro registro histórico?

a. Validación de los sitios de referencia

Para asegurar que la línea base fuera sólida, se identificaron cuatro sitios de referencia (R1 a R4) en áreas estables y con mínima intervención humana. En todos ellos, el inventario de Cs-137 fue mayor en la capa superficial y disminuyó exponencialmente hasta los 15 cm (Figura 4.1.1). El coeficiente de variación entre sitios fue de 13 %, por debajo del umbral del 30 % recomendado en la literatura, lo que respalda la estabilidad de los sitios. El inventario promedio de 143 Bq/m² es coherente con los valores esperados para la latitud y altitud del área de estudio.

b. Diseño de muestreo y análisis de muestras

El diseño de muestreo combinó dos estrategias. Se seleccionaron tres laderas representativas donde se establecieron transectos lineales para caracterizar la redistribución del suelo a lo largo de la pendiente de la ladera (Figura 4.1.3). Además, se muestrearon puntos independientes distribuidos por el distrito para registrar la variabilidad espacial bajo distintas coberturas de suelo.

En total, se recolectaron 26 testigos de suelo de la capa de 0 a 20 cm (Figura 4.1.2). Los sitios de referencia se laminaron en capas de 5 cm y los sitios de redistribución en capas de 10 cm, lo que dio lugar a 120 muestras en total. Todas fueron secadas, tamizadas y analizadas por espectrometría gamma. El Cs-137 se detectó en 73 muestras (61 %); en las 47 restantes, la actividad quedó por debajo del límite de detección (LD = 0.1 Bq/kg, según Currie (1968), con un nivel de confianza del 95 %). Las muestras bajo el LD fueron excluidas del análisis de redistribución.

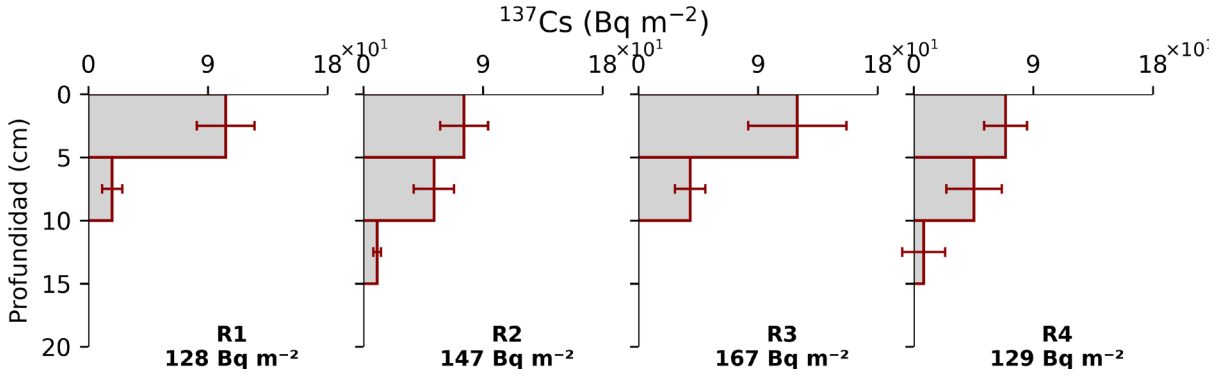


Figura 4.1.1. Distribución de Cs-137 en el perfil del suelo de sitios de referencia.

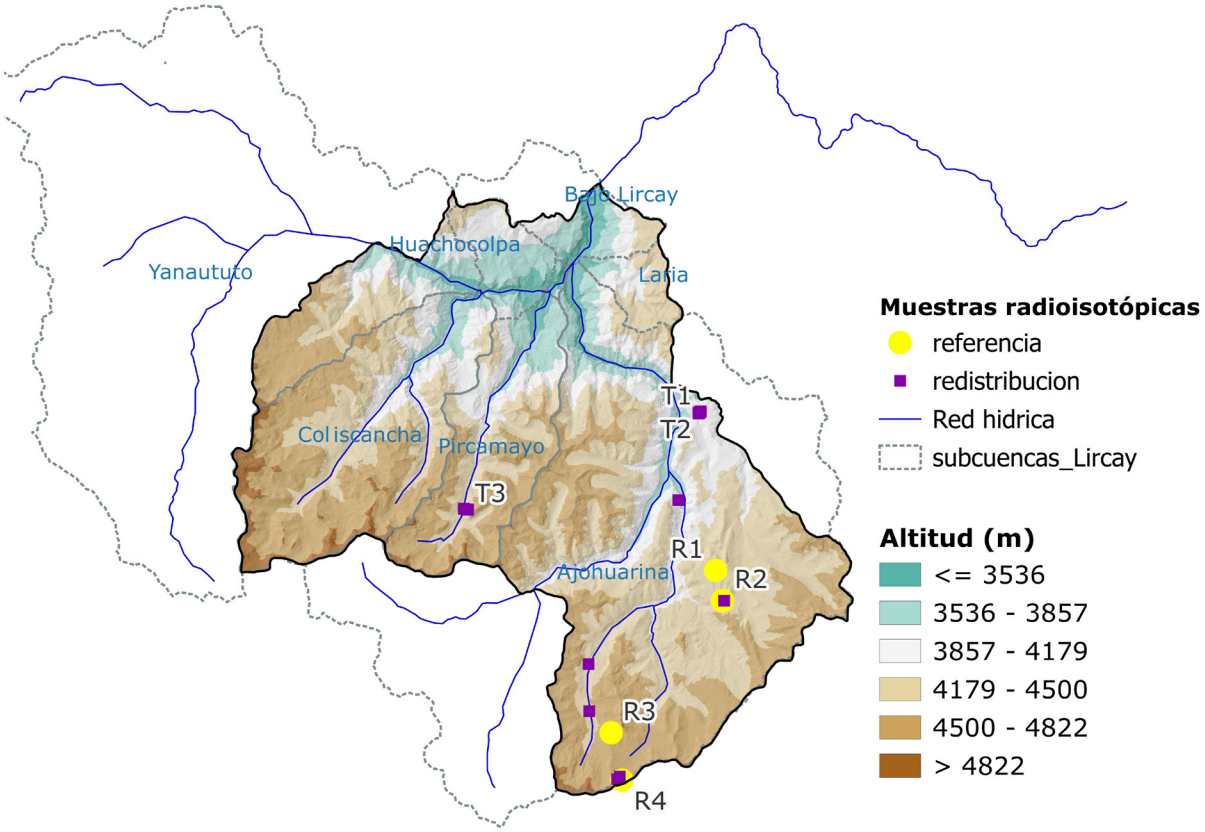


Figura 4.1.2. Distribución de los sitios de referencia (R1-R4) y puntos de redistribución

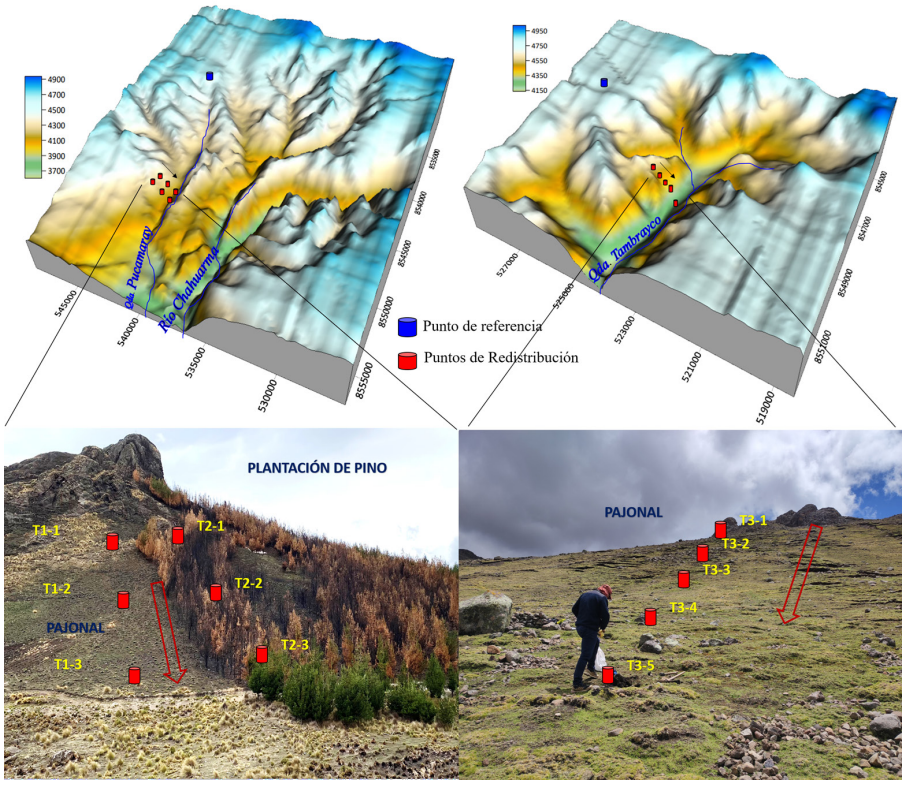


Figura 4.1.3. Laderas muestreadas en transecto de pajonal y plantación de pino en la subcuenca Ajohuarina y pajonal césped en la subcuenca Pircamayo.



Figura 4.1.4. Proceso de extracción de testigos: a) extracción de testigos; b) testigos de suelo compuesto; c) laminado de testigos; d) acondicionamiento de muestra; e) muestras acondicionadas; y f) medición de muestras por espectrometría gamma.

c. Modelo de conversión de inventarios a tasas de redistribución

Los inventarios de Cs-137 fueron corregidos por decaimiento radiactivo hasta el año de muestreo (2023), de modo que las tasas estimadas representan promedios anuales integrados para el periodo 1963–2023 (~60 años). La conversión a tasas de redistribución del suelo se realizó mediante el modelo de balance de masa de Soto y Navas (2004, 2008), implementado en el paquete RadEro para R. El coeficiente de difusión fue calibrado con el perfil de referencia (k = 0.019), y la tasa de migración varió entre –0.0164 y 0.021 entre sitios.

4.1.2 Diagnóstico de la pérdida de suelo por uso de la tierra

Las tasas de redistribución por cobertura se presentan en la Figura 4.1.5, integrando puntos independientes y en transecto. Los suelos desnudos naturales registraron las mayores tasas de erosión media (22 t/ha/año), con valores que varían entre 8 y 44 t/ha/año. Las plantaciones forestales presentaron una tasa media de 7 t/ha/año. Dado que las plantaciones datan de 2019, la señal de Cs-137 integra procesos previos a la cobertura actual, lo que limita atribuir estas tasas exclusivamente al uso forestal presente.

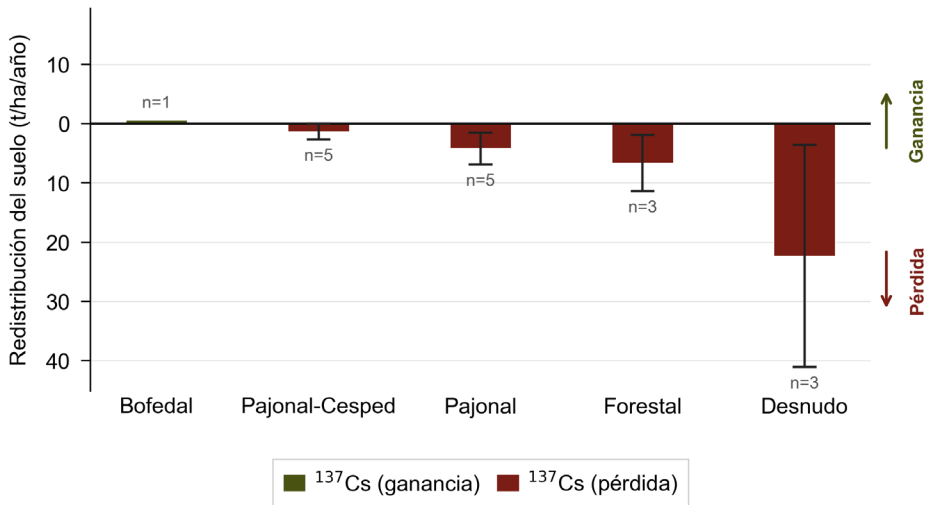


Figura 4.1.5. Balance de redistribución de suelo según cobertura vegetal. Las barras representan las tasas de pérdida (rojos) y ganancia (verdes) en t/ha/año, estimadas a partir del radionúclido Cs-137. Las barras de error indican la desviación estándar asociada a la cobertura de suelo.

El pajonal registró una tasa media de 4 t/ha/año y el pajonal-césped, la menor del estudio (1 t/ha/año). En comparación con la tasa de los suelos desnudos, esta diferencia representa una disminución media de 21 t/ha/año en la pérdida de suelo. El bofedal fue la única cobertura con puntos de depósito (2 t/ha/año), debido a su capacidad de almacenamiento y a la presencia de pendientes planas.

4.1.3 Movimiento histórico del suelo a escala de ladera

Para reconstruir el movimiento histórico del suelo a lo largo de las laderas de estudio (T1 a T3), se analizaron los perfiles de profundidad de Cs-137 (Figura 4.1.6). Las barras con líneas discontinuas indican la distribución esperada en ausencia de erosión o acumulación de sedimentos.

- **Pajonal (T1)**

El Cs-137 conserva su señal original en toda la ladera, con perturbación mínima. Los inventarios crecientes de la ladera alta a la ladera baja (51, 56 y 123 Bq/m²) evidencian transporte activo con acumulación neta en la parte baja.

- **Plantación de pinos (T2)**

La parte alta perdió la señal de Cs-137, probablemente por remoción del suelo durante la plantación. La parte media y baja sí conservan suelo, aunque en menor medida que el pajonal. En la ladera baja, la muestra presenta mayor actividad en 10–20 cm que en 0–10 cm, lo que sugiere perturbación mecánica del suelo, posiblemente asociada a las labores de plantación de pino en 2019; por ello, las tasas de este transecto deben interpretarse con cautela.

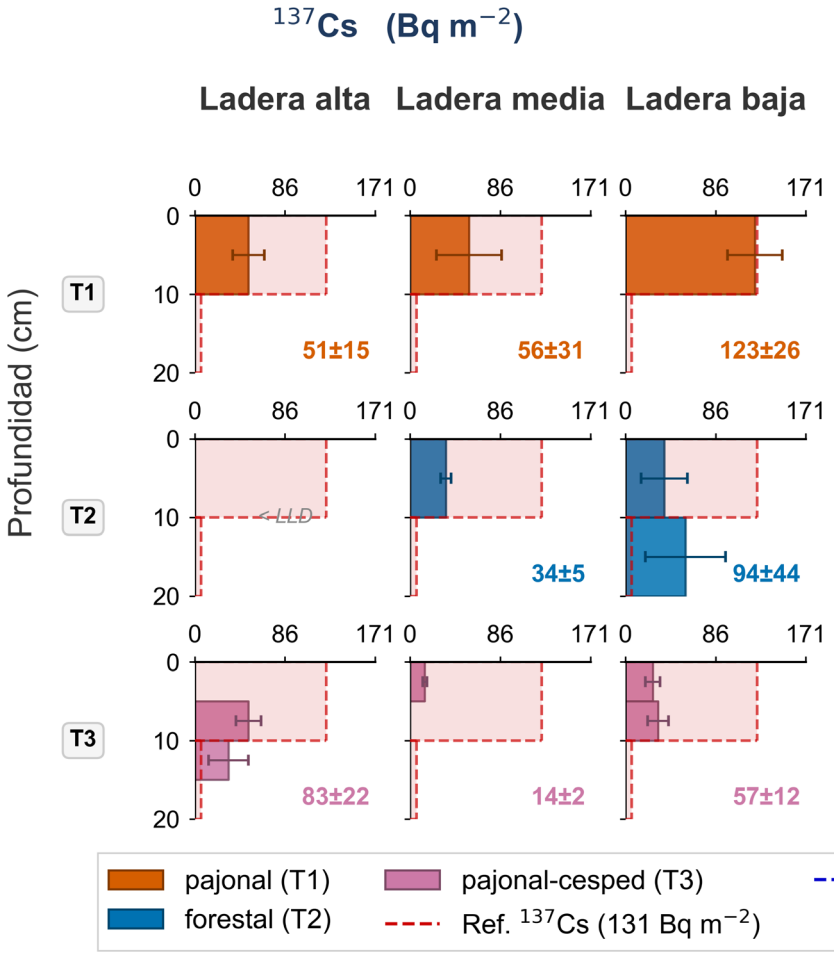


Figura 4.1.6. Inventarios de Cs-137 por perfil de suelo en transectos de ladera alta, media y baja, Lircay. Cada barra representa el inventario por capa (0–10 y 10–20 cm); valor al pie = total ± incertidumbre combinada. Líneas discontinuas: inventario de referencia en suelo no perturbado (Cs-137 = 131 Bq m^{-2}). < LLD = señal por debajo del límite de detección.

- Pajonal-césped (T3)

Conserva la señal de Cs-137 en toda la ladera, de manera similar al pajonal. En la ladera alta, los primeros 5 cm muestran remoción superficial, pero el horizonte profundo (5–20 cm) permanece intacto, lo que indica que la pérdida se limita a la capa más superficial.

a. Análisis de las tasas de redistribución a lo largo de las laderas

Para entender cómo varían las tasas de erosión a escala de ladera se calcularon cuatro indicadores: (i) erosión bruta (E), suma de las tasas de erosión de todos los puntos; (ii) deposición bruta (D), suma de las tasas de depósito; (iii) erosión neta (E–D), diferencia entre suelo perdido y retenido; y (iv) razón de entrega de sedimentos (SDR = (E–D)/E), indicador adimensional de la eficiencia de transferencia hacia el sistema fluvial.

La ladera forestal registró la mayor tasa de erosión bruta (E = 4.7 t/ha/año), seguida por el pajonal (E = 4.2 t/ha/año) y el pajonal-césped (E = 1.3 t/ha/año). En las laderas forestal y pajonal todos los puntos fueron erosivos, sin almacenamiento interno y con exportación total del sedimento movilizado (SDR = 1). El pajonal-césped fue la única ladera con puntos de deposición bruta de 0.2 t/ha/año y SDR = 0.86, lo que indica retención parcial del sedimento antes de su exportación al sistema fluvial.

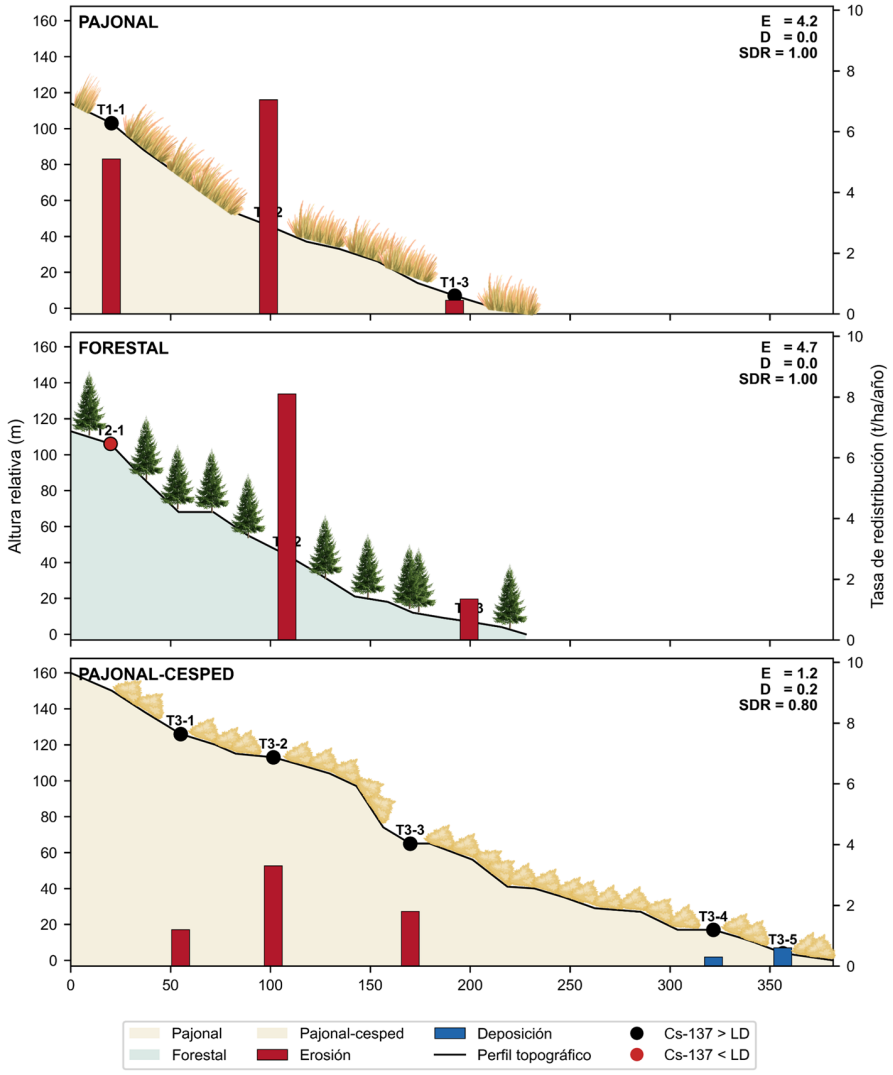


Figura 4.1.7. Tasas de redistribución de suelo e inventarios de Cs-137 en las laderas T1 (pajonal), T2 (forestal) y T3 (pajonal-césped). Los puntos de muestreo se codifican como T[transecto]-[posición], donde el número tras el guion indica la posición en la ladera de arriba hacia abajo (p. ej., T1-1 corresponde al punto más alto del transecto 1).

b. Factores que controlan la variabilidad espacial de la redistribución histórica

Para evaluar cómo la cobertura del suelo y las variables topográficas explican las tasas de erosión en laderas, se derivaron cuatro variables morfométricas del DEM ALOS PALSAR (12 × 12 m). La pendiente y el factor LS determinan la susceptibilidad a la erosión y la capacidad de transporte de sedimento. El Stream Power Index (SPI) aproxima la energía del flujo superficial y el Topographic Wetness Index (TWI) refleja la convergencia del escurrimiento y la probabilidad de saturación local (Figura 4.1.8). En la ladera forestal y pajonal, la pendiente y el factor LS coinciden espacialmente con las posiciones de mayor pérdida de suelo, lo que indica control topográfico directo sobre la erosión. Esta relación se rompe en el pajonal-césped: en la tercera posición (T3-3) registró la pendiente más alta del estudio (38°), el mayor LS (46) y el mayor SPI (5.5), pero una tasa erosiva moderada (2 t/ha/año). El desacople entre forzamiento topográfico y respuesta erosiva en este punto es la evidencia más directa del rol modulador de la cobertura herbácea densa. La segunda posición de la ladera forestal (T2-2), presenta el patrón inverso: pendiente baja (18°) y LS moderado (18), pero la mayor tasa erosiva del estudio (8 t/ha/año). Su TWI elevado (8.9) sugiere que la convergencia del flujo subsuperficial actúa como mecanismo potenciador localizado, independiente de la pendiente superficial. En conjunto, la topografía determina el potencial erosivo a escala de ladera, mientras que la cobertura vegetal y la dinámica del flujo modulan la respuesta erosiva a escala de punto.

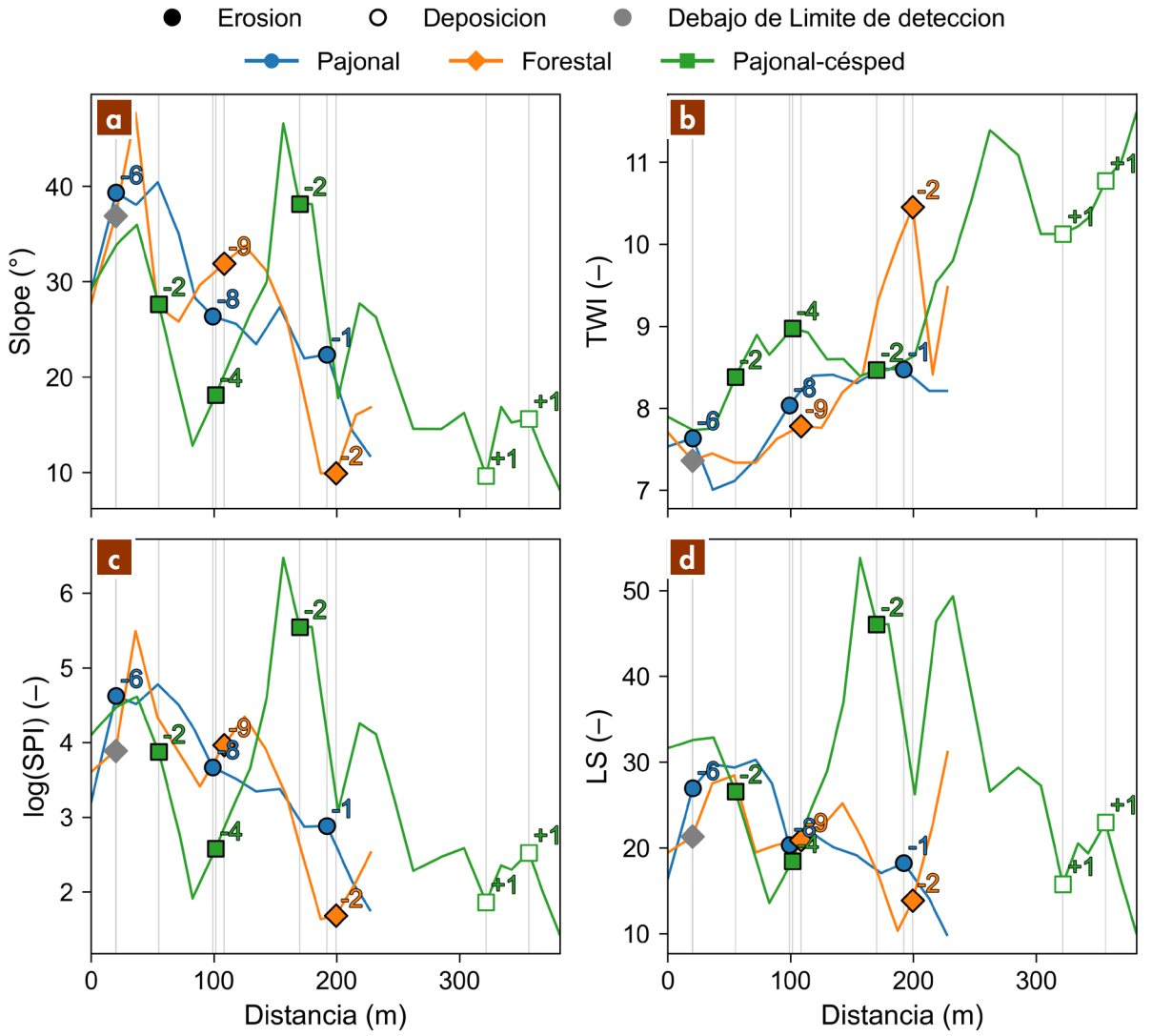


Figura 4.1.8. Influencia del factor topográfico en la redistribución del suelo en las laderas muestreadas.

4.2 Dinámica y monitoreo de la erosión actual

4.2.1 Red de microparcelas experimentales

La evaluación de la pérdida de suelo en el distrito de Lircay se fundamenta en la instalación de una red experimental de 30 microparcelas de escorrentía de 1 m^2 (Figura 4.2.1). Se seleccionaron las comunidades de Jatumpata y Tambraico bajo criterios de accesibilidad logística y representatividad geográfica estratégica, posicionando los puntos de control en zonas con condiciones meteorológicas y de exposición contrastantes. Esto permite evaluar la respuesta erosiva del suelo ante forzantes diferenciados. Esta distribución valida la respuesta del suelo ante condiciones climáticas heterogéneas a lo largo del distrito.

Para la caracterización del relieve, las unidades experimentales se emplazaron en laderas con un rango de pendientes que oscila entre 10° y 30°. Esta variabilidad es fundamental para cuantificar la influencia de la inclinación del terreno en la velocidad de la escorrentía superficial y la erosión por salpicadura (*splash erosion*). Complementariamente, se realizó un análisis fisicoquímico del suelo en cada trampa para correlacionar la pérdida de sedimentos con la composición edafológica específica y la estabilidad de los agregados en cada comunidad.

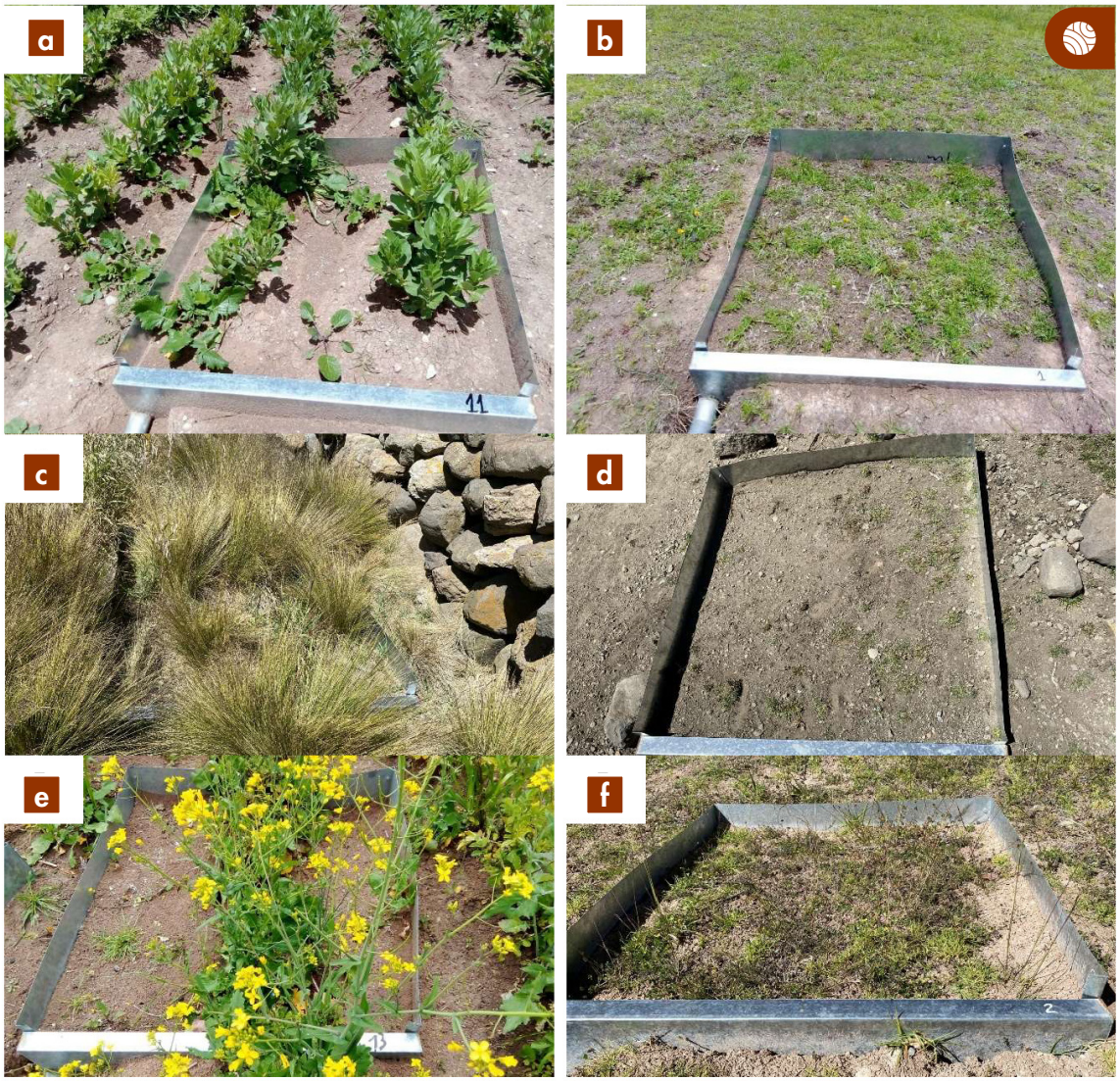


Figura 4.2.1. Red de microparcelas experimentales para el monitoreo de erosión hídrica bajo diferentes tipos de cobertura vegetal en Jatumpata y Tambraico: a) cultivos de habas en hileras, b) pastos naturales cortos, c) vegetación densa (ichu), d) suelo desnudo con presencia de clastos, e) cultivo de mostaza en floración, y f) rastrojo o cobertura degradada.

Bajo un enfoque de alta resolución, el monitoreo se ejecutó por cada evento de precipitación registrado por las estaciones meteorológicas implementadas por el Instituto Geofísico del Perú. Este régimen de muestreo es determinante, ya que permite desvincular el ruido de las lluvias acumuladas y asociar directamente la producción de sedimentos con la energía cinética y la intensidad de cada tormenta. Dicho procedimiento permite identificar con precisión los pulsos de mayor agresividad climática y proporciona datos críticos para la planificación de medidas de conservación de suelos en las zonas donde la conectividad hidrológica es máxima.

4.2.2 Poder erosivo de la lluvia

El análisis de los datos recolectados en las estaciones de Jatumpata y Tambraico permite caracterizar la erosividad real a la que están expuestos los suelos de Lircay. Este nivel de resolución es determinante, ya que la erosión no es un proceso lineal ni constante, sino que responde a pulsos discretos de energía vinculados a tormentas de alta intensidad que superan los umbrales de infiltración locales.

a. Distribución mensual

El régimen pluviométrico registrado durante el monitoreo (enero-mayo de 2023) presentó una marcada estacionalidad, con una lámina total acumulada de 574 mm. Si bien este volumen es coherente con los patrones históricos de PISCO y RAIN4PE (sección 3.2.2), la concentración del 40.1 % de la carga hídrica en febrero (230 mm) define el periodo de mayor riesgo de desestabilización del sistema suelo-cobertura (Figura 4.2.2). Es importante indicar que este periodo representó una condición de humedad superior al promedio, lo que exacerbó los procesos de degradación.

Debido a la persistencia de las lluvias, la humedad del suelo se vuelve el factor crítico de estabilidad. En marzo, la humedad alcanzó un máximo del 12 %. Bajo esta saturación, el suelo va perdiendo su capacidad de almacenamiento, transformando la precipitación neta en escorrentía superficial inmediata. Este excedente hídrico no solo arrastra sedimentos hacia las microparcelas, sino que incrementa la presión de poros, facilitando el desprendimiento de partículas.

Posteriormente, a partir de abril, la humedad del suelo disminuyó por debajo del 8 % hacia mayo. Esta dinámica confirma que el riesgo erosivo en Lircay está modulado por la saturación previa, que aumenta el coeficiente de escorrentía y hace que incluso lluvias de intensidad moderada generen una pérdida de suelo desproporcionada durante el pico del periodo húmedo.

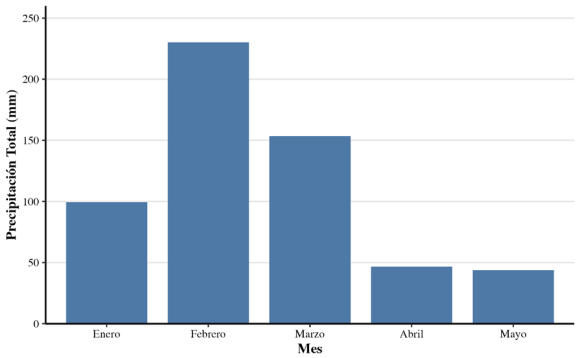


Figura 4.2.2. Precipitación observada acumulada mensual en el distrito de Lircay durante el periodo enero-mayo de 2023.

b. Ciclo diurno

El análisis del ciclo diurno revela una concentración crítica de energía pluvial durante la tarde. La ventana entre las 14:00 y 19:00 h concentró el 43.4 % de la lámina total (249 mm), con un pico crítico a las 16:00 h. Físicamente, la ocurrencia de lluvias intensas tras horas de alta radiación solar favorece el sellado superficial; el impacto de gotas frías sobre un suelo previamente calentado induce el estallido de poros por atrapamiento de aire, lo que incrementa la disponibilidad de sedimentos finos para su transporte.

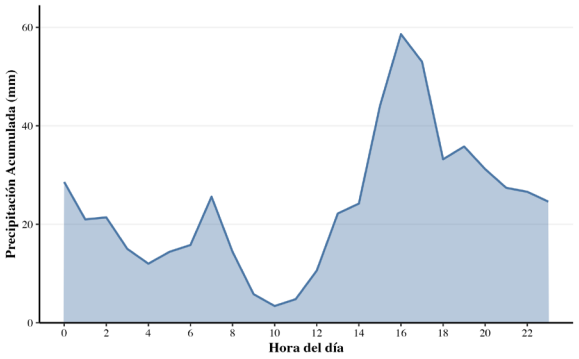


Figura 4.2.3. Distribución horaria de la precipitación acumulada en el distrito de Lircay durante el periodo enero-mayo de 2023.

La relevancia de este patrón radica en la recurrencia de los eventos. Mientras que por la mañana la probabilidad de lluvia es mínima (6.8 %), hacia las 17:00 h la frecuencia se cuadruplica, registrando precipitaciones en casi 1 de cada 3 días (27.8 %). Esta persistencia vespertina asegura que el suelo enfrente un estrés hídrico sistemático antes de recuperar su capacidad de infiltración, lo que explica la alta eficiencia de arrastre observada en las microparcelas (Figura 4.2.3).

c. Intensidad de eventos (I_{30})

La agresividad pluvial se evaluó mediante la identificación de 126 eventos independientes. Se utilizó el índice I_{30} como el predictor principal del potencial erosivo, ajustando umbrales de 5 mm/h y 15 mm/h para clasificar la intensidad. Esta categorización es vital en los Andes, donde las pendientes pronunciadas inician la escorrentía ante intensidades menores que en zonas llanas. El 71.9 % de la carga hídrica provino de eventos moderados, pero la identificación de 6 eventos de categoría "alta (erosiva)" es la que define la morfología de la cuenca (Figura 4.2.4).

Estos eventos extremos superaron los 15.3 mm/h y destacaron por una duración media excepcional de 325 minutos. Esta combinación de alta intensidad y persistencia temporal satura rápidamente el horizonte superficial, anulando la rugosidad del terreno y facilitando el transporte de sedimentos a gran escala. Para el tomador de decisiones, estos 6 eventos representan la mayor amenaza estructural, siendo responsables de la mayor parte de la redistribución de masa en el ciclo anual evaluado.

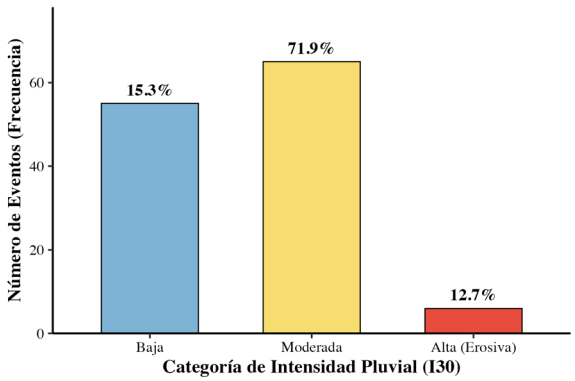


Figura 4.2.4. Clasificación de eventos según su intensidad máxima (I_{30}) en el distrito de Lircay. Las etiquetas superiores indican el porcentaje de aporte de cada categoría respecto a la precipitación total acumulada de enero-mayo de 2023.

4.2.3 Pérdida de suelo por tipo de cobertura

a. Por evento de precipitación

La respuesta física de las parcelas demuestra que la protección del suelo depende de la interacción entre la arquitectura del follaje y la estabilidad del horizonte superficial (Figura 4.2.5). Los cultivos de arveja y haba registraron la mayor pérdida (mediana de 5.9 g/m²), debido a una cobertura basal deficiente que permite que las gotas de lluvia impacten directamente sobre el suelo desnudo y rompan su estructura. En contraste, el ichu mantiene tasas mínimas (0.27 g/m²), lo que disipa la energía del impacto antes de que alcance la superficie edáfica.

Un hallazgo crítico es el comportamiento del suelo sin vegetación. Aunque registró una producción de sedimentos reducida (0.79 g/m²), esto no indica estabilidad, sino una degradación física avanzada por encostramiento. La compactación y el sellado superficial aumentan la cohesión de la capa superior, dificultando el desprendimiento por impacto (*splash*), pero reduciendo drásticamente la infiltración. En consecuencia, estas áreas actúan como zonas de generación y concentración de escorrentía superficial, y transfieren el potencial erosivo hacia la formación de cárcavas.

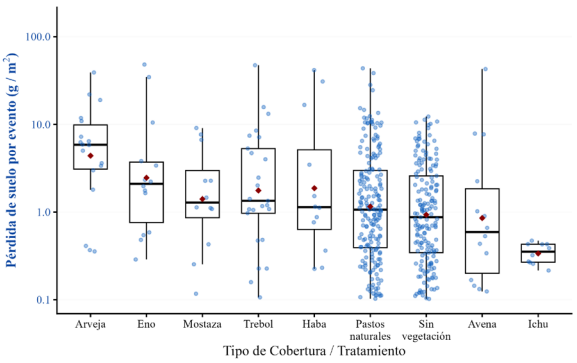


Figura 4.2.5. Variabilidad de la pérdida de suelo por evento (g/m²) según el tipo de cobertura y tratamiento en el distrito de Lircay.

b. Tasa anualizada

La extrapolación a tasas anuales permite dimensionar el impacto real en la productividad (Figura 4.2.6). Los cultivos de arveja y haba alcanzan tasas de 20 y 18 t/ha/año, valores que superan la tasa de formación natural del suelo. Estos

niveles son comparables a ecosistemas de montaña bajo presión antrópica (Descroix et al., 2008), lo que evidencia un balance de masa negativo que compromete la seguridad alimentaria a largo plazo.

El tratamiento sin vegetación (4 t/ha/año) confirma la paradoja de la compactación: la baja tasa de sedimento recolectada es evidencia de un suelo que ha perdido su porosidad funcional. Esta degradación física impide la regeneración natural y maximiza la escorrentía neta. Por el contrario, el ichu (<1 t/ha/año) se consolida como la barrera biológica más eficiente, protegiendo la integridad del suelo y asegurando la regulación hidrológica en las cabeceras del distrito.

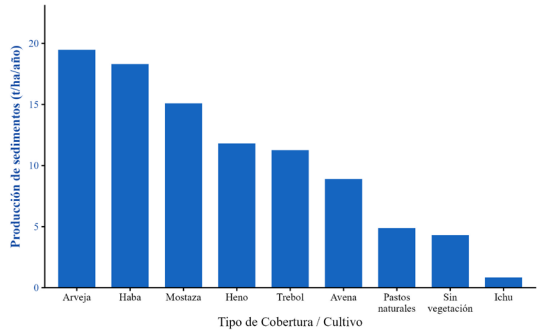


Figura 4.2.6. Producción de sedimentos anualizada (t/ha/año) estimada para los diferentes tratamientos evaluados en Lircay.

4.2.4 Factores aceleradores de erosión

Para aislar los determinantes críticos, se aplicó un análisis PLS-R. Como muestra el *biplot* (Figura 4.2.7), el coeficiente de escorrentía (Rc) y la fracción de agregados libres (fa) poseen la mayor correlación positiva con la pérdida de suelo (SL).

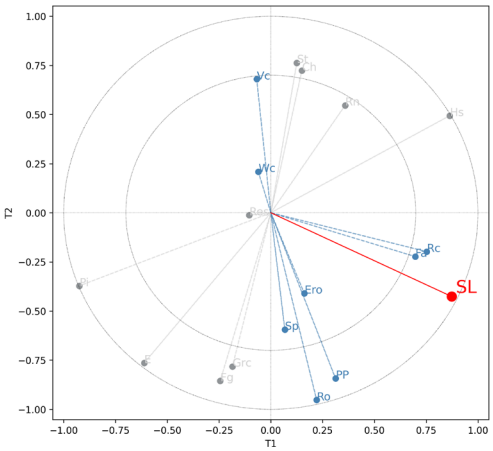


Figura 4.2.7. *biplot* PLS-R: Relación vectorial entre variables hidropedológicas y pérdida de suelo.

Físicamente, esto indica que la erosión actual está controlada por la facilidad con la que el agua fluye sobre la superficie y por la cantidad de material suelto disponible para ser transportado.

El análisis VIP (Figura 4.2.8) confirma que el coeficiente de escorrentía (Rc) es el principal acelerador. La humedad inicial (mt0) y la energía cinética (Ec30) actúan como detonantes que preparan el sistema para el desprendimiento. La cobertura vegetal (Vc) aparece como la única variable de control negativa y significativa; esto valida que la biomasa superficial es el único factor capaz de compensar la inestabilidad física intrínseca de los suelos andinos frente a eventos climáticos extremos.

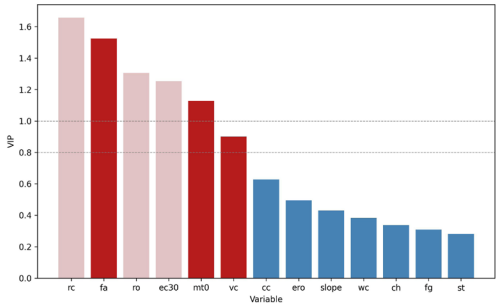


Figura 4.2.8. Importancia de la Variable (VIP): Jerarquía de factores influyentes en la producción de sedimentos.

La capacidad de estos factores para predecir la degradación fue validada mediante el modelado TEST (Terrace Erosion and Sediment Transport). La relación entre la pérdida de suelo observada en campo y la predicha por el modelo presenta un ajuste estadístico robusto ($R^2 = 0.85$; $p < 0.001$), como se detalla en la Figura 4.2.9 con la siguiente formulación:

$$\text{Log(SL)} = 0.94 + 1.29\ \text{Log(Erc)} + 0.50\ \text{Fa} - 0.11\ \text{Vc}$$

Donde Erc representa el factor de transporte; E es la energía cinética total del evento de lluvia y Rc es el coeficiente de escorrentía superficial. Esta interacción refleja cómo la energía disponible se traduce en capacidad de arrastre según la respuesta hidrológica del suelo. Esta formulación demuestra que la gestión debe priorizar dos frentes: incrementar la cobertura (Vc) para disipar la energía y mejorar la estabilidad de agregados (Fa) para reducir la disponibilidad de sedimentos. Intervenir sobre estos factores es la única estrategia viable para frenar la energía externa impuesta por el régimen pluvial de Lircay.

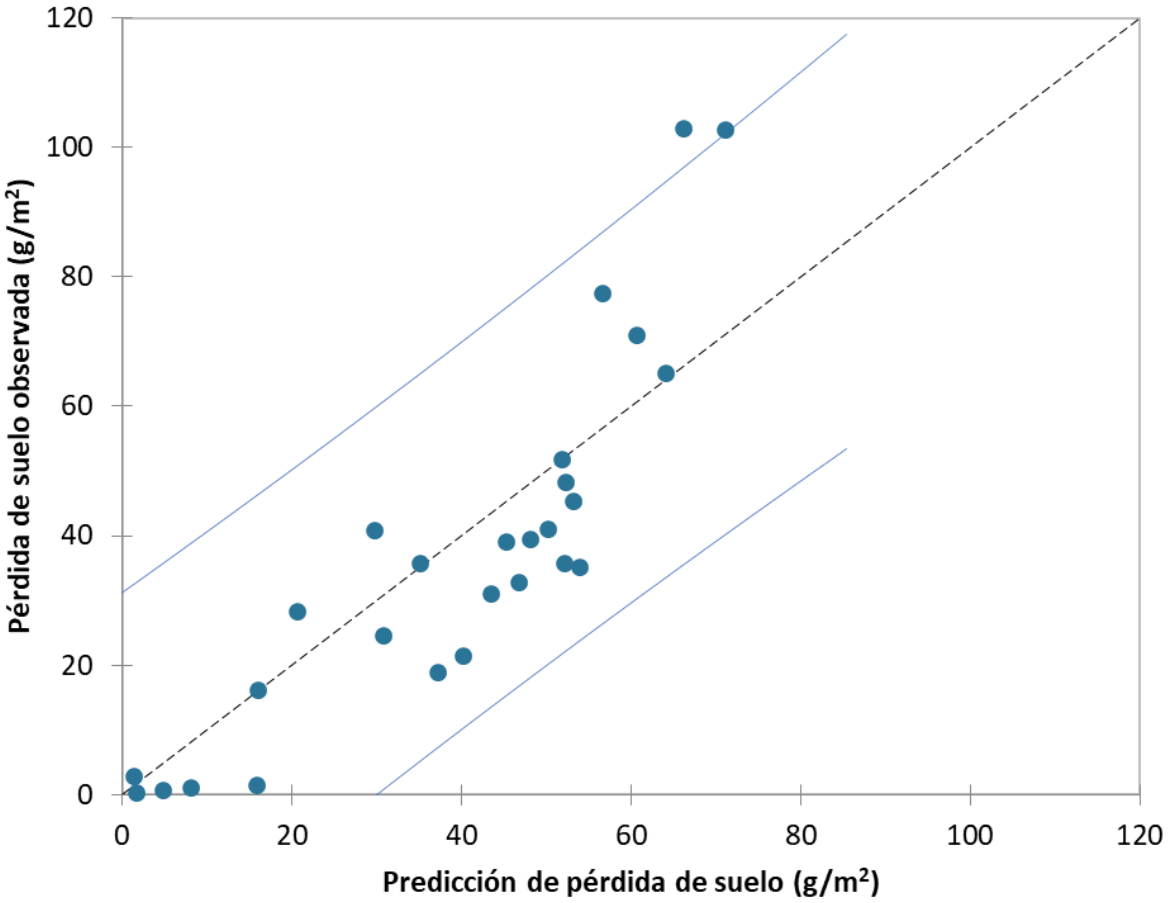


Figura 4.2.9. Validación del modelo: correlación entre la pérdida de suelo observada y predicha (g/m²).

5. Procedencia y dinámica de los sedimentos

5.1 Caracterización de los sedimentos

5.1.1 Monitoreo de la concentración de sedimentos en suspensión

La serie de sedimentos en suspensión en la estación Allato presenta una distribución altamente asimétrica, con una media de 111 mg/L y una mediana de 33 mg/L. Los valores varían entre 2 y 3136 mg/L, evidenciando una amplia dispersión y el predominio de concentraciones bajas, donde al menos el 50 % de los registros se sitúa en valores iguales o inferiores a 33 mg/L. El análisis de percentiles muestra que el P95 (244 mg/L) delimita los eventos de mayor magnitud dentro de la serie, mientras que la relación P95/mediana (7.4) cuantifica la amplificación de estos pulsos respecto al comportamiento base, evidenciando un patrón claramente no lineal.

La carga sólida instantánea reproduce esta estructura, con una mediana de 0.7 kg/s y valores máximos de hasta 19 kg/s. La distribución de la masa transportada es marcadamente concentrada en el tiempo: el 10 % de las observaciones explica el 50 % de la carga total, mientras que el 20 % alcanza el 76 %. Esta configuración indica que el transporte de sedimentos no es continuo, sino que se concentra en eventos de alta intensidad que ocurren en una fracción reducida del tiempo, controlando de forma desproporcionada la exportación total de sedimentos del sistema.

5.1.2 Relación caudal-concentración de sedimentos en suspensión

La relación caudal-concentración de sedimentos en suspensión (CSS) en la estación Allato presenta una tendencia positiva en escala logarítmica, con dispersión elevada en todo el rango de caudales (Figura 5.1.2a). Entre 3 y 10 m^3/s, la CSS se sitúa principalmente entre 10 y 80 mg/L, mientras que en el intervalo de 10 a 20 m^3/s se extiende hasta valores cercanos a 100–150 mg/L. Para un mismo rango de caudal (5–15 m^3/s), la CSS varía aproximadamente entre 10 y 150 mg/L, evidenciando alta variabilidad en condiciones de bajo caudal. En caudales mayores a 40 m^3/s, la CSS se concentra principalmente entre 50 y 200 mg/L, con una dispersión relativa menor respecto a los rangos inferiores.

La distribución mensual (Figura 5.1.2a) muestra diferencias en la amplitud de la CSS. En febrero y marzo, las concentraciones se agrupan entre 20 y 100 mg/L para caudales de 10 a 40 m^3/s. En abril, el rango se amplía hasta aproximadamente 200–300 mg/L, particularmente en caudales superiores a 50 m^3/s. En mayo, se observa

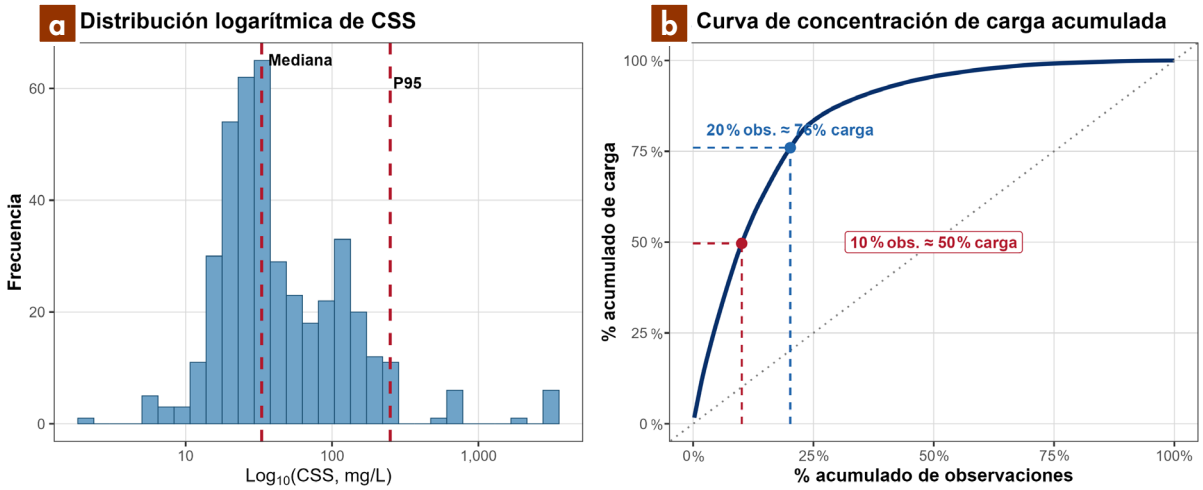


Figura 5.1.1. Monitoreo de la concentración de sedimentos en suspensión en la estación Allato, río Lircay: a) distribución logarítmica de la CSS y b) curva de concentración de carga acumulada.

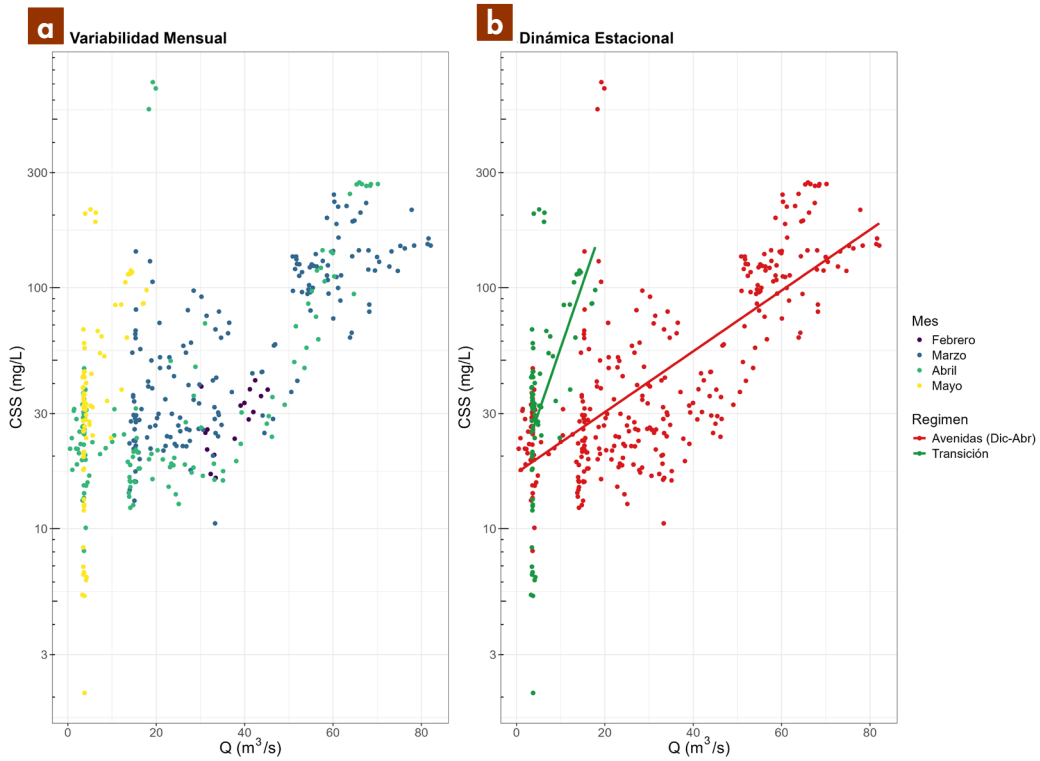


Figura 5.1.2. Relación caudal–CSS y variabilidad temporal del transporte en suspensión en la estación Allato.

mayor dispersión en caudales bajos, aunque sin presencia de valores extremos, manteniendo concentraciones mayormente por debajo de 150 mg/L. La separación por régimen (Figura 5.1.2b) organiza estos patrones. Los periodos de transición se concentran principalmente en caudales menores a 20 m^3/s y presentan una CSS entre 10 y 150 mg/L, con alta dispersión. En contraste, durante las avenidas (20–80 m^3/s), la CSS se distribuye entre 20 y 200 mg/L y muestra una relación creciente con el caudal, con menor dispersión relativa. En conjunto, la mayor variabilidad de la CSS se concentra en caudales bajos e intermedios, mientras que en caudales altos la relación Q–CSS presenta una menor dispersión relativa, consistente con un mayor control del caudal sobre la concentración.

5.2 Zonas críticas de aporte de sedimentos

La identificación de las zonas críticas de aporte de sedimentos se desarrolló mediante el enfoque de la geología forense, disciplina que aplica principios geológicos y que, mediante el uso de trazadores naturales, permite reconstruir la procedencia de materiales sólidos en sistemas fluviales. Para el distrito de Lircay, se empleó el color del suelo como trazador, ya que esta propiedad funciona como una "huella dactilar", proporcionando información que permite diferenciar las fuentes de sedimentos y cuantificar su contribución en las mezclas de sedimentos fluviales.

5.2.1 Clasificación y agrupamiento de fuentes de sedimentos

Para garantizar la precisión del análisis forense, se establecieron tres conjuntos representativos de fuentes basados en el tipo de cobertura y el uso del suelo registrado durante las campañas de campo. Esta caracterización (Figura 5.2.1) es el punto de partida para identificar qué grupos impactan con mayor fuerza la estabilidad de las cuencas:

a. Grupo 1 (G1)

Suelos de coloración pardo oscuro, caracterizados por una alta acumulación de materia orgánica, provenientes de áreas cultivadas y de suelos con vegetación natural.



Figura 5.2.1. Catálogo visual de fuentes de sedimento en el distrito: a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3.

b. Grupo 2 (G2)

Corresponde a suelos de tonalidades rojizas, pardo claro y amarillentas, característicos de suelos desnudos, laderas expuestas, taludes de carretera y caminos no pavimentados.

c. Grupo 3 (G3)

Agrupa suelos de tonalidades grisáceas, provenientes de cárcavas, bancos de ríos y quebradas, característicos por presentar un alto grado de remoción debido a la acción del agua, principalmente fluvial, y por quedar desprotegidos frente al impacto directo de la lluvia, especialmente en laderas inclinadas.

Para identificar las áreas prioritarias de aporte sedimentario, es necesario agrupar las fuentes potenciales de sedimentos con el fin de determinar cuáles contribuyen en mayor proporción al material transportado hacia los ríos. Esta evaluación se realiza mediante el análisis de los sedimentos depositados o transportados en los ríos, conocidos como "mezcla de sedimentos".

5.2.2 Cuantificación del aporte de sedimentos en sistemas fluviales

En la Figura 5.2.2 se observan los aportes de sedimento de cada grupo de fuentes representados espacialmente en el distrito de Lircay. Las contribuciones de sedimento están representadas por el gráfico circular, cuyos colores identifican a cada grupo: el Grupo 1 (G1), que abarca los suelos cultivados y cubiertos por vegetación natural; el Grupo 2 (G2), correspondiente a los suelos desnudos y laderas; y el Grupo 3 (G3), que comprende los suelos afectados por erosión en cárcavas, así como bancos de ríos y quebradas.

Los resultados a partir del uso de las características colorimétricas del suelo como trazadores muestran la predominancia de sedimento proveniente de los grupos G2 (suelos desnudos y laderas) y G3 (cárcavas, bancos de ríos y canales), con aportes porcentuales de hasta el 61 % y 94 %, respectivamente (Tabla 5.2.2).

El aporte máximo de sedimento del Grupo 1 alcanzó el 36 % en una mezcla de sedimento localizada en la parte media de la cuenca Coliscancha; mientras que a la salida de las tres cuencas (río Lircay) la contribución de este grupo se redujo al 3 % (Mezcla C38).

Se midieron los parámetros colorimétricos correspondientes a dos eventos de crecida monitoreados en el río Allato, ubicado en la parte baja del distrito. Estos eventos permitieron observar de manera dinámica el aporte de sedimentos de cada grupo de fuentes (Figura 5.2.3).

Los porcentajes de aporte de sedimento de cada grupo están representados en el gráfico de barras con sus respectivos colores: verde para G1, anaranjado para G2 y gris para G3. Sobre este gráfico se superpusieron las concentraciones de sedimento en suspensión (CSS) en gramos por litro (g/L), así como los caudales del río (m^3/s). Estos datos permiten observar la dinámica de estas variables y los aportes de sedimento.

En ambos eventos se registró un aporte inferior al 13 % por parte del grupo G1, correspondiente a zonas con cultivos y vegetación natural, mientras que el sedimento predominante fue el producido por las laderas, los suelos desnudos y la erosión en forma de cárcavas.

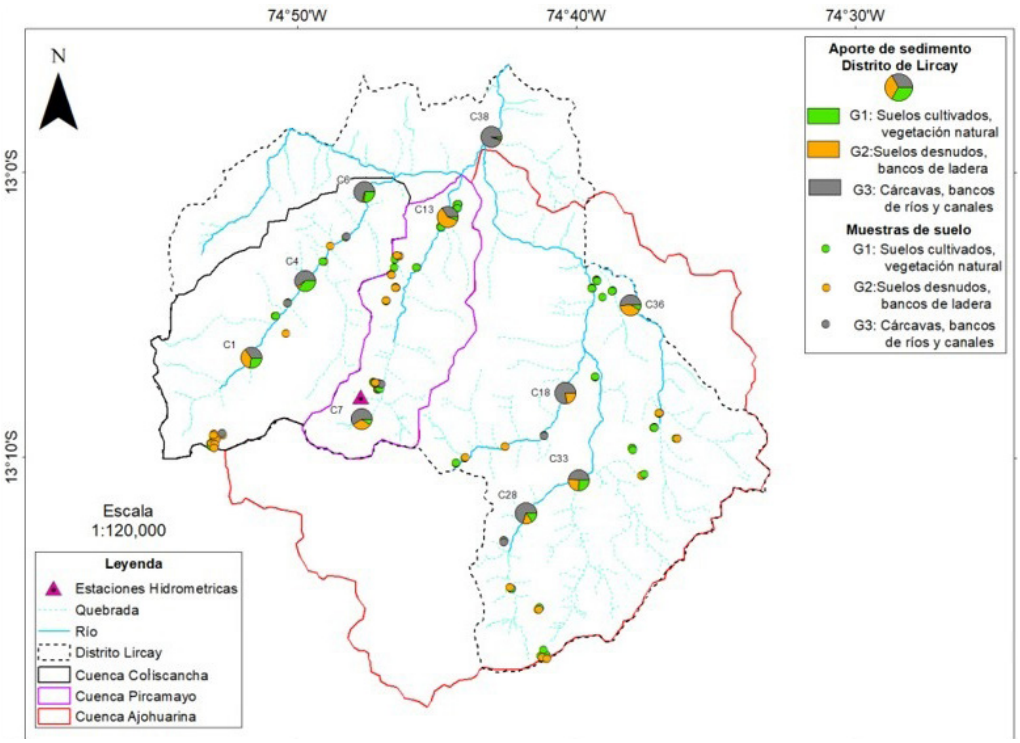


Figura 5.2.2. Sedimento predominante en las mezclas de los ríos del distrito de Lircay, Huancavelica.

Tabla 5.2.1. Porcentajes de contribución de sedimento de cada grupo de fuentes.

Aporte de sedimentos por grupo de fuente (%)			
Mezcla	G1	G2	G3
C1	27 %	38 %	35 %
C4	36 %	5 %	59 %
C5	26 %	3 %	71 %
C7	9 %	32 %	59 %
C13	5 %	61 %	34 %
C18	0 %	22 %	78 %
C28	15 %	16 %	69 %
C33	26 %	26 %	48 %
C38	3 %	3 %	94 %

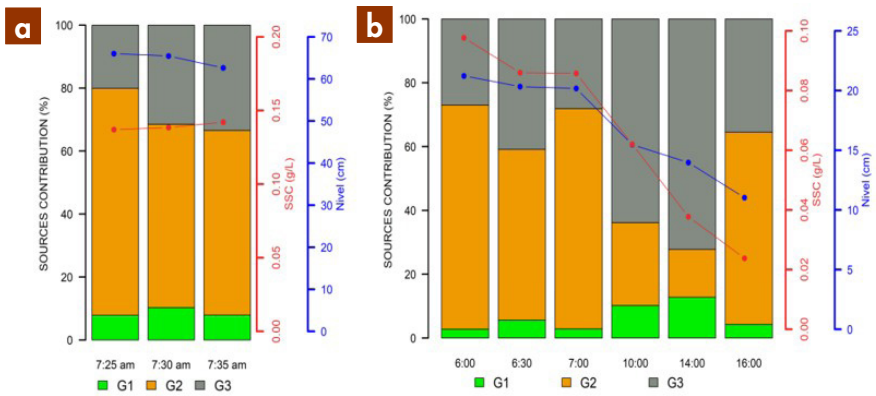


Figura 5.2.3. Evento de crecida del río Allato monitoreado el a) 3 de abril de 2023 y b) 9 de mayo de 2023.

En relación con las concentraciones de sedimento en suspensión (CSS) y los niveles del río, no se evidenció correlación con los cambios en los aportes de sedimentos. No obstante, en el evento del 9 de mayo de 2023 (Figura 5.2.3b) se observa una correlación directa entre el nivel del río y las concentraciones de sedimentos en suspensión, las cuales aumentan cuando el nivel se incrementa y disminuyen conforme este desciende.

Al analizar los resultados tanto a nivel espacial (Figura 5.2.2) como por evento de crecida (Figura 5.2.3a y b), se aprecia que en las tres cuencas existe un deterioro de las áreas expuestas directamente a factores climáticos, como las lluvias y los vientos.

En el caso de los grupos G2 y G3, la degradación de estas áreas se encuentra asociada a procesos de erosión hídrica, tales como la erosión por salpicadura, laminar, en surcos y en cárcavas. Cabe mencionar que la erosión por surcos y en cárcavas actúa como drenaje o quebrada efímera, que se activa durante la época de lluvia y se conecta con los ríos, lo que facilita el transporte de sedimentos hacia los cauces. A pesar de que este tipo de suelos ocupa el 18 % de la superficie del distrito, se observó que hasta el 82 % del sedimento transportado por los ríos proviene de la erosión en surcos de suelos desnudos y de procesos asociados a cárcavas (Figura 5.2.4).

Por otro lado, se observa una baja predominancia de sedimentos provenientes de áreas de cultivo y vegetación natural, representadas por el Grupo 1. Este resultado porcentual muestra que, a pesar de que los suelos labrados y sometidos a prácticas agrícolas son altamente susceptibles a la erosión, no llegan a los ríos.

Una de las posibles razones por las que los sedimentos del Grupo 1 presentan una baja contribución a los cauces fluviales es la reducida extensión que ocupan estas áreas dentro del distrito, representando aproximadamente el 4 % del área total. Asimismo, esta baja contribución podría estar asociada a las características físicas de los cercos presentes en las parcelas (Figura 5.2.5). En la mayoría de los casos, dichos cercos están constituidos por muros de rocas y piedras que actúan como barreras físicas, favoreciendo la retención del suelo erosionado y reduciendo su transporte hacia los cauces de los ríos.

En las áreas con vegetación natural, pese a que ocupan el 78 % del área total del distrito, el aporte de sedimentos es reducido. Esto se debe a que la cobertura vegetal protege el suelo frente al impacto directo de la lluvia y disminuye los procesos erosivos. En ese contexto, el aporte máximo registrado para el Grupo 1 fue de hasta el 36 %.



Figura 5.2.4. Principales fuentes de sedimentos en el distrito de Lircay: a) suelo desnudo (G2) y b) cárcava (G3).



Figura 5.2.5. Factores que reducen el aporte de sedimentos desde fuentes del Grupo 1 (G1) en el distrito de Lircay: (a) ladera con cobertura vegetal natural; (b) parcelas agrícolas cercadas con muros de roca.

6. Mapeo de las tasas y la severidad de erosión

6.1 Construcción del modelo espacial de erosión

La caracterización de la erosión hídrica en el distrito de Lircay (Huancavelica), cuya configuración fisiográfica y de uso del suelo fue descrita en el Capítulo 3, se realizó mediante el modelo distribuido WaTEM/SEDEM. Este enfoque permite representar espacialmente la generación, transporte y redistribución de sedimentos a escala de cuenca, integrando las subcuencas de Ajohuarina, Coliscancha y Pircamayo en un área aproximada de 829 km².

El modelo se construyó a partir de los factores R, K y LS, derivados de información climática y topográfica, y de los factores C y P, asociados a la cobertura y manejo del suelo (Capítulo 3). El factor de erosividad (R) se estimó a partir del producto RAIN4PE (1981–2015), ajustado con información local, representando condiciones promedio de precipitación (Capítulo 3.2.2). El factor de erodabilidad (K; Figura 6.1.1B) fue derivado del producto SoilGrids mediante la formulación de Wischmeier, mostrando una variabilidad espacial moderada en el distrito. El factor topográfico (LS) fue calculado a partir de un modelo de elevación digital de 20 m, asumiendo homogeneidad dentro de cada celda de 400 m², lo que implica que procesos de microescala, como cárcavas y flujos concentrados de pequeña extensión, no son representados explícitamente.

El factor de cobertura vegetal (C; Figura 6.1.1 A) presenta valores entre 0.01 y 0.4 según el tipo de uso del suelo. La distribución espacial evidencia un claro predominio de valores bajos

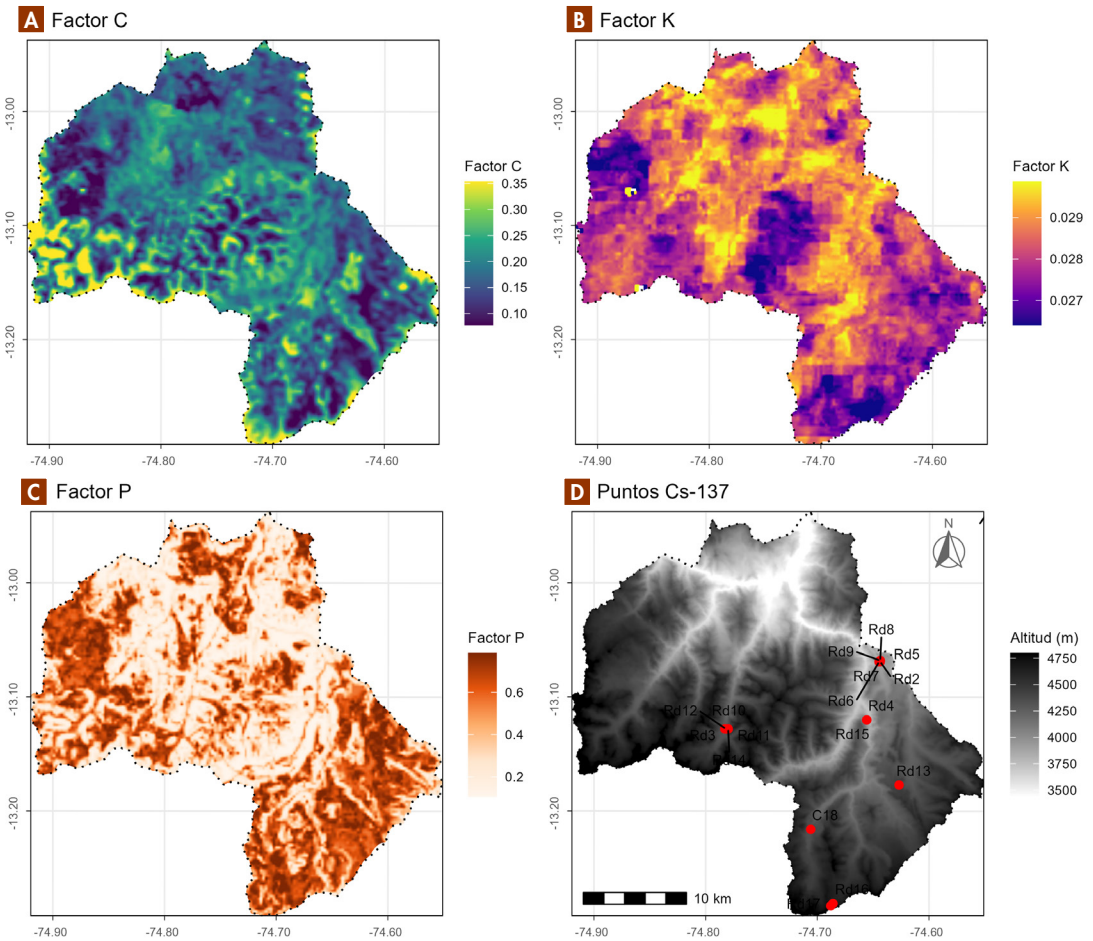


Figura 6.1.1. Variables de ingreso del modelo distribuido WaTEM/SEDEM en el distrito de Lircay. A) Cobertura vegetal del distrito de Lircay. B) Factor K, estimado a partir de datos de SoilGrids. C) Distribución espacial del factor P en el distrito. D) Tasas de erosión medidas con Cs-137, utilizadas en la etapa de calibración del modelo.

(0.01–0.1), asociados a coberturas herbáceas y áreas altoandinas que constituyen la mayor parte del territorio. Los valores intermedios (0.1–0.2) se presentan de forma transicional, mientras que los valores altos (0.25–0.4) se concentran en áreas agrícolas, distribuidas de manera discontinua. Este patrón define una matriz dominante de cobertura natural con focos aislados de intervención.

El factor de prácticas de conservación (P; Figura 6.1.1C) presenta valores entre 0.8 y 1.0, con predominio casi absoluto de valores cercanos a 1.0 en el distrito. Los valores de P entre 0.8 y 0.9 se restringen a áreas agrícolas y de pasturas, mientras que las coberturas naturales presentan valores entre 0.95 y 1.0. La distribución espacial confirma que la mayor parte del territorio no presenta prácticas de conservación efectivas, manteniendo condiciones donde la escorrentía superficial no es significativamente controlada. Finalmente, las tasas de erosión obtenidas mediante Cs-137 (Figura 6.1.1D), que integran procesos erosivos a escala decadal (Capítulo 4.1), fueron empleadas como referencia para evaluar la correspondencia de las tasas simuladas por el modelo.

6.2 Espacialización de la severidad de pérdida de suelo

La distribución espacial de las tasas de erosión hídrica en el distrito de Lircay (Figura 6.2.1) muestra valores entre aproximadamente 1.4 y superiores a 100 t/ha/año, evidenciando una alta heterogeneidad espacial. Sin embargo, la mayor parte del territorio se concentra en rangos intermedios, mientras que los valores extremos corresponden a focos puntuales de extensión reducida. A nivel de subcuencas, Coliscancha concentra las mayores tasas del sistema, con áreas que superan los 50 t/ha/año y focos localizados que exceden los 100 t/ha/año, principalmente en sectores occidentales y suroccidentales. Ajohuarina presenta un rango intermedio (3–95 t/ha/año), con predominio de valores entre 10 y 35 t/ha/año y ocurrencia localizada de valores altos. Por su parte, Pircamayo muestra un comportamiento más acotado, con tasas entre 6 y 67 t/ha/año, predominando valores intermedios y con menor presencia de extremos.

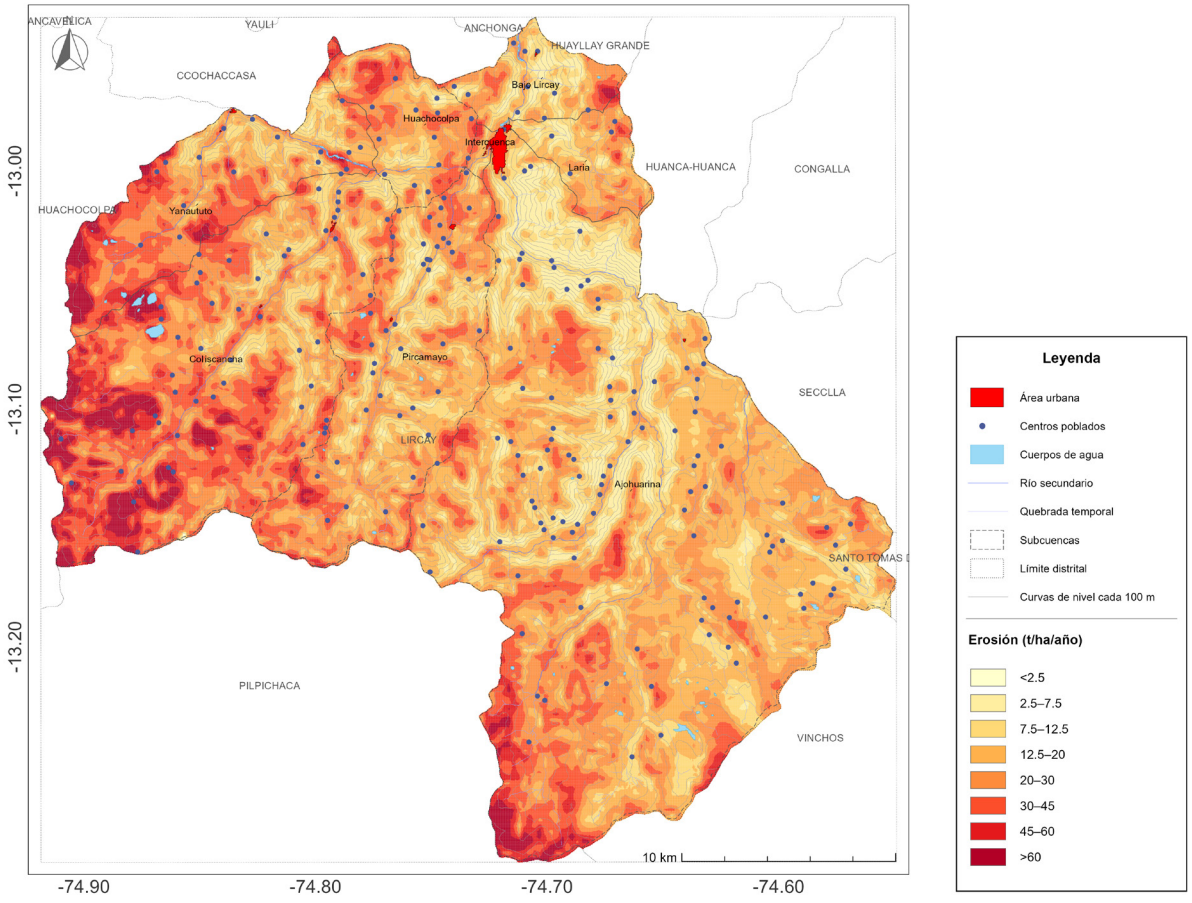


Figura 6.2.1. Mapa de las tasas de erosión en el distrito de Lircay.

En la Figura 6.2.2 se presenta la clasificación de las tasas de erosión en categorías de severidad. A escala distrital, los rangos intermedios de erosión (10–35 t/ha/año) concentran la mayor proporción del territorio, distribuyéndose de manera continua en gran parte del distrito. Esta condición se refleja en que más del 60 % del área se ubica en categorías de erosión fuerte a severa, mientras que las categorías superiores a 50 t/ha/año se concentran en una fracción reducida del territorio. Los valores bajos (<10 t/ha/año) presentan una representación limitada. En conjunto, esta distribución indica que la mayor parte del territorio está afectada por erosión moderada a alta, con presencia de áreas críticas en distintos sectores del territorio, donde las proporciones de valores superiores a 35 t/ha/año superan el 30 % en zonas específicas, lo que evidencia que la configuración espacial de la erosión no responde únicamente a la altitud, sino a la interacción de factores locales del terreno.

La cuantificación espacial muestra que las clases intermedias (20–45 t/ha/año) concentran la mayor proporción del área distrital. Las categorías superiores a 45 t/ha/año representan una fracción menor, pero agrupan los valores máximos del sistema. A nivel de subcuencas, Ajohuarina concentra el 36 % del área en la categoría fuerte (12.5–20 t/ha/año) y el 24 % en muy fuerte (20–30 t/ha/año), con una participación reducida de clases superiores a 45 t/ha/año (<4 %). En Coliscancha, más del 74 % del área se ubica en clases superiores a 20 t/ha/año, destacando 29 % en la categoría severa (30–45 t/ha/año), 11 % en muy severa (45–60 t/ha/año) y 9 % en extrema (>60 t/ha/año). Por su parte, Pircamayo presenta una mayor concentración en rangos intermedios, con 32 % del área en la clase fuerte y 32 % en muy fuerte, mientras que las clases superiores a 45 t/ha/año representan menos del 2 %.

Desde el punto de vista cuantitativo, la estructura del sistema erosivo muestra una concentración de las tasas más altas en una fracción reducida del territorio. En la subcuenca Coliscancha, las categorías superiores a 45 t/ha/año representan aproximadamente el 21 % del área, mientras que en Ajohuarina y Pircamayo estas mismas clases

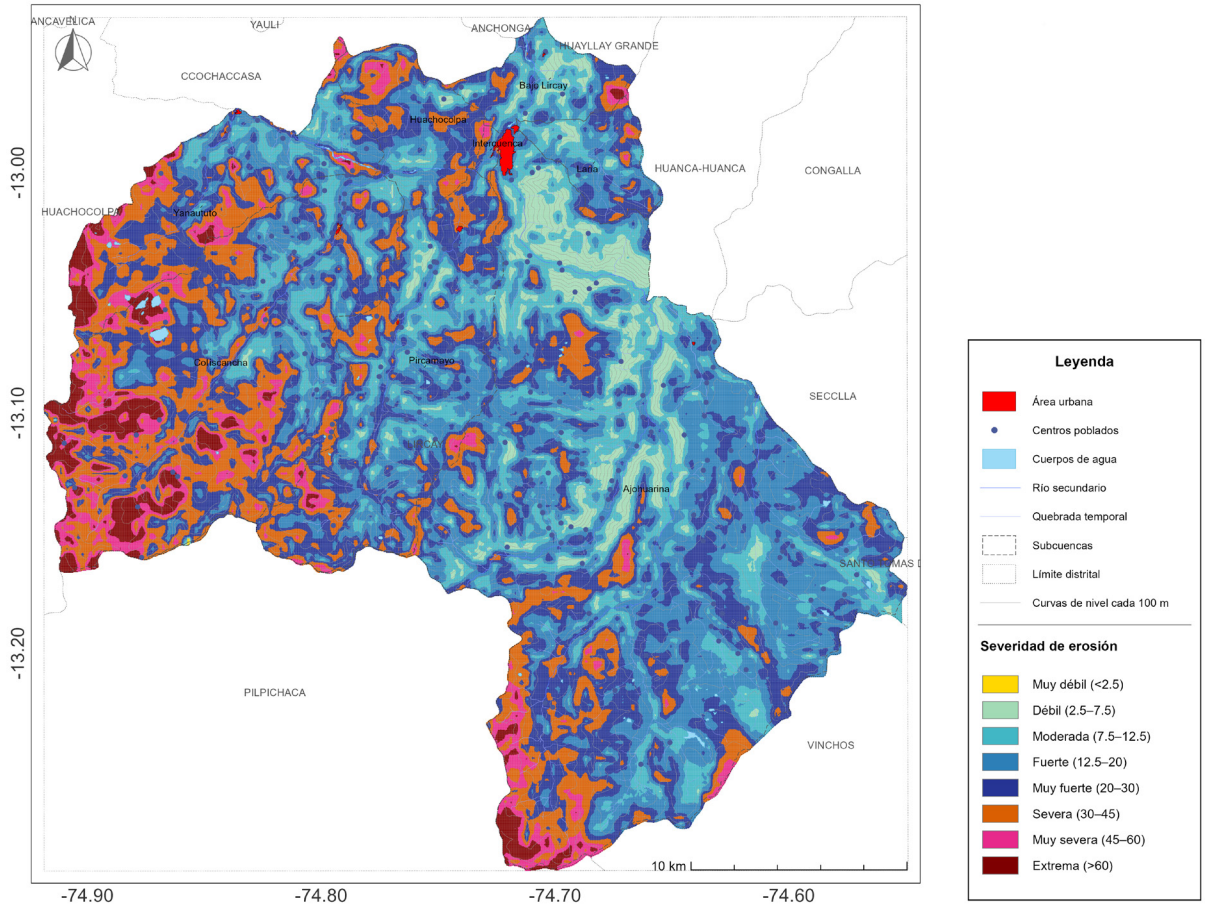


Figura 6.2.2. Espacialización de la severidad de pérdida de suelo en el distrito de Lircay.

no superan el 4 % y el 2 %, respectivamente. En contraste, las clases fuerte y muy fuerte (12.5–30 t/ha/año) concentran más del 60 % del área en Ajohuarina y Pircamayo, evidenciando que la mayor parte del territorio se encuentra bajo condiciones de erosión moderada a alta, mientras que las clases superiores se restringen a sectores específicos de mayor intensidad.

En conjunto, la distribución espacial de la erosión evidencia que la dinámica del sistema no está definida por los valores máximos localizados, sino por la proporción y continuidad de áreas con erosión moderada a alta en el territorio (Figura 6.1.2 y Figura 6.1.3). Este patrón es consistente con los resultados del Capítulo 4, donde se identifica la generación y redistribución de sedimentos a escala de parcela y ladera, y con el Capítulo 5, que muestra que la transferencia de sedimentos hacia la red de drenaje se concentra en una fracción limitada del territorio. En este contexto, las condiciones más críticas se asocian a sectores con mayor conectividad hacia la red de drenaje, presentes principalmente en zonas medias y bajas, pero también en áreas específicas de zonas altas, lo que condiciona la magnitud del proceso a escala de cuenca.

7. Conclusiones y recomendaciones para la gestión

El presente estudio integra la memoria isotópica, el monitoreo en tiempo real y el modelamiento geoespacial para establecer que la pérdida de suelo en Lircay no es un problema exclusivamente agrícola, sino una amenaza directa a la regulación hídrica y la productividad del distrito. Los resultados permiten formular conclusiones y recomendaciones orientadas a la acción.

7.1 ¿Qué nos dicen los isótopos, las trampas y el modelado?

La dinámica de la erosión en el distrito de Lircay muestra que más del 60 % del territorio presenta tasas entre 20 y 45 t/ha/año, lo que evidencia un predominio de condiciones de erosión moderada a alta. Las categorías superiores a 45 t/ha/año se concentran en una fracción reducida del territorio, alcanzando aproximadamente el 21 % en la subcuenca Coliscancha y menos del 4 % en Ajohuarina y Pircamayo. En conjunto, la distribución está dominada por clases intermedias, mientras que las más severas se restringen a focos localizados.

El uso agrícola en laderas y el tipo de cobertura vegetal son los factores que modulan la intensidad de esa degradación. El monitoreo en microparcelas (Capítulo 4.2) registró tasas de hasta 20 t/ha/año en cultivos de leguminosas bajo lluvias intensas, frente a valores menores a 1 t/ha/año en pajonal (ichu), diferencia que refleja el rol determinante de la cobertura en la reducción de la escorrentía superficial.

El análisis de Cs-137 (Capítulo 4.1) evidencia que el material erosionado no se exporta inmediatamente hacia la red fluvial. Este material se redistribuye y se almacena temporalmente en laderas, formando zonas de retención dentro del sistema. Este patrón coincide con lo observado en Allato (Capítulo 5.1.1), donde el 10 % de las observaciones concentra el 50 % de la carga total y el 20 % concentra el 76 %. La exportación se concentra en eventos de alta intensidad, mientras que durante el resto del tiempo predomina el almacenamiento y la redistribución.

A escala de cuenca, el análisis de procedencia (Capítulo 5) muestra que entre el 82 % y 94 % del sedimento transportado proviene de suelos desnudos, cárcavas y bancos de río, que en conjunto representan cerca del 18 % del territorio. En contraste, las áreas agrícolas y naturales, pese a generar sedimento, aportan una fracción menor al material transportado.

En conjunto, los resultados evidencian un desacople entre la generación y la exportación de sedimentos. Las laderas funcionan como zonas de almacenamiento temporal, mientras que la exportación efectiva se concentra en sectores conectados y durante eventos de alta intensidad. Este comportamiento define la conectividad sedimentaria como el principal control del sistema y permite identificar las áreas prioritarias para la gestión del territorio.

7.2 ¿En qué situación se encuentra Lircay respecto a la cordillera de los Andes?

Las tasas de erosión observadas en Lircay son consistentes con las reportadas en cuencas andinas del Perú bajo uso agropecuario. Los cultivos de ladera en Lircay alcanzan hasta 20 t/ha/año, mientras que en la cuenca Ronquillo (Cajamarca) cultivos equivalentes registran hasta 34.60 t/ha/año; aunque los valores absolutos difieren, ambos sistemas comparten una brecha estructural de entre 20 y 30 veces respecto a sus coberturas naturales de referencia. En ese sentido, el pajonal nativo (ichu) actúa como estabilizador consistente a lo largo de la cordillera: con tasas menores a 1 t/ha/año en Lircay y 1.2 t/ha/año en Ronquillo, confirma su rol como la cobertura protectora más eficiente de los sistemas altoandinos peruanos, independientemente del contexto local.

A diferencia de otros sistemas andinos, en Lircay las prácticas locales de manejo observadas en parcelas agrícolas influyen en la dinámica del proceso erosivo. En particular, la presencia de cercos de piedra en zonas medias y bajas introduce discontinuidades en el flujo superficial a escala local, favoreciendo la retención de sedimentos y limitando su transferencia directa hacia la red de drenaje. Esto indica que, bajo ciertas condiciones, la relación entre generación de sedimentos y su aporte al sistema fluvial no es lineal, lo que sugiere que la conectividad efectiva del sistema puede ser modulada por prácticas de manejo a escala de parcela.

7.3 Prioridades para la gestión

Los resultados permiten establecer que la gestión ambiental en Lircay debe evolucionar de un enfoque de mitigación general hacia una intervención focalizada sobre la conectividad sedimentaria, orientando las acciones hacia los procesos que controlan la exportación efectiva de sedimentos a escala de cuenca:

- **Mitigación en focos críticos:** La prioridad para implementar prácticas de conservación de los suelos debe centrarse en la subcuenca Coliscancha, donde se concentran focos que superan los 100 t/ha/año y aproximadamente el 75 % del territorio presenta erosión superior a 20 t/ha/año. Más que los valores extremos puntuales, su importancia radica en la continuidad espacial de la erosión y su conexión con la red de drenaje, que controla el aporte de sedimentos a escala de cuenca. Intervenir en estos sectores permitirá reducir de manera eficiente la carga sedimentaria.

- **Estabilización de suelos desnudos y cárcavas:** Dado que estas unidades, junto con fuentes como bancos de río, aportan hasta el 94 % del sedimento transportado, es prioritario implementar barreras vegetativas y estructuras de retención que reduzcan la conexión entre laderas y cauces. La efectividad de estas medidas radica en disminuir la continuidad del flujo superficial, limitando la transferencia del sedimento hacia la red de drenaje más que su generación.

- **Conservación del pajonal (ichu):** El mantenimiento de esta cobertura debe considerarse una medida estructural de control de la erosión. Con tasas menores a 1 t/ha/año, el ichu reduce la pérdida de suelo en más de 20 veces respecto a áreas agrícolas, evitando la formación de nuevas áreas fuente y contribuyendo a la estabilidad del sistema a mediano plazo.

- **Optimización agrícola:** En cultivos de ladera (arveja/haba), donde las pérdidas alcanzan hasta 20 t/ha/año, las prácticas deben orientarse a reducir la transferencia del sedimento generado. El uso de residuos vegetales y cercos de piedra en parcelas introduce discontinuidades en el flujo superficial, favoreciendo la retención local del suelo y limitando su aporte al sistema fluvial.

7.4 Capacidad técnica y tecnológica del laboratorio MoSSARD

- El laboratorio MoSSARD del Instituto Geofísico del Perú se posiciona como una infraestructura analítica de alta resolución con sólida competencia técnica, capaz de generar información robusta y confiable para el estudio de procesos de erosión hídrica. La integración de tecnologías avanzadas junto con metodologías validadas y personal especializado garantiza una caracterización multianalítica de alta sensibilidad y precisión.

- La implementación progresiva del marco NTP-ISO/IEC 17025, el uso de materiales de referencia certificados y la trazabilidad metrológica internacional consolidan la validez de los resultados, asegurando niveles adecuados de incertidumbre, repetibilidad y reproducibilidad. La gestión eficiente del flujo analítico, respaldada por protocolos estrictos de cadena de custodia y planificación operativa, permite manejar altos volúmenes de muestras manteniendo su integridad y representatividad estadística.

- El enfoque sistemático en el pretratamiento y procesamiento diferenciado de matrices sólidas y líquidas, junto con una gestión dinámica de tiempos analíticos, refuerza la capacidad del laboratorio para abordar estudios completos en ecosistemas de alta montaña. En conjunto, estas fortalezas convierten al Laboratorio MoSSARD en un soporte científico clave para la modelización, diagnóstico y toma de decisiones en torno a la degradación de suelos y el transporte de sedimentos.

Referencias

- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Van Oost, K., Montanarella, L., & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications, 8*, Article 2013. https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7

- Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerdà, A., Chalise, D., Chen, S., Chen, W., De Girolamo, A. M., Gessesse, G. D., Deumlich, D., Diodato, N., Efthimiou, N., Erpul, G., Fiener, P., ... Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the Total Environment, 780*, Article 146494. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494

- Bracken, L. J., Wainwright, J., Ali, G. A., Tetzlaff, D., Smith, M. W., Reaney, S. M., & Roy, A. G. (2013). Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas. *Earth-Science Reviews, 119*, 17–34. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.001

- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma, 124*(1–2), 3–22. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005

- Centeri, C. (2022). Effects of grazing on water erosion, compaction and infiltration on grasslands. *Hydrology, 9*(2), Article 34. https://doi.org/10.3390/hydrology9020034

- Currie, L. A. (1968). Limits for qualitative detection and quantitative determination: Application to radiochemistry. *Analytical Chemistry, 40*(3), 586–593. https://doi.org/10.1021/ac60259a007

- Descroix, L., González Barrios, J. L., Viramontes, D., Poulenard, J., Anaya, E., Esteves, M., & Estrada, J. (2008). Gully and sheet erosion on subtropical mountain slopes: Their respective roles and the scale effect. *Catena, 72*(3), 325–339. https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.07.003

- Dittmer, K. M., Rose, S., Snapp, S. S., Kebede, Y., Brickman, S., Shelton, S., Egler, C., Stier, M., & Wollenberg, E. (2023). Agroecology can promote climate change adaptation outcomes without compromising yield in smallholder systems. *Environmental Management, 72*(2), 333–342. https://doi.org/10.1007/s00267-023-01816-x

- Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., & Li, Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review. *Progress in Physical Geography, 29*(2), 189–217. https://doi.org/10.1191/0309133305pp443ra

- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2025). *Perú: Población total proyectada al 30 de junio de cada año, según departamento, provincia y distrito, 2018–2026* [Conjunto de datos]. Gob.pe. https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/6894980-peru-poblacion-total-proyectada-al-30-de-junio-de-cada-ano-segun-departamento-provincia-y-distrito-2018-2026

- Lal, R. (2003). Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International, 29*(4), 437–450. https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00192-7

- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (s. f.). Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA). Recuperado el 12 de junio de 2026, de https://siea.midagri.gob.pe/

- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 104*(33), 13268–13272. https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104

- Morera, S. B., Condom, T., Crave, A., Steer, P., & Guyot, J. L. (2017). The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968–2012). *Scientific Reports, 7*, Article 11947. https://doi.org/10.1038/s41598-017-12220-x

- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazón, M., Guallpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes, 30*(22), 4074–4089. https://doi.org/10.1002/hyp.10980

- O'Neal, M. R., Nearing, M. A., Vining, R. C., Southworth, J., & Pfeifer, R. A. (2005). Climate change impacts on soil erosion in Midwest United States with changes in crop management. *Catena, 61*(2–3), 165–184. https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.03.003

- Soto, J., & Navas, A. (2004). A model of ^{137}Cs activity profile for soil erosion studies in uncultivated soils of Mediterranean environments. *Journal of Arid Environments, 59*(4), 719–730. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.02.003

- Soto, J., & Navas, A. (2008). A simple model of Cs-137 profile to estimate soil redistribution in cultivated stony soils. *Radiation Measurements, 43*(7), 1285–1293. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.02.024

- Tao, W., Wu, J., & Wang, Q. (2017). Mathematical model of sediment and solute transport along slope land in different rainfall pattern conditions. *Scientific Reports, 7*, Article 44082. https://doi.org/10.1038/srep44082

- Zimmerer, K. S. (2014). Conserving agrobiodiversity amid global change, migration, and nontraditional livelihood networks: The dynamic uses of cultural landscape knowledge. *Ecology and Society, 19*(2), Article 1. https://doi.org/10.5751/ES-06316-190201

- Zubieta, R., Molina-Carpio, J., Laqui, W., Sulca, J., & Ilbay, M. (2021). Comparative analysis of climate change impacts on meteorological, hydrological, and agricultural droughts in the Lake Titicaca Basin. *Water, 13*(2), Article 175. https://doi.org/10.3390/w13020175

Información clave para ti

Puedes consultar, descargar y compartir desde el Repositorio Geofísico Nacional (REGEN) los diferentes **reportes**, **boletines** e **informes** que genera el IGP.

RECUERDA: La Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) se fundamenta en la investigación científica. El IGP es una entidad líder en la generación de conocimiento científico en el país.

REGEN



Sede central del Instituto Geofísico del Perú (IGP)


IGP
Instituto
Geofísico
del Perú