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 MAÑAZO

(Provincia de Puno, región Puno)

Informe técnico n.° 035-2026/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima, Perú
Noviembre de 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 Mañazo
Informe técnico

Sergio Morera
Jhon Orrillo
Shirley Contreras
Jorge Laura
Michael Sánchez
Kithner Espinoza
Jhon Villanueva
Ivan Luque
Deysi Yana
Brayan Nicasio
Autores

César Huincho
Gestor del Programa Presupuestal 0089

Hernando Tavera
Jorge Concha
Edición de contenido

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Este documento incluye figuras, tablas, ecuaciones y material cartográfico elaborados 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, noviembre 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 e instituciones que colaboraron en el desarrollo del presente estudio:

- La Municipalidad Distrital de Mañazo (MDM) de la región Puno, 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 cooperar con análisis complementarios de muestras de suelo.
- El Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), por la contribución con las políticas y estrategias para la ejecución del PP 0089.

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

(Provincia de Puno, región Puno)

Lima, Perú
Noviembre de 2026

RESUMEN

El distrito de Mañazo (Puno) ocupa 410 km² en el altiplano, entre 3862 y 4965 m s. n. m. El 73 % drena hacia el Titicaca y el 27 % hacia el Pacífico. Su relieve es moderado, con una pendiente media de 14°. El 92 % de la agricultura distrital se desarrolla en pendientes planas a moderadas (<15°). La cobertura vegetal se compone de vegetación herbácea o arbustiva (64 %), agricultura (19 %), áreas altoandinas con escasa o sin vegetación (10 %) y áreas húmedas continentales (7 %). Entre 1988 y 2024, la agricultura fue la cobertura que más cambió; creció 18 km², equivalentes al 4 % del distrito.

Los radioisótopos, que integran las últimas seis a diez décadas, muestran que el suelo desnudo registra las tasas más altas del distrito: 42 t/ha/año con Cs-137 y 30 t/ha/año con Pb-210ex. Le siguen la agricultura, con 16 t/ha/año y 15 t/ha/año, y el pajonal, con 11 t/ha/año y 6 t/ha/año. El bofedal es la única cobertura con tasas de deposición (+3 t/ha/año en ambos trazadores). Las diferencias entre coberturas son significativas con los dos trazadores (Kruskal-Wallis, $p < 0.001$; $\eta^2 = 0.27$).

El monitoreo directo con la red de 29 microparcelas (15 en Charamaya, 4163 m s. n. m.; 14 en Mañazo, 3964 m s. n. m.) confirma esa jerarquía y cuantifica el efecto del manejo. En Mañazo, el suelo desnudo y el cultivo de papa son las únicas coberturas que superan el umbral de tolerancia de 10 t/ha/año, con 14 t/ha/año y 12 t/ha/año en año normal (hasta 18 t/ha/año y 16 t/ha/año en año húmedo). En Charamaya, el pajonal quemado pierde 4 t/ha/año; aunque se mantiene debajo del umbral, esta cifra equivale a ocho veces la pérdida del pajonal sin quemar. Los pastos y la azorella también permanecen por debajo. Con una erosividad de campaña similar en ambas estaciones, Charamaya perdió un orden de magnitud menos suelo por evento, lo que sitúa a la cobertura y al manejo por encima de la energía de la lluvia como control de la pérdida de suelo.

Se identificó un predominio de sedimentos provenientes de pastizales y cobertura vegetal natural en las cabeceras de las cuencas de Charamaya y Conaviri, con aportes de 89.3 % y 64.2 %, respectivamente, asociados al pastoreo extensivo sin manejo adecuado, práctica que favorece la erosión. En contraste, las cuencas Caquincora (cabecera de Yanarico) y Quilpache registraron mayores aportes de suelos agrícolas (84.8 % y 59 %), debido a su ubicación en zonas de menor altitud, donde la actividad agrícola y la conectividad con la red de drenaje favorecen el transporte de sedimentos.

El modelado WaTEM/SEDEM mostró un predominio de erosión baja: 352 km² (86 % del área modelada) correspondieron a las categorías muy débil y débil, 20 km² (5 %) a moderada y 37 km² (9 %) a fuerte y muy fuerte; las categorías superiores a 30 t/ha/año ocuparon solo 6 ha. Charamaya concentró la mayor extensión crítica, con un P_{90} de 20 t/ha/año y un máximo de 47 t/ha/año, mientras las áreas altoandinas con escasa o sin vegetación concentraron la mayor parte de la superficie con erosión fuerte o superior.

El diagnóstico identifica cuatro prioridades de gestión: regular la quema de pajonal; restituir la cobertura en suelo desnudo y parcelas de cultivo; proteger bofedales y pajonales como infraestructura natural; y verificar en campo, antes de intervenir, las superficies altoandinas expuestas y las cárcavas de Charamaya.

CONTENIDO

4 Agradecimientos

6 Resumen

9 Siglas, acrónimos y convenciones

11 Glosario de términos clave y conceptos fundamentales

13 Introducción

14 Instrumentación y laboratorio

14 Redes de monitoreo e instrumentación

15 Competencia técnica y caracterización metrológica

19 Análisis del sistema físico-territorial

19 Relieve y geología

20 Clima e hidrología

24 Uso del suelo en las últimas décadas

27 Diagnóstico de la erosión

27 Historia de las últimas seis a diez décadas

32 Dinámica y monitoreo de la erosión actual

37 Procedencia y dinámica de los sedimentos

37 Caracterización de los sedimentos

38 Zonas críticas de aporte de sedimentos

43 Mapeo de las tasas y la severidad de erosión

43 Construcción del modelo espacial de erosión

44 Espacialización de la severidad de pérdida de suelo

47 Conclusiones y recomendaciones para la gestión

47 ¿Qué nos dicen los isótopos, las microparcelas, la geología forense y el modelado?

48 Situación de Mañazo en el contexto andino

48 Prioridades para la gestión

50 Referencias

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y CONVENCIONES

USOS DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL	
Agr	Áreas agrícolas.
CuA	Aguas continentales.
Hrb	Áreas con vegetación herbácea o arbustiva.
Urb	Áreas urbanizadas.
SVg	Áreas altoandinas con escasa o sin vegetación.
AHu	Áreas húmedas continentales.
Gla	Glaciares.

VARIABLES BIOFÍSICAS, HIDROLÓGICAS Y EDÁFICAS	
Cc	Fracción de cobertura vegetal del cultivo principal sobre la superficie del suelo.
Ch	Altura del cultivo evaluado en campo.
CO	Carbono orgánico.
CSS	Concentración de sedimentos en suspensión.
E	Energía cinética de la lluvia (en modelo TEST).
EI_{30}	Índice de erosividad de la lluvia, calculado como el producto de la energía cinética total del evento y la intensidad máxima en 30 minutos.
Ec_{30}	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.
Grc	Fracción de gravas embebidas en la matriz 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.
Ro	Escorrentía superficial generada ante eventos de precipitación.
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 TEST).
ktc_low	Coeficiente de capacidad de transporte para coberturas con baja capacidad de transporte.
ktc_high	Coeficiente de capacidad de transporte para coberturas con alta capacidad de transporte.
C_mult	Multiplicador del factor de cobertura y manejo (C).

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

INSTITUCIONES	
CONCYTEC	Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica.
CONIDA	Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
IGP	Instituto Geofísico del Perú.
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática.
LSCE	Laboratory for Sciences of Climate and Environment.
MIDAGRI	Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.
MoSSARD	Laboratorio de Monitoreo de Suelos, Sedimentos y Agua ante Riesgos de Desastres.
MDM	Municipalidad Distrital de Mañazo.
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica.

NORMAS Y MÉTODOS	
CV	Coeficiente de variación.
DEM	Modelo digital de elevación.
DS	Desviación estándar.
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional.
ISO	Organización Internacional de Normalización.
LD	Límite de detección.
POE	Procedimientos operativos estándar.
RAIN4PE	*Rain for Peru and Ecuador.*
Random Forest	Algoritmo de aprendizaje automático que combina árboles de decisión para predecir la tasa de erosión según variables como pendiente, uso de suelo y precipitación.
WaTEM/SEDEM	Modelo de erosión y transporte de sedimentos en cuencas.
NSE	Eficiencia de Nash-Sutcliffe.
KGE	Eficiencia de Kling-Gupta.
NSGA-II	Algoritmo genético de ordenamiento no dominado II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*).

COLORIMETRÍA Y ESPACIOS DE COLOR	
CIE	Comisión Internacional de Iluminación.
CIE1976LAB	Espacio de color CIE 1976 L*a*b*, también denominado CIELAB, basado en luminosidad (L*) y coordenadas cromáticas (a* y b*).
CIELCh	Espacio de color cilíndrico basado en luminosidad (L), croma (C) y tono (h).
CIELUV	Espacio de color uniforme estandarizado para emisión de luz y mezclas aditivas (L, u, v).
CIE XYZ	Modelo triestímulo primario y estándar de colorimetría (X, Y, Z).
Hunter Lab	Espacio de color en escala Hunter de raíz cuadrada (L, a, b).
RGB	Modelo de color aditivo basado en rojo, verde y azul (*red*, *green*, *blue*).

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, concentran el flujo superficial y favorecen el transporte acelerado de sedimentos hacia la red hídrica.
Saturación del suelo	Estado en el que el suelo ya no puede absorber más agua, lo que puede desencadenar una respuesta erosiva 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.
Sedimentos en suspensión (SS)	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.
Concentración de sedimentos en suspensión (CSS)	Cantidad de partículas sólidas transportadas en la columna de agua, expresada como masa por unidad de volumen.



Ecosistema altoandino del distrito de Mañazo, región Puno.

1. Introducción

Evaluar si la pérdida de suelo es sostenible exige compararla con la velocidad natural a la que el paisaje se desgasta. En la cuenca del Titicaca, al sureste del lago, esa tasa de referencia es de unos 10.8 mm por milenio, equivalentes a 0.1-0.2 t/ha/año, estimada sobre los últimos 60 000 años (Hippe et al., 2021). Toda tasa que supere ese valor implica pérdida neta de suelo.

El primer control de la erosión es la cobertura vegetal y su efecto no es lineal. En los Andes del sur de Ecuador, las cuencas con más del 80 % de su superficie cubierta por vegetación erosionan a un ritmo similar al natural; por debajo del 50 % lo superan entre 100 y 1000 veces (Vanacker et al., 2014). En Mañazo, la vegetación herbácea ocupa el 64 % del distrito, pero la fracción de suelo que cubre depende de cómo se maneja.

Ese pajonal sostiene 30 238 ovinos, 21 317 alpacas y 10 021 vacunos (Rodríguez Aranzábal et al., 2024). En las cuencas altoandinas, el pastoreo es el uso con mayor efecto sobre la regulación hidrológica (Ochoa-Tocachi et al., 2016). A ello se suma la quema periódica del pajonal, documentada para el distrito (Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI], 2018), que induce repelencia al agua y altera los agregados (Poulenard et al., 2001). El efecto de esta práctica sobre la erosión hídrica no ha sido cuantificado en el altiplano peruano.

El segundo control es la conversión de esa cobertura a cultivo, que reduce la materia orgánica y debilita los agregados (Lal, 2003; Rolando et al., 2018). Entre 1988 y 2024, la superficie agrícola en Mañazo creció 18 km², de forma consistente con la expansión de la quinua en Puno (Bedoya-Perales et al., 2018). El aporte de sedimento de estas parcelas depende de cuán conectadas estén con el cauce. El rendimiento específico aumenta ante incrementos de apenas 3 % a 4 % del área cultivada, porque las parcelas ocupan los valles, próximas a la red de drenaje (Rosas et al., 2023). En Mañazo, la agricultura se concentra en la vertiente del Titicaca, en los sectores de menor altitud.

El tercer control es el régimen pluviométrico. Ambas vertientes reciben entre 560 mm y 658 mm anuales. Sobre ese régimen se superponen los eventos extremos de El Niño, que multiplican la producción de sedimentos entre 3 y 60 veces, con efecto mínimo entre los 7° S y 18° S (Morera et al., 2017). Mañazo se sitúa en ese tramo austral, el menos sensible, aunque la evidencia disponible corresponde a cuencas del Pacífico.

Pese a estos tres controles reconocidos, la pérdida de suelo en las laderas de Mañazo no ha sido medida. El único antecedente directo es el de Salcedo-Mayta et al. (2022), quienes mediante varillas de erosión registraron pérdidas de 0.35 t/ha en suelos sin cobertura, 0.14 t/ha en trébol, 0.17 t/ha en *mulch* y 0.17 t/ha en vicia. Esas mediciones se realizaron sobre pendientes de 0 % a 4 %, no sobre las laderas ni las coberturas naturales que ocupan cerca del 80 % del territorio.

Este estudio aborda ese vacío con cuatro técnicas. Los objetivos son (a) reconstruir la redistribución de suelo de las últimas seis a diez décadas mediante Cs-137 y Pb-210ex; (b) cuantificar la pérdida por evento y por cobertura mediante microparcelas de escorrentía, con atención al efecto de la quema de pajonal; (c) identificar la procedencia de los sedimentos y jerarquizar las fuentes por subcuenca; y (d) representar espacialmente las tasas y su severidad mediante WaTEM/SEDEM, para identificar dónde la inversión pública en conservación rendiría más.

2. Instrumentación y laboratorio

2.1 Redes de monitoreo e instrumentación

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) desplegó una red de monitoreo en el distrito entre noviembre de 2023 y mayo de 2024 (Figura 2.1.1). La red combinó cuatro componentes: dos estaciones meteorológicas automáticas, dos estaciones hidrosedimentológicas, 29 microparcelas experimentales de 1 m² y una campaña de muestreo que comprendió 125 testigos de suelo y 335 muestras de suelo y sedimentos para la geología forense. El diseño responde a la división del territorio en dos vertientes: cada una cuenta con una estación meteorológica, una estación hidrosedimentológica y un conjunto de microparcelas, lo que permite contrastar coberturas y manejo bajo regímenes de lluvia distintos.

Las estaciones meteorológicas automáticas de Charamaya (4163 m s. n. m., subcuenca Charamaya, vertiente del Pacífico) y Mañazo (3964 m s. n. m., subcuenca Conaviri, vertiente del Titicaca) registraron precipitación y humedad del suelo con resolución nativa de 5 y 1 minuto, respectivamente. Estos registros sustentan la caracterización del régimen de campaña (sección 3.2.2), del ciclo diurno de la precipitación (sección 3.2.3) y de la intensidad y erosividad de los eventos (sección 3.2.4).

Las dos estaciones hidrosedimentológicas cuantificaron el transporte de sedimentos en suspensión. La estación Charamaya, en el río Charamaya, monitorea la subcuenca Charamaya (110 km²), única unidad del distrito que drena hacia el Pacífico. La estación Conaviri, situada a la salida de la cabecera de la subcuenca Conaviri, monitorea un área de 62 km², representativa de la parte alta de la vertiente del Titicaca. La caracterización hidrosedimentológica del capítulo 5 se apoya en la estación Charamaya, que dispone del registro más completo (sección 5.1.1).

Las 29 microparcelas de 1 m² (15 junto a la estación Charamaya, 14 junto a Mañazo) midieron escorrentía superficial y pérdida de suelo evento a evento bajo siete condiciones de cobertura y manejo (sección 4.2.1). Cada parcela está delimitada por bordes metálicos y drena a un colector que retiene el volumen escurrido y el

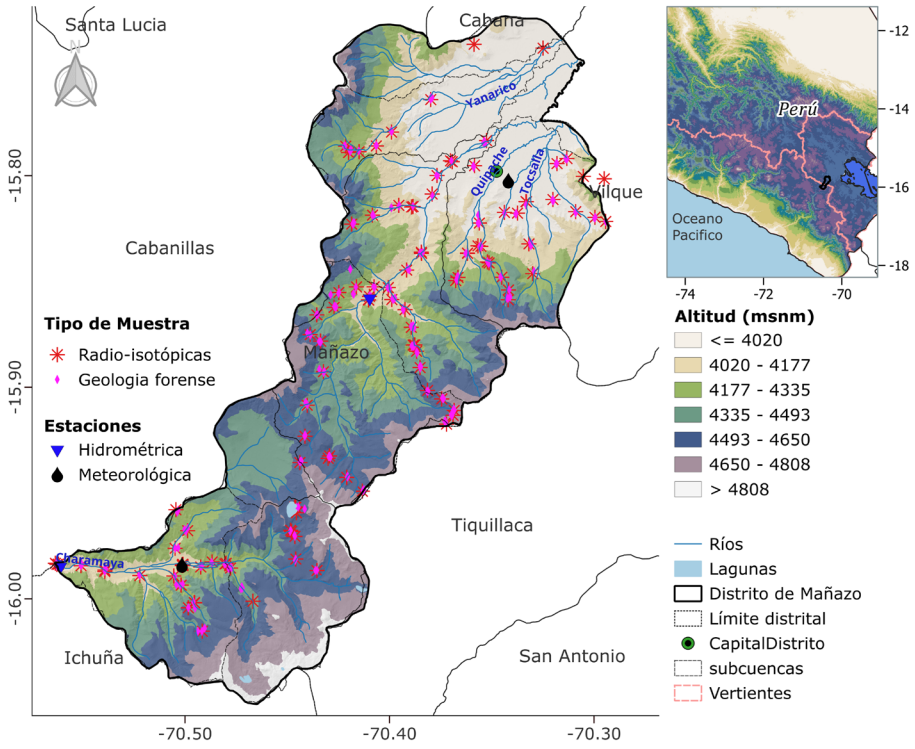


Figura 2.1.1. Red de monitoreo hidrometeorológico y ubicación estratégica de los puntos de muestreo radioisotópico y geología forense para la cuantificación de la dinámica erosiva en el distrito de Mañazo (noviembre de 2023 a mayo de 2024).

sedimento asociado. La escala de 1 m² registra erosión laminar y entre surcos, no erosión en surcos ni en cárcavas.

Para reconstruir el proceso erosivo de las últimas seis a diez décadas se recolectaron 125 testigos de suelo distribuidos entre los cuatro usos predominantes del distrito y todo el rango de pendientes. Los testigos de referencia se laminaron en capas de 5 cm, de modo que los 125 núcleos generaron 160 muestras para espectrometría gamma (sección 4.1.1).

Para identificar la procedencia de los sedimentos se recolectaron 335 muestras, distribuidas entre los tres grupos de uso del suelo definidos en la sección 5.2.1. Todas se analizaron por colorimetría (sección 5.2).

En conjunto, el despliegue generó 495 matrices sólidas y 2208 matrices líquidas, procesadas en el laboratorio MoSSARD-IGP (sección 2.2.1).

2.2 Competencia técnica y caracterización metrológica

2.2.1 Capacidades analíticas y tecnologías de alta resolución

Las muestras ambientales recolectadas en el distrito de Mañazo 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 detalladamente en el estudio de referencia de Morera et al. (2026). Sobre esta base metodológica, las lecturas instrumentales desarrolladas para este estudio garantizan la precisión, trazabilidad y validez técnica de los insumos analíticos requeridos para la caracterización y modelamiento de la erosión hídrica en el distrito.

2.2.2 Cuantificación de matrices ambientales para pretratamiento

La fase de acondicionamiento y pretratamiento preanalítico en el Laboratorio MoSSARD comprendió el procesamiento integral de 2703 unidades de muestras ambientales correspondientes al distrito de Mañazo (Figura 2.2.2a). El volumen preanalítico estuvo dominado por las matrices líquidas, donde las muestras de sedimentos en suspensión procedentes de microparcelas y del río representaron el 51.5 % y 30.2 %, respectivamente. En relación con las matrices sólidas, se acondicionaron 335 unidades de suelos y sedimentos superficiales, destinadas a la caracterización granulométrica,

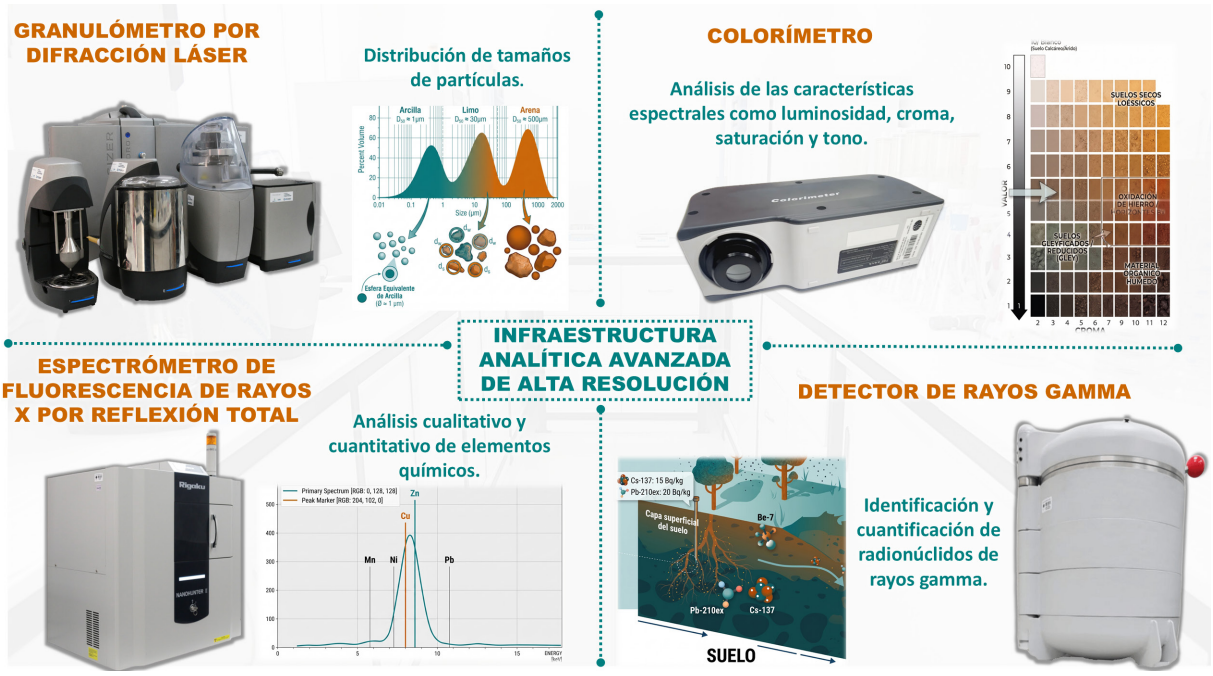


Figura 2.2.1. Instrumentación analítica de alta complejidad en el laboratorio MoSSARD-IGP.

geoquímica y colorimétrica, mientras que 160 unidades de fracciones de testigos de suelo completaron la secuencia de laminado, secado y homogeneización previa a las lecturas por espectrometría gamma. Este volumen de procesamiento asegura la representatividad estadística del estudio, se ajusta al rigor técnico exigido por los procedimientos operativos estándar (POE) y garantiza la eficiencia en los tiempos de respuesta analítica (Figura 2.2.2b).

2.2.3 Rangos dinámicos y métricas analíticas por técnica

La caracterización multianalítica de las muestras del distrito de Mañazo permitió cuantificar 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 por uso de la tierra, las lecturas por espectrometría de rayos gamma mostraron una respuesta analítica definida por la actividad mínima detectable (MDA), con un límite de detección (LD) de 0.1 Bq kg^{-1} y un control estricto de la variabilidad metrológica; las incertidumbres combinadas se mantuvieron por debajo del 30 % en la cuantificación de los fotopicos de interés (Figura 2.2.3).

b. Caracterización cromática para *fingerprinting*

El análisis colorimétrico evidenció una clara separación estadística entre las firmas espectrales

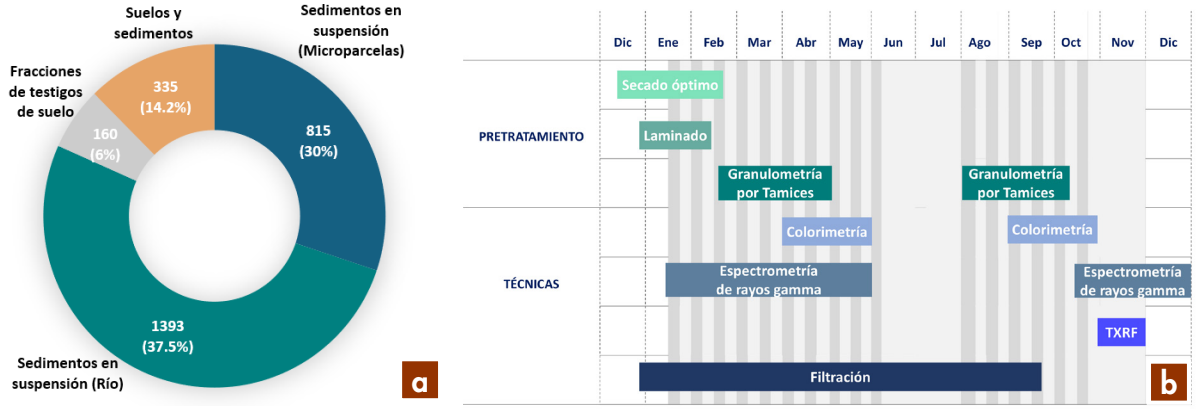


Figura 2.2.2. a) Volumen de muestras y b) balance de tiempos de respuesta y rendimiento analítico ejecutado para el distrito de Mañazo en 2024.

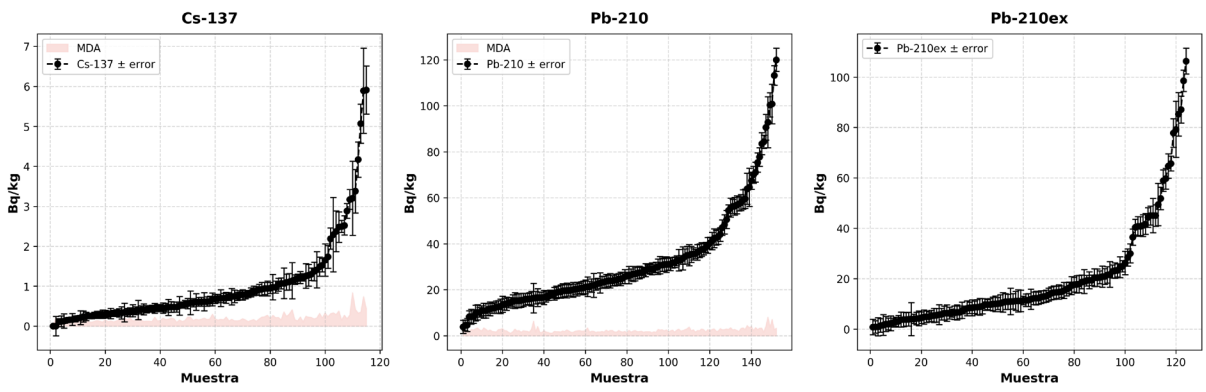


Figura 2.2.3. Límites de detección e incertidumbres en fracciones de testigos de suelos en el distrito de Mañazo.

de los grupos de uso del suelo: vegetación natural, áreas de cultivo y mezclas de ríos (Figura 2.2.4). En particular, los suelos de la clase natural exhibieron valores sistemáticamente más altos de luminosidad y croma en la totalidad de los espacios cromáticos evaluados (CIE1976LAB, CIELCH, CIELUV, CIEXYZ, HunterLAB y RGB). Destacaron especialmente la firma espectral de los suelos naturales en Tambo (cuencas de la vertiente del Pacífico) e Illpa (cuencas de la vertiente del Titicaca). Esta marcada diferenciación indica que el color permite discriminar los grupos de fuentes por tipo de matriz y procedencia geográfica.

c. Concentración de sedimentos en suspensión (CSS) en dinámicas de transporte

La caracterización gravimétrica de las matrices líquidas procesadas por filtración al vacío permitió cuantificar la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) en las estaciones hidrosedimentológicas de Charamaya y Conaviri (Figura 2.2.5). A diferencia de otras microcuencas, la carga en suspensión en este sector está fuertemente dominada por la fracción de partículas finas, con promedios de 0.752 g/L en Charamaya y 0.543 g/L en Conaviri, en comparación con los aportes de partículas gruesas (0.093 g/L y 0.032 g/L, respectivamente). Durante eventos de avenidas e intensas crecidas, la concentración total alcanzó valores pico de 18.527 g/L en la estación Charamaya (15.608 g/L en finos) y 19.570 g/L en la estación Conaviri (17.862 g/L en finos).

Por otro lado, la caracterización del desprendimiento de sedimentos en microparcelas experimentales evidenció un contraste significativo en la respuesta erosiva de las estaciones evaluadas (Figura 2.2.6). La estación Mañazo registró los niveles más elevados de sedimentos en suspensión, con una concentración promedio

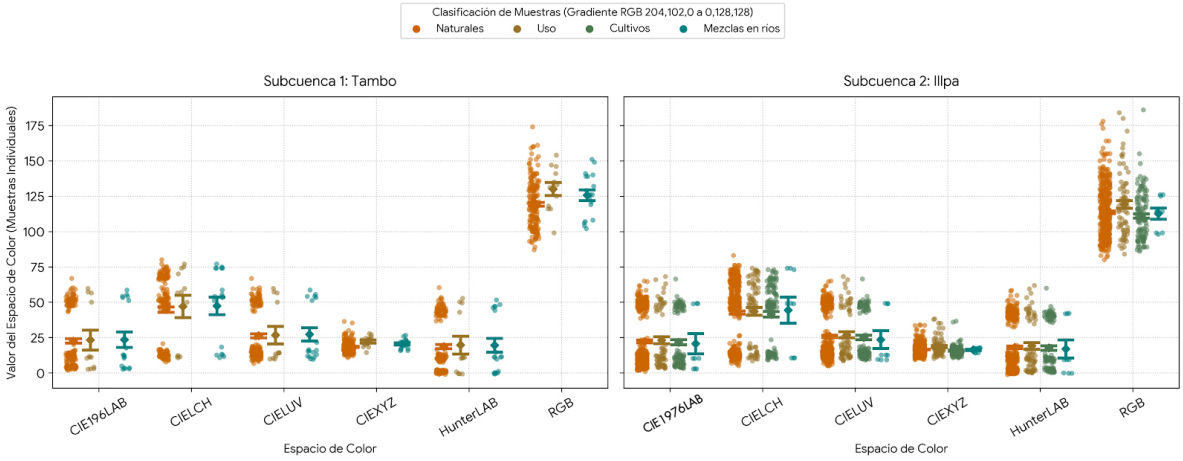


Figura 2.2.4. Diferenciación de firmas espectrales de acuerdo con el tipo de cobertura y estación.

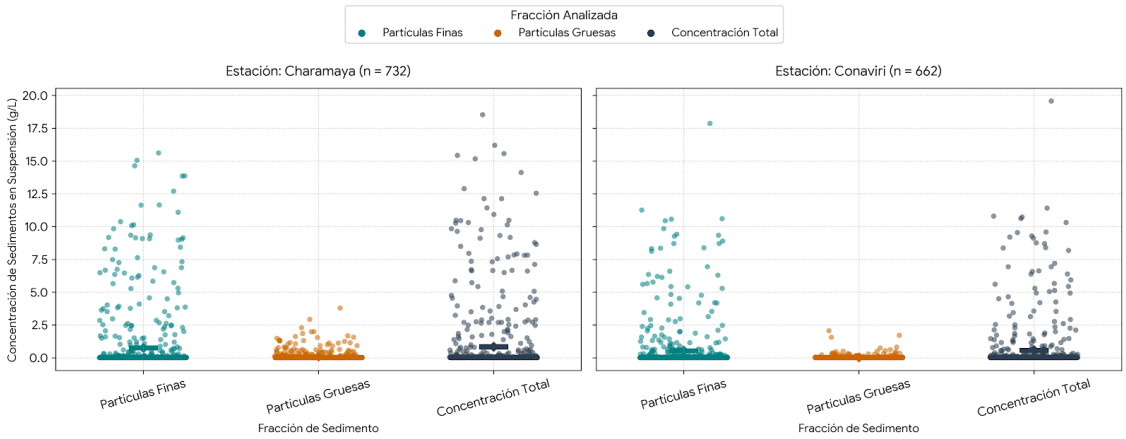


Figura 2.2.5. Concentración de sedimentos en suspensión (CSS) según la fracción analizada en las estaciones Charamaya y Conaviri.

de 4.879 g/L y un evento pico de 23.884 g/L. En contraste, la estación Charamaya presentó una respuesta promedio más atenuada con 0.678 g/L y una mediana de 0.277 g/L, aunque se registraron máximos puntuales de hasta 19.682 g/L durante eventos de lluvia de alta intensidad. Esta distribución de puntos dispersos confirma que, si bien la escorrentía basal genera valores reducidos en la mayoría de las microparcelas, la susceptibilidad del suelo ante eventos torrenciales produce concentraciones muy elevadas de sedimentos en suspensión de manera no lineal.

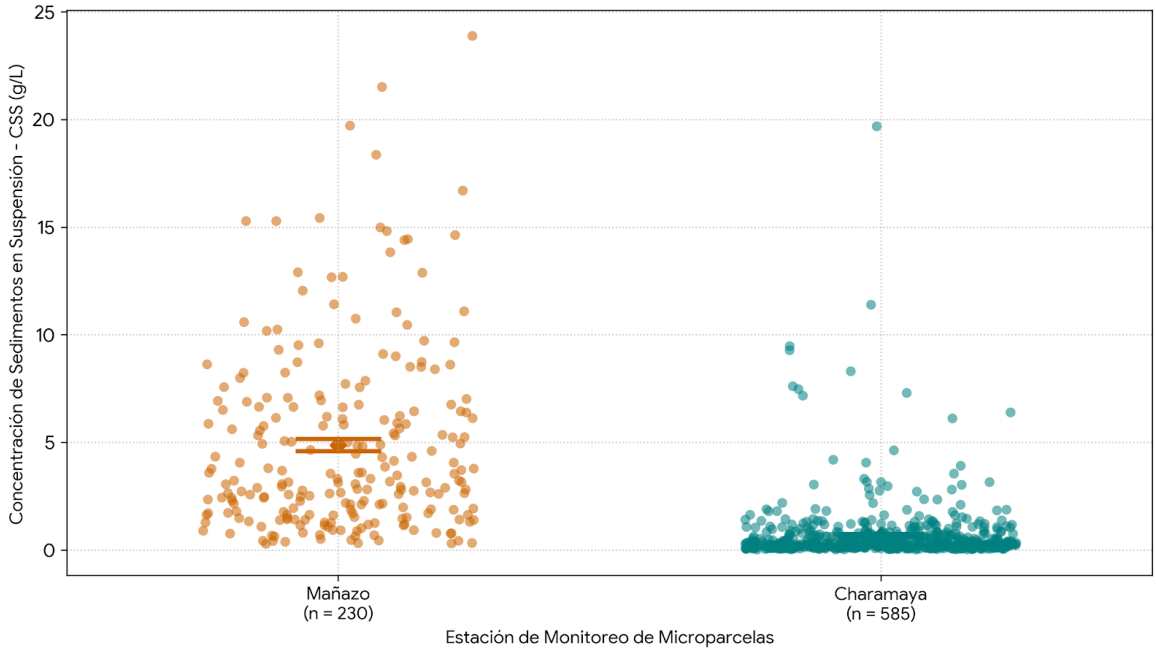


Figura 2.2.6. Concentración de sedimentos en suspensión (CSS, en g/L) en microparcelas experimentales en dos estaciones de monitoreo en el distrito de Mañazo.

3. Análisis del sistema físico-territorial

3.1 Relieve y geología

3.1.1 Unidad litoestratigráfica

La geología de Mañazo está dominada por secuencias sedimentarias y volcanosedimentarias del Mesozoico al Cuaternario. Las principales unidades son los grupos Yura, Tacaza, Maure y Barroso, y las formaciones Vilquechico, Muñani y Ayavacas, compuestas por areniscas, lutitas, limoarcillitas, conglomerados, depósitos tobáceos y lavas andesíticas, junto con cuerpos intrusivos locales de diorita, microgranito y pórfidos riolíticos. Los depósitos cuaternarios glaciares, aluviales, coluviales y lacustres constituyen gran parte del relieve reciente. En conjunto, esta secuencia de ambientes sedimentarios, volcánicos y tectónicos condiciona la geomorfología actual del territorio.

La respuesta de estos materiales a la meteorización varía según su litología. Areniscas, lutitas y limoarcillitas generan regolito y finos susceptibles al transporte superficial; lavas andesíticas y cuerpos intrusivos producen materiales residuales más estables y resistentes. Esta heterogeneidad litológica condiciona diferencias espaciales en infiltración, estabilidad superficial y disponibilidad de sedimentos y constituye uno de los principales controles naturales sobre los procesos erosivos analizados en los capítulos posteriores.

3.1.2 Morfometría y análisis de pendientes

La topografía condiciona la velocidad del flujo superficial y, con ella, la capacidad del territorio para generar y transportar sedimentos. El modelo digital de elevación (DEM) CONIDA (5 m de resolución) indica una pendiente media distrital de 14° (máxima: 82°). Según la clasificación de la FAO, el distrito presenta pendientes planas a suaves (0°-5°) en 23 % de su superficie, moderadas (5°-15°) en 36 %, empinadas (15°-25°) en 26 %, muy empinadas (25°-45°) en

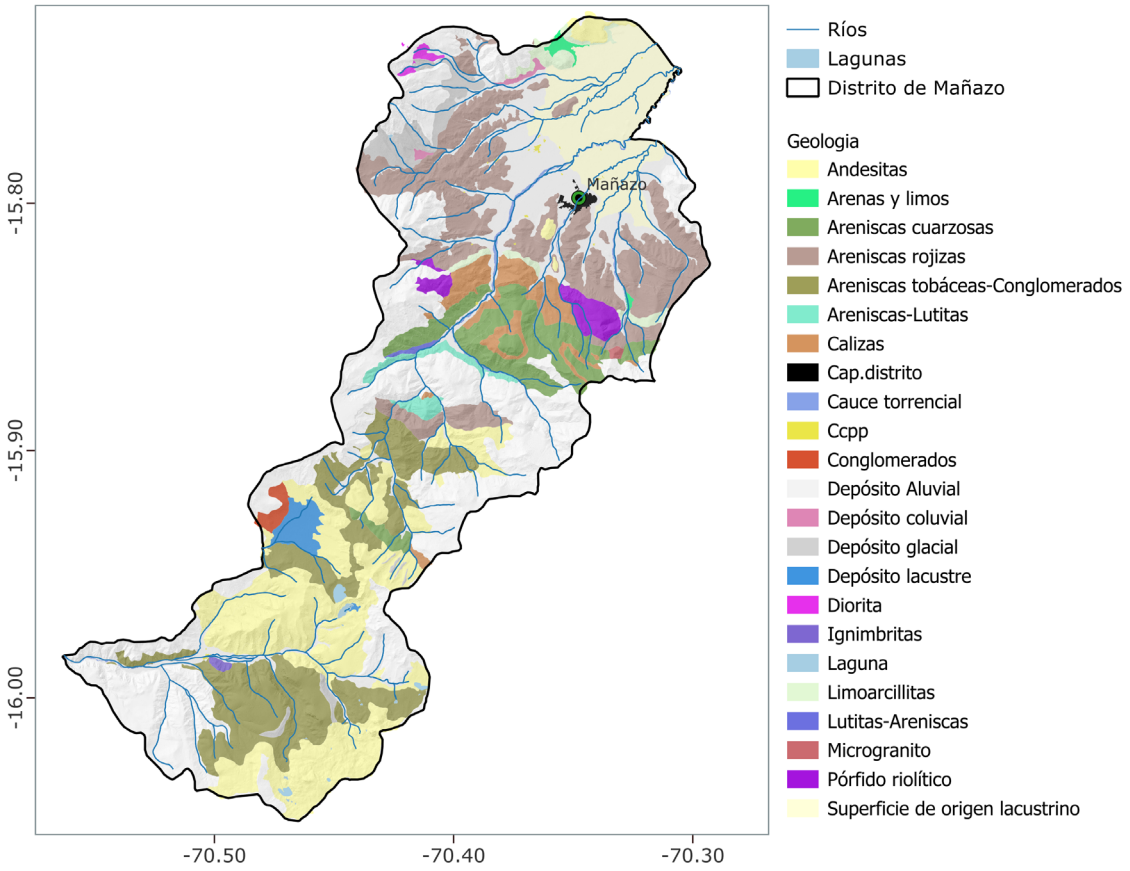


Figura 3.1.1. Mapa de litoestratigrafía de la unidad de análisis.

14 % y escarpadas (>45°) en 1 %. El 41 % de la superficie distrital supera los 15°, lo que configura condiciones de susceptibilidad erosiva moderada a muy alta (Figura 3.1.2).

Las cárcavas ocupan las pendientes más pronunciadas (media: 29°; máximo: 59°), seguidas por las áreas altoandinas con escasa o sin vegetación (media: 18°; máximo: 78°), las áreas con vegetación herbácea o arbustiva (media: 17°; máximo: 80°), las aguas continentales (media: 9°), las áreas húmedas continentales (media: 7°) y las áreas agrícolas (media: 5°).

Solo el 8 % de las áreas agrícolas supera los 15°, es decir, el 92 % de la agricultura distrital se desarrolla en pendientes planas a moderadas (<15°). En la cobertura predominante, «áreas con vegetación herbácea o arbustiva» (64 % del distrito), el 51 % supera los 15°, el 19 % los 25° y el 2 % los 45°.

3.2 Clima e hidrología

3.2.1 Régimen pluviométrico histórico (1981-2024)

El distrito de Mañazo presenta un régimen pluviométrico característico del altiplano: precipitación anual media de 560 mm en Charamaya (4163 m s. n. m.) y 658 mm en Mañazo (3964 m s. n. m.), según PISCO (Aybar et al., 2020) para 1981-2024 (Figura 3.2.1). La diferencia de 98 mm entre estaciones separadas por solo 199 m de altitud refleja la heterogeneidad espacial de zonas de alta montaña, con barreras topográficas y exposición diferencial al flujo húmedo amazónico (Chavez & Takahashi, 2017; Junquas et al., 2018). La variabilidad interanual es similar en ambas estaciones (CV de 22 % y 23 %), lo que es consistente con los Andes del sur

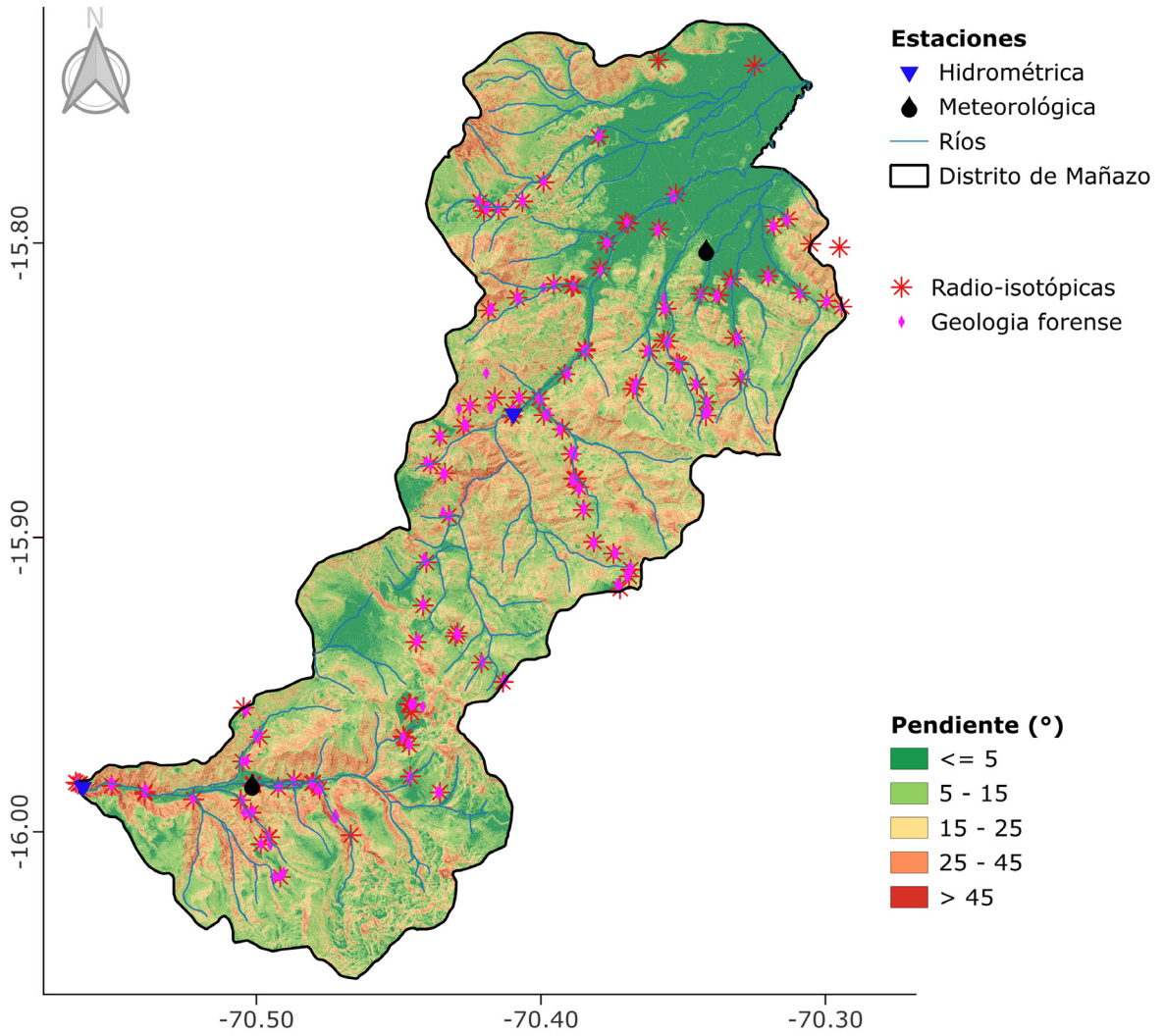


Figura 3.1.2. Mapa de pendientes de la unidad de análisis.

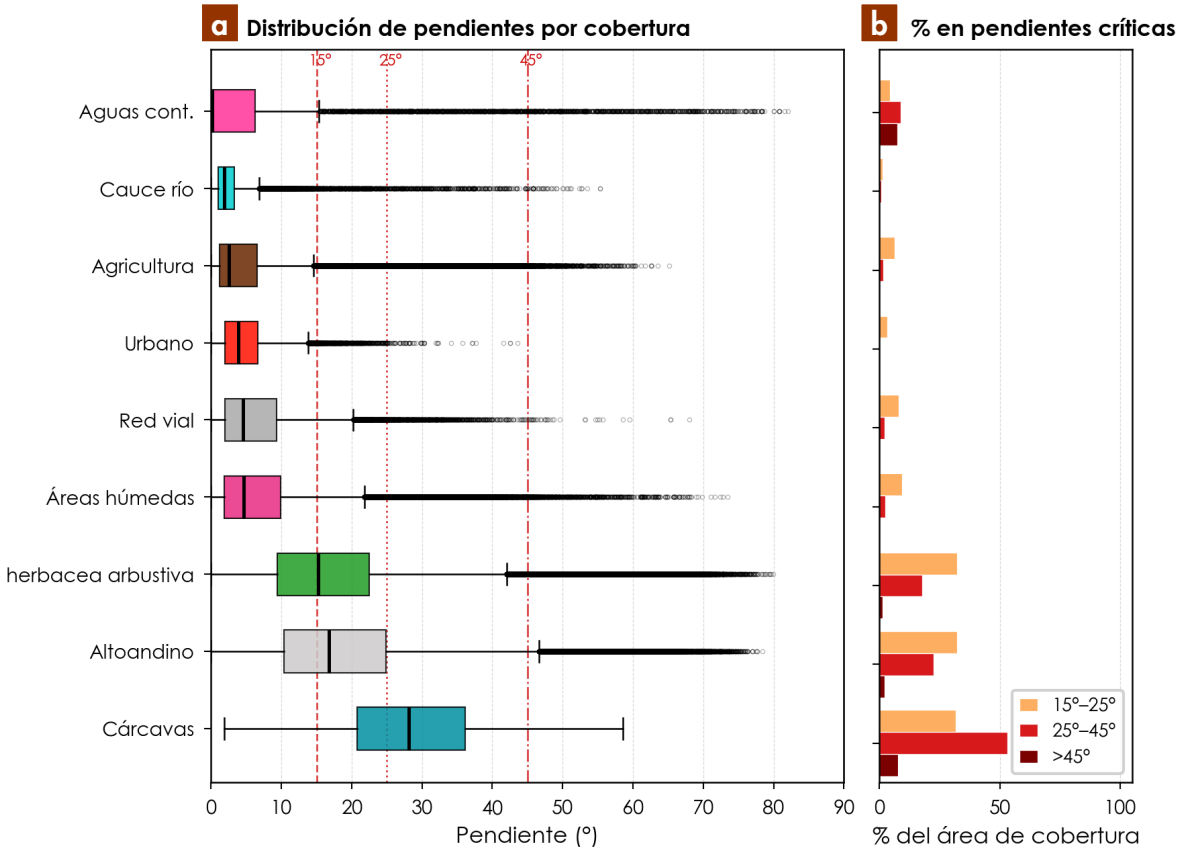


Figura 3.1.3. Análisis de pendientes por cobertura de suelo.

del Perú (Heidinger et al., 2018). La precipitación muestra estacionalidad marcada: temporada húmeda de octubre a abril (más del 80 % del total anual; pico en febrero, 151 mm; máximo histórico de 234 mm en P_{90}) y temporada seca (mayo-septiembre: de junio a agosto caen menos de 5 mm mensuales), lo que circunscribe la actividad erosiva a los siete meses húmedos.

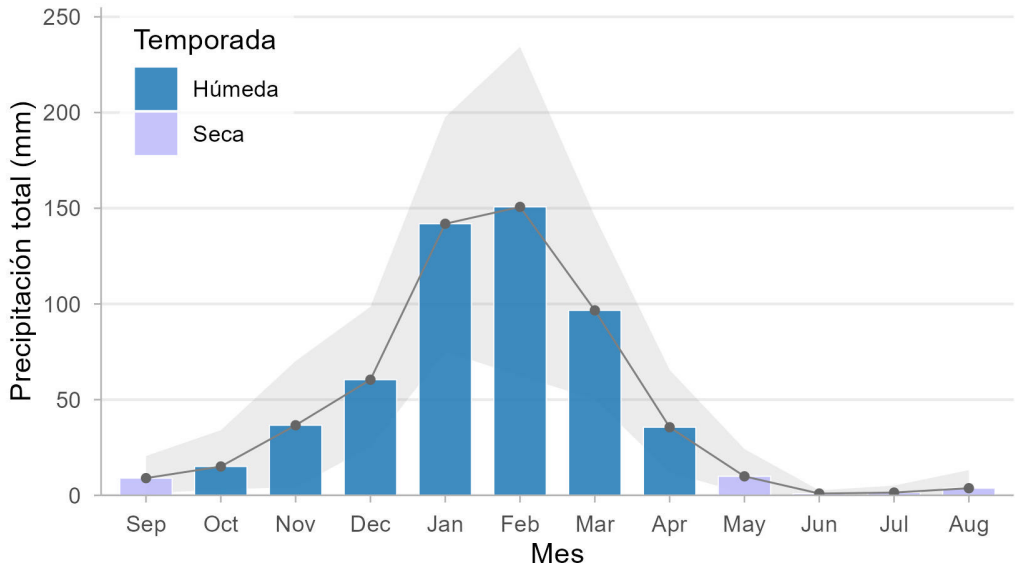


Figura 3.2.1. Climatología mensual de precipitación de la estación Charamaya (4163 m s. n. m.), periodo 1981-2024 (PISCO). Las barras representan la precipitación media mensual; la banda sombreada delimita el rango entre el percentil 10 (año seco) y el percentil 90 (año húmedo).

3.2.2 Régimen de precipitación (noviembre de 2023-mayo de 2024)

El IGP registró la precipitación mediante estaciones automáticas en Charamaya y Mañazo (Figura 3.2.2). Charamaya acumuló 589 mm (105 % de su media histórica), con febrero y marzo como meses de mayor aporte (167 mm y 170 mm); Mañazo acumuló 528 mm (80 % de su media histórica, Figura 3.2.3). Ambas registraron condiciones dentro del rango normal, lo que permite interpretar los resultados del capítulo 4 como respuesta a los contrastes de cobertura y uso del suelo, y no a condiciones atípicas; dado que se trata de una sola temporada de monitoreo, los valores constituyen una aproximación representativa y no una caracterización de largo plazo.

3.2.3 Ciclo diurno de la precipitación

El ciclo diurno en Charamaya muestra un máximo vespertino a las 17:00 horas (101 mm; 9 % de los eventos), con mínima actividad entre las 07:00 horas y 11:00 horas (Figura 3.2.4), lo



Figura 3.2.2. Estaciones meteorológicas automáticas instaladas por el IGP en el distrito de Mañazo. a) Estación Charamaya (4163 m s. n. m.), con panel solar, sensores múltiples y localidad al fondo; b) Estación Mañazo (3964 m s. n. m.).

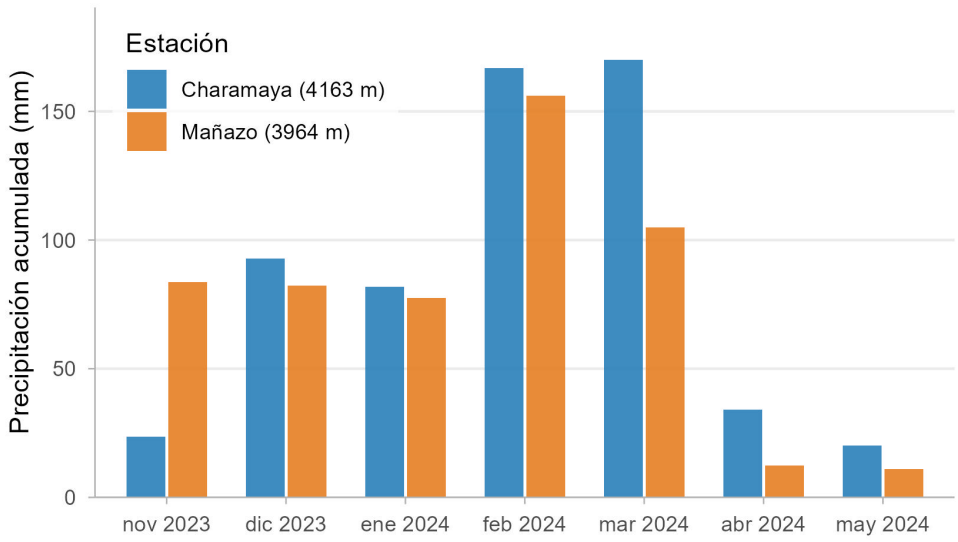


Figura 3.2.3. Precipitación mensual acumulada en las estaciones Charamaya y Mañazo durante la campaña de monitoreo (noviembre de 2023 a mayo de 2024). Datos registrados por el IGP.

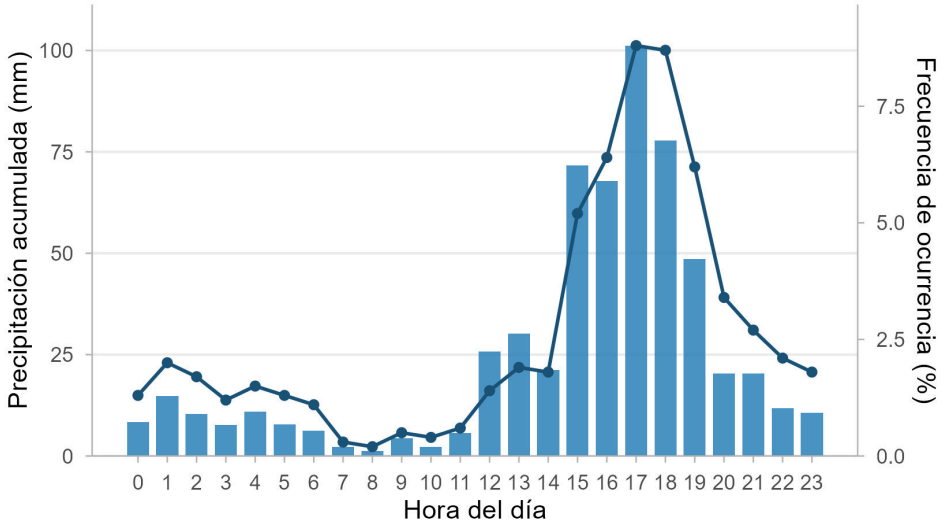


Figura 3.2.4. Ciclo diurno de precipitación registrado en la estación Charamaya (4163 m s. n. m.) durante la campaña de noviembre de 2023 a mayo de 2024. Las barras representan la precipitación acumulada por hora (eje izquierdo, mm); la línea con puntos indica la frecuencia de ocurrencia de lluvia por hora (eje derecho, %).

que es consistente con la convección orográfica vespertina del sur andino (Junquas et al., 2018). Esto implica que los eventos erosivos ocurren sobre suelos calentados y, cuando carecen de vegetación, con la superficie seca: las costras resultantes reducen la conductividad hidráulica y favorecen la escorrentía en eventos posteriores (Armenise et al., 2018), lo que es consistente con los patrones de escorrentía superficial del capítulo 4.

3.2.4 Intensidad y erosividad de los eventos de campaña

La erosividad se cuantificó mediante el índice EI_{30} (Brown & Foster, 1987; Yin et al., 2015). En Charamaya, de los 78 eventos registrados, los de baja intensidad (<5 mm/h) fueron los más frecuentes (41 eventos), pero aportaron solo el 26 % del volumen total; los de intensidad alta (10-20 mm/h) y extrema (>20 mm/h) concentraron, en conjunto, el 40 %. Mañazo presentó una distribución similar: 44 de 83 eventos fueron de baja intensidad (27 % del volumen total), mientras que los eventos de intensidad alta y extrema concentraron, en conjunto, el 40 % del volumen. La erosividad acumulada durante la campaña fue comparable en ambas estaciones: 911 MJ·mm·ha^{-1}·h^{-1} en Charamaya y 935 MJ·mm·ha^{-1}·h^{-1} en Mañazo. Asimismo, ambas estaciones presentaron una humedad antecedente similar (0.30 m^3/m^3), lo que sugiere que las diferencias en la pérdida de suelo entre estaciones (capítulo 4) no se explican principalmente por la erosividad registrada durante la campaña.

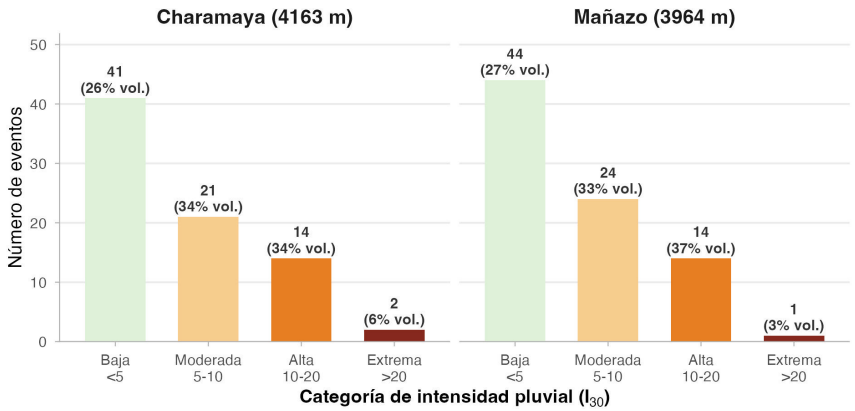


Figura 3.2.5. Clasificación de los eventos de precipitación en las estaciones Charamaya y Mañazo según categoría de intensidad I_{30} (mm/h). Las etiquetas indican el número de eventos y el porcentaje del volumen total de campaña (noviembre de 2023 a mayo de 2024).

3.3 Uso del suelo en las últimas décadas

3.3.1 Evolución espacio-temporal de las coberturas del suelo en el distrito de Mañazo (1988-2024)

La dinámica multitemporal de las coberturas del suelo muestra que Mañazo estuvo dominado por la vegetación herbácea o arbustiva (Hrb) a lo largo del periodo 1988-2024 (Figura 3.3.1). Esta cobertura disminuyó de 276 km² (67 %) en 1988 a 261 km² (64 %) en 2024 y alcanzó su menor extensión en 2015, con 249 km² (61 %). En contraste, las áreas agrícolas (Agr) aumentaron de 60 km² (15 %) a 77 km² (19 % ± 8) y registraron su máxima extensión también en 2015, con 82 km² (20 %). Entre el inicio y el final del periodo, la superficie agrícola aumentó cerca de 18 km², lo que constituyó el cambio más marcado dentro de la estructura general de coberturas del distrito.

Las áreas altoandinas con escasa o sin vegetación (SVg) fluctuaron entre 41 km² y 52 km² y finalizaron en 2024 con 41 km² (10 % ± 13), frente a 47 km² en 1988. Las áreas húmedas continentales (AHu) variaron entre 23 km² y 34 km² y pasaron de 27 km² a 29 km² (7 % ± 12). En ambas coberturas, las diferencias entre el inicio y el final del periodo son menores que sus márgenes de incertidumbre, por lo que no sustentan una tendencia definida. Las aguas continentales permanecieron por debajo de 1 km², mientras que el área urbanizada aumentó

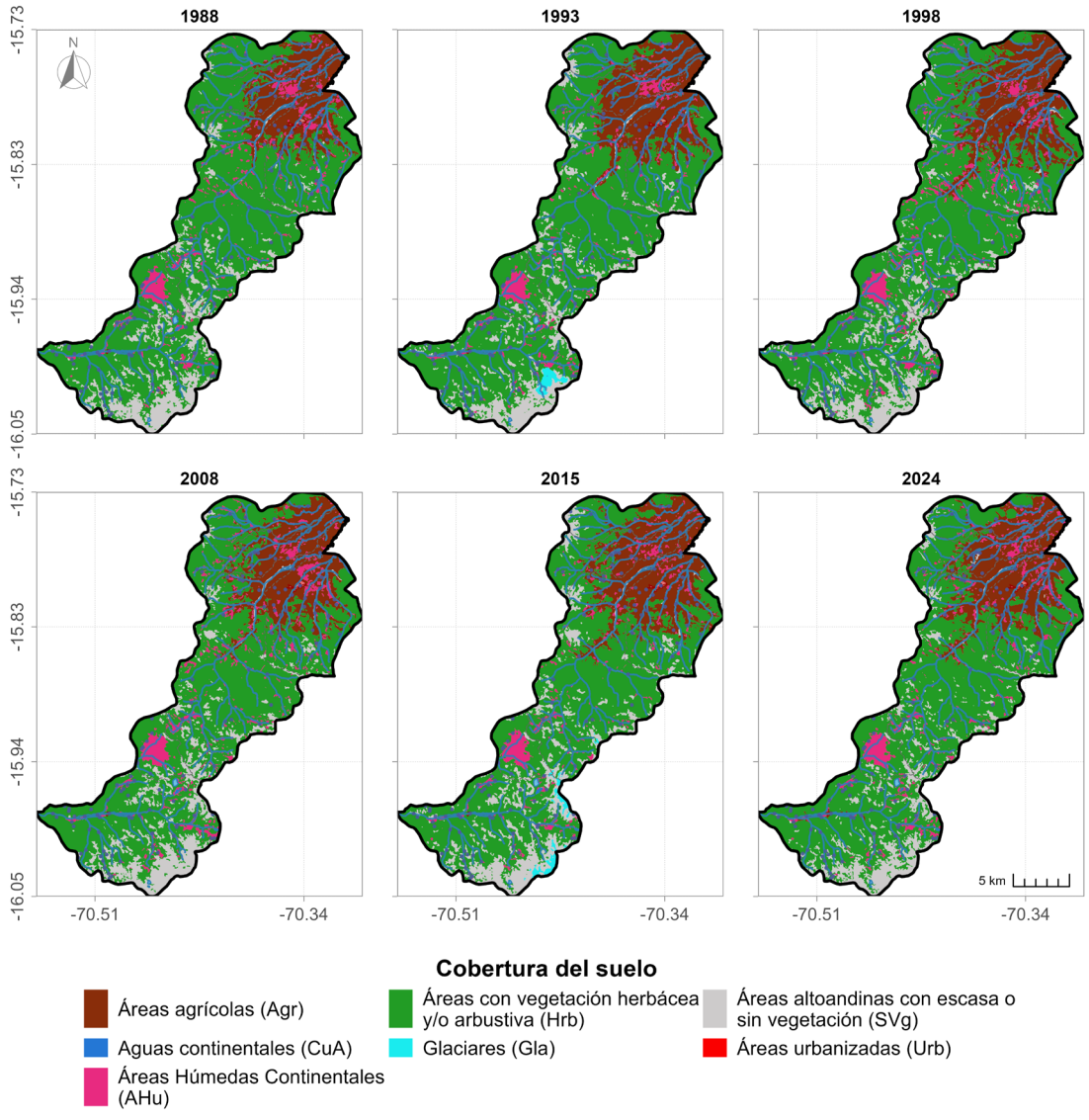


Figura 3.3.1. Evolución espacio-temporal de la cobertura y uso del suelo en el distrito de Mañazo durante la época húmeda, periodo 1988-2024.

de aproximadamente 9 ha a 68 ha. La cobertura glaciar tuvo una presencia discontinua, con cerca de 3 km² en 1993 y 4 km² en 2015. En conjunto, el paisaje mantuvo el predominio de la vegetación herbácea o arbustiva, mientras la principal modificación observada correspondió al aumento de la superficie clasificada como agrícola.

3.3.2 Evolución de la cobertura y uso del suelo por subcuenca (1988-2024)

La composición multitemporal por subcuenca evidencia una marcada diferenciación territorial (Figura 3.3.2). En 2024, la vegetación herbácea o arbustiva continuó dominando ampliamente en Charamaya, Conaviri y Tarucani, donde ocupó 78 km² (71 %), 100 km² (72 %) y 13 km² (65 %), respectivamente. Charamaya presentó además 24 km² de áreas altoandinas con escasa o sin vegetación (22 %), mientras que en Tarucani las áreas húmedas continentales alcanzaron 5 km² (27 %). La agricultura tuvo una presencia mínima en Charamaya, con cerca de 1 km² (1 %), y no registró una superficie significativa en Tarucani.

La ocupación agrícola fue mayor en Yanarico, Quilpache y Tiracoma. Yanarico presentó 18 km² de agricultura, equivalentes al 47 % de su superficie, y fue la única de estas tres subcuencas donde esta cobertura superó a la vegetación herbácea o arbustiva, que ocupó 16 km² (40 %). En Quilpache, la agricultura alcanzó 27 km² (39 %) frente a 36 km² de cobertura herbácea (51 %); en Tiracoma ocupó 11 km² (34 %) frente a 18 km² (56 %). Sin embargo, el mayor crecimiento de la superficie agrícola desde 1988 ocurrió en Conaviri (+7 km²) y Quilpache (+6 km²), seguido por Yanarico (+2 km²), Charamaya (+1 km²) y Tiracoma (+1 km²). Para 2024, Conaviri, Quilpache y Yanarico reunían 65 km² de agricultura, equivalentes al 84 % del total distrital. La evolución por subcuenca muestra, por tanto, que el avance agrícola se concentró en sectores específicos, mientras Charamaya y Tarucani conservaron una estructura predominantemente natural.

3.3.3 Ganancias, pérdidas y persistencia de coberturas del suelo (1988-2024)

Entre 1988 y 2024, 336 km² (82 %) conservaron la misma clase de cobertura, mientras 74 km² (18 %) experimentaron algún cambio (Figura 3.3.3). La mayor superficie persistente

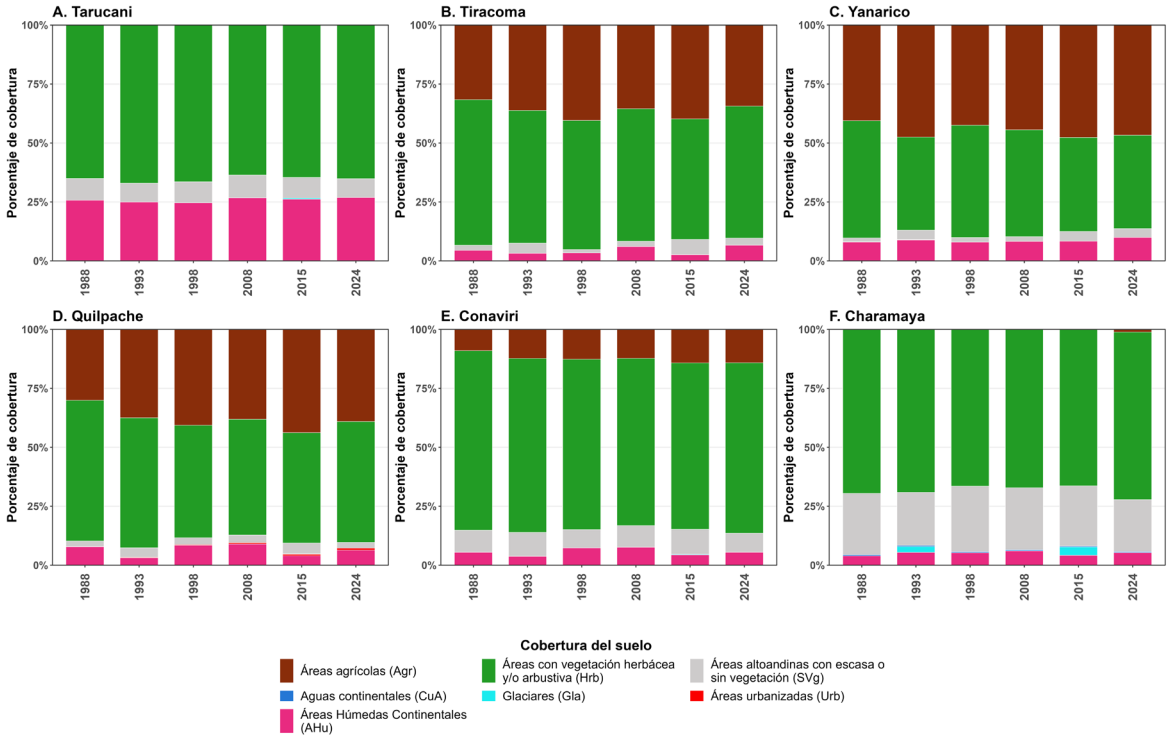


Figura 3.3.2. Composición multitemporal de la cobertura y uso del suelo por subcuenca durante la época húmeda, periodo 1988-2024.

correspondió a la vegetación herbácea o arbustiva (Hrb), con 240 km²; durante el mismo periodo, esta cobertura perdió 37 km² y ganó 21 km², por lo que su extensión final fue menor que la registrada en 1988. Las áreas agrícolas (Agr) conservaron 50 km², ganaron 27 km² y perdieron 9 km², lo que resultó en un incremento neto de 18 km². Las áreas altoandinas con escasa o sin vegetación (SVg) mantuvieron 31 km², ganaron 10 km² y perdieron 15 km², con un balance de –5 km².

Las áreas húmedas continentales (AHu) conservaron 15 km², pero también registraron 15 km² de ganancia y 12 km² de pérdida. Aunque su superficie distrital cambió poco entre 1988 y 2024, estas ganancias y pérdidas muestran que parte de los humedales modificó su distribución espacial durante el periodo. El área urbanizada, por su parte, conservó aproximadamente 9 ha y ganó cerca de 60 ha. En conjunto, los resultados muestran un territorio mayoritariamente estable, pero con cambios localizados: la agricultura presentó el principal incremento de superficie, mientras que la vegetación herbácea y las áreas con escasa vegetación registraron pérdidas netas y los humedales mostraron una importante redistribución espacial.

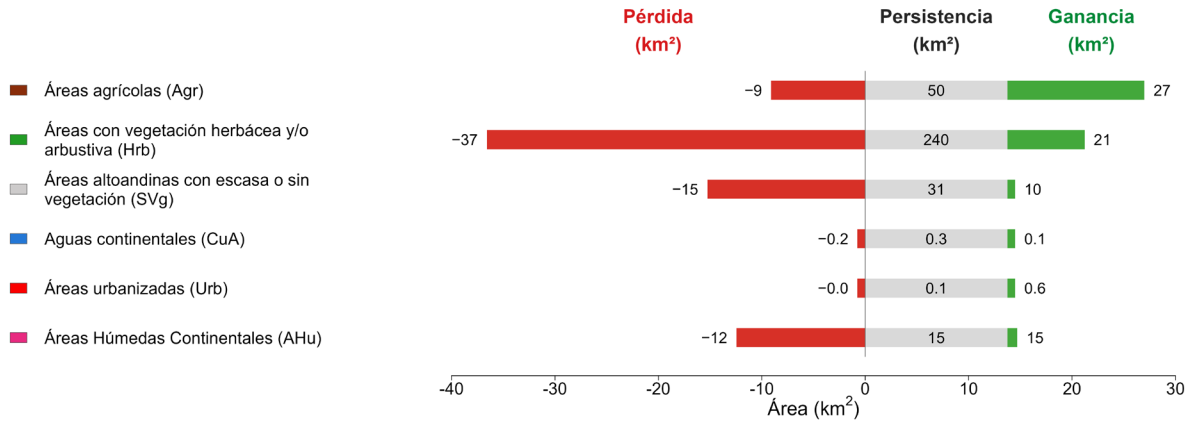


Figura 3.3.3. Ganancia, pérdida y persistencia de las coberturas del suelo en Mañazo durante la época húmeda, periodo 1988-2024.

4. Diagnóstico de la erosión

4.1 Historia de las últimas seis a diez décadas

El Perú carece de registros continuos de erosión, lo que limita el análisis de los cambios del paisaje a escala decadal. Los radioisótopos Cs-137 y Pb-210ex reconstruyen esta historia mediante su señal en el perfil edáfico. El Cs-137, producto de las pruebas nucleares atmosféricas de mediados del siglo XX, registra la pérdida de suelo de los últimos 61 años (1963-2024). El Pb-210ex, de origen natural, amplía esta ventana a 100 años (1924-2024). Al comparar el inventario de cada trazador entre un punto de ladera y un sitio de referencia no perturbado, se cuantifica la redistribución neta de suelo.

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

a. Diseño de muestreo

Se recolectaron 125 testigos de suelo con un muestreador cilíndrico de 8 cm de diámetro y 20 cm de profundidad (Figuras 4.1.1 y 4.1.2). El muestreo cubrió los cuatro usos del suelo predominantes del distrito (agricultura, pajonal, suelos desnudos y bofedales) a lo largo de todo el gradiente altitudinal (3862-4965 m s. n. m.) y con pendientes desde <2° hasta >25°.

Los sitios de referencia se laminaron en capas de 5 cm; los testigos de redistribución se analizaron como núcleo completo. En total se generaron 160 muestras, secadas, tamizadas y analizadas por espectrometría gamma. El Cs-137 se detectó en 115 muestras (72 %); en las 45 restantes,

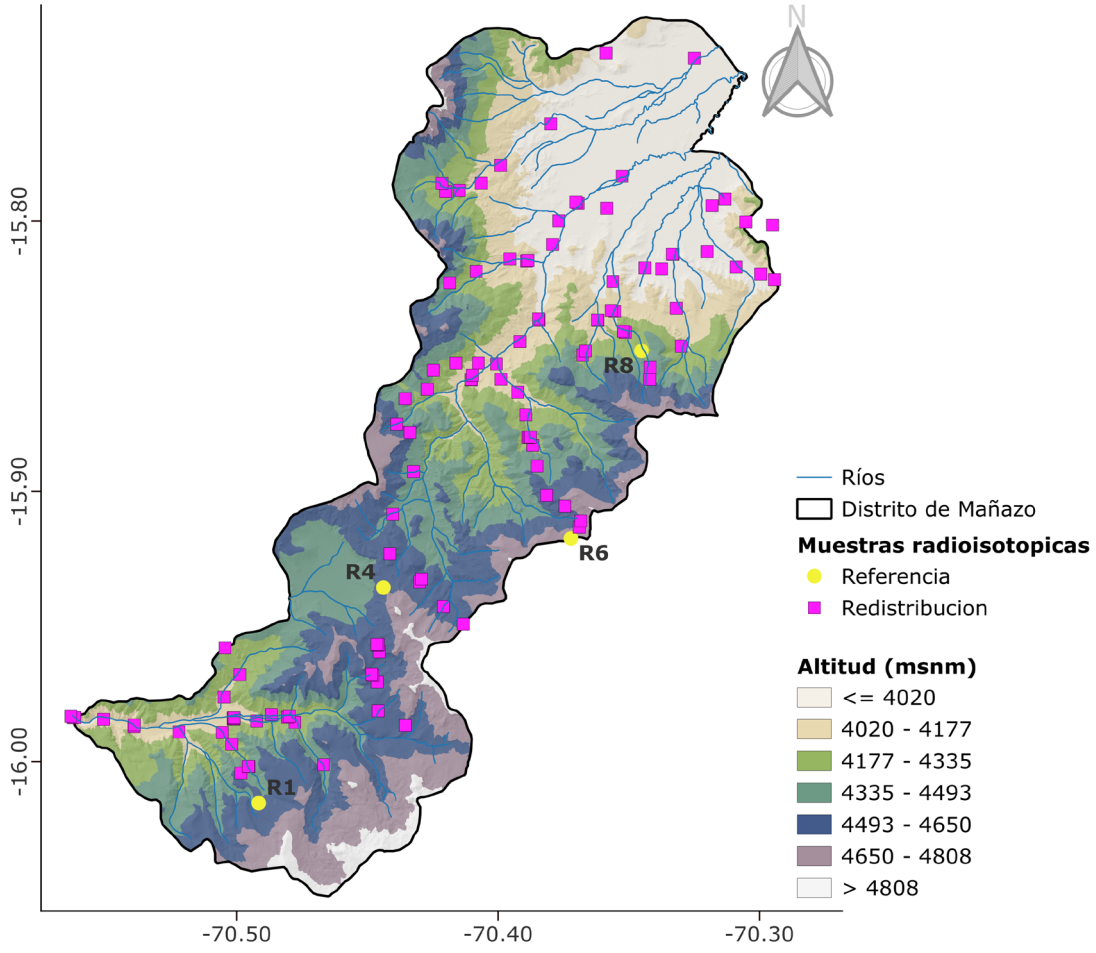


Figura 4.1.1. Muestras recolectadas en sitios de redistribución y referencia en el distrito de Mañazo.

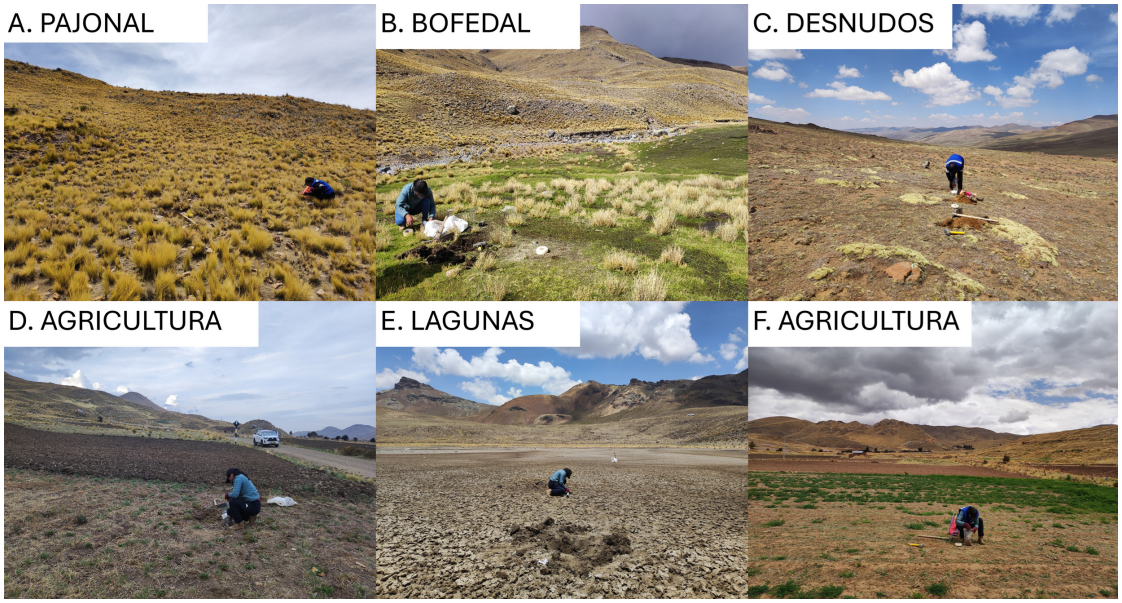


Figura 4.1.2. Evidencia fotográfica del muestreo en las diversas coberturas de suelos.

su actividad quedó por debajo del límite de detección (LD = 0.1 Bq kg^{-1}; Currie, 1968; 95 % de confianza). El Pb-210ex se detectó en 124 muestras (78 %). En ambos casos, las muestras bajo el LD del respectivo radionucleido se excluyeron de los cálculos.

b. Validación de los sitios de referencia

Se identificaron cuatro sitios de referencia (R1, R4, R6 y R8) en áreas planas de mínima intervención humana. En todos, el inventario decreció exponencialmente desde la superficie hasta los 15 cm (Figura 4.1.3).

El coeficiente de variación (CV) entre los cuatro puntos fue 32 % para Cs-137 y 37 % para Pb-210ex, diferencia que puede reflejar el gradiente de precipitación y la variabilidad local del depósito. Además de ubicarse en vertientes distintas, cada sitio se asignó a un piso altitudinal y una subcuenca específicos:

- R1: subcuenca Charamaya, altitudes <4493 m s. n. m.
- R4: subcuenca Charamaya (cotas >4493 m s. n. m.) y cabecera de la vertiente Titicaca (>4493 m s. n. m.)
- R6: vertiente Titicaca, 4177-4493 m s. n. m.
- R8: vertiente Titicaca, <4177 m s. n. m.

4.1.2 Diagnóstico de la pérdida de suelo por uso de tierra

Las tasas de redistribución de suelo se estimaron mediante los modelos de perfil de Soto y Navas para suelos no cultivados (2004) y cultivados (2008) para Cs-137, y mediante los modelos de balance de masa para suelos cultivados (Walling & He, 1999) y de difusión-migración para suelos no cultivados (Walling et al., 2002) para Pb-210ex.

Los resultados por cobertura se presentan en la Figura 4.1.4. Los suelos desnudos registran las tasas más altas del distrito: 42 t/ha/año (Cs-137) y 30 t/ha/año (Pb-210ex). La agricultura ocupa el segundo lugar, con 16 t/ha/año y 15 t/ha/año, respectivamente. La alta variabilidad entre parcelas agrícolas (DS: ±15 t/ha/año para Cs-137 y ±9 t/ha/año para Pb-210ex) indica que no todas pierden suelo al mismo ritmo, posiblemente por diferencias en intensidad de labranza, características edáficas y topografía local: los suelos agrícolas muestreados tuvieron una pendiente media menor (6°, DS: ±6°) que los suelos desnudos (9°, DS: ±2°).

Los pajonales registran las pérdidas más bajas entre las coberturas con pérdida neta: 11 t/ha/año (Cs-137) y 6 t/ha/año (Pb-210ex), con alta variabilidad (DS: ±21 t/ha/año y ±13 t/ha/año, respectivamente). Esta dispersión se explica en parte por el mayor tamaño muestral (n = 55) y por el rango más amplio de pendientes en esta cobertura (media de 12°, DS: ±7°).

El bofedal es la única cobertura con balance positivo en ambos periodos (3 t/ha/año para los dos trazadores), con baja variabilidad entre sitios (DS: ±2 t/ha/año) y pendientes medias bajas (4°, DS: ±2°). Desde la gestión territorial, bofedales y pajonales constituyen infraestructura natural de regulación que merece protección prioritaria.

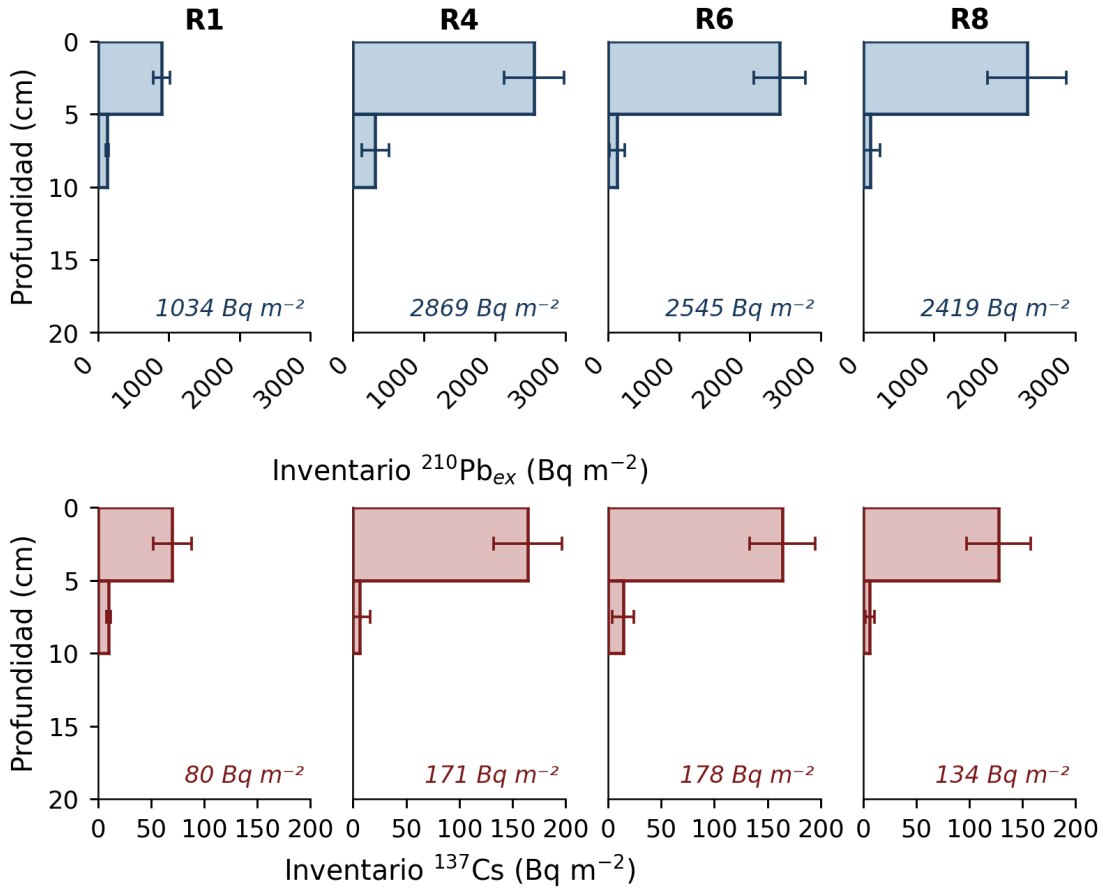


Figura 4.1.3. Distribución de Pb-210ex y Cs-137 en el perfil del suelo de sitios de referencia.

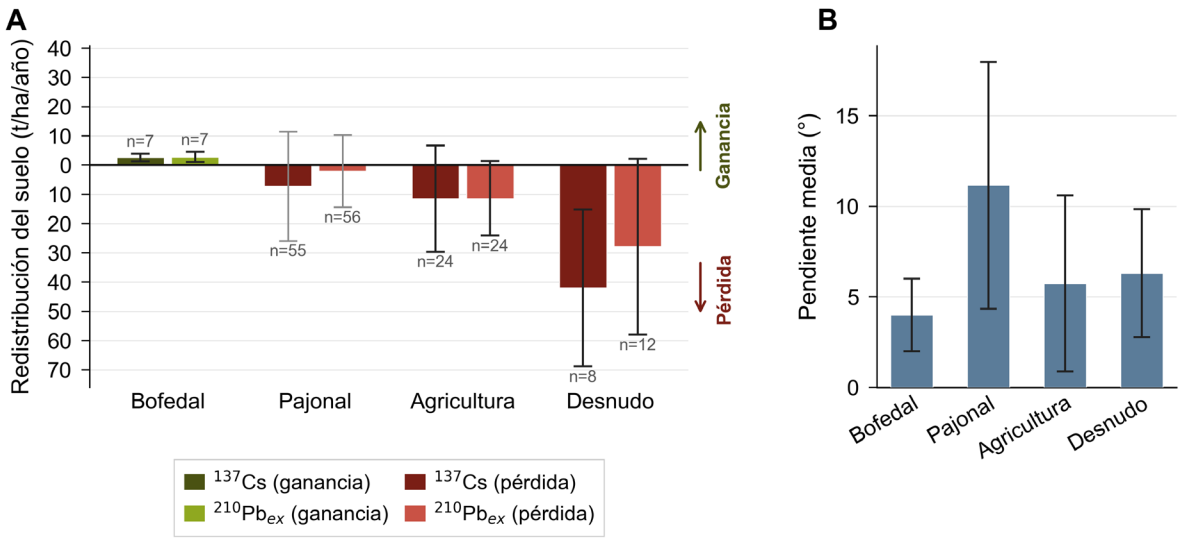


Figura 4.1.4. Balance de redistribución de suelo según cobertura vegetal. Barras rojas: pérdida; barras verdes: ganancia (t/ha/año), estimadas mediante Cs-137 y Pb-210ex. Barras de error: desviación estándar.

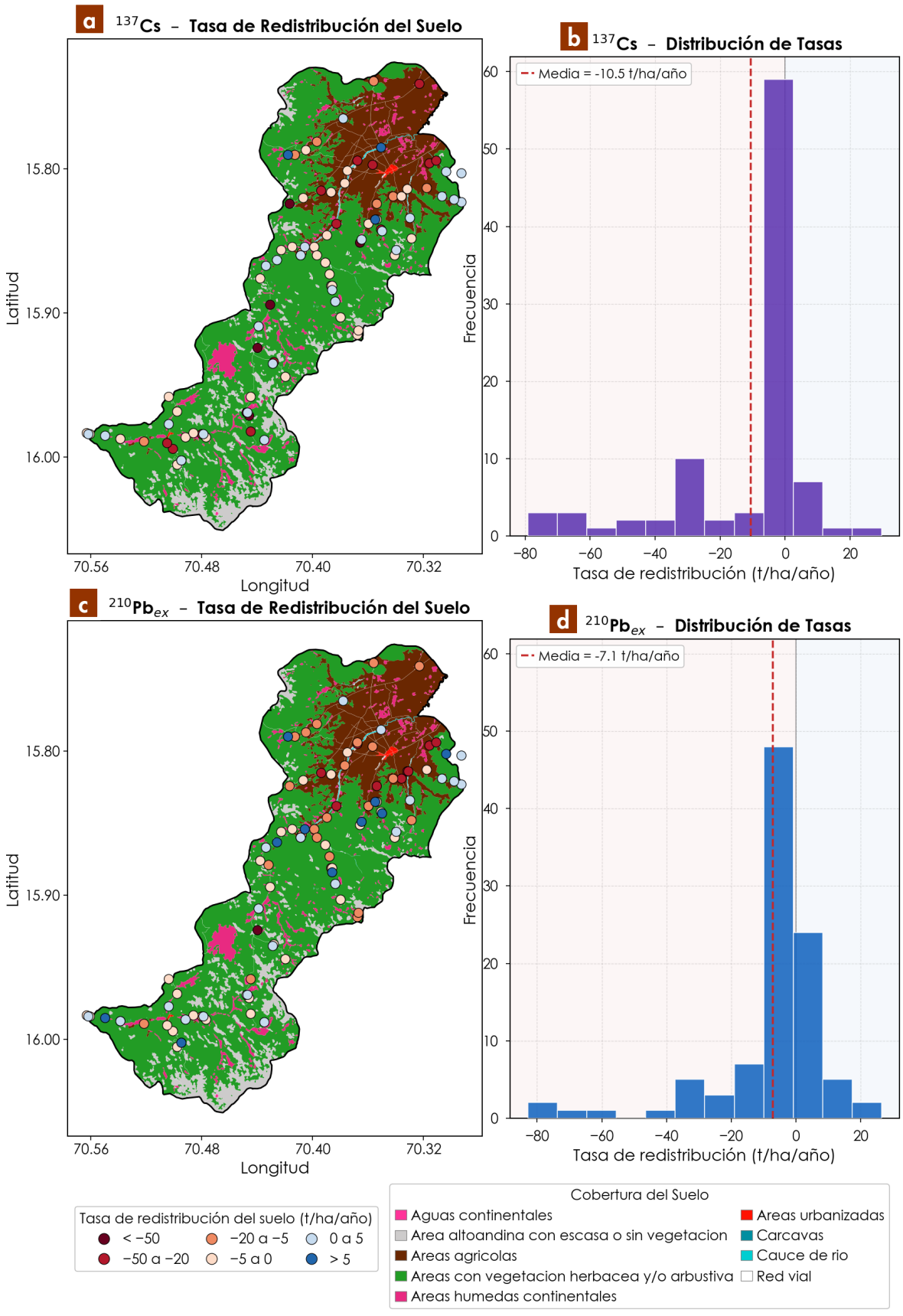


Figura 4.1.5. Distribución espacial de las tasas de redistribución estimadas mediante Cs-137 (a) y Pb-210ex (c), con histogramas distritales (b y d).

4.1.3 Factores que controlan la variabilidad espacial

La cobertura vegetal es el factor dominante de la variabilidad espacial en la redistribución de suelo del distrito. Las diferencias entre coberturas son estadísticamente robustas en ambos trazadores (Kruskal-Wallis: Cs-137, $H = 27.67$, $gl = 3$, $p = 4.3 \times 10^{-6}$, $\eta^2 = 0.27$; Pb-210ex, $H = 28.24$, $gl = 3$, $p = 3.2 \times 10^{-6}$, $\eta^2 = 0.27$), y explican cerca del 27 % de la varianza total.

El *post hoc* de Dunn (Tabla 4.1.1) muestra, para Pb-210ex, un patrón consistente: suelo desnudo y agricultura no se diferencian ($p = 0.65$), pero ambos difieren de pajonal y bofedal ($p \leq 0.002$); estos dos últimos tampoco se diferencian entre sí ($p = 0.062$). Con Cs-137, el patrón es más heterogéneo: todas las coberturas difieren entre sí, incluidos suelo desnudo frente a agricultura ($p = 0.04$) y pajonal frente a bofedal ($p = 0.008$).

La comparación entre coberturas perturbadas (agricultura, desnudo; n = 32-36) y perennes (pajonal, bofedal; n = 62-63) cuantifica esta diferencia. Las coberturas perturbadas pierden entre 3.1 y 11.6 veces más suelo (Mann-Whitney unilateral: Cs-137, $p = 3.8 \times 10^{-6}$, $r = 0.41$; Pb-210ex, $p = 4.3 \times 10^{-7}$, $r = 0.49$).

La topografía, en cambio, no ejerce un control independiente sobre la erosión. Las correlaciones entre variables topográficas y tasas de redistribución son débiles: ninguna supera $|r| = 0.49$ a nivel global. Al controlar por cobertura mediante correlación parcial de Spearman, solo una de las 70 combinaciones evaluadas se mantiene significativa: log(SPI) con Pb-210ex a nivel global ($r = 0.26$; $p < 0.05$). Otras tres celdas quedan en el rango marginal ($p < 0.10$): pendiente global con Pb-210ex ($r = 0.20$†), log(SPI) global con Cs-137 ($r = 0.19$†), y curvatura de perfil en pajonal ($r = 0.23$†) y en suelo desnudo ($r = 0.55$†), pero ninguna variable topográfica resulta consistente en ambos trazadores simultáneamente (Figura 4.1.6).

Tabla 4.1.1. *Post hoc* de Dunn (p ajustado por Benjamini-Hochberg) para Cs-137 y Pb-210ex. *** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$.

Cs-137				
Cobertura	**Desnudo**	**Agricultura**	**Pajonal**	**Bofedal**
Desnudo	—	0.0405 *	0.0006 ***	0.0000 ***
Agricultura	0.0405 *	—	0.0374 *	0.0004 ***
Pajonal	0.0006 ***	0.0374 *	—	0.0080 **
Bofedal	0.0000 ***	0.0004 ***	0.0080 **	—
Pb-210ex				
Cobertura	**Desnudo**	**Agricultura**	**Pajonal**	**Bofedal**
Desnudo	—	0.6502 ns	0.0015 **	0.0004 ***
Agricultura	0.6502 ns	—	0.0005 ***	0.0004 ***
Pajonal	0.0015 **	0.0005 ***	—	0.0623 ns
Bofedal	0.0004 ***	0.0004 ***	0.0623 ns	—

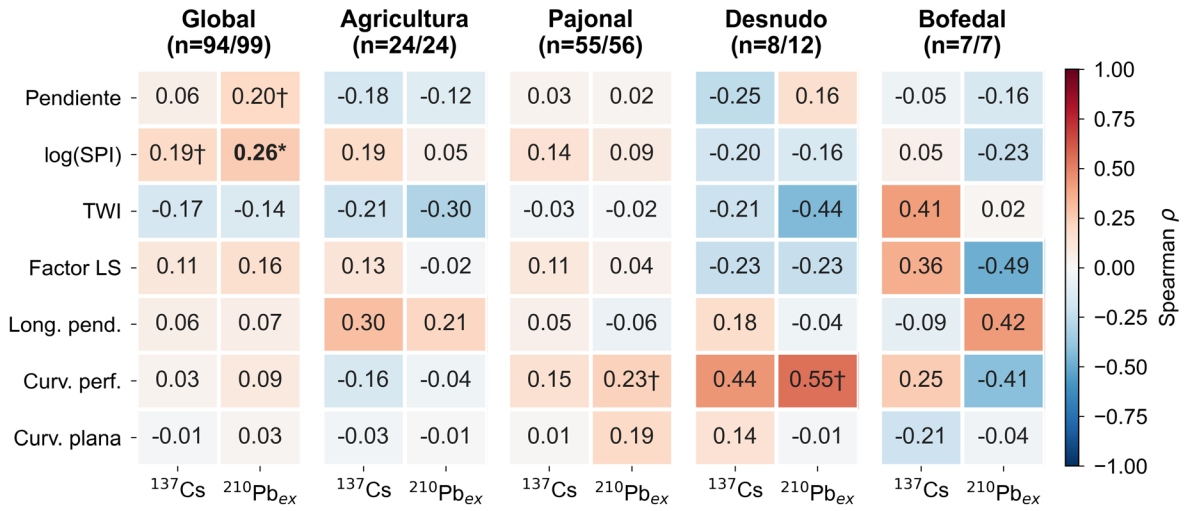


Figura 4.1.6. Correlaciones de Spearman (r) entre variables topográficas y tasas de redistribución del suelo: † $p < 0.10$; * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

4.2 Dinámica y monitoreo de la erosión actual

4.2.1 Red de microparcelas y sistema de monitoreo

El monitoreo de la erosión hídrica en el distrito de Mañazo se realizó mediante una red de 29 microparcelas experimentales de 1 m², distribuidas en dos estaciones: 15 en Charamaya (4163 m s. n. m.) y 14 en Mañazo (3964 m s. n. m.) (Figura 4.2.1). En Charamaya se monitorearon cuatro grupos de cobertura: pajonal (5 parcelas), pajonal con quema controlada previa al periodo de monitoreo (3 parcelas), pastos naturales (4 parcelas) y azorella (3 parcelas). En Mañazo se monitorearon tres grupos: suelo desnudo (7 parcelas), cultivo de papa (5 parcelas) y pajonal (2 parcelas). La resolución temporal del registro meteorológico fue de 5 minutos en Charamaya y 1 minuto en Mañazo. Para el cálculo del índice de erosividad EI_{30}, se preservó la resolución nativa de cada estación.



Figura 4.2.1. Microparcela experimental de 1 m² instalada en la estación Charamaya, con cobertura de pajonal (estación Charamaya, 4163 m s. n. m.).

4.2.2 Escorrentía superficial según cobertura

El coeficiente de escorrentía (RC) en Charamaya muestra una jerarquía clara: pajonal quemado (mediana 25 %), pastos (21 %), azorella (17 %) y pajonal sin quemar, con el RC más bajo (12 %) (Figura 4.2.2). Esta menor escorrentía es consistente con la densidad radicular y la capa orgánica de pajonales no perturbados, que favorecen la infiltración (Buytaert et al., 2006; Molina et al., 2007); la azorella, con su arquitectura en cojín, favorece igualmente la conductividad hidráulica y el almacenamiento superficial (Páez-Bimos et al., 2022). El pajonal quemado registra un RC dos veces mayor que el del pajonal sin quemar, reflejo de la menor infiltración por la eliminación de la cobertura y la alteración de la estructura del suelo (Molina et al., 2007).

Mañazo registra un RC global de 40 %, significativamente superior al de Charamaya (24 %), diferencia que responde a los tipos de cobertura de cada estación y no a condiciones climáticas atípicas durante la campaña (capítulo 3.2). El cultivo de papa presenta el RC más alto de Mañazo (43 %), seguido por suelo desnudo (35 %) y pajonal (32 %): la conversión a usos agrícolas y la exposición del suelo sin vegetación reducen la infiltración e incrementan la escorrentía en laderas andinas (Galindo et al., 2022; Molina et al., 2007).

4.2.3 Pérdida de suelo por evento

La pérdida de suelo por evento en Charamaya muestra diferencias marcadas entre coberturas: pajonal quemado (mediana 1.4 g/m²), pastos (0.5 g/m²), y azorella y pajonal sin quemar, con pérdidas equivalentes (0.3 g/m² en ambos casos) (Figura 4.2.3). La mediana del pajonal quemado es cerca de cinco veces la del pajonal sin quemar, resultado consistente con los efectos documentados de la quema sobre la erodibilidad: la eliminación de la cobertura, la repelencia al agua inducida y la alteración de la estructura del suelo incrementan el desprendimiento de las partículas y la escorrentía (Poulenard et al., 2001; Coaguila et al., 2025).

Mañazo registra pérdidas por evento sustancialmente mayores, con medianas de 15 g/m² para papa, 13 g/m² para suelo desnudo y 9 g/m² para pajonal —hasta 35 veces la mediana global de Charamaya—, pues el suelo desnudo y la papa exponen directamente la superficie edáfica al impacto de las gotas y la escorrentía, a diferencia del pajonal y la azorella dominantes en Charamaya (Galindo et al., 2022). Los máximos por evento confirman el riesgo ante precipitaciones intensas: en Charamaya, el pajonal quemado alcanzó 46 g/m², frente a 5 g/m² del pajonal sin quemar; en Mañazo, el suelo desnudo registró el valor más alto

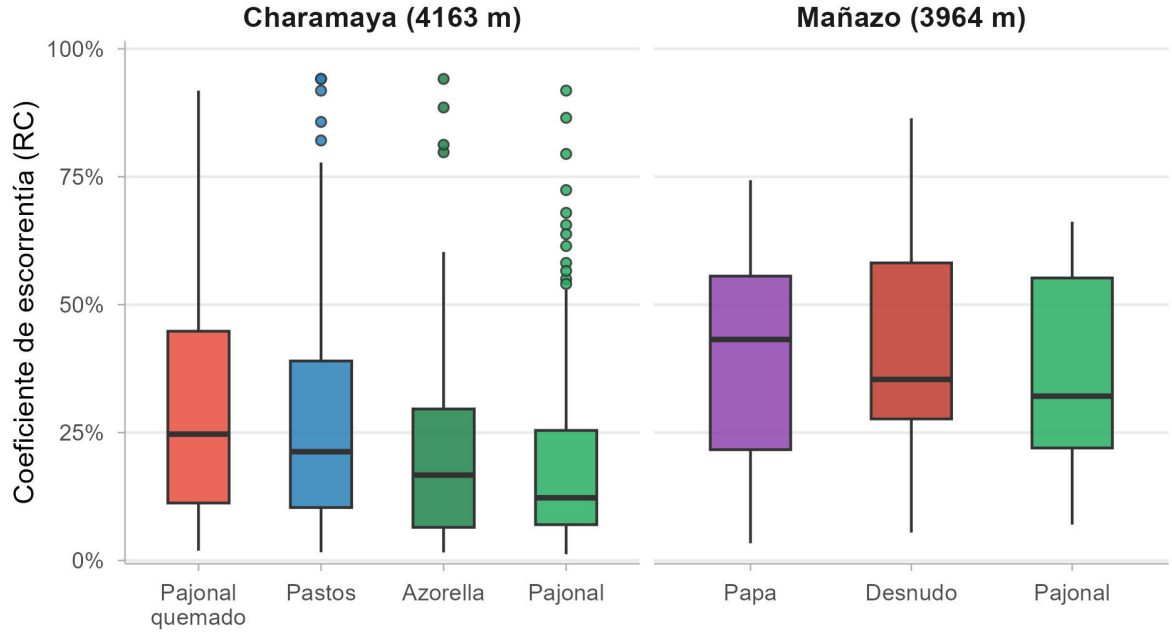


Figura 4.2.2. Coeficiente de escorrentía (RC) por tipo de cobertura en las estaciones Charamaya y Mañazo, campaña de noviembre de 2023 a mayo de 2024. La línea central indica la mediana.

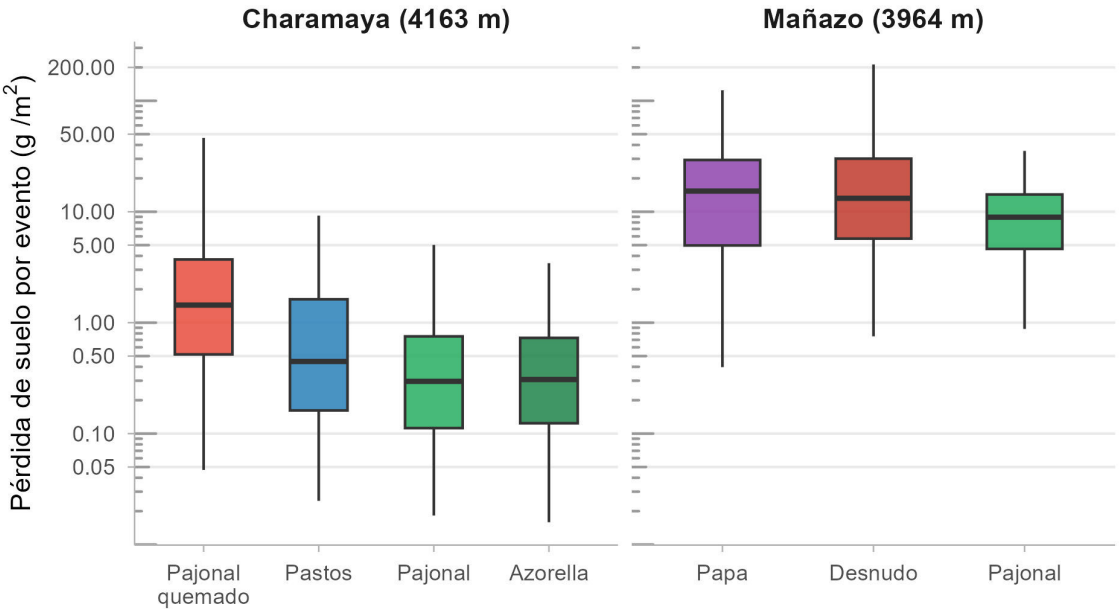


Figura 4.2.3. Pérdida de suelo por evento (g/m²) según tipo de cobertura en las estaciones Charamaya y Mañazo, campaña de noviembre de 2023 a mayo de 2024. Escala logarítmica en el eje vertical. La línea central indica la mediana.

del distrito (213 g/m²), seguido por el cultivo de papa (124 g/m²). Estas pérdidas se registraron durante eventos con valores de I_{30} de 18 mm/h a 20 mm/h; en particular, el evento asociado a la pérdida de 213 g/m² superó los 20 mm/h y correspondió a la clase extrema. Las láminas de precipitación asociadas fueron moderadas, entre 11 mm y 17 mm.

Los sedimentos exportados están dominados por la fracción fina (menor a 11 µm, 88-93 % del total) sin diferencias sustanciales entre coberturas ni estaciones, lo que implica un empobrecimiento progresivo en materia orgánica, nutrientes y capacidad de intercambio catiónico y afecta la fertilidad de los suelos del distrito (Ebabu et al., 2023).

4.2.4 Factores que controlan la pérdida de suelo y modelo predictivo

El análisis de correlaciones de Spearman entre la pérdida de suelo por evento y las variables predictoras identifica al RC como predictor dominante (r = 0.67), seguido por la fracción de arenas (r = 0.54) y la erosividad EI_{30} (r = 0.50) (Figura 4.2.4). La cobertura vegetal presenta correlación negativa (r = −0.37), lo que cuantifica su efecto protector; la humedad antecedente es prácticamente nula (r = 0.04), lo que indica que la partición lluvia-escorrentía respondió a la cobertura y el uso del suelo, no al estado hídrico previo del perfil.

Esta jerarquía sustenta un modelo predictivo calibrado para Charamaya, basado en el marco conceptual del modelo TEST (Van Dijk & Bruijnzeel, 2004; Van Dijk et al., 2002), que integra la erosividad combinada de lluvia y escorrentía ($EI_{30} \cdot RC$), la cobertura vegetal (Vc) y la fracción de finos del suelo menor que 0.15 mm (Ff) mediante la siguiente ecuación:

$$\log(SL) = 0.62 + 0.53 \cdot \log(EI_{30} \cdot RC) - 0.018 \cdot Vc - 0.020 \cdot Ff$$

Donde SL es la pérdida de suelo por evento (g/m²); EI_{30}, la erosividad (MJ·mm·ha^{-1}·h^{-1}); RC, el coeficiente de escorrentía expresado como fracción (0-1); Vc, la cobertura vegetal (%); y Ff, la fracción de finos del suelo con tamaño inferior a 0.15 mm (%).

El modelo se calibró con 576 eventos de Charamaya (n = 462 para calibración y n = 114 para validación). Alcanzó un R^2 de 0.57 en la calibración y de 0.55 en la validación, con resultados consistentes entre ambos conjuntos (Figura 4.2.5). La razón del error cuadrático medio (RMSE), calculada en escala logarítmica natural, fue de 0.951 en la calibración y de 0.984 en la validación. El exponente 0.53 del producto $EI_{30} \cdot RC$ refleja una respuesta sublineal ante el incremento conjunto

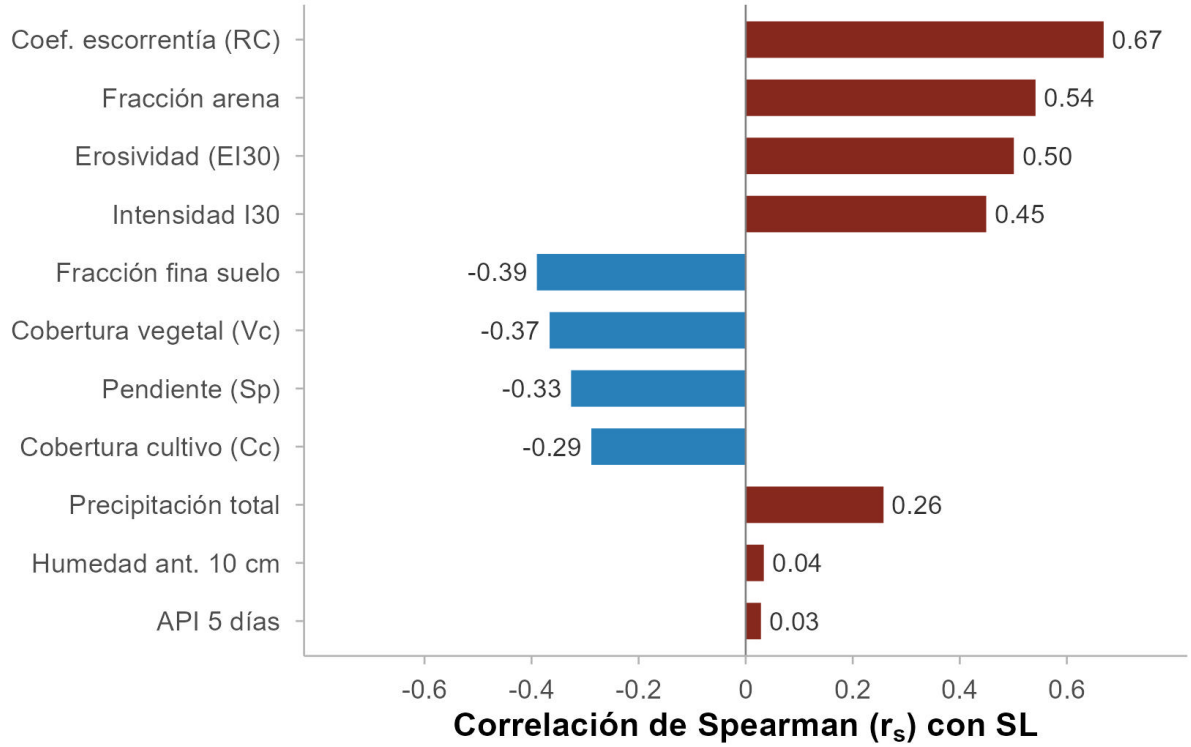


Figura 4.2.4. Correlaciones de Spearman entre la pérdida de suelo por evento y las variables predictoras, conjunto distrital de Mañazo (n = 806). Barras a la derecha: correlación positiva; a la izquierda: negativa.

de la erosividad y la escorrentía. Manteniendo constantes los demás términos del modelo, cada punto porcentual adicional de cobertura vegetal reduce aproximadamente en 1.7 % la pérdida de suelo estimada; un incremento de 10 puntos porcentuales representa una reducción aproximada del 16 %, lo que confirma la función protectora de la cobertura vegetal.

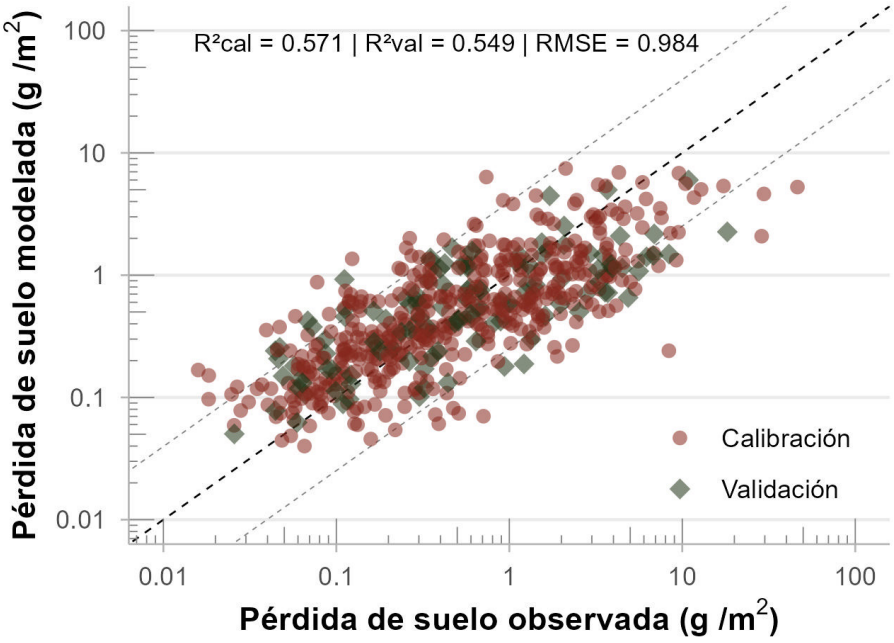


Figura 4.2.5. Valores observados frente a los predichos por el modelo TEST extendido, pérdida de suelo por evento (g/m²), escala logarítmica, estación Charamaya. Línea discontinua: 1:1. R^2 de calibración = 0.57; R^2 de validación = 0.55; RMSE = 0.984.

4.2.5 Proyección anualizada y umbrales de tolerancia

Las tasas de pérdida de suelo anualizadas muestran contrastes marcados entre coberturas y estaciones (Figura 4.2.6). En Mañazo, el suelo desnudo y el cultivo de papa superan el umbral global de tolerancia de 10 t/ha/año (Borrelli et al., 2017), con tasas de 14 t/ha/año y 12 t/ha/año en año normal (hasta 18 t/ha/año y 16 t/ha/año en año húmedo, P_{90}); el pajonal de Mañazo (5 t/ha/año) permanece por debajo del umbral en todos los escenarios, al igual que los pastos (1.2 t/ha/año), la azorella (0.6 t/ha/año) y el pajonal sin quemar (0.5 t/ha/año) de Charamaya.

El hallazgo más destacado en Charamaya es el efecto de la quema controlada: el pajonal quemado registra 4 t/ha/año, ocho veces la tasa del pajonal sin quemar (0.5 t/ha/año), diferencia sostenida en todos los escenarios. La quema elimina la cobertura protectora, induce repelencia al agua y altera la estructura del suelo, lo que incrementa la erodibilidad y la escorrentía (Poulenard et al., 2001; Coaguila et al., 2025). Al ser una práctica extendida en la puna para promover el rebrote del forraje, estos resultados cuantifican por primera vez su efecto sobre la erosión hídrica en el altiplano de Puno y aportan una base técnica para revisar esta práctica en programas de conservación de suelos.

Las coberturas que superan el umbral en Mañazo —suelo desnudo y papa— corresponden a los usos con menor cobertura vegetal y mayor exposición superficial. Esta condición favorece la generación de sedimentos y su movilización aguas abajo.

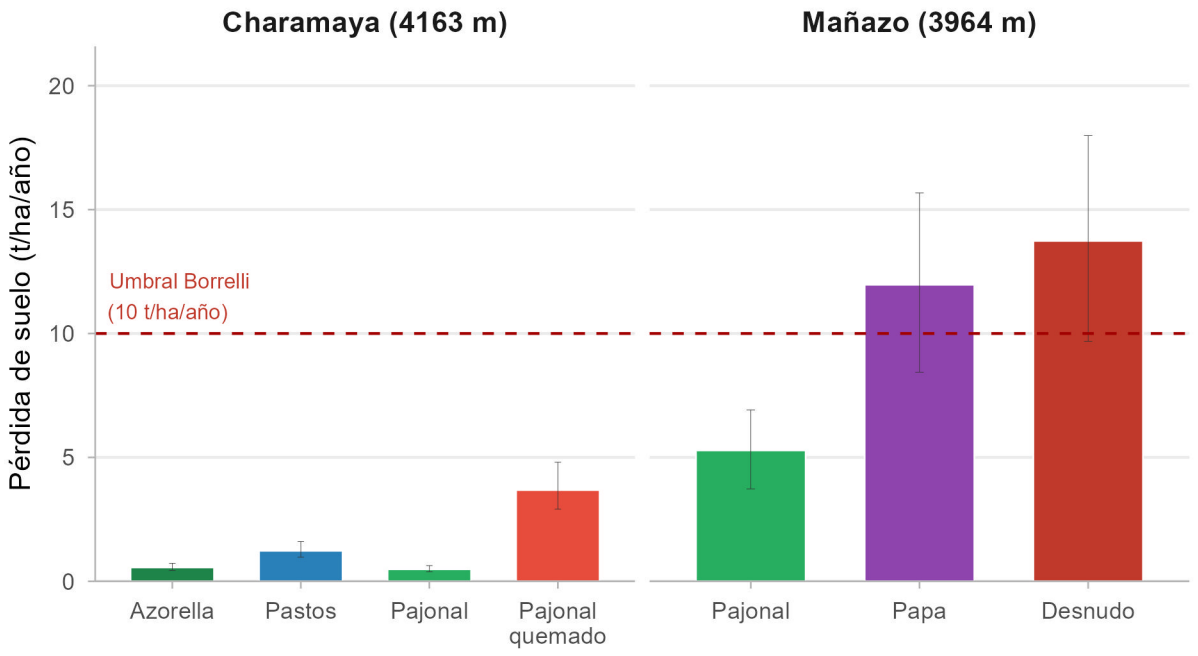


Figura 4.2.6. Tasas de pérdida de suelo anualizadas (t/ha/año) por tipo de cobertura, estaciones Charamaya y Mañazo. Barras de error: rango entre año seco (P_{10}) y húmedo (P_{90}). Línea roja: umbral de tolerancia de 10 t/ha/año (Borrelli et al., 2017).

5. Procedencia y dinámica de los sedimentos

5.1 Caracterización de los sedimentos

5.1.1 Monitoreo de la concentración de sedimentos en suspensión

Debido a la mayor disponibilidad y continuidad de los registros, la caracterización hidrosedimentológica se concentró en la estación Charamaya. Durante el periodo de estudio, la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) presentó una mediana de 15 mg/L y un percentil 95 de 3332 mg/L (Figura 5.1.1a). La marcada diferencia entre las condiciones dominantes y los valores extremos evidencia una dinámica sedimentaria altamente episódica.

La curva acumulada de carga confirma este comportamiento (Figura 5.1.1b). Aproximadamente el 10 % de las observaciones concentró el 87 % de la carga total transportada, mientras que el 20 % acumuló cerca del 99 %. En consecuencia, la exportación de sedimentos se concentró en una fracción reducida de eventos, mientras que la mayoría de las observaciones contribuyó marginalmente al transporte total.

Las concentraciones extremas (>3000 mg/L) representaron los principales pulsos sedimentarios del sistema. Durante estos eventos, la carga sólida instantánea alcanzó 66 kg/s, frente a una mediana de apenas 0.005 kg/s (5 g/s) para la serie, lo que representa una diferencia superior a cuatro órdenes de magnitud. Estos resultados muestran que la exportación sedimentaria en Charamaya se concentró en episodios breves de elevada carga de sedimentos.

5.1.2 Dinámica temporal de la concentración de sedimentos en suspensión

La relación entre el caudal (Q) y la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) en Charamaya muestra una asociación positiva, aunque con elevada dispersión (Figura 5.1.2, panel B). Para caudales inferiores a 1 m^3/s, se registraron concentraciones entre 0.06 mg/L y 8837 mg/L; para caudales entre 1 m^3/s y 2 m^3/s, las concentraciones variaron entre 0.33 mg/L y 13 594 mg/L; y para caudales iguales o superiores a 2 m^3/s, la CSS alcanzó valores de hasta 9271 mg/L. Esta amplitud sugiere que el transporte sedimentario también responde a la disponibilidad de sedimentos y a la conectividad entre las áreas fuente y la red de drenaje.

Febrero concentró la mayor actividad sedimentaria de la serie (Figura 5.1.2, panel A), con una mediana de 41 mg/L y un P_{95} de 5087 mg/L. Se registraron 42 observaciones con concentraciones superiores a 1000 mg/L, de las

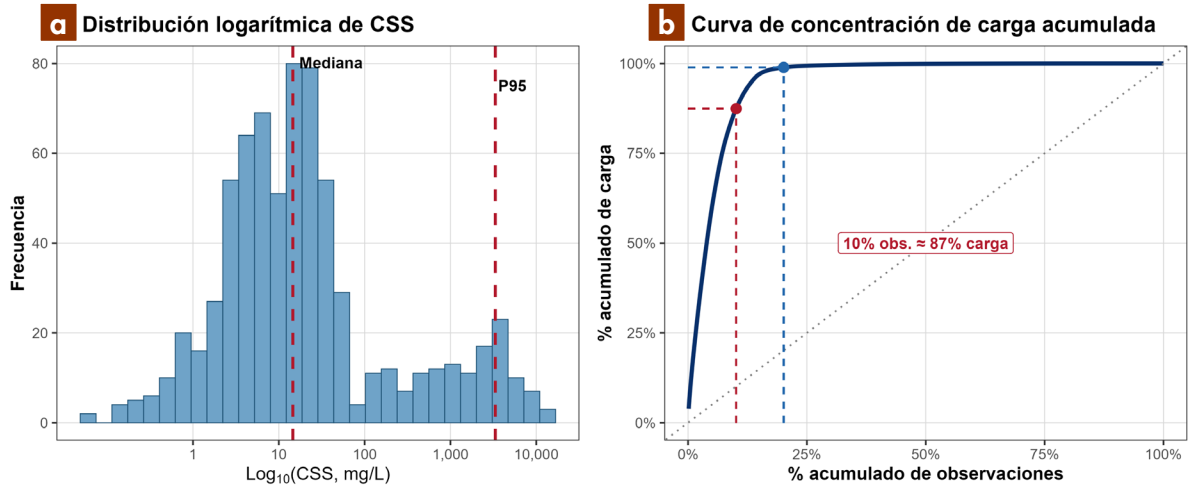


Figura 5.1.1. Monitoreo de la concentración de sedimentos en suspensión en la estación Charamaya, río Charamaya: a) distribución logarítmica de la CSS y b) curva de concentración de carga acumulada.

cuales 28 superaron los 3000 mg/L. En marzo, las observaciones con concentraciones >1000 mg/L disminuyeron a 27 y aquellas con concentraciones >3000 mg/L, a cinco. Posteriormente, abril registró una mediana de 4 mg/L y un P_{95} de 228 mg/L, mientras que en mayo no se registraron concentraciones superiores a 1000 mg/L.

Esta evolución sugiere una reducción progresiva de la disponibilidad de sedimentos fácilmente movilizables después de las principales crecidas de febrero y marzo. El comportamiento observado es consistente con una limitación parcial por disponibilidad de sedimentos, dado que la mayor parte del transporte se concentró en un número reducido de eventos.

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 Mañazo, se empleó la colorimetría del suelo como trazador; esta propiedad actúa como una «huella dactilar» para diferenciar las fuentes de origen y cuantificar su contribución en la mezcla de sedimentos del río, además de proporcionar información clave para la gestión y conservación de los recursos hídricos y del suelo.

5.2.1 Clasificación y agrupamiento de fuentes de sedimentos

Para garantizar la precisión del análisis de rastreo de sedimentos, se establecieron tres conjuntos representativos de fuentes potenciales (Figura 5.2.1), a partir de la información cartográfica de uso actual de tierras a escala 1:25 000 (Figura 5.2.2), elaborada por el MINAGRI (2018). Dicha cartografía presenta una clasificación de los usos del suelo basada en el sistema internacional de clasificación de uso de tierras propuesto por Boesch et al. (1976).

A partir de la clasificación de usos del suelo propuesta por la Unión Geográfica Internacional

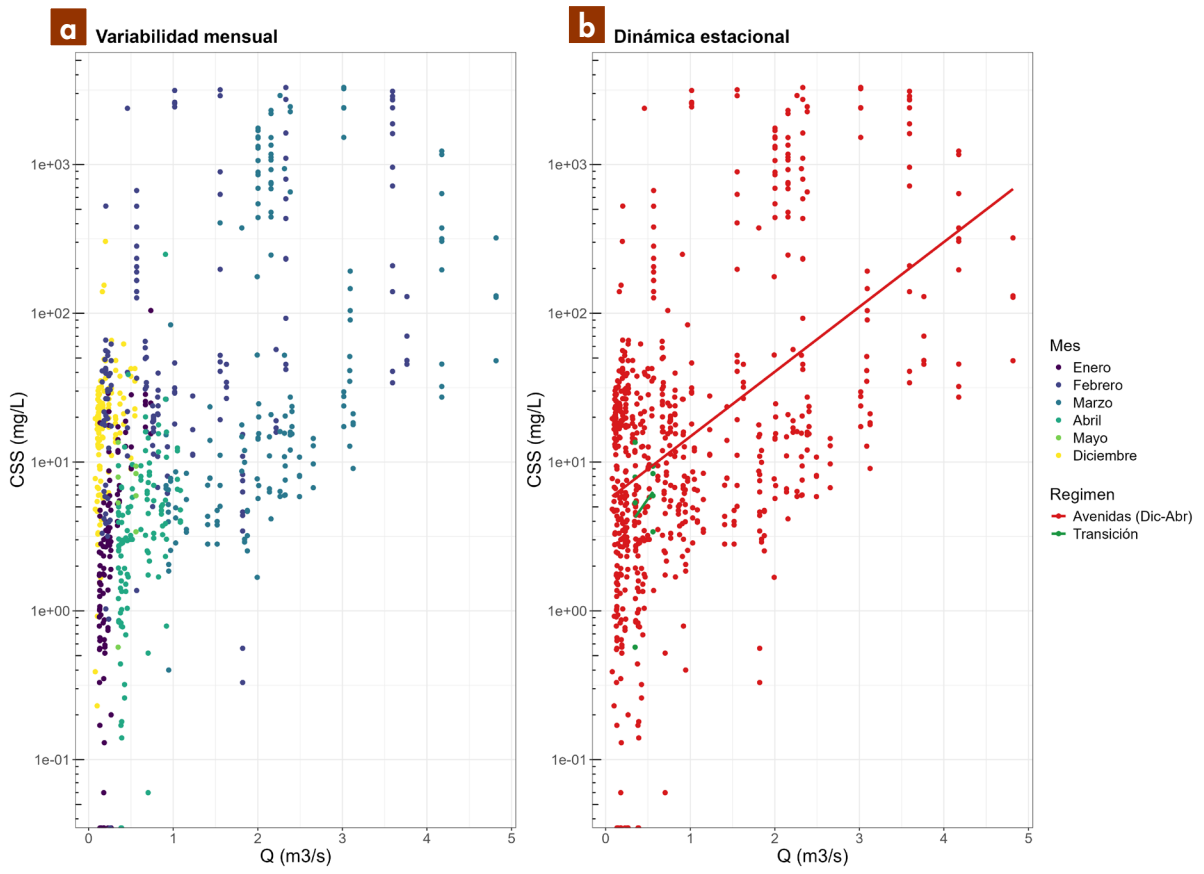


Figura 5.1.2. Relación caudal-CSS y variabilidad temporal del transporte en suspensión en la estación Charamaya.

(UGI) y de su adaptación al distrito de Mañazo, se definió un esquema de agrupamiento de las fuentes potenciales de sedimentos en tres categorías principales. Este agrupamiento, mostrado en la Tabla 5.2.1, permite identificar y cuantificar los grupos de uso del suelo que presentan una mayor contribución de sedimentos hacia los sistemas fluviales del área de estudio.

a. **Suelos improductivos (G1: T_Uso):** comprenden áreas urbanizadas, instalaciones gubernamentales, espacios públicos y privados, así como terrenos eriazos o sin uso productivo aparente.

b. **Suelos con cultivos (G2: T_Cultivos):** corresponden a terrenos destinados a la actividad agrícola e incluyen tanto cultivos permanentes como cultivos extensivos.

c. **Suelos con cobertura vegetal (G3: T_Naturales):** incluyen áreas dominadas por vegetación natural, principalmente pastizales y bosques, que presentan una cobertura vegetal continua.



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

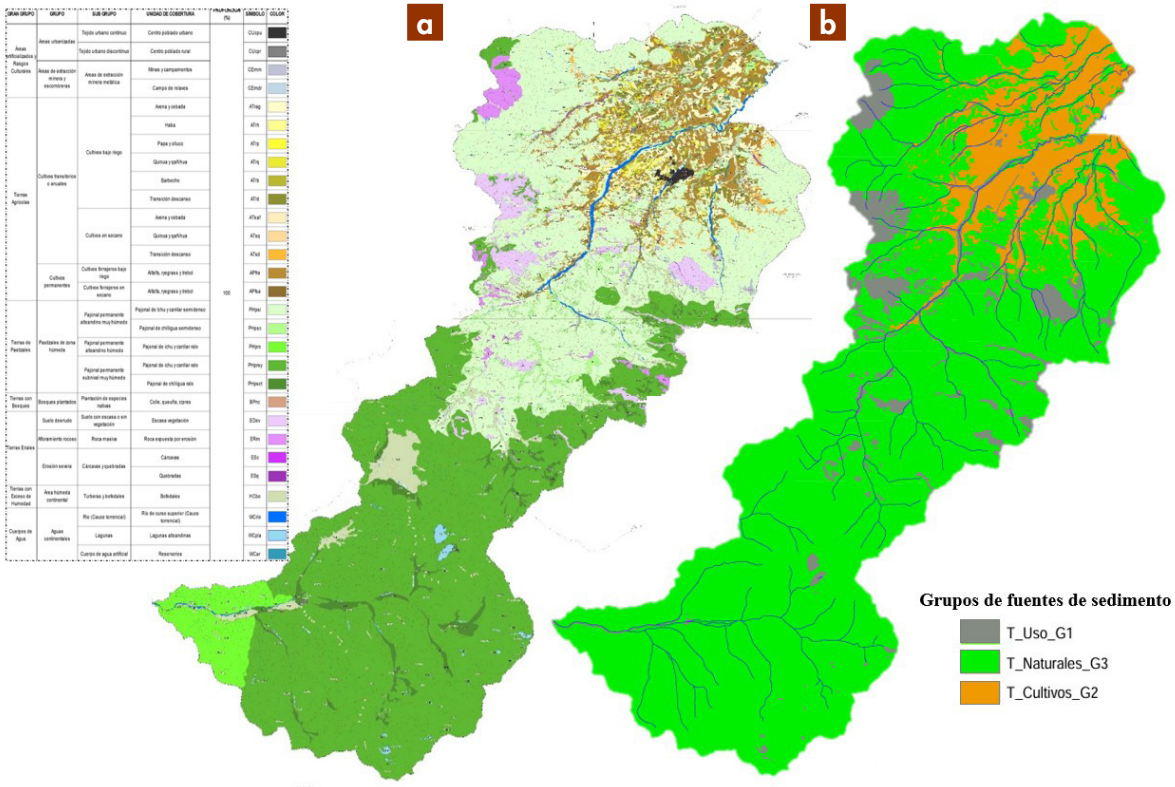


Figura 5.2.2. a) Cobertura y uso actual del suelo del distrito de Mañazo; escala 1:25 000 (MINAGRI, 2018); b) mapa de ubicación de los grupos de fuentes de sedimentos.

Tabla 5.2.1. Adaptación de la clasificación del uso del suelo, propuesta por la Unión Geográfica Internacional (UGI), para el distrito de Mañazo.

Grupo	Categorías	Clase	Subclases	Superficie	
				Hectáreas	%
G1 (T_Uso)	Terrenos urbanos, instalaciones gubernamentales y lugares públicos o privados	Poblacional	Tejido urbano continuo	77.22	0.19
			Tejido urbano discontinuo	27.3	0.07
		Paisajístico	Ríos	238.25	0.58
			Lagunas y lagos	85.52	0.21
		Áreas con infraestructura	Red vial	*	*
			Infraestructura de riego	8.12	0.02
		Minero	Áreas de extracción minera metálica	45.67	0.09
	Terrenos sin uso o improductivos	Suelos desnudos	Suelo con escasa o sin vegetación	1137	2.78
		Afloramiento rocoso	Roca masiva	596.4	1.46
		Tierras con arena y canto	Riberas	*	*
		Erosión severa	Cárcavas y quebradas	63.28	0.16
				2279.07	**5.58**
G2 (T_Cultivos)	Terrenos con cultivos permanentes	Pecuario con pastos cultivados	Cultivos forrajeros bajo riego	2160	5.29
			Cultivos forrajeros en secano	9.96	0.02
	Terrenos con cultivos extensivos	Agrícola con cultivos extensivos	Cultivos bajo riego	3497.05	8.57
			Cultivos en secano	382.91	0.93
				6049.92	**14.81**
G3 (T_Naturales)	Terrenos con pastos naturales	Pecuario con pajonales	Pajonal permanente altoandino muy húmedo	14 146.48	34.64
			Pajonal permanente altoandino húmedo	1178.48	2.89
			Pajonal permanente subnival muy húmedo	15 898.76	38.93
		Pecuario con área hidromórfica	Turberas y bofedales	1281.92	3.14
	Terrenos con bosques naturales o cultivados	Forestales plantados	Plantación de especies nativas	5.51	0.01
				32 511.15	**79.61**

5.2.2 Cuantificación del aporte de sedimentos en sistemas fluviales

La categorización de fuentes y el análisis de las mezclas de sedimentos permitieron estimar la contribución porcentual de cada grupo de fuentes. Las cabeceras de los ríos Charamaya y Conaviri, así como la zona media-baja del Charamaya, comparten el predominio del grupo T_Naturales (G3). Esta jerarquía se asocia a la extensión de cada cobertura y a su conectividad con la red de drenaje.

a. Principales fuentes de sedimentos fluviales

En las cabeceras de las cuencas de los ríos Charamaya y Conaviri predominan los sedimentos provenientes de pastizales y áreas con cobertura vegetal natural, con aportes de 89.3 % y 64.2 %, respectivamente. Asimismo, en la zona media-baja de la cuenca Charamaya este grupo de fuentes también presenta una contribución elevada (62.5 %), lo que evidencia el predominio de los suelos correspondientes al grupo T_Naturales (G3).

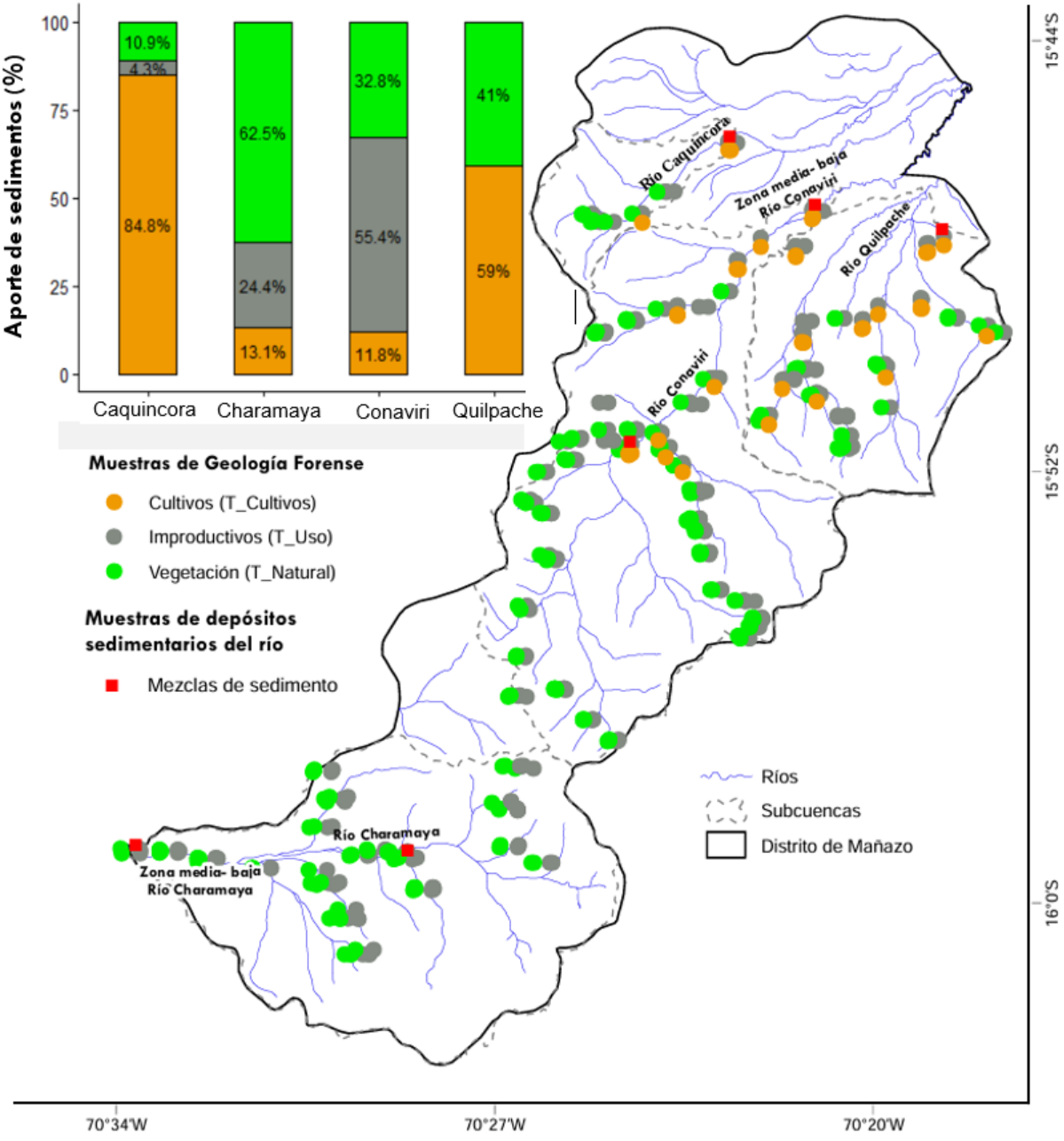


Figura 5.2.3. Diagnóstico de la procedencia de los sedimentos, localización de los puntos de mezcla, conectividad hídrica y aportes porcentuales por subcuenca.

En contraste, las cuencas de Caquincora y Quilpache registran una mayor contribución de sedimentos procedentes de áreas agrícolas, pertenecientes al grupo T_Cultivos (G2), con aportes de 84.8 % y 59 %, respectivamente. Estas áreas comprenden principalmente cultivos permanentes y estacionales, entre los que destacan la papa, el haba, la cebada y la alfalfa.

Por su parte, en la zona media-baja de la cuenca Conaviri predominan los sedimentos asociados al grupo T_Uso (G1), con un aporte de 55.4 %, correspondiente principalmente a suelos desnudos, terrenos eriazos o áreas sin uso productivo aparente. Este comportamiento se relaciona con la proximidad a la zona urbana de la capital del distrito y con la presencia de afloramientos rocosos masivos conectados a la red de quebradas, lo que favorece el transporte de sedimentos hacia el cauce principal.

La diferencia en los patrones de contribución de sedimentos se relaciona con las características de uso y cobertura del suelo presentes en las cuencas de los ríos Charamaya y Conaviri. El predominio del grupo T_Naturales en estas cuencas es consistente con la amplia distribución de pastizales y vegetación natural en el distrito de Mañazo, que abarcan 32 511 ha, equivalentes al 79.61 % de la superficie total. No obstante, estas coberturas pueden estar afectadas por el pastoreo y la quema (MINAGRI, 2018), aunque en este estudio solo se cuantificó el efecto de la quema. La reducción de la cobertura vegetal favorece la exposición del suelo a las condiciones climáticas del altiplano e incrementa su susceptibilidad a la erosión, lo que podría contribuir a explicar los elevados aportes de sedimentos asociados a este grupo de fuentes en dichas cuencas.

Por el contrario, en las cuencas de Caquincora y Quilpache, el grupo T_Cultivos (suelos con cultivos permanentes y extensivos) presentó los mayores porcentajes de aporte de sedimentos fluviales. Estas coberturas abarcan 6049.92 ha, equivalentes al 14.81 % de la superficie del distrito de Mañazo. Su predominio se asocia con su ubicación en zonas de menor altitud, donde las condiciones son más favorables para el desarrollo de actividades agrícolas. Asimismo, al encontrarse más próximas a los cauces y presentar una mayor conectividad hídrica con la red de drenaje, estas áreas poseen una mayor capacidad para transferir sedimentos hacia los sistemas fluviales.

- **Fuentes secundarias de sedimentos**

En menor proporción, se observan diferencias en las fuentes secundarias de sedimentos de cada cuenca:

» **Cuenca del río Charamaya:** los suelos eriazos o improductivos constituyen una fuente secundaria de sedimentos, con aportes de 10.7 % en la cabecera y 24.4 % en la zona media-baja. Esta contribución se relaciona con la escasa cobertura vegetal, que incrementa la susceptibilidad del suelo a los procesos erosivos. En contraste, el grupo T_Cultivos no registra aportes en la cabecera de cuenca, debido a que gran parte de esta zona se encuentra por encima de los 4177 m s. n. m., donde las condiciones climáticas propias del altiplano y el carácter seco del ambiente limitan el desarrollo de actividades agrícolas. En estas zonas predominan los pastizales naturales y las áreas eriazas. Por otro lado, en la zona media-baja, los suelos con cultivos constituyen la fuente con menor aporte de sedimentos, con 13.1 %.

» **Cuenca del río Conaviri:** en la cabecera de la cuenca, la fuente secundaria de sedimentos corresponde a los suelos con cultivos, con un aporte de 30.4 %, seguida por los suelos eriazos, con 5.4 %. En la zona media-baja, los aportes secundarios provienen principalmente de los pastizales y áreas con cobertura vegetal natural (32.8 %), seguidos por los suelos con cultivos (11.8 %). Este patrón sugiere que, en la cabecera de la cuenca, donde la actividad agrícola se ubica por debajo de los 4177 m s. n. m., la proximidad de los cultivos a los cauces y su conexión con la red de drenaje favorecen el transporte de sedimentos. En cambio, en la zona media-baja predominan los aportes de los pastizales debido a su mayor extensión y al desarrollo de actividades agropecuarias.

» **Cuencas de los ríos Caquincora y Quilpache:** se identificaron aportes relevantes de sedimentos asociados a suelos naturales y con cobertura vegetal, con contribuciones de 10.9 % y 41 %, respectivamente. Asimismo, en la cuenca del río Caquincora se registraron aportes menores provenientes de suelos improductivos (4.3 %). Estas subcuencas presentan pendientes suaves, lo que reduce la capacidad de transporte de sedimentos. Aun así, registran aportes relativamente elevados, debido a que la extensión de las áreas agrícolas y su proximidad a los cauces favorecen la transferencia de sedimentos hacia la red de drenaje.

6. Mapeo de las tasas y la severidad de erosión

6.1 Construcción del modelo espacial de erosión

La erosión hídrica se caracterizó mediante WaTEM/SEDEM. El modelo simuló la generación, la redistribución y el transporte de sedimentos sobre un área efectiva de aproximadamente 410 km². El análisis integró las subcuencas Conaviri (138 km²), Charamaya (110 km²), Quilpache (69 km²), Yanarico (39 km²), Tiracoma (32 km²) y Tarucani (20 km²).

El modelo integró los factores R, K y LS, derivados de información climática, edáfica y topográfica. El factor de erosividad R se estimó mediante RAIN4PE (Fernandez-Palomino et al., 2021), ajustado con información local, y representó condiciones medias de precipitación para 1981-2015. El factor de erodabilidad K (Figura 6.1.1B) se derivó de SoilGrids250m (Hengl et al., 2017) mediante la formulación de Wischmeier y Smith (1978) y varió entre 0.027 y 0.032. El factor topográfico LS se calculó con un modelo digital de elevación PerúSAT a 20 m, equivalente a 400 m² por celda. Esta resolución no representa explícitamente cárcavas ni flujos concentrados de pequeña extensión.

El factor de cobertura vegetal C (Figura 6.1.1A) se parametrizó según la cobertura y el grado de exposición superficial: aguas continentales, C = 0; áreas húmedas continentales, C = 0.03; vegetación herbácea o arbustiva, C = 0.08;

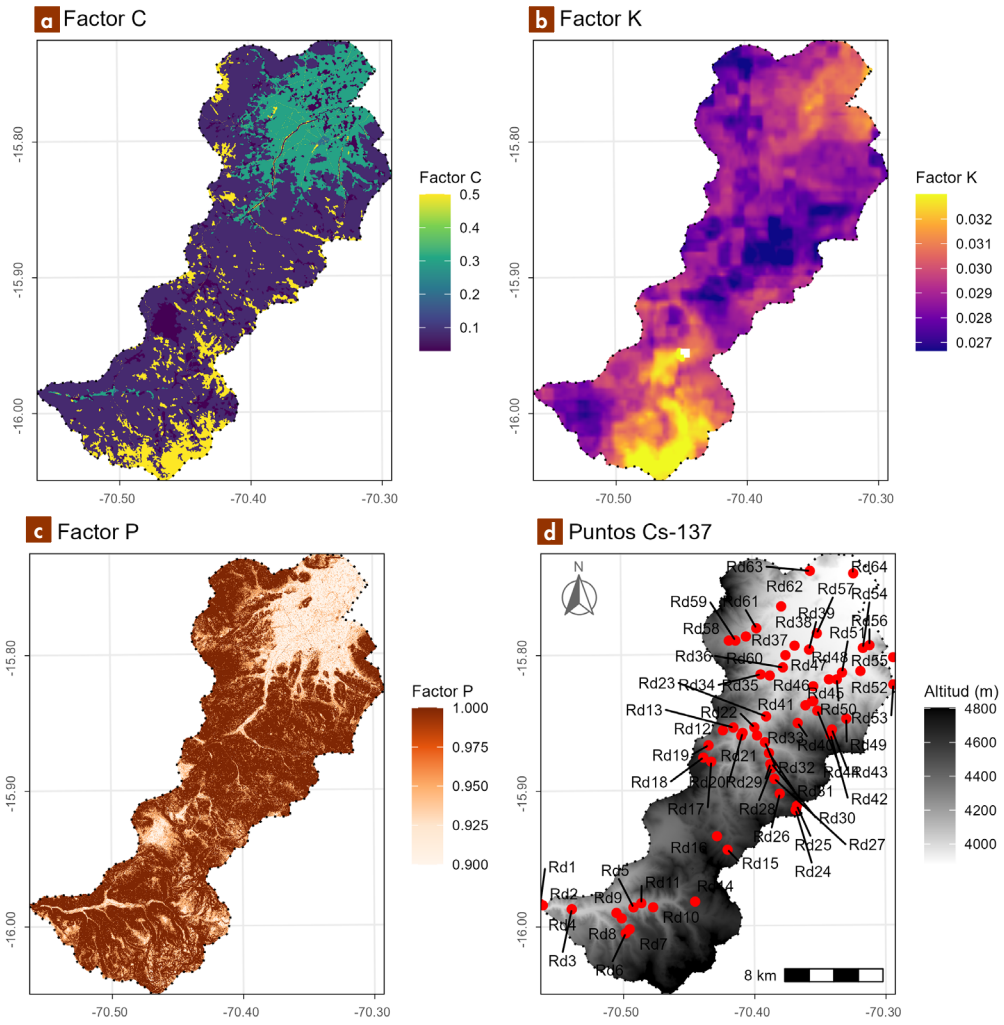


Figura 6.1.1. Variables de ingreso del modelo distribuido WaTEM/SEDEM en el distrito de Mañazo. A) Cobertura vegetal del distrito de Mañazo. B) Factor K, estimado a partir de datos de SoilGrids. C) Distribución espacial del factor P en el distrito. D) Tasas de erosión medidas con Cs-137, utilizadas en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

áreas urbanizadas, C = 0.20; áreas agrícolas, C = 0.30; áreas altoandinas con escasa o sin vegetación, C = 0.50; red vial, C = 0.60; y cárcavas, C = 0.90. Los cauces quedaron sin asignación. Esta parametrización diferenció coberturas protectoras, usos agrícolas y superficies expuestas.

El factor de prácticas de conservación (P; Figura 6.1.1C) presentó valores entre 0.90 y 1.00. La distribución espacial mostró predominio de valores próximos a 1.00 sobre gran parte del distrito. Estos valores se concentraron principalmente en sectores con limitada implementación de prácticas de conservación del suelo. Los valores relativamente menores se distribuyeron de forma localizada dentro del distrito. Este patrón refleja la escasa implementación de prácticas de conservación identificadas en campo.

Las tasas derivadas de Cs-137 se emplearon en la calibración multiobjetivo de WaTEM/SEDEM mediante 1200 evaluaciones con el algoritmo NSGA-II. Se ajustaron los parámetros R, ktc_low, ktc_high y C_mult, utilizando NSE y KGE ponderados como criterios de optimización. El contraste con 63 mediciones de Cs-137 obtuvo un KGE = 0.4. El análisis de sensibilidad identificó a R y ktc_low como los parámetros con mayor asociación con el NSE (r = 0.8 y r = 0.7, respectivamente). El análisis de incertidumbre paramétrica mostró una amplitud relativa de 46.1 % para ktc_high.

6.2 Espacialización de la severidad de pérdida de suelo

La distribución espacial de la erosión hídrica en Mañazo estuvo dominada por clases bajas (Figura 6.2.1). Las categorías de erosión muy débil (<2.5 t/ha/año) y débil (2.5-7.5 t/ha/año) concentraron aproximadamente 352 km², equivalentes al 86 % del área modelada. La categoría moderada (7.5-12.5 t/ha/año) ocupó 20 km² (5 %). En conjunto, las clases menores a 12.5 t/ha/año abarcaron aproximadamente 373 km² (91 %). Las categorías fuerte (12.5-20 t/ha/año) y muy fuerte (20-30 t/ha/año) ocuparon 37 km² (9 %).

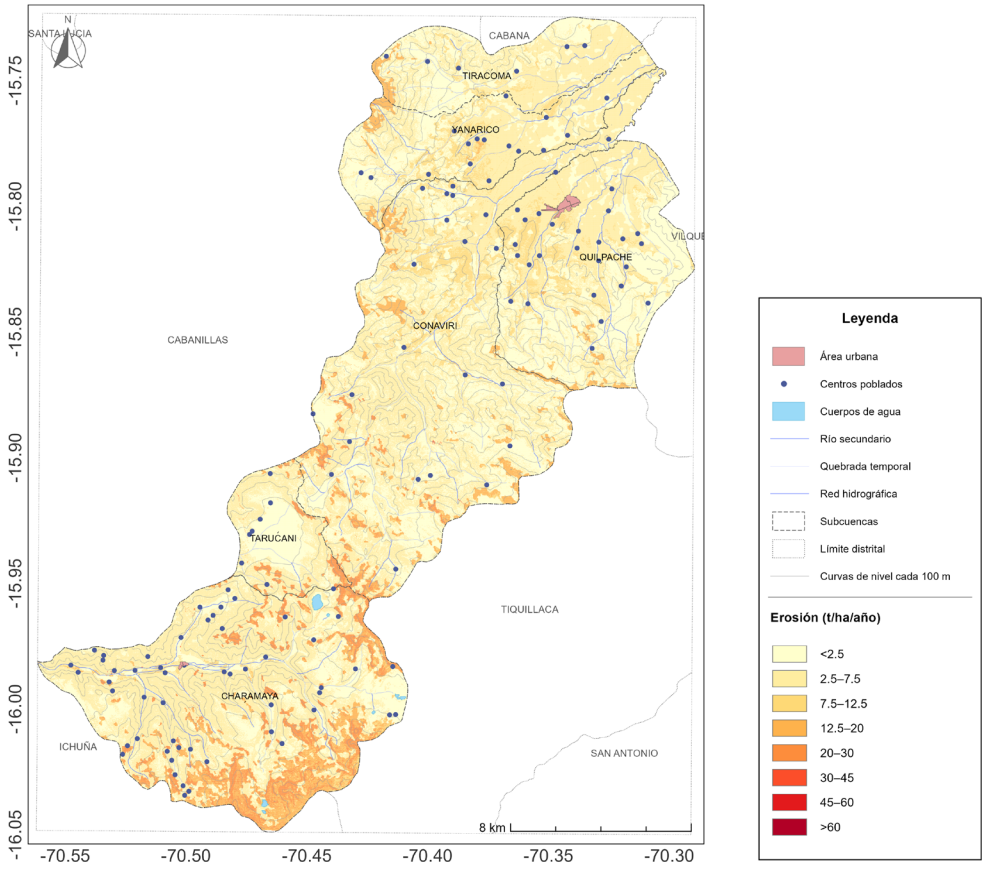


Figura 6.2.1. Mapa de distribución de las tasas de erosión en el distrito de Mañazo.

Las categorías severa (30-45 t/ha/año) y muy severa (45-60 t/ha/año) sumaron 6 ha y no se identificaron superficies en la categoría extrema (>60 t/ha/año). El percentil 90 distrital fue aproximadamente 11 t/ha/año y el máximo alcanzó 47 t/ha/año. Bajo el criterio combinado de erosión >30 t/ha/año, distancia al cauce <50 m y pendiente >35°, se identificó un único punto crítico de 0.04 ha en Charamaya, correspondiente a una celda de 20 m × 20 m. Este punto crítico no equivale a toda la superficie distrital superior a 30 t/ha/año.

Las diferencias entre subcuencas fueron marcadas. Charamaya concentró 23 km² sobre 12.5 t/ha/año, equivalentes al 21 % de su superficie, y aproximadamente 3 ha por encima de 30 t/ha/año; además, presentó el mayor P_{90} (20 t/ha/año) y el máximo distrital (47 t/ha/año). Conaviri registró 9 km² sobre 12.5 t/ha/año (7 %), cerca de 3 ha sobre 30 t/ha/año, un P_{90} de 9 t/ha/año y un máximo de 41 t/ha/año. Tarucani presentó 2 km² sobre 12.5 t/ha/año (8 %), un P_{90} de 4 t/ha/año y un máximo de 31 t/ha/año. Yanarico, Tiracoma y Quilpache registraron aproximadamente 1 km² sobre ese umbral, con P_{90} de 8 t/ha/año, 6 t/ha/año y 8 t/ha/año y máximos de 23 t/ha/año, 31 t/ha/año y 19 t/ha/año, respectivamente.

La relación entre cobertura y severidad mostró un contraste marcado entre aporte absoluto e intensidad relativa, conforme a la distribución descrita en la sección 3.3. Las áreas altoandinas con escasa o sin vegetación ocuparon aproximadamente 40 km² en la malla modelada; el 87 % superó 12.5 t/ha/año y esta cobertura concentró cerca del 95 % del área crítica distrital. En contraste, las áreas agrícolas ocuparon 76 km² y solo el 0.3 % superó 12.5 t/ha/año, mientras la vegetación herbácea o arbustiva ocupó 260 km² y presentó menos del 1 % sobre ese umbral. Las cárcavas mostraron la mayor intensidad relativa: aunque ocuparon solo 0.05 km², el 65 % superó 12.5 t/ha/año y el 56 % superó 30 t/ha/año.

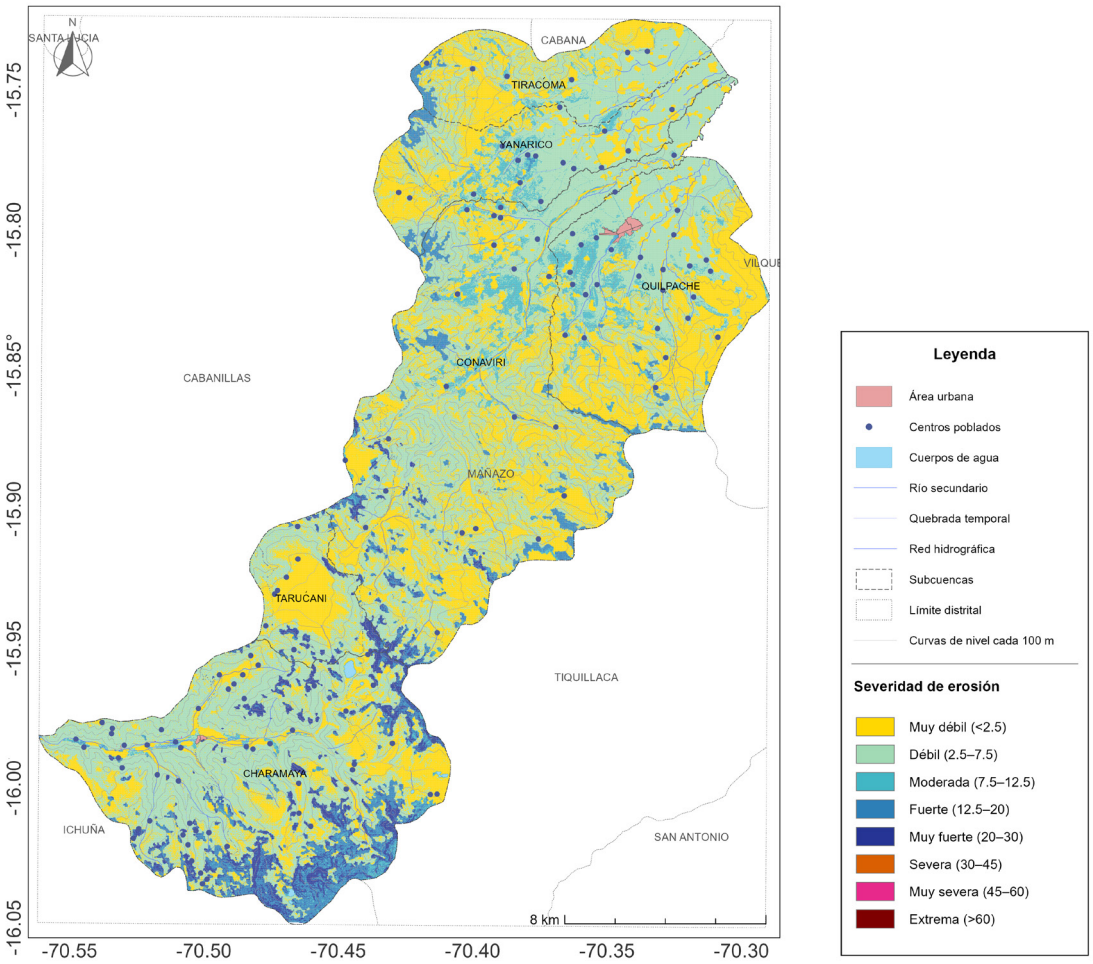


Figura 6.2.2. Mapa de las tasas de erosión hídrica en el distrito de Mañazo.

El gradiente altitudinal mostró una concentración progresiva de las categorías fuerte o superior hacia las zonas altas. En Charamaya, esta proporción aumentó de 2 % en la zona baja a 12 % en la media y 47 % en la alta. En las zonas altas alcanzó 18 % en Tarucani, 16 % en Conaviri, 10 % en Yanarico, 8 % en Tiracoma y 4 % en Quilpache. El patrón muestra que las mayores proporciones de erosión fuerte se concentran en sectores altos, especialmente donde predominan superficies expuestas.

La proximidad a la red hídrica no mostró un incremento directo de la severidad. El P_{90} se mantuvo próximo a 6 t/ha/año en los tres estratos más cercanos y alcanzó aproximadamente 16 t/ha/año en el más alejado. En conjunto, Mañazo presenta una matriz con tasas predominantemente inferiores a 12.5 t/ha/año, interrumpida por focos localizados de mayor severidad. Charamaya concentra la mayor extensión crítica y los valores más altos, mientras las superficies altoandinas con escasa o sin vegetación dominan tanto el aporte absoluto de áreas críticas como la intensidad relativa.

7. Conclusiones y recomendaciones para la gestión

7.1 ¿Qué nos dicen los isótopos, las microparcelas, la geología forense y el modelado?

Las cuatro técnicas evalúan procesos diferentes, en distintas escalas espaciales y temporales. Los radioisótopos integran información correspondiente a un periodo de seis a diez décadas en puntos de ladera. Las microparcelas registran la erosión laminar y entre surcos durante una temporada sobre superficies de 1 m^2. La geología forense describe la procedencia de los sedimentos. El modelo estima la pérdida media anual de suelo en celdas de 20 × 20 m. Su valor conjunto no radica, por tanto, en coincidir en una cifra única, sino en converger o divergir de manera interpretable.

Los métodos coinciden en el orden de las coberturas, no en la magnitud. Los radioisótopos ordenan la pérdida de mayor a menor así: suelo desnudo, agricultura, pajonal y bofedal. Las microparcelas reproducen ese mismo orden en las tres coberturas que tienen en común (suelo desnudo, 14 t/ha/año; papa, 12 t/ha/año; pajonal, 5 t/ha/año en tasas anualizadas). Las tasas de los radioisótopos son, sin embargo, hasta tres veces mayores; en suelo desnudo, el Cs-137 registra una tasa de 42 t/ha/año. La diferencia es esperable, porque las microparcelas corresponden a una sola temporada, no registran la erosión en surcos ni la erosión inducida por la labranza y tampoco integran los eventos extremos de las últimas décadas.

El diagnóstico depende del referente que se use. Frente al umbral genérico de tolerancia de 10 t/ha/año (Borrelli et al., 2017), lo superan el suelo desnudo y la agricultura con ambos trazadores, y el pajonal solo con Cs-137. Frente a la tasa natural del sur de la vertiente del Titicaca, de 0.1 a 0.2 t/ha/año (Hippe et al., 2021), todas las coberturas salvo el bofedal están en pérdida neta. Incluso el pajonal pierde entre 30 y más de 100 veces esa referencia.

La quema es el efecto de manejo mejor documentado del estudio. En parcelas contiguas y bajo la misma lluvia, el pajonal quemado (3 parcelas) duplicó el coeficiente de escorrentía del no quemado (5 parcelas): 25 % frente a 12 % en mediana. Su pérdida mediana por evento fue cinco veces mayor (1.4 g/m^2 frente a 0.3 g/m^2) y su tasa anualizada, ocho veces mayor (4 t/ha/año frente a 0.5 t/ha/año). El resultado corresponde a la primera temporada después de una sola quema, el periodo en que la respuesta erosiva suele ser máxima. No debe extrapolarse como tasa permanente.

El bofedal es la única cobertura con balance positivo. Ambos trazadores le asignan +3 t/ha/año (n = 7), con baja dispersión (DS de ±2 t/ha/año) y pendientes medias de 4°. Este balance es coherente con la retención de sedimento procedente de las laderas.

La lluvia no explica por sí sola la diferencia entre estaciones. La erosividad acumulada durante la campaña fue similar en ambas estaciones: 911 $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$ en Charamaya y 935 $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$ en Mañazo. Pese a presentar niveles de erosividad comparables, Charamaya registró menores pérdidas de suelo por evento (de 0.3 g/m^2 a 1.4 g/m^2, frente a un intervalo de 9 g/m^2 a 15 g/m^2 en Mañazo), lo que sugiere que la cobertura y el manejo ejercen un control más importante sobre la pérdida de suelo que la energía de la lluvia.

La pérdida de suelo en las laderas no determina por sí sola cuánto sedimento llega al cauce. Los pastizales y la vegetación natural aportan el 89 % del sedimento fluvial en la cabecera de Charamaya y el 64 % en la de Conaviri, pese a registrar las menores tasas de pérdida de suelo. Estos aportes se explican por la extensión de dichas coberturas, que ocupan cerca del 80 % del territorio, y por su conexión con los cauces. En Caquincora, cabecera de Yanarico, el aporte de sedimentos procedentes de áreas agrícolas alcanza el 85 %; en Quilpache, el 59 %. En ambos casos, la menor altitud y la proximidad de los cultivos a la red de drenaje favorecen la transferencia de sedimentos hacia los cauces.

En conjunto, las cuatro técnicas describen un territorio con erosión mayoritariamente baja, pero con focos localizados de mayor severidad. Las mayores pérdidas de suelo se asocian con la ausencia de cobertura vegetal y la quema, aunque las diferencias entre estaciones sugieren que las condiciones locales también influyen. La cantidad de sedimentos que alcanza los cauces depende, además, de la extensión y la conectividad de cada cobertura.

7.2 Situación de Mañazo en el contexto andino

En la vertiente occidental peruana, el rendimiento específico de sedimentos varía entre 0.4 t/ha/año y 23 t/ha/año. Los valores más altos se concentran entre los 6° S y 11° S. Al sur de los 11° S, los valores se mantienen entre 0.39 t/ha/año y 5.51 t/ha/año (Rosas et al., 2023).

Mañazo, localizado aproximadamente a 15.8° S, se encuentra al sur del área cubierta por esa síntesis, cuyo límite meridional alcanza los 14.5° S; además, solo la subcuenca Charamaya drena hacia el Pacífico. Las cifras reportadas por Rosas et al. (2023) corresponden a la exportación de sedimentos medida a la salida de las cuencas y no a la erosión en ladera; por ello, no son directamente comparables con las tasas estimadas en este estudio.

Los ambientes como el de Mañazo están poco representados en la evidencia andina. La revisión de 118 casos de estudio identifica pocos estudios en sitios de gran altitud y en regiones de precipitación muy baja o muy alta, y pocos que evalúen eventos extremos (Vanacker et al., 2022). Hasta donde conocemos, la combinación de radioisótopos, microparcelas, geología forense y modelado no se había aplicado de forma conjunta en el altiplano peruano.

El único antecedente en el distrito registra pérdidas mucho menores, pero no es comparable en magnitud. Salcedo-Mayta et al. (2022) midieron con varillas de erosión 0.35 t/ha en suelo sin cobertura, sobre pendientes de 0 % a 4 %. Esa pérdida equivale a un descenso de la superficie de unos 0.03 mm (con una densidad aparente de 1.3 g/cm³), muy por debajo de la resolución habitual de las varillas, del orden del milímetro. Las microparcelas de suelo desnudo de este estudio, en cambio, captan el sedimento exportado evento a evento y registraron 14 t/ha/año.

Los pajonales protegen el suelo en términos relativos, no absolutos. Pierden menos que las coberturas perturbadas y tienen el menor coeficiente de escorrentía del monitoreo (12 %). Esto es coherente con la función reguladora que la literatura atribuye a los pastizales altoandinos no perturbados (Buytaert et al., 2006; Ochoa-Tocachi et al., 2016). Sus tasas de 6 t/ha/año a 11 t/ha/año indican, sin embargo, que los pajonales del distrito no están en esa condición. El estudio documenta el efecto de la quema; el del pastoreo queda pendiente de medición.

La quema es el aporte más original del diagnóstico. La literatura andina documenta su efecto sobre la repelencia al agua, la estructura del suelo y la escorrentía en los páramos de Ecuador y en la sierra de Arequipa (Poulenard et al., 2001; Coaguila et al., 2025). Hasta donde conocemos, no existía para el altiplano de Puno una medición pareada de parcelas quemadas y no quemadas bajo la misma lluvia.

7.3 Prioridades para la gestión

Las prioridades que siguen se ordenan por la relación entre la magnitud del efecto documentado y la superficie sobre la que actúan:

- **Prioridad 1. Regular la quema de pajonal.** En la primera temporada posterior a la quema, el pajonal quemado perdió ocho veces más suelo que el no quemado (4 t/ha/año frente a 0.5 t/ha/año) y duplicó su coeficiente de escorrentía (secciones 4.2.2 y 4.2.5). La vegetación herbácea, susceptible a esta práctica, ocupa 261 km² del distrito. Como instrumento de gestión, se propone una ordenanza municipal que establezca un calendario de quema y zonas de exclusión, articulada con acuerdos comunales de manejo de pastizales y con la Ley n.° 29763, Ley Forestal y de Fauna Silvestre, que comprende los pajonales. Su cumplimiento puede verificarse mediante el seguimiento anual de la superficie quemada por sensores remotos y el número de acuerdos comunales suscritos.

- **Prioridad 2. Restituir cobertura en suelo desnudo y en laderas de cultivo.** El suelo desnudo registra las tasas más altas del distrito (42 t/ha/año con Cs-137 y 30 t/ha/año con Pb-210ex; sección 4.1.2). En el monitoreo directo, el suelo desnudo y el cultivo de papa son las únicas coberturas que superan el umbral de tolerancia (14 t/ha/año y 12 t/ha/año, respectivamente; sección 4.2.5). Como medidas de gestión, se proponen la incorporación de residuos, el uso de cultivos de cobertura durante el periodo de descanso y la labranza reducida, todas ellas mediante planes de asistencia técnica agraria. Su cumplimiento puede verificarse mediante la superficie agrícola mantenida bajo cobertura durante el barbecho y la proporción de parcelas con labranza reducida.

- **Prioridad 3. Proteger bofedales y pajonales como infraestructura natural.** El bofedal es la única cobertura con balance positivo (+3 t/ha/año; sección 4.1.2), mientras que el pajonal sin quemar presentó la menor escorrentía registrada durante el periodo de monitoreo (12 %; sección 4.2.2). Como instrumentos de gestión, se proponen la zonificación de protección en el ordenamiento territorial, el control de la carga animal de acuerdo con la capacidad de carga de los pastizales y el reconocimiento de estas superficies como infraestructura natural en los proyectos de inversión pública. Su cumplimiento puede verificarse mediante la superficie de bofedal y pajonal incorporada en zonas de protección y la evolución de la carga animal por unidad de pastoreo.

- **Prioridad 4. Verificar e intervenir las cárcavas y las superficies altoandinas expuestas.** Las áreas altoandinas con escasa o sin vegetación reúnen cerca del 95 % del área crítica distrital, con el 87 % de su superficie por encima de 12.5 t/ha/año, y las cárcavas presentan la mayor intensidad relativa, con el 56 % de su extensión por encima de 30 t/ha/año (sección 6.2). Las medidas aplicables son diques de retención escalonados y revegetación de cabeceras de cárcava, cuya efectividad para reducir la movilización de sedimentos en sistemas de cárcavas activas de los Andes está documentada (Borja et al., 2018). La focalización debe priorizar la zona alta de la subcuenca Charamaya, que concentra 23 km^2 por encima de 12.5 t/ha/año, el P_{90} más alto (20 t/ha/año) y el máximo distrital (47 t/ha/año). Su cumplimiento puede verificarse mediante el número de cárcavas tratadas y la superficie revegetada en la zona alta de Charamaya.

Referencias

- Armenise, E., Simmons, R. W., Ahn, S., Garbout, A., Doerr, S. H., Mooney, S. J., Sturrock, C. J., & Ritz, K. (2018). Soil seal development under simulated rainfall: Structural, physical and hydrological dynamics. *Journal of Hydrology, 556*, 211–219. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.073

- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal, 65*(5), 770–785. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411

- Bedoya-Perales, N. S., Pumi, G., Mujica, A., Talamini, E., & Padula, A. D. (2018). Quinoa expansion in Peru and its implications for land use management. *Sustainability, 10*(2), Article 532. https://doi.org/10.3390/su10020532

- Boesch, H., Flatres, P., Takasaki, M., Paludan, C. T., Czati, E., & Clark, A. (1976). World land use survey = L'utilisation du sol dans le monde. *Geographica Helvetica, 31*(1), 1–28. https://doi.org/10.5194/gh-31-1-1976

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

- Brown, L. C., & Foster, G. R. (1987). Storm erosivity using idealized intensity distributions. *Transactions of the ASAE, 30*(2), 379–386. https://doi.org/10.13031/2013.31957

- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews, 79*(1–2), 53–72. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002

- Chavez, S. P., & Takahashi, K. (2017). Orographic rainfall hot spots in the Andes-Amazon transition according to the TRMM precipitation radar and in situ data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122*(11), 5870–5882. https://doi.org/10.1002/2016JD026282

- Coaguila, L., Mataix-Solera, J., Nina, S., García-Carmona, M., & Salazar, E. T. (2025). Soil degradation evidence following a wildfire in Arequipa's Andean region, Peru. *Spanish Journal of Soil Science, 15*, Article 13983. https://doi.org/10.3389/sjss.2025.13983

- 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

- Ebabu, K., Taye, G., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Adgo, E., Tsubo, M., Fenta, A. A., Meshesha, D. T., Sultan, D., Aklog, D., Admasu, T., van Wesemael, B., & Poesen, J. (2023). Land use, management and climate effects on runoff and soil loss responses in the highlands of Ethiopia. *Journal of Environmental Management, 326*, Article 116707. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116707

- Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., Santini, W., Aybar, C., & Bronstert, A. (2021). *Rain for Peru and Ecuador (RAIN4PE)* (Version 1.0) [Conjunto de datos]. GFZ Data Services. https://doi.org/10.5880/pik.2020.010

- Galindo, V., Giraldo, C., Lavelle, P., Armbrecht, I., & Fonte, S. J. (2022). Land use conversion to agriculture impacts biodiversity, erosion control, and key soil properties in an Andean watershed. *Ecosphere, 13*(3), Article e3979. https://doi.org/10.1002/ecs2.3979

- Heidinger, H., Carvalho, L. M. V., Jones, C., Posadas, A., & Quiroz, R. (2018). A new assessment in total and extreme rainfall trends over central and southern Peruvian Andes during 1965–2010. *International Journal of Climatology, 38*(S1), e998–e1015. https://doi.org/10.1002/joc.5427

- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE, 12*(2), Article e0169748. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748

- Hippe, K., Jansen, J. D., Skov, D. S., Lupker, M., Ivy-Ochs, S., Kober, F., Zeilinger, G., Capriles, J. M., Christl, M., Maden, C., Vockenhuber, C., & Egholm, D. L. (2021). Cosmogenic in situ ^{14}C–^{10}Be reveals abrupt Late Holocene soil loss in the Andean Altiplano. *Nature Communications, 12*, Article 2546. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22825-6

- Junquas, C., Takahashi, K., Condom, T., Espinoza, J. C., Chavez, S., Sicart, J.-E., & Lebel, T. (2018). Understanding the influence of orography on the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the central Andes. *Climate Dynamics, 50*, 3995–4017. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3858-8

- 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 Agricultura y Riego. (2018). *Estudio de cobertura y uso actual de la tierra del distrito de Mañazo.*

- Molina, A., Govers, G., Vanacker, V., Poesen, J., Zeelmaekers, E., & Cisneros, F. (2007). Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use. *Catena, 71*, 357–370. https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.04.002

- 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

- Morera, S., Orrillo, J., Contreras, S., Laura, J., Sánchez, M., Espinoza, K., Villanueva, J., Díaz, D., Yana, D., Ruiz, J., & 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 (Provincia de Angaraes, región Huancavelica)* [Informe técnico]. Instituto Geofísico del Perú. https://hdl.handle.net/20.500.12816/5858

- 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

- Páez-Bimos, S., Villacís, M., Morales, O., Calispa, M., Molina, A., Salgado, S., De Bièvre, B., Delmelle, P., Muñoz, T., & Vanacker, V. (2022). Vegetation effects on soil pore structure and hydraulic properties in volcanic ash soils of the high Andes. *Hydrological Processes, 36*(9), Article e14678. https://doi.org/10.1002/hyp.14678

- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J., & Collinet, J. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: Effect of tillage and burning. *Catena, 45*, 185–207. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00148-5

- Rodríguez Aranzábal, O. J., Caro-Sánchez Gago, G. L., Vázquez Villano, G. A., Zolezzi Monzen, A., Peña Lozano, A. M., & Prado Fasanando, J. (2024). *Caracterización agroclimática del distrito de Mañazo, Puno* (1.ª ed.). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. https://hdl.handle.net/20.500.12542/4200

- Rolando, J. L., Dubeux, J. C. B., Ramirez, D. A., Ruiz-Moreno, M., Turin, C., Mares, V., Sollenberger, L. E., & Quiroz, R. (2018). Land use effects on soil fertility and nutrient cycling in the Peruvian High-Andean Puna grasslands. *Soil Science Society of America Journal, 82*(2), 463–474. https://doi.org/10.2136/sssaj2017.09.0309

- Rosas, M. A., Viveen, W., & Vanacker, V. (2023). Spatial variation in specific sediment yield along the Peruvian western Andes. *Catena, 220*, Article 106699. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106699

- Salcedo-Mayta, S., Canihua-Rojas, J., Samaniego-Vivanco, T., Cruz-Luis, J., Pérez-Porras, W., & Cosme-De La Cruz, R. (2022). Cultivos de cobertura asociados a quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en el Altiplano peruano: Reducción de la erosión, mejora de la salud del suelo y rendimiento agrícola. *Scientia Agropecuaria, 13*(3), 265–274. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.024

- 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 ^{137}Cs 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

- Van Dijk, A. I. J. M., & Bruijnzeel, L. A. (2004). Runoff and soil loss from bench terraces. 2. An event-based erosion process model. *European Journal of Soil Science, 55*, 317–334. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00605.x

- Van Dijk, A. I. J. M., Meesters, A. G. C. A., & Bruijnzeel, L. A. (2002). Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments. *Soil Science Society of America Journal, 66*, 1466–1474. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1466

- Vanacker, V., Bellin, N., Molina, A., & Kubik, P. W. (2014). Erosion regulation as a function of human disturbances to vegetation cover: A conceptual model. *Landscape Ecology, 29*, 293–309. https://doi.org/10.1007/s10980-013-9956-z

- Vanacker, V., Molina, A., Rosas, M. A., Bonnesoeur, V., Román-Dañobeytia, F., Ochoa-Tocachi, B. F., & Buytaert, W. (2022). The effect of natural infrastructure on water erosion mitigation in the Andes. *SOIL, 8*(1), 133–147. https://doi.org/10.5194/soil-8-133-2022

- Walling, D. E., He, Q., & Appleby, P. G. (2002). Conversion models for use in soil-erosion, soil-redistribution and sedimentation investigations. En F. Zapata (Ed.), *Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides* (pp. 111–164). Kluwer Academic Publishers.

- Walling, D. E., & He, Q. (1999). Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land. *Soil Science Society of America Journal, 63*(5), 1404–1412. https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351404x

- 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, Science and Education Administration.

- Yin, S., Xie, Y., Liu, B., & Nearing, M. A. (2015). Rainfall erosivity estimation based on rainfall data collected over a range of temporal resolutions. *Hydrology and Earth System Sciences, 19*(10), 4113–4126. https://doi.org/10.5194/hess-19-4113-2015

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