

SITIOS POTENCIALES E IMPACTADOS POR EL DRENAJE ÁCIDO DE ROCA ASOCIADO AL RETROCESO GLACIAR EN ÁNCASH



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM

INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

SITIOS POTENCIALES E IMPACTADOS POR EL DRENAJE ÁCIDO DE ROCA ASOCIADO AL RETROCESO GLACIAR EN ÁNCASH



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

SITIOS POTENCIALES E IMPACTADOS POR EL DRENAJE ÁCIDO DE ROCA ASOCIADO AL RETROCESO GLACIAR EN ÁNCASH

Autor

Frank Santiago Bazan
Jose Herrera Nizama

Con apoyo de

Yeidy Montano Chavez
Lourdes Eliana Cerdán Estrada
Jhomira Loja Zumaeta
Lucero Lopez Garay

Elaboración de mapas:

Jose Herrera Nizama
Frank Santiago Bazan

Revisores

Mirtha Camacho Hernández
Helder Mallqui Meza

Editado por

© Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM)
Sede central: Av. Centenario 2656 - Sector Palmira, Independencia, Huaraz - Áncash - Perú
Teléfono: (043) 64 3460

Revisión de estilo

Jorge Coaguila Quispe

Diseño y diagramación

Kipu Visual

Fotografías

Jose Herrera Nizama
Yeidy Montano Chávez

1ra edición
noviembre 2025

Depósito legal del libro N° 2025-14181

Impreso por: Multiservicios Imp. "Gráfica Francis" Jr. Jorge Chávez N° 373 - Caraz - Huaylas - Ancash

RUC: 10411255706
Tiraje: 200 ejemplares

ISBN: 978-612-48999-8-0



Por favor citar la publicación de la siguiente manera:

INAIGEM (2025). Sitios potenciales e impactados por el drenaje ácido de roca asociado al retroceso glaciar en Áncash. Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña – Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM).

CONTENIDO

1. PRESENTACIÓN	10
2. INTRODUCCIÓN	11
3. ANTECEDENTES	12
4. OBJETIVOS	13
4.1.OBJETIVO GENERAL	13
4.1.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
5. ALCANCES	15
6. ASPECTOS GENERALES	15
6.1.Drenaje ácido de roca (DAR)	15
6.1.1. Formación	15
6.1.2. Actividad bacteriana en la formación del DAR	16
6.2.Aspectos geológicos	17
6.2.1. Identificación de unidades geológicas con potencial generación del DAR	18
6.2.2. Unidades geológicas con potencial generación del DAR	18
6.3.Impactos socioambientales	22
6.3.1. Impactos en los ecosistemas acuáticos	22
6.3.2. Impactos en el suelo	22
6.3.3. Impactos en la salud humana	23
6.3.4. Impactos socioeconómicos	23
6.4.Teledetección y machine learning	23
7. METODOLOGÍA	24
7.1.Ámbito de estudio	24
7.2.Insumos	26
7.2.1. Sentinel 2	26
7.2.2. Modelo digital de elevación	26
7.2.3. Potencial de generación DAR en las unidades geológicas	27
7.2.4. Datos de campo	31
7.3. Delimitación de sitios potenciales e impactados con el DAR	34

7.3.1.	Etapa 1: Preprocesamiento	34
7.3.2.	Etapa 2: Procesamiento	36
7.3.3.	Etapa 3: Análisis de variables y clasificación	38
7.3.4.	Etapa 4: Validación	42
7.3.5.	Etapa 5: Posprocesamiento	43
8.	RESULTADOS	44
8.1.	Distribución espacial de sitios potenciales e impactados con el DAR	44
8.1.1.	Sitios potenciales e impactados por el DAR por cordilleras	46
8.1.2.	Sitios potenciales e impactados por el DAR por límites políticos	47
8.1.3.	Sitios potenciales e impactados por el DAR por UH	50
8.2.	Mapa de probabilidad de ocurrencia del DAR	52
8.3.	Verificación en campo	54
8.3.1.	Quebrada Cayesh-UH Quillcay	55
8.3.2.	Laguna Shallap-UH Quillcay	55
8.3.3.	Cuerpo de agua-UH Pachacoto	56
8.3.4.	Río Pucavado-UH Pucavado	57
9.	DESAFÍOS	59
	LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS	60
	BIBLIOGRAFÍA	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Información satelital y vectorial empleada en el estudio.	26
Tabla 2. Muestras de rocas del grupo Chicama descritas en las campañas de campo.	27
Tabla 3. Contenido geoquímico de los elementos Fe y S.	28
Tabla 4. Nivel de potencialidad de generación de drenaje ácido de roca de las unidades geológicas del departamento de Áncash.	30
Tabla 5. Matriz de confusión de la clasificación.	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Cronología de actividades desarrolladas por la DIEM en relación con el DAR.	12
Figura 2.	Principales procesos regionales formadores de unidades geológicas con contenido de minerales de sulfuros.	17
Figura 3.	Diagrama de flujo para la identificación de unidades geológicas con potencial generación del DAR.	18
Figura 4.	Muestra de roca corneana de protolito probable de arenisca cortada por venillas de pirita.	19
Figura 5.	Muestra de roca alterada por oxidación de sulfuros y con hidróxidos de hierro precipitados.	19
Figura 6.	Pirita cúbica en muestra de roca andesítica alterada por la oxidación de sulfuros.	20
Figura 7.	Unidades geológicas generadoras del DAR en el departamento de Áncash.	21
Figura 8.	Hoja de ruta metodológica para la elaboración del mapa.	24
Figura 9.	Mapa de ubicación del ámbito de estudio.	25
Figura 10.	Composición química de las muestras de roca del departamento de Áncash.	27
Figura 11.	Mapa de potencialidad de generación del DAR de las unidades geológicas del departamento de Áncash.	30
Figura 12.	Firmas espectrales de sedimento (rojo) y roca (azul) recopiladas en el año 2022.	31
Figura 13.	Firmas espectrales ajustadas al sensor Sentinel 2.	33
Figura 14.	Mapa de distribución de puntos de entrenamiento y validación del modelo.	33
Figura 15.	Diagrama de flujo metodológico empleado en la delimitación de sitios potenciales e impactados con el DAR.	34
Figura 16.	Diagrama de flujo del preprocesamiento de las imágenes Sentinel 2.	35
Figura 17.	Flujo de trabajo para la obtención de las relaciones de bandas.	36
Figura 18.	Flujo de trabajo e insumos empleados en la determinación del PCA	37
Figura 19.	Flujo de trabajo para la obtención de las características del terreno.	37
Figura 20.	Flujo de trabajo para la determinación del SAM en roca y sedimento.	38
Figura 21.	Distribución de valores para las 17 variables predictoras en el algoritmo RF.	39

Figura 22. Correlación cruzada (coeficiente de Pearson) entre 27 variables predictoras de entrada al modelo.	40
Figura 23. Importancia relativa de las variables predictoras del modelo.	41
Figura 24. Histograma de probabilidad de ocurrencia del DAR.	43
Figura 25. Mapa de distribución de sitios potenciales e impactados con el DAR.	45
Figura 26. Número de sitios impactados con el DAR por cordillera.	46
Figura 27. Distribución de puntos por provincias en Ancash.	47
Figura 28. Mapa de Impacto de DAR por provincia.	48
Figura 29. Distribución de puntos por distrito en Ancash.	49
Figura 30. Mapa de impacto de DAR por distrito.	50
Figura 31. Número de sitios impactados con el DAR por cuencas.	51
Figura 32. Mapa de probabilidad de ocurrencia del DAR en la cordillera Blanca.	52
Figura 33. Mapa de probabilidad de ocurrencia del DAR en la cordillera Huallanca.	53
Figura 34. Mapa de probabilidad de ocurrencia del DAR en la cordillera Huayhuash.	54
Figura 35. Impacto del DAR en la quebrada Cayesh.	55
Figura 36. Impacto del DAR en la laguna Shallap.	56
Figura 37. Impacto del DAR en un cuerpo de agua cercano al glaciar Pastoruri.	57
Figura 38. Impacto del DAR en el río Pucavado.	58

1. PRESENTACIÓN

El drenaje ácido de roca es un proceso geoquímico que puede producirse de forma natural o como consecuencia de actividades humanas. Se origina cuando rocas con minerales de sulfuros quedan expuestos al oxígeno y el agua, se genera condiciones de acidez y la liberación de metales pesados. Este fenómeno representa un desafío ambiental crítico, con potenciales impactos significativos en los ecosistemas, la salud humana y el ámbito socioeconómico.

En este contexto, el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (Inaigem) ha elaborado el «Mapa de sitios potenciales e impactados por drenaje ácido de roca» del departamento de Áncash. Esta iniciativa constituye un esfuerzo importante por identificar, de manera espacial, las zonas afectadas o susceptibles a este tipo de drenaje, empleando metodologías avanzadas de análisis espacial e inteligencia artificial (IA).

Desde el Inaigem, concebimos este documento como una herramienta clave para la gestión de los ecosistemas, al reconocer la complejidad de las interacciones entre procesos geológicos, climáticos, hidrológicos y ecológicos. No solo se presenta información geográfica detallada, sino que también se busca generar conciencia sobre los impactos ambientales del drenaje ácido de roca.

Con una mirada hacia el futuro, esperamos que este documento sirva como base para nuevas investigaciones, contribuyendo al desarrollo del conocimiento científico nacional y promoviendo una gestión más informada y sostenible de nuestros recursos naturales.

Por último, el Inaigem expresa su reconocimiento a los profesionales e instituciones que hicieron posible la elaboración de este documento. Su compromiso y experiencia han sido fundamentales para alcanzar los objetivos planteados. Este trabajo refleja nuestro compromiso institucional con la generación de conocimiento científico aplicado y con el desarrollo de herramientas para la gestión sostenible de los ecosistemas de montaña en el Perú.

2. INTRODUCCIÓN

La creciente exposición de minerales sulfurosos, impulsada por el retroceso glaciar y las actividades mineras en la región andina del Perú, ha intensificado los procesos de drenaje ácido de roca (DAR), generando impactos significativos en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Este fenómeno geoquímico requiere herramientas eficaces para la identificación y gestión de las áreas afectadas. En particular, el departamento de Áncash —caracterizado por sus importantes sistemas glaciares y su compleja geología— presenta condiciones que hacen aún más urgente la generación de información sobre los impactos actuales y potenciales del DAR.

El presente documento expone la metodología, los resultados y el análisis desarrollados para la elaboración del «Mapa de sitios potenciales e impactados por drenaje ácido de roca» en el departamento de Áncash. Este instrumento cartográfico constituye una herramienta clave para la gestión ambiental, al facilitar la identificación sistemática de zonas críticas susceptibles a la generación del DAR, uno de los principales desafíos ambientales en la región.

El drenaje ácido de roca es un proceso geoquímico que se desencadena cuando los minerales sulfurosos quedan expuestos al oxígeno atmosférico y al agua, dando lugar a reacciones que generan ácido y favorecen la lixiviación de metales pesados hacia el entorno. Este fenómeno puede comprometer seriamente la calidad de los recursos hídricos, afectando no solo la integridad de los ecosistemas, sino también la disponibilidad de agua para el consumo humano y diversas actividades productivas. En este contexto, la identificación temprana de áreas potencialmente afectadas es esencial para implementar medidas de prevención y mitigación oportunas.

La elaboración de este mapa se basa en el uso de técnicas avanzadas de teledetección y aprendizaje automático, mediante la implementación del algoritmo random forest. La metodología empleada integra 27 variables predictoras, entre las que se incluyen datos geológicos, relaciones espectrales derivadas de imágenes satelitales, análisis de componentes principales (PCA) y características topográficas. Este enfoque multivariable ha permitido desarrollar una clasificación robusta de los sitios de interés, garantizando un alto nivel de precisión en la identificación de áreas potenciales e impactadas por el DAR.

Este estudio representa un avance significativo en la comprensión y gestión del drenaje ácido de roca en el departamento de Áncash, al proporcionar una base científica sólida para la toma de decisiones en planificación ambiental, ordenamiento territorial y diseño de estrategias de mitigación. Los resultados obtenidos constituyen un recurso valioso para instituciones gubernamentales y organizaciones ambientales comprometidas con la protección de los ecosistemas altoandinos y el bienestar de las comunidades locales.

3. ANTECEDENTES

La Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM) inició en 2016 un programa de monitoreo de la calidad del agua en cinco unidades hidrográficas (UH) del departamento de Áncash: Quillcay, Pachacoto, Casca-Llaca, Río Blanco-Santa Cruz y Santiago. El objetivo principal de esta iniciativa fue evaluar el estado de los recursos hídricos en la región, con especial atención a aquellas unidades afectadas por el fenómeno del DAR.

En 2020, el monitoreo fue reestructurado estratégicamente, concentrando los esfuerzos solo en las unidades hidrográficas de la cordillera Blanca impactadas por el DAR: Pachacoto, Pariac-Rajucolta, Quillcay (microcuenca Shallap) y Pucavado. Esta focalización permitió profundizar en el estudio y seguimiento de este fenómeno natural.

En 2021 se continuó con los trabajos de evaluación de calidad de agua (parámetros fisicoquímicos y químicos), además, se añadió un nuevo sitio de estudio la UH río Negro, siendo en total seis sitios de estudio en la cordillera Blanca: Quillcayhuanca y Shallap de la UH de Quillcay, Pachacoto, Pariac-Rajucolta, Pucavado y río Negro. Asimismo, se logró un avance significativo con el inicio de la identificación sistemática de sitios con contaminación de origen natural, a partir del análisis estadístico de los datos de calidad del agua proporcionados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). La metodología empleada para localizar áreas con presencia natural de aguas ácidas y metales pesados sentó un precedente para un abordaje más integral del problema.

Durante 2022, la DIEM inició el desarrollo de una metodología para el mapeo de sitios impactados por el DAR en la cordillera Blanca, utilizando técnicas de teledetección e inteligencia artificial (IA). La precisión en la delimitación de estos sitios se optimizó mediante la validación en campo del modelo y la incorporación de firmas espectrales de rocas y sedimentos tomadas en las zonas afectadas.

En 2023 culminó el proceso de identificación de sitios con contaminación natural a nivel nacional, mediante el análisis exhaustivo de información secundaria. Este estudio integral permitió elaborar un diagnóstico comprehensivo de las zonas potencialmente impactadas por el DAR en todo el territorio nacional, revelando una mayor concentración de puntos de monitoreo con posible contaminación natural en el sur del país.

Figura 1. Cronología de actividades desarrolladas por la DIEM en relación con el DAR.



La evolución cronológica descrita evidencia un desarrollo progresivo y sistemático en el abordaje del fenómeno del DAR, pasando de evaluaciones iniciales en unidades hidrográficas específicas a un enfoque integral que abarca la identificación sistemática de sitios afectados y la planificación estratégica a nivel nacional. Esta trayectoria institucional refleja el compromiso sostenido del Inaigem con la comprensión y gestión de una problemática ambiental tan compleja.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Contar con información geoespacial sistematizada sobre la distribución de los sitios potenciales e impactados por el DAR en el departamento de Áncash, que sirva como insumo para la gestión ambiental y la toma de decisiones.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Contar con una metodología validada, basada en teledetección y análisis geoespacial, para la identificación, delimitación y caracterización de sitios potenciales e impactados por el DAR en el departamento de Áncash.
- Generar productos cartográficos y bases de datos espaciales que representen la distribución de los sitios DAR identificados.



5. ALCANCES

La memoria descriptiva del mapa de sitios potenciales e impactados por el DAR en el departamento de Áncash es un instrumento técnico-científico destinado a la identificación, caracterización y análisis espacial de zonas afectadas en la región. Este documento constituye una herramienta estratégica para el análisis geoespacial, orientada a la prevención y mitigación de impactos ambientales, y facilita la evaluación integral de la vulnerabilidad geológica y ambiental del territorio.

El alcance de este instrumento técnico abarca diversas dimensiones de aplicación práctica. En el ámbito de la gestión ambiental, brinda un soporte clave para la toma de decisiones estratégicas relacionadas con la conservación de ecosistemas vulnerables o afectados, así como para la gestión integrada de los recursos hídricos, con especial énfasis en las zonas donde la calidad del agua podría verse comprometida por los efectos del drenaje ácido.

En cuanto al contenido técnico, la memoria descriptiva incorpora un análisis de la distribución espacial de los sitios potenciales e impactados. En el acápite referido a los aspectos geológicos, se presenta una caracterización de los factores que condicionan la generación del fenómeno DAR, los cuales incluyen características geológicas, configuraciones topográficas y condiciones mineralógicas y geoquímicas específicas del territorio.

Desde una perspectiva académica y científica, el documento proporciona un marco conceptual sobre los procesos geoquímicos asociados al DAR, convirtiéndose en una fuente de referencia para investigaciones posteriores y estudios especializados en la materia. Esta base teórica sustenta tanto el enfoque metodológico empleado como los resultados obtenidos del análisis espacial.

Este instrumento ha sido diseñado para visibilizar la problemática asociada al DAR, y se dirige tanto a la comunidad académica como a los responsables de la toma de decisiones en materia de gestión territorial y ambiental. Su propósito es contribuir al desarrollo sostenible y a la preservación efectiva de los recursos naturales en el departamento de Áncash, mediante la provisión de información técnica confiable que respalde la implementación de estrategias de gestión ambiental basadas en evidencia.

6. ASPECTOS GENERALES

6.1. Drenaje ácido de roca

El DAR es un fenómeno geoquímico que puede originarse tanto por procesos naturales o inducido por actividades antropogénicas. Se caracteriza por la generación de lixiviados de pH bajo, producto de la oxidación de rocas con altas concentraciones de minerales sulfurosos al estar expuestas a condiciones atmosféricas. Este proceso conlleva la generación de ácido sulfúrico, la liberación y acumulación de metales pesados en los cuerpos de agua, provocando su acidificación (Dold, 2017; Nordstrom, 2009; Zarroca et al., 2021).

La formación del DAR implica una serie de reacciones químicas que se desencadenan cuando los minerales sulfurosos entran en contacto con el agua y el oxígeno atmosférico. En el contexto actual del cambio climático, este fenómeno adquiere especial relevancia en zonas glaciares, donde la pérdida acelerada de masas de hielo expone progresivamente nuevas superficies de rocas mineralizadas. Esta exposición intensifica los procesos de oxidación y lixiviación, lo que facilita la movilización de metales hacia los sistemas hídricos circundantes (Egiebor & Oni, 2007; Jacobs et al., 2014).

Es importante señalar que la exposición de rocas sulfurosas puede también deberse a intervenciones antropogénicas, como la construcción de infraestructura vial, túneles u otras obras civiles. Sin embargo, el presente documento se enfoca específicamente en los procesos de origen natural y sus implicaciones ambientales.

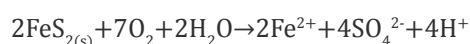
En el departamento de Áncash, el DAR constituye una problemática ambiental crítica debido a las características geológicas particulares de la región.

6.1.1. Formación

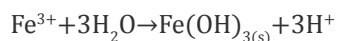
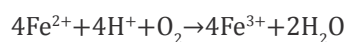
La génesis del DAR es un fenómeno complejo que implica una serie de interacciones químicas y biológicas. Este proceso se desarrolla mediante la oxidación de minerales sulfurosos en presencia de oxígeno y agua, siendo significativamente acelerado por la actividad bacteriana, especialmente en la oxidación del hierro ferroso y la degradación directa de minerales sulfurosos como la pirita (FeS_2).

El proceso de formación se desarrolla en las siguientes etapas secuenciales (Egiebor & Oni, 2007; Jacobs et al., 2014; Zarroca et al., 2021):

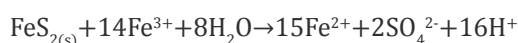
- a. Exposición inicial:** El proceso se inicia con la exposición de rocas con concentraciones de minerales sulfurosos, principalmente pirita, a condiciones atmosféricas. Esta exposición ocurre naturalmente mediante procesos de meteorización y erosión de formaciones rocosas, particularmente en zonas de retroceso glaciar.
- b. Oxidación primaria:** Los minerales sulfurosos expuestos experimentan una reacción inicial con oxígeno y agua, generando iones ferrosos (Fe^{2+}), sulfato (SO_4^{2-}) e iones de hidrógeno (H^+). Esta reacción, aunque puede ocurrir de manera abiótica, es frecuentemente catalizada por microorganismos acidófilos como *Thiobacillus ferrooxidans*.



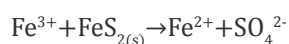
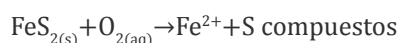
- c. Transformación del hierro:** La oxidación del hierro ferroso (Fe^{2+}) a férrico (Fe^{3+}) representa una fase crítica del proceso, siendo significativamente acelerada por la actividad de bacterias acidófilas. Esta transformación bacteriana supera considerablemente la velocidad de oxidación química natural.



- d. Oxidación secundaria:** El hierro férrico (Fe^{3+}) actúa como un potente oxidante de la pirita, generando una reacción que produce Fe^{2+} adicional, sulfato e iones de hidrógeno. Esta etapa resulta particularmente significativa en la generación de acidez y la liberación de metales pesados.



- e. Ciclo de oxidación continua:** Se establece un ciclo autosostenido donde el Fe^{2+} producido se reconvierte en Fe^{3+} mediante acción bacteriana, perpetuando el proceso de acidificación hasta el agotamiento del mineral sulfuroso (pirita) o la eliminación de factores críticos como oxígeno o agua.



- f. Generación del drenaje:** El resultado final comprende la formación de un lixiviado ácido enriquecido en sulfatos y metales pesados, caracterizado por valores de pH extremadamente bajos, potencialmente inferiores a 3, con significativa capacidad de impacto en sistemas hídricos y edáficos.

6.1.2. Actividad bacteriana en la formación del drenaje ácido de roca

La participación bacteriana constituye un factor determinante en la formación del DAR, actuando mediante dos mecanismos principales (Jacobs et al., 2014):

Mecanismo indirecto: Las bacterias catalizan la oxidación del hierro ferroso a férrico, el cual subsecuentemente oxida la pirita. Este proceso representa una vía indirecta de degradación mineral.

Mecanismo directo: Implica la adhesión bacteriana directa a la superficie de la pirita, facilitando su oxidación inmediata. Este contacto directo intensifica significativamente la velocidad de degradación mineral.

La presencia de microorganismos, particularmente bacterias quimioautótrofas acidófilas como *Thiobacillus ferrooxidans*, puede incrementar la tasa de formación del DAR en múltiples órdenes de magnitud comparado con procesos exclusivamente abióticos. Esta capacidad catalítica bacteriana representa un factor crítico en el desarrollo y progresión del DAR, constituyendo un elemento fundamental para la comprensión y gestión efectiva de este fenómeno geoquímico.

6.2. Aspectos geológicos

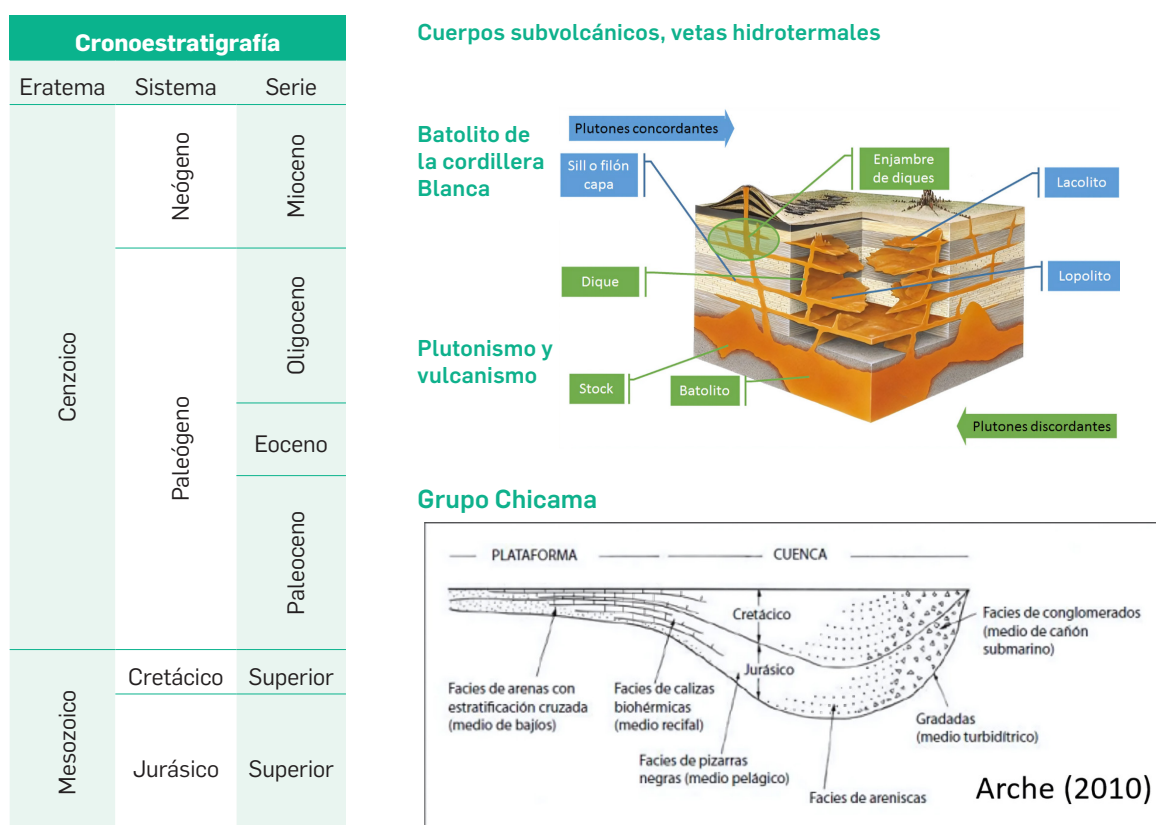
El desarrollo del drenaje ácido de roca (DAR) en la Cordillera Blanca está estrechamente vinculado a la compleja evolución geológica regional del departamento de Áncash, donde interactúan secuencias sedimentarias mesozoicas, eventos magmáticos y sistemas subvolcánicos e hidrotermales. La figura 2 sintetiza estos procesos regionales que favorecen la formación y concentración de minerales sulfurados, principales precursores del DAR.

El basamento de la Cordillera Blanca está constituido por las rocas sedimentarias del Grupo Chicama (Jurásico), depositadas en un ambiente deltaico-marino con condiciones anóxicas. Litológicamente, incluye areniscas cuarzosas, lutitas oscuras y niveles carbonosos, que reflejan ambientes reductores propicios para la precipitación de pirita. Estas unidades experimentaron posteriormente deformación y metamorfismo, consolidando un núcleo rocoso, actualmente cubierto por glaciares, y que constituye la base estructural de la cordillera (Cobbing et al., 1996).

Sobre este basamento mesozoico se emplazó el Batolito de la Cordillera Blanca, un extenso cuerpo plutónico cenozoico representado en la figura 2 como una intrusión concordante y discordante. Su ascenso generó procesos de metamorfismo de contacto y modificó las rocas del Grupo Chicama. Posteriormente, a lo largo del Sistema de Fallas de la Cordillera Blanca (SFCB), se produjeron nuevas intrusiones subvolcánicas, como stocks y enjambres de diques, que cortaron tanto las rocas jurásicas como las secuencias cretácicas. Estos cuerpos están directamente asociados a vetas hidrotermales y zonas de alteración, donde se concentraron sulfuros metálicos como pirita, calcopirita y arsenopirita (Villarreal y Rodríguez, 2009).

La combinación de ambientes sedimentarios reductores, intrusiones plutónicas y procesos subvolcánicos-hidrotermales generó un marco geológico con elevada presencia de minerales sulfurados. Bajo las condiciones actuales de retroceso glaciar, erosión acelerada, meteorización física y disponibilidad de agua superficial y subterránea, estas unidades se convierten en fuentes potenciales de drenaje ácido de roca.

Figura 2. Principales procesos regionales formadores de unidades geológicas con contenido de minerales de sulfuros.

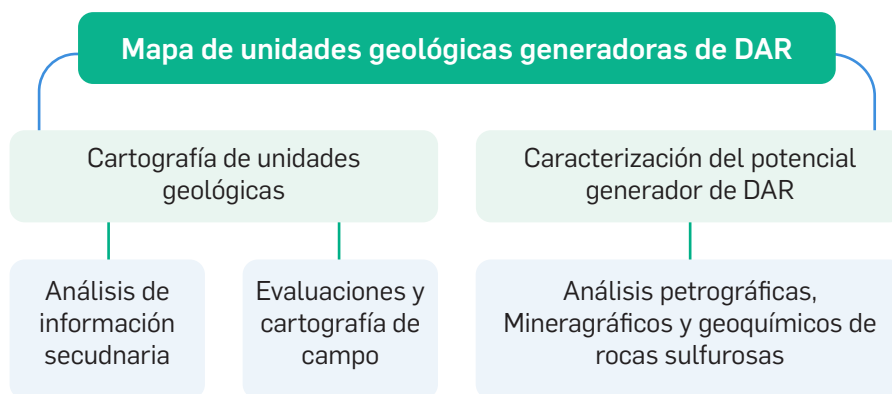


6.2.1. Identificación de unidades geológicas con potencial generación del drenaje ácido de roca

La identificación de unidades geológicas con potencial de generación del DAR se desarrolló mediante una metodología sistemática que integró el análisis de información secundaria y evaluaciones de campo, como se detalla en la **figura 3**. El proceso cartográfico comprendió la recopilación y análisis de información geológica y metalogenética del departamento de Áncash, complementada con evaluaciones de campo en unidades hidrográficas estratégicamente seleccionadas: Casca-Llaca, Huachecsa, Shallap, río Negro y Pachacoto.

Las evaluaciones de campo se centraron en el análisis de aspectos estratigráficos, estructurales, litológicos y mineralógicos de las unidades geológicas, permitiendo la elaboración de mapas a escala 1:25.000 a 1:50.000. La caracterización del potencial generador del DAR se fundamentó en el contenido de sulfuros de las unidades geológicas, determinado mediante análisis petrográficos y geoquímicos de muestras de campo, en conjunto con la sistematización de datos minerográficos del portal del Sistema de Información Geológico y Catastral Minero de Perú (Geocatmin).

Figura 3. Diagrama de flujo para la identificación de unidades geológicas con potencial generación del DAR.



6.2.2. Unidades geológicas con potencial generación de drenaje ácido de roca

El análisis de información secundaria, los trabajos de evaluación geológica de campo y los análisis de laboratorio, han permitido determinar las unidades geológicas que contienen minerales de sulfuros que están generando los procesos DAR actualmente y mantienen el potencial de generación para el futuro.

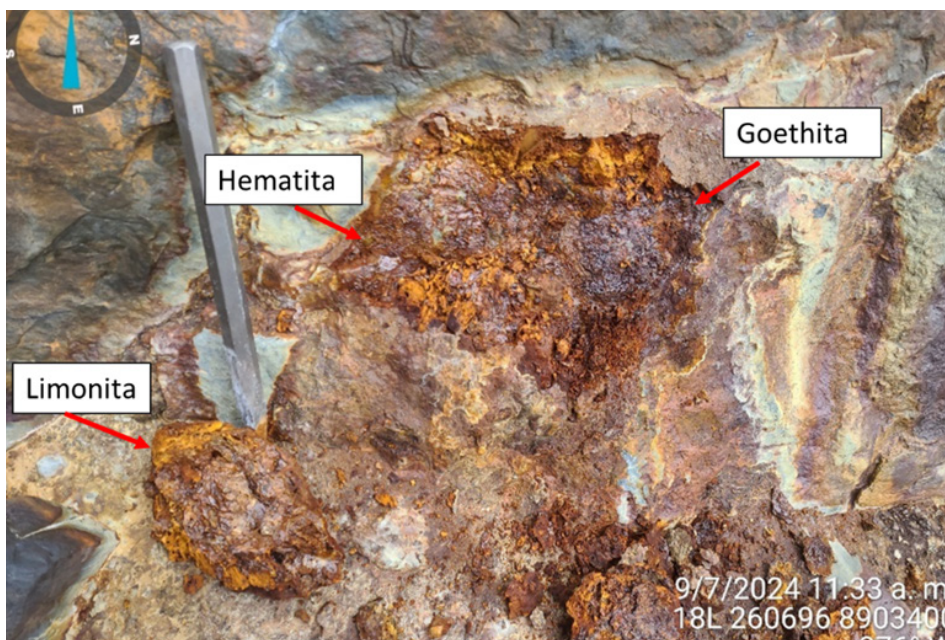
El grupo Chicama, es una unidad sedimentaria-metamórfica de ambiente marino litoral a profundo, comprende las formaciones Simbal, Punta Moreno, Sapotal y Tinajones. Esta unidad representa el principal generador de drenaje ácido de roca asociado al retroceso glaciar en Áncash. La secuencia estratigráfica incluye areniscas gris verdosas a marrón, microconglomerados volcánoclasticos, y lutitas gris oscuras intercaladas con areniscas. En contacto con las unidades intrusivas y subvolcánicas, existe un enriquecimiento de minerales de sulfuros. Este proceso se explica porque en ciertos sectores, las intrusiones magmáticas cortan unidades sedimentarias produciendo un enriquecimiento secundario de minerales que se hospedaron en los estratos de dichas unidades (figura 4).

Figura 4. Muestra de roca corneana de protolito probable de arenisca cortada por venillas de pirita.



En algunos sectores, se ha identificado evidencias de la oxidación de sulfuros (figura 5) asociado a alteración supérgena y precipitando minerales como limonita y hematita (hidróxidos de hierro).

Figura 5. Muestra de roca alterada por oxidación de sulfuros y con hidróxidos de hierro precipitados.



Los cuerpos subvolcánicos, discordantes con el grupo Chicama y el batolito de la cordillera Blanca, están compuestos por andesitas afaníticas con cristales de plagioclasas y textura fluidal. Presentan mineralización de pirita cúbica (**figura 6**), esfalerita y zonas de alteración hidrotermal con bornita y venillas de cuarzo y clorita.

Figura 6. Pirita cúbica en muestra de roca andesítica alterada por la oxidación de sulfuros.

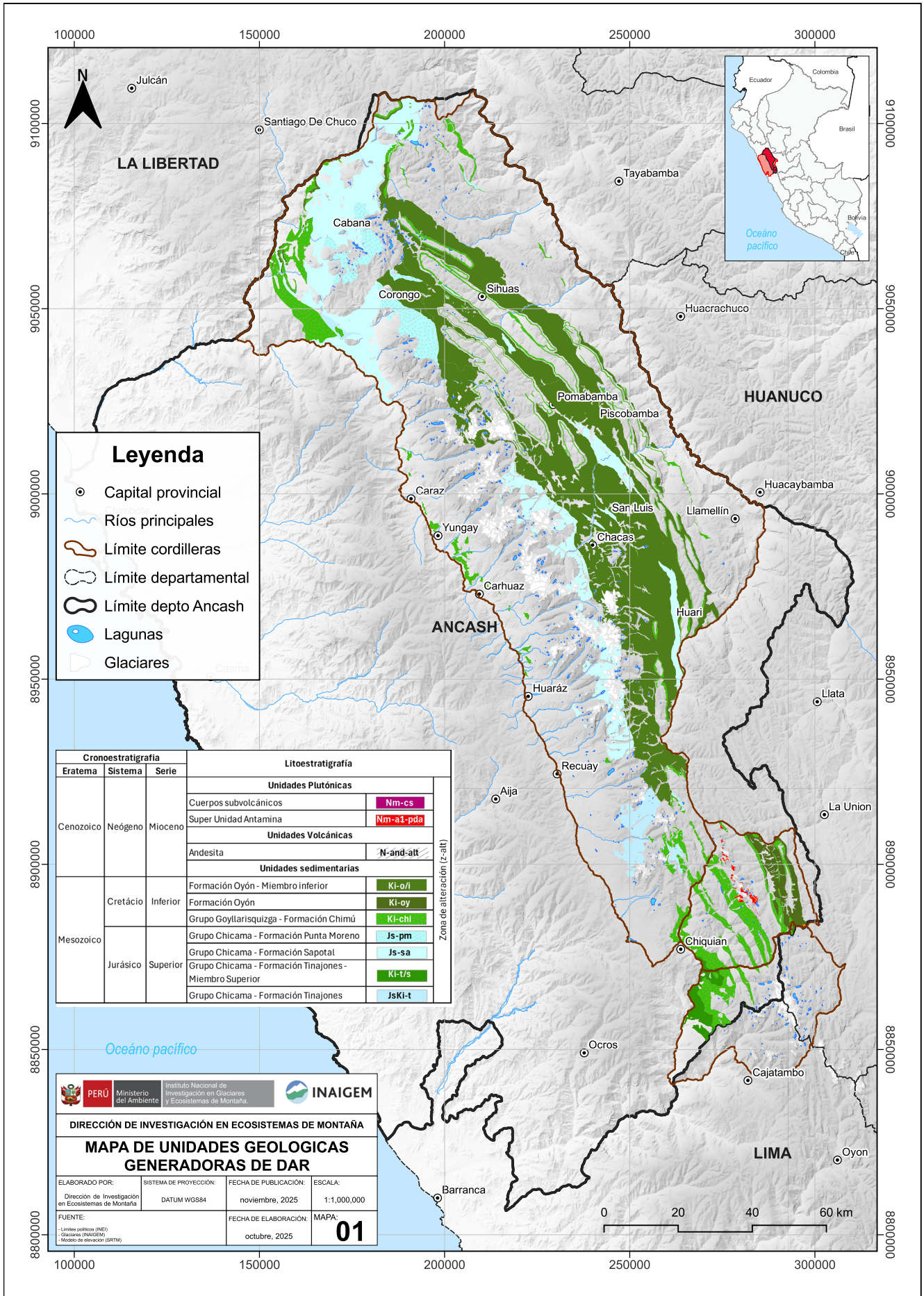


Los pórfidos dacíticos y andesíticos del Paleógeno y Neógeno se caracterizan por su textura porfírica con fenocristales de cuarzo y plagioclasa, presentando mineralización de pirita diseminada.

El Centro Volcánico Patorumi, localizado al oeste del río Santa, está constituido por flujos de lava gris oscuro y piroclastos, con mineralización en vetas de cuarzo, calcopirita-magnetita-pirita y óxidos de hierro.

Estas unidades geológicas descritas se ilustran en la **figura 7**, presentando un potencial moderado a alto de generación del DAR, asociado a su contenido de sulfuros y la presencia de zonas de alteración hidrotermal y supérgena.

Figura 7. Unidades geológicas generadoras del DAR en el departamento de Áncash.



6.3. Impactos socioambientales

El DAR genera impactos significativos que trascienden la alteración de la calidad del agua. Ello afecta de manera integral los ecosistemas de montaña, compromete la sostenibilidad de las comunidades rurales. La afectación al servicio ecosistémico hídrico resulta particularmente preocupante, dado que compromete la disponibilidad de agua para consumo humano, actividades agrícolas y ganaderas, amenazando directamente la viabilidad de las unidades de producción familiar y la seguridad alimentaria de poblaciones en condición de vulnerabilidad.

La comprensión integral de estos impactos socioambientales resulta fundamental para el desarrollo de estrategias efectivas de gestión y mitigación, que consideren tanto la dimensión ecológica como la socioeconómica del fenómeno.

6.3.1. Impactos en los ecosistemas acuáticos

La acidificación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos constituye uno de los impactos más significativos del DAR. La disminución del pH altera significativamente los ecosistemas acuáticos, afectando la supervivencia de peces, insectos y vegetación acuática. (Zarroca et al., 2021). Además, el pH bajo favorece la disolución de metales como el hierro, aluminio, cobre y zinc, que pueden ser tóxicos para la biota acuática incluso en concentraciones bajas (Nordstrom, 2011).

La movilización de metales pesados representa otro impacto crítico. La toxicidad combinada del ácido y los metales pesados reduce la diversidad de especies, alterando las cadenas tróficas y el funcionamiento ecológico de los ríos y lagos afectados (Gibert et al., 2014). La precipitación de óxidos de hierro y otros metales forma capas sobre el fondo de los cuerpos de agua, sofocando organismos bentónicos y reduciendo la disponibilidad de hábitats (Moncur et al., 2009). A diferencia de los eventos puntuales de contaminación, el drenaje ácido de roca puede mantenerse durante décadas o siglos, con efectos a largo plazo sobre la calidad del agua (Napier et al., 2022). Esta alteración química del medio acuático resulta en una degradación sustancial del entorno, comprometiendo la biodiversidad y la productividad ecosistémica.

6.3.2. Impactos en el suelo

El drenaje ácido de roca reduce el pH del suelo, alterando la disponibilidad de nutrientes esenciales (como calcio, magnesio y potasio) y aumentando la solubilidad de elementos tóxicos como el aluminio, el hierro y el manganeso (Nordstrom, 2011), lo cual afecta directamente la fertilidad del suelo, comprometiendo el desarrollo vegetal y la producción agrícola. Los metales liberados por la oxidación de minerales sulfurados pueden ser transportados a través del perfil del suelo y bioacumularse, generando toxicidad en plantas y microorganismos (Dold, 2017). Además, la vegetación limitada y la estructura degradada del suelo favorecen la erosión hídrica y eólica, especialmente en zonas montañosas o de clima extremo, agravando aún más la pérdida de suelo fértil. La acumulación progresiva de estos elementos genera condiciones de toxicidad que afectan tanto a la flora como a la fauna, deteriorando la salud integral del ecosistema (Zarroca et al., 2021).

6.3.3. Impactos en la salud humana

La contaminación de fuentes de agua potable por metales pesados representa un riesgo directo para la salud pública, pudiendo tornar el recurso hídrico no apto para consumo humano. Además, la exposición indirecta a través de la cadena alimentaria, mediante el consumo de productos agrícolas o pecuarios expuestos al DAR, constituye una vía adicional de exposición a estos contaminantes (Zarroca et al., 2021).

6.3.4. Impactos socioeconómicos

Los efectos socioeconómicos del DAR son múltiples y complejos. La contaminación de los recursos hídricos y del suelo pone en riesgo la sostenibilidad de las unidades de producción familiar, lo que afecta directamente la seguridad alimentaria de las poblaciones más vulnerables. En las zonas impactadas, la ganadería extensiva sufre una notable reducción en su productividad, comprometiendo los medios de subsistencia de las comunidades rurales.

Los costos asociados a la remediación de sitios contaminados representan un costo económico significativo. Además, la presencia del DAR puede resultar en la devaluación de propiedades circundantes y generar tensiones sociales entre diferentes usuarios del recurso hídrico, particularmente en contextos de escasez o competencia por el acceso al agua (Dold, 2017; Nordstrom, 2009).

6.4. Teledetección y *machine learning*

La identificación y monitoreo del DAR ha experimentado una transformación significativa gracias a la integración de tecnologías avanzadas de teledetección y aprendizaje automático (*machine learning*). Esta convergencia tecnológica ha permitido desarrollar metodologías más precisas y eficientes para la evaluación y seguimiento de impactos ambientales (Ge et al., 2018; Ghrefat et al., 2023).

La teledetección, fundamentada en el análisis de imágenes satelitales, facilita la obtención de datos espaciales sobre las características de la superficie terrestre. Esta tecnología permite la identificación de firmas espectrales específicas asociadas a la presencia de minerales secundarios y zonas impactadas por el DAR. El análisis se enriquece mediante la implementación de técnicas avanzadas que incluyen: la aplicación de relaciones de banda espectrales optimizadas para la detección de minerales característicos, utilización de índices normalizados y desarrollo de análisis de componentes principales (PCA) para la identificación de patrones espectrales específicos.

Complementariamente, la implementación de algoritmos de *machine learning*, particularmente *random forest*, ha permitido procesar y analizar extensos conjuntos de datos geoespaciales con alta precisión. Este enfoque metodológico integra múltiples variables: topográficas, que caracterizan el relieve y la morfología del terreno; geológicos, que identifican formaciones geológicas susceptibles y parámetros espectrales derivados del análisis de imágenes satelitales.

La combinación de estas variables mediante algoritmos de aprendizaje automático genera modelos predictivos robustos que optimizan la identificación de áreas de interés. Estas tecnologías han sido fundamentales en la elaboración del presente mapa, demostrando su utilidad para abordar problemas complejos en el ámbito socioambiental y promoviendo soluciones basadas en evidencia científica.

7. METODOLOGÍA

La delimitación de sitios potenciales e impactados por el DAR se fundamenta en la integración de información satelital y datos recopilados en campo mediante técnicas de teledetección. La presente sección desarrolla la metodología empleada, la cual combina análisis de teledetección con validación de datos in situ.

El marco metodológico se sustenta en una revisión de literatura académica especializada en el mapeo y delimitación de áreas afectadas por procesos geoquímicos, con énfasis en la formación de óxidos de hierro y alteraciones hidrotermales en ecosistemas montañosos.

Figura 8. Hoja de ruta metodológica para la elaboración del mapa.



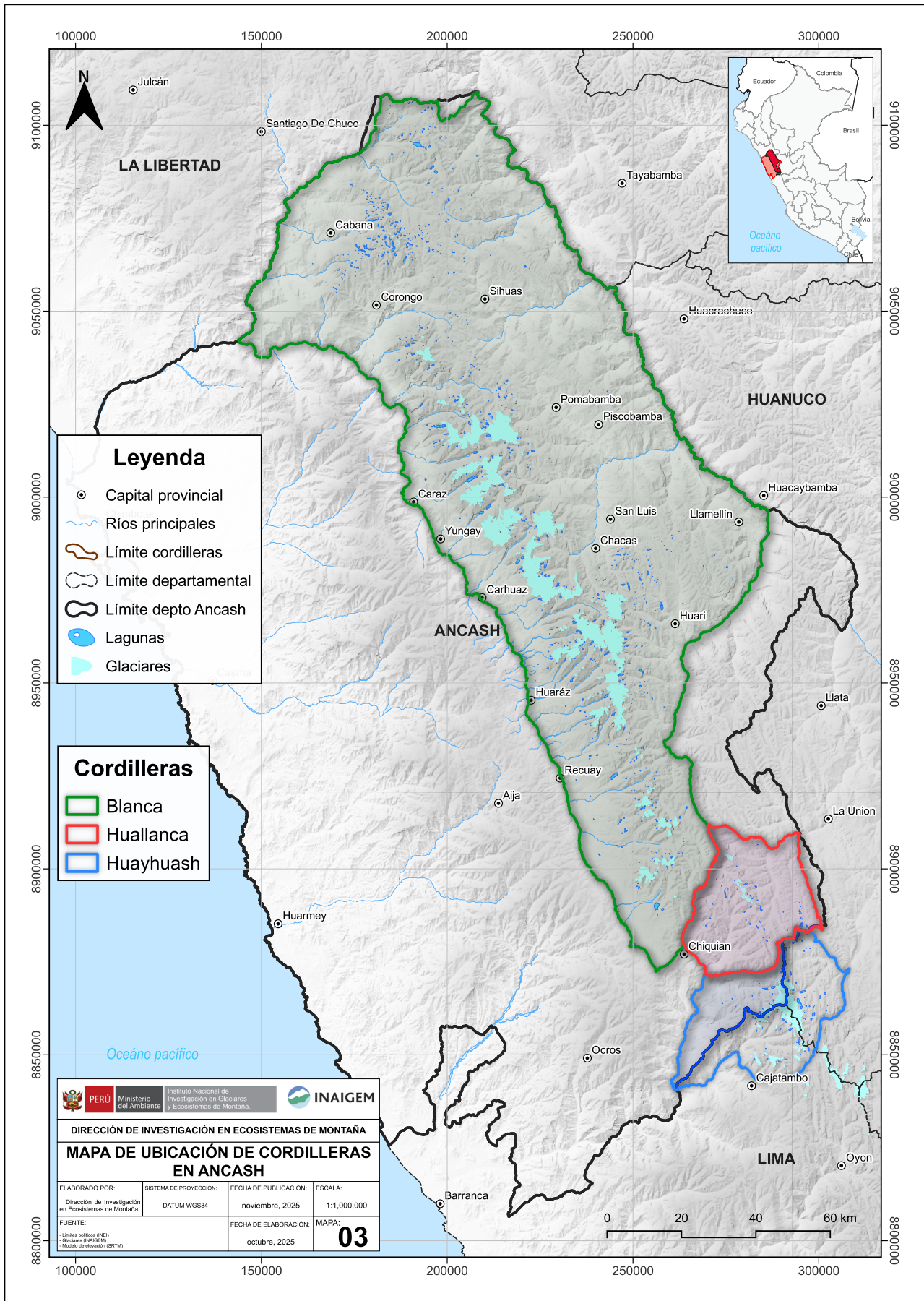
La ruta metodológica fue planteada de manera detallada para describir las actividades fundamentales a ejecutar, tanto en gabinete como en campo, para cada fase del proceso. La articulación integral de estas actividades permitió implementar un enfoque sistemático y coordinado para el proceso de delimitación.

7.1. Ámbito de estudio

La metodología de delimitación de sitios potenciales e impactados por el DAR se implementó en las tres cordilleras del departamento de Áncash: la cordillera Blanca, la cordillera Huallanca y la cordillera Huayhuash (**figura 9**). La selección de estas áreas responde a su singular configuración geográfica y su significativa relevancia para el estudio de entornos periglaciares, los cuales constituyen ecosistemas de alta fragilidad donde se manifiestan procesos activos de generación del DAR.

Es particularmente relevante señalar que dentro del ámbito de estudio se encuentra el Parque Nacional Huascarán (PNH), área natural protegida de excepcional importancia para la conservación de ecosistemas glaciares y periglaciares. Este espacio protegido no solo representa un patrimonio natural de alto valor ecológico y científico, sino que también resulta fundamental para la comprensión de los procesos dinámicos asociados a la exposición de material rocoso y la consecuente generación del DAR.

Figura 9. Mapa de ubicación del ámbito de estudio.



7.2. Insumos

Se integró múltiples fuentes de información, incluyendo imágenes ópticas Sentinel 2, el Modelo Digital de Elevación (DEM), la información geológica y la información recopilada en campo, como se detalla en la **tabla 1**. La selección de estos insumos se fundamenta en investigaciones previas que demuestran que la integración de fuentes diversas optimiza la precisión en la delimitación de sitios potencialmente impactados por el DAR.

Tabla 1. Información satelital y vectorial empleada en el estudio.

Dato	Fuente	Resolución (m)	Bandas
Sentinel 2 A/B	ESA	10/20	azul(b2), verde(B3), rojo(4), borde rojo 1(B5), borde rojo 2(B6), borde rojo 3(B6), NIR(B8), , borde rojo 4(B8A), SWIR1(B11), SWIR2(B12)
Copernicus GLO-30	ESA	30	DEM
Unidades geológicas	Ingemmet Inaigem	-	-
Datos de campo	Inaigem	-	-

7.2.1. Sentinel 2

Las imágenes satelitales Sentinel 2 opera con instrumental espectral en órbita sincrónica solar a 786 kilómetros de altitud, proporcionando cobertura terrestre y acuática con un ancho de barrido de 290 kilómetros. Su temporalidad de revisita es de diez días en el ecuador, reduciéndose a cinco días cuando operan dos satélites simultáneamente (Van der Meer et al., 2014).

7.2.2. Modelo digital de elevación

El DEM GLO-30, proporcionado por el programa Copernicus, constituye una representación precisa de la superficie terrestre, excluidos elementos superficiales como vegetación y estructuras antrópicas. Este producto, derivado del WorldDEM y basado en datos radar de la misión TanDEM-X, ofrece una resolución espacial de 30 metros. Está disponible a nivel mundial y fue utilizado como insumo base de este mapa.

7.2.3. Potencial de generación DAR en las unidades geológicas

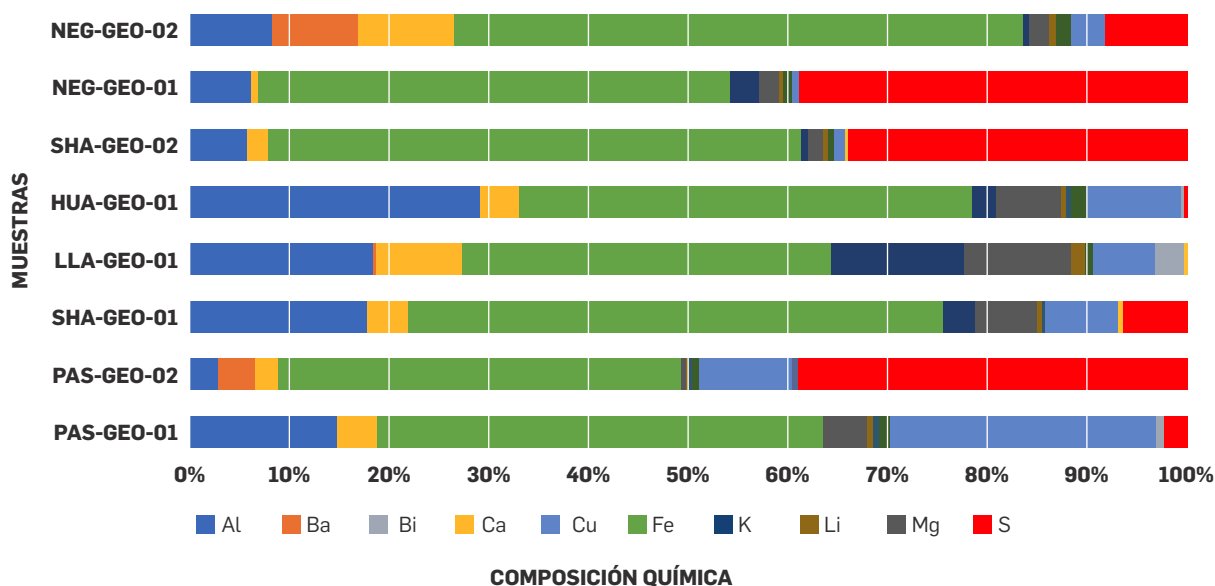
La evaluación del potencial generador del DAR se fundamentó en la determinación cuantitativa del contenido de minerales sulfurados en las rocas, mediante análisis minerográficos y geoquímicos. Durante las campañas de campo realizadas en el departamento de Áncash, se recolectaron ocho muestras de roca con presencia visible de pirita y esfalerita (**tabla 2**). Estas muestras fueron sometidas a análisis de laboratorio mediante el método ICP-OES con digestión por agua regia, enfocándose en la detección y cuantificación de elementos metálicos constituyentes.

Tabla 2. Muestras de rocas del grupo Chicama descritas en las campañas de campo.

Código	Unidad hidrográfica	Unidad geológica	Tipo de roca
PAS-GEO-01	Pachacoto	Grupo Chicama	Sedimentaria
PAS-GEO-02	Pachacoto	Grupo Chicama	Metamórfica
HUA-GEO-01	Huachecsa	Grupo Chicama	Sedimentaria
NEG-GEO-01	Río Negro	Grupo Chicama	Metamórfica
NEG-GEO-02	Río Negro	Grupo Chicama	Metamórfica
SHA-GEO-01	Shallap	Grupo Chicama	Metamórfica
SHA-GEO-02	Shallap	Grupo Chicama	Metamórfica

Las muestras analizadas, provenientes principalmente del grupo Chicama, presentan una variada composición litológica que incluye rocas sedimentarias (areniscas) y metamórficas (cuarcitas y corneanas), distribuidas en diferentes unidades hidrográficas del departamento. La caracterización geoquímica, representada en la **figura 10**, reveló un predominio significativo de aluminio, hierro y azufre en la composición elemental de las muestras. El contenido de azufre oscila entre 7% y 40%, mientras que el hierro mantiene una presencia constante entre 40% y 50%. El aluminio, por su parte, presenta una variación entre 5% y 28%.

Figura 10. Composición química de las muestras de roca del departamento de Áncash.



En el análisis comparativo con los valores promedio de la corteza terrestre (Swaine, 1955), se identificaron enriquecimientos significativos de azufre en varias localidades. Las muestras de Shallap (de 1.606 a 30.422 ppm), Pachacoto (1.168 ppm) y río Negro (de 1.543 a 79.139 ppm) superan considerablemente el valor referencial de la corteza continental (250 ppm). Este enriquecimiento en azufre está directamente relacionado con la presencia de minerales sulfurosos, particularmente pirita, identificados durante las evaluaciones de campo.

Tabla 3. Contenido geoquímico de los elementos Fe y S.

Código	Hierro (Fe) (ppm)	Azufre (S) (ppm)
PAS-GEO-01	825,66	45,16
PAS-GEO-02	1.216,78	1.168,64
SHA-GEO-01	12.964,10	1.606,74
LLA-GEO-01	7.699,60	0,10
HUA-GEO-01	5.557,37	0,10
SHA-GEO-02	47.881,70	30.422,50
NEG-GEO-01	95.915,20	79.139,52
NEG-GEO-02	10.736,07	1.543,89
Corteza terrestre	56.000,00	250,00

Respecto al contenido de hierro, las muestras del río Negro presentan valores de 95.915 ppm, superando el promedio cortical de 56.000 ppm. Las muestras de Shallap, con 47.881 ppm, también muestran un contenido significativo de hierro. Esta concentración elevada se asocia a la presencia de precipitados ferruginosos como limonita, hematita y goethita, minerales que pueden influir en la calidad del agua debido a su movilización durante los procesos de drenaje ácido.

La clasificación del potencial generador del DAR se estableció en función del contenido porcentual de sulfuros (**tabla 4 y figura 11**), identificándose el nivel de las siguientes unidades geológicas:

El grupo Chicama, específicamente la la formación Sapotal y Tinajones, ubicada en la cordillera Blanca y en contacto directo con masas glaciares en retroceso, presenta un potencial de generación moderado (1-11% de sulfuros) a muy alto (>30% de sulfuros). Esta unidad se caracteriza por un alto contenido de pirita, calcopirita y esfalerita.

La Super Unidad Antamina y los cuerpos subvolcánicos, que atraviesan el grupo Chicama y el Batolito de la cordillera Blanca, exhiben una potencialidad alta (>30% de sulfuros), caracterizada por la presencia de pirita cúbica diseminada y en venillas, asociada con calcopirita y arsenopirita.

Tabla 4. Nivel de potencialidad de generación de drenaje ácido de roca de las unidades geológicas del departamento de Áncash.

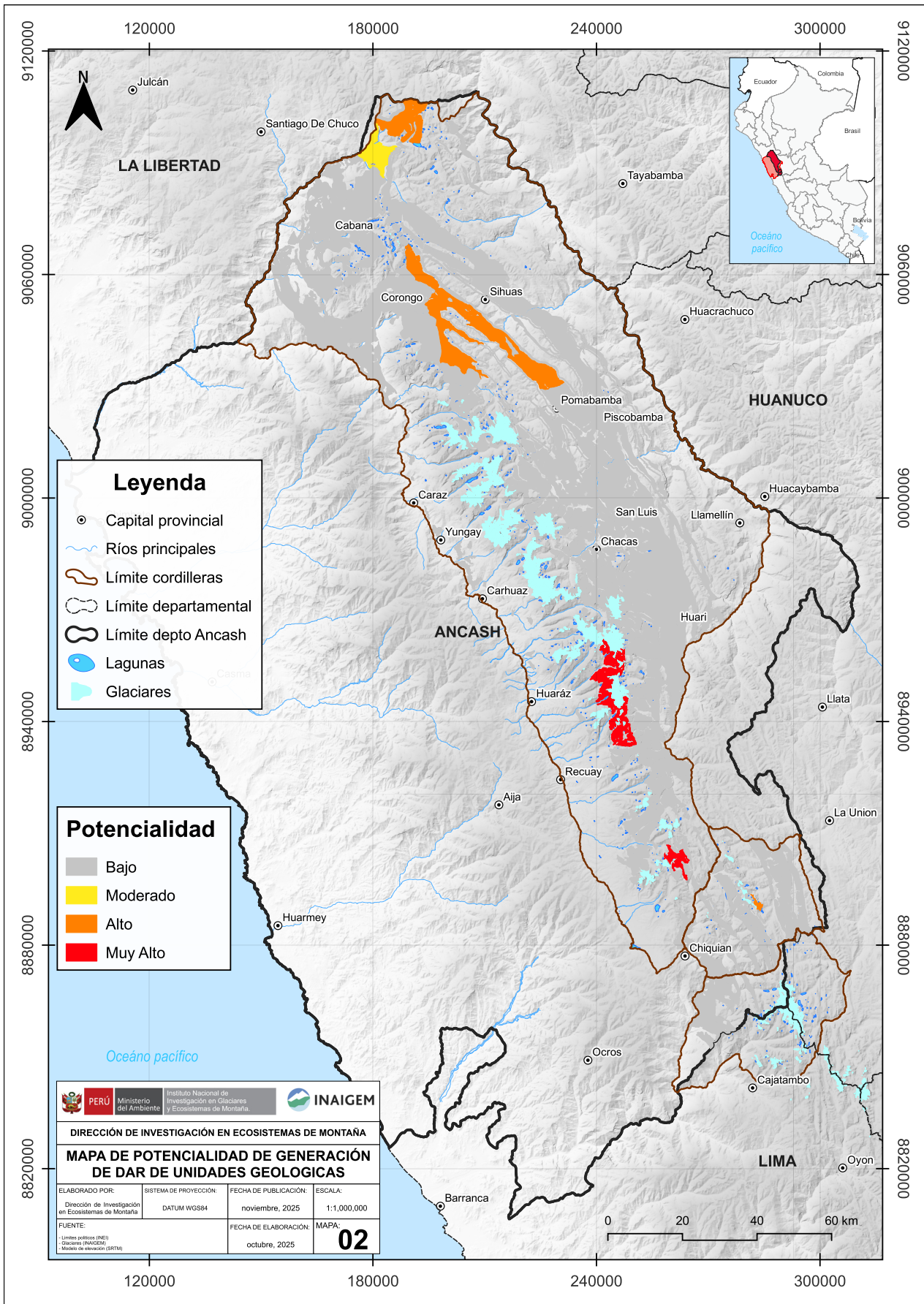
Unidad geológica	Nivel de Potencialidad	% Sulfuros	Valor
Cuerpos subvolcánicos	Bajo	<1%	1
Super Unidad Antamina			
Andesita			
Formación Oyón - Miembro inferior			
Formación Oyón			
Grupo Goyllarisquizga - Formación Chimú			
Grupo Chicama - Formación Sapotal			
Grupo Chicama - Formación Tinajones - Miembro Superior			
Grupo Chicama - Formación Tinajones			
Grupo Chicama - Formación Sapotal*	Moderado	1-11%	2
Formación Oyón - Miembro inferior*	Alto	12-29%	3
Grupo Chicama - Formación Sapotal*			
Super Unidad Antamina*			
Grupo Chicama - Formación Sapotal*	Muy alto	>30%	4
Grupo Goyllarisquizga - Formación Chimú*			
Grupo Chicama - Formación Tinajones - Miembro Superior*			

*Unidades geológicas subdivididas que contienen información asociada al contenido de sulfuros.

Es importante destacar que el potencial de generación de DAR es mayor en los sulfuros de origen diagenético, ya que se encuentran ampliamente distribuidos en unidades formadas bajo ambientes anóxicos, lo que incrementa su volumen, continuidad y capacidad de oxidarse al ser expuestos. En contraste, los sulfuros asociados a eventos hidrotermales y magmáticos presentan un potencial más localizado, pues están restringidos a zonas puntuales de enriquecimiento, como vetas, fracturas mineralizadas y áreas de alteración hidrotermal.

Esta caracterización geoquímica y mineralógica constituye una base sólida para evaluar el riesgo ambiental asociado a la generación de drenaje ácido de roca (DAR), y la identificación de estas unidades geológicas y su potencial de generación de DAR constituye un insumo fundamental para la elaboración del mapa de sitios potenciales e impactados por drenaje ácido de roca asociado al retroceso glaciar en Áncash.

Figura 11. Mapa de potencialidad de generación del DAR de las unidades geológicas del departamento de Áncash.



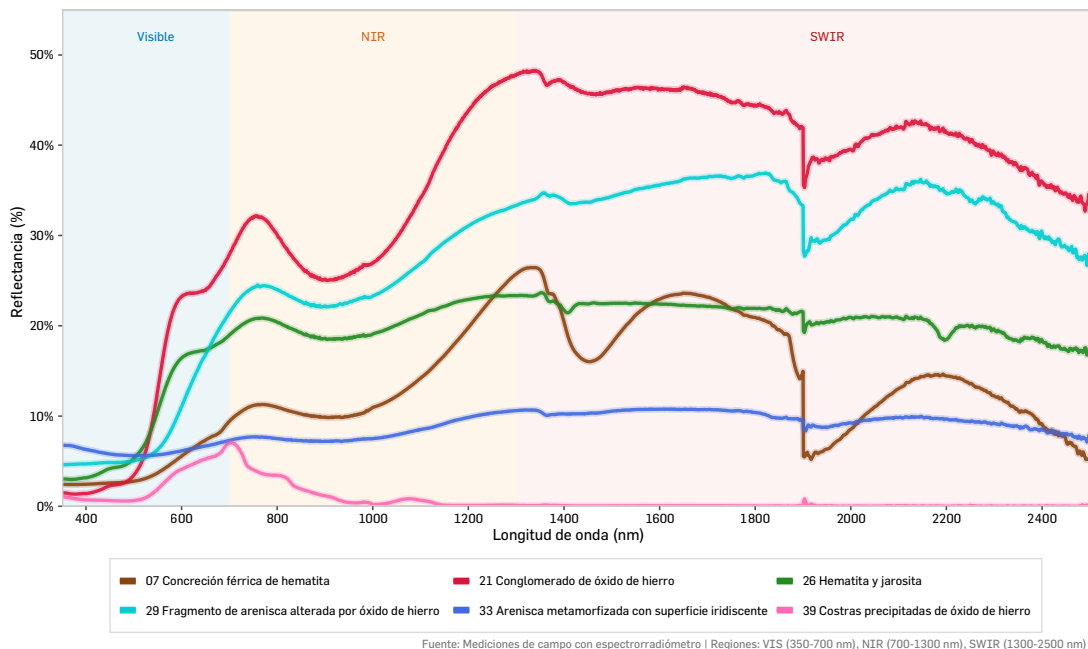
7.2.4. Datos de campo

La información recopilada en campo constituyó un elemento fundamental para el entrenamiento, calibración y validación de algoritmos predictivos. Para el mapa, se incluyeron dos tipos principales de información de campo:

a. Firmas espectrales

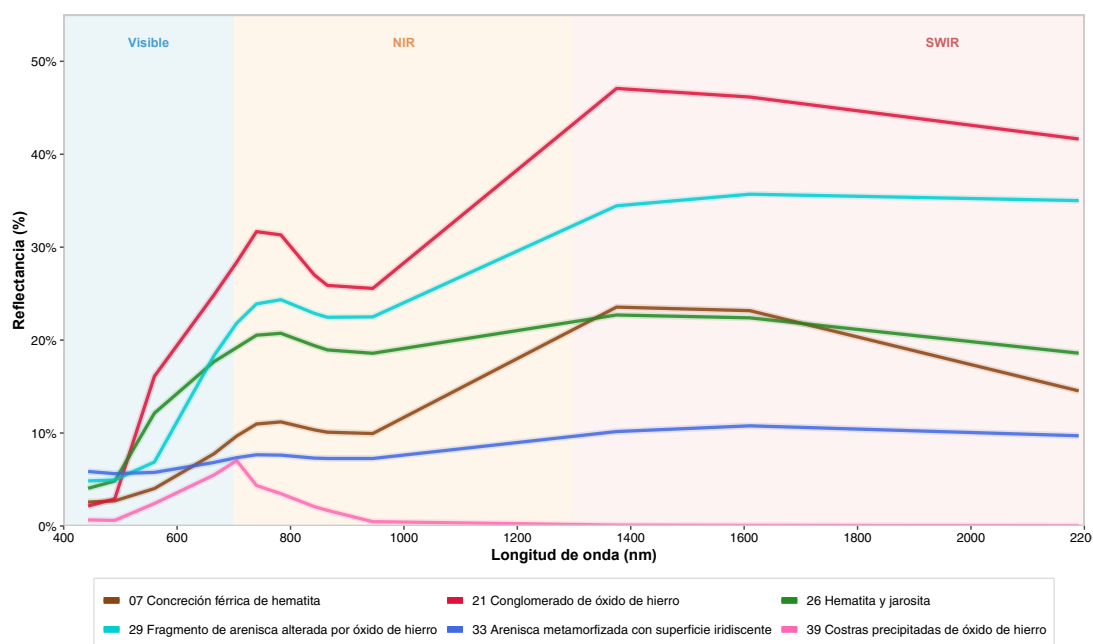
Las firmas espectrales, también conocidas como firmas espectrales, representan la «huella digital» de un objeto o superficie en términos de la radiación electromagnética que refleja o emite a lo largo de diferentes longitudes de onda. En el mapa se consideraron firmas espectrales recopiladas durante las campañas de campo de 2025, que proporcionaron la caracterización espectral específica de rocas y sedimentos asociados al DAR.

Figura 12. Firmas espectrales de sedimento y roca recopiladas en el año 2025.



El remuestreo de las firmas espectrales consistió en ajustar las mediciones obtenidas del espectrorradiómetro de campo para hacerlas compatibles a las características espectrales del sensor Sentinel 2, optimizando su aplicación en la clasificación de imágenes.

Figura 13. Firmas espectrales ajustadas al sensor Sentinel 2.



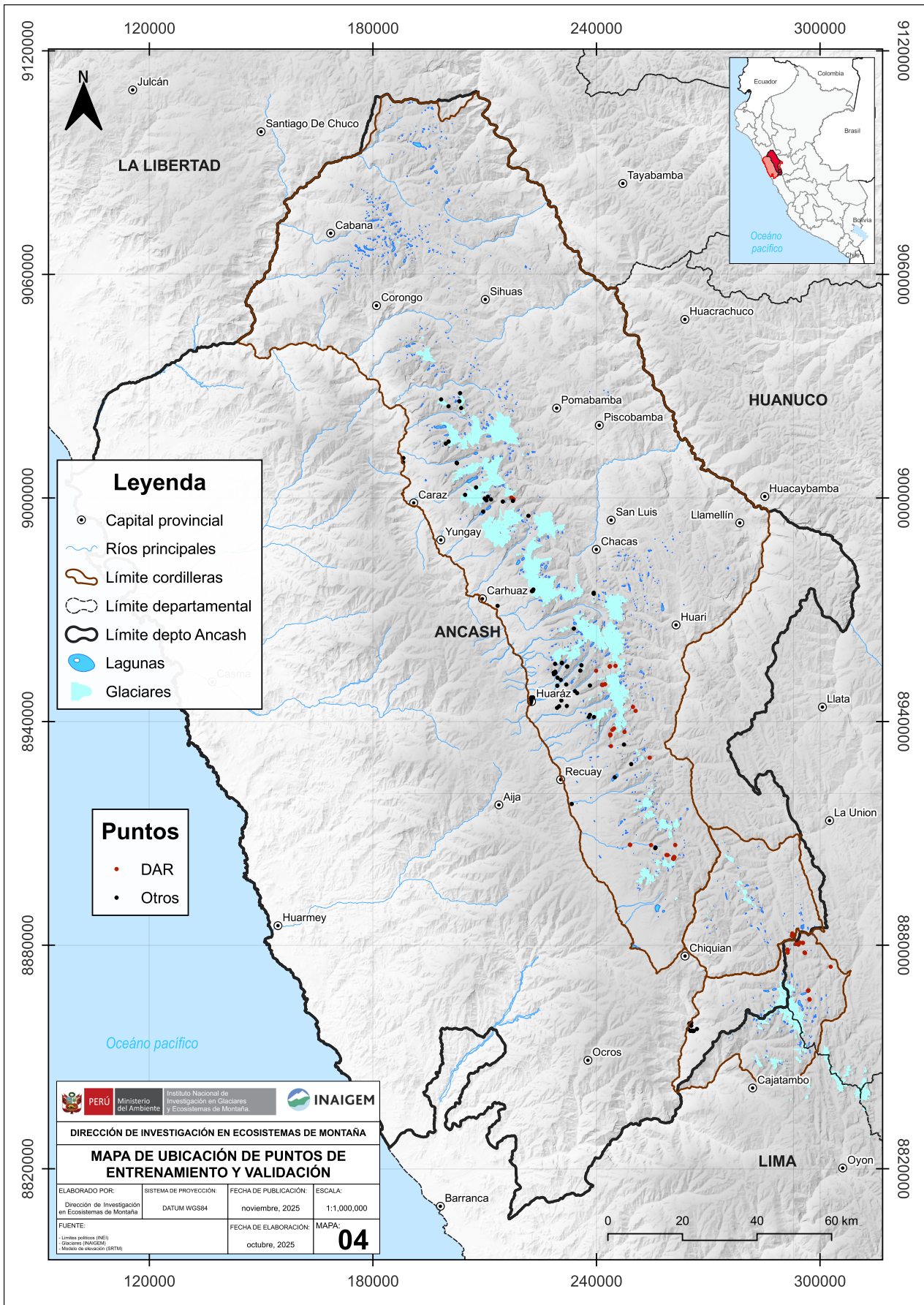
b. Puntos de entrenamiento y validación

Se establecieron un total de 133 puntos de control georreferenciados, distribuidos estratégicamente con el propósito de capturar la heterogeneidad geológica, geomorfológica y espectral del territorio. De estos, 60 corresponden a sitios confirmados con presencia de DAR, mientras que los 73 restantes representan áreas con otras coberturas no afectadas por dicho proceso. La distribución de los puntos siguió una proporción del 80 % para entrenamiento y 20 % para validación, garantizando así una adecuada representación de ambas clases en el conjunto de datos.

En todos los sitios identificados con DAR se realizaron mediciones de parámetros de campo, tales como pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura, potencial redox, sólidos disueltos totales, entre otros. En la mayoría de estos puntos se recolectaron muestras de agua, sedimento y roca, las cuales fueron posteriormente analizadas en laboratorio. Estos análisis permitieron confirmar la presencia de condiciones ácidas y procesos de oxidación de sulfuros, validando los sitios como impactados por DAR. Adicionalmente, en estos mismos lugares se llevaron a cabo evaluaciones geológicas, que permitieron identificar unidades litológicas y estructuras geológicas generadoras de DAR, tales como zonas de mineralización y presencia de sulfuros metálicos.

En el caso de los sitios no impactados por DAR, se realizó un levantamiento de información en campo. Además, esta información fue complementada mediante interpretación visual de imágenes de alta resolución disponibles en plataformas como Google Earth Pro y Bing, lo que permitió verificar la ausencia de indicadores superficiales de alteración ácida y validar su clasificación como áreas no impactadas.

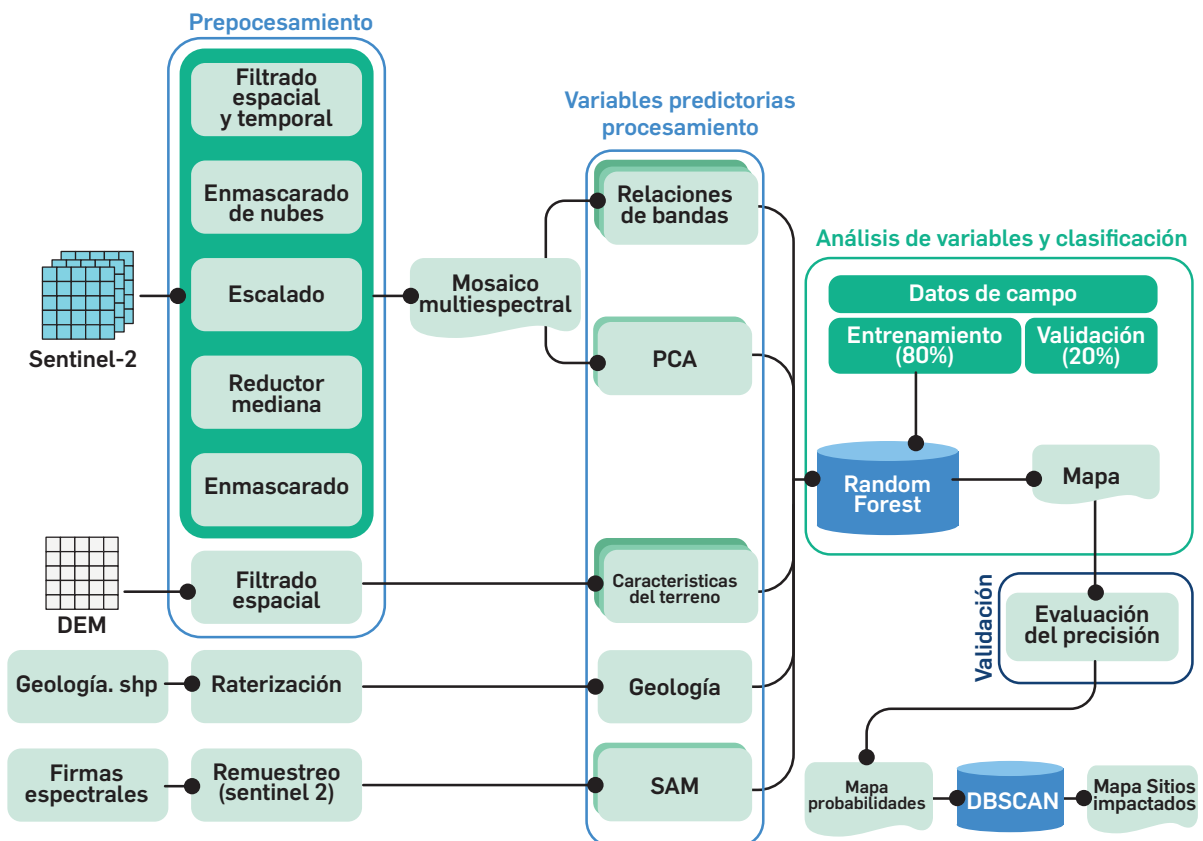
Figura 14. Mapa de distribución de puntos de entrenamiento y validación del modelo.



7.3. Delimitación de sitios potenciales e impactados con el drenaje ácido de roca

La metodología implementada para la delimitación de sitios potenciales e impactados por el DAR se fundamenta en la aplicación del algoritmo random forest, siguiendo un protocolo sistemático que se detalla en la **figura 15**.

Figura 15. Diagrama de flujo metodológico empleado en la delimitación de sitios potenciales e impactados con el DAR.



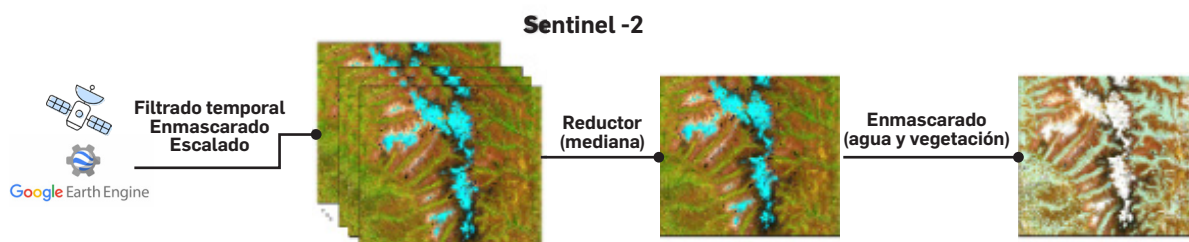
El proceso metodológico comprende etapas principales que se describirán a continuación.

7.3.1. Etapa 1: Preprocesamiento

La fase inicial consiste en la obtención de datos de entrada, donde se recopilaban imágenes ópticas multispectrales del satélite Sentinel 2, DEM, información geológica vectorial (formato shapefile) y datos de campo que incluyen firmas espectrales, así como puntos de entrenamiento y validación.

Las imágenes Sentinel 2 utilizadas en este estudio fueron sometidas a un proceso de preprocesamiento para garantizar que estuvieran en las mejores condiciones posibles para los análisis posteriores. Este proceso se realizó específicamente en la zona montañosa del departamento de Áncash, para optimizar la calidad y la precisión de los resultados.

Figura 16. Diagrama de flujo del preprocesamiento de las imágenes Sentinel 2.



a. Filtrado espacial y temporal.

El proceso inició con la implementación de un filtrado espacial orientado a la selección precisa de imágenes satelitales que cubren el área de estudio del departamento de Áncash. Además, se ejecutó un filtrado temporal, restringiendo el periodo de análisis a abril-octubre de 2025. Esta ventana temporal se estableció estratégicamente para asegurar la obtención de datos con óptima calidad radiométrica y mínima interferencia atmosférica.

b. Enmascarado de nubes y sombras.

Se implementó un algoritmo en Google Earth Engine (GEE) para la identificación y eliminación de zonas con alta nubosidad y sus sombras asociadas. Este procedimiento fue fundamental para preservar la integridad del análisis, ya que estas interferencias pueden comprometer significativamente la precisión de los resultados.

c. Escalado radiométrico.

La conversión a unidades de reflectancia se realizó mediante un proceso de escalado, aplicando un factor de división de 10.000 a todas las imágenes.

d. Aplicación de reductor mediana.

Se implementó un reductor estadístico de mediana sobre la serie temporal de imágenes satelitales. Este proceso genera una imagen única que representa el valor mediano de cada píxel, minimizando efectivamente la influencia de valores atípicos y fortaleciendo la robustez del análisis.

e. Enmascarado de agua y vegetación.

El procedimiento de enmascaramiento de agua y vegetación se ejecutó mediante la aplicación de índices espectrales específicos, lo que nos permitió identificar y eliminar las áreas que podrían generar confusión en el proceso de clasificación (Ge et al., 2018).

- » **El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):** se implementó para la identificación y exclusión de áreas con cobertura vegetal, utilizando las reflectancias superficiales en las regiones del espectro visible ($\lambda \sim 0,6 \mu\text{m}$) e infrarrojo cercano ($\lambda \sim 0,8 \mu\text{m}$). Este índice se calcula mediante la fórmula (Jiang et al., 2006):

$$\text{NDVI} = \left(\frac{\text{Banda } 8_{(\text{NIR})} - \text{Banda } 4_{(\text{rojo})}}{\text{Banda } 8_{(\text{NIR})} + \text{Banda } 4_{(\text{rojo})}} \right)$$

- » **El Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI):** se aplicó para la detección y delimitación de cuerpos de agua, empleando la siguiente formulación (McFeeters, 1996):

$$\text{MNDWI} = \left(\frac{\text{Banda } 3_{(\text{verde})} - \text{Banda } 8_{(\text{NIR})}}{\text{Banda } 3_{(\text{verde})} + \text{Banda } 8_{(\text{NIR})}} \right)$$

f. Mosaico multiespectral.

El resultado de esta fase de preprocesamiento fue un mosaico multiespectral de alta calidad, caracterizado por la ausencia de interferencias atmosféricas y la exclusión de áreas con vegetación y cuerpos de agua. Este producto constituyó la base fundamental para los análisis subsecuentes.

Por su parte, el DEM se sometió a un proceso de filtrado espacial para asegurar su correspondencia exacta con el área de estudio y con ello garantizar la coherencia espacial con las imágenes satelitales, mientras que las firmas espectrales fueron ajustadas a las bandas de la imagen satelital Sentinel 2.

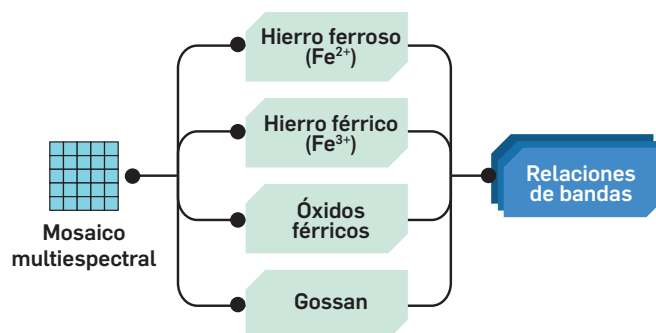
7.3.2. Etapa 2: Procesamiento

La fase de procesamiento comprende el análisis y transformación de las variables predictoras derivadas de imágenes satelitales, modelo digital de elevación (DEM), datos vectoriales y firmas espectrales, que constituyen los insumos fundamentales para el algoritmo de clasificación.

a. Relaciones de bandas

Se implementaron tres relaciones espectrales principales para la discriminación de áreas con presencia del DAR (Ge et al., 2018; Van der Meer et al., 2014), como se ilustra en la **figura 17**.

Figura 17. Flujo de trabajo para la obtención de las relaciones de bandas.



- **Hierro ferroso (Fe²⁺):** la relación para resaltar el hierro ferroso combina diferentes bandas de las imágenes Sentinel 2, la formulación es la siguiente:

$$Fe^{2+} = \left(\frac{\text{Banda 12}_{(SWIR2)}}{\text{Banda 8}_{(NIR)}} + \frac{\text{Banda 3}_{(verde)}}{\text{Banda 4}_{(rojo)}} \right)$$

- **Hierro férrico (Fe³⁺):** la detección de conjuntos minerales de hierro férrico implicó el uso exclusivo de dos bandas de la imagen Sentinel 2, según la siguiente expresión:

$$Fe^{3+} = \left(\frac{\text{Banda 4}_{(rojo)}}{\text{Banda 3}_{(verde)}} \right)$$

- **Óxidos férricos (OxFe):** los óxidos férricos fueron resaltados aplicando la relación de las bandas del espectro infrarrojo de las imágenes Sentinel 2, como se aprecia a continuación:

$$OxFe = \left(\frac{\text{Banda 11}_{(SWIR1)}}{\text{Banda 8}_{(NIR)}} \right)$$

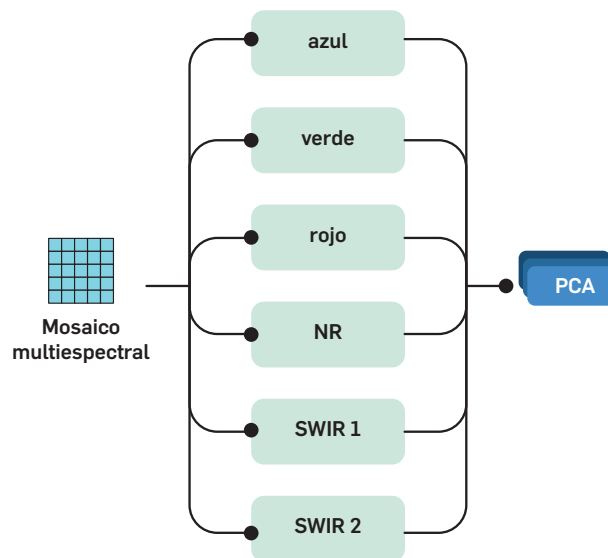
- **Gossan:** los afloramientos meteorizados ricos en hierro fueron detectados mediante la siguiente relación de bandas de Sentinel 2:

$$\text{Gossan} = \left(\frac{\text{Banda 11}_{(\text{SWIR1})}}{\text{Banda 4}_{(\text{rojo})}} \right)$$

b. Análisis de componentes principales (PCA)

Se implementó el PCA utilizando seis bandas específicas de Sentinel 2, seleccionadas por su capacidad para identificar óxidos de hierro y alteraciones hidrotermales. Esta técnica permitió reducir la dimensionalidad de los datos y detectar patrones espectrales asociados a la presencia del DAR, como se detalla en la **figura 18**.

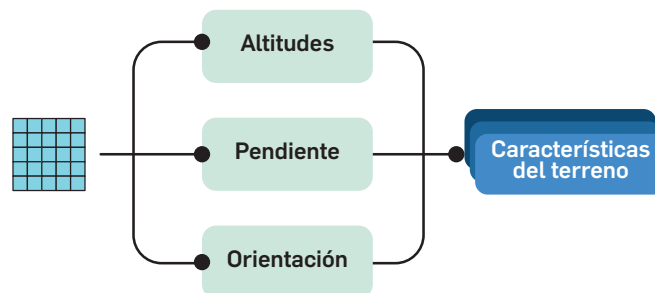
Figura 18. Flujo de trabajo e insumos empleados en la determinación del PCA.



c. Características del terreno

A partir del DEM, se derivaron tres variables fundamentales para la modelización del DAR.

Figura 19. Flujo de trabajo para la obtención de las características del terreno.



Altitud: se analizaron las elevaciones superiores a 2.500 metros sobre el nivel del mar, considerando su influencia en la disponibilidad hídrica y los procesos de oxidación mineral, particularmente en zonas afectadas por retroceso glaciar.

Pendiente: se caracterizaron las pendientes del terreno, reconociendo su papel en los procesos de transporte y erosión que facilitan la exposición de minerales sulfurosos a condiciones oxidantes.

Orientación: se evaluó la orientación de las laderas en relación con la exposición solar, factor determinante en los procesos de fusión glaciaria y consecuente exposición de minerales sulfurados.

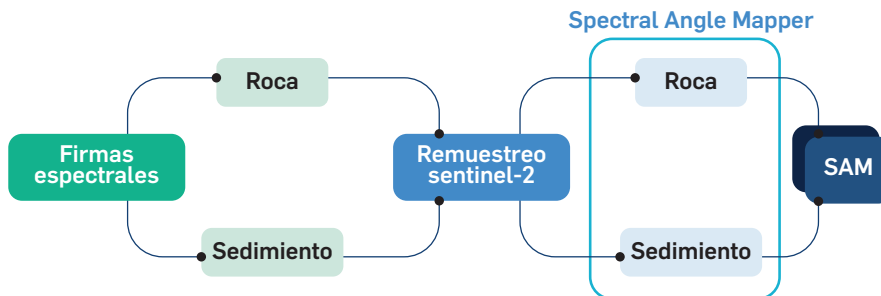
d. Unidades geológicas en formato ráster

La información geológica, fue procesada mediante un protocolo de rasterización en QGIS. Este proceso incluyó el establecimiento de un tamaño de píxel de 10 metros, compatible con Sentinel 2; selección de atributos litológicos relevantes y aseguramiento de coherencia espacial con las demás capas de análisis.

e. Spectral Angle Mapper (SAM)

Se aplicó el algoritmo SAM para la identificación de áreas con presencia del DAR, utilizando firmas espectrales de roca y sedimento obtenidas en campo durante 2025.

Figura 20. Flujo de trabajo para la determinación del SAM en roca y sedimento.



El procedimiento englobó el análisis diferenciado para muestras de roca y sedimento y establecimiento de umbrales angulares óptimos para la clasificación. La fórmula general para SAM (Kruse et al., 1993) es:

$$\theta(x,y) = \text{Cos}^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} * \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right)$$

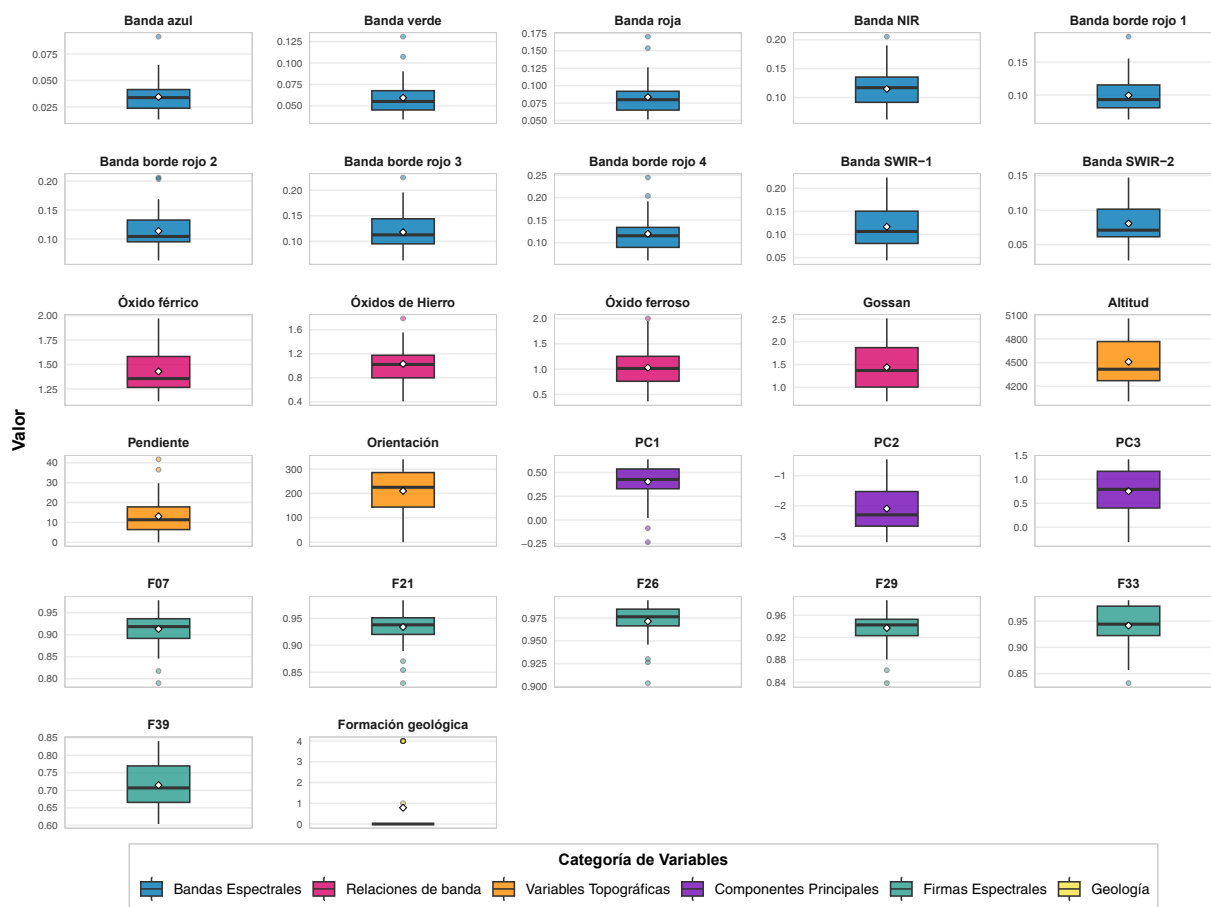
Donde: x: es la firma espectral de un píxel de la imagen, y: es la firma espectral del objeto de interés y n: es el número de bandas de la imagen satelital.

7.3.3. Etapa 3: Análisis de variables y clasificación

a. Distribución de valores en las variables predictoras

El análisis de la distribución de las 27 variables predictoras empleadas en el modelo reveló patrones significativos para la delimitación de sitios potenciales e impactados con el DAR. La **figura 21** ilustra estas distribuciones, proporcionando una comprensión integral de su variabilidad y su relación con las características geográficas y litológicas de la zona.

Figura 21. Distribución de valores para las 27 variables predictoras en el algoritmo RF.



Las variables topográficas mostraron patrones distintivos. La elevación (DEM) indica una concentración predominante de sitios impactados con el DAR entre los 3.900 y 5.000 metros sobre el nivel del mar, sugiriendo una estrecha relación con las condiciones ambientales características de la alta montaña. La pendiente evidenció que estos sitios se ubican típicamente en terrenos con inclinaciones entre 5 y 30 grados, con una mediana aproximada de 10 grados, correlacionándose con zonas de exposición rocosa facilitada por el retroceso glaciar.

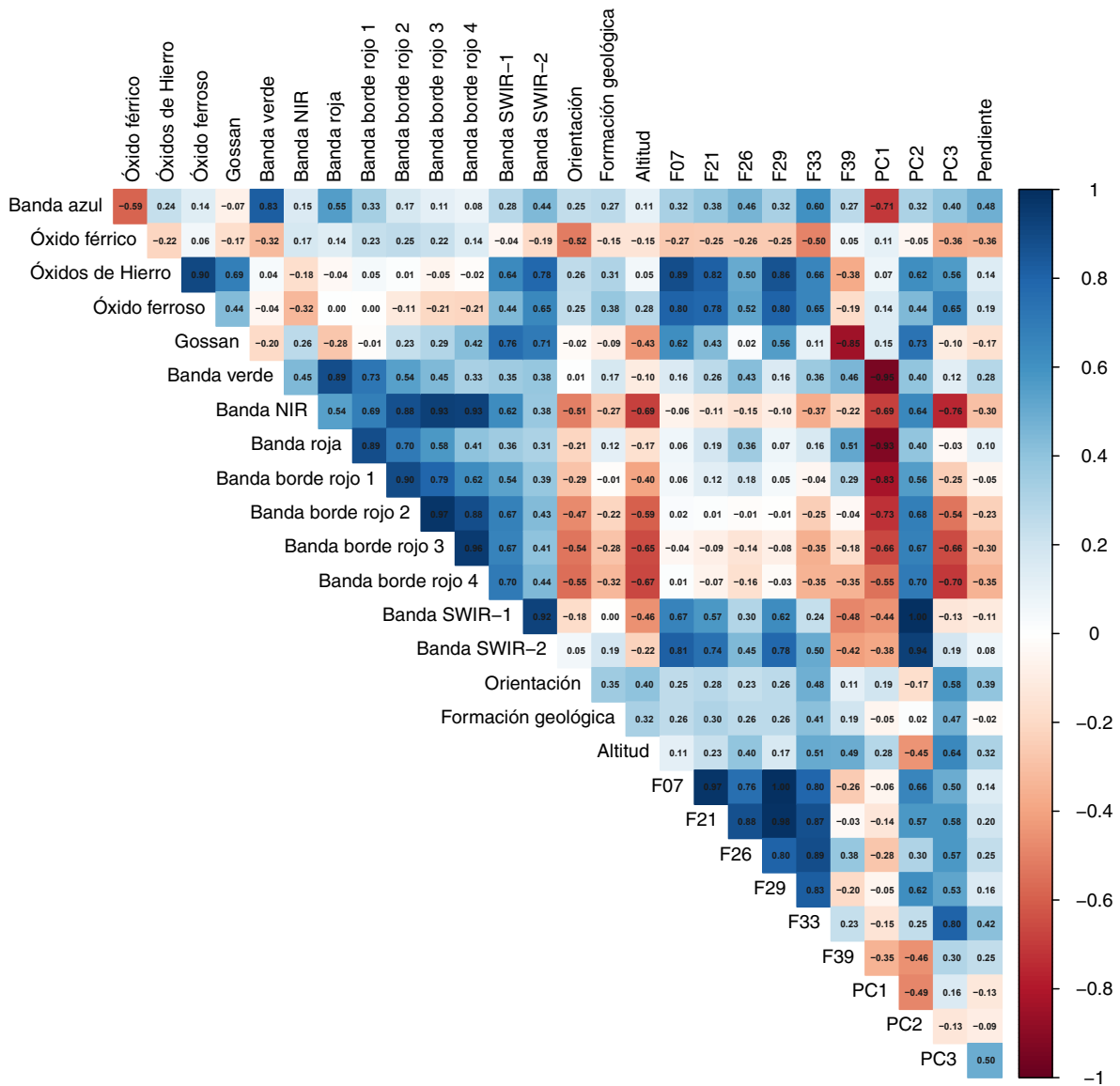
Los indicadores espectrales también revelaron patrones significativos. La variable de óxidos de hierro presentó valores predominantemente superiores a 0.5 en sitios con evidencias del DAR confirmadas en campo. Las relaciones de bandas para óxidos férricos y ferrosos mostraron distribuciones similares, reforzando su utilidad como indicadores de alteración mineral.

El análisis de diagramas de caja identificó variables con alta capacidad discriminativa, destacando la orientación, el primer componente principal (PC1) y la elevación (DEM). En contraste, el SAM de sedimento y las bandas espectrales roja y verde exhibieron menor variabilidad entre clases.

b. Análisis de correlación cruzada (colinealidad)

La evaluación de colinealidad entre variables predictoras, ilustrada en la **figura 22**, reveló correlaciones generalmente moderadas, indicando una baja redundancia en el conjunto de datos. Se implementó un criterio de exclusión para variables con correlaciones altas ($r > 0.9$) en al menos tres casos. Las bandas SWIR1, SWIR2 y NIR mostraron correlaciones esperables debido a su naturaleza espectral, mientras que variables como SAM de sedimento, óxidos férricos y pendiente demostraron independencia significativa.

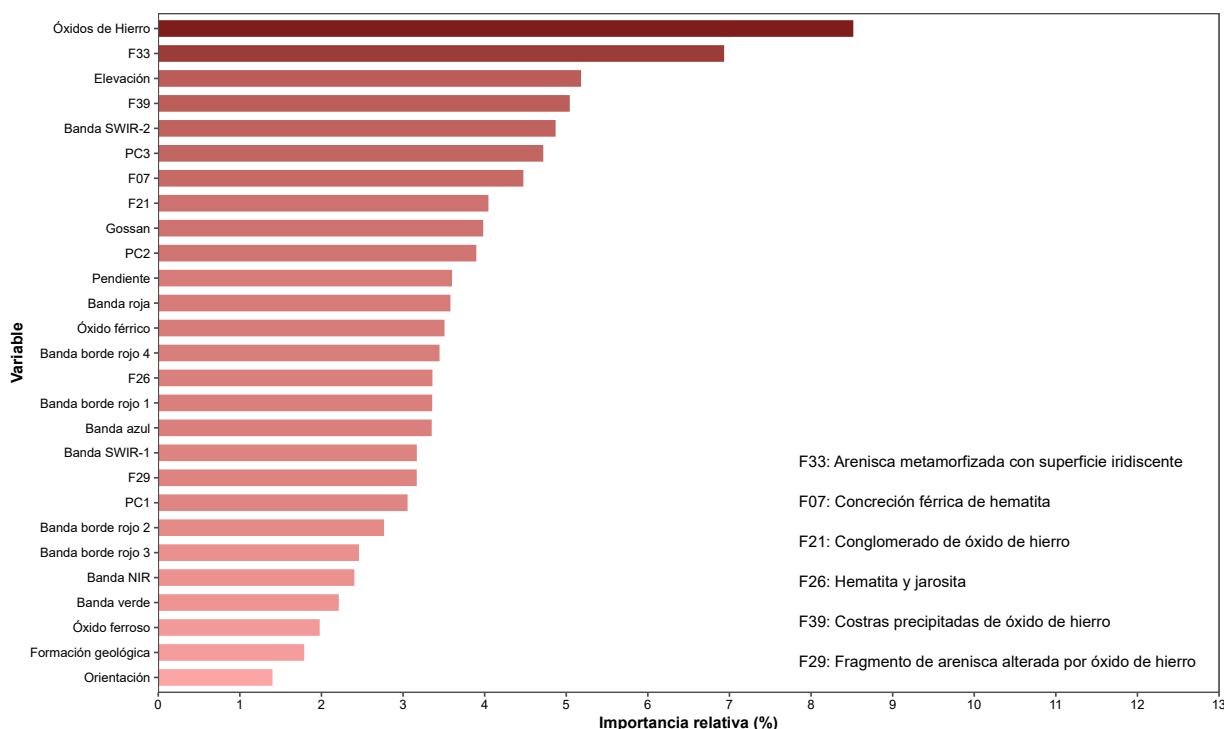
Figura 22. Correlación cruzada (coeficiente de Pearson) entre 27 variables predictoras de entrada al modelo.



Las variables con iniciales F, corresponden a los SAM de las firmas espectrales.

c. Importancia de las variables

La evaluación de importancia relativa, permitió identificar los predictores más influyentes para la clasificación de zonas con DAR (figura 23). La variable asociada a los óxidos de hierro mostró la mayor relevancia, lo cual resulta coherente con el comportamiento geoquímico característico de áreas sometidas a procesos de oxidación de sulfuros metálicos. Destaca asimismo la variable F33 (arenisca metamorfozada con superficie iridiscente), lo que sugiere que la presencia de esta litología alterada constituye un indicador clave para la identificación del DAR. La variable elevación también ocupa una posición destacada, lo que evidencia que la altitud incide en la distribución espacial del DAR, posiblemente debido a su influencia sobre el drenaje natural, la exposición de unidades litológicas y los procesos erosivos. Por su parte, la variable F39 (costras precipitadas de óxido de hierro) representa productos típicos de la oxidación y lixiviación de metales, procesos comúnmente observados en áreas afectadas por DAR; refuerza la capacidad del modelo para detectar zonas con impacto geoquímico.

Figura 23. Importancia relativa de las variables predictoras del modelo.

Entre otros predictores relevantes se encuentran SWIR2, fundamental para la identificación de características superficiales y niveles de humedad; gossan, reconocido como un indicador clásico de procesos de oxidación mineral; y la pendiente, que valida la relación entre la exposición rocosa y los procesos de alteración. Asimismo, el modelo incorpora variables litológicas específicas como F23 (arenisca metamorfizada con superficie iridiscente), F07 (concreción férrica de hematita), F21 (conglomerado de óxido de hierro), F26 (hematita y jarosita) y F29 (fragmento de arenisca alterada por óxido de hierro), todas ellas representativas de ambientes con alteración mineralógica compatible con condiciones ácidas.

d. Clasificación

La delimitación de sitios potenciales e impactados por el DAR se realizó mediante la implementación del algoritmo *random forest*, seleccionado por su comprobada eficacia en aplicaciones geológicas y su capacidad superior para el procesamiento de datos espaciales complejos.

Variables predictoras: el modelo integró múltiples capas de información geoespacial como variables predictoras:

- Datos multispectrales derivados de imágenes Sentinel 2 y sus productos derivados.
- Parámetros topográficos (altitud, pendiente y orientación) extraídos del Modelo Digital de Elevación.
- Información geológica rasterizada.
- Productos espectrales obtenidos a partir de mediciones espectrorradiométricas de campo.

La incorporación de este conjunto diverso de variables predictoras optimizó la capacidad del modelo para caracterizar la variabilidad espacial del terreno y redujo significativamente los errores de sobreestimación en la clasificación.

Optimización de parámetros: Se estableció una configuración inicial de 300 árboles de decisión, determinada mediante un análisis de la disponibilidad de datos de entrenamiento y validación, lo que permitió generar como producto final un mapa de probabilidades de ocurrencia con resolución a nivel de píxel.

Implementación computacional: La metodología se implementó en la plataforma GEE, aprovechando sus capacidades de procesamiento en la nube y su extensa biblioteca de datos geoespaciales. La arquitectura se estructuró mediante un sistema modular de scripts, privilegiando la claridad, mantenibilidad y reusabilidad del código, lo que facilitará la actualización y optimización continua de los procesos, permitiendo además su adaptación a diferentes contextos de análisis geoespacial.

7.3.4. Etapa 4: Validación

La evaluación del rendimiento del modelo se fundamentó en el análisis de múltiples métricas estadísticas que permitieron cuantificar la precisión y capacidad de clasificación. Los resultados obtenidos demostraron un buen nivel de confiabilidad en la delimitación de sitios potenciales e impactados con el DAR.

a. Matriz de confusión.

El análisis de esta matriz revela un desempeño notable en la clasificación de sitios impactados con el DAR. De los 12 puntos de validación correspondientes a sitios con el DAR, el modelo clasificó correctamente 10 puntos, presentando solo una confusión con la clase no DAR. En el caso de los sitios sin evidencia del DAR, de los 25 puntos evaluados, 24 fueron clasificados correctamente, mientras que 4 presentaron confusión con la categoría DAR.

Tabla 5. Matriz de confusión de la clasificación.

		Predicción	
		No DAR	DAR
Actual	No DAR	24	1
	DAR	2	10

b. Métricas de desempeño

El desempeño del algoritmo Random Forest fue evaluado mediante un proceso de validación cruzada utilizando cinco particiones (k -folds = 5), utilizando como métricas de desempeño la exactitud (accuracy), precisión (precision), sensibilidad (Recall) y puntaje F1 (F1-score).

Los resultados obtenidos reflejan un rendimiento sólido y consistente del modelo, con un valor de exactitud del 87.2% (\pm 6.8%), lo que indica una alta proporción de clasificaciones correctas en el conjunto de validación. La precisión alcanzó un 88.3% (\pm 11.9%), lo que refleja una alta capacidad del modelo para identificar correctamente los sitios clasificados como DAR, minimizando los falsos positivos. Por su parte, la sensibilidad se situó en 78.6% (\pm 12.9%), lo que significa que el modelo es capaz de identificar correctamente la mayoría de los casos positivos reales, aunque con una mayor variabilidad entre las particiones. Finalmente, el puntaje F1, que combina precisión y sensibilidad en una métrica balanceada, fue de 82.4% (\pm 9.1%), confirmando un equilibrio adecuado entre la capacidad de detección y la confiabilidad de las predicciones positivas.

En definitiva, los estadísticos de desempeño obtenidos confirman que el modelo basado en *random forest* demuestra una alta eficacia en la identificación de sitios potenciales e impactados con el DAR.

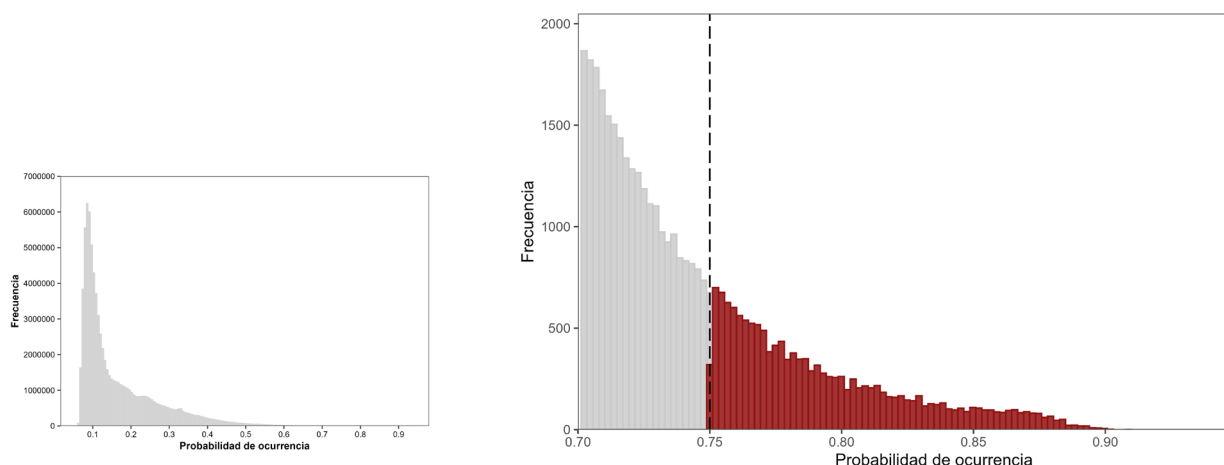
7.3.5. Etapa 5: Postprocesamiento

La optimización de los resultados generados por el modelo de clasificación requirió un proceso sistemático de posprocesamiento, ejecutado en el entorno de Python, que comprende dos fases fundamentales:

a. Vectorización de resultados

La primera fase consistió en la transformación del mapa de probabilidades de ocurrencia del DAR del formato ráster original a formato vectorial. El análisis del histograma de distribución de probabilidades (**figura 24**) reveló una distribución gaussiana con un máximo de frecuencia aproximado en 0,1. La validación mediante análisis visual con imágenes satelitales de alta resolución y datos de campo permitió establecer un umbral de probabilidad de 0,75 para la identificación efectiva de áreas impactadas por el DAR. La aplicación de este umbral, seguida de la conversión a formato vectorial tipo punto (.shp), optimizó la representación espacial y facilitó el análisis posterior de los resultados.

Figura 24. Histograma de probabilidad de ocurrencia del DAR.



b. Análisis de agrupamiento DBSCAN

La segunda fase implementó el algoritmo DBSCAN (*density-based spatial clustering of applications with noise*) para el análisis de agrupamiento espacial. Este método, fundamentado en el análisis de densidad, permite la identificación de clústeres de forma arbitraria y el tratamiento eficiente de datos atípicos. Su principal ventaja radica en la capacidad de identificar agrupamientos sin requerir la especificación previa del número de clústeres, adaptándose a la distribución natural de los datos.

La implementación culminó con el cálculo de centroides para cada clúster identificado, generando una representación simplificada, pero representativa de la distribución espacial de las áreas impactadas por el DAR.

8. RESULTADOS

La implementación del modelo de clasificación basado en random forest y su posterior procesamiento han generado una caracterización espacial de los sitios potenciales e impactados por el DAR.

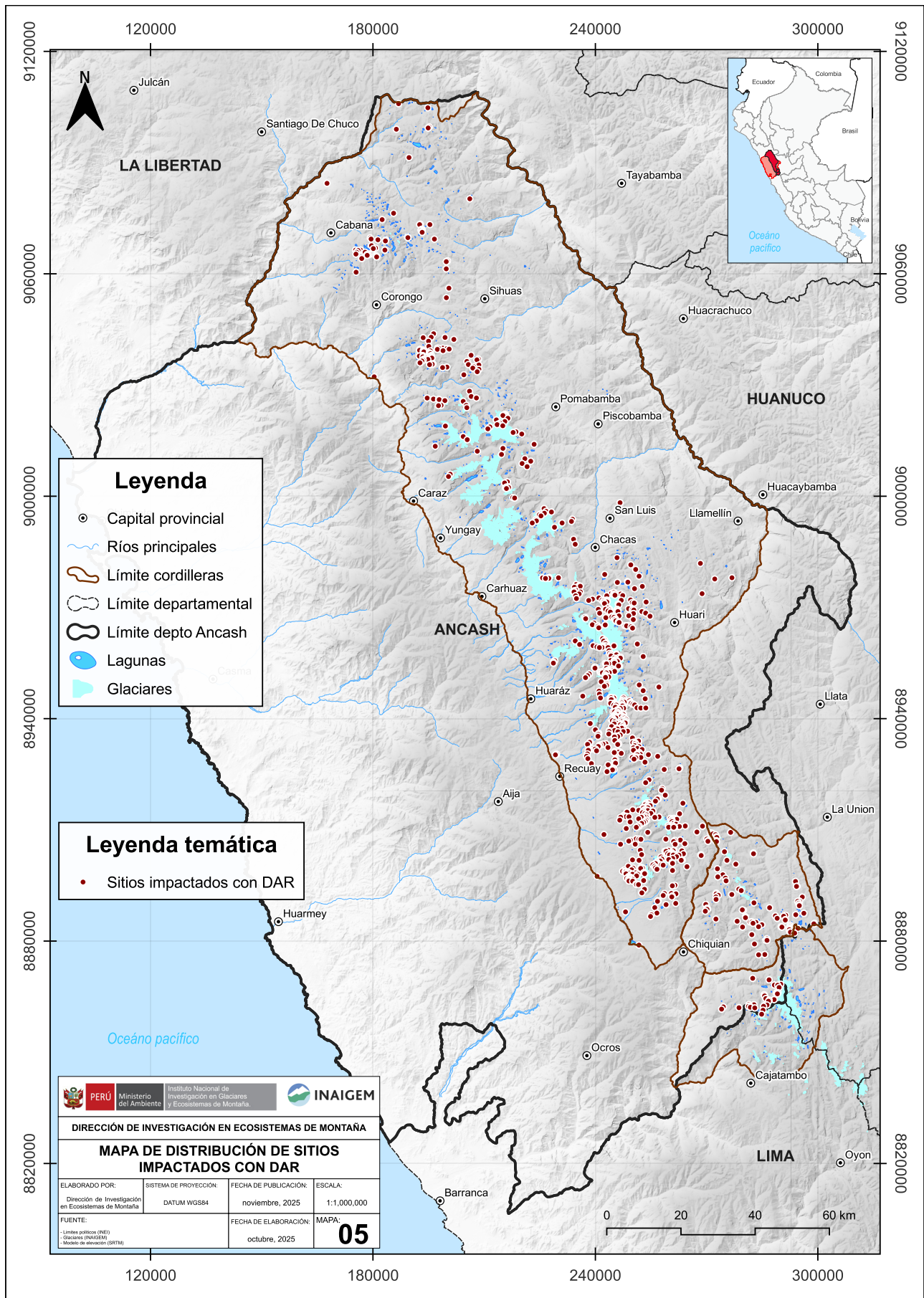
8.1. Distribución espacial de sitios potenciales e impactados con el drenaje ácido de roca

La distribución espacial de sitios impactados con el DAR en las cordilleras Blanca, Huallanca y Huayhuash, localizadas en el departamento de Áncash, se muestra en la figura 25. Los puntos representados corresponden a ubicaciones cuya probabilidad de ocurrencia iguala o supera el umbral de 0,75 establecido durante la fase de validación en campo del modelo de predicción.

En la cordillera Blanca, se identifica una distribución heterogénea de los sitios con DAR, observándose una mayor concentración en el sur, en contraste con una densidad notablemente inferior en el norte y centro. Esta variabilidad espacial sugiere una relación con la heterogeneidad litológica y estructural de la cordillera y podría reflejar procesos diferenciados de exposición rocosa asociados a la pérdida de masa glaciar.

Por su parte, en las cordilleras Huallanca y Huayhuash, el patrón de distribución muestra una marcada concentración de sitios en zonas periglaciares. Esta distribución refuerza la hipótesis de que la deglaciación y la consecuente exposición del sustrato rocoso constituyen factores determinantes en la generación del DAR en estos ambientes de montaña..

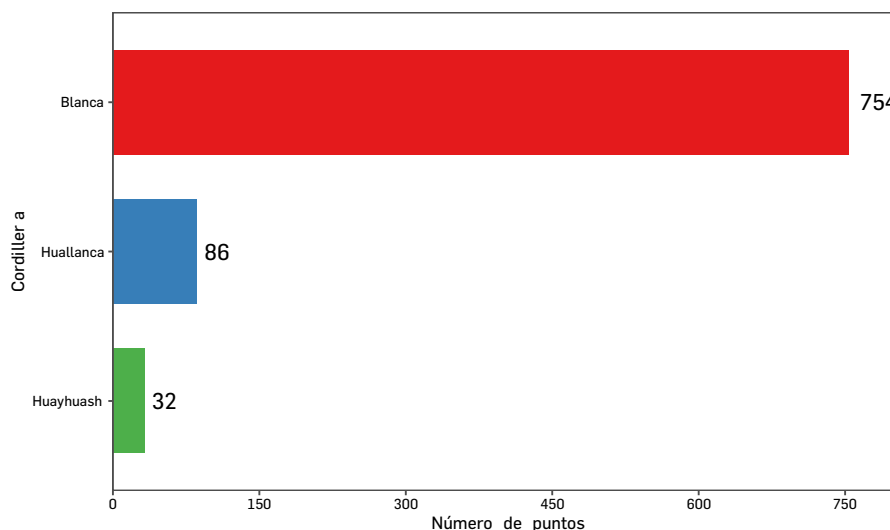
Figura 25. Mapa de distribución de sitios potenciales e impactados con el DAR.



8.1.1. Sitios potenciales e impactados por el drenaje ácido de roca por cordilleras

El análisis cuantitativo de la distribución espacial de sitios potenciales e impactados por el DAR revela patrones diferenciados entre las tres cordilleras estudiadas, permitiendo identificar áreas prioritarias para la gestión ambiental.

Figura 26. Número de sitios impactados con el DAR por cordillera.



Cordillera Blanca: emerge como el área más significativamente afectada, con 754 sitios identificados que representan aproximadamente el 86% del total de sitios detectados. Esta prevalencia se atribuye a su composición geológica caracterizada por formaciones andesíticas y graníticas, en combinación con la presencia de glaciares en retroceso. La interacción entre estos factores genera condiciones óptimas para la oxidación de minerales sulfurados, proceso que se intensifica por el aporte hídrico proveniente del deshielo glaciar.

Cordillera Huallanca: se identificaron 86 sitios, representando el 10% del total. Si bien la magnitud es considerablemente menor en comparación con la cordillera Blanca, la presencia de formaciones geológicas susceptibles sugiere un potencial significativo para la generación del DAR que requiere atención específica.

Cordillera Huayhuash: registra la menor incidencia de sitios con DAR, con 32 puntos identificados que representan el 4% del total. Pese a su baja frecuencia relativa, su relevancia es significativa considerando la alta sensibilidad ambiental de sus ecosistemas y su importante biodiversidad. Cabe precisar que el ámbito de análisis de esta cordillera se restringe al sector correspondiente al departamento de Áncash, por lo que la caracterización aquí presentada no necesariamente refleja la condición completa de este sistema montañoso a escala regional.

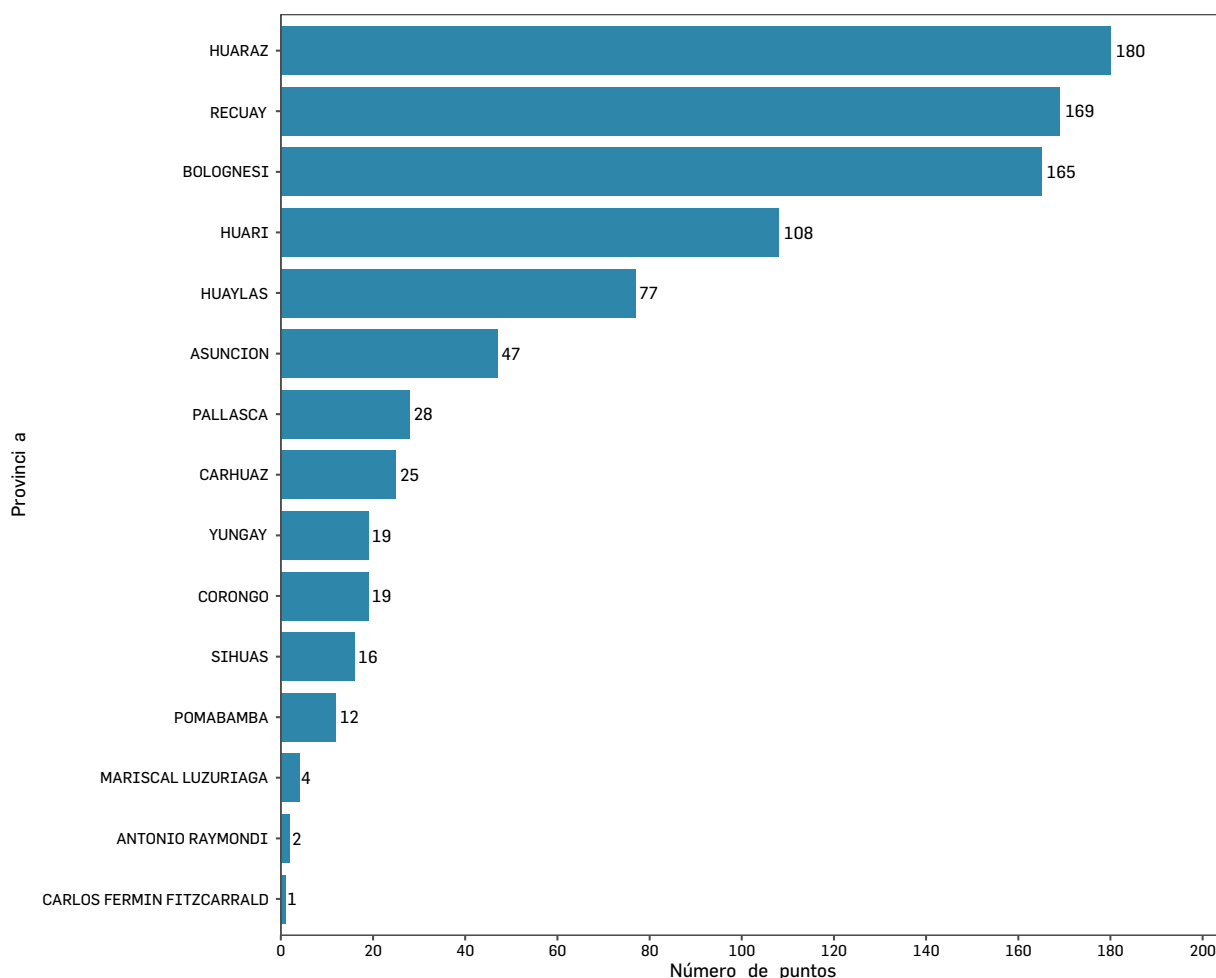
La distribución diferencial de sitios potenciales e impactados con el DAR entre las tres cordilleras tiene importantes implicaciones ambientales a nivel regional. Considerando que estos sistemas montañosos son componentes cruciales de las redes hidrográficas, los impactos del DAR trascienden las localidades inmediatas, afectando potencialmente la calidad y disponibilidad del recurso hídrico para comunidades y actividades económicas en las zonas bajas.

8.1.2. Sitios potenciales e impactados por el DAR por límites políticos

La distribución de puntos por provincia en el departamento de Áncash (figura 27) evidencia una concentración notable en cierto número de jurisdicciones, lo que revela tanto patrones espaciales de ocurrencia del DAR como prioridades para la gestión y monitoreo. Las provincias de Huaraz (180), Recuay (169) y Bolognesi (165) acumulan la mayor parte de los registros, indicando que estas áreas concentran las condiciones geológicas, geomorfológicas y glaciológicas más favorables para la generación del DAR. La elevada representación de estas provincias sugiere que en ellas conviven factores como mayor exposición de rocas mineralizadas y dinámica glaciaria activa.

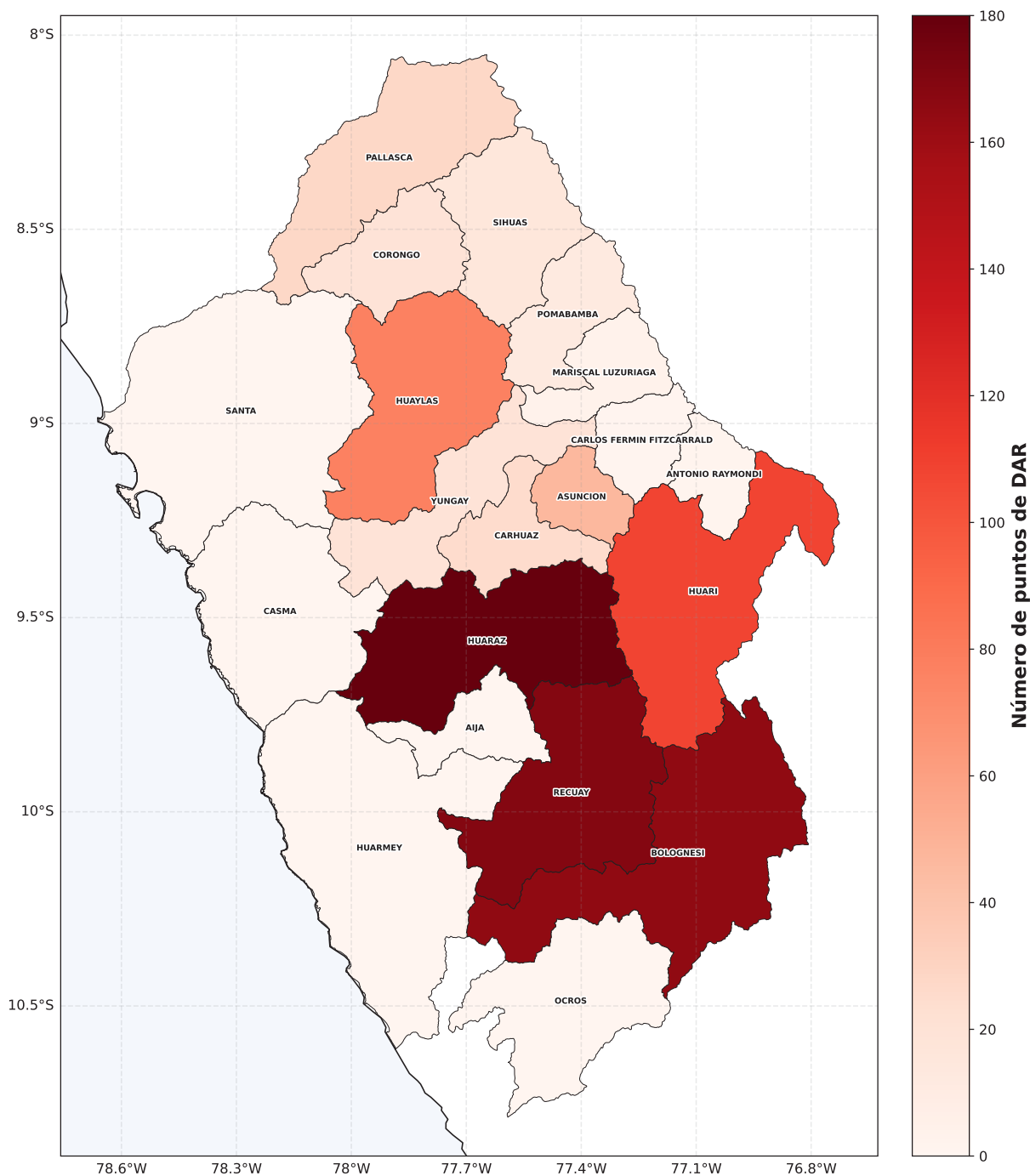
En un segundo estrato se ubican Huari (108), Huaylas (77) y Asunción (47), donde la presencia de puntos es importante, aunque claramente inferior a las tres antes descritas. Estas provincias posiblemente albergan sectores con unidades litológicas susceptibles y condiciones locales que promueven la oxidación y movilización de sulfuros, por lo que requieren un seguimiento específico y muestreos complementarios para caracterizar la extensión y severidad del DAR en ámbitos concretos.

Figura 27. Distribución de puntos por provincias en Ancash



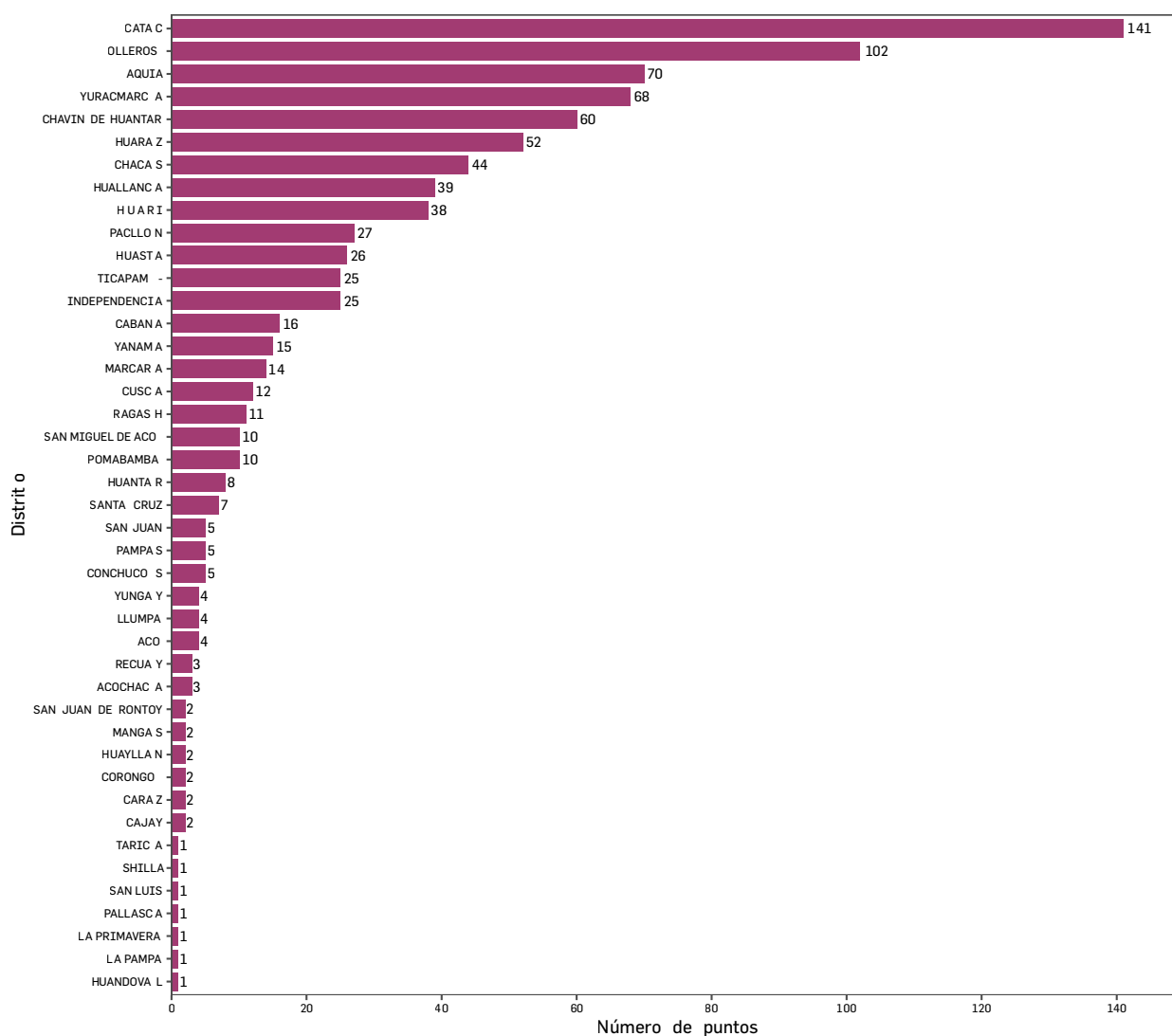
El extremo inferior de la distribución incluye provincias con baja representación —Sihuas (16), Pomabamba (12) y las de menor registro: Mariscal Luzuriaga (4), Antonio Raymondi (2) y Carlos Fermín Fitzcarrald (1)—. La baja frecuencia en estas provincias no excluye la presencia de DAR, pero sugiere una menor extensión superficial detectable con las variables empleadas o limitaciones en el muestreo y la accesibilidad. En estos casos conviene evaluar si la escasez de puntos obedece a una real baja incidencia, a coberturas superficiales que enmascaran indicadores, o a brechas en el levantamiento de campo y la interpretación remota.

Figura 28. Mapa de Impacto de DAR por provincia.



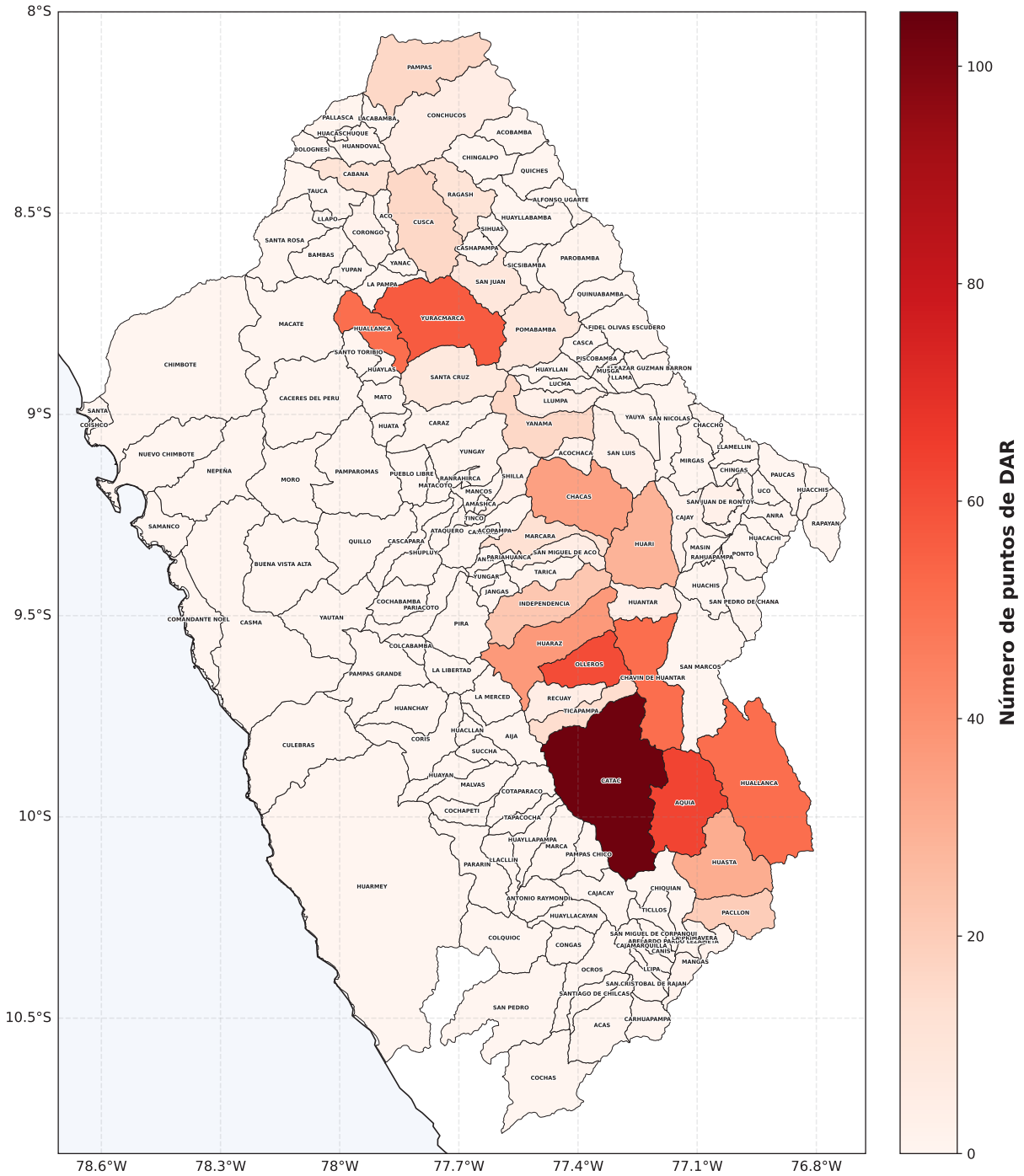
La distribución distrital pone de manifiesto una marcada concentración de sitios impactados por el DAR en un reducido número de distritos del departamento de Áncash (figura 29). El distrito de Catac presenta la mayor densidad con 141 puntos, seguido por Olleros con 102 y Aco con 70, cifras que representan una proporción significativa del total de registros. Esta agregación espacial sugiere que dichos distritos agrupan condiciones geológicas y topográficas favorables a la manifestación del DAR, tales como la exposición de unidades mineralizadas, actividad glaciaria o procesos de meteorización intensos.

Figura 29. Distribución de puntos por distrito en Áncash



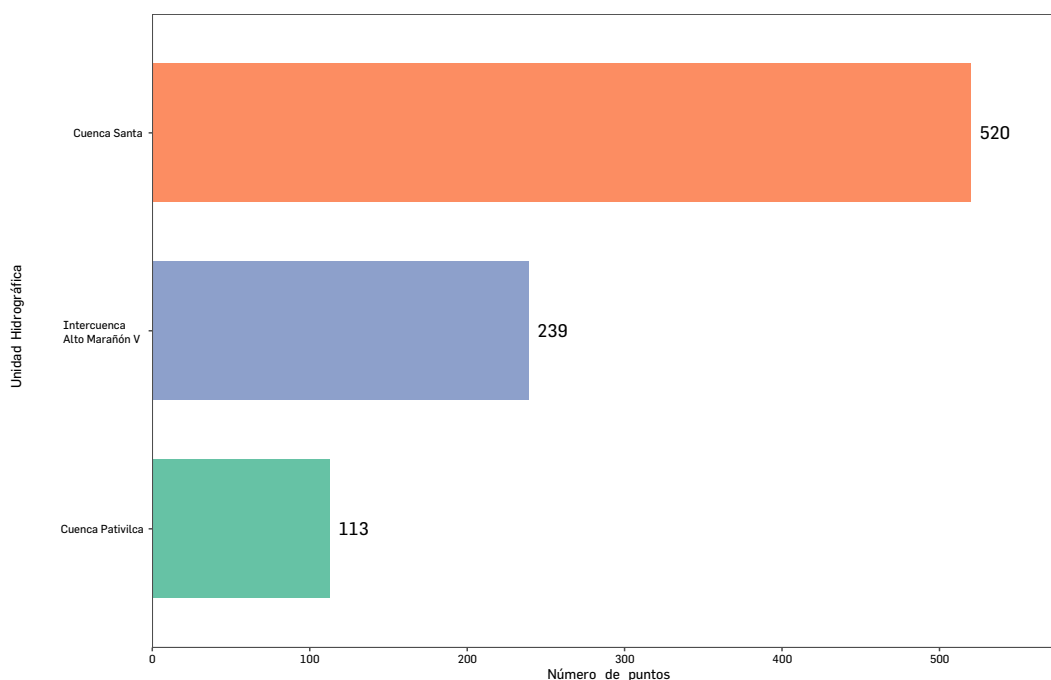
En contraste, la mayoría de distritos registran un número reducido de puntos, muchos con menos de diez, lo que evidencia una distribución asimétrica y puntual de los impactos detectados. Esta heterogeneidad implica que las acciones de monitoreo, muestreo y gestión ambiental deben priorizarse en los distritos con mayor concentración de sitios, sin desestimar la posibilidad de subregistro en áreas con baja representación.

Figura 30. Mapa de impacto de DAR por distrito.



8.1.3. Sitios potenciales e impactados por el drenaje ácido de roca por UH

La distribución de los sitios potenciales o impactados por el DAR según las unidades hidrográficas (UH) analizadas ofrece información valiosa para identificar las áreas más afectadas y priorizar acciones de mitigación.

Figura 31. Número de sitios impactados con el DAR por cuencas.

Cuenca Santa: con 520 sitios identificados, esta unidad hidrográfica concentra el mayor número de sitios potenciales o impactados (aproximadamente el 60% del total). Esto resalta la importancia de esta cuenca como un área crítica en términos de problemas asociados al DAR. La cuenca Santa, además de su importancia ambiental, tiene un uso intensivo para actividades económicas como agricultura y generación hidroeléctrica, lo que la hace especialmente vulnerable.

Intercuenca Alto Marañón: es la segunda área más afectada, con 239 sitios (alrededor del 27% del total). Esta región alberga importantes fuentes de agua que fluyen hacia el río Marañón, un componente clave del sistema hidrográfico amazónico. El impacto del DAR aquí podría tener consecuencias aguas abajo, afectando comunidades, biodiversidad y ecosistemas más amplios.

Cuenca Pativilca: aunque tiene menos sitios identificados (113, equivalente al 13% del total), su proximidad a áreas mineras y su extensión relativamente menor podrían explicar esta cifra. A pesar de su menor representación, los impactos del DAR en esta cuenca pueden ser significativos debido a su influencia en los recursos hídricos utilizados por las poblaciones locales.

Los impactos acumulativos del DAR en las tres unidades hidrográficas pueden afectar tanto la calidad como la cantidad de los recursos hídricos, con repercusiones potenciales en la salud humana, la biodiversidad y las actividades económicas locales.

8.2. Mapa de probabilidad de ocurrencia del drenaje ácido de roca

La validación visual del mapa de probabilidad de ocurrencia, mediante su contraste con imágenes satelitales de alta resolución, ha permitido corroborar la efectividad del modelo en la delimitación de áreas de interés. Dada la escala reducida de las zonas identificadas, se han elaborado tres productos cartográficos que facilitan una visualización integral de los resultados obtenidos.

Los mapas de probabilidad generados mediante GEE presentan un rango de valores continuos (de 0 a 1) por píxel, donde 0 indica probabilidad nula y 1 señala una alta probabilidad de ocurrencia del DAR. La **figura 32** ilustra el mapa correspondiente a la cordillera Blanca. Considerando que las áreas delimitadas pueden resultar poco perceptibles a escala general, se han incorporado las siguientes vistas detalladas:

Figura 32-A (glaciar Champará): se evidencia una alta probabilidad del DAR en la zona periglacial del glaciar localizado en el sector norte de la cordillera.

Figura 32-B (parte alta de la UH Quillcay): se constata la efectiva delimitación de las zonas impactadas en la quebrada Cayesh y el sector superior de la laguna Shallap.

Figura 32-C (parte alta de la UH Pachacoto): se verifica la precisa delimitación tanto de las áreas impactadas como de los afloramientos rocosos potencialmente generadores del DAR.

Figura 32. Mapa de probabilidad de ocurrencia del DAR en la cordillera Blanca.

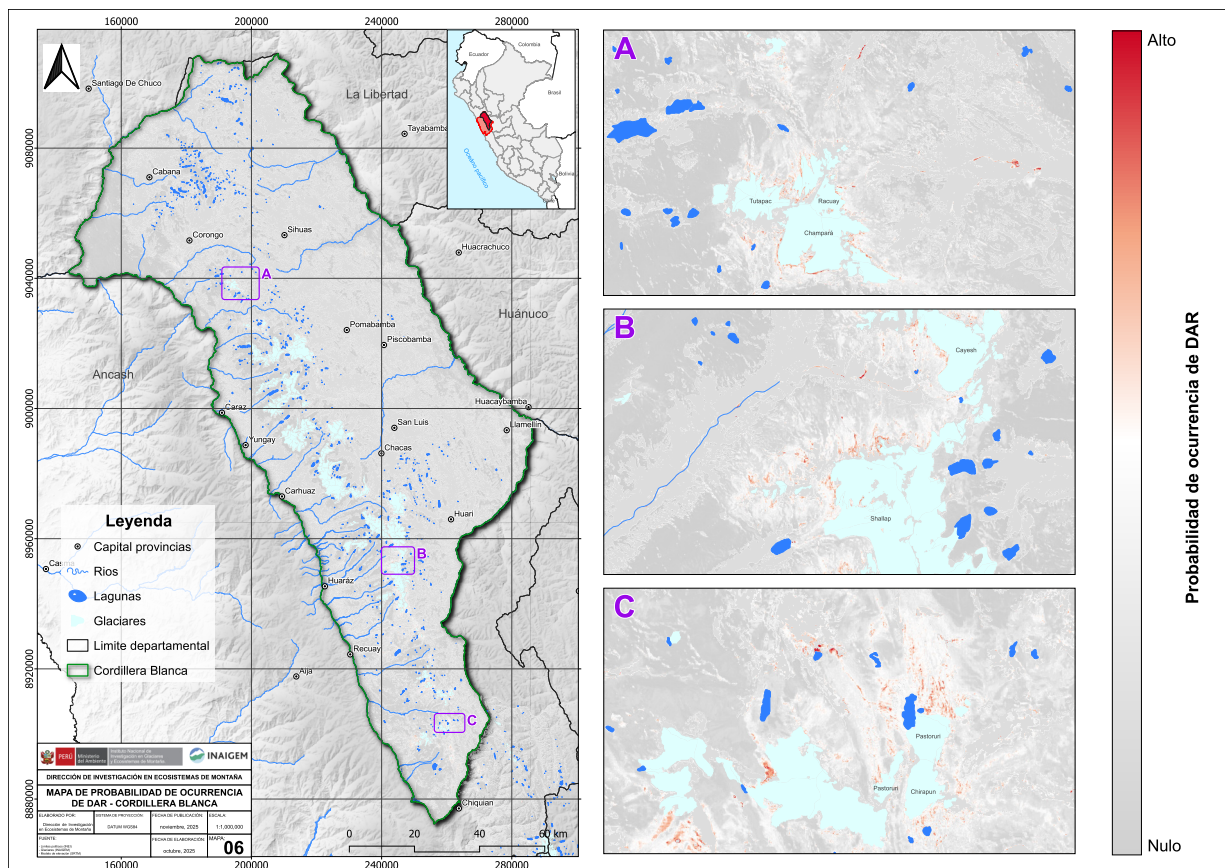
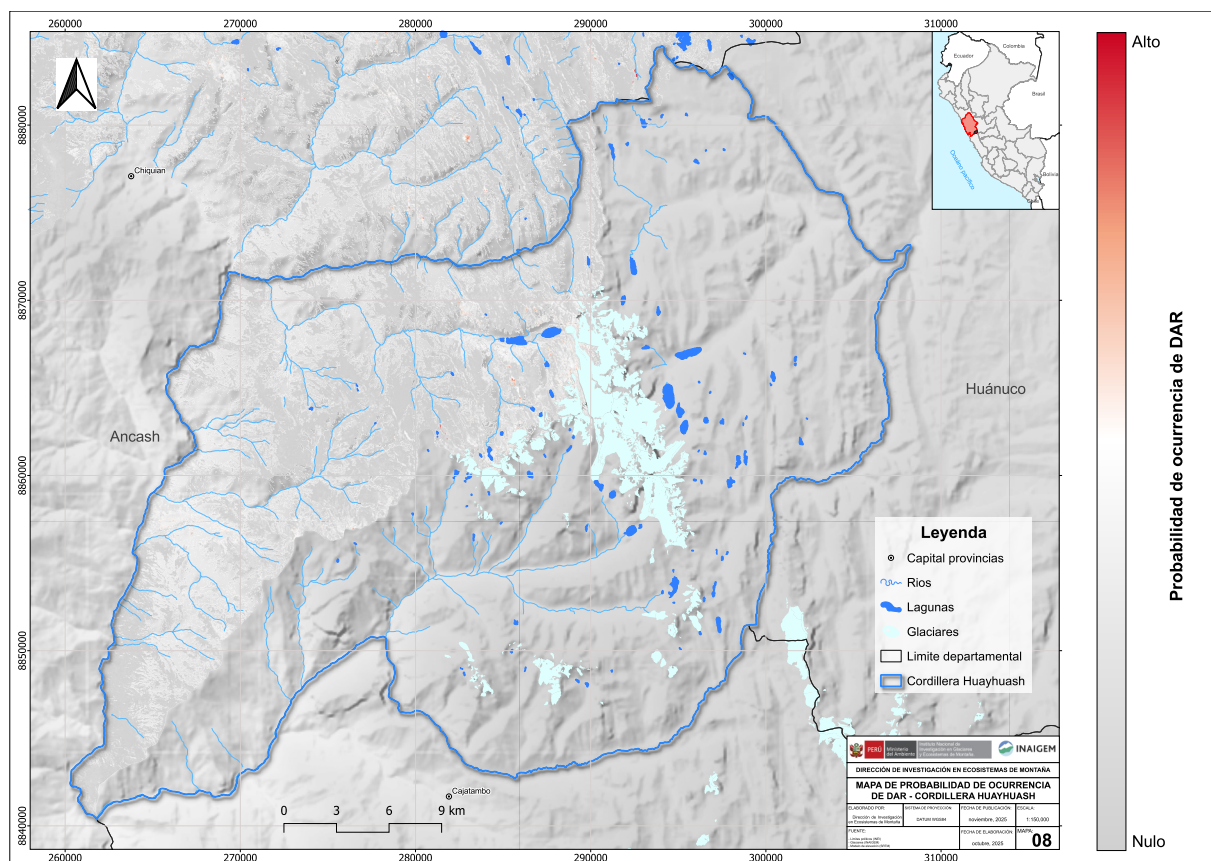


Figura 34. Mapa de probabilidad de ocurrencia del DAR en la cordillera Huayhuash.



La validación del análisis visual, extendida a otras áreas reconocidas, confirma que la metodología implementada en el presente estudio proporciona una caracterización confiable de los sitios potenciales e impactados por el DAR. La optimización de los resultados se atribuye a la incorporación de un conjunto más robusto de variables predictoras, lo cual incrementa la validez y precisión del modelo.

Estos hallazgos respaldan la pertinencia del enfoque metodológico aplicado para la planificación y gestión ambiental en ecosistemas de alta montaña, facilitando la identificación y monitoreo sistemático de áreas vulnerables al impacto de la desglaciación y sus consecuencias ambientales asociadas.

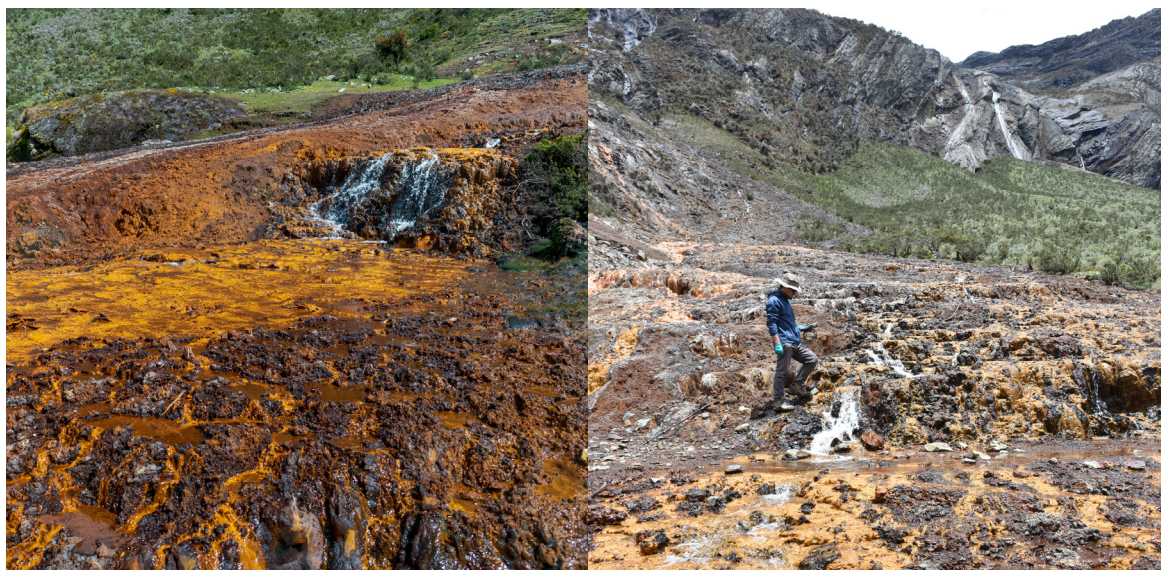
8.3. Verificación en campo

A continuación, se exponen imágenes obtenidas durante las campañas de verificación *in situ* de los sitios previamente identificados como potencialmente impactados por el DAR. Las actividades de campo comprendieron la inspección visual de las condiciones ambientales, el registro fotográfico sistemático de las áreas afectadas y la medición de parámetros fisicoquímicos del agua. La evaluación permitió constatar la presencia de impactos asociados al DAR en diversos puntos, caracterizados por alteraciones significativas en la calidad del agua, modificaciones en la coloración del sustrato y del lecho fluvial, así como la ausencia de desarrollo de ecosistemas acuáticos funcionales.

8.3.1. Quebrada Cayesh-UH Quillcay

El área visitada en el sector Quillcayhuanca, provincia de Huaraz, exhibe un impacto severo por el DAR. El paisaje se caracteriza por la presencia de suelos expuestos y un curso de agua superficial que discurre sobre una pendiente moderada. Las prominentes coloraciones rojizas y anaranjadas que predominan en el sustrato son consecuencia de la precipitación de óxidos de hierro, evidenciando la interacción entre minerales sulfurados, agua y oxígeno atmosférico. La ausencia de cobertura vegetal en las zonas más afectadas corrobora la magnitud del impacto sobre este ecosistema.

Figura 35. Impacto del DAR en la quebrada Cayesh.



Esta manifestación es característica de los ambientes de alta montaña en la cordillera Blanca, donde el retroceso glaciar y la consecuente exposición de materiales geológicos con alto contenido de sulfuros intensifican los procesos del DAR. El registro fotográfico documenta la alteración de las condiciones naturales del paisaje, con implicaciones directas sobre la calidad del recurso hídrico y la integridad ecológica del área. Los valores de pH registrados, que oscilan entre 3 y 4 unidades, confirman las condiciones de acidez extrema.

8.3.2. Laguna Shallap-UH Quillcay

La laguna Shallap, localizada en el distrito de Independencia, provincia de Huaraz, presenta un cuerpo de agua caracterizado por una coloración verde intensa, atribuible a la presencia de minerales en suspensión o en estado disuelto. Los márgenes de los tributarios que confluyen en la laguna evidencian coloraciones rojizas en el sustrato rocoso y edáfico, características de los procesos de precipitación de óxidos de hierro asociados al DAR.

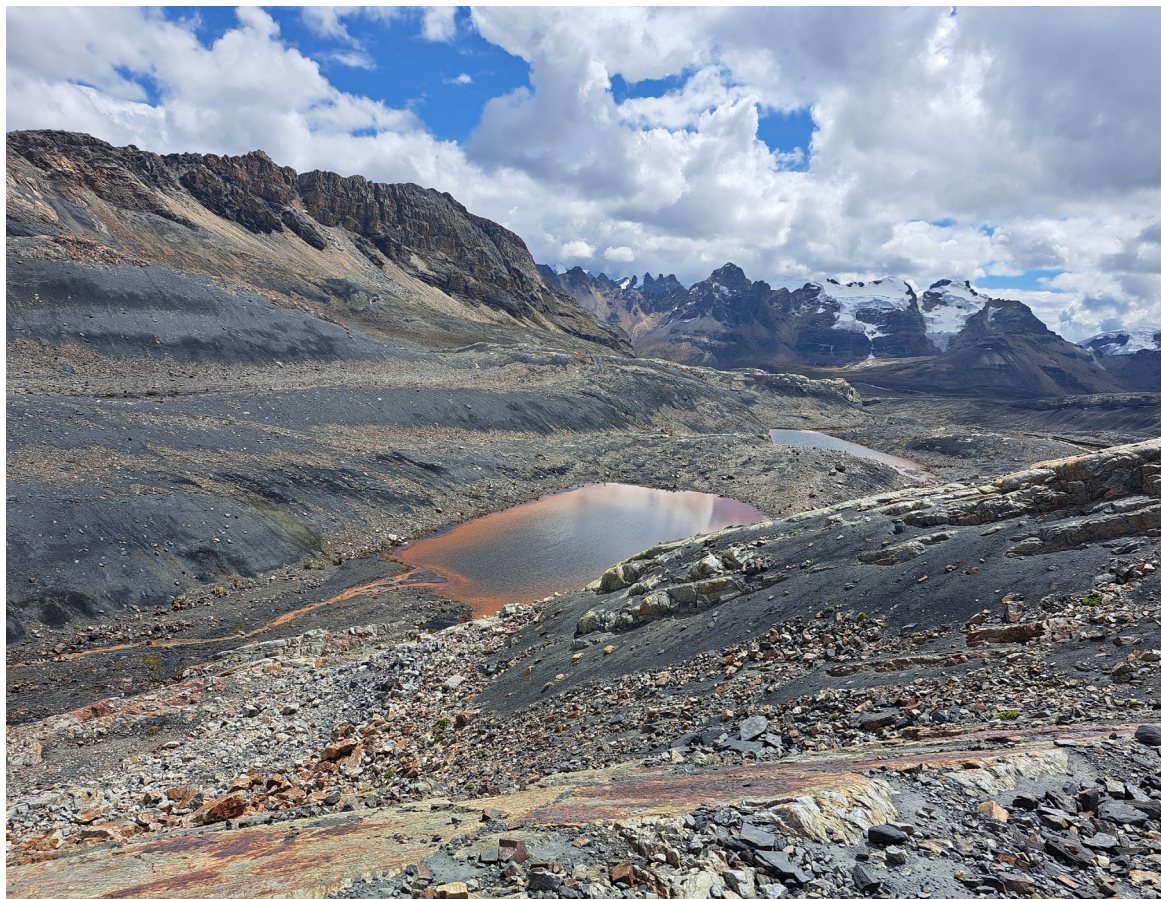
Figura 36. Impacto del DAR en la laguna Shallap.

El análisis *in situ* del agua reveló un pH de 3,5 unidades, valor que corrobora las condiciones de acidez extrema y sugiere una significativa interacción entre el recurso hídrico y los materiales sulfurados presentes en la cuenca. Estas condiciones físico-químicas alteran sustancialmente la calidad del agua e impactan negativamente en la estructura y función de los ecosistemas acuáticos y terrestres asociados. Las características observadas evidencian la vulnerabilidad de los sistemas lacustres altoandinos frente a los procesos del DAR

8.3.3. Cuerpo de agua-UH Pachacoto

El cuerpo lacustre visitado en la UH Pachacoto, provincia de Recuay, muestra un severo impacto por el DAR. La laguna presenta una distintiva coloración rojiza, producto de la precipitación de óxidos de hierro y minerales asociados al DAR, fenómeno derivado de la interacción entre el recurso hídrico y los materiales geológicos sulfurados expuestos por el retroceso glaciar. Las mediciones de pH, con valores cercanos a 3 unidades, confirman un ambiente de acidez extrema incompatible con el desarrollo de la mayoría de organismos acuáticos.

El entorno circundante se caracteriza por la presencia de suelos desnudos con tonalidades oscuras y ausencia de cobertura vegetal, condiciones que reflejan el impacto de los procesos del DAR. Se observan, además, pequeños cursos de agua que facilitan el transporte y dispersión de contaminantes hacia el cuerpo lacustre, intensificando su deterioro.

Figura 37. Impacto del DAR en un cuerpo de agua cercano al glaciar Pastoruri.

8.3.4. El río Pucavado-UH Pucavado

El tramo fluvial evaluado en la UH Pucavado, provincia de Huari, presenta evidencias significativas de impacto por el DAR, manifestadas en la coloración rojiza característica del lecho fluvial y en las condiciones de acidez del agua, con valores de pH aproximados a 4. Estos niveles de acidez constituyen un indicador inequívoco de los procesos de oxidación de minerales sulfurados, que generan la liberación de iones metálicos y sulfatos al sistema hídrico, alterando sus propiedades físico-químicas y comprometiendo la integridad de las comunidades acuáticas.

El registro fotográfico evidencia las actividades de monitoreo realizadas por profesionales de la DIEM para la determinación de parámetros físico-químicos in situ, lo cual resalta la importancia del seguimiento sistemático de estas alteraciones ambientales. Es destacable que, ante el evidente impacto sobre el sistema fluvial, el entorno inmediato mantiene cobertura vegetal, evidenciando la coexistencia de áreas impactadas con zonas que conservan cierta integridad ecológica.

Figura 38. Impacto del DAR en el río Pucavado.



9. DESAFÍOS

La identificación y el análisis de sitios potenciales e impactados por el DAR en las cordilleras de Áncash presentan diversos desafíos que requieren atención prioritaria. Estos se pueden agrupar en tres ámbitos principales:

En el ámbito de la gestión territorial, se evidencia la necesidad de implementar estrategias diferenciadas según las características específicas de cada cordillera. La cordillera Blanca demanda el desarrollo prioritario de planes integrales de monitoreo y remediación, con especial énfasis en la identificación y tratamiento de fuentes puntuales del DAR. Por su parte, las cordilleras Huallanca y Huayhuash requieren estudios detallados para verificar posibles subestimaciones del modelo y evaluar la dinámica de propagación del DAR en sus sistemas hídricos locales.

En el ámbito técnico-metodológico, se identifican tres aspectos fundamentales para el fortalecimiento del algoritmo. Primero, la optimización del algoritmo implementado en GEE para mejorar los tiempos de cálculo y la eficiencia del procesamiento, especialmente considerando el incremento en el volumen de datos a analizar. Segundo, la ampliación de la base de datos mediante la recopilación de información en campo, incluidas la caracterización detallada de firmas espectrales con datos sobre minerales, rocas, unidades geológicas y tipos de sedimentos. Tercero, la validación continua del modelo mediante datos empíricos adicionales para garantizar su precisión y fiabilidad en la identificación de áreas de interés.

En el ámbito de la gestión interinstitucional, resulta fundamental promover la cooperación entre diferentes niveles de gobierno y sectores, particularmente en cuencas estratégicas como las del río Santa y Alto Marañón, donde los impactos del DAR pueden afectar extensas áreas y poblaciones significativas. Esta colaboración debe orientarse al desarrollo de estrategias preventivas y de mitigación que consideren la vulnerabilidad de los ecosistemas altoandinos frente al cambio climático y la exposición de materiales potencialmente acidificantes, para proteger la integridad de los sistemas hidrográficos y los servicios ecosistémicos que estos proporcionan a las poblaciones locales.

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ANA	Autoridad Nacional del Agua
BOA	Bottom of Atmosphere (corrección bajo de la atmósfera)
DAR	Drenaje ácido de roca
DEM	Digital Elevation Model (modelo digital de elevación)
DIEM	Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña
ESA	European Space Agency (Agencia Europea Espacial)
GEE	Google Earth Engine
Inaigem	Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña
Ingemmet	Ingemmet: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico
MDS	Model Digital Surface (modelo digital de superficie)
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index (índice modificado de diferencia normalizada de agua)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (índice de diferencia normalizada de vegetación)
PCA	Principal Component Analysis (análisis de componentes principales)
PC	Principal Component (componente principal)
PNH	Parque Nacional Huascarán
QGIS	Quantum GIS
RF	Random Forest (bosques aleatorios)
SAM	Spectral Angle Mapper (mapeo por ángulo espectral)
SFCB	Sistemas de fallas de la cordillera Blanca
SIG	Sistema de Información Geográfica
UH	Unidad hidrográfica

BIBLIOGRAFÍA

Cobbing, E. J., Sánchez, A., Martínez, W., & Zárate, H. (1996). Geología de los cuadrángulos de Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquián y Yanahuanca. Hojas: 20-h, 20-i, 20-j, 21-i, 21-j. In Serie A: Carta Geológica Nacional (Ingemmet, Vol. 76, p. 297).

Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction: A critical review. In *Journal of Geochemical Exploration* (Vol. 172, pp. 120-132). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.014>

Dold, B. (2017). Evolution of acid mine drainage formation in sulfidic mine tailings. *Minerals*, 7(12), 247. <https://doi.org/10.3390/min7120247>

Egiebor, N. O., & Oni, B. (2007). Acid rock drainage formation and treatment: a review. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2(1), 47-62. <https://doi.org/10.1002/apj.057>

Ge, W., Cheng, Q., Jing, L., Armenakis, C., & Ding, H. (2018). Lithological discrimination using ASTER and Sentinel 2A in the Shibanjing ophiolite complex of Beishan orogenic in Inner Mongolia, China. *Advances in Space Research*, 62(7), 1702-1716. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.06.036>

Ghrefat, H., Awawdeh, M., Howari, F., & Al-Rawabdeh, A. (2023). Mineral exploration using multispectral and hyperspectral remote sensing data. In *Geoinformatics for Geosciences: Advanced Geospatial Analysis using RS, GIS and Soft Computing* (pp. 197-222). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-98983-1.00013-2>

Gibert, O., de Pablo, J., Cortina, J. L., & Ayora, C. (2014). Treatment of acid mine drainage by a combined system of limestone and reactive organic materials: Field experiment. *Journal of Environmental Management*, 132, 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.10.021>

Jacobs, J. A., Lehr, J. H., & Testa, S. M. (2014). Acid mine drainage, rock drainage, and acid sulfate soils : causes, assessment, prediction, prevention, and remediation. John Wiley & Sons, Inc.

Jiang, Z., Huete, A. R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., & Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 101(3), 366-378. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.003>

Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., & Dietz, J. B. (1993). Expert system-based mineral mapping in northern death valley, California/Nevada, using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing of Environment*, 44(2-3), 309-336. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90024-R](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90024-R)

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

Napier, B. A., Brugger, C. R., & Dold, B. (2022). Natural acid rock drainage: A global perspective and emerging challenges under climate change. *Science of the Total Environment*, 828, 154443. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154443>

Nordstrom, D. K. (2009). Acid rock drainage and climate change. *Journal of Geochemical Exploration*, 100(2-3), 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.08.002>

Nordstrom, D. K. (2011). Mine waters: Acidic to circumneutral. *Elements*, 7(6), 393–398. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.6.393>

Van der Meer, F. D., van der Werff, H. M. A., & van Ruitenbeek, F. J. A. (2014). Potential of ESA's Sentinel 2 for geological applications. *Remote Sensing of Environment*, 148, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.022>

Villarreal, E., & Rodríguez, I. (2009). Informe geoeconómico de la región Áncash (Informe Técnico A-6477, Proyecto GE-13). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET.

Zarroca, M., Roqué, C., Linares, R., Salminci, J. G., & Gutiérrez, F. (2021). Natural acid rock drainage in alpine catchments: A side effect of climate warming. *Science of the Total Environment*, 778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146070>



INAIGEM

INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA