PERÚ | Ministerio del Ambiente

IGP Instituto Geofísico del Perú

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

(Provincia de Cajamarca, región Cajamarca)

Informe Técnico n.° 020-2026/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima-Perú
Julio, 2026

CRÉDITOS

Vladimiro Huaroc Portocarrero
Ministro 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, producción y transporte de sedimentos en el distrito de La Encañada
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: +51 1 317 2300

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 Distrital de La Encañada (MDLE), en la región de Cajamarca, por el apoyo logístico y las convocatorias 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 colaborar en los análisis complementarios de muestras de suelo.

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

(Provincia de Cajamarca, región Cajamarca)

Lima, Perú
Julio de 2026

RESUMEN

La erosión hídrica constituye uno de los principales procesos de degradación del suelo en zonas de montaña, donde puede comprometer la regulación del ciclo hidrológico (para el desarrollo conceptual del fenómeno, véase Morera et al., 2026).

En los Andes del norte del Perú, la respuesta hidrológica de los suelos varía marcadamente incluso entre cuencas vecinas. En la cuenca del río Ronquillo (Cajamarca), el coeficiente de escorrentía oscila entre 0.33 y 0.66 según el sector del territorio, con valores de 0.23 a 0.60 durante la temporada de lluvias, entre enero y abril (Krois & Schulte, 2013). Esta variabilidad evidencia que los suelos altoandinos cumplen funciones de regulación hídrica diferenciadas según su cobertura y posición en el relieve (Krois, 2016).

En el distrito de La Encañada (635 km^2), la actividad pecuaria genera el 48 % del valor bruto de la producción (VBP) y es desarrollada por más de 13 000 productores distribuidos en un gradiente altitudinal de 2700 a 4300 m s. n. m. (MIDAGRI, 2024). La pérdida de suelo por erosión hídrica compromete la base productiva de estos productores, cuyo sustento depende de la conservación de los horizontes fértiles (MIDAGRI, 2019).

Estudios previos realizados en el distrito documentaron procesos individuales de erosión, aunque sin integrarlos en un diagnóstico multitécnico. Romero et al. (2007) caracterizaron la erosividad de las lluvias en la microcuenca de La Encañada durante distintas fases del ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) y registraron, durante eventos El Niño, hasta 14 tormentas con intensidades superiores a 25 mm/h en una sola temporada. Simulaciones posteriores con el modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) estimaron que el 10 % del territorio distrital presenta tasas de pérdida de suelo superiores a 150 t/ha/año, concentradas en laderas con pendientes mayores de 40°, mientras que el 58 % del área mantiene valores inferiores a 10 t/ha/año (Baigorria & Romero, 2007). Ninguna de estas aproximaciones incorporó trazadores radioisotópicos, análisis de procedencia de sedimentos ni modelado espacial calibrado, por lo que no permiten atribuir la pérdida de suelo a fuentes específicas ni cuantificar su transporte hacia la red fluvial.

A escala nacional, el Programa Presupuestal 0089 (PP 0089) identificó como problema central el deficiente aprovechamiento del recurso suelo en el ámbito agrario. Esta problemática se concentra en 52 distritos de ocho departamentos, que reúnen 3 701 600 ha de suelos severamente degradados, equivalentes al 32 % de las 11 519 206 ha consideradas como población potencial. La Encañada forma parte de este conjunto de distritos prioritarios, donde la ausencia de estimaciones locales de las tasas de erosión limita el diseño de estrategias efectivas de gestión.

La necesidad del diagnóstico se refuerza por la ocurrencia de eventos de erosión documentados en el distrito. El 14 de enero de 2024, la activación de las quebradas de los sectores San Francisco, Lloctorampa y El Porvenir generó huaicos que afectaron viviendas, cultivos y ganado, y dejaron a dos familias damnificadas (INDECI, 2024). Este tipo de eventos evidencia que la degradación del suelo no constituye únicamente un proceso gradual, sino también un factor de riesgo frente a episodios de lluvia intensa.

El presente estudio diagnostica la erosión hídrica de los suelos del distrito de La Encañada e identifica las fuentes, la producción y el transporte de sedimentos hacia la red fluvial. El diagnóstico integra trazadores radioisotópicos (^{137}Cs y $^{210}Pb_{ex}$), monitoreo mediante microparcelas de escorrentía, geología forense para determinar la procedencia de los sedimentos y modelado espacial mediante WaTEM/SEDEM.

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 analítica y caracterización metrológica

18 Análisis del sistema físico-territorial

18 Relieve y geología

20 Uso del suelo en las últimas décadas

22 Clima e hidrología

24 Diagnóstico de la erosión

24 Historia de las últimas décadas

29 Dinámica y monitoreo de la erosión actual

32 Procedencia y dinámica de los sedimentos

32 Caracterización de los sedimentos

33 Zonas críticas de aporte de sedimentos

37 Mapeo de las tasas y la severidad de erosión

37 Construcción del modelo espacial de erosión

38 Espacialización de la severidad de pérdida de suelo

39 Mapa de severidad y priorización de intervenciones

41 Conclusiones y recomendaciones para la gestión

41 ¿Qué nos dicen los isótopos, las microparcelas y el modelado?

41 La Encañada frente al umbral de tolerancia

42 Prioridades para la gestión

43 Referencias

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y CONVENCIONES

USOS DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL	
Agr	Áreas agrícolas heterogéneas / Frontera agrícola.
Arb	Áreas con vegetación arbustiva.
CuA	Aguas continentales.
Hrb	Áreas con vegetación herbácea natural.
Min	Áreas de extracción minera.
Pas	Pasturas.
Pfo	Cobertura forestal.
Urb	Áreas urbanizadas.

VARIABLES BIOFÍSICAS, HIDROLÓGICAS Y EDÁFICAS	
C	Factor de cobertura vegetal.
Cc	Cobertura de cultivo.
Ch	Altura de cultivo.
CO	Carbono orgánico.
CSS	Concentración de sedimentos en suspensión.
E	Energía cinética de la lluvia en el modelo TEST.
Ei30	Erosividad de la lluvia (energía cinética × intensidad máxima en 30 min).
Ero	Costras de erosión.
Fa	Agregados libres (free aggregates).
Grc	Costra de grava (gravel crust).
I30	Intensidad máxima en 30 minutos.
K	Factor de erodabilidad del suelo.
KTC	Coeficiente de capacidad de transporte.
LS	Factor de longitud y pendiente.
Mt	Humedad del suelo.
Om	Materia orgánica.
P	Factor de prácticas de conservación.
PP	Precipitación.
Q	Caudal.
R	Factor de erosividad.
Rc	Coeficiente de escorrentía.
Res	Cobertura de residuos.
Rn	Rugosidad superficial del suelo.
SDR	Relación de entrega de sedimentos.
SL	Pérdida de suelo por evento (soil loss).
Slp	Pendiente del terreno.
SPI	Índice de potencia de corriente.
TWI	Índice de humedad topográfica.
Vc	Cobertura vegetal en el modelo PLS-R.
Wc	Cobertura de malezas.
Wh	Altura de malezas.

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.
GASEMT	Global Applications of Soil Erosion Modelling Tracker (base de datos global de modelado de erosión de suelos; Borrelli et al., 2021).
ISO	Organización Internacional de Normalización.
LD	Límite de detección.
PLS-R	Regresión por mínimos cuadrados parciales (partial least squares regression).
POE	Procedimiento(s) operativo(s) estándar.
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 (variable importance in projection), índice del análisis PLS-R.
WaTEM/SEDEM	Modelo de erosión y transporte de sedimentos en cuencas.

GLOSARIO DE TÉRMINOS CLAVE Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Erosión hídrica	Proceso de degradación en el que 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 fluye sobre el terreno; constituye el principal motor del transporte masivo de sedimentos en el distrito.
Cárcavas y caminos	Zanjas profundas y vías no pavimentadas que mantienen una conexión directa con los cauces y concentran 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, lo que desencadena 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 durante los últimos 60 a 100 años.
Carbono orgánico (CO)	Indicador del estado de conservación del suelo; los niveles inferiores al 1 % reducen la cohesión entre las partículas e incrementan la susceptibilidad a la erosión.
Sedimentos en suspensión (CSS)	Cantidad de partículas sólidas transportadas por el río.
Conectividad sedimentaria	Capacidad física de una cuenca para transportar 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, calibrado sobre los 849 km² del área de estudio e interpretado para el distrito de La Encañada (635 km²).
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 entre los usos de suelo monitoreados en microparcelas.



Talud de suelo expuesto en el distrito de La Encañada, Cajamarca, característico de las laderas desprotegidas frente a la erosión hídrica.

1. Introducción

1.1 Los suelos a escala global y regional

La erosión hídrica compromete la estabilidad de los sistemas edáficos a escala global (Borrelli et al., 2017). La base de datos GASEMT (Global Applications of Soil Erosion Modelling Tracker) identifica la cordillera de los Andes como un área crítica donde las tasas de pérdida de suelo exceden sistemáticamente su capacidad de regeneración natural (Borrelli et al., 2021). En el Perú, la topografía accidentada, la estacionalidad de las lluvias y la presión antrópica sobre la cobertura vegetal agravan este proceso (Krois, 2016).

En la región altoandina de Cajamarca, el suelo cumple una función de regulación hídrica que va más allá del soporte agrícola (Krois & Schulte, 2013). La pérdida de horizontes orgánicos reduce la infiltración y convierte los suelos con capacidad de retención en superficies de escorrentía rápida (Krois, 2016), lo que altera el ciclo hidrológico local y aumenta la exposición de las comunidades rurales ante eventos climáticos extremos (Romero et al., 2007).

En el distrito de La Encañada, el 48 % del valor bruto de la producción (VBP) corresponde a la actividad pecuaria, desarrollada por más de 13 000 productores en un gradiente altitudinal de 2700 a 4300 m s. n. m. (MIDAGRI, 2024). La pérdida de suelo por erosión hídrica compromete directamente la base productiva de estos productores, cuyo sustento depende de la integridad de los horizontes fértiles (Baigorria & Romero, 2007; MIDAGRI, 2019).

El presente estudio diagnostica la erosión hídrica de los suelos del distrito de La Encañada (635 km², Cajamarca) e identifica las fuentes, la producción y el transporte de sedimentos hacia la red fluvial. El diagnóstico integra trazadores radioisotópicos (Cs-137 y Pb-210ex), monitoreo de microparcelas de escorrentía, geología forense para la procedencia de sedimentos y modelado espacial con WaTEM/SEDEM.

1.2 Antecedentes del distrito

Romero et al. (2007) caracterizaron la erosividad de las lluvias en la microcuenca de La Encañada bajo distintas fases del ENSO (El Niño-Oscilación del Sur). Encontraron que durante los eventos de El Niño se concentra el mayor número de tormentas con intensidades superiores a 25 mm/h, con hasta 14 eventos de este tipo en una sola temporada.

Simulaciones posteriores con el modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project; Baigorria & Romero, 2007) estimaron que el 10 % del territorio presenta tasas de pérdida de suelo superiores a 150 t/ha/año, concentradas en laderas con pendientes mayores a 40°, mientras que el 58 % del área mantiene valores por debajo de 10 t/ha/año, asociados principalmente a coberturas naturales de pastos y cereales.

Estudios hidrológicos previos en una cuenca cercana del distrito de La Encañada muestran que su capacidad natural de almacenamiento de agua sostiene el caudal durante la estación seca (Krois et al., 2013), lo que evidencia la vulnerabilidad del sistema hídrico local ante la pérdida de cobertura vegetal y suelo.

La presión antrópica sobre el suelo del distrito se ha intensificado desde entonces. El análisis multitemporal de coberturas (capítulo 3.2) confirma que las coberturas naturales han sido sustituidas por pastizales y áreas de cultivo, lo que ha incrementado la conectividad sedimentaria en las 47 835 ha de superficie agropecuaria registradas en 2012.

2. Instrumentación y laboratorio

2.1 Redes de monitoreo e instrumentación

El IGP desplegó una red de monitoreo durante la campaña de campo de marzo a mayo de 2023 (Figura 2.1.1). El muestreo se organizó en torno a las tres subcuencas del distrito: Llaucano (312 km^2), Chonta (283 km^2) y Namora (254 km^2), que, en conjunto, conforman un área hidrológica de 849 km^2 con un gradiente altitudinal de 2700 a 4300 m s. n. m. Este marco permitió cubrir, de forma integrada, la respuesta atmosférica, la dinámica de la erosión en las laderas y la exportación fluvial.

Para caracterizar la erosividad de las tormentas, se instalaron dos estaciones meteorológicas automáticas en Cushurobamba (subcuenca Llaucano) y Sangal (subcuenca Chonta), que registraron la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}) y los niveles de humedad antecedente del suelo (capítulo 3.3). El monitoreo fluvial se realizó mediante dos estaciones hidrométricas en los cauces principales, con las que se acumularon 964 observaciones de concentración de sedimentos en suspensión (CSS), vinculadas a 454 000 registros de caudal por minuto (capítulo 5.1).

La respuesta directa del suelo se cuantificó con 30 microparcelas de escorrentía (1 m^2) bajo diferentes coberturas y usos (capítulo 4.2). Para reconstruir la memoria histórica y determinar la procedencia del sedimento, se recolectaron 102 testigos de suelo para el análisis de radionúclidos (^{137}Cs y ^{210}Pb$_{ex}$) y 366 muestras superficiales para geología forense (capítulo 5.2). El volumen total procesado en el laboratorio fue de 468 matrices sólidas y 1537 matrices líquidas.

2.2 Competencia analítica y caracterización metrológica

2.2.1 Capacidades analíticas y tecnologías de alta resolución

Las muestras ambientales recolectadas en el distrito de La Encañada fueron procesadas en el Laboratorio de Monitoreo de Suelos, Sedimentos y Agua ante Riesgos y Desastres (MoSSARD) del IGP (Figura 2.2.1). Las capacidades operativas, el soporte instrumental y el alcance de las metodologías validadas del laboratorio se describen en detalle en el estudio de referencia

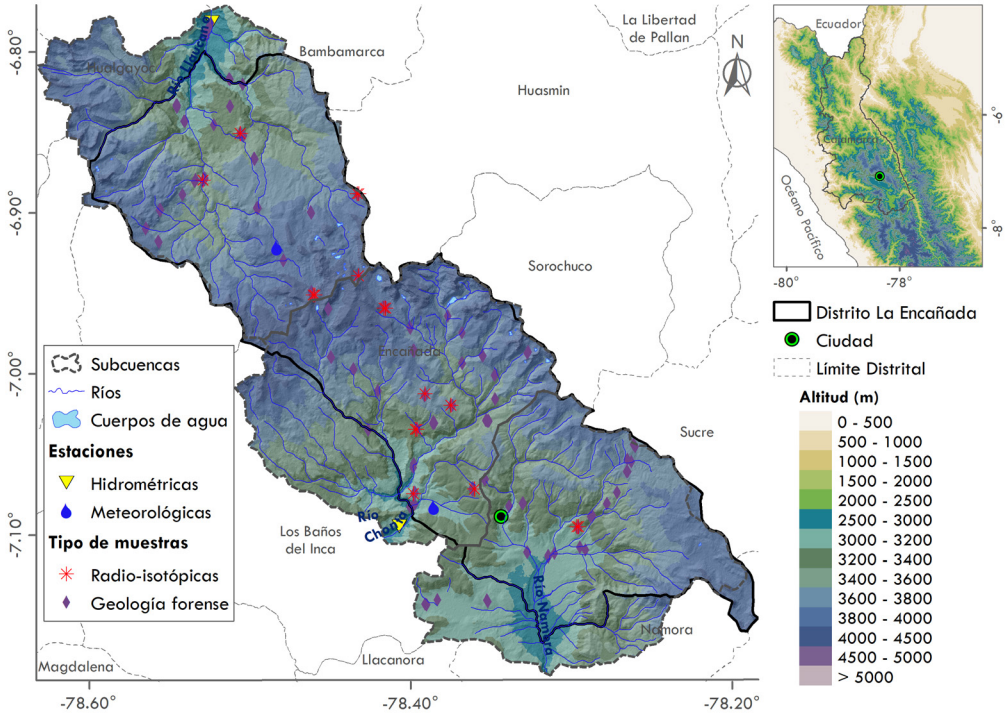


Figura 2.1.1. Unidades políticas, gradiente altitudinal, red de monitoreo hidrometeorológico y muestreo multianalítico (radioisótopos y geología forense) para el diagnóstico de la erosión hídrica en el distrito de La Encañada (campaña 2023).

de Morera et al. (2026). Sobre esta base metodológica, las mediciones instrumentales efectuadas para el presente estudio permiten asegurar la precisión, trazabilidad y validez técnica de los insumos analíticos requeridos para la caracterización y el modelamiento de la erosión hídrica en el distrito.

2.2.2 Cuantificación de matrices ambientales para pretratamiento

La fase de acondicionamiento y pretratamiento en el Laboratorio MoSSARD comprendió el procesamiento integral de 2005 muestras ambientales correspondientes al distrito de La Encañada (Figura 2.2.2a). El volumen de muestras procesadas estuvo constituido principalmente por matrices líquidas, entre las cuales las muestras de sedimentos en suspensión procedentes de microparcelas y del río representaron el 28.6 % y el 48.1 %, respectivamente. En cuanto a las matrices sólidas, se acondicionaron 366 muestras de suelos y sedimentos superficiales, destinadas a la caracterización granulométrica, geoquímica y colorimétrica, mientras que 102 fracciones de testigos de suelo completaron la secuencia de laminado, secado y homogeneización previa a las mediciones mediante espectrometría gamma. Este volumen de procesamiento contribuye a asegurar la representatividad estadística del estudio, responde al rigor técnico establecido en los Procedimientos Operativos Estándar (POE) y favorece la eficiencia de los tiempos de respuesta analítica (Figura 2.2.2b).

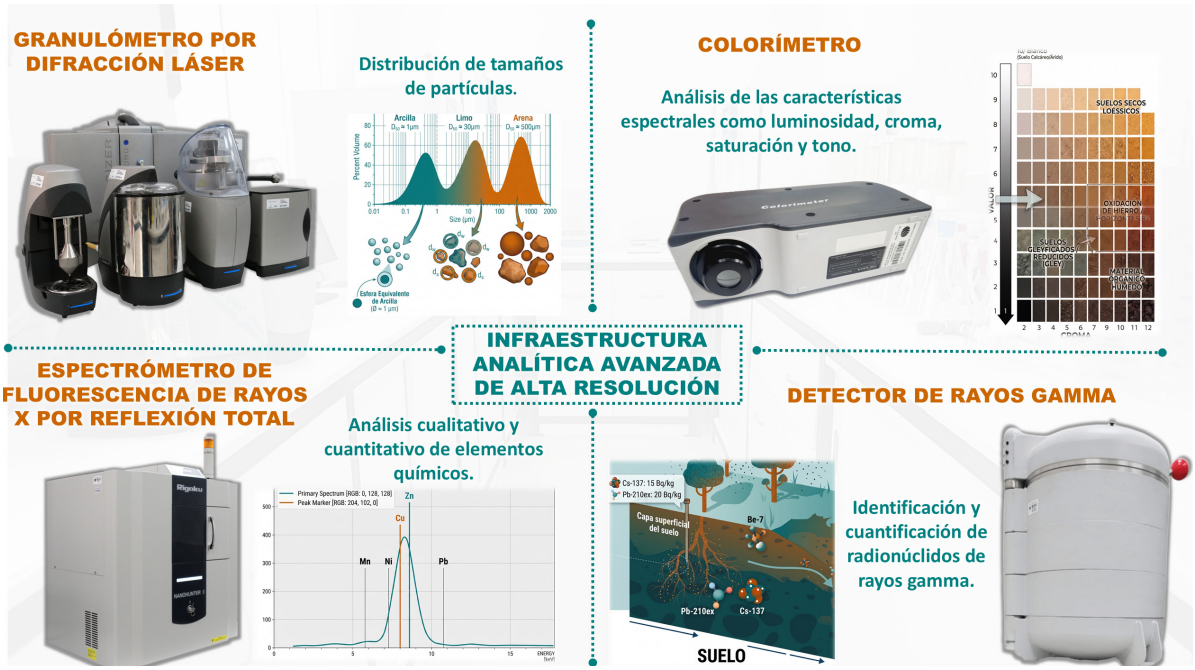


Figura 2.2.1. Instrumentación analítica de alta complejidad del Laboratorio MoSSARD del IGP.

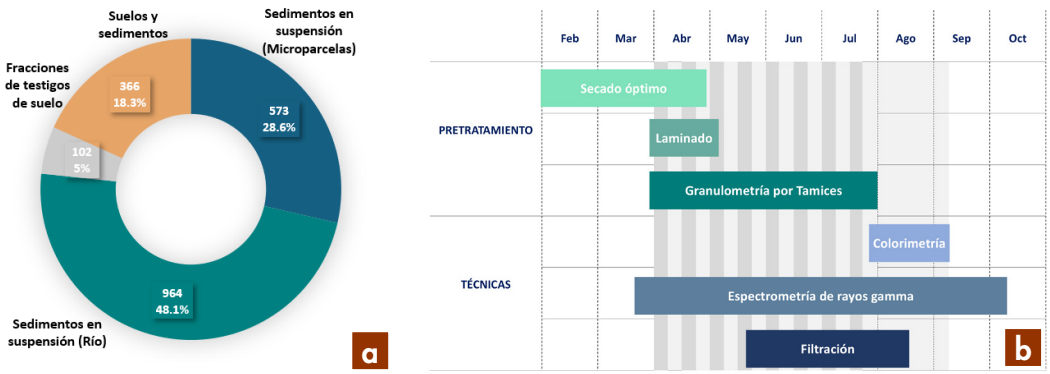


Figura 2.2.2. a) Volumen de muestras procesadas; b) balance de tiempos de respuesta y rendimiento analítico para el distrito de La Encañada, 2023.

2.2.3 Rangos dinámicos y métricas analíticas por técnica

La caracterización multianalítica de las muestras del distrito de La Encañada permitió determinar la sensibilidad, los rangos de concentración y la resolución de las técnicas fisicoquímicas y radioisotópicas aplicadas en el Laboratorio MoSSARD.

a. Actividad radioisotópica (^{137}Cs, ^{210}Pb y $^{210}Pb_{ex}$)

En las fracciones de testigos de suelo procesadas para el diagnóstico de la pérdida de suelo según el uso de la tierra, las mediciones mediante espectrometría de rayos gamma mostraron una respuesta analítica definida por una actividad mínima detectable (MDA) asociada a un límite de detección (LD) de 0.1 Bq/kg. Asimismo, se mantuvo un control estricto de la variabilidad metrológica, con incertidumbres combinadas inferiores al 30 % en la cuantificación de los fotopicos de interés (Figura 2.2.3).

b. Caracterización cromática para *fingerprinting*

El análisis colorimétrico aplicado a las muestras de suelo superficial evidenció diferencias numéricas significativas en las coordenadas de los espacios cromáticos evaluados según la procedencia y el tipo de cobertura de las muestras (Figura 2.2.4). Las firmas cromáticas mostraron una clara separación estadística entre los grupos correspondientes a suelos expuestos, agrícolas, naturales y bosques. En particular, los suelos expuestos presentaron valores sistemáticamente más altos de luminosidad y croma en los distintos espacios cromáticos analizados (CIE1976LAB, CIELCH, CIELUV, CIEXYZ, Hunter Lab y RGB), lo que evidencia una firma cromática diferenciada. Estos resultados respaldan la capacidad del laboratorio para discriminar y trazar las distintas fuentes de sedimentos mediante variables colorimétricas, como insumo previo para el modelado multivariado de las fuentes de aporte de sedimentos.

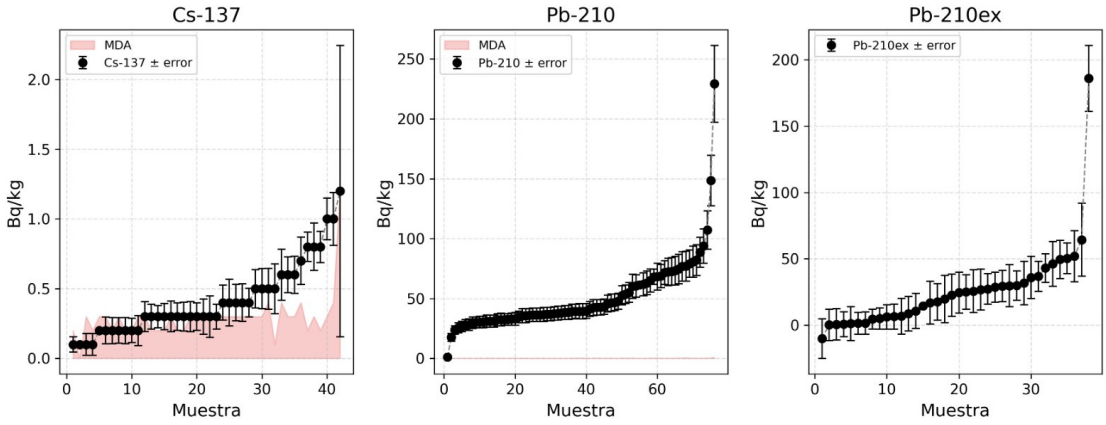


Figura 2.2.3. Límites de detección e incertidumbres en fracciones de testigos de suelo del distrito de La Encañada.

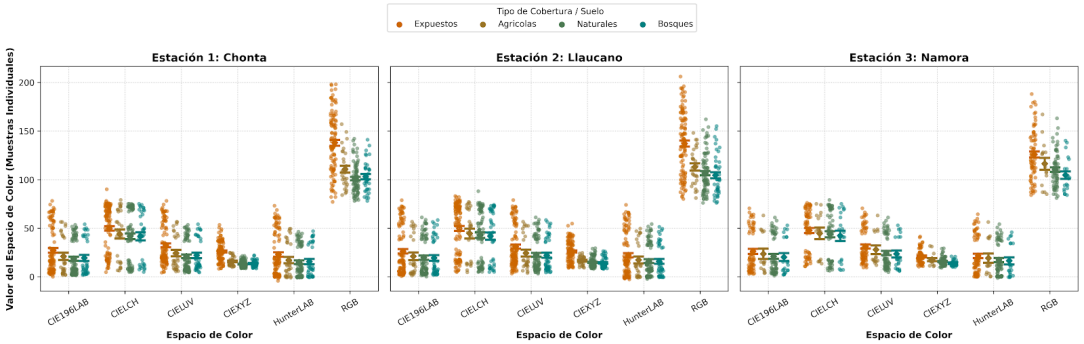


Figura 2.2.4. Diferenciación de firmas cromáticas según el tipo de cobertura y la estación de monitoreo.

c. Concentración de sedimentos en suspensión (CSS) en la dinámica de transporte

La cuantificación mediante filtración gravimétrica de las matrices líquidas provenientes de la red de monitoreo permitió determinar las variaciones de la concentración de sedimentos en suspensión (CSS, expresada en g/L). Los datos de CSS registrados en los ríos muestran que la fracción de partículas gruesas domina la masa total transportada en ambas estaciones, con valores promedio de 0.133 g/L en la estación Chonta y 0.181 g/L en la estación Llaucano, frente a 0.071 g/L y 0.110 g/L correspondientes a la fracción fina, respectivamente. En los eventos extremos, la estación Chonta registró la concentración total máxima del estudio, con 9.097 g/L, de los cuales 6.695 g/L correspondieron a la fracción gruesa y 2.402 g/L a la fracción fina. En la estación Llaucano, la concentración total máxima alcanzó 4.815 g/L.

Por otro lado, el análisis de las muestras recolectadas en el sistema de microparcelas experimentales permitió cuantificar la variabilidad del desprendimiento y transporte de sedimentos bajo distintos tipos de cobertura en el distrito de La Encañada (Figura 2.2.6). La estación Sangal registró las mayores concentraciones de sedimentos en suspensión, con un valor promedio de 3.710 g/L y un máximo de 22.114 g/L, seguida de la estación Cushuro, con un promedio de 1.478 g/L y un máximo de 11.881 g/L. La dispersión de los datos evidencia que, si bien la mayoría de los eventos de escorrentía genera concentraciones reducidas (<0.500 g/L), las tormentas de alta intensidad pueden activar pulsos de arrastre erosivo que incrementan de manera no lineal la concentración de sedimentos en suspensión.

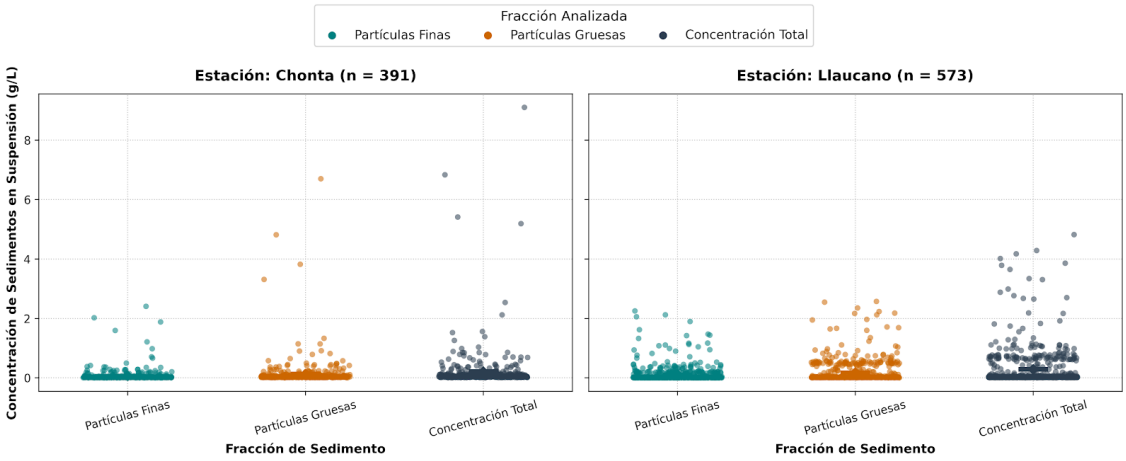


Figura 2.2.5. Concentración de sedimentos en suspensión registrada en ríos, diferenciada en partículas finas, partículas gruesas y concentración total.

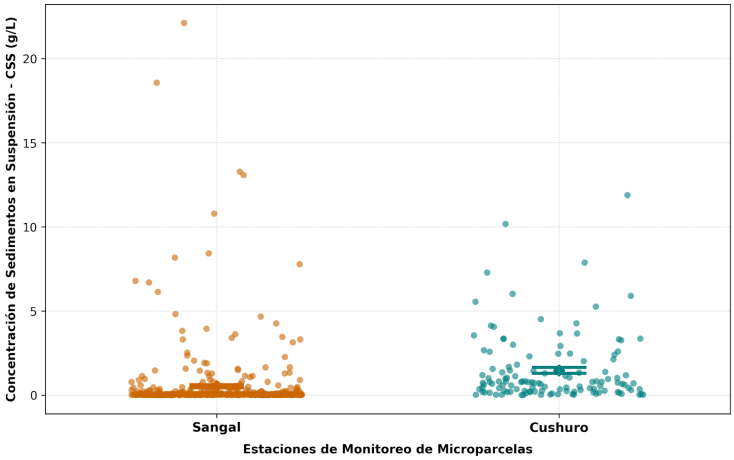


Figura 2.2.6. Concentración de sedimentos en suspensión en microparcelas experimentales de cuatro estaciones de monitoreo.

3. Análisis del sistema físico-territorial

3.1 Relieve y geología

3.1.1 Geología

El distrito de La Encañada (635 km²) presenta 44 unidades litoestratigráficas distribuidas entre el Cretácico Inferior y el Cuaternario (Figura 3.1.1). La Formación Yumagual ocupa 71 km² (11 % del territorio), mientras que el Grupo Pulluicana abarca 67 km² (11 %). Ambas unidades suman 138 km² y representan el 22 % de la superficie distrital. Sus secuencias interestratificadas de calizas y lutitas generan contrastes litológicos que condicionan las propiedades físicas de los materiales superficiales.

3.1.2 Morfometría y análisis de pendiente

Los depósitos cuaternarios cubren 163 km², equivalentes al 26 % del distrito (Figuras 3.1.2 y 3.1.3). Este conjunto incluye depósitos aluviales, coluviales, fluviales, fluvioglaciares, morrénicos y coluvio-aluviales. Los depósitos aluviales ocupan 94 km², correspondientes al 58 % de la cobertura cuaternaria y al 15 % del territorio. Estos materiales se distribuyen principalmente en fondos de valle y terrazas fluviales. Su composición incluye gravas, arenas, limos y arcillas depositadas por procesos recientes de transporte sedimentario.

La Formación Yumagual, el Grupo Pulluicana y los depósitos cuaternarios concentran en conjunto 301 km² (47 % del territorio) y constituyen las unidades de mayor representación distrital. De ellas, los depósitos aluviales son la unidad cuaternaria dominante, lo que incrementa la presencia de materiales no consolidados en el paisaje del distrito.

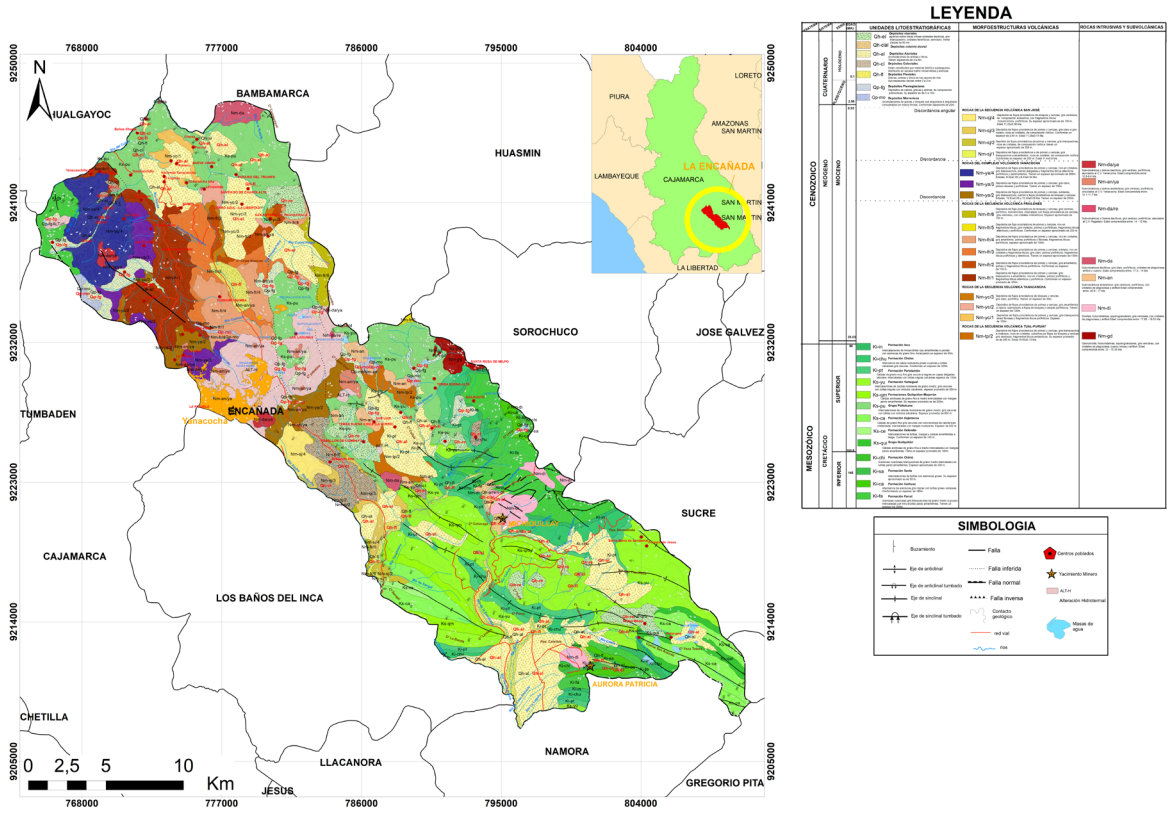


Figura 3.1.1. Mapa litoestratigráfico de La Encañada: distribución de las 44 unidades geológicas que definen la susceptibilidad erosiva del distrito.

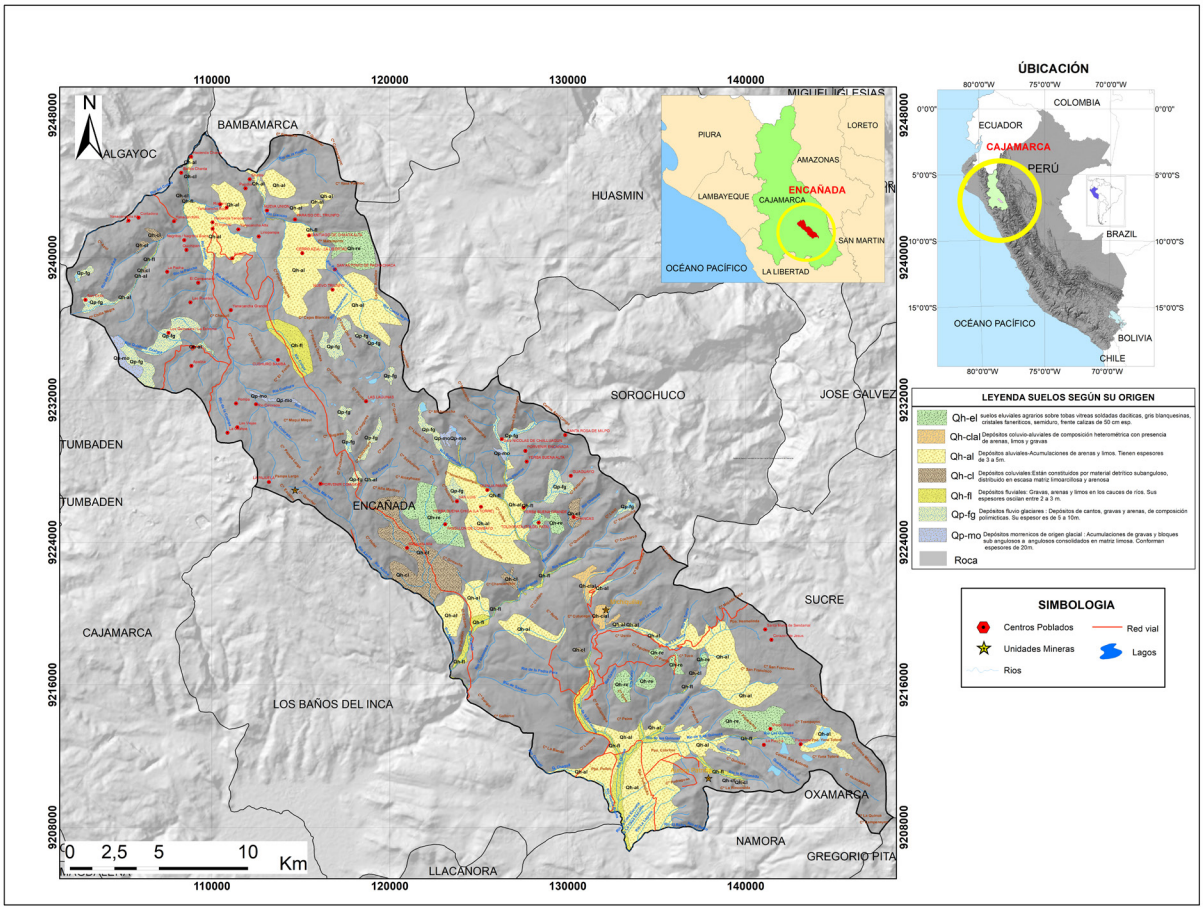


Figura 3.1.2. Distribución espacial de los suelos según su origen genético, que destaca la extensión de depósitos aluviales y coluviales vulnerables.

LEYENDA SUELOS SEGÚN SU ORIGEN

Qh-el	suelos eluviales agrarios sobre tobas vitreas soldadas daciticas, gris blanquesinas, cristales faneriticos, semiduro, frente calizas de 50 cm esp.
Qh-clal	Depósitos coluvio-aluviales de composición heterométrica con presencia de arenas, limos y gravas
Qh-al	Depósitos aluviales-Acumulaciones de arenas y limos. Tienen espesores de 3 a 5m.
Qh-cl	Depósitos coluviales:Están constituidos por material detrítico subanguloso, distribuido en escasa matriz limoarcillosa y arenosa
Qh-fl	Depósitos fluviales: Gravas, arenas y limos en los cauces de ríos. Sus espesores oscilan entre 2 a 3 m.
Qp-fg	Depósitos fluvio glaciares : Depósitos de cantos, gravas y arenas, de composición polimicticas. Su espesor es de 5 a 10m.
Qp-mo	Depósitos morrenicos de origen glacial : Acumulaciones de gravas y bloques sub angulosos a angulosos consolidados en matriz limosa. Conforman espesores de 20m.
	Roca

Figura 3.1.3. Leyenda de suelos según su origen.

La topografía condiciona la velocidad del flujo superficial y determina la capacidad del territorio para generar y transportar sedimentos. Mediante el procesamiento del modelo de elevación digital (DEM) ALOS PALSAR (12.5 m), se determinó que el 39 % de la superficie presenta pendientes superiores a 15°, lo que configura condiciones de moderada a alta susceptibilidad erosiva (Figura 3.1.4).

La distribución de pendientes se organiza en tres rangos con comportamientos hidrológicos diferenciados. El rango plano a moderado (0°–15°) abarca el 61 % del área (386 km²) y se concentra en fondos de valle y terrazas, con mayor presencia en las subcuencas Llaucano (150 km²) y Namora (126 km²), donde la velocidad del flujo disminuye y favorece la deposición de sedimentos. El rango empinado (15°–25°) representa el 28 % del territorio (180 km²) y marca el umbral a partir del cual el agua adquiere energía suficiente para iniciar la erosión laminar de la capa superficial. El rango crítico (>25°) ocupa el 11 % del área (68 km²) y se concentra principalmente en las laderas de la subcuenca Chonta (30 km²), donde la velocidad del flujo facilita la formación de surcos y cárcavas.

3.2 Uso del suelo en las últimas décadas

Durante las últimas cuatro décadas, el paisaje de La Encañada experimentó una transformación sostenida caracterizada por la sustitución progresiva de coberturas naturales por actividades agropecuarias (Figura 3.2.1).

3.2.1 Dinámica multitemporal (1986–2022)

El análisis multitemporal revela que la superficie agrícola (Agr) se expandió de 70 km² (11 %) en 1986 a 126 km² (20 %) en 2022. En contraste, la vegetación herbácea natural (Hrb), cobertura dominante del distrito, registró la reducción más importante del periodo al pasar de 491 km² (77 %) a 366 km² (58 %), equivalente a una pérdida neta de 125 km². Paralelamente, las pasturas (Pas) incrementaron su extensión de 68 km² (11 %) a 113 km² (18 %), mientras que la actividad minera (Min) alcanzó 9 km² (1 %) y el área urbana (Urb), aunque representa menos del 1 % del territorio, también mostró un crecimiento sostenido.

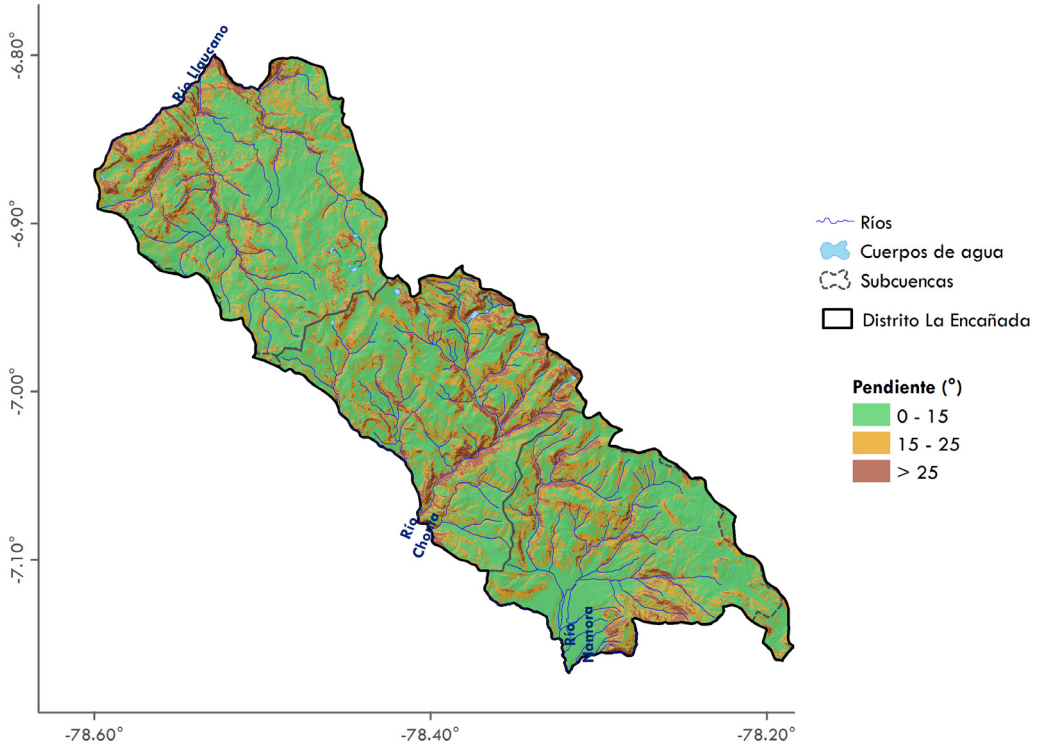


Figura 3.1.4. Mapa de pendientes de la unidad de análisis: distribución de los rangos de inclinación que condicionan el potencial erosivo y el transporte de sedimentos.

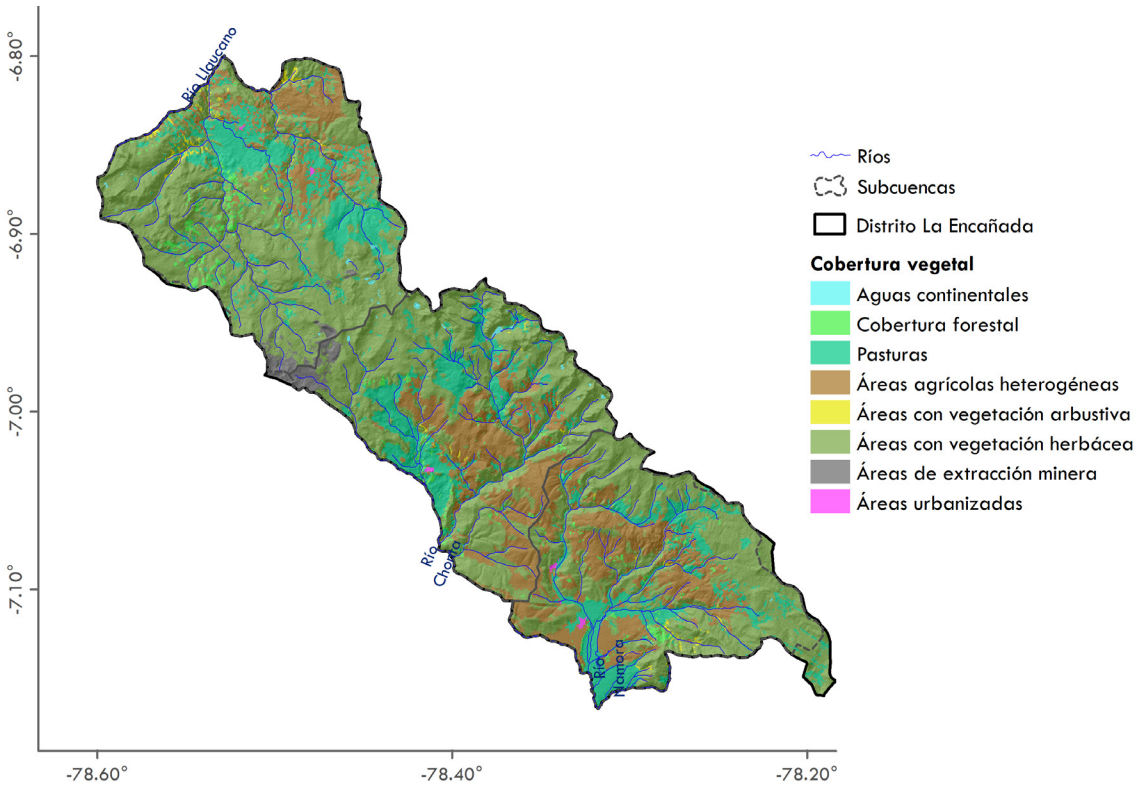


Figura 3.2.1. Distribución espacial de la cobertura vegetal y del uso del suelo en el distrito de La Encañada (año 2022).

3.2.2 Análisis comparativo por subcuencas

La intensidad de la transición paisajística no es uniforme, sino que responde a la accesibilidad y aptitud de cada unidad hídrica (Figura 3.2.2):

- Subcuenca del río Namora (escenario crítico): la superficie agrícola aumentó de 26 km² (13 %) a 54 km² (28 %), mientras que la cobertura herbácea disminuyó del 76 % al 52 %, lo que constituye la transformación agrícola más intensa entre las tres subcuencas.

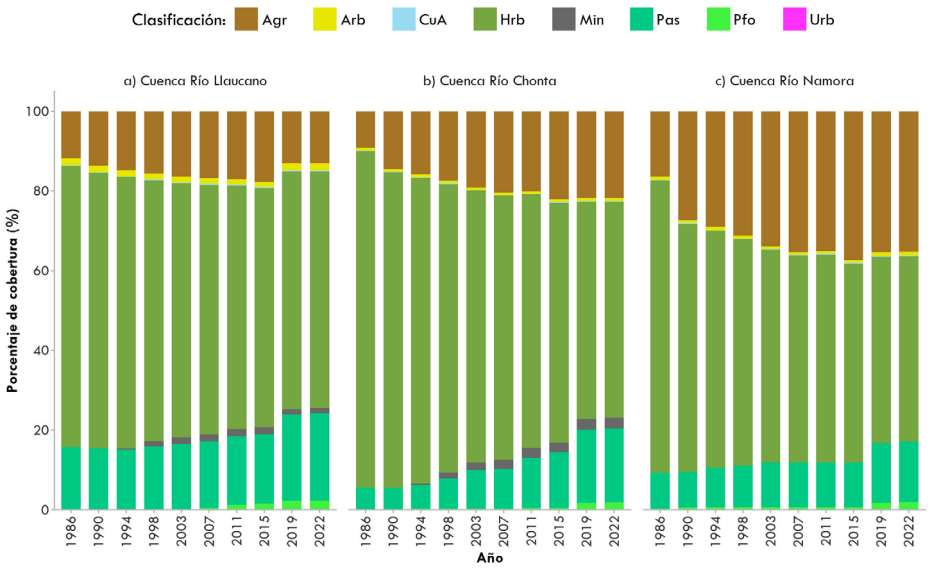


Figura 3.2.2. Evolución histórica de la cobertura vegetal (1986–2022), desglosada por unidades hidrográficas, lo que evidencia el crecimiento agrícola (Agr) y la pérdida de vegetación herbácea (Hrb).

- Subcuenca del río Chonta (transición acelerada): presenta una expansión importante de la frontera agrícola, que pasó de 21 km² (10 %) a 45 km² (22 %). Paralelamente, la vegetación herbácea se redujo del 82 % al 56 %, lo que equivale a una pérdida neta de 54 km² y a la mayor tasa de reducción de herbáceas del distrito (–0.7 puntos porcentuales/año).

- Subcuenca del río Llaucano (zona de estabilidad): mantiene la mayor proporción de cobertura herbácea del distrito, con el 64 % (151 km²) de su superficie. Aunque registra incrementos en la agricultura y las pasturas, conserva la mayor proporción de coberturas naturales del distrito.

3.2.3 Magnitud del cambio neto en coberturas críticas

El balance neto de coberturas evidencia una reducción sostenida de vegetación herbácea asociada a la expansión de usos agropecuarios. A escala distrital, la vegetación herbácea perdió 125 km² entre 1986 y 2022, mientras que la agricultura aumentó 56 km² y las pasturas 45 km². Este patrón fue más marcado en Namora y Chonta: la primera concentró la mayor expansión agrícola, mientras que la segunda registró la mayor pérdida absoluta de vegetación herbácea.

En contraste, Llaucano conservó la mayor proporción de cobertura natural remanente.

3.3 Clima e hidrología

3.3.1 Régimen de precipitación

La precipitación en el distrito de La Encañada presenta una media anual de 963 mm según el producto de precipitación grillada RAIN4PE (1981–2015), distribuida bajo un régimen estacional que define dos periodos hidrológicos clave (Figura 3.3.1):

- La temporada húmeda (octubre–abril) concentra el 84 % de la precipitación anual, con un pico en marzo de 168 mm en promedio y máximos históricos de 260 mm (percentil P_{90}).

- La temporada seca (mayo–septiembre) registra precipitaciones por debajo de 17 mm mensuales entre junio y agosto, con un mínimo en julio de 9 mm.

El contraste entre los 168 mm de marzo y los 9 mm de julio define la estacionalidad que condiciona la dinámica erosiva del distrito.

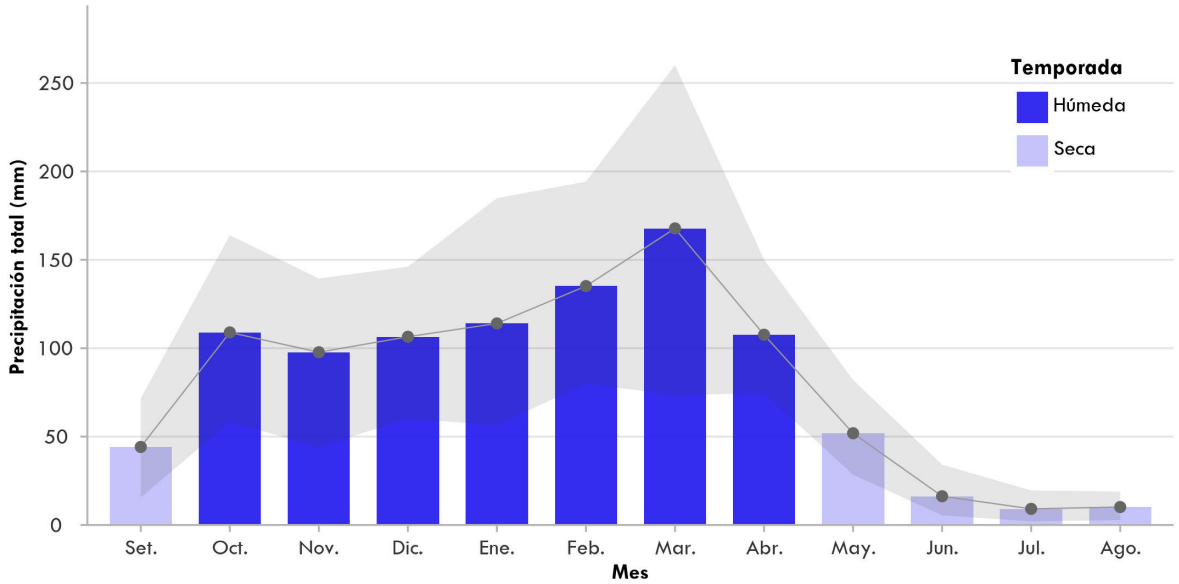


Figura 3.3.1. Distribución estacional de la precipitación mensual en el distrito de La Encañada (serie RAIN4PE). Las barras indican la media mensual (mm) y el área sombreada representa el rango de variabilidad entre los años más secos (P_{10}) y los más lluviosos (P_{90}). Fuente: elaboración propia con datos del producto RAIN4PE.

3.3.2 Distribución mensual

Durante el monitoreo meteorológico de marzo a mayo de 2023, las estaciones Cushurobamba y Sangal, instaladas por el IGP, registraron los mayores acumulados en marzo: 145 mm y 112 mm, respectivamente (Figura 3.3.2). El factor determinante no fue el volumen total, sino la humedad antecedente del suelo, que alcanzó niveles de saturación del 31 % y el 28 %, anuló la capacidad de infiltración y convirtió cada nueva lluvia en escorrentía superficial inmediata.

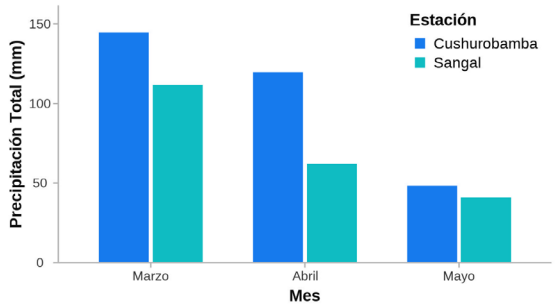


Figura 3.3.2. Precipitación total mensual registrada en las estaciones Cushurobamba y Sangal durante la campaña de monitoreo marzo-mayo de 2023.

3.3.3 Intensidad de eventos de precipitación

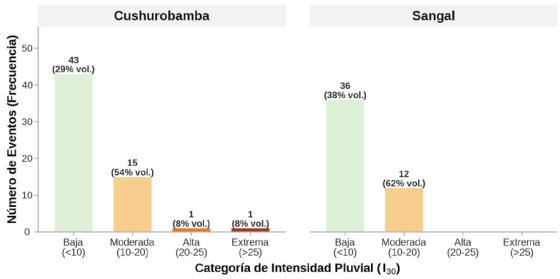


Figura 3.3.3. Clasificación de los eventos de precipitación en las estaciones Cushurobamba y Sangal según la categoría de intensidad I_{30} (mm/h). Las etiquetas indican el número de eventos y el porcentaje del volumen total de la campaña (marzo-mayo de 2023).

La erosión en el distrito no es un proceso constante, sino que responde a pulsos de energía asociados a las intensidades máximas de precipitación en 30 minutos (I_{30}). En Cushurobamba, los eventos de intensidad alta (20–25 mm/h) y extrema (>25 mm/h) concentraron el 16 % del volumen de precipitación registrado, aunque representaron solo 2 de los 60 eventos observados (3 % de la frecuencia), con una intensidad máxima de 30 mm/h. Por su parte, los eventos moderados (10–20 mm/h) concentraron el 54 % del volumen de precipitación y correspondieron a 15 de los 60 eventos registrados (25 % de la frecuencia). En Sangal, todos los eventos se distribuyeron entre las categorías baja (<10 mm/h), que concentró el 39 % del volumen de precipitación y 43 de los 55 eventos registrados (78 % de la frecuencia), y moderada (10–20 mm/h), que concentró el 62 % del volumen y 12 de los 55 eventos (22 % de la frecuencia). No se registraron eventos de intensidad alta ni extrema (Figura 3.3.3).

Los eventos de mayor erosividad siguen un ciclo diario recurrente, con picos de I_{30} concentrados a partir de las 13:00 h (Figura 3.3.4). Las tormentas vespertinas impactan sobre suelos que han recibido radiación solar durante la mañana, condición que favorece el encostramiento superficial, lo que reduce la infiltración y concentra el flujo superficial.

En Cushurobamba, la combinación de alta energía cinética y baja capacidad de absorción del suelo superó el umbral de I_{30} de 23 mm/h identificado por Borja et al. (2018) como el nivel a partir del cual se activa la movilización generalizada de sedimentos en las laderas monitoreadas.



Figura 3.3.4. Distribución horaria de la precipitación acumulada y frecuencia de ocurrencia de eventos en la estación Cushurobamba (marzo-mayo de 2023).

4. Diagnóstico de la erosión

4.1 Historia de las últimas décadas

La falta de registros históricos continuos de erosión en el Perú limita la capacidad para comprender cómo ha cambiado el territorio a largo plazo. Los trazadores radioisotópicos de Cs-137 y Pb-210ex permiten reconstruir esa historia a partir de la señal que dejan en el suelo. El Cs-137 proviene de los ensayos nucleares atmosféricos de mediados del siglo XX y permite estimar la pérdida de suelo de los últimos 60 años (1963–2023). El Pb-210ex es de origen natural y extiende la ventana temporal hasta 100 años (1923–2023). La comparación entre el inventario de cada trazador en un punto de ladera y el de un sitio de referencia no perturbado permite calcular cuánto suelo se ha redistribuido.

4.1.1 Validación científica: ¿cuán confiable es nuestro registro histórico?

a. Diseño de muestreo

Se seleccionaron ocho laderas representativas (T1 a T8), que abarcaron las coberturas dominantes del distrito. En cada ladera se estableció un transecto lineal en dirección de la pendiente, con puntos de muestreo en las posiciones alta, media y baja, para caracterizar el gradiente de redistribución a lo largo de la pendiente (Figura 4.1.1). Además, se muestrearon puntos independientes distribuidos en el distrito para registrar la variabilidad espacial bajo distintas coberturas del suelo.

En total, se recolectaron 102 testigos de suelo mediante un muestreador cilíndrico de 8 cm de diámetro, hasta una profundidad de 20 cm. Ambos trazadores se midieron mediante espectrometría

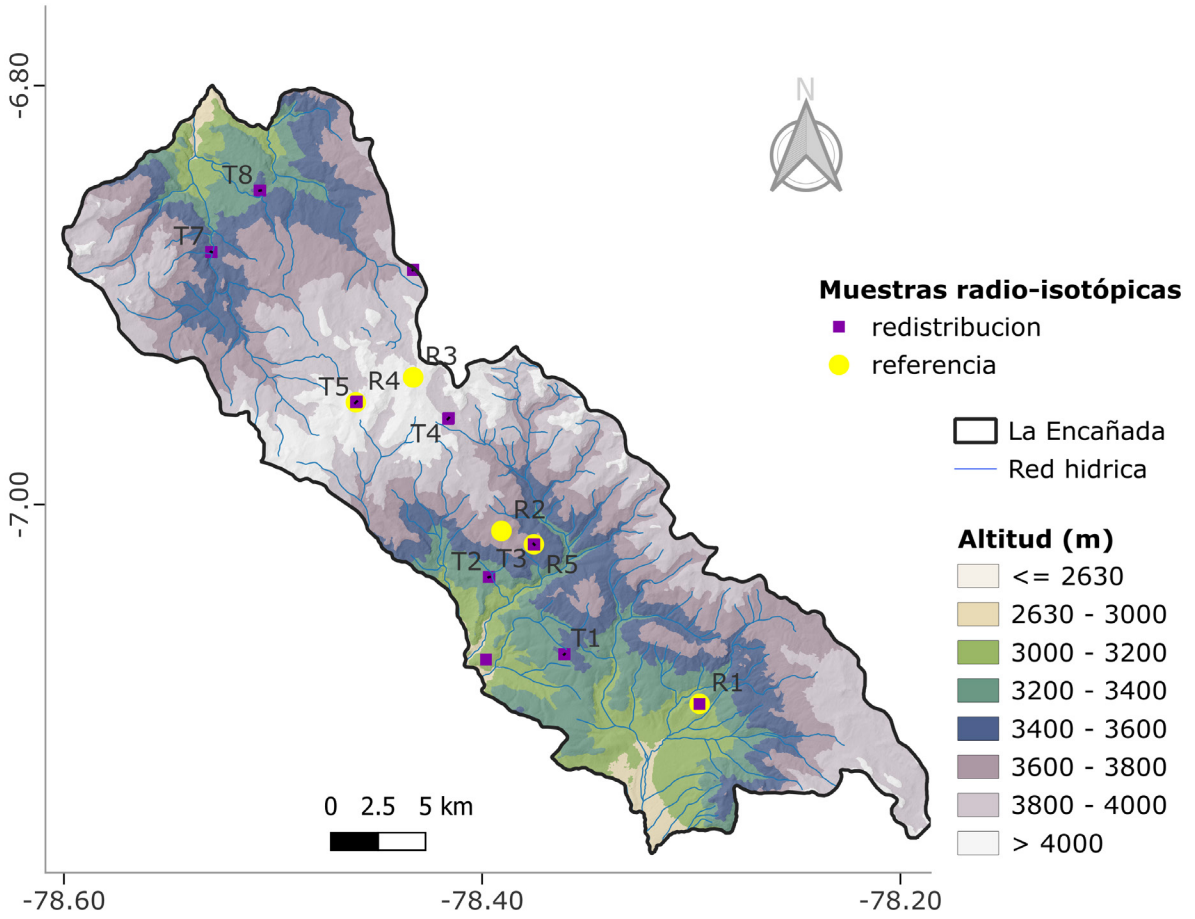


Figura 4.1.1. Distribución espacial de los sitios de muestreo radioisotópico en el distrito de La Encañada.

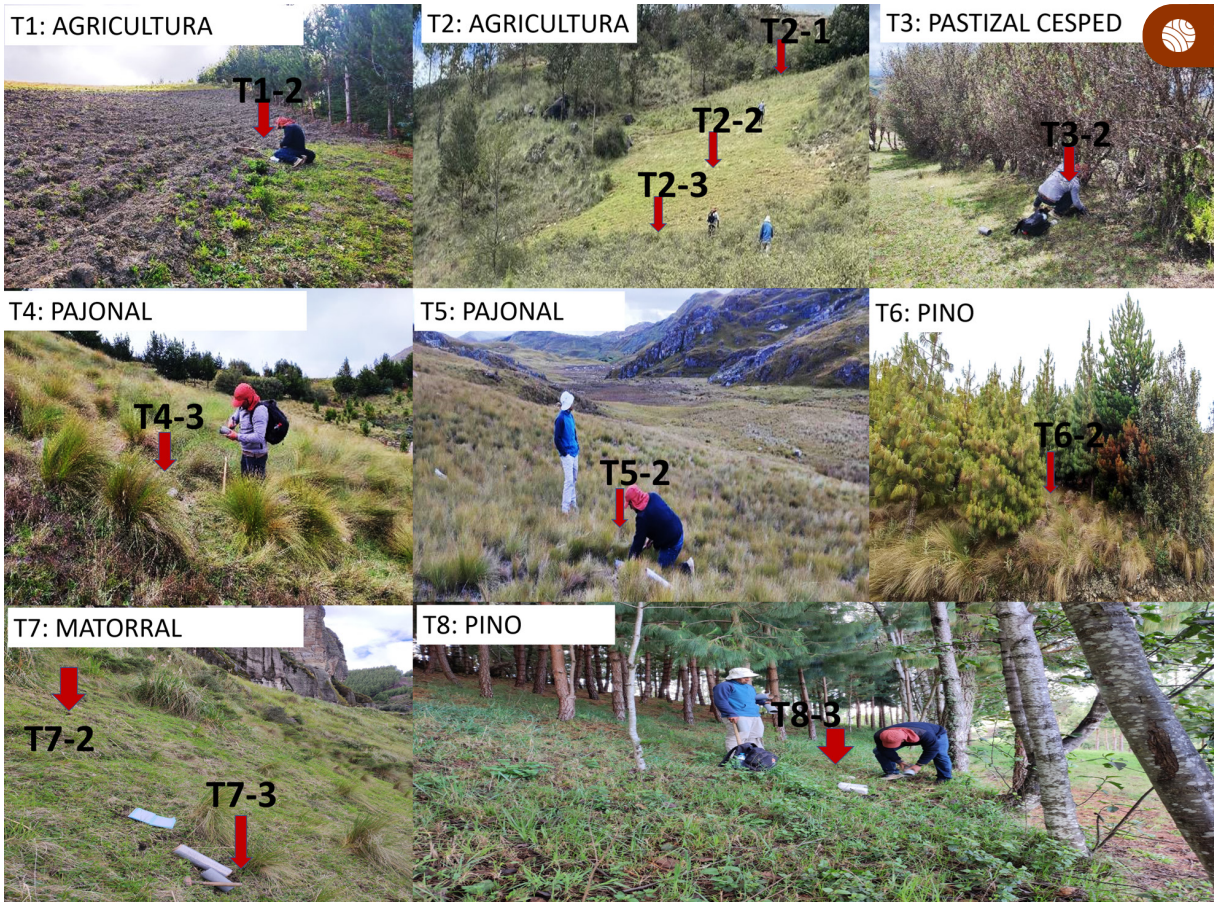


Figura 4.1.2. Evidencia fotográfica del muestreo en las diversas coberturas del distrito.

gamma. El Cs-137 se detectó en 42 muestras (43 %); en las 60 restantes, la actividad quedó por debajo del límite de detección (LD = 0.1 Bq kg^{-1}, según Currie (1968), con un nivel de confianza del 95 %). El Pb-210ex se detectó en 86 muestras (87 %). Las muestras con valores por debajo del LD fueron excluidas del análisis de redistribución.

b. Validación de los sitios de referencia

Se identificaron cinco sitios de referencia (R1 a R5) en áreas planas y con mínima intervención humana. En todos los sitios, el inventario fue mayor en la capa superficial y disminuyó exponencialmente hasta los 15 cm (Figura 4.1.3). Los coeficientes de variación se mantuvieron por debajo del umbral del 30 % recomendado en la literatura (Cs-137: 18 %; Pb-210ex: 28 %), lo que respalda la estabilidad espacial de ambos trazadores.

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

Las tasas de redistribución del suelo se calcularon mediante la comparación del inventario medido en cada punto con el inventario de referencia validado. Para el Cs-137, se aplicó el modelo de balance de masas de Soto y Navas (2004, 2008); para el Pb-210ex, se empleó el modelo de balance de masas en sitios agrícolas y el de migración-difusión en coberturas naturales.

La tasa de erosión de los suelos agrícolas en los últimos 60 años (33 t/ha/año, Cs-137) supera en un 74 % el promedio de los últimos 100 años (19 t/ha/año, Pb-210ex). En cambio, los suelos bajo coberturas naturales presentan tasas de entre 1 y 3 t/ha/año, lo que confirma que su función de conservación se ha mantenido estable durante al menos 100 años.

En un punto de muestreo independiente, bajo una

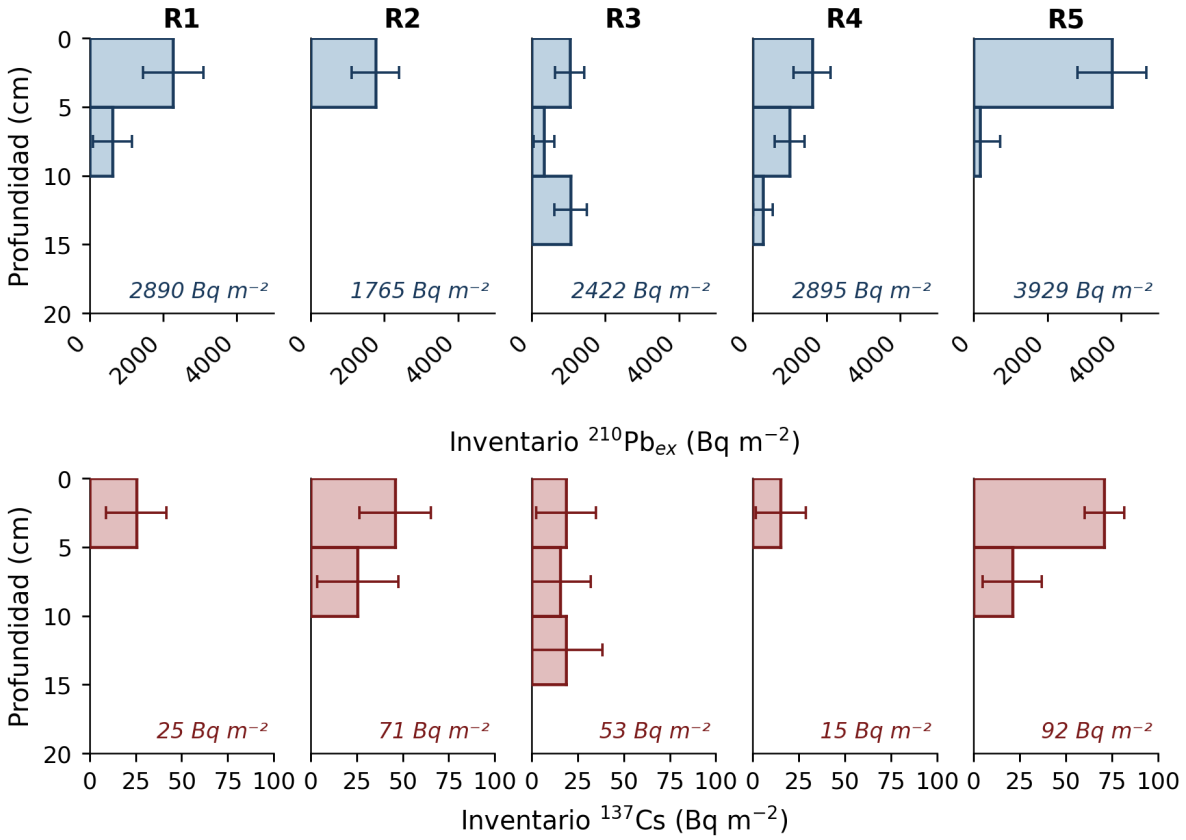


Figura 4.1.3. Distribución de Pb-210ex y Cs-137 en los perfiles de suelo de los sitios de referencia R1–R5.

condición de suelo desnudo, las tasas alcanzaron 55 t/ha/año (Cs-137) y 43 t/ha/año (Pb-210ex). Este valor proviene de una observación única (n = 1) y, por lo tanto, no posee representatividad estadística; sin embargo, se reporta como referencia indicativa del escenario de máxima vulnerabilidad ante la ausencia total de cobertura vegetal.

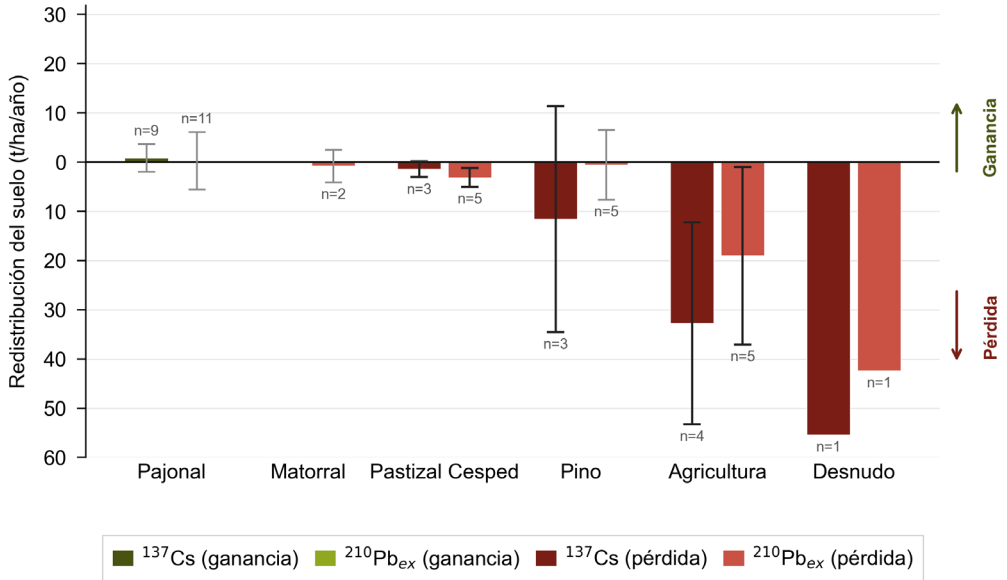


Figura 4.1.4. Balance de redistribución del suelo según la cobertura vegetal. Las barras de error indican la desviación estándar asociada a cada cobertura del suelo.

4.1.3 Movimiento histórico del suelo a escala de ladera

Para comprender el movimiento histórico del suelo a lo largo de las laderas (T1 a T8), se analizaron los perfiles de profundidad de ambos radioisótopos (Figura 4.1.5). El Cs-137 se depositó una sola vez (1953–1987); por ello, su ausencia es irreversible. El Pb-210ex, en cambio, se deposita anualmente con la precipitación y conserva su señal en la mayoría de los puntos.

En los transectos agrícolas (T1 y T2), la labranza eliminó completamente el Cs-137 en los primeros 20 cm, lo que evidencia la remoción del horizonte superficial original durante las últimas décadas (Figura 4.1.5). Ambos trazadores indican que las laderas están dominadas por la erosión neta (relación de entrega de sedimentos, SDR = 1), con tasas promedio de 14 y 16 t/ha/año (Cs-137 y Pb-210ex, respectivamente) en T1, y de 44 y 21 t/ha/año en T2 (Figura 4.1.6).

En los transectos de pajonal (T4–T5) y pastizal césped (T3), ambos trazadores conservan inventarios cercanos al valor de referencia, lo que refleja la capacidad de la vegetación nativa para retener el suelo, incluso en pendientes superiores a 20°. En T3, sometido a pastoreo ganadero, el

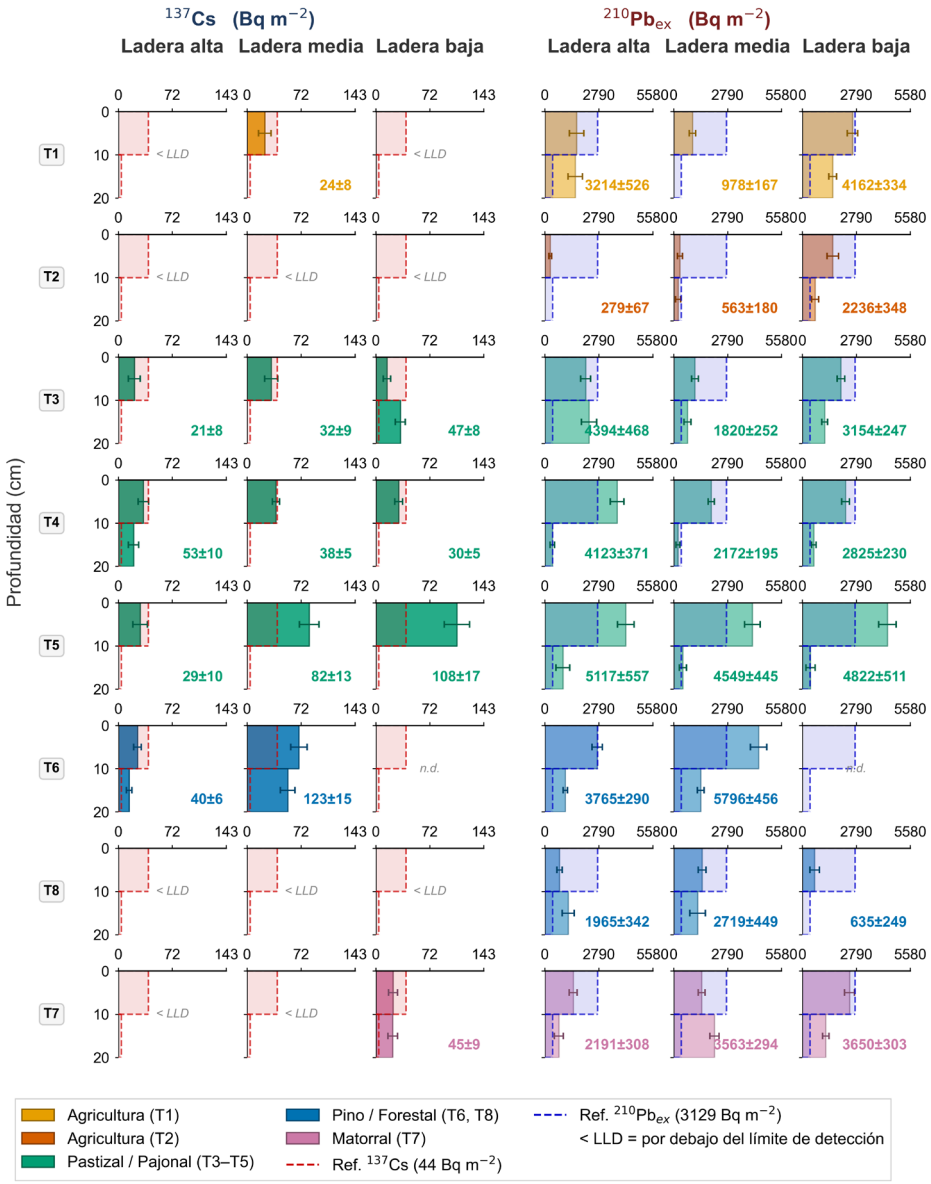


Figura 4.1.5. Inventarios de Cs-137 y Pb-210ex (Bq/m²) por perfil de suelo en transectos de ladera alta, media y baja. El valor al pie = total ± incertidumbre. Líneas discontinuas: distribución esperada si no hubiera erosión ni acumulación. <LLD = señal por debajo del límite de detección; n.d. = no muestreado.

Pb-210ex registra una erosión promedio mayor (5 t/ha/año) que el Cs-137 (3 t/ha/año), con SDR = 0.8 en ambos periodos. En contraste, T4 y T5 funcionan como sumideros netos de sedimento (SDR = 0), e incluso T5 registra una acumulación de entre 3 y 6 t/ha/año, según el trazador, en la parte baja.

En los transectos de pino (T6 y T8), el comportamiento difiere según la madurez del bosque. T6 funciona como sumidero neto de sedimento a lo largo de toda la ladera (SDR = 0), con una deposición de 7 t/ha/año (Pb-210ex) y 4 t/ha/año (Cs-137), comparable a la del pajonal nativo. En T8, el Cs-137 no fue detectado en ningún punto del transecto, lo que evidencia una remoción severa del horizonte superficial original, posiblemente asociada a la perturbación durante la plantación; en consecuencia, solo el Pb-210ex registra una erosión promedio de 7 t/ha/año, con SDR = 0.5.

En el matorral (T7), aunque la pendiente media es de 33°, las tasas de erosión se mantienen bajas (2 t/ha/año).

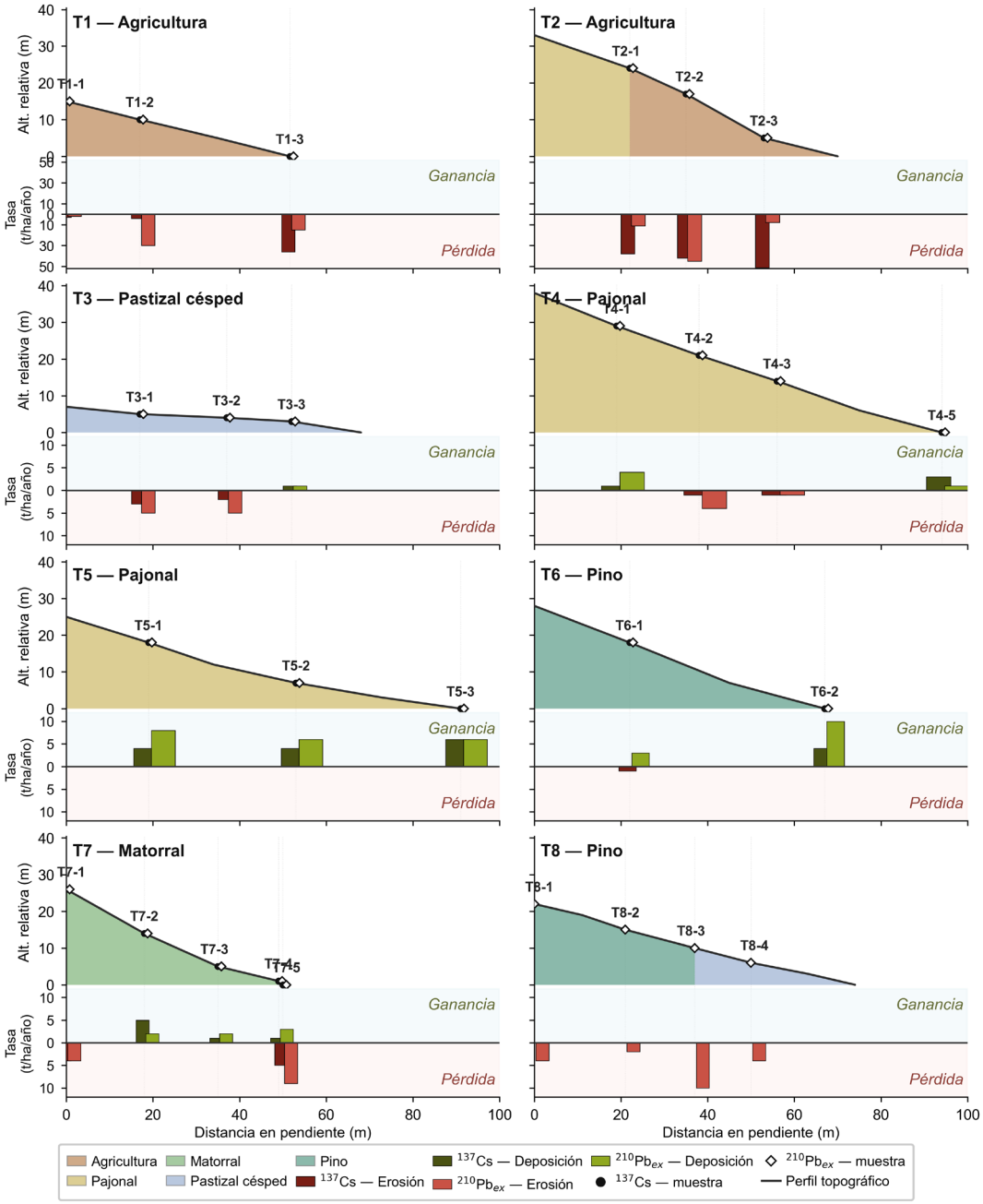


Figura 4.1.6. Perfiles topográficos y tasas de redistribución del suelo (t/ha/año) por punto de muestreo en los ocho transectos T1–T8. Las barras superiores indican deposición (ganancia) y las inferiores, erosión (pérdida), según el Cs-137 y el Pb-210ex.

4.1.4 Factores que controlan la erosión histórica a escala de ladera

Según la prueba de Kruskal-Wallis, la cobertura vegetal es el único factor con significancia estadística al nivel $\alpha = 0.10$ ($H = 6.58$, $p = 0.07$, $\eta^2 = 0.33$). Ninguna variable topográfica individual, como la pendiente, el factor LS, el índice de potencia de flujo (SPI) o el índice de humedad topográfica (TWI), mostró una correlación significativa con las tasas (Spearman, todos los valores de $p > 0.10$ en ambos trazadores).

La topografía influye únicamente cuando se ha removido la cobertura vegetal; en los suelos protegidos, la vegetación neutraliza este efecto y mantiene tasas de redistribución mínimas, independientemente de la inclinación del terreno. En las laderas agrícolas, por ejemplo, T2 (26°) duplica la tasa de erosión de T1 (15°), lo que evidencia un control topográfico activo cuando el suelo carece de protección vegetal. En contraste, los transectos bajo pajonal (T4–T5) y bosque (T6) no registran una pérdida neta, incluso en pendientes superiores a 20°.

4.2 Dinámica y monitoreo de la erosión actual

El monitoreo de 30 microparcelas de escorrentía (1 m²), realizado en 2023, permitió cuantificar la pérdida de suelo bajo las condiciones climáticas y de cobertura actuales del distrito. Las parcelas se desplegaron en las subcuencas Llaucano y Chonta, en laderas con pendientes de 8° a 23°, y abarcaron las coberturas y los usos dominantes. Durante el periodo de monitoreo, marzo fue el mes crítico: la humedad del suelo alcanzó el 31 %, anuló la infiltración y convirtió cada lluvia en escorrentía inmediata.

4.2.1 Pérdida de suelo por tipo de cobertura

La pérdida de suelo difiere según el tipo de cobertura, con medianas que abarcan desde 0.4 g/m² en quinual hasta 7 g/m² en zonas de pastoreo:

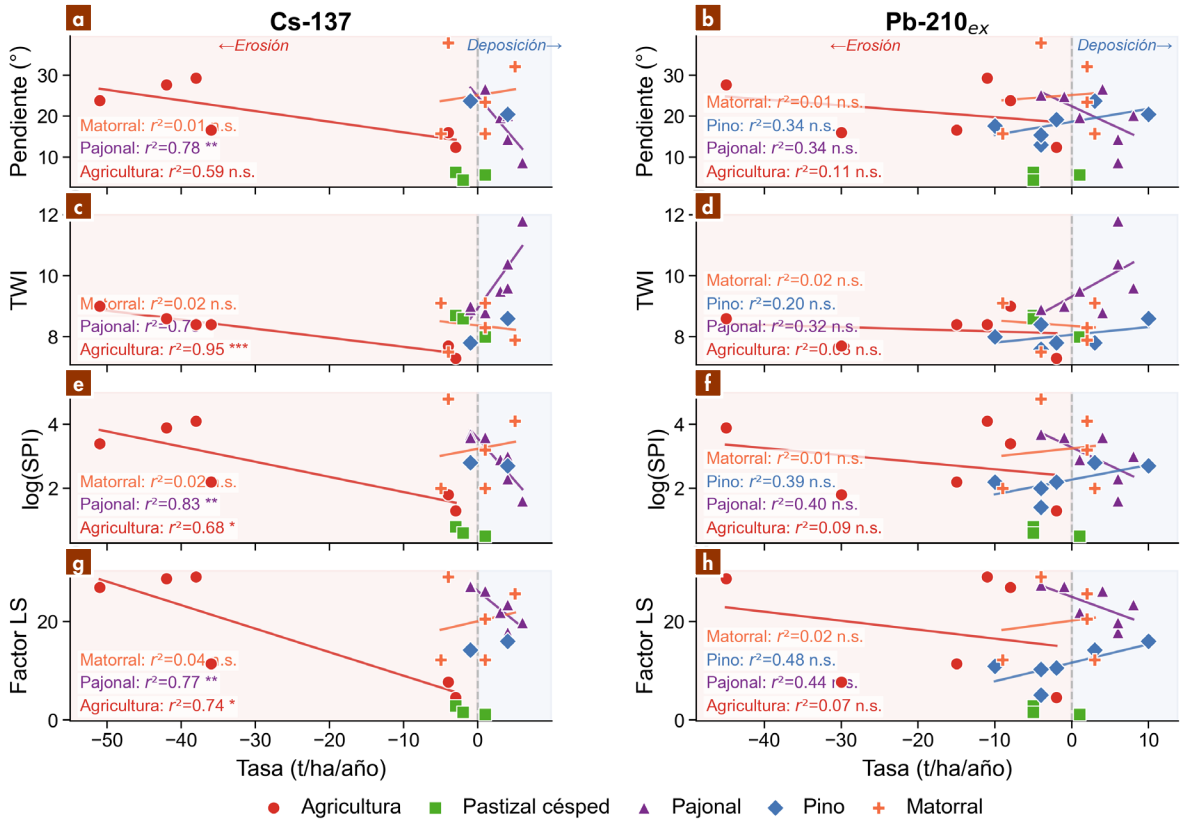


Figura 4.1.7. Relación entre las tasas de erosión y deposición estimadas con Cs-137 y Pb-210ex y cuatro variables topográficas: pendiente (a, b), TWI (c, d), log(SPI) (e, f) y factor LS (g, h). La zona sombreada en rojo indica erosión y la azul, deposición. La línea negra corresponde a la regresión lineal global.

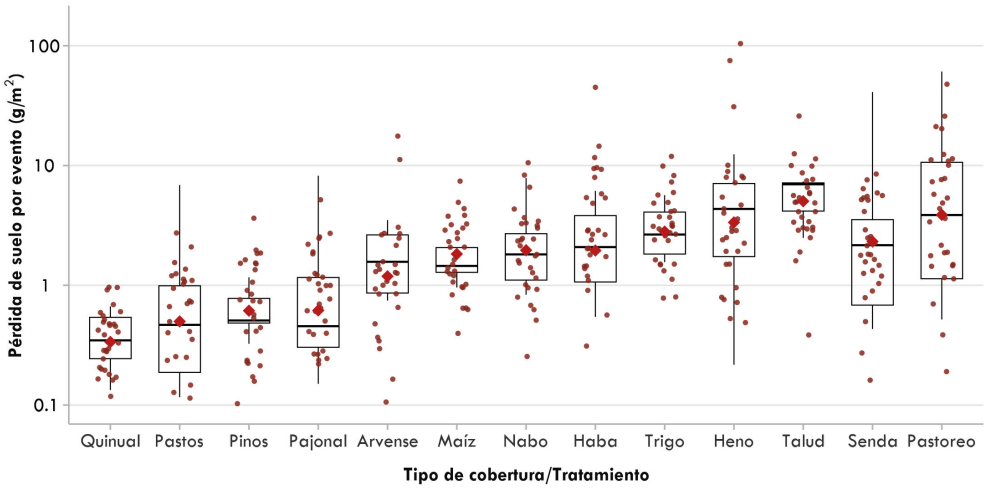


Figura 4.2.1. Variabilidad de la pérdida de suelo (g/m²) por evento de precipitación según el tipo de cobertura y tratamiento.

- **Coberturas degradadas:** las zonas de pastoreo registraron la mediana más alta (7 g/m²), con un máximo de 61 g/m² en un solo evento; los taludes de carretera alcanzaron 4 g/m².

- **Coberturas protectoras:** el bosque de quinual (0.4 g/m²) y el ichu pajonal (0.5 g/m²) mantuvieron pérdidas mínimas, incluso durante eventos de categoría alta y extrema (I_{30} > 20 mm/h; capítulo 3.3.3).

4.2.2 Poder erosivo de la lluvia

La extrapolación a tasas anuales permite dimensionar la magnitud del proceso frente al umbral de tolerancia de pérdida de suelo de 10 t/ha/año (Borrelli et al., 2017). En La Encañada, la mayoría de los usos bajo intervención humana superan este límite (Figura 4.2.2).

Las tasas más elevadas corresponden al pastoreo (68 t/ha/año), las sendas de herradura (67 t/ha/año) y los taludes de carretera (62 t/ha/año), que superan el umbral entre seis y siete veces. Entre los cultivos, el trigo (30 t/ha/año), el haba (25 t/ha/año), el maíz (24 t/ha/año) y el nabo (23 t/ha/año) presentan pérdidas que multiplican entre dos y tres veces el límite de tolerancia, debido a la escasa cobertura basal al inicio de la temporada húmeda. El heno (48 t/ha/año) ocupa una posición intermedia, con tasas comparables a las de los usos más degradados.

En el extremo opuesto, el bosque de quinual (4 t/ha/año) y el pajonal (9 t/ha/año) son las únicas coberturas por debajo del umbral; la plantación de pino (10 t/ha/año) lo alcanza, pero no lo supera.

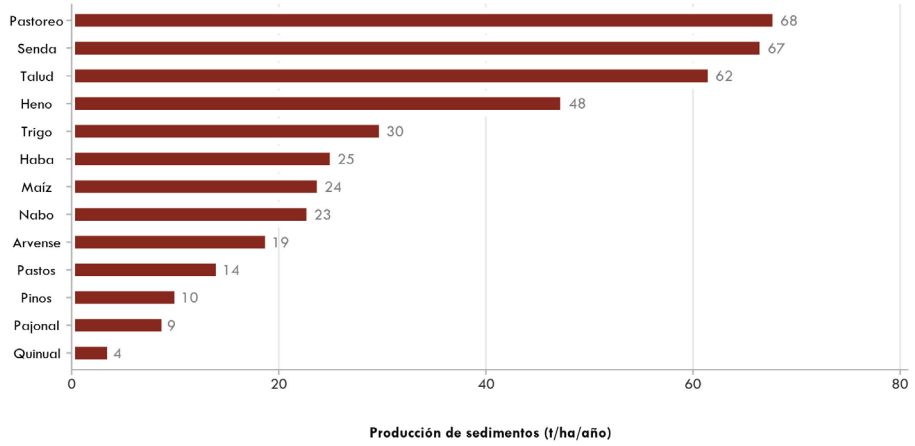


Figura 4.2.2. Producción de sedimentos anualizada (t/ha/año) estimada para el distrito de La Encañada.

4.2.3 Factores aceleradores de la erosión

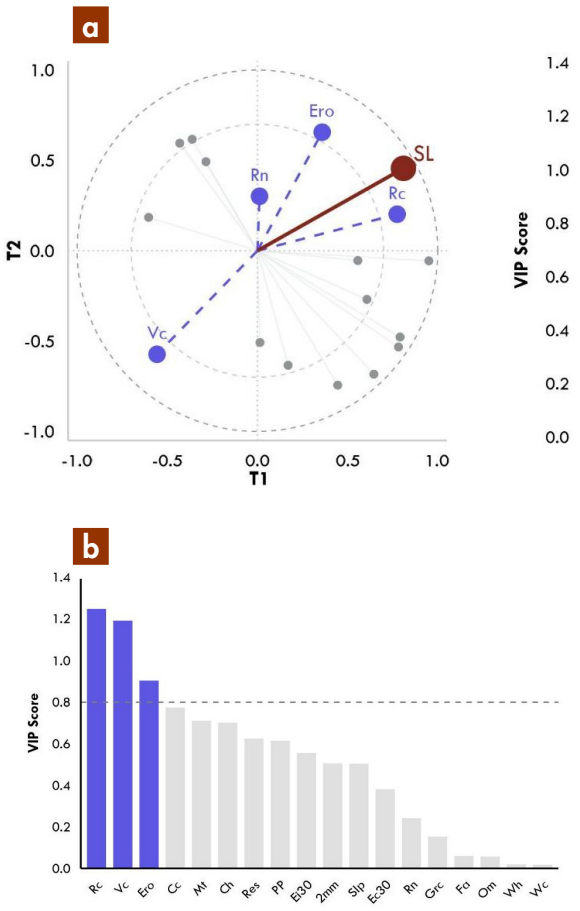


Figura 4.2.3. Análisis multivariado de los motores de la erosión: a) relación entre las variables hidrológicas; b) importancia de cada factor en la degradación del suelo.

Para identificar los factores que controlan la pérdida de suelo, se aplicó un análisis de regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS-R), que jerarquiza las variables según su influencia real sobre la erosión (Figura 4.2.3). El análisis vectorial (biplot) muestra una alineación directa entre la pérdida de suelo y el volumen de escorrentía, lo que confirma que la erosión está controlada por la capacidad de transporte del agua y no por la disponibilidad de sedimento suelto. El análisis de importancia de las variables (VIP) identifica tres factores por encima del umbral de significancia (VIP > 0.8):

- **Coeficiente de escorrentía (Rc):** principal motor de transporte; determina el volumen de agua que fluye sobre la superficie sin infiltrarse.
- **Cobertura vegetal (Vc):** único factor de control negativo eficaz; su incremento es la única variable de manejo capaz de reducir la pérdida de suelo de forma directa.
- **Costras de erosión (Ero):** el sellado superficial reduce la rugosidad e incrementa la velocidad del flujo, lo que amplifica el transporte de sedimentos.

La integración de estos factores permitió ajustar el modelo de erosión en terrazas y transporte de sedimentos (TEST), con valores de R^2 = 0.8 y NSE = 0.6 (eficiencia de Nash-Sutcliffe). La formulación resultante para La Encañada es la siguiente:

$$\text{Log(SL)} = -2.72 + 0.90\ \text{Log(E·Rc)} + 0.70\ \text{Ero} - 0.80\ \text{Vc}$$

El coeficiente de la cobertura vegetal (–0.80) es el único término negativo de la ecuación, lo que confirma que incrementar la cobertura es la única variable de manejo capaz de contrarrestar el efecto combinado de la energía cinética de la lluvia y la escorrentía. El modelo presenta mayor precisión en eventos de magnitud media y alta, que concentran la mayor proporción de la pérdida anual de suelo (Figura 4.2.4). La pérdida de suelo cuantificada en las microparcelas representa el inicio del proceso: una vez desprendidas, las partículas inician su tránsito hacia la red de drenaje, dinámica que se analiza en el capítulo 5.

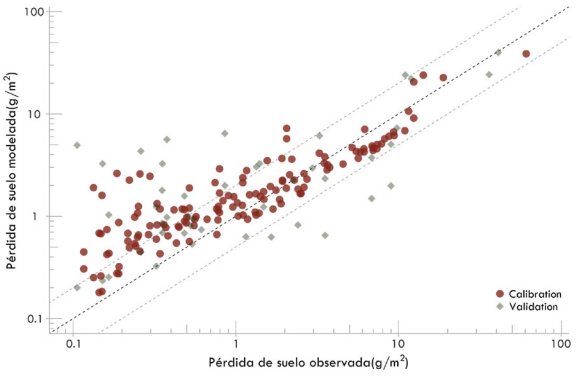


Figura 4.2.4. Validación del modelo TEST: correlación entre la pérdida de suelo observada y la predicha por el modelo.

5. Procedencia y dinámica de los sedimentos

5.1 Caracterización de los sedimentos

El comportamiento de los sedimentos en suspensión registrado en la estación hidrosedimentológica Llaucano estuvo asociado a eventos puntuales de crecida, que generaron incrementos abruptos en la concentración y carga sedimentaria. El monitoreo desarrollado entre febrero y junio de 2023 permitió caracterizar los procesos de movilización y transporte de sedimentos en la cuenca alta del río Llaucano.

5.1.1 Dinámica temporal y eventos de carga crítica

Durante el periodo de estudio, la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) presentó una media de 180 mg/L y una mediana de 20 mg/L, y alcanzó un valor máximo de 2570 mg/L. La diferencia entre la media y la mediana evidencia una distribución altamente asimétrica, en la que una fracción reducida de eventos concentra la mayor parte de la carga sedimentaria (Figura 5.1.1a). La curva acumulada muestra que aproximadamente el 10 % de las observaciones representa cerca del 60 % de la carga total, mientras que el 20 % concentra alrededor del 84 % (Figura 5.1.1b).

El análisis de percentiles muestra que el P95 (770 mg/L) define el umbral de las crecidas sedimentarias (Figura 5.1.1a). Bajo este criterio, aproximadamente el 5 % de las observaciones concentra los eventos de mayor magnitud del sistema. Estos eventos ocurrieron principalmente durante marzo y coincidieron con condiciones de alta saturación del suelo y mayor activación hidrosedimentológica (capítulo 3.3.2).

Las concentraciones extremas (>2000 mg/L) representan los máximos pulsos de transporte registrados en el sistema. Durante estos eventos, el río Llaucano alcanzó cargas instantáneas cercanas a 25 kg/s, mientras que, durante los periodos de recesión hidrológica, las cargas permanecieron alrededor de 0.05 kg/s. La dinámica sedimentaria del río Llaucano está dominada por pulsos de corta duración y alta magnitud, mientras que durante gran parte del periodo predominan concentraciones relativamente bajas y estables.

5.1.2 Relación caudal-concentración de sedimentos en suspensión

La relación entre el caudal (Q) y la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) en la estación Llaucano evidencia una asociación positiva, en la que los mayores niveles de transporte ocurren

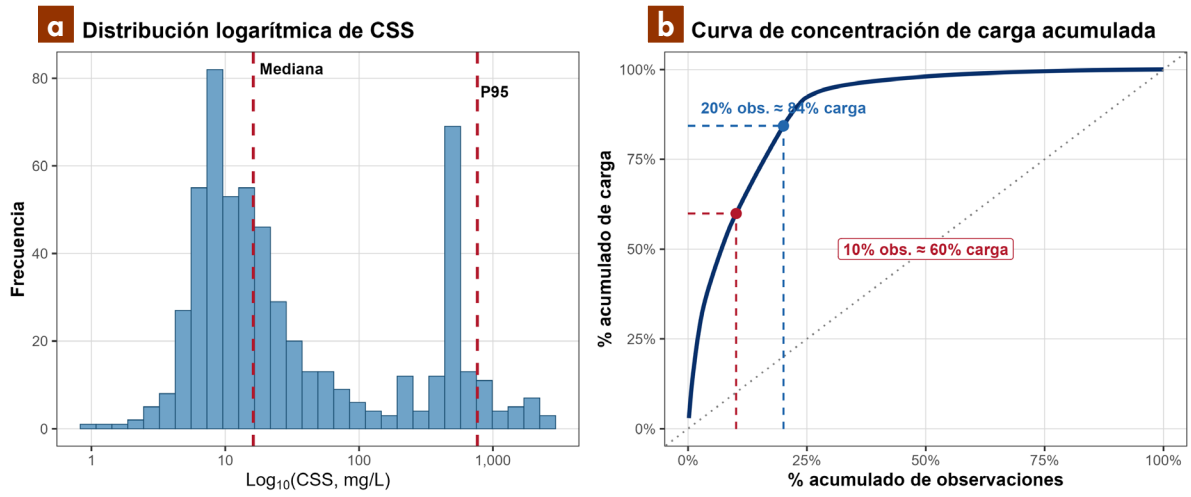


Figura 5.1.1. Monitoreo de la concentración de sedimentos en suspensión en la estación Llaucano, río Llaucano: a) distribución logarítmica de la CSS y b) curva de concentración de carga acumulada.

durante las crecidas (Q > 10 m³/s). Sin embargo, la dispersión observada entre 3 y 10 m³/s indica que, para caudales similares, las concentraciones pueden variar entre <10 y >500 mg/L, lo que evidencia un control por la disponibilidad de sedimentos y no únicamente por el forzamiento hidráulico (Figura 5.1.2, panel B). Al analizar la cronología de los eventos, se observa un proceso de agotamiento de sedimentos:

- Durante marzo, el sistema registra las concentraciones más elevadas de sedimentos, que alcanzan aproximadamente entre 1000 y 2500 mg/L bajo caudales medios y altos. Estos eventos coinciden con periodos de mayor activación hidrosedimentológica y conectividad entre las laderas y la red de drenaje (capítulo 4).

- Hacia mayo y junio, a pesar de presentarse pulsos moderados de caudal (4–8 m³/s), las concentraciones disminuyen, por lo general, a valores inferiores a 50 mg/L (Figura 5.1.2, panel A). Este comportamiento evidencia una menor disponibilidad de sedimentos fácilmente movilizables hacia el final de la temporada húmeda.

Tras los eventos críticos de inicio de año, las fuentes de sedimento disponibles en los cauces y laderas cercanas se reducen o estabilizan conforme avanza la temporada. El río Llaucano actúa así como un sistema de transporte limitado por el suministro de material: la mayor carga se moviliza en pulsos rápidos al inicio de la época húmeda, mientras que hacia el final de la temporada el sistema mantiene concentraciones bajas (<0.05 g/L) y una contribución marginal a la carga total.

5.2 Zonas críticas de aporte de sedimentos

La identificación de los aportes de sedimentos en los cauces de los ríos se desarrolló mediante el enfoque de la geología forense, disciplina que permite reconstruir la procedencia de los materiales sólidos que ingresan al sistema fluvial mediante el uso de trazadores naturales.

Bajo este enfoque, el estudio se desarrolló en un área de 849 km² que comprende las cuencas

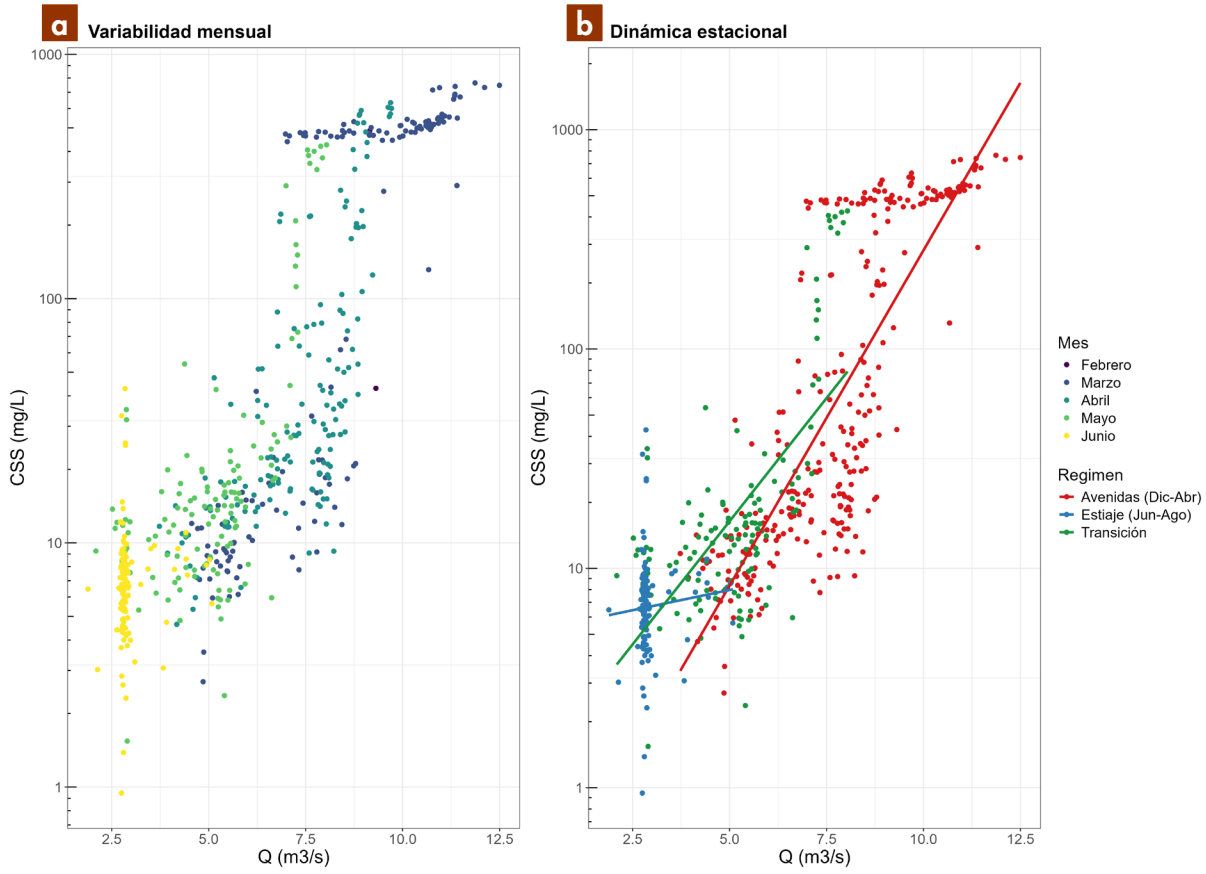


Figura 5.1.2. Análisis de la relación caudal-CSS y variabilidad estacional del transporte de sedimentos en la estación Llaucano.

Llaucano (312 km²), Chonta (283 km²) y Namora (254 km²), e incluye el distrito de La Encañada. Dado que los procesos de erosión, transporte y deposición de sedimentos se desarrollan a escala de cuenca, su evaluación requiere considerar la dinámica integral de estos sistemas hidrográficos. Para ello, se emplearon como trazadores las propiedades colorimétricas del suelo y el contenido de carbono orgánico (CO), que permiten diferenciar las fuentes de origen y cuantificar su contribución relativa a la mezcla de sedimentos fluviales.

5.2.1 Clasificación y agrupamiento de fuentes de sedimentos

La predominancia de lutitas y materiales finos en la configuración geológica del distrito (capítulo 3.1.1) favorece la generación y movilización de sedimentos hacia los cauces cuando se remueve la cobertura vegetal. En este contexto, se establecieron cuatro conjuntos representativos de fuentes según la cobertura y el uso del suelo (Figura 5.2.1).

- **Bosques:** suelos bajo plantaciones forestales con elevado contenido de materia orgánica (>4 %).
- **Naturales:** suelos con cobertura de pastizales nativos (pajonales) y arbustos.
- **Agrícolas:** suelos destinados a cultivos permanentes y transitorios (p. ej., maíz y haba), caracterizados por distintos grados de exposición.
- **Expuestos:** áreas degradadas con escasa cobertura vegetal, como cárcavas, bancos de ríos, quebradas, caminos rurales y laderas desnudas.

5.2.2 Cuantificación del aporte de sedimentos en sistemas fluviales

El análisis de las cabeceras de las cuencas Llaucano, Chonta y Namora evidencia procesos activos de erosión y aporte de sedimentos desde distintas fuentes del suelo. Como se muestra en la Figura 5.2.2, los aportes de sedimentos presentan una distribución jerárquica influenciada principalmente por la pendiente y la conectividad hídrica:

a. Dinámica de la fuente primaria de sedimento

En las tres subcuencas, el sedimento predominante proviene de los suelos expuestos, con contribuciones críticas que alcanzan el 67 % en Llaucano, 65 % en Chonta y 66 % en Namora. La mayoría de estas fuentes se localizan en áreas donde los procesos de erosión en cárcavas y surcos mantienen una conexión directa con los cauces, lo que facilita el transporte de sedimentos hacia los ríos.

b. Dinámica de las fuentes secundarias de sedimento

La procedencia del sedimento restante revela una diferenciación marcada por el uso predominante y el estado de conservación de cada subcuenca:

- **Subcuencas Llaucano y Namora:** los suelos agrícolas constituyen la segunda fuente principal de sedimentos, con aportes del 26 % y el 25 %, respectivamente. Este comportamiento se debe a la cercanía de las parcelas de cultivo a los cauces, lo que reduce el efecto de amortiguamiento natural y favorece el ingreso directo de partículas al agua.



Figura 5.2.1. Catálogo visual de fuentes de sedimento: a) bosques forestales; b) áreas naturales de pajonal; c) áreas agrícolas; d) suelos expuestos y cárcavas.

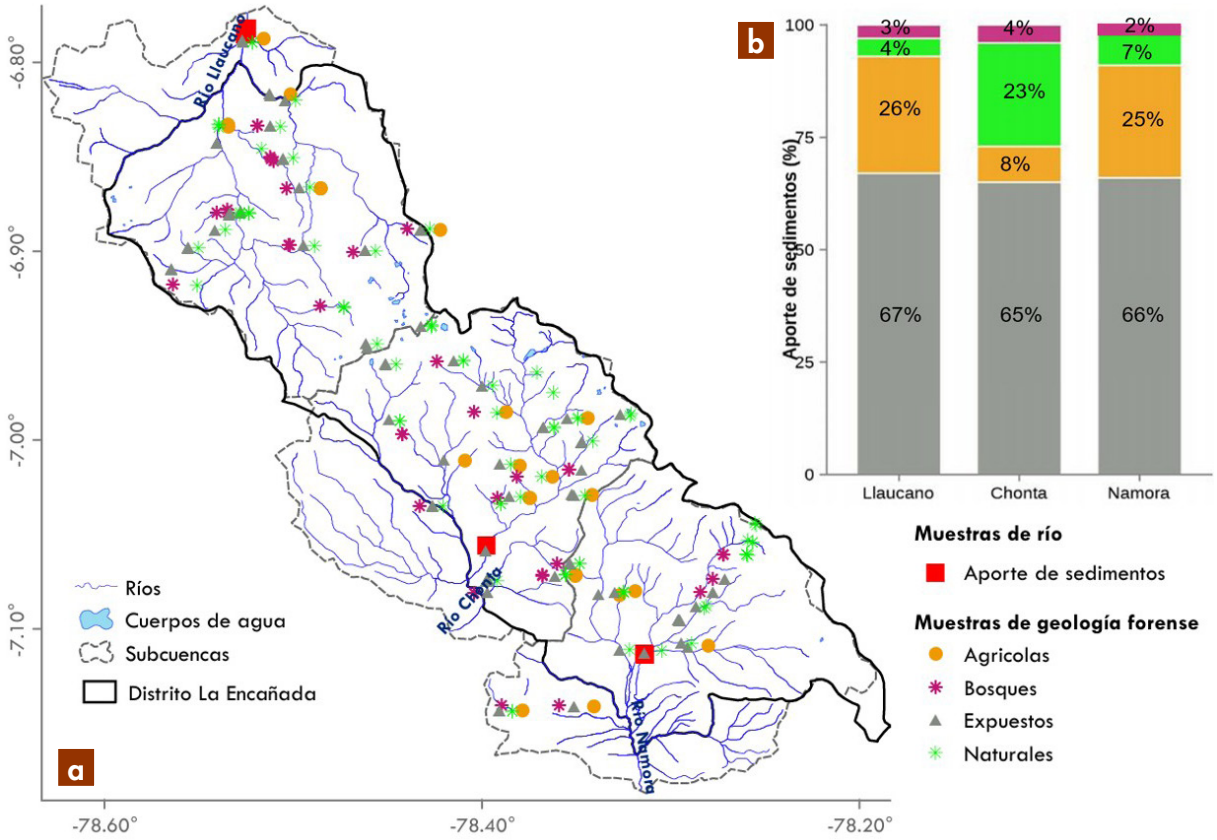


Figura 5.2.2. Diagnóstico de la procedencia de los sedimentos: a) localización de los puntos de mezcla y conectividad hídrica; b) análisis comparativo de los aportes porcentuales de sedimentos por subcuenca.

- **Subcuenca Chonta:** en contraste, la contribución secundaria de sedimentos en esta cuenca proviene de los suelos naturales (23 %), lo que sugiere que procesos como el sobrepastoreo y las quemas recurrentes han reducido la capacidad de retención de los pajonales y han favorecido su aporte de sedimentos a los cauces.

A nivel distrital, la cobertura forestal registra los aportes más bajos (2–4 %) y valores de CO superiores al 10 % (Figura 5.2.3), lo que confirma su función como barrera efectiva contra la exportación de sedimentos.

Cabe distinguir entre la fuente de origen y la vía de transporte. Aunque las parcelas agrícolas generan el desprendimiento de partículas (capítulo 4), los suelos expuestos, las cárcavas y los caminos mantienen una conexión directa con los cauces y aportan hasta el 67 % de la carga sedimentaria fluvial. Esto refleja el efecto acumulado del manejo inadecuado del suelo en las partes altas de la cuenca.

5.2.3 Carbono orgánico como trazador de degradación

El carbono orgánico (CO) desempeña un doble papel en los procesos de erosión del suelo. Por un lado, la disminución de su contenido debido al laboreo intensivo o al sobrepastoreo reduce la cohesión entre las partículas, lo que favorece su desprendimiento y transporte por escorrentía. Por otro lado, la erosión remueve preferentemente la capa superficial rica en carbono, por lo que los sedimentos transportados hacia los cauces suelen presentar menores concentraciones de CO, lo que refleja la pérdida previa de los horizontes más productivos del suelo.

El contenido de carbono orgánico (CO), además de constituir un indicador del estado de conservación del suelo y un trazador complementario de procedencia, muestra que las fuentes con mayor aporte sedimentario presentan los valores más bajos de CO (Figura 5.2.3).

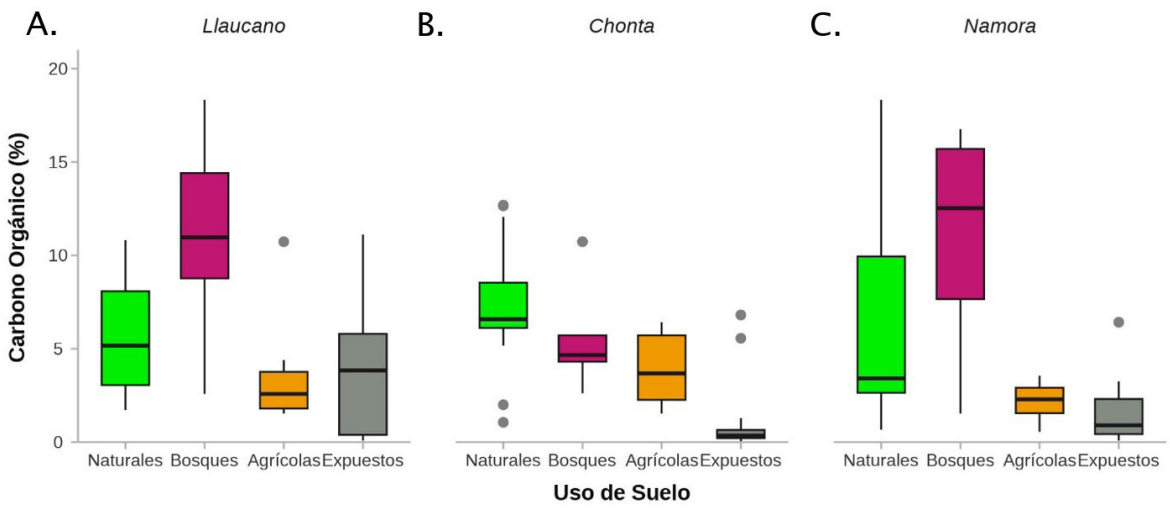


Figura 5.2.3. Variabilidad del carbono orgánico (%) según el tipo de fuente de origen en el distrito.

En efecto, mientras los suelos boscosos conservan hasta un 11 % de CO, los suelos expuestos de cuencas como Chonta registran apenas un 0.4 %. Esta diferencia, observada también en los sedimentos de Llaucano y Namora, evidencia el predominio de material proveniente de suelos degradados con bajas reservas orgánicas. En conjunto, la geología forense identifica los suelos expuestos y agrícolas con bajo contenido de carbono como las principales fuentes de sedimentos fluviales.

Naturales ~5 %	Referencia de salud
Bosques ~11 %	Ideal de conservación
Agrícolas ~3 %	Zona de alerta
Expuestos <1 %	Zona de colapso

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 La Encañada se realizó mediante el modelo distribuido WaTEM/SEDEM. El modelo representó espacialmente procesos de generación, redistribución y conectividad sedimentaria potencial a escala de cuenca. La simulación integró las subcuencas Llaucano, Chonta y Namora mediante una unidad hidrológica de aproximadamente 849 km². Los resultados de erosión, severidad e identificación de áreas críticas fueron analizados para el territorio distrital de 635 km², con fines de interpretación y gestión territorial.

El modelo se construyó mediante los factores R, K y LS, derivados de información climática, edáfica y topográfica. El factor de erosividad (R) se estimó mediante el producto RAIN4PE, ajustado con información local, y representó las condiciones medias de precipitación del periodo 1981–2015 (capítulo 3.3.2). El factor de erodabilidad (K; Figura 6.1.1B) se derivó del producto SoilGrids mediante la formulación de Wischmeier y Smith (1978) y presentó una variabilidad espacial moderada dentro del distrito. El factor topográfico (LS) se calculó a partir de un modelo digital de elevación PerúSAT de 20 m de resolución. Cada celda representó aproximadamente 400 m² de superficie. Esta resolución permite representar la variabilidad topográfica distrital, aunque no captura explícitamente las cárcavas ni los flujos concentrados de pequeña extensión.

El factor de cobertura vegetal (C; Figura 6.1.1A)

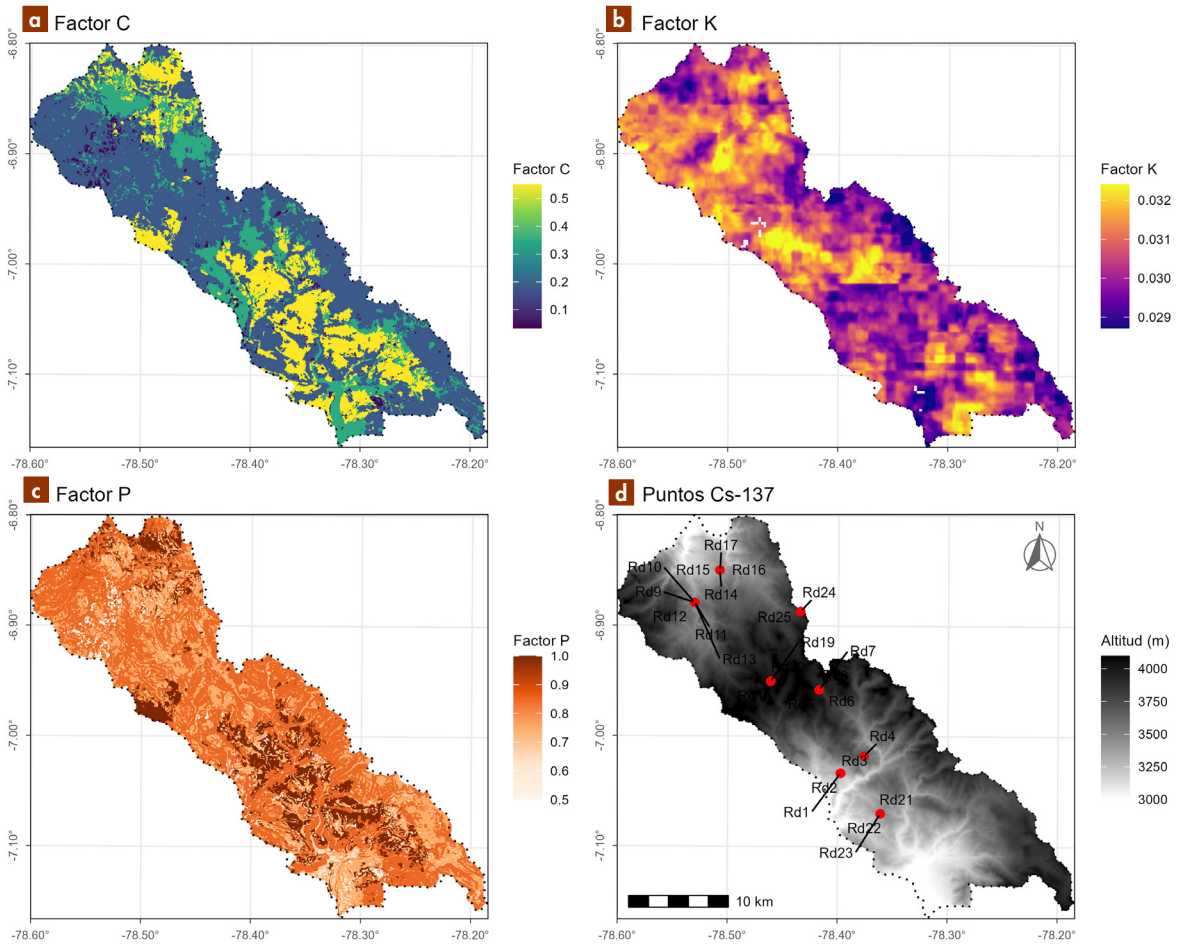


Figura 6.1.1. Variables de ingreso del modelo distribuido WaTEM/SEDEM en el distrito de La Encañada: a) cobertura vegetal del distrito; b) factor K, estimado a partir de datos de SoilGrids; c) distribución espacial del factor P; d) tasas de erosión medidas con Cs-137, utilizadas en la etapa de calibración del modelo.

varía en función del tipo de cobertura y del grado de intervención antrópica. A las aguas continentales se les asignó un valor de C = 0, mientras que las coberturas forestales registraron el valor más bajo entre las superficies vegetadas (C = 0.003). Las áreas urbanizadas presentaron C = 0.05 y las coberturas herbáceas naturales, C = 0.18. Las pasturas registraron C = 0.35, seguidas de las coberturas arbustivas (C = 0.42) y las áreas agrícolas (C = 0.55). Las zonas de extracción minera presentaron el valor más alto del factor C (C = 0.80), asociado a una mayor exposición superficial. El patrón espacial resultante diferencia las coberturas protectoras, las coberturas agropecuarias intervenidas y las superficies con mayor susceptibilidad a la generación de erosión dentro del distrito. Por su parte, el factor de prácticas de conservación (P; Figura 6.1.1C) presentó valores de entre 0.80 y 1.00. Las áreas agrícolas y de pasturas registraron valores de entre 0.80 y 0.90, mientras que las coberturas herbáceas naturales alcanzaron valores de entre 0.95 y 1.00. La distribución espacial mostró un predominio de valores superiores a 0.80 en gran parte del distrito, lo que indica condiciones de flujo superficial con un control limitado mediante prácticas efectivas de conservación del suelo.

Finalmente, las tasas de erosión obtenidas mediante Cs-137 (Figura 6.1.1D) fueron empleadas como referencia para la calibración y validación espacial del modelo. Estos datos integran procesos erosivos acumulados durante varias décadas y proporcionan una medida independiente de la pérdida de suelo, descrita previamente en el capítulo 4.1. La calibración del coeficiente de capacidad de transporte (KTC) permitió ajustar las simulaciones de WaTEM/SEDEM a las condiciones observadas en el distrito, lo que incrementó la consistencia espacial de los resultados.

6.2 Espacialización de la severidad de pérdida de suelo

6.2.1 Distribución espacial de las categorías de erosión

La distribución espacial de las tasas de erosión hídrica en el distrito de La Encañada abarcó desde la categoría muy débil (<2.5 t/ha/año) hasta la categoría extrema (>60 t/ha/año) (Figura 6.2.1). Las categorías muy débil y débil

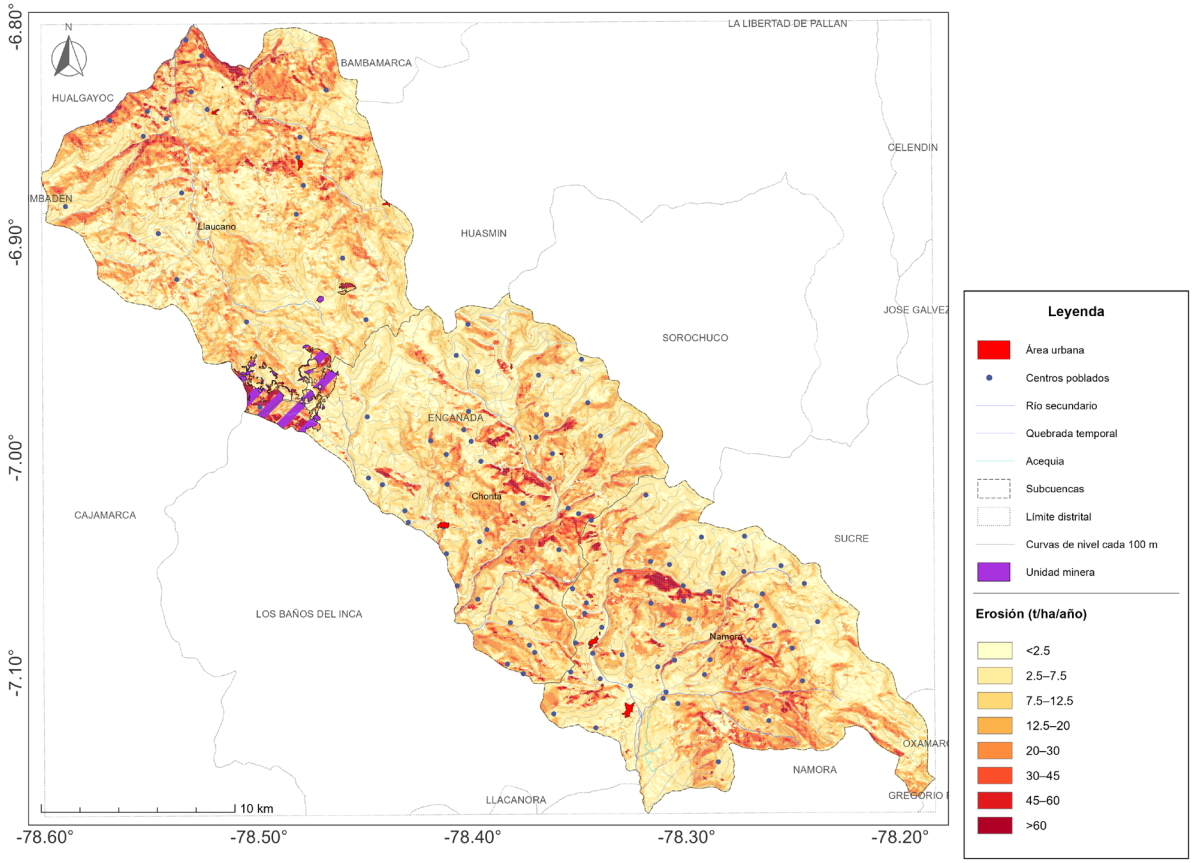


Figura 6.2.1. Mapa de tasas de erosión en el distrito de La Encañada.

concentraron 308 km², equivalentes al 48 % del distrito. La categoría moderada (7.5–12.5 t/ha/año) ocupó 118 km² y representó el 19 % de la superficie distrital. En contraste, las categorías fuerte (12.5–20 t/ha/año) y muy fuerte (20–30 t/ha/año) abarcaron 162 km², equivalentes al 26 % del territorio. Las categorías severa (30–45 t/ha/año), muy severa (45–60 t/ha/año) y extrema (>60 t/ha/año) ocuparon conjuntamente 46 km², equivalentes al 7 % del distrito.

Dentro de las categorías superiores a 30 t/ha/año, la categoría extrema representó aproximadamente 8 km², equivalentes al 1 % de la superficie distrital. Asimismo, los focos críticos de erosión identificados ocuparon aproximadamente 12 ha en Llaucano, 5 ha en Chonta y 2 ha en Namora, lo que evidencia una concentración espacial reducida de las áreas con mayor intensidad erosiva.

6.3 Mapa de severidad y priorización de intervenciones

Las diferencias entre subcuencas fueron marcadas. Llaucano registró la media más elevada del distrito (13 t/ha/año), la mediana más alta (8 t/ha/año) y el percentil 90 más elevado (27 t/ha/año). Namora y Chonta presentaron medias cercanas a 12 t/ha/año y percentiles 90 de aproximadamente 26 t/ha/año. Los valores máximos alcanzaron 208 t/ha/año en Llaucano, 180 t/ha/año en Chonta y 165 t/ha/año en Namora. Asimismo, Llaucano concentró la mayor proporción de superficie bajo categorías severa, muy severa y extrema (8 %), seguido por Namora (7 %) y Chonta (7 %).

La distribución de la erosión mostró un patrón consistente según la posición relativa dentro de las subcuencas. Los mayores niveles de erosión se concentraron en sectores específicos de Llaucano y Namora. En Llaucano, la mediana alcanzó 11 t/ha/año y el percentil 90 llegó a 35 t/ha/año; en Namora, el sector de mayor severidad relativa registró una mediana cercana a 12 t/ha/año y un percentil 90 de 35 t/ha/año. Estos sectores concentraron, además, las mayores proporciones de superficie bajo erosión fuerte o superior, que alcanzaron el 47 % en Llaucano y el 49 % en Namora. En contraste, las zonas bajas registraron medianas comprendidas entre 5 y 7 t/ha/año y proporciones de erosión fuerte inferiores al 30 %.

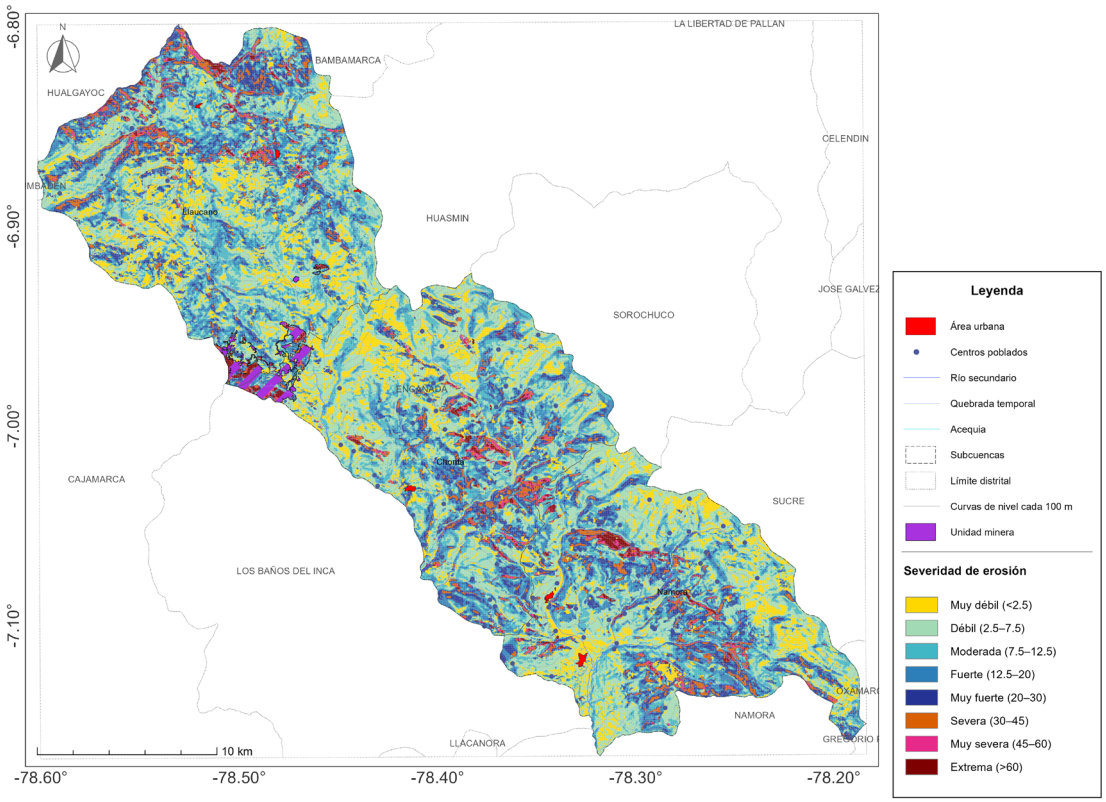


Figura 6.3.1. Mapa de severidad: identificación de las áreas con mayor pérdida de suelo.

Llaucano concentró los máximos distritales y la mayor superficie de focos críticos de erosión. En contraste, Chonta y Namora presentaron una distribución más continua de categorías fuerte y muy fuerte dentro de sus respectivas superficies. Este comportamiento diferencia focos erosivos localizados de áreas extensas sometidas a procesos persistentes de degradación intermedia.

6.3.1 Relación entre cobertura vegetal y severidad erosiva

La distribución de la severidad mostró diferencias marcadas entre coberturas vegetales y usos del suelo. Las áreas agrícolas concentraron 64 % de su superficie por encima de 12.5 t/ha/año (categoría fuerte o superior), mientras que 19 % se ubicó por encima de 30 t/ha/año (categoría severa o superior). Las áreas mineras registraron una de las mayores proporciones relativas de erosión, con 78 % de su superficie por encima de 12.5 t/ha/año (categoría fuerte o superior) y 44 % por encima de 30 t/ha/año (categoría severa o superior). Las coberturas arbustivas presentaron un comportamiento similar, con 82 % de su superficie por encima de 12.5 t/ha/año (categoría fuerte o superior) y 40 % por encima de 30 t/ha/año (categoría severa o superior).

Las pasturas registraron 30 % de su superficie por encima de 12.5 t/ha/año (categoría fuerte o superior) y 5 % por encima de 30 t/ha/año (categoría severa o superior). En contraste, las coberturas herbáceas, que representan la unidad dominante del distrito y ocupan aproximadamente 366 km² (58 % del territorio), presentaron 22 % de su superficie por encima de 12.5 t/ha/año (categoría fuerte o superior) y menos de 3 % por encima de 30 t/ha/año (categoría severa o superior). Las coberturas forestales mostraron la menor incidencia de erosión del distrito, con menos de 1 % de su superficie por encima de 12.5 t/ha/año (categoría fuerte o superior).

Este patrón evidencia que la severidad erosiva aumenta en coberturas intervenidas o con mayor exposición superficial, mientras que las coberturas herbáceas y forestales mantienen una función relativa de protección del suelo. La relación observada es consistente con la expansión de los usos agropecuarios y la reducción de las coberturas naturales documentadas previamente en el capítulo 3.2.

7. Conclusiones y recomendaciones para la gestión

El presente estudio integra la memoria isotópica, el monitoreo en tiempo real y el modelado geoespacial para establecer que la pérdida de suelo en La Encañada no es un problema exclusivamente agrícola, sino una amenaza directa para 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 microparcelas y el modelado?

El análisis de Cs-137 y el monitoreo de microparcelas convergen en un mismo diagnóstico para las laderas agrícolas monitoreadas: ambas técnicas registran la pérdida de horizontes orgánicos superficiales, la primera a escala de memoria histórica (capítulo 4.1) y la segunda a escala de respuesta inmediata ante cada tormenta (capítulo 4.2). Esta pérdida reduce la capacidad de infiltración del suelo y aumenta la generación de escorrentía ante cada evento de lluvia, lo que compromete la productividad agrícola y la regulación hídrica de las laderas monitoreadas.

En las subcuencas Llaucano y Chonta, donde operaron las estaciones meteorológicas de Cushurobamba y Sangal, la humedad antecedente del suelo alcanzó niveles de saturación del 31 % y el 28 % en marzo de 2023 (capítulo 3.3.2). Bajo esta condición estacional, el suelo perdió su capacidad de infiltración y cada nuevo evento de lluvia se transformó de inmediato en escorrentía superficial, lo que concentró en ese mes la mayor transferencia de suelo fértil hacia la red fluvial durante el periodo monitoreado.

El modelado espacial y la geología forense convergen en Llaucano y Namora bajo un mismo mecanismo de degradación. El modelo WaTEM/SEDEM ubica en Llaucano la severidad más alta del distrito, con una media de 13 t/ha/año y el 8 % de su superficie en categorías de severa a extrema (capítulo 6.3). En Namora, el sector de mayor severidad relativa concentra una proporción de erosión fuerte o superior (49 %), comparable al foco crítico de Llaucano (47 %; capítulo 6.3). En ambas subcuencas, la geología forense atribuye la segunda fuente de sedimentos a los suelos agrícolas, con aportes del 26 % y el 25 %, respectivamente, asociados a la cercanía de los cultivos a los cauces (capítulo 5.2). La coincidencia entre la alta severidad simulada y el aporte agrícola medido señala a Llaucano y Namora como la prioridad conjunta de intervención sobre la conectividad entre las parcelas y los cauces.

Chonta presenta un mecanismo distinto. Su severidad erosiva es similar a la de Namora, con una media cercana a 12 t/ha/año (capítulo 6.3), pero su segunda fuente de sedimentos proviene de suelos naturales (23 %), no de suelos agrícolas (capítulo 5.2). La geología forense vincula este aporte con el sobrepastoreo y las quemas recurrentes, que reducen la capacidad de retención del pajonal nativo. Esta diferencia indica que, en Chonta, la prioridad de gestión se orienta al manejo del pastoreo y la quema antes que al control de la frontera agrícola.

Las cuatro técnicas convergen en que la conectividad sedimentaria, y no solo la tasa de erosión, determina cuánto suelo llega efectivamente a los ríos. El Cs-137 muestra que el suelo erosionado en ladera puede quedar retenido sin exportarse de inmediato (capítulo 4.1). Las microparcelas cuantifican esa generación a escala de punto (capítulo 4.2); sin embargo, la geología forense revela que, a pesar de las altas tasas de erosión agrícola, entre el 65 % y el 67 % del sedimento que efectivamente llega a los cauces proviene de suelos expuestos, cárcavas y caminos, por su conexión directa con la red de drenaje (capítulo 5.2). El modelado espacial confirma esta lógica al ubicar las zonas críticas precisamente donde la severidad simulada coincide con esa conectividad (capítulo 6.3). En conjunto, el diagnóstico evidencia que reducir la erosión en ladera no basta: la gestión debe actuar también sobre las vías que conectan el suelo erosionado con el sistema fluvial.

7.2 La Encañada frente al umbral de tolerancia

Al situar los resultados de las microparcelas frente al umbral de tolerancia de pérdida de suelo de 10 t/ha/año (Borrelli et al., 2017), el monitoreo evidencia brechas marcadas según el uso del suelo. El modelado espacial complementa esta evidencia y cuantifica la intensidad erosiva

distrital: el 33 % del territorio presenta tasas superiores a 12.5 t/ha/año, el 7 % supera 30 t/ha/año y cerca del 1 % alcanza valores mayores de 60 t/ha/año. Entre los usos monitoreados, las áreas de pastoreo (68 t/ha/año) y las sendas de herradura (67 t/ha/año) superan el umbral casi siete veces, mientras que los principales cultivos de ladera, como el trigo (30 t/ha/año), el haba (25 t/ha/año) y el maíz (24 t/ha/año), lo superan entre dos y tres veces. Estas cifras confirman que el manejo actual del suelo en zonas de pastoreo y vías rurales representa la condición más alejada del umbral de tolerancia.

7.3 Prioridades para la gestión

La inversión pública y privada debe orientarse con precisión territorial, sobre la base del mapa de severidad (capítulo 6.3) y del análisis de conectividad sedimentaria (capítulo 5.2):

- La prioridad de intervención sobre la conectividad agrícola corresponde a las subcuencas Llaucano y Namora, donde coinciden una elevada severidad erosiva simulada (capítulo 6.3) y el mayor aporte de sedimentos agrícolas al cauce (26 % y 25 %; capítulo 5.2). En ambas, la cercanía de las parcelas de cultivo a los ríos reduce el efecto de amortiguamiento natural y favorece el ingreso directo de sedimentos al sistema fluvial.

- En la subcuenca Chonta, la prioridad se orienta al manejo del pastoreo y la quema del pajonal nativo, ya que su aporte secundario de sedimentos proviene de suelos naturales degradados (23 %; capítulo 5.2) y no de suelos agrícolas. A escala distrital, las áreas de pastoreo intensivo registran, además, la tasa de pérdida de suelo más alta medida en microparcelas (68 t/ha/año), que supera casi siete veces el umbral de tolerancia (capítulo 4.2). La implementación de planes de pastoreo rotativo y de clausura temporal para la recuperación del pajonal es la medida más directa para revertir esta tendencia.

- La implementación de barreras vivas con quinual es la medida de mayor eficiencia demostrada, con tasas de pérdida de suelo de 4 t/ha/año, las más bajas entre los usos de suelo monitoreados en microparcelas (capítulo 4.2).

- La gestión de la red vial no pavimentada debe incorporar criterios de drenaje y control de la escorrentía, dado que las cárcavas y los caminos concentran entre el 65 % y el 67 % de la exportación sedimentaria hacia los cauces en las tres subcuencas (capítulo 5.2). Intervenir estas vías de transporte es tan prioritario como reducir la erosión en las laderas.

- Las acciones de mantenimiento y protección deben intensificarse en la ventana crítica de febrero a abril, periodo de máxima saturación del suelo y mayor erosividad pluvial.

Referencias

- Baigorria, G. A., & Romero, C. C. (2007). Assessment of erosion hotspots in a watershed: Integrating the WEPP model and GIS in a case study in the Peruvian Andes. *Environmental Modelling & Software, 22*(8), 1175–1183. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.06.012

- Borja, P., Molina, A., Govers, G., & Vanacker, V. (2018). Check dams and afforestation reducing sediment mobilization in active gully systems in the Andean mountains. *Catena, 165*, 42–53. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.013

- 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*, 2013. https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7

- 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

- Krois, J. (2016). *Soil and water conservation in the Northern Andes of Peru* [Doctoral dissertation, Freie Universität Berlin]. Refubium. https://doi.org/10.17169/refubium-7024

- Krois, J., Abendroth, S., Schulte, A., & Schneider, M. (2013). Dry season runoff and natural water storage capacity in the high Andean catchment of the River Ronquillo in the Northern Sierra of Peru. *Journal of Latin American Geography, 12*(3), 59–89. https://doi.org/10.1353/lag.2013.0042

- Krois, J., & Schulte, A. (2013). Modeling the hydrological response of soil and water conservation measures in the Ronquillo watershed in the Northern Andes of Peru. In A. M. Conde Corral, U. Schröder, & J. Cullmann (Eds.), *Water & environmental dynamics: Proceedings of the 6th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER 2013)* (pp. 147–184). German IHP/HWRP National Committee. https://doi.org/10.5675/ICWRER_2013

- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2019). *Reporte oficial de poblaciones pecuarias y valor bruto de la producción.*

- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2024). *Sistema de Consulta de Estadística Agraria (SISEA).*

- Morera, S., Orrillo, J., Contreras, S., Laura, J., Sánchez, M., Espinoza, K., Villanueva, J., Díaz, D., Yana, D., Ruiz, J., y Prudencio, F. (2026). *Diagnóstico de la erosión hídrica de los suelos e identificación de fuentes de producción y transporte de sedimentos en el distrito de Lircay*. Instituto Geofísico del Perú.

- Romero, C. C., Baigorria, G. A., & Stroosnijder, L. (2007). Changes of erosive rainfall for El Niño and La Niña years in the northern Andean highlands of Peru. *Climatic Change, 85*(3–4), 343–356. https://doi.org/10.1007/s10584-007-9301-0

- Soto, J., & Navas, A. (2004). A model of 137Cs 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

- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* (Agriculture Handbook No. 537). U.S. Department of Agriculture.

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