

TOMO I **DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE LOS SUELOS, IDENTIFICACIÓN DE FUENTES, PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DEL DISTRITO DE LIRCAY – HUANCAMELICA**

**PROGRAMA PRESUPUESTAL N° 0089
REDUCCIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS AGRARIOS**

Medición del Deterioro del Suelo por Erosión Hídrica



Lima, 2025

PROGRAMA PRESUPUESTAL N° 0089

“REDUCCIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS AGRARIOS”

Agradecimientos a las personas y actores institucionales que colaboraron en la elaboración o revisión del presente estudio tales como: Municipalidad Provincial de Angaraes - Lircay del departamento de Huancavelica, Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) 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) y el Laboratory for Sciences of Climate and Environment (LSCE).

EQUIPO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Sergio Morera Julca
Coordinador Técnico del PP0089 del IGP

Jhon Orrillo Vigo
Monitor General

Shirley Contreras Acho
Coordinadora del Laboratorio MoSSARD

Jorge Laura Santos
Monitor de Radioisótopos

Michael Sánchez Muñoz
Monitor de Procesos Físicos y Climáticos

Kithner Espinoza Varillas
Monitor de Modelado de Erosión de Suelos

Jhon Villanueva Portella
Asistente de Investigación en Modelado

Diana Díaz Llatas
Asistente de Investigación en Uso de Trazadores

Deysi Yana Quispe
Asistente de Investigación en Análisis Elemental

Jennifer Ruiz Alarcón
Especialista en Geología

Fernando Prudencio Paredes
Especialista en Teledetección

César Huincho Taipe
Coordinador Administrativo

IGP, 2025. Diagnóstico de la erosión hídrica de los suelos, identificación de fuentes, producción y transporte de sedimentos del distrito Lircay – Huancavelica.

Este documento incluye figuras, tablas, ecuaciones y material cartográfico elaborado por el equipo técnico del PP0089-IGP, excepto que se indique explícitamente lo contrario.

Fecha de publicación: 6 de octubre de 2025

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN

Página 14

1.1 Antecedentes

Página 14

1.2 Objetivo del Tomo I

Página 15

2. DIAGNÓSTICO DEL DISTRITO DE LIRCAY

Página 16

2.1. Cambio de cobertura y uso del suelo

Página 16

2.1.1. Generalidades

Página 16

2.1.2. Discusión

Página 16

2.1.3. Conclusiones

Página 18

2.2. Geología

Página 18

2.2.1. Generalidades

Página 19

2.2.2. Discusión y Conclusiones

Página 19

2.3. Hidrología

Página 21

2.3.1 Generalidades

Página 21

2.3.2. Discusión y Conclusiones

Página 22

3. EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO

Página 23

3.1. Trampas de sedimentos

Página 23

3.1.1. Resultados

Página 23

3.1.2. Discusión

Página 28

3.1.3. Conclusiones

Página 29

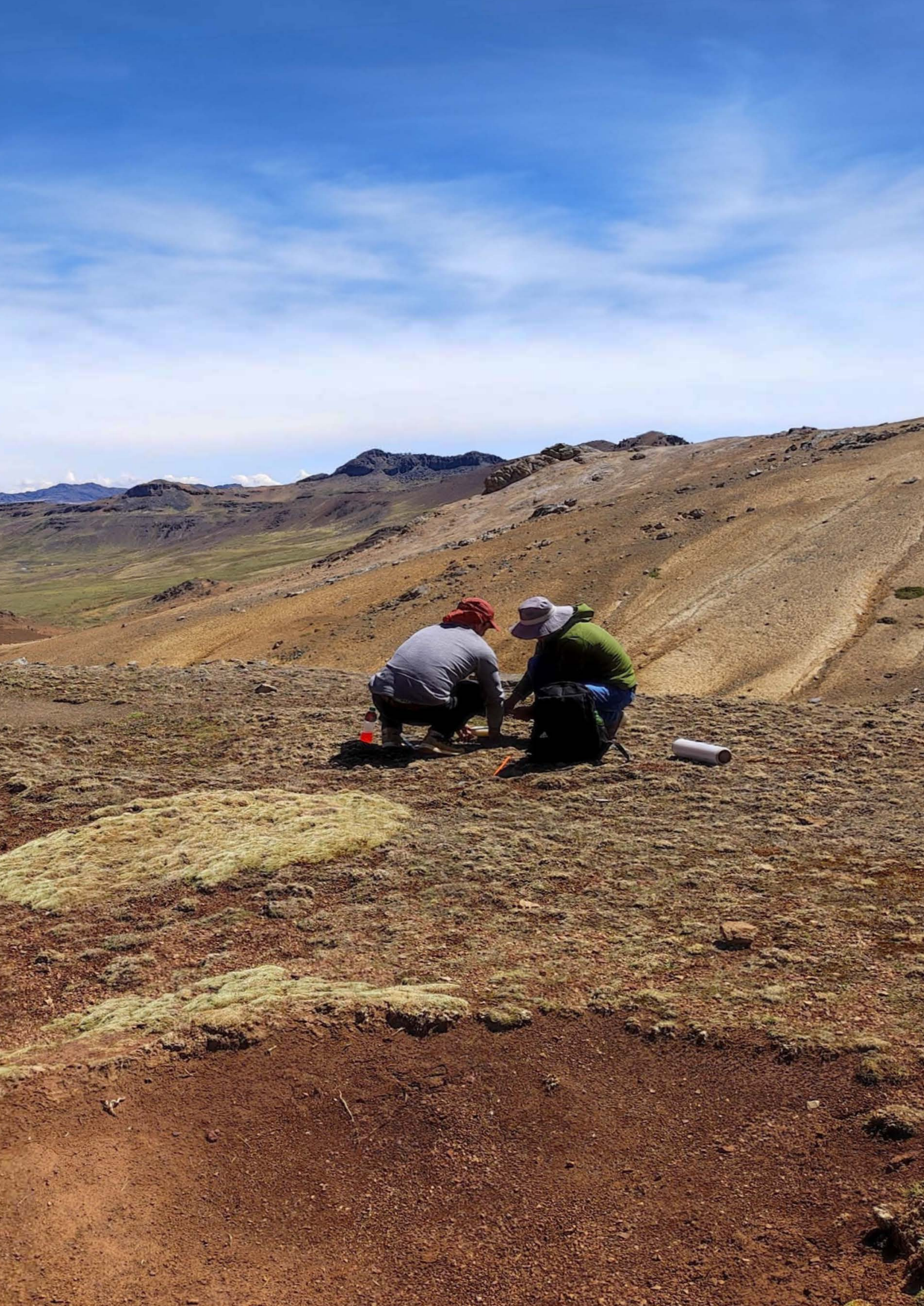
3.2. Radioisótopos

Página 30

CONTENIDO

3.2.1. Resultados	
Página 30	
3.2.2. Discusión	
Página 36	
3.2.3. Conclusiones	
Página 36	
4. IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE SEDIMENTOS	
Página 37	
4.1. Geología Forense (color del suelo)	
Página 37	
4.1.1. Resultados	
Página 37	
4.1.2. Discusión	
Página 40	
4.1.3. Conclusiones	
Página 41	
5. PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	
Página 43	
5.1. Transporte de sedimentos	
Página 43	
5.1.1. Resultados	
Página 43	
5.1.2. Discusión	
Página 47	
5.1.3. Conclusiones	
Página 48	
6. LABORATORIO	
Página 50	
6.1. Ambiente físico y técnicas de aplicación	
Página 50	
6.2. Gestión y control de muestras	
Página 51	
6.3. Preparación y análisis de muestras	
Página 51	





SIGLAS, ACRÓNIMOS Y CONVENCIONES

USO DEL SUELO

Agr	Area agricolas heterogeneas
AHu	Areas humedas continentales
CuA	Aguas continentales
Hrb	Area con vegetacion herbacea y/o arbustivo
Min	Area de extraccion minera
BPl	Bosques plantados
PFo	Bosques forestales
SVg	Area altoandina con escasa o sin vegetacion
Urb	Areas urbanizadas
Gla	Area Glaciar
ZAE	Zona agroecológica

VARIABLES BIOFÍSICAS, HIDROLÓGICAS Y EDÁFICAS

C	Factor de cobertura vegetalt
Ch	Altura de cultivo
E	Energía cinética de la precipitación
Ero	Fracción de costras de erosión
Fa	Fracción de agregados libres
Fg	Fracción de gravas libres del suelo
Grc	Fracción de gravas embebidas en el suelo
Hs	Humedad antecedente del suelo

K	Factor de erodabilidad del suelo
KTC	Coefficiente de capacidad de transporte de sedimentos
LS	Factor de longitud y pendiente
P	Factor de prácticas de conservación
Pi	Intensidad de precipitación
PP	Precipitación
R	Factor de erosividad de la lluvia
Rc	Coefficiente de escorrentía
Rn	Rugosidad del suelo
Ro	Escorrentía superficial
SL	Pérdida de suelo por evento de precipitación
Sp	Pendiente
SSC	Concentración de sedimento en suspensión
SSL	Pérdida anual del suelo
St	Costras estructurales
Vc	Cobertura vegetal
Wc	Cobertura de malezas
Cs-137	Radioisótopo de Cs-137

INSTITUCIONES, NORMAS, PROGRAMAS Y MÉTODOS

ISO	Organización Internacional de Normalización
LSCE	Laboratorio de Ciencias del Clima y del Medio Ambiente (Francia)
MoSSARD	Monitoreo de Suelos y Sedimentos Ante Riesgos y Desastres
NTP	Normas Técnicas Peruanas

PLS-R	Regresión por mínimos cuadrados parciales
POE	Procedimientos operativos estándar
PP0089	Programa Presupuestal Reducción De La Degradación De Los Suelos Agrarios
RISE	Repositorio de Indicadores de Seguimiento
TEST	Modelo de Erosión en Terrazas y Transporte de Sedimentos
TXRF	Fluorescencia de rayos X por reflexión total
UNE - EN	Asociación Española de Normalización y Certificación

DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS E IDENTIFICACIÓN DE FUENTES, PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DEL DISTRITO DE LIRCAY, HUANCVELICA

Resumen Ejecutivo

El distrito de Lircay, con 829 km², presenta predominancia de 10 tipos de suelos según su origen, destacando los depósitos de suelos bofedales (117 km²), glaciofluviales (52 km²) y glaciares (18 km²). Se observa que, en los últimos 35 años (1987-2022) la expansión agrícola (Agr) se incrementó de 24 a 35 km², así como una reducción de los humedales (AHu) de 12.6 a 10.9% (91 km²). Sobre los 4000 msnm, se identificó el 99.8% (149 km²) del suelo desnudo (Sv) y el 67% (404 km²) de la vegetación arbustiva (Hrb).

Para entender los procesos y tasas de erosión de los suelos del distrito de Lircay, en las últimas cinco décadas (1963-2023) y a escala de ladera, se empleó el radioisótopo de Cesio-137 (Cs-137). Las laderas con menores tasas de erosión fueron zonas con cobertura de pajonal 10 t/ha/año (pendiente 27°), seguido de laderas con cobertura de pino 12 t/ha/año (pendiente 25°), mientras los bofedales son zonas de depósito logrando acumular hasta 2 t/ha/año (pendiente 2°). Así mismo, al realizar un análisis geoestadístico se estimó que 20% del distrito puede explicarse a partir de las laderas muestreadas.

Con el propósito de cuantificar la erosión de los suelos agrícolas, para el ciclo hidrológico 2022-2023, se construyeron e instalaron dos estaciones meteorológicas estratégicamente ubicadas para monitorear las precipitaciones en la cuenca baja y alta. Además, se instalaron 30 parcelas experimentales de 1 m², en las coberturas predominantes como son: la arveja (19 t/ha/año), haba (18 t/ha/año), mostaza (15 t/ha/año), heno (12 t/ha/año), trébol (11 t/ha/año), avena (9 t/ha/año); pastos naturales (5 t/ha/año), suelos desnudos (4.5 t/ha/año) e ichu (1 t/ha/año). Los pastos naturales se monitorearon en la parte baja y los suelos desnudos en la parte alta, donde el suelo es más compacto. Por ello, las tasas de erosión pueden variar según las condiciones locales. Los bofedales actúan como zonas potenciales de acumulación de sedimentos.

Se implementó un modelo a escala de pixel empleando la herramienta WaTEM SEDEM, y se caracterizó las tasas y rangos de erosión. Su desarrollo requirió diversas fuentes de información, entre ellos los factores de cobertura, longitud-pendiente, erosividad y erodabilidad

del suelo. Además, se empleó las tasas obtenidas a partir de radioisótopos para el proceso de calibración. Las subcuencas de Ajohuarina, Coriscancha y Pircamayo presentan predominio de erosión moderada y fuerte, con distribución espacial heterogénea. En Ajohuarina, el 46% del área corresponde a erosión moderada y el 29% a fuerte; en Coriscancha, predominan las clases fuerte (38%), muy fuerte (21%) y severa (12%); mientras que en Pircamayo, las clases moderada y fuerte abarcan el 82% del territorio. Ninguna de las tres subcuencas presenta una dominancia de erosión débil o muy débil.

Mediante un muestreo espacial distribuido en todo el distrito, se identificó la procedencia de los sedimentos. Los aportes de las fuentes en los eventos evaluados mostraron la predominancia del sedimento proveniente de los suelos desnudos y cárcavas de hasta el 92%, mientras que los suelos cultivados y con cobertura nativa aportaron hasta el 13% del total.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo proporciona directa o indirectamente el 95% de todos los productos que consumimos a diario (FAO, 2015). Numerosas investigaciones a nivel mundial han indicado que la degradación de los suelos agrícolas es un fenómeno silencioso que se manifiesta cada vez más debido al cambio climático. Más aún, en países en desarrollo, los cambios de cobertura y uso del suelo, así como el sobrepastoreo, en territorios sin una Zonificación AgroEcológica (ZAE) han generado conflictos de uso del suelo con una degradación ambiental severa y un limitado desarrollo económico. Este último, sobre todo, en los pequeños agricultores andinos, catalogados como la población más vulnerable.

La gestión y planificación en nuestros territorios más vulnerables, se inicia con un diagnóstico del territorio en el cambio del uso de suelo, prácticas de conservación y degradación de los suelos a escala de cuenca, ladera y parcela. Es así, que todos ellos en su conjunto devienen instrumentos claves para un mayor aprovechamiento de nuestros suelos en función de la sostenibilidad económica.

1.1 Antecedentes

A nivel del Programa Presupuestal Reducción De La Degradación De Los Suelos Agrarios (PP0089), se tiene identificado como problema el deficiente aprovechamiento del recurso suelo en el ámbito agrario a nivel nacional. A partir de un análisis multicriterio de ocho bases de datos oficiales y reconocidas por el estado peruano, entre los principales se destacan mapas de pobreza (INIA, 2017), población según actividad económica agrícola, pecuaria y forestal (MIDAGRI, 2012), deforestación (MINAM, 2017), entre otros (PP0089, 2019-Anexo 2); se determinó la población objetivo, la cual asciende a 3'701.600 hectáreas de suelo degradado. Mediante un análisis estadístico espacial, se identificó que dichos suelos se encuentran distribuidos en mayor proporción en 52 distritos en 8 departamentos del Perú. Es oportuno indicar que, la población objetivo representa el 34% de la población potencial.

El 4 de julio de 2022, el indicador de desempeño del programa PP0089, específicamente para el Instituto Geofísico del Perú (IGP), fue aprobado y registrado en el Repositorio de Indicadores de Seguimiento (RISE) del Ministerio de Economía y Finanzas (MEF). Este indicador mide el porcentaje de área cartografiada con intensidades de erosión del suelo y se viene utilizando desde el 2023.

De este modo, el IGP generará conocimiento científico, contribuyendo a la gestión y planificación estratégica que desarrolle el estado peruano.

1.2 Objetivo del Tomo I

Los estudios científicos que se desarrollan en el Instituto Geofísico del Perú abarcan la erosión hídrica, sedimentación, transporte de sedimentos e identificación de fuentes de sedimentos. En el marco del PP0089 los estudios y productos se difunden a nivel de distrito y se dividen en dos tomos.

El Objetivo del presente documento (**Tomo I**) es brindar el diagnóstico y los principales resultados obtenidos mediante cinco herramientas o técnicas analíticas, entre ellas: granulometría por difracción láser, colorimetría, fluorescencia de rayos-X por reflexión total, detector de rayos gamma, y modelado espacio-temporal, empleadas para estimar la erosión hídrica, el transporte de sedimentos y la identificación de sus fuentes a nivel del distrito de Lircay.

El Tomo I constituye una herramienta útil que permitirá a técnicos, especialistas y las autoridades institucionales de los tres niveles de gobierno dedicados a la planificación territorial en el Perú, contar con un diagnóstico completo y detallado para la planificación y gestión de nuestro territorio.

Mientras que el **Tomo II** describe las metodologías, tareas y actividades desarrolladas en campo y gabinete para el desarrollo de cada una de las técnicas. Es decir, proporciona un conjunto de técnicas y métodos para estimar la erosión hídrica, el transporte de sedimentos y la identificación de sus fuentes.

2. DIAGNÓSTICO DEL DISTRITO DE LIRCAY

2.1. Cambio de cobertura y uso del suelo

2.1.1. Generalidades

El suelo proporciona servicios ecosistémicos esenciales como: la producción de alimentos, la regulación hídrica, el secuestro de carbono y la provisión de hábitat.

La ciencia del uso de la tierra, mediante técnicas de teledetección, ha demostrado ser un enfoque poderoso para detectar, explicar y comparar tendencias de uso de la tierra y los recursos, así como para modelar sus posibles impactos socioecológicos. Desde una escala global hasta pequeñas áreas protegidas.

A escala mundial, el 60% de los cambios en el uso y la cobertura del suelo tienen como origen la actividad humana, mientras que el 40% depende de controladores externos, como el cambio climático. Esto altera significativamente el equilibrio energético y los ciclos biogeoquímicos de la Tierra, convirtiéndose en una causa y consecuencia del cambio climático.

2.1.2. Discusión

En el norte del Perú, en la cuenca del río Maschon durante las últimas cuatro décadas, se ha identificado un cambio agresivo en la cobertura y uso de la tierra. A diferencia de esta realidad, en el distrito de Lircay, el uso del suelo se ha mantenido con pocos cambios (Figura 2.1.1). Por ejemplo, la agricultura (Agr) ha experimentado un aumento del 3% al 4.3% (36 km²) desde 1987 hasta el 2022. El suelo desnudo o con cobertura estacional (SVg) se mantiene en un 18% \pm 2 (150 km²), la vegetación herbácea natural (Hrb) se mantiene estable en un 65% \pm 1 (549 km²), los humedales (AHu) han disminuido de un 12.6% a un 10.9% (91 km²), los bosques forestales (PFo) han incrementado del 0.2% al 0.5% (3.8 km²), mientras que el área urbana (Urb) presenta un incremento constante del 0.02% al 0.17% (1.4 km²). En cuanto al uso minero (Min), fue difícil de caracterizar y se confundió con la cobertura de suelo desnudo.

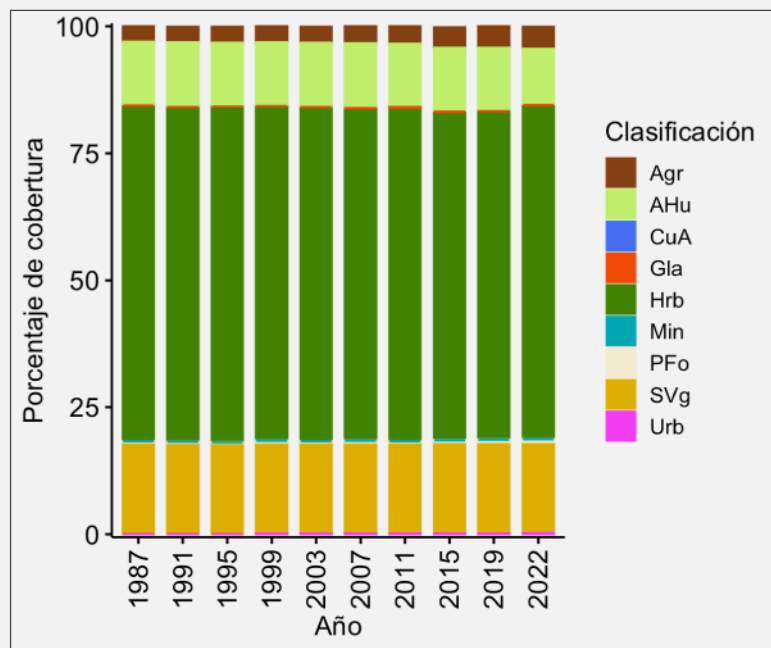


Figura 2.1.1. Dinámica de la cobertura vegetal y uso del suelo en el distrito de Lircay, durante los últimos 35 años.

A partir del producto generado, se extrajeron las zonas bajas (3150 msnm) hasta la cuenca media (4000 msnm), con el objetivo de analizar con mayor precisión el cambio del uso del suelo por debajo de los 4000 msnm (Figura 2.1.2). Se observa que la expansión agrícola (Agr) ha aumentado de 24 a 35 km², confirmando lo indicado por la literatura en cuanto a la expansión de la actividad agrícola. También se puede apreciar que el suelo desnudo (SVg), altamente erodable, abarca solo 0.32 km² de la cobertura para esta región. Como consecuencia, el 99.82% (149 km²) del suelo desnudo se encuentra sobre los 4000 msnm. Por debajo de esta altitud, solo se encuentran 3.2 km² de humedales (AHu). Finalmente, menos de la tercera parte de la vegetación arbustiva (Hrb, 145 km²) predomina por debajo de los 4000 msnm.

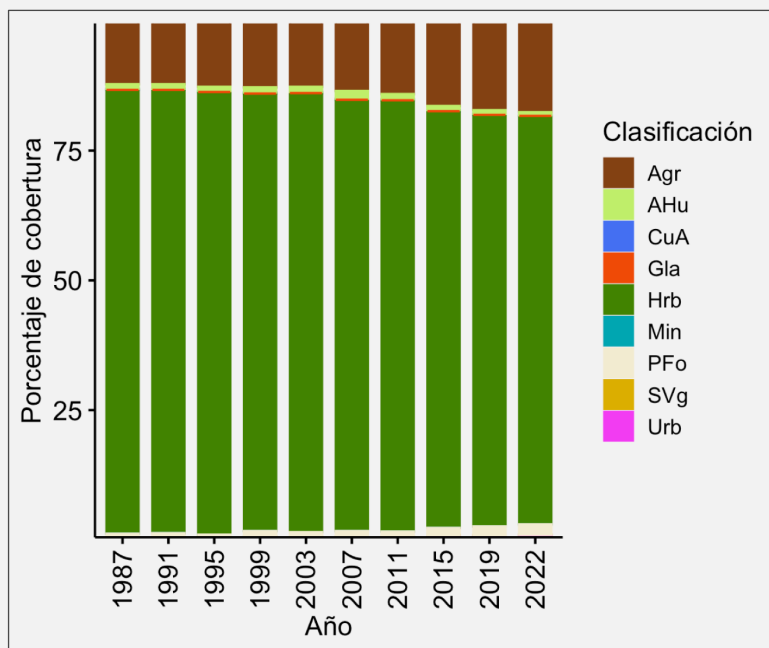


Figura 2.1.2. Dinámica de la cobertura vegetal y uso del suelo en el distrito de Lircay, durante los últimos 35 años, entre los 3150 hasta 4000 msnm.

2.1.3. Conclusiones

Durante las últimas cuatro décadas, diversos factores han acelerado el cambio del uso del suelo. Entre las actividades predominantes se encuentran la agricultura, la ganadería o pastos naturales, la extracción de turberas en los humedales, la tala ilegal y la minería (tanto formal como ilegal). Estos cambios, aunque no tan críticos para el distrito de Lircay, señalan una degradación de la tierra a largo plazo, comprometiendo la salud de los ecosistemas y el bienestar humano. También se identificó que las prácticas de conservación deben centrarse especialmente sobre los 4000 msnm, ya que existe una dominancia de suelos desnudos o vegetación estacional en un área de 149 km². Otro aspecto relevante es el potencial para la actividad ganadera, que dispondría de un área de 404 km².

2.2. Geología

2.2.1. Generalidades

La geología de la región de Lircay es diversa y compleja, la columna estratigráfica revela una secuencia desde el Paleozoico hasta el Cuaternario reciente. El Grupo Ambo precede a una secuencia de lutitas, areniscas y calizas del Carbonífero-Permiano inferior. La secuencia mesozoica, del Triásico superior al Cretácico inferior, presenta formaciones como las calizas de los Grupos Copacabana, Pucará y Goyllarisquizga, afectadas por plegamientos y levantamientos. Hacia el Oeste emergen las formaciones volcánicas Tantará y Sacsacero del Eoceno, mientras al Noreste se encuentra la Formación volcánico-sedimentaria Rumichaca. La fase tectónica Quechua I del Mio-Plioceno introduce el último plegamiento fuerte, afectando todas las formaciones del Paleógeno. La fase Quechua II inicia el volcanismo explosivo del Grupo Huachocolpa (Formaciones Caudalosa, Apacheta, Chahuarma y Portuguesa), cubriendo gran parte de la región. Los depósitos cuaternarios incluyen morrenas por la glaciación cuaternaria, seguidas por depósitos aluviales y fluviales recientes.

2.2.2. Discusiones y Conclusiones

El distrito de Lircay, exhibe 10 tipos de suelos diferentes según su origen. Destacan los depósitos de bofedales, que abarcan 117 km² y se caracterizan por la predominancia de limos, arenas y niveles con alto contenido de materia orgánica. Estos suelos presentan un pH fuertemente ácido, una textura muy gravosa, drenaje imperfecto y una velocidad de infiltración moderadamente lenta. Asociados a regiones frías con ciclos de congelación y descongelación, su relevancia agrícola radica en su capacidad para proporcionar una base rica en materia orgánica y retener agua. También se encuentran suelos glaciofluviales, que cubren 52 km² y presentan gravas, arenas en matriz limoarenosa y materiales residuales no consolidados. En Lircay, estos suelos adoptan la forma de terrazas, siendo generalmente compactos y resistentes a la erosión, lo que favorece un considerable desarrollo de las actividades agrícolas. Además, se identifican suelos moderadamente profundos con un drenaje moderado, baja susceptibilidad a la erosión, alto contenido de materia orgánica y una cantidad moderada de arcilla. Asimismo, se registra la presencia de suelos glaciares que abarcan 18 km², con depósitos morrenicos que contienen bloques angulosos rellenos con arcillas, limos y arenas, y una baja concentración de nutrientes.

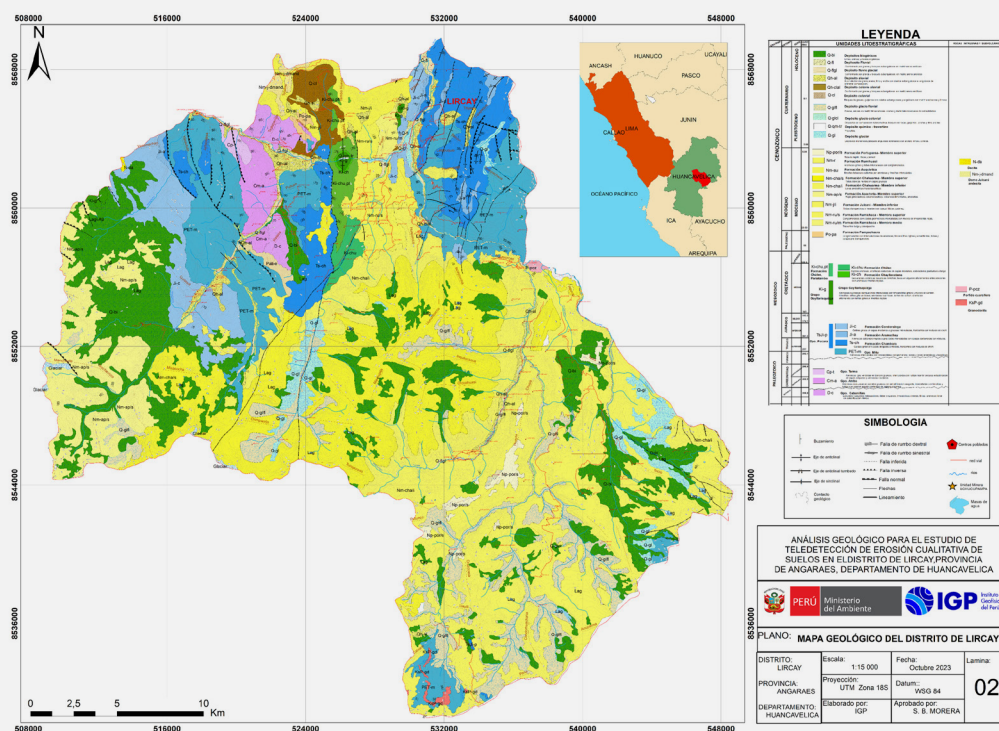


Figura 2.2.1. Mapa Geológico del distrito de Lircay a escala 1:20,000.

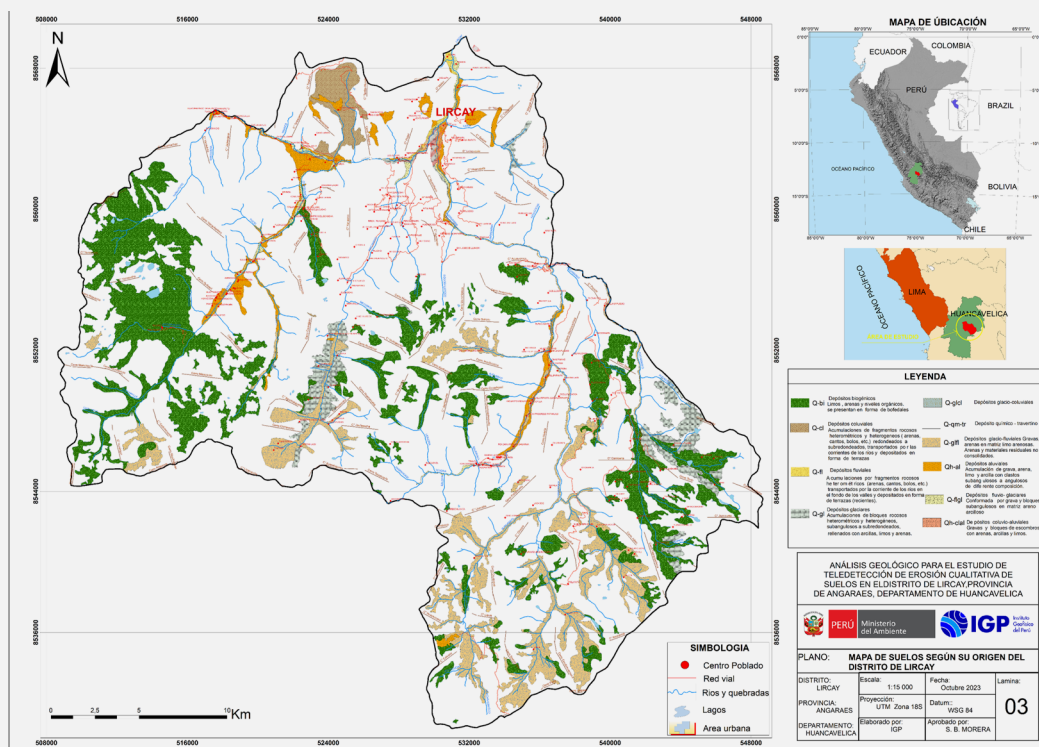


Figura 2.2.2. Mapa de suelos según su origen del distrito de Lircay a escala 1:20,000.

2.3. Hidrología

2.3.1. Generalidades

El distrito de Lircay es la capital de la provincia de Angaraes - Lircay y está localizada en la zona sureste del departamento de Huancavelica, en la sierra central del país. Está conformado por tres subcuencas principales: (i) Coriscancha (177 km²), (ii) Pircamayo (103 km²), (iii) Ajohuarina (632 km²) y cinco áreas de influencia. Se encuentra ubicada en la región hidrográfica del Amazonas. La red hídrica posee dos ríos principales, el Sicra y el Opamayo, que confluyen y dan origen al río Lircay, en la subcuenca Bajo Lircay. La información climatológica a partir de la red de monitoreo meteorológico se detalla en la sección 3.1.1 - Figura 3.1.1 a y b.

El distrito de Lircay se extiende en un territorio de 829 km², con una variación altitudinal máxima y mínima de 5112 msnm y 3101 msnm, respectivamente. El distrito está ubicado en la provincia de Angaraes con coordenadas geográficas de 12°59 03"S de latitud y 74°43 13"O de longitud, a una altitud

de 3355 msnm. El distrito registra precipitaciones acumuladas promedio de 782 mm/año, acentuadas durante la época de lluvias (diciembre a marzo), con un acumulado de 396 mm en dicho periodo. En algunos episodios de El Niño o El Niño Costero, la precipitación puede presentar incrementos puntuales o mayor frecuencia de eventos intensos, aunque sus efectos en la sierra central son variables y dependen de la magnitud y tipo del evento. Asimismo, las condiciones térmicas presentan temperaturas máximas promedio de 19 a 21 °C y mínimas promedio de 1 a 6 °C.

2.3.2. Discusiones y Conclusiones

La evaluación de la hidrología del distrito de Lircay se ha visto limitada debido a la falta de estaciones meteorológicas e hidrométricas. En este sentido, la implementación de la red de monitoreo durante el periodo febrero a junio del 2023, ha permitido caracterizar el régimen hidrológico de la cuenca del río Lircay, cuyo caudal promedio es de 5 m³/s.

3. EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO

3.1. Trampas de sedimentos

Las microparcelas experimentales, también conocidas como trampas de sedimentos a escala de 1 m² (Figura 3.1.1), son una herramienta eficaz para evaluar la erosión hídrica en áreas específicas. Estas pueden implementarse en parcelas con diversas pendientes y cultivos, lo que permite obtener datos precisos sobre la pérdida de suelo en diferentes condiciones. Esta técnica proporciona información valiosa sobre la degradación del suelo por erosión, lo que es fundamental para implementar prácticas de manejo sostenible de los suelos y prevenir la erosión en áreas rurales.



Figura 3.1.1. Trampa de sedimentos instalada en el distrito de Lircay.

3.1.1. Resultados

Se implementaron dos estaciones meteorológicas en el distrito de Lircay, cada una de las cuales albergó exitosamente 15 parcelas experimentales destinadas al estudio de la producción de sedimentos. Durante el periodo de estudio se registró una precipitación total de 573 mm de enero a mayo (Figura 3.1.2 a). Febrero destacó como el mes más lluvioso. Sin embargo, la humedad del suelo

exhibió una respuesta máxima del 12% (valor medio) en marzo. Posteriormente, la humedad del suelo experimentó una marcada disminución hasta mayo, en concordancia con una reducción significativa en la precipitación, la cual se mantuvo por debajo de los 50 mm, y el valor de la humedad descendió por debajo del 10%.

Según los datos recopilados en el producto PISCO, la precipitación anual se estima en 672 mm. Durante el periodo de enero a mayo, que corresponde al foco temporal de nuestro estudio, se registra un promedio de precipitación de 453 mm. Estos resultados implican un sesgo del 20%.

El análisis de precipitación, ilustrado en la Figura 3.1.2 b, revela que el 82.5% de las precipitaciones se clasifican como eventos tipo B según el índice de concentración propuesto. Esto sugiere que estos eventos de precipitación tienen una duración superior a 1 hora, lo que las clasifica como precipitaciones medianamente erosivas. En contraste, los eventos de tipo A que muestran una intensidad mayor, pero con una duración más breve representan solo el 12.5%. Un caso extremo son las precipitaciones tipo C, las cuales tienden a ser muy prolongadas, superando las 6 horas y no superando el 5% de ocurrencia.

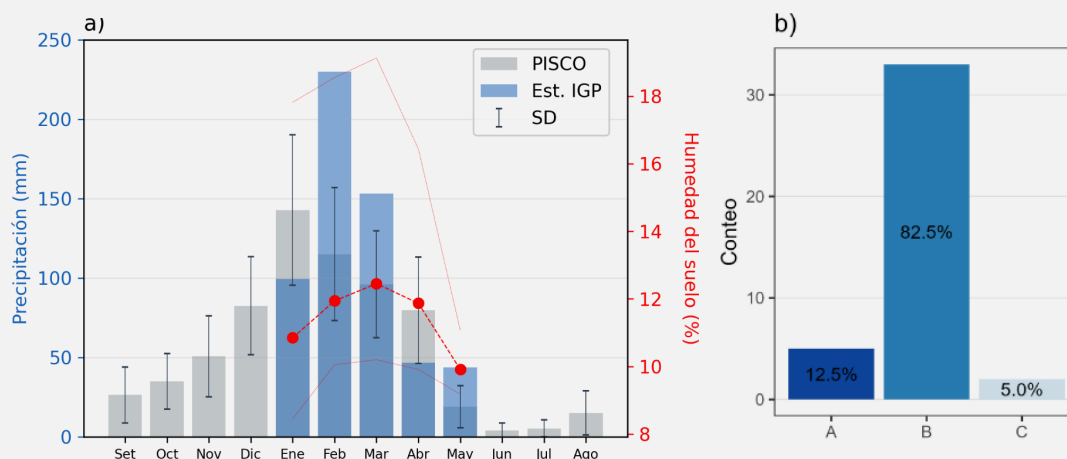


Figura 3.1.2. a) Precipitación y humedad del suelo mensual en el distrito de Lircay. b) Frecuencia de eventos de precipitación erosivas, clasificados según el índice de concentración donde se designa como "A" a aquellos eventos altamente erosivos hasta "C" a eventos menos propensos a la erosión.

En la Figura 3.1.3, se evidencia una notable generación de sedimentos en cultivos como arvejas, habas y mostaza, seguido de los cultivos herbáceos heno, trébol y avena. Un descubrimiento relevante en estos resultados es que las áreas carentes de vegetación o expuestas muestran una reducida producción de sedimentos. Este fenómeno puede atribuirse a la estructura del suelo, donde se ha observado una compactación significativa, ya sea debido a las características inherentes del suelo o a la compactación provocada por el pastoreo de animales, especialmente en las partes altas de las microcuencas

del distrito. En este contexto, las gotas de lluvia no logran redistribuir el suelo, y la escorrentía tampoco alcanza un coeficiente crítico para arrastrar las partículas del suelo.

Resulta notable que la cobertura vegetal de "Ichu" se distinga como una de las estrategias más efectivas para controlar la erosión del suelo. Por otro lado, los páramos, aunque no están representados en la Figura 3.1.3 debido a la escasa cobertura de muestreo, indican áreas susceptibles a la acumulación de sedimentos.

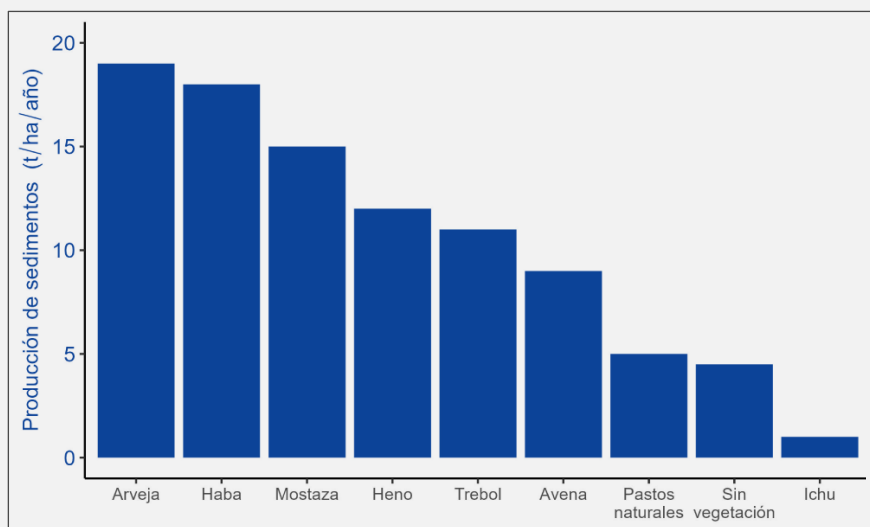


Figura 3.1.3. Producción de sedimentos anuales según el tipo de cobertura.

En la Figura 3.1.4, todas las variables están centradas en el origen del gráfico, lo que indica que se han normalizado para permitir comparaciones justas entre ellas. Los vectores que se extienden desde el centro representan las diferentes variables. La longitud de estos vectores sugiere la magnitud de la influencia de cada variable en la pérdida de suelo (SL). La dirección de los vectores proporciona información sobre la correlación entre las variables. Por ejemplo, las variables que apuntan en la misma dirección generalmente están positivamente correlacionadas. Además, la proximidad de los vectores a la línea roja de "SL" puede indicar su relevancia en la pérdida de suelo frente a variables que pueden predecir el fenómeno. Por ejemplo, el coeficiente de escorrentía (Rc), los agregados libres (Fa), precipitación (PP) y escorrentía (Ro) se sitúan próximos a la línea de 'SL', lo que sugiere que son factores significativos en la pérdida de suelo. En contraste, la cobertura vegetal (Vc) muestra una relación inversa con la pérdida de suelo, posicionándose como una variable determinante en el control de la erosión del suelo.

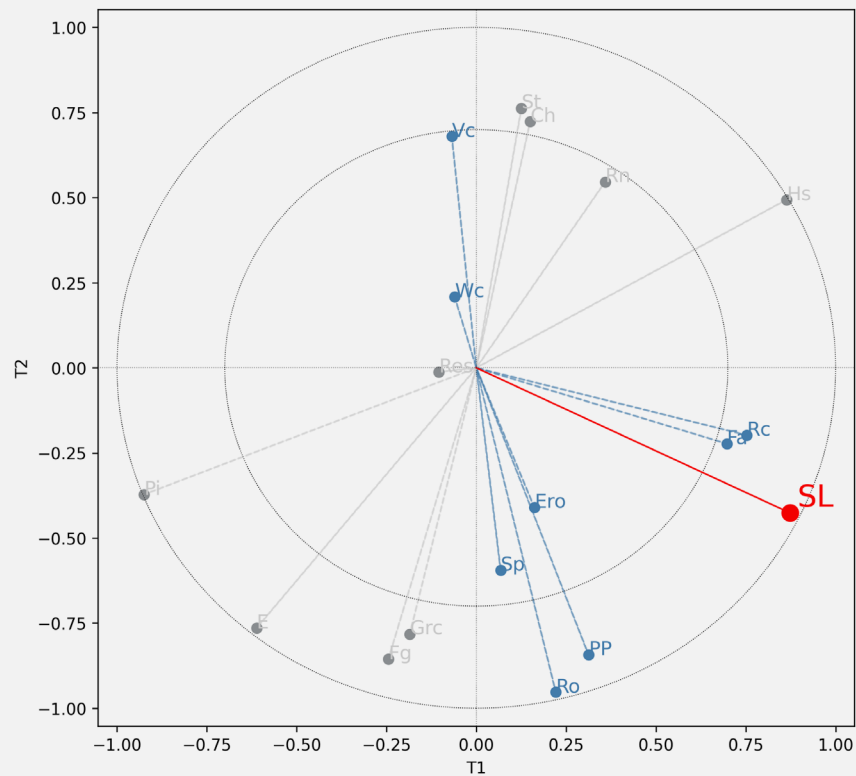


Figura 3.1.4. Biplot del modelo PLS-R aplicado a parcelas experimentales para identificar las variables más influyentes en la pérdida de suelo (SL). Se destacan como factores determinantes: la fracción de agregados libres (Fa), el coeficiente de escorrentía (Rc), la pendiente del terreno (Sp), la precipitación acumulada (PP), la escorrentía superficial (Ro), las costras de erosión (Ero), la cobertura vegetal (Vc) y la cobertura de malezas (Wc).

Basado en el análisis de regresión por mínimos cuadrados parciales (Partial Least Squares Regression, PLS-R) mostrado en la Figura 3.1.4, y en una proyección de las variables más relevantes, se llevó a cabo un modelado de Erosión en Terrazas y Transporte de Sedimentos (Terrace Erosion and Sediment Transport, TEST) para predecir la pérdida de suelo por evento de precipitación (Figura 3.1.5). Los resultados de la regresión y modelado presentan valores estadísticos significativos con un R² de 0.85 y un p-value < 0.001. Lo que indica que el modelo predice de manera efectiva la producción de sedimentos mediante la fórmula:

$$\text{Log (SL)} = 0.94 + 1.29 \text{ Log}(E R_c) + 0.50 Fa - 0.11 V_c$$

Donde:

E:	Energía cinética (MJ/ha)
Rc:	Coefficiente de escorrentía
Fa:	Fracción de agregados libres (%)
Vc:	Cobertura vegetal (%)

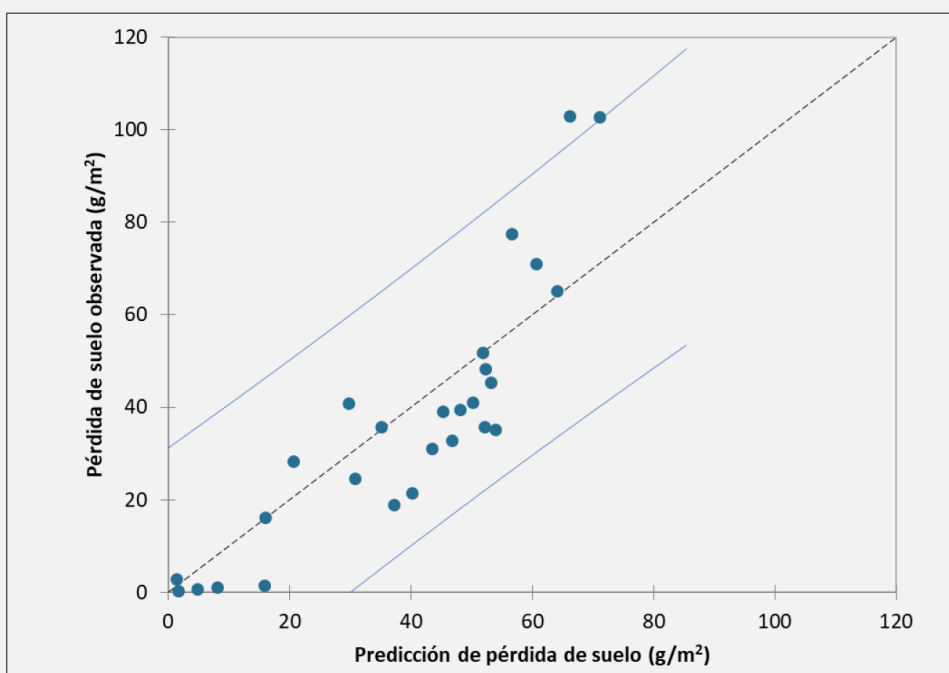


Figura 3.1.5. Pérdida de suelo modelada y observada por evento de precipitación.

3.1.2. Discusión

En el estudio llevado a cabo en el distrito de Lircay, se desplegaron dos estaciones meteorológicas, cada una equipada con un total de 15 parcelas experimentales, con el objetivo de supervisar la precipitación y examinar la generación de sedimentos. Durante el periodo de investigación, que abarcó desde enero hasta mayo de 2023, se documentó una precipitación acumulada de 573 mm, destacándose febrero como el mes más lluvioso. Para enriquecer el contexto, se incorporaron datos de precipitación provenientes de PISCO, con el fin de ofrecer un panorama más completo, aunque no se busca establecer comparaciones entre los cinco meses de estudio y una serie histórica más extensa y grillada. A pesar de ello, se identificó un error mensual cercano al 50%, el corto periodo de análisis impide obtener conclusiones significativas. Sin embargo, a pesar de la alta precipitación, la humedad del suelo mostró una respuesta máxima del 12% en marzo, seguido de una marcada disminución hasta mayo, coincidiendo con una reducción significativa en la precipitación. Este descenso llevó la humedad del suelo por debajo del 10%. El análisis de la precipitación por evento reveló que el 82.5% de las precipitaciones se clasifican como eventos tipo B, indicando una duración superior a 1 hora y considerándose medianamente erosivas. Por otro lado, los eventos tipo A, de intensidad mayor, pero duración más breve, representaron el 12.5%, mientras que las precipitaciones tipo C fueron muy prolongadas, superando las 6 horas con una ocurrencia del 5%.

Se mostró una producción destacada en cultivos como arvejas, habas y mostaza alcanzando tasas aproximadas de pérdida de suelo de 20 t/ha/año, seguido de los cultivos herbáceos heno, trébol y avena llegando cerca de las 12 t/ha/año. La ausencia de vegetación expuso una reducida producción de sedimentos, atribuida a la compactación del suelo, ya sea por características naturales o por el pastoreo de animales, impidiendo la redistribución del suelo por gotas de lluvia y la escorrentía de partículas. Estos resultados contrastan con investigaciones que utilizaron parcelas similares de 1m². Por ejemplo, en la Sierra de Enguera, España, se registró un desprendimiento de suelo de 44 t/ha/año bajo labranza y falta de cobertura vegetal. De manera similar, en la Sierra Madre Occidental, México, informaron valores de 25 t/ha/año. En la Meseta de Mossi, Burkina Faso registraron una erosión del suelo menor a 1 t/ha/año para una precipitación anual de 638 mm.

Las tasas de producción de sedimentos en estas zonas son moderadas en comparación con la parte norte de los Andes peruanos, donde se registran cerca de 35 t/ha/año en tubérculos como el olluco.

Es importante destacar que la cobertura vegetal de "Ichu" ha demostrado ser altamente efectiva en el control de la erosión del suelo, exhibiendo tasas de pérdida de sedimentos inferiores a 1 t/ha/año, lo cual es consistente con las

observaciones en el norte del país. Por otro lado, los páramos señalaron zonas potenciales de acumulación de sedimentos.

Se implementó un modelo para la producción de sedimentos utilizando la metodología TEST (Terrace Erosion and Sediment Transport), evidenciando que los agregados libres (Fa) contribuyen al proceso de producción de sedimentos, mientras que la presencia de cobertura vegetal (Vc) disminuye dicho proceso. Los resultados exhiben consistencia en la reducción de la producción de sedimentos con el aumento de la cobertura vegetal, como se ha observado en investigaciones previas. No obstante, es crucial señalar que la variable que amplifica la producción de sedimentos tiende a variar según las características del suelo y la precipitación, resaltando la importancia de considerar estas características al evaluar la producción de sedimentos de manera local.

Es esencial llevar a cabo estudios a diversas escalas con el fin de determinar si la erosión en cárcavas, surcos (*rill erosion*) o entre surcos (*interrill erosion*) ya que ejerce una influencia predominante en los fenómenos de erosión en el distrito de Lircay. Además, abogamos por la implementación de un enfoque pragmático mediante la instalación de fajinas o barreras en la parte baja de la cuenca-distrito, similares a las presentes en la parte alta, con el objetivo de mejorar el control efectivo de la erosión.

3.1.3. Conclusiones

Se implementó un modelo de Erosión en Terrazas y Transporte de Sedimentos (Terrace Erosion and Sediment Transport, TEST) para la producción de sedimentos, evidenciando que los agregados libres contribuyen al proceso, mientras que la cobertura vegetal lo disminuye, consistente con investigaciones previas. Las tasas de producción de sedimentos en áreas cultivadas y de pastizales son de alrededor de 20 t/ha/año y 12 t/ha/año, respectivamente, contrastando con estudios similares tanto en los Andes peruanos como a nivel internacional. Se subraya la eficacia de la cobertura de lchu en la protección del suelo. También, se destaca la importancia de estudios a diversas escalas para determinar la influencia predominante de la erosión en diferentes contextos del distrito de Lircay. Se aboga por la implementación de fajinas o barreras, similares a las existentes en la zona alta, con el objetivo de fortalecer el control eficaz de la erosión en las proximidades de áreas destinadas a la agricultura extensiva, especialmente en la región baja de la cuenca del distrito de Lircay.

3.2. Radioisótopos

Las técnicas nucleares ofrecen una novedosa y sólida base científica para evaluar y cuantificar las tasas de redistribución (erosión y/o depósito) del suelo. Los radioisótopos más comunes empleados como trazadores de la redistribución de los suelos son el Cs-137, Pb-210 en exceso y Be-7. Cada uno ofrece una escala temporal y resolución diferente. El Be-7 permite evaluar pérdidas de suelos en periodos cortos (desde eventos de precipitación), el Cs-137 periodos medios (>50 años) y el Pb-210 en exceso para periodos largos (>100 años). El presente estudio se limitó al uso del Cs-137. Este radioisótopo de origen antropogénico fue liberado durante las pruebas nucleares entre 1950-1965, se dispersó globalmente por los patrones de circulación atmosféricos, y luego se depositaron en la capa superficial del suelo por acción de la precipitación. El balance de su inventario respecto a un sitio de referencia permite establecer zonas de erosión o depósito, además de lograr datos cuantitativos al integrar modelos de balance de masa. El Cs-137 es estable y se adhiere a las partículas finas del suelo de forma irreversible después de su deposición. Su vida media de 30 años permite lograr tasas de redistribución mayores a 50 años. No obstante, también presenta desafíos y limitaciones como tiempos de medición largos (>24 horas por cada muestra), baja concentración de actividad en el hemisferio sur, equipo multidisciplinario de ciencias del suelo y técnicas nucleares.

3.2.1. Resultados

En el distrito de Lircay se recolectaron un total de 94 muestras entre zonas de fuerte pendiente y 3 usos de suelo predominantes en las cuencas (pajonal, bofedales y plantaciones de bosques). Además de 4 puntos de referencia localizados a diferentes altitudes y ubicaciones. En la Figura 3.2.1, se presentan las zonas de muestreo y en la Figura 3.2.2 los pasos desde la extracción de testigos hasta la medición de las muestras por espectrometría de rayos gamma.

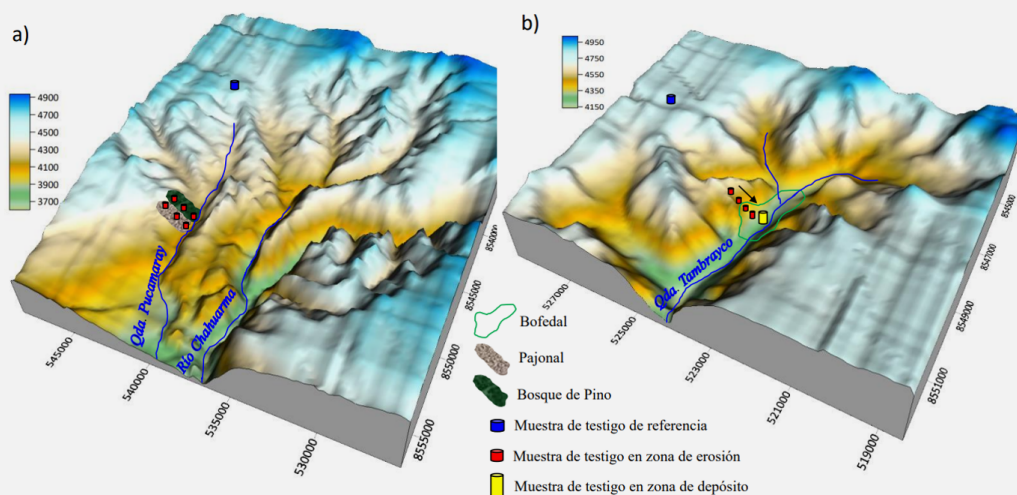


Figura 3.2.1. (a) corresponde a una ladera ubicada dentro de la su cuenca Pircamayo con cobertura de pajonal y bosque, y (b) ladera dentro de la sub cuenca Ajuhuarina donde existe una combinación de pajonal y bofedal.



Figura 3.2.2. Proceso (a) extracción de testigos, (b) testigos de suelo compuesto, (c) laminado de testigos, (d) acondicionamiento de muestra, (e) muestras acondicionadas y (f) medición de muestras por espectrometría de rayos gamma.

Habiendo realizado un agrupamiento de las concentraciones de actividad de Cs-137 por usos de suelo (Figura 3.2.3); se puede verificar que las mayores concentraciones están en los bofedales, seguido de los pajonales, bosques y suelos desnudos. Esta tendencia también se presenta en los inventarios de Cs-137.

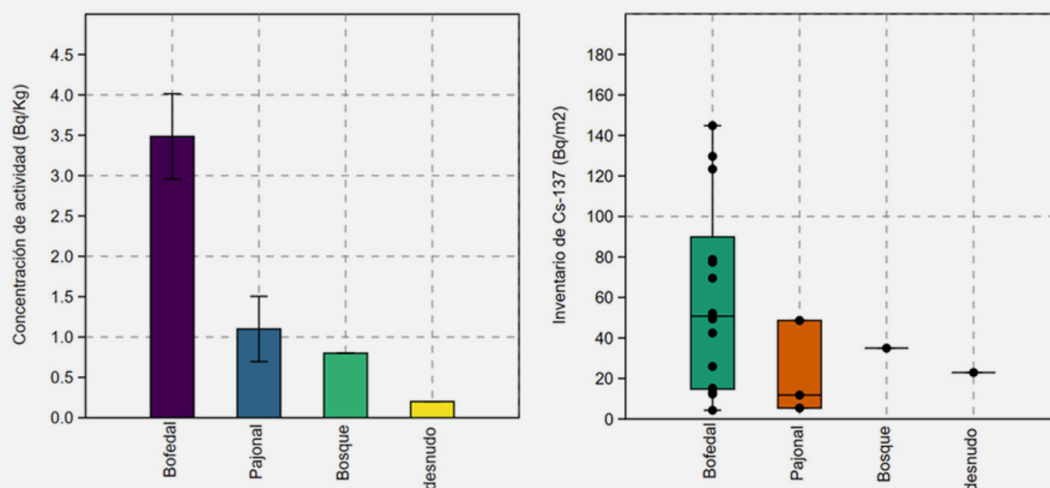


Figura 3.2.3. Concentración de actividad e inventario de Cs-137 por usos de suelo muestreados en el distrito de Lircay.

En la Figura 3.2.4, se presenta la distribución de Cs-137 en el perfil del suelo en los sitios de referencia, erosión y depósito identificados en el distrito de Lircay. En el sitio de referencia se muestra un patrón de disminución exponencial de la concentración de Cs-137 a medida que incrementa la profundidad. Este comportamiento es típico de una zona no disturbada donde la actividad antrópica es mínima y el radionúclido experimenta solamente desintegración radiactiva de forma natural. Respecto a la zona de erosión se logra ver una baja concentración respecto al sitio de referencia. Respecto al sitio de depósito, la distribución muestra que la acumulación del Cs-137 se incrementó en las capas superficiales. Lo cual es un indicador que la pérdida de suelos en los últimos años es mayor respecto a años anteriores. Hay que precisar que la deposición del Cs-137 coincide con el inicio del Antropoceno, período al cual se le atribuye un aceleramiento de la degradación de los suelos y cambios en las medias de los indicadores climáticos.

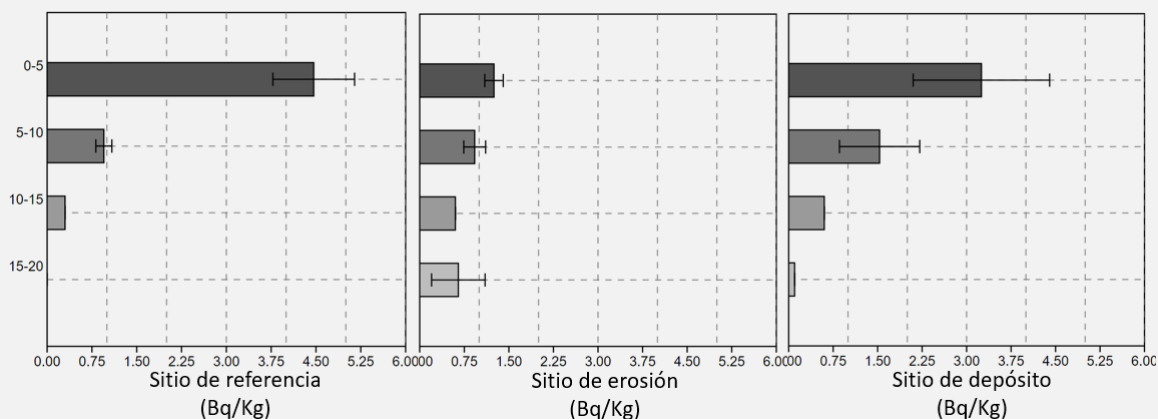


Figura 3.2.4. Concentración de actividad e inventario de Cs-137 por usos de suelo muestreados en el distrito de Lircay.

Los pajonales lograron retener el Cs-137 desde las partes altas de la ladera. Se verifica una disminución progresiva a medida que la pendiente llega al fondo del valle. Respecto a los bosques podríamos indicar que los pajonales tienen un mejor desempeño en cuanto a la conservación física de los suelos; ya que ambas laderas son adyacentes y presentan condiciones topográficas similares. La tasa de erosión promedio es de 10 t/ha/año (Figura 3.2.5).

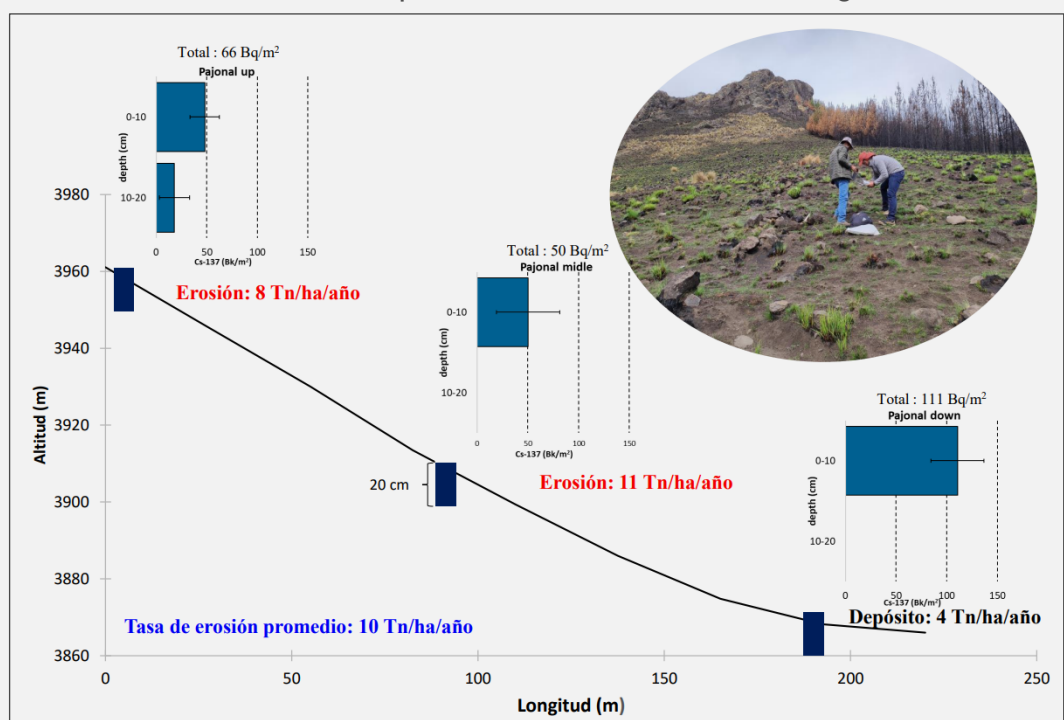


Figura 3.2.5. Distribución del inventario de Cs-137 en el perfil del suelo y tasas de redistribución en los transectos de muestreo en zona de pajonal.

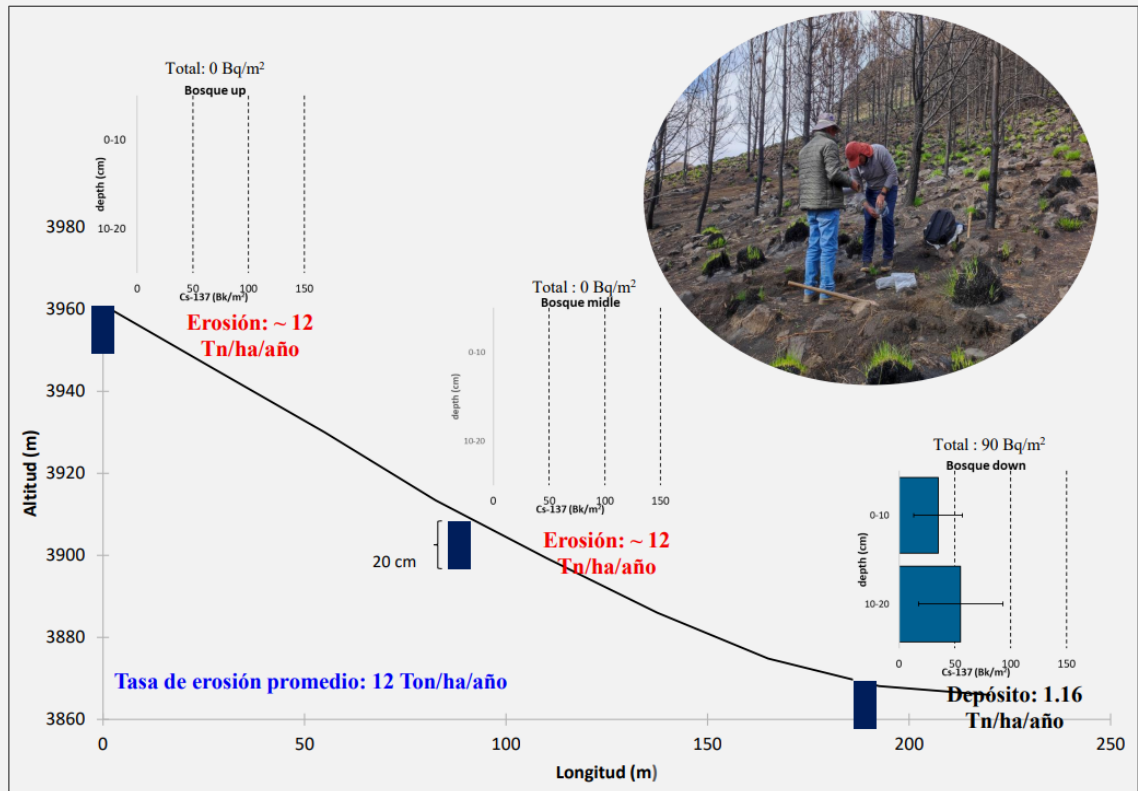


Figura 3.2.6. Distribución del inventario de Cs-137 en el perfil del suelo y tasas de redistribución en los transectos de muestreo en zona de plantación de pinos.

En el caso de ladera con plantaciones de pino, se pudo verificar que el Cs-137 fue removido en su totalidad en las partes altas, mientras en la parte baja se encontró 95 Bq/m² de Cs-137. Este es un indicador que en los últimos 60 años la ladera en las partes altas perdió igual o mayor a 20 cm de capa superficial de suelo.

La caracterización del cambio de cobertura de suelo del distrito de Lircay indica la presencia de pinos en la ladera desde el año 2019 (4 años de antigüedad). La llegada de Cs-137 a todos los suelos del hemisferio sur se estima entre 1960-1965. Es decir, el Cs-137 se depositó en esta ladera antes de las plantaciones, razón por la cual no fue necesario realizar correcciones por interceptación de Cs-137 en las hojas de los pinos. Finalmente, la tasa de erosión promedio se estima en 12 t/ha/año (Figura 3.2.6).

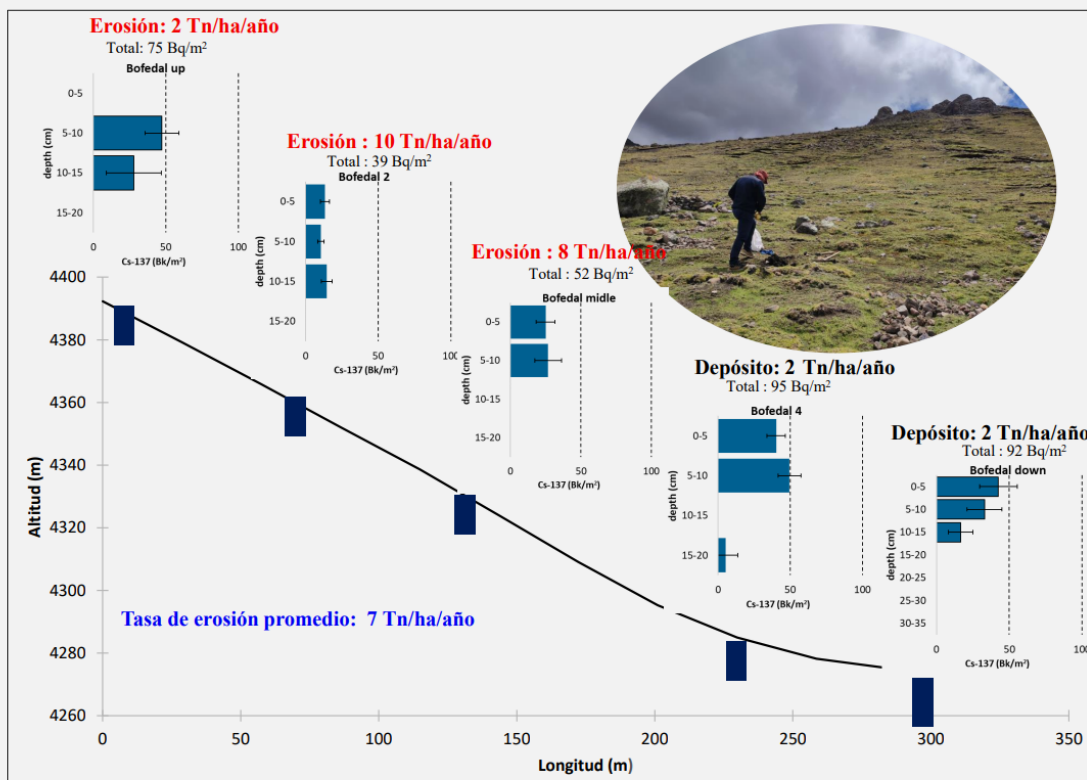


Figura 3.2.7. Distribución del inventario de Cs-137 en el perfil del suelo y tasas de redistribución en los transectos de muestreo en laderas con bofedal.

En la Figura 3.2.7 se presenta los procesos de redistribución del suelo en una ladera con un uso combinado de pajonales y bofedales. La ladera con pendiente tiene cobertura de pajonal y el fondo de valle bofedal. Este tipo de laderas es común, sobre todo en las partes altas del distrito. La distribución del Cs-137 en el perfil de suelo del bofedal muestra un descenso exponencial desde la capa superficial; lo cual es un indicador que el proceso de erosión en esta ladera no estuvo influenciado por acciones antrópicas como la labranza u otro tipo. Respecto a la ladera de pajonal se ve una distribución uniforme del Cs-137 en los primeros 20 cm de suelo, lo cual confirma una pérdida progresiva del suelo principalmente por acción de la erosión hídrica. Se estima una tasa de erosión promedio de 7 t/ha/año en la ladera con pajonal, mientras en la zona de valle donde se ubican los bofedales logran acumular hasta 2 t/ha/año.

3.2.2. Discusión

Es importante precisar que las tasas de erosión obtenidas corresponden a un valor promedio interanual de 60 años (1963-2023). Para el caso de las laderas con cobertura de pajonal y plantaciones de pino se pudo verificar por medio de imágenes satelitales que anterior al 2016 fueron áreas donde se practicaron la agricultura. Por lo tanto, las tasas obtenidas representan un promedio retrospectivo donde hubo una combinación de pastizales, pastoreo, agricultura y prácticas de conservación de suelos. Adicionalmente, aclarar que en el día del muestreo se verificó que tanto la ladera con bosque y pajonales sufrieron incendios. Este es un factor que también debe ser considerado como un agente que acelera las tasas de erosión sobre todo en las primeras lluvias del año hidrológico inmediato, donde la cobertura de suelos se ve reducida considerablemente y todo el material quemado es arrastrado con facilidad.

3.2.3. Conclusiones

Las tasas promedio de erosión del suelo durante un periodo de 60 años (1963-2023), estimadas mediante el radioisótopo Cs-137, alcanzan 10 t/ha/año en laderas cubiertas por pajonales, mientras que en laderas con plantaciones recientes de pino se registran hasta 12 t/ha/año. En contraste, los bofedales funcionan como zonas de acumulación, con tasas de depósito de hasta 2 t/ha/año. El análisis de la distribución vertical del Cs-137 en los primeros 20 cm del suelo reveló que, en laderas con pajonales, el Cs-137 se conserva incluso en pendientes superiores a 33°, lo que indica un transporte de sedimentos uniforme y sin remoción significativa del horizonte superficial. Por el contrario, en laderas intervenidas con plantaciones de pino, se evidenció una remoción total del Cs-137. Este patrón sugiere que la perturbación del suelo combinada con las altas pendientes aceleró significativamente los procesos erosivos.

4. IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE SEDIMENTOS

4.1. Geología Forense (color del suelo)

La geología forense es una disciplina que combina los principios de la geología para estudiar eventos relacionados con la Tierra. En este caso se utilizó para identificar la procedencia de los sedimentos que están llegando a los ríos utilizando el color de suelo como trazador, ya que es una de las características que proporciona información valiosa sobre las condiciones del suelo en un área determinada.

Los trazadores permitieron agrupar las muestras de suelo de acuerdo con sus características colorimétricas similares, a dichos grupos se les llamó "fuentes de sedimentos". En el caso del distrito de Lircay se obtuvieron tres grupos de fuentes, los cuales son:

- *Grupo 1 (G1):* agrupa a los suelos color pardo oscuro característico de los suelos cultivados y suelos con vegetación natural.
- *Grupo 2 (G2):* corresponde a los suelos que varían desde rojizo, pardo claro hasta amarillento, colores característicos de los suelos desnudos y laderas expuestas.
- *Grupo 3 (G3):* agrupa a los suelos con tonos grisáceos proveniente de las cárcavas, bancos de ríos y quebradas.

La identificación de las fuentes de sedimentos nos permite detectar cual es el grupo que está aportando mayor cantidad de sedimento hacia los ríos, esto se logra analizando el sedimento depositado o transportado en los mismos a los cuales se les llama "mezclas de sedimento".

4.1.1. Resultados

En la Figura 4.1.1 podemos observar los aportes de sedimento de cada grupo de fuentes de forma espacial en el distrito de Lircay. Las contribuciones de sedimento están representadas por el gráfico de pastel con los colores representativos de cada grupo; Grupo 1 "G1" el cual abarca los suelos cultivados y cubiertos por vegetación natural, Grupo 2 "G2" representa a los suelos desnudos y laderas y; el Grupo 3 "G3" abarca los suelos por erosión por cárcavas y bancos de ríos y quebradas.

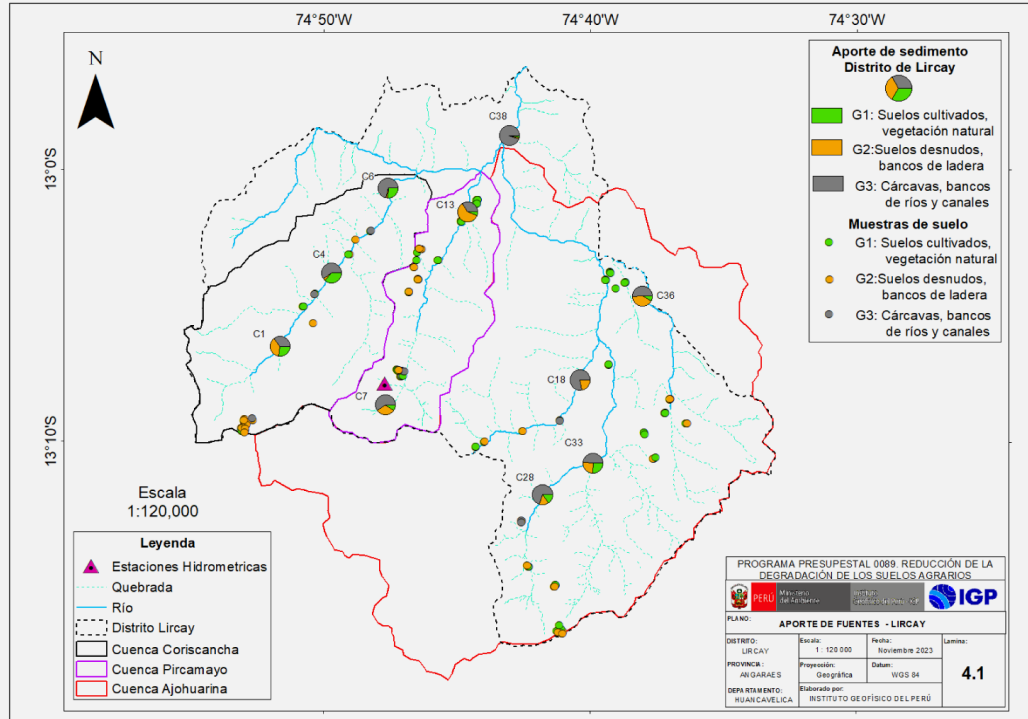


Figura 4.1.1. Sedimento predominante en las mezclas de los ríos del distrito de Lircay - Huancavelica.

Los resultados obtenidos utilizando las características colorimétricas del suelo como trazadores, muestran la predominancia de sedimento proveniente de los grupos G2 (suelos desnudos y laderas) y G3 (cárcavas, bancos de ríos y canales) con porcentajes de hasta el 61% y 94% respectivamente (Tabla 4.1.1).

Tabla 4.1.1. Porcentajes de contribución de sedimento de cada grupo de fuentes

Aporte de sedimentos de cada grupo (%)			
Mezcla	G1	G2	G3
C1	27%	38%	35%
C4	36%	4%	59%
C5	26%	3%	71%
C7	9%	31%	59%

C13	6%	61%	34%
C18	0%	22%	78%
C28	15%	15%	69%
C33	26%	26%	48%
C38	3%	3%	94%

El aporte máximo de sedimento del Grupo 1 fue del 36% en una mezcla de sedimento localizada en la parte media de la cuenca Coriscancha, mientras que a la salida de las tres cuencas (en el río Allato) la contribución de este grupo fue del 3% (Mezcla C18).

Se logró medir los parámetros colorimétricos de dos eventos de crecida monitoreado en el río Allato, río que se encuentra ubicado en la parte baja del distrito. Estos eventos permitieron observar de manera dinámica el aporte de sedimentos de cada grupo de fuentes (Figura 4.1.2).

Los porcentajes de aporte de sedimento de cada grupo están representados en el gráfico de barras con sus respectivos colores, verde para G1, anaranjado para G2 y gris para G3. Al gráfico de barras se superpusieron las concentraciones de sedimento en suspensión (SSC) en gramos por litro (g/L) y los caudales del río (m³/s), datos que permiten observar la dinámica de estas variables y los aportes de sedimento.

En ambos eventos se observó un aporte menor del 13% del grupo G1, que corresponde a suelos con cultivos y vegetación natural, mientras que el sedimento predominante fue el que producen las laderas, suelos desnudos y erosión en forma de cárcavas.

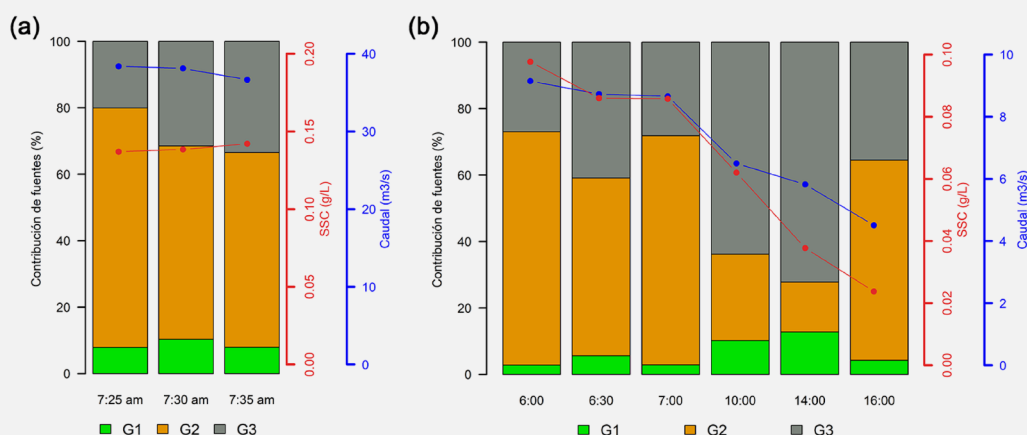


Figura 4.1.2. Evento de crecida del río Allato monitoreado el (a) 03 de abril de 2023 y (b) 9 de mayo de 2023.

Respecto a las concentraciones de sedimento en suspensión (SSC) y niveles, no se observó una correlación con los cambios de aportes de sedimentos, sin embargo, en el evento del 9 de mayo de 2023 (Figura 4.1.2 b) se puede observar una correlación “directa” entre el nivel del río y las concentraciones de sedimentos en suspensión, ya que esta incrementa cuando los niveles del río aumentan y disminuye cuando los niveles del río también lo hacen.

4.1.2. Discusión

Visualizando los resultados espacialmente (Figura 4.1.1) y por evento de crecida (Figura 4.1.2 a y b), se aprecia que en las tres cuencas existe un deterioro de las áreas que se encuentran expuestas directamente hacia los factores climáticos como son lluvias y vientos.

En el caso de los grupos G2 y G3, estos se deterioran debido a los procesos de erosión hídrica como son erosión por salpicadura, laminar, surcos y cárcavas. Cabe mencionar que la erosión por surcos y cárcavas actúan como quebradas efímeras, las cuales se activan en época de lluvia y se conectan con los ríos transportando el sedimento hacía los mismos. A pesar de que este tipo de suelos ocupa el 18% del distrito, se observó que del sedimento que es transportado por los ríos hasta el 92% procede de la erosión por surcos de los suelos desnudos y la erosión tipo cárcavas (Figura 4.1.3 a y b).

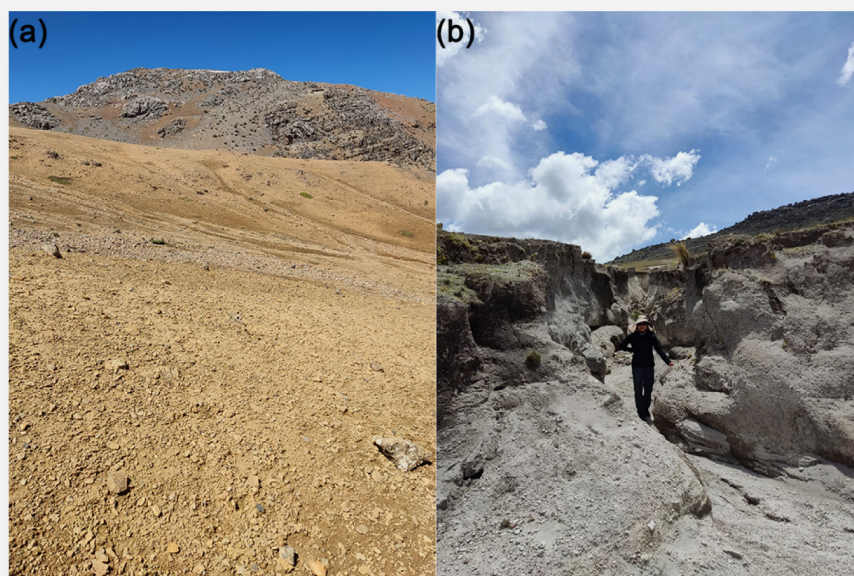


Figura 4.1.3. Principales fuentes de sedimentos en el distrito de Lircay: a) suelo desnudo (G2) y, b) cárcava (G3).

Por otro lado, se observa poca predominancia de aporte de suelo proveniente de áreas de cultivo y vegetación natural, los cuales son representados por el Grupo 1. Este porcentaje muestra que, a pesar de que los suelos labrados y sometidos a prácticas agrícolas son altamente susceptibles a la erosión, no están llegando hacia los ríos.

Uno de los motivos por el cual los sedimentos del Grupo 1 no esté llegando hacia los ríos puede deberse a que este tipo de cobertura ocupa aproximadamente el 4% del distrito y/o a la forma de los cercos de las parcelas (Figura 4.1.4 a y b). Los cercos que se observan en la mayoría de parcelas consisten en muros con rocas, los cuales estarían reteniendo el suelo erosionado e impidiendo su llegada a los ríos.

Respecto a las áreas con vegetación natural, a pesar que éstas ocuparían el 78% del área total del distrito, el aporte de sedimentos hacia los ríos es bajo, esto debido a que la cubierta vegetal natural protege al suelo de los impactos de las lluvias, siendo el aporte máximo de sedimento del grupo G1 de hasta el 36%.

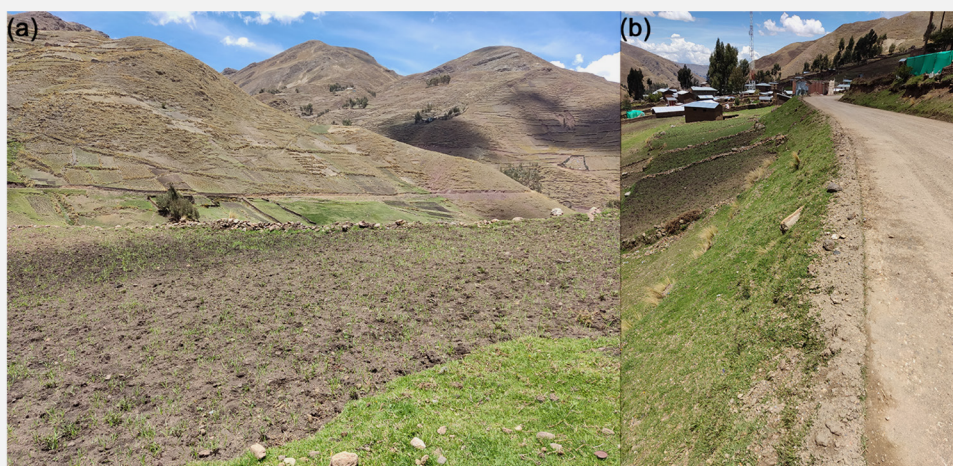


Figura 4.1.4. Factores que reducen el aporte de sedimentos desde fuentes del Grupo 1 (G1) en el distrito de Lircay: a) ladera con cobertura vegetal natural, b) parcelas agrícolas cercadas con muros de roca.

4.1.3. Conclusiones

- El rastreo de sedimentos permitió identificar la procedencia de los sedimentos que están llegando a los ríos. Para ello se utilizó las características colorimétricas de los suelos, características que fueron muy útiles y permitieron discriminar los suelos en tres grupos.
- Los resultados mostraron que el sedimento predominante en los ríos proviene

de las laderas, suelos desnudos, cárcavas y bancos de ríos, con aportes de hasta el 92%.

- Los suelos de áreas agrícolas y vegetación natural aportaron como máximo el 36% en las mezclas de sedimentos de los ríos y menos del 13% en los eventos de crecida del río medidos.

5. PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

5.1. Transporte de sedimentos

El suelo es el mayor recurso natural que sostiene a la gran parte de los organismos vivos. El proceso de degradación del recurso suelo comprende el proceso de desintegración en partículas más pequeñas como rocas, arenas, arcillas, limo, y minerales; para posteriormente ser arrastrados, transportados, redistribuidos y depositados a lo largo de la cuenca hidrográfica.

La principal limitación para llevar a cabo estudios sobre la conservación o degradación del recurso suelo, es la falta de registros a nivel espacial y temporal. Actualmente, puede abordarse mediante técnicas de modelado hidrológico y transporte de sedimentos. Estas herramientas computacionales permiten responder a preguntas del cambio, variabilidad, balance hídrico, erosión por efectos del movimiento del agua sobre las superficies y el transporte de nutrientes, elementos disueltos, contaminantes y sedimentos dentro del medio natural. Estos progresos resultan esenciales para mejorar la planificación y la gestión sostenible del suelo, permitiendo diseñar medidas de conservación más eficaces y adaptadas a las condiciones locales.

En este sentido, los modelos semi-distribuidos y distribuidos se han consolidado como herramientas clave para espacializar la información y simular detalladamente los procesos en la cuenca. En línea con este enfoque, y con el objetivo de mantener al Perú a la vanguardia en la gestión del recurso suelo, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) ha implementado un modelo semi-distribuido y distribuido para caracterizar la respuesta hidrológica, así como las tasas de erosión y su severidad en el distrito de Lircay. Este esfuerzo contribuye a generar conocimiento científico aplicado que respalde a la sociedad en la gestión y conservación del recurso suelo.

5.1.1. Resultados

La implementación del modelo distribuido WaTEM/SEDEM en su versión GUI permitió caracterizar la respuesta hidrológica de las cuencas de Coriscancha (177 km²), Pircamayo (103 km²), Ajohuarina (632 km²). El proceso de caracterización de las tasas de erosión empleando WaTEM SEDEM para el distrito de Lircay, aborda un área de 829 km². No obstante, la sumatoria de las tres subcuencas principales y las cinco de influencia parcial, se extiende hasta 1659 km² (Figura 5.1.1). Para estimar las tasas de erosión se aplicaron las ecuaciones que estiman los factores LS, P, Cobertura, erodabilidad y erosividad. Además, empleando el modelo MONTE CARLO y las tasas

obtenidas del Cs-137, se caracteriza espacialmente el mapa. El proceso de implementación caracterizó la topografía a partir del modelo de elevación digital SRTM con resolución de 30 metros (Figura 5.1.1), insumo base para la generación del factor LS y la delimitación espacial de la cuenca. La cobertura del suelo se clasificó conforme a lo descrito en la sección 2.1, mientras que el mapa de tipos de suelo se elaboró a partir del producto SoilGrids, del cual se extrajeron variables texturales y contenido de materia orgánica necesarios para estimar el factor de erodabilidad (K) mediante la fórmula de Wischmeier et al. (1971).

El factor de erosividad de la lluvia (R) se calculó utilizando el producto grillaado RAIN4PE (1981-2015). Para mejorar su representatividad local, se aplicó una corrección mensual basada en datos registrados por dos estaciones meteorológicas durante los meses de enero a mayo, ajustando el grid mediante factores de sesgo. Posteriormente, se estimó R mediante la fórmula de Arnoldus (1980), obteniendo un raster continuo de erosividad climática. Todos los insumos fueron estandarizados espacialmente y convertidos a formatos compatibles con la interfaz del modelo WaTEM/SEDEM GUI.

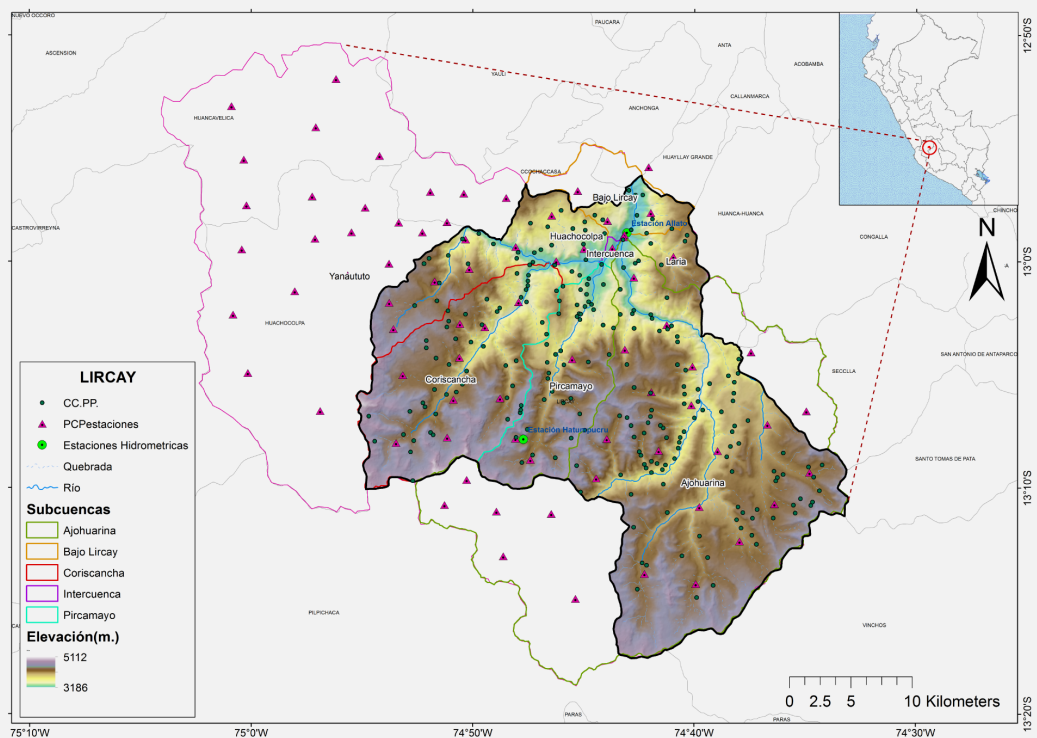


Figura 5.1.1. Red de monitoreo Hidro-sedimentológico, subcuencas y Pseudo estaciones meteorológicas en el distrito de Lircay.

La estructura operativa del modelo WaTEM/SEDEM se completa con la estimación de los factores LS, C y P. El factor LS, que representa la influencia topográfica sobre el transporte de sedimentos, fue calculado mediante la metodología de Moore y Burch (1986), integrando la pendiente y la acumulación de flujo por celda para identificar zonas con mayor susceptibilidad a la erosión.

El factor C, correspondiente a la cobertura del suelo, se construyó a partir de la clasificación previamente descrita en la sección 2.1, asignando valores codificados según el esquema oficial del modelo GUI. Esta representación permite al modelo diferenciar niveles de cobertura vegetal y su efecto sobre la reducción de la erosión. Finalmente, el factor P fue definido en función de la pendiente del terreno y la presencia o ausencia de prácticas de conservación, integrando criterios técnicos apropiados para áreas sin manejo estructurado. Todos los factores fueron estandarizados y preparados en formato raster compatible con el entorno gráfico del modelo.

Los inputs de entrada del modelo se presentan en la Figura 5.1.2.

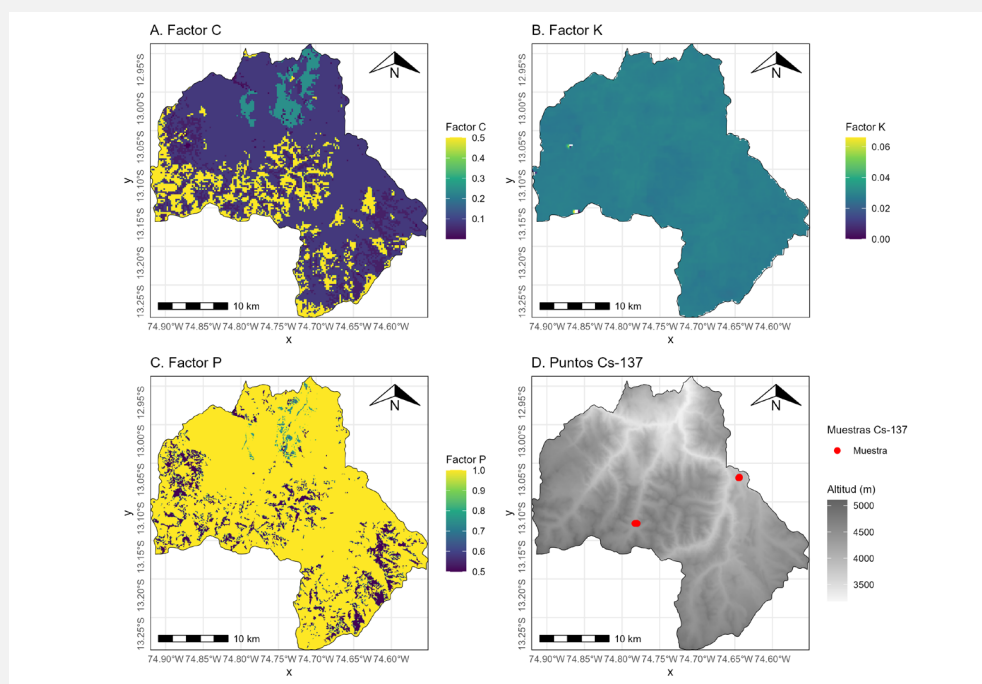


Figura 5.1.2. Variables de ingreso del modelo distribuido WaTEM/SEDEM el distrito de Lircay. A) Cobertura vegetal del distrito de Lircay. B) Factor K, estimado a partir de datos de SoilGrids. C) Distribución espacial del factor P en el distrito. D) Tasas de erosión medidas con Cs-137, utilizadas en la etapa de calibración del modelo.

La calibración del modelo se basó en mediciones de Cs-137 obtenidas a partir de muestras de suelo recolectadas en campo, conforme a lo descrito en el apartado 3.2. Esta información permitió validar los resultados simulados y ajustar el modelo espacialmente. Se aplicó además un enfoque de simulación

Monte Carlo para explorar combinaciones de parámetros y optimizar el ajuste, incluyendo la calibración del coeficiente de capacidad de transporte de sedimentos (KTC). Los resultados permitieron generar mapas de erosión (t/ha/año), identificar su variación espacial y delimitar zonas críticas para la gestión de suelos.



Figura 5.1.3. Red de monitoreo Hidro-sedimentológico del distrito de Lircay. a) Estación hidrométrica Hatumpucro. b) Estación Hidrométrica de Allato.

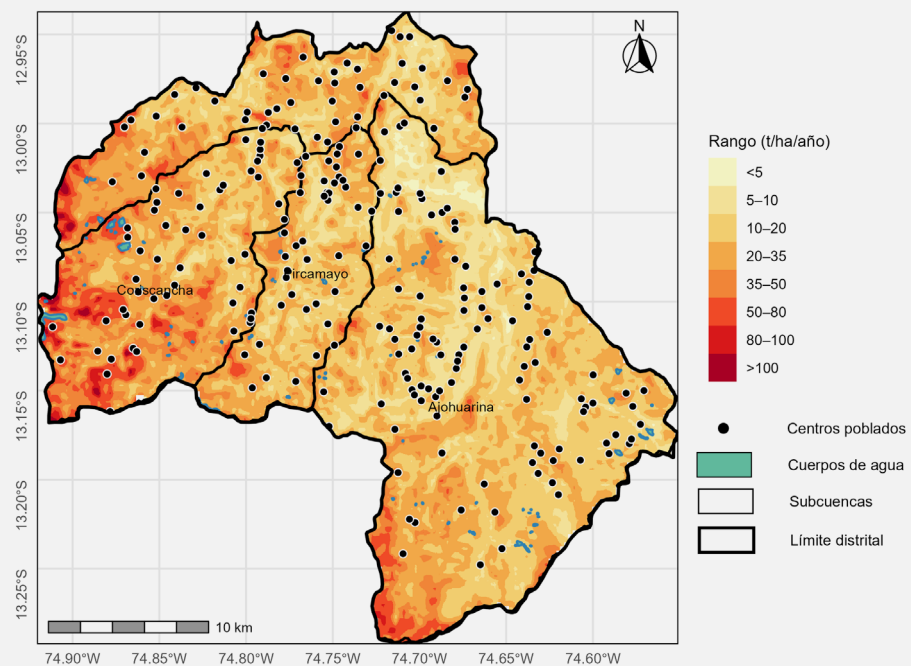


Figura 5.1.4. Nueva descripción: Mapa de la distribución de las tasas de erosión de suelos en las principales subcuencas con influencia en el distrito de Lircay. La subcuenca de Alohuarina presenta una tasa de erosión media interanual que varía entre 1 y 95 t/ha/año, la subcuenca Coriscancha, muestra una tasa de erosión media interanual de entre 1 a más de 100 t/ha/año. Finalmente, la subcuenca de Pircamayo muestra tasas de erosión media interanual de entre 6 y 69 t/ha/año.

5.1.2. Discusión

La aplicación del modelo WaTEM/SEDEM en su versión GUI evidenció una serie de limitaciones asociadas a la disponibilidad y calidad de los datos de entrada. La escasa cobertura de estaciones meteorológicas en la cuenca obligó a utilizar productos grillados como RAIN4PE, los cuales, si bien ofrecen continuidad espacial y temporal, requieren ajustes locales para mejorar su representatividad. En este estudio, se aplicó una corrección estacional basada en los registros de las 2 estaciones meteorológicas, lo que permitió afinar la estimación del factor R durante los meses más representativos del ciclo hidrológico.

En cuanto a la caracterización de la cobertura del suelo, si bien se logró codificar las clases conforme a los requerimientos del modelo, se reconoce que la representación de prácticas de manejo (factor P) fue simplificada, dada la limitada evidencia de conservación estructural en el área de estudio. Asimismo, el valor de KTC —parámetro clave que regula la capacidad de transporte de sedimentos— debió ser ajustado mediante simulaciones Monte Carlo, dada la incertidumbre asociada a su calibración empírica directa.

Una de las fortalezas del estudio fue el uso de mediciones de Cs-137 como base para la validación espacial del modelo. Esta técnica permitió contrastar los patrones simulados con evidencia directa de pérdida de suelo, contribuyendo a una mejor delimitación de zonas críticas. En la figura 5.1.4 y 5.1.5, se evidencia que las tasas de erosión media anual, rangos de variación y el grado de veracidad, son producto de la heterogeneidad geomorfológica, climática y cobertura vegetal en el área del distrito. Los resultados obtenidos ofrecen una línea base robusta para priorizar intervenciones de manejo y conservación de suelos en zonas altoandinas con información limitada.

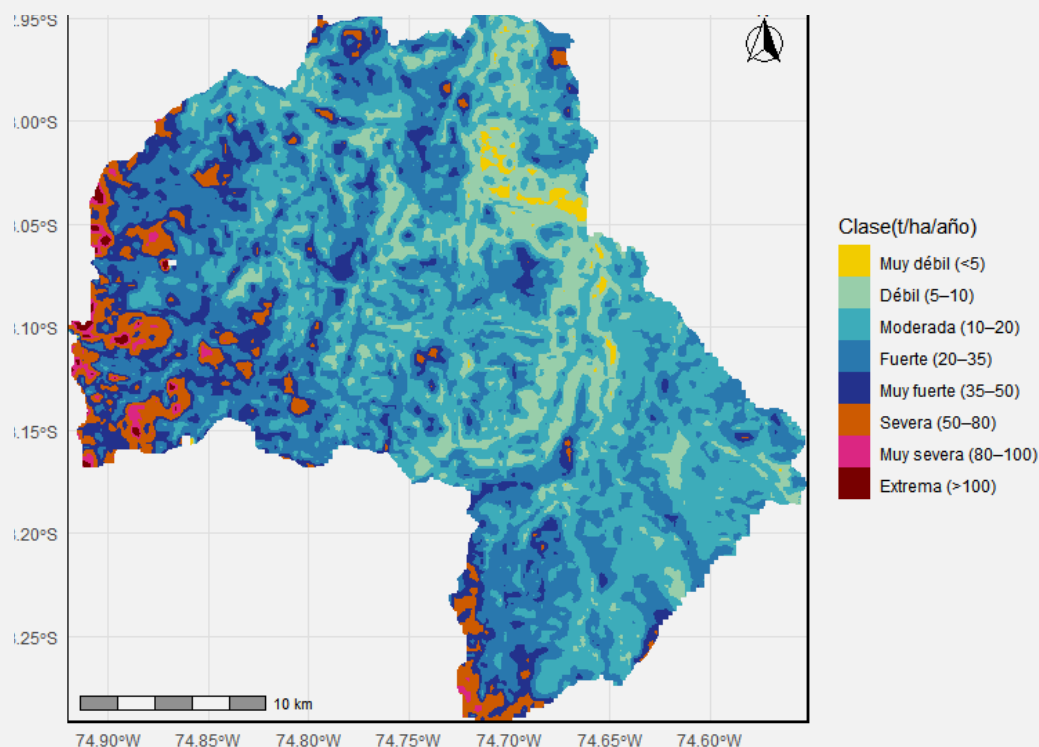


Figura 5.1.5. La gura muestra los grados de erosión hídrica en el distrito de Lircay, propuesta de la cación del IGP. En Ajojuarina predomina la erosión moderada (46%), seguida por fuerte (29%) y débil (16%), con menor presencia de clases más severas. Coriscancha presenta un escenario más crítico, con 38% del área en erosión fuerte, 21% en muy fuerte y 12% en severa; mientras que en Pircamayo destacan las clases moderada (41%) y fuerte (41%), con menor proporción de erosión severa y muy fuerte

5.1.3. Conclusiones

El análisis global del distrito de Lircay revela que la erosión hídrica se concentra principalmente en los grados moderado (38%) y fuerte (34%), lo cual implica que más del 70% del territorio experimenta pérdidas de suelo superiores a 10 t/ha/año. Las clases más severas —muy fuerte, severa, muy severa y extrema— en conjunto representan el 16% del área distrital, mientras que solo el 12% se mantiene en condiciones de erosión débil o muy débil, como se muestra en la Figura 5.1.4. Esto evidencia que, aunque la erosión extrema no es generalizada, sí existe un grado de degradación sostenida en grandes extensiones del distrito.

A nivel de subcuencas, Ajojuarina presenta una erosión media-alta, con 46% del área en clase moderada y 29% en fuerte, y un rango de variación que llega hasta los 94.7 t/ha/año, lo cual indica zonas puntuales críticas. Coriscancha

exhibe el escenario más severo, con 38% en fuerte, 21% en muy fuerte, 12% en severa, y un rango de erosión que alcanza los 197.1 t/ha/año, incluyendo áreas clasificadas como extremas. Esto confirma que esta subcuenca representa el mayor foco de pérdida de suelo del distrito. En contraste, Pircamayo muestra una situación más contenida: aunque el 41% de su área está en clase moderada y otro 41% en fuerte, sus clases severas son minoritarias y el rango de erosión no supera los 68.4 t/ha/año, lo que sugiere mayor estabilidad relativa (Figura 5.1.5).

Este patrón de erosión se encuentra estrechamente vinculado al tipo de cobertura del suelo. El distrito de Lircay presenta una cobertura dominante de vegetación herbácea y arbustiva (65% del territorio), que ofrece una protección natural contra procesos erosivos. Las zonas con mayores tasas de erosión coinciden con sectores de menor cobertura vegetal o con uso agropecuario intensivo sobre laderas, lo cual incrementa la vulnerabilidad del suelo. En conjunto, el estudio concluye que la erosión hídrica en Lircay es un proceso generalizado en grados intermedios, con zonas críticas localizadas, y que la conservación de coberturas vegetales permanentes es clave para mitigar la pérdida de suelo en el mediano y largo plazo.

6. LABORATORIO

6.1. Ambiente físico y técnicas de aplicación

El Instituto Geofísico del Perú cuenta con un laboratorio de investigación especializado en el análisis físico, colorimétrico, multielemental y radioisotópico de muestras de suelos, sedimentos y aguas (Figura 6.1.1). El laboratorio dispone de equipos sofisticados de última generación para el estudio de suelos, esto en base a las técnicas aplicadas, tales como: granulometría por difracción láser, colorimetría, espectrometría de fluorescencia de rayos X por reflexión total (TXRF) y espectrometría de rayos gamma. Además, cuenta con una serie de equipos menores complementarios y necesarios para el desarrollo de los métodos de ensayo y preparación de muestras. La gestión y operación del laboratorio se vienen implementando conforme a los lineamientos de las Normas Técnicas Peruanas (NTP) aplicables a laboratorios de ensayo y calibración, las cuales proporcionan directrices para asegurar la competencia técnica, la calidad de los resultados y la trazabilidad de los procesos analíticos. Asimismo, los métodos aplicados para el tratamiento y análisis de muestras se ejecutan conforme a normas ISO específicas, seleccionadas en función de cada técnica empleada. La implementación de instrumental calibrado según estándares internacionales, el cumplimiento de protocolos normalizados y el uso de materiales de referencia certificados internacionalmente, garantizan la calidad, trazabilidad y confiabilidad tanto de los procedimientos operativos estándar (POE) como de los resultados obtenidos.



Figura 6.1.1. Equipos sofisticados del laboratorio especializado para análisis de suelo y agua.

6.2. Gestión y control de muestras

En el presente año, el laboratorio ha recepcionado la cantidad de 1529 muestras sólidas y 3351 muestras líquidas. Para el distrito de Lircay (Tabla 6.2.1), se han procesado y analizado 352 muestras sólidas y 1401 muestras líquidas. A través de una cadena de custodia se maneja el inventario y observación de las muestras recepcionadas. Posteriormente, se planifican los procedimientos para cada tipo de muestra y la aplicación de las técnicas físico-químicas.

Tabla 6.2.1. Cantidad de muestras sólidas y líquidas

Ítem	Técnica	Tipo	Lugar de Procedencia		Cantidad
1	0001_COD_LAB_MoSSARD	Suelos y sedimentos	Lircay	Huancavelica	241
2	0002_COD_LAB_MoSSARD	Testigos de suelo	Lircay	Huancavelica	111
3	0008_COD_LAB_MoSSARD	Sedimentos en suspensión	Lircay	Huancavelica	1401

6.3. Preparación y análisis de muestras

La fase de pretratamiento se compone de diferentes procesos de acuerdo al tipo y al estado de las muestras provenientes de campo. Se han establecido los POE para el tratamiento de muestras e implementado las normas ISO para el análisis de las mismas. En la Figura 6.3.1 se visualiza el flujograma de los procedimientos generales establecidos para muestras sólidas y líquidas. De acuerdo al procesamiento de muestras sólidas (Figura 6.3.2) se obtienen productos para el análisis de materia orgánica, granulometría por tamices, colorimetría y espectrometría de rayos gamma. Respecto a las muestras líquidas (Figura 6.3.3), se obtiene como producto la concentración de sedimentos en suspensión recolectadas en el río y en trampas experimentales de sedimentos instalados en diferentes tipos de cultivos.

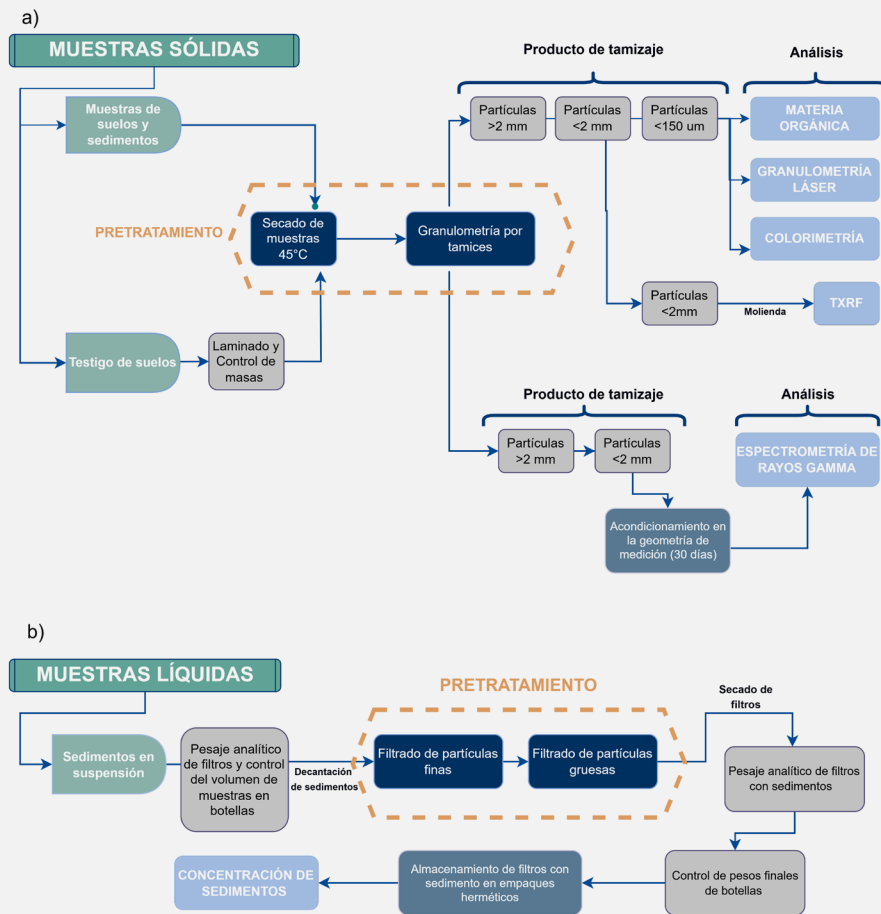


Figura 6.3.1. Flujoograma del pretratamiento de muestras. a) Procesos y productos finales del tamizaje de muestras sólidas; y b) Procesos de separación de partículas y obtención de la concentración de sedimentos en muestras líquidas.

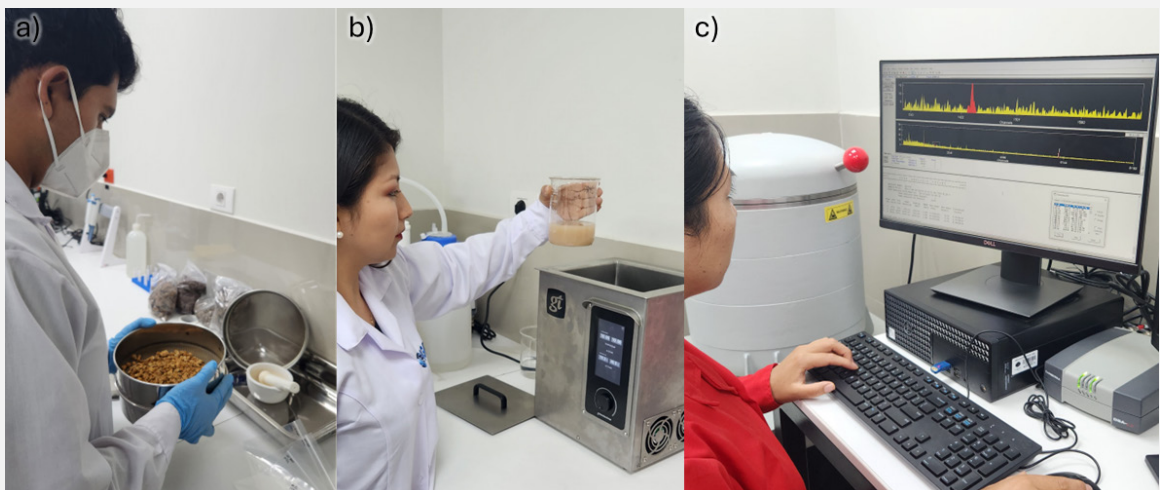


Figura 6.3.2. a) Granulometría por tamices, b) Pretratamiento para granulometría láser, y c) Espectrometría de rayos gamma.

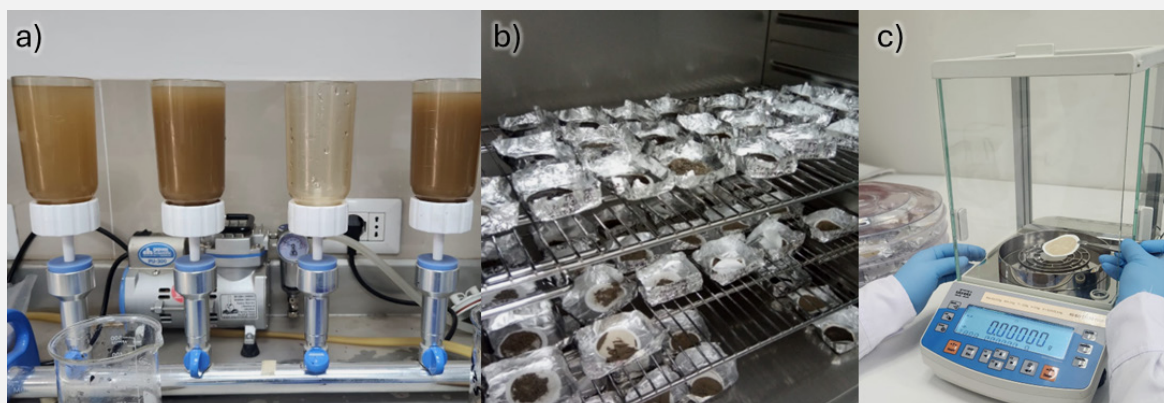


Figura 6.3.3. a) Sistema de filtración de sedimentos, b) Proceso de secado, y c) Pesaje analítico de sedimentos.

De acuerdo al tipo de muestra, procedimientos operativos estándar y el análisis en los equipos sofisticados, se obtienen tiempos de producción variable para cada técnica (Tabla 6.3.1), requiriendo mayor tiempo de medición la técnica de espectrometría gamma. Así también, se presenta en la Figura 6.3.4 los periodos de pretratamiento y análisis de las muestras provenientes del distrito de Lircay (Huancavelica), visualizando un periodo variable en base al estado de la muestra proveniente de campo y a la capacidad de medición de cada equipo sofisticado.

Tabla 6.3.1. Tiempo de producción de las técnicas aplicadas

Ítem	Técnica	Tipo de Análisis	Tiempo de Pretratamiento	Tiempo de Medición
1	Granulometría por Difracción Láser	Análisis Físico	25 h / 01 muestra	0.7 h / 01 muestra
2	Colorimetría	Análisis Físico	2 h / 01 muestra	0.5 h / 01 muestra
3	Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total	Análisis Elemental	1 h / 01 muestra	4 h / 01 muestra
4	Espectrometría de Rayos Gamma	Análisis Radioisotópico	35 días / 01 muestra	24-48 h / 01 muestra

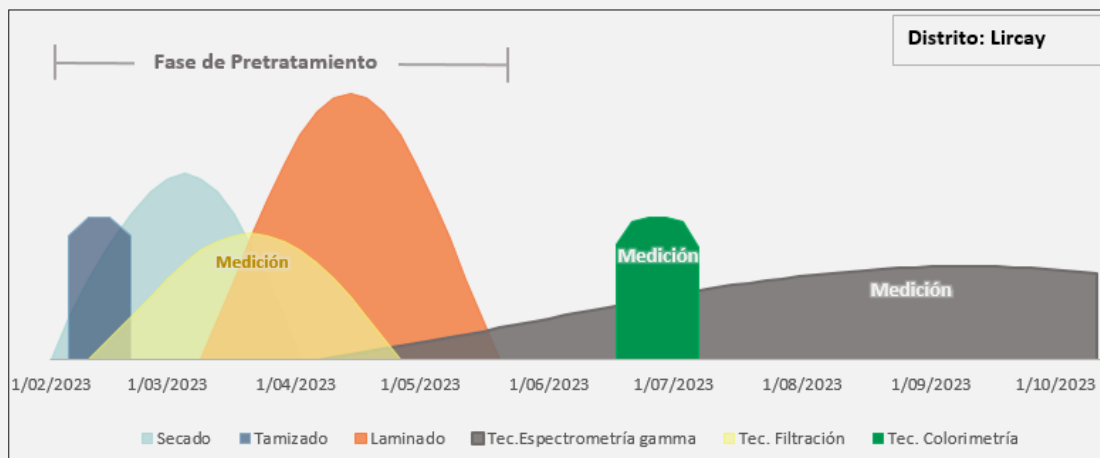


Figura 6.3.4. Periodos de pre-tratamiento y análisis de muestras extraídas del distrito de Lircay.



www.igp.gob.pe

© Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz N° 169
Urb. Mayorazgo, IV Etapa
Ate, Lima - Perú
(511) 317-2300