

QUELCCAYA

UN LABORATORIO NATURAL PARA LA CIENCIA Y LA HUMANIDAD



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA



**Universidad
Andina
del Cusco**

Sabiduría que vive en ti

QUELCCAYA

UN LABORATORIO NATURAL PARA LA CIENCIA Y LA HUMANIDAD



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

QUELCCAYA: LABORATORIO NATURAL PARA LA CIENCIA Y LA HUMANIDAD

Autores

Oscar Vilca Gómez
Renny Díaz Aguilar
Ricardo Vila Garrafa
Ángela Mendoza Ato
Wilfredo Chávez Huamán
Víctor Bustinza Urviola
Patricia Barros Pozo
César Portocarrero Rodríguez

Carlos Lazo Oscanoa
Aracely Machaca Condori
Gimi Cristian Mamani
Bruss Huachaca Avalos
Yaqueline Abrella Chise
Velnia Chacca Luna
Luis Quispe Borda
Miguel Luza Victorio.

Editorial

© 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

Editado por

Patricia Barros Pozo
Wilfredo Chávez Huamán

Fotografías

Renny Díaz Aguilar
Oscar Vilca Gómez
Ricardo Vila Garrafa
Ángela Mendoza Ato
Miguel Luza Victorio
Carlos Lazo Oscanoa
Gimi Cristian Mamani
Bruss Huachaca Avalos
Patricia Barros Pozo
Lonnie Thompson

Cuidado de la publicación

Victor Bustinza Urviola

Diseño y diagramación

Joan Ramírez Romero

Director de Biblioteca y Editorial Universitario

Dr. Carlos Máximo Tamayo Vargas

Cordinador Editorial Universitario

Mg. Mario Obando Cazorla

1ra edición
OCTUBRE 2025

Depósito legal del libro **N° 2025-14986**

Impreso por: Corporacion Grafica Colorgraf Sociedad Comercial de Responsabilidad Limitada
Av. Huascar Nro. 205, Wanchaq, Cusco
Tiraje: 500 ejemplares

ISBN: 978-612-48999-7-3



9 786124 899973

Citar la publicación de la siguiente manera:

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.
(2025). Quelccaya: Un laboratorio natural para la ciencia y la humanidad

PALABRAS DE LA RECTORA: VISIÓN INSTITUCIONAL Y DESARROLLO REGIONAL

Es un privilegio para la Universidad Andina del Cusco presentar esta trascendental obra: “Quelccaya: Un laboratorio natural para la ciencia y la humanidad”. Este libro, producto de una rigurosa labor de investigación científica, no es solo una publicación; es un llamado a la conciencia y una hoja de ruta para la acción.

El glaciar Quelccaya, el casquete glaciar tropical más extenso del planeta, es un emblema de la Cordillera Vilcanota y una fuente de vida para nuestra Región del Cusco. Los hallazgos presentados en estas páginas, particularmente la cuantificación del vasto volumen de agua dulce almacenada —estimado en 2430 millones de metros cúbicos—, nos obligan a revalorar su rol como el reservorio hídrico estratégico para la seguridad de miles de cusqueños.

Nuestra universidad tiene el compromiso ineludible de impulsar una investigación que no solo genere conocimiento, sino que también tenga un impacto directo y positivo en la vida de nuestra comunidad. A través de la colaboración con instituciones clave como el INAIGEM, estamos forjando una sinergia vital para la gestión de riesgos, la planificación territorial y la adaptación al cambio climático en las cabeceras de cuenca.

Al felicitar a los autores y a todos los equipos involucrados en la realización de esta obra, reafirmamos que la Universidad Andina del Cusco continuará siendo un referente que ilumine el camino hacia la sostenibilidad, protegiendo nuestro patrimonio natural y preservando el futuro hídrico del sur del Perú. Que este libro sea un instrumento de consulta indispensable para académicos, gestores y autoridades.

Dra. Di Yanira Bravo Gonzales
Rectora
Universidad Andina del Cusco (UAC)

PALABRAS DEL VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN: RIGOR CIENTÍFICO Y SEGURIDAD HÍDRICA

Desde el Vicerrectorado de Investigación, saludamos con entusiasmo la aparición de “Quelccaya: Un laboratorio natural para la ciencia y la humanidad”, un hito en la investigación glaciológica y un ejemplo palpable de excelencia académica al servicio del desarrollo regional.

El valor fundamental de este estudio radica en la rigurosidad metodológica con la que, por primera vez, se ha logrado una estimación validada in situ del volumen de hielo en el Quelccaya. Esta cifra —equivalente al suministro de agua para la ciudad de Cusco por cerca de 100 años— transforma la percepción de nuestro reservorio natural, elevando la discusión sobre la vulnerabilidad hídrica y la necesidad de integrar esta información en políticas de Estado.

Esta publicación subraya el compromiso de nuestra universidad con la investigación de alto impacto, especialmente en temas que conciernen directamente a la Seguridad Hídrica y la gestión ambiental en la Macro Región Sur. Al detallar el papel del Quelccaya en la regulación del caudal de los ríos Urubamba e Inambari, el trabajo demuestra una visión ecosistémica que trasciende el límite de la cuenca y se inserta en el sistema hídrico amazónico.

Instamos a la comunidad científica y a los estudiantes a tomar este libro como referencia y ejemplo. La ciencia es la base de las decisiones informadas, y es nuestra responsabilidad seguir generando conocimiento pertinente que nos permita enfrentar con resiliencia los retos impuestos por la crisis climática global.

Dr. Nicolás Francisco Bolaños Cerrillo
Vicerrector de Investigación
Universidad Andina del Cusco (UAC)

PRESENTACIÓN INAIGEM

Desde su creación en 2014, el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) ha asumido el compromiso de generar conocimiento técnico y científico sobre los glaciares y los ecosistemas de montaña del Perú. Esta labor tiene como propósito contribuir con la prevención, mitigación y adaptación a los riesgos asociados al cambio climático, beneficiando especialmente a las poblaciones que dependen directamente de estos ecosistemas.

El glaciar Quelccaya, ubicado en la cordillera Vilcanota, entre los departamentos de Cusco y Puno, constituye uno de estos espacios excepcionales. Su extensión, historia y sensibilidad al clima lo han convertido, durante décadas, en un punto de referencia para la investigación científica internacional. Gracias a su singularidad, hoy es considerado un indicador clave de los impactos del cambio climático en los glaciares tropicales del planeta.

Este libro representa un hito para nuestra institución. No solo sintetiza varios años de trabajo científico sobre uno de los glaciares más extensos del mundo, sino que también busca hacer accesible ese conocimiento a la ciudadanía, a tomadores de decisiones y a la comunidad académica nacional e internacional. En un escenario de transformaciones aceleradas por el cambio climático, contar con publicaciones que integren ciencia, territorio y cultura resulta más urgente que nunca.

La obra no se limita a mostrar la dinámica física del glaciar, sino que se detiene también en sus orígenes geológicos, en las investigaciones científicas que han permitido conocerlo, y en su estrecha relación con los ecosistemas de alta montaña como los bofedales, pajonales y lagunas que lo rodean. Esta mirada integral permite comprender mejor cómo el retroceso glaciar afecta, directa e indirectamente, a todo el sistema natural que lo acompaña.

Confiamos en que esta publicación contribuya a generar nuevas sinergias y movilice a más actores hacia la investigación, conservación y valorización del Quelccaya. Nuestro deseo es que se convierta en un punto de partida para futuros proyectos colaborativos, donde el INAIGEM siga desempeñando un rol articulador y técnico, comprometido con la sostenibilidad de los glaciares y ecosistemas de montaña del país.

PRÓLOGO

El Quelccaya es uno de los glaciares tropicales más importantes del mundo. Ubicado en la cordillera oriental de los Andes del sur peruano, entre los departamentos de Cusco y Puno, ha sido objeto de múltiples investigaciones científicas debido a su capacidad para registrar las condiciones climáticas del pasado y a su papel clave en la dinámica hídrica regional.

La motivación de este libro nace de la necesidad de comunicar y divulgar el conocimiento adquirido sobre este glaciar tropical. Cada capítulo busca poner en valor su complejidad, su historia, su rol estratégico para los ecosistemas andinos y las comunidades que habitan su entorno. A través de una narrativa que equilibra el rigor técnico con un lenguaje accesible, se invita al lector a recorrer uno de los glaciares tropicales más extensos del mundo y el paisaje que lo rodea.

El presente libro ofrece una visión integral del Quelccaya, pues aborda no solo sus características físicas y científicas, sino también su relevancia ecosistémica, social y estratégica para el desarrollo sostenible. La obra está organizada en seis capítulos, que si bien siguen una secuencia temática y científica, pueden leerse de forma independiente.

El **capítulo 1** presenta el contexto general del glaciar, describe su ubicación geográfica y analiza su papel histórico y cultural para las comunidades andinas cercanas. Asimismo, expone los ecosistemas de alta montaña presentes en el entorno glaciar, lo que permite comprender la importancia territorial del Quelccaya más allá de sus límites físicos.

El **capítulo 2** se enfoca en el desarrollo de la investigación científica en el glaciar. Desde las primeras expediciones de la década de 1970, se documenta el crecimiento del interés académico y los aportes de múltiples estudios. Se destacan también los principales hallazgos científicos publicados durante los últimos 50 años.

El **capítulo 3** detalla los factores físicos que condicionan la existencia y el comportamiento del Quelccaya. Incluye análisis del clima, la geodesia, la topografía, así como de la geología y geomorfología de la zona. Estos elementos brindan una base fundamental para interpretar los procesos glaciológicos que se abordan posteriormente.

El **capítulo 4** examina la dinámica reciente del glaciar. Se presenta un análisis multitemporal de los cambios en su extensión durante los



últimos 40 años, junto con estimaciones del volumen de agua almacenada en el glaciar y en las lagunas glaciares. Asimismo, se incluye el registro de un evento que ejemplifica los riesgos asociados al retroceso glaciar.

El **capítulo 5** aborda la flora y fauna que habita las zonas entre el glaciar y los ecosistemas circundantes. Se ofrece una caracterización de la vegetación en áreas deglaciadas, pajonales y bofedales, así como un registro preliminar de especies animales que destaca la presencia del fringilo glaciar, una especie que nidifica directamente en el cuerpo del glaciar.

Por último y no menos importante, el **capítulo 6** propone una mirada hacia el futuro. Se presenta la propuesta del Observatorio Científico Quelccaya como una plataforma para el monitoreo continuo e integrado de variables glaciológicas, hidrológicas, ecológicas y climáticas. Además, se destaca la necesidad de consolidar una red institucional que permita aprovechar el conocimiento generado e incidir en políticas públicas.

Este libro se basa principalmente en estudios realizados por el equipo técnico de la Oficina Desconcentrada Macrorregional Sur (ODMRS) del INAIGEM, complementados con investigaciones previas y con el conocimiento de las comunidades locales. Aunque estructurado con una lógica temática, cada capítulo puede leerse de manera independiente, lo que permite al lector abordar los temas según sus intereses. La publicación busca fortalecer el entendimiento científico del Quelccaya y proporcionar elementos para su conservación, en un contexto de cambio climático acelerado.



El Quelccaya fue, alguna vez, el glaciar tropical más grande del mundo. Hoy, su capa de hielo se reduce a un ritmo acelerado, con lo que quedan expuestos suelos y rocas desnudas para el inicio de una colonización vegetal adaptada al clima extremo. Este libro es un testimonio visual y científico sobre su historia, importancia y posible futuro ante el contexto actual del cambio climático.



CONTENIDO

Presentación INAIGEM	1
Prólogo	2
Contenido 5	
CAPÍTULO 1.	
CONOCIENDO AL QUELCCAYA.....	6
Ubicación	8
Historia y cultura en su entorno	12
Ecosistemas del Quelccaya	26
CAPÍTULO 2.	
IMPORTANCIA DEL QUELCCAYA EN LA INVESTIGACIÓN.....	36
Las travesías iniciales en la investigación.....	39
Investigaciones en el glaciar	48
CAPÍTULO 3	
LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL QUELCCAYA.....	60
Un clima de contrastes.....	63
Una posición estratégica en el planeta.....	73
La historia escrita en rocas	81
CAPÍTULO 4.	
EL QUELCCAYA A TRAVÉS DE LOS AÑOS.....	102
De la pequeña edad de hielo a la actualidad	104
Reserva de agua para la vida.....	124
Peligros asociados al retroceso glaciar	139
CAPÍTULO 5.	
LA VIDA SILVESTRE ENTRE EL GLACIAR Y SU ENTORNO	146
Flora que se adapta a los cambios	148
Fauna que habita en el glaciar y su entorno.....	158
CAPÍTULO 6.	
UNA MIRADA AL FUTURO: OBSERVATORIO CIENTÍFICO QUELCCAYA.....	176
Desafíos y avances actuales.....	179
Propuesta del observatorio	185
El Geoparque del Glaciar Quelccaya	190
Bibliografía.....	195
Siglas y abreviaciones.....	202
Glosario	203
Agradecimientos	206
Listado de figuras y tablas.....	210

An aerial photograph of a vast glacier valley, likely the Quelccaya Ice Sheet in Peru. The glacier is a deep blue color, contrasting with the dark, rocky terrain of the surrounding mountains. The sky is a mix of light blue and orange, suggesting a sunset or sunrise. The number '1' is centered over the glacier, flanked by horizontal lines.

1

CONOCIENDO AL

QUELCCAYA

WILFREDO CHÁVEZ



En los Andes del sur peruano, entre los departamentos de Cusco y Puno, se encuentra una gran reserva de agua dulce: el Quelccaya. Alguna vez fue el glaciar tropical más grande del mundo; y aunque hoy su tamaño se ha reducido significativamente, sigue siendo un archivo natural invaluable que almacena más de 1800 años de historia climática.

No solo es un testigo del pasado, sino también es un indicador clave para comprender el presente y anticipar el futuro del agua, del clima y de los impactos del cambio climático. Más allá de su imponente física, este glaciar tropical y su entorno constituyen una fuente estratégica para los ecosistemas altoandinos y las poblaciones que dependen de sus recursos hídricos.

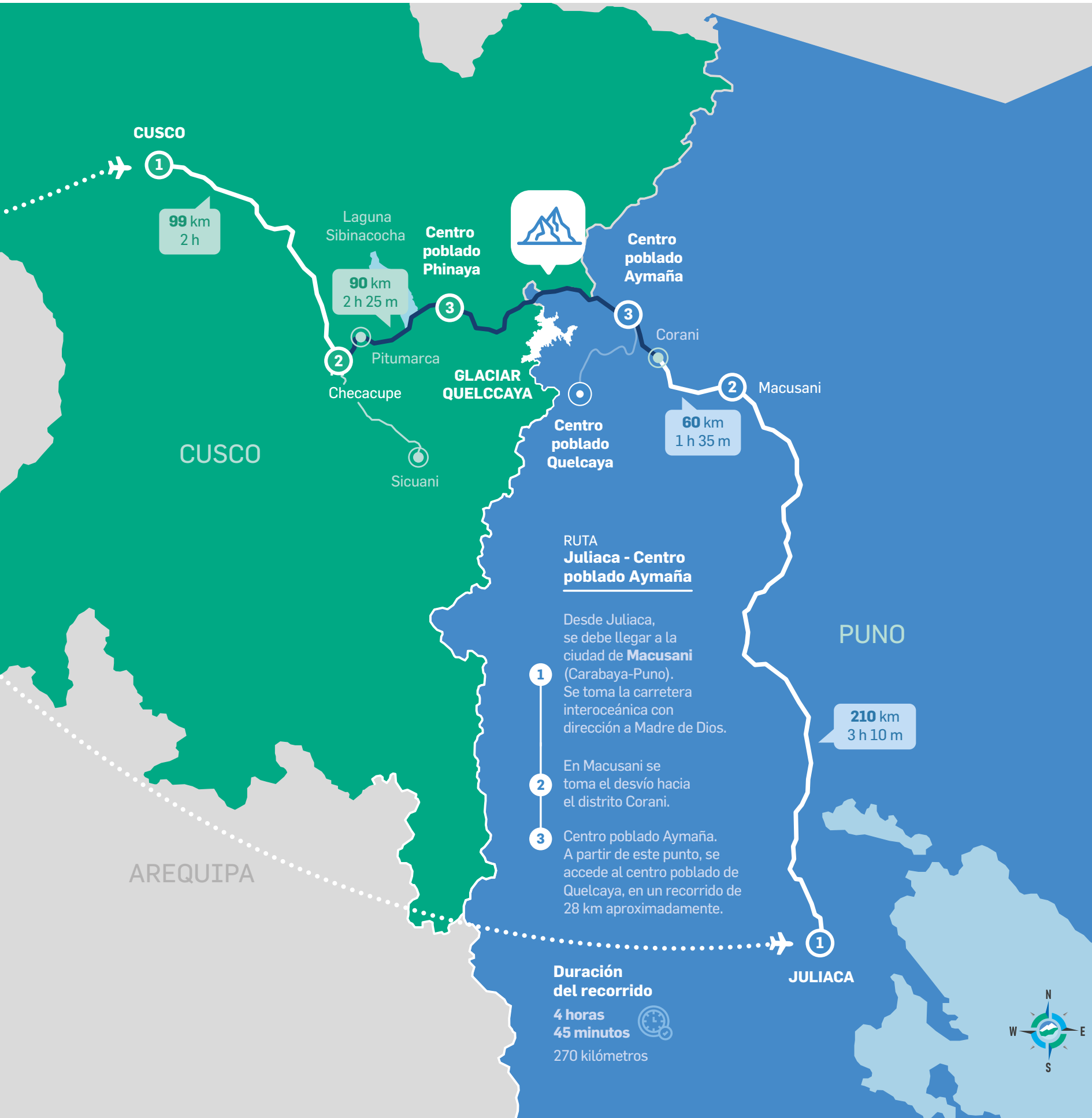
Conocerlo permite entender la conexión entre glaciares, ecosistemas y sociedad, en un mundo donde el cambio climático cada vez cobra mayor protagonismo. Este capítulo aborda su ubicación estratégica dentro de la geografía peruana, el contexto histórico y sociocultural, así como los ecosistemas de alta montaña que alberga.

UBICACIÓN

El glaciar Quelccaya es mucho más que una masa de hielo: es un ecosistema frágil interconectado con otros tipos de ecosistemas de alta montaña. También es importante para las comunidades locales que se han adecuado al entorno y establecido sus formas de vida. Con una altitud de 5663 m s. n. m. y una superficie de 38 km² (Wilca, 2025a), forma parte de la cordillera Vilcanota¹ y se extiende entre los departamentos de Cusco y Puno, abarcando los distritos de Checacupe y Corani, respectivamente. Sus coordenadas aproximadas son de 13° 56' latitud sur y 70° 50' longitud oeste, localizándose en el trópico con respecto al mundo.



¹ La cordillera del Vilcanota es considerada la segunda con mayor cobertura de nieve del Perú, después de la Cordillera Blanca, con una longitud de 134 km (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, 2018).



Por su ubicación, en el sur del Perú, sobre los 13° latitud sur, el Quelccaya es un glaciar tropical donde el sol incide casi perpendicularmente, acelerando procesos únicos como la sublimación, hielo que se convierte directamente en vapor (Wagnon et al., 1999). Las mediciones meteorológicas directas realizadas en el glaciar Quelccaya revelan un régimen térmico extremo característico de los glaciares tropicales de alta montaña. Los registros indican una temperatura media anual de -3.2°C , con temperaturas máximas anuales que alcanzan los 6.9°C y mínimas anuales que descienden hasta -13.4°C (Suarez et al., 2025). Esta distribución térmica genera una amplitud diaria de aproximadamente 20.3°C , evidenciando las condiciones climáticas severas que dominan este ecosistema glaciar.

El glaciar Quelccaya es una fuente de agua dulce para los departamentos de Cusco y Puno, así como un aportante estratégico de la cuenca del Amazonas que vierte sus aguas hacia el Océano Atlántico. El deshielo del glaciar origina una red de lagunas y ríos que fluyen en dos direcciones:



Hacia Cusco, en la cuenca Vilcanota - Urubamba: Las aguas del Quelccaya, que discurren hacia el oeste, forman cursos de agua como Ritiananta, Morojani, Ojejocha, Lacaahuampa y Palljacancha, que forman más abajo el río Salcca, vital para la cuenca Vilcanota. Estas corrientes sostienen el suministro de agua para consumo humano y las actividades agropecuarias locales.



Hacia Puno, en la cuenca Inambari: Del lado oriental, es fuente de los ríos como el Paljapampa, Huasapaco, Ancasi, Phacu Cucho, Huayllani y Huancarane, los cuales confluyen aguas abajo para formar el río Corani, que abastece a comunidades altoandinas y desciende hacia la selva de Madre de Dios.



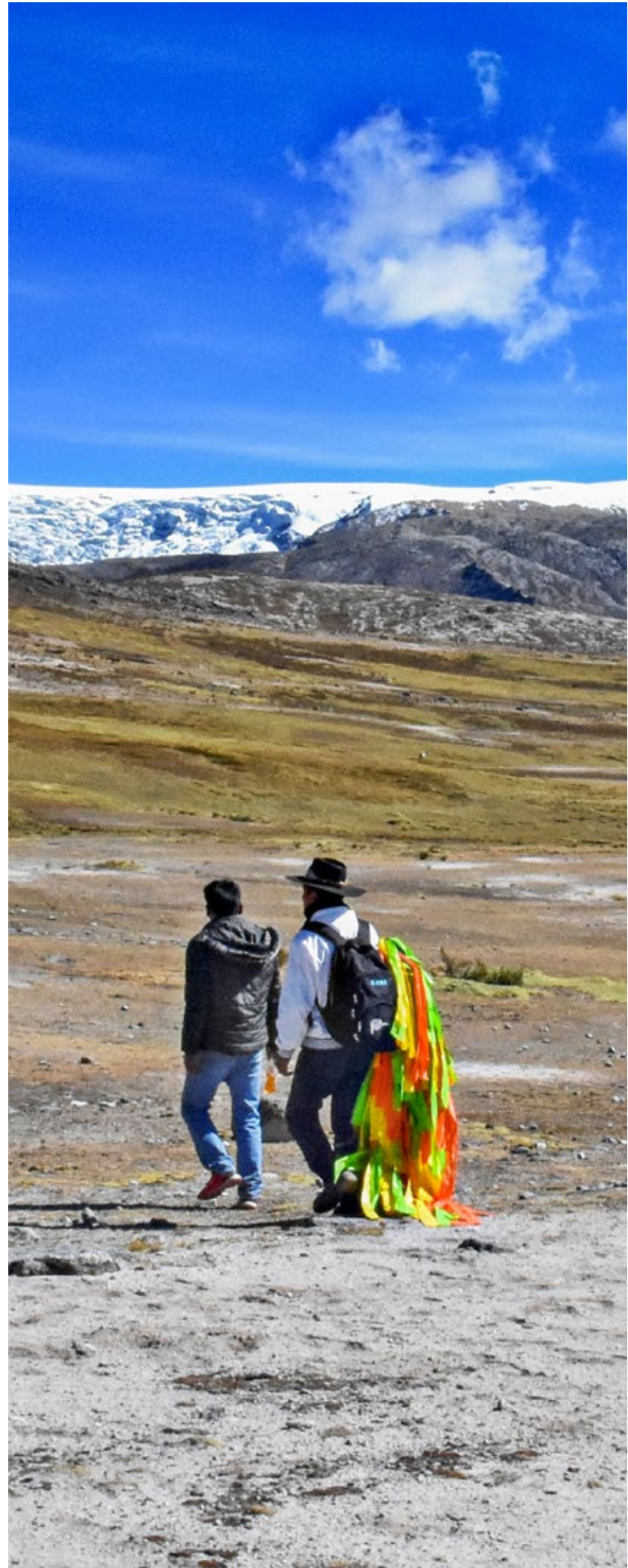


HISTORIA Y CULTURA EN SU ENTORNO

Desde mucho antes de que existieran registros escritos, el glaciar Quelccaya fue un punto de referencia espiritual, práctico y simbólico para los pueblos andinos. Aunque su gran presencia natural lo hace visible desde kilómetros de distancia, es su presencia inmaterial la que ha dejado una huella profunda en el imaginario andino.

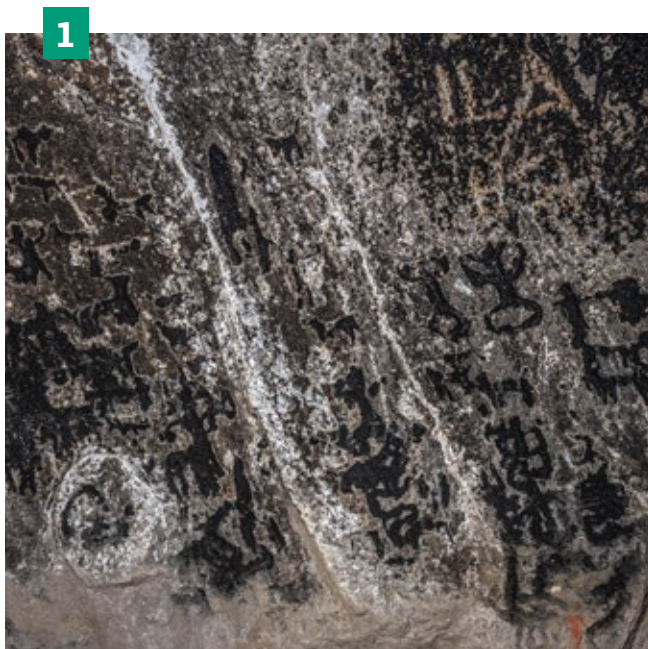
A lo largo de los siglos, su imagen ha sido reinterpretada desde diversas cosmovisiones: primero como parte de un universo animado y espiritual, luego como un obstáculo o recurso dentro de la lógica colonial y republicana; y más recientemente, como un indicador de la evidencia del cambio climático.

LA IMPONENTE PRESENCIA DEL QUELCCAYA
EN LOS ANDES DEL SUR PERUANO HA
CONDICIONADO LA OCUPACIÓN HUMANA
DESDE TIEMPOS PREHISTÓRICOS,
MOLDEANDO LAS PRÁCTICAS CULTURALES,
LAS RUTAS DE MOVILIDAD Y LAS FORMAS
DE RELACIÓN CON ESTE ENTORNO
ALTOANDINO A LO LARGO DE LOS SIGLOS.



EVOLUCIÓN DEL VÍNCULO HUMANO CON EL GLACIAR

En los alrededores del glaciar Quelccaya, se han identificado vestigios arqueológicos que sugieren ocupaciones humanas que datan del año 5000 a. C. (Dillehay y Kolata, 2004). Estas evidencias incluyen arte rupestre, que se remonta aproximadamente entre los años 3000 y 1000 a. C., con representaciones de camélidos, figuras humanas, escenas de caza y otros símbolos que podrían estar relacionados con rituales asociados a las montañas nevadas (Hostnig, 2003). A través de estos rastros visuales, es posible inferir que este glaciar ya era percibido como un elemento singular dentro del paisaje.



Arte rupestre encontrado en la cueva Titulmachay, en las inmediaciones del Quelccaya, Puno. La fotografía 1 muestra figuras con formas humanas, mientras que la fotografía 2 evidencia formas de animales labrados en roca.

Con el avance del dominio Wari (600 - 1000 d.C.) y más tarde con el imperio Inca (1438 - 1533 d.C.), el Quelccaya fue parte de las montañas nevadas que orientaban la ubicación de una red de caminos, *tambos* (puestos de descanso) y sitios ceremoniales. Para estas culturas, el mundo estaba vivo y los *Apus* eran entidades vivas, proveedoras de agua y fertilidad, dignas de profundo respeto y veneración (Rowe, 1946). Las montañas nevadas no eran simplemente accidentes geográficos, sino seres vivos con funciones específicas capaces de controlar el clima, proveer lluvias, o vigilar el comportamiento humano.

LOS AGRICULTORES PREHISPÁNICOS OBSERVABAN ATENTAMENTE LOS CICLOS DE NIEVE Y DESHIELO DE LOS GLACIARES, COMO EL QUELCCAYA. GRACIAS A ELLO, PREDECÍAN LAS MEJORES ÉPOCAS PARA LA SIEMBRA O COSECHA DE ALIMENTOS.



Glaciar Quelccaya

¿POR QUÉ SE LLAMA QUELCCAYA?

El glaciar no siempre se llamó así. Aunque hoy este nombre aparece en estudios glaciológicos, mapas y artículos científicos, su origen es más reciente. El término proviene del quechua *qellqa* (marca o escritura) y el sufijo *-ya* (lugar), lo que podría traducirse como “el lugar marcado”, en referencia a las pinturas rupestres o a las estrías naturales del hielo sobre la roca.

Otra versión recogida entre la población local cuenta que en las cercanías del glaciar vivía el único habitante que sabía leer y escribir. A él acudían para redactar cartas o

documentos. Tras su fallecimiento, la memoria colectiva conservó el recuerdo de “donde vivía el escribano”, con lo que ese nombre perdura hasta hoy.

Según Ricker (1970), Quelccaya no era el nombre más utilizado por las comunidades locales, que preferían usar otras denominaciones como *Ritipampa* (llanura de nieve), *Yuraq Orqo* (montaña blanca) o una más genérica como *Apu* (Flores Galindo, 1988).

Durante la Colonia, no hay registros claros del glaciar con nombre propio. Es recién en el siglo XVIII que aparece mencionado como “nevados de *Qelqaya*” en contextos legales entre comunidades (Glave & Remy, 1983).

La consolidación moderna del nombre se debe, en gran parte, al glaciólogo Lonnie Thompson. Durante sus primeras expediciones en la década de 1970, al señalar hacia la masa de hielo para indicar a los pobladores su destino final, estos asumían que se refería al centro poblado de Quelccaya, ubicado detrás del glaciar, cuando se accede desde Cusco. Fue así como Thompson pensó que ese era el nombre del glaciar, usándolo en sus publicaciones científicas para referirse a la capa de hielo que estudiaba.

Desde entonces, Quelccaya dejó de ser solo un topónimo local y se convirtió en un referente mundial para la ciencia del clima y los glaciares tropicales.

COSMOVISIÓN Y ESPIRITUALIDAD

La veneración de los *Apus* no fue cuestionada hasta la llegada de una nueva cosmovisión que veía las montañas como paisajes inertes. La imposición del cristianismo durante la conquista española (1533 - 1821), trajo consigo una fractura en la relación con los glaciares y montañas, aunque como en otros aspectos de la cultura andina, la espiritualidad resistió, transformándose. La llegada de los conquistadores supuso una ruptura violenta en cuanto a la forma en que se entendía el mundo, ya que la Iglesia Católica condenó como idolatría todas las prácticas que veneraban montañas, lagunas, piedras y glaciares (Duviols, 1986).

Sin embargo, la espiritualidad andina no desapareció: se adaptó. Muchas comunidades comenzaron a disfrazar sus rituales bajo formas aceptadas por la religión oficial. Se realizaron pagos a la tierra durante festividades católicas, se invocó a los glaciares y montañas bajo la figura de santos cristianos, y se mantuvieron ofrendas escondidas. Los registros administrativos de la época documentan cómo las comunidades indígenas fueron reorganizadas en reducciones, alterando los tradicionales ciclos de trashumancia vertical que habían caracterizado la adaptación andina al entorno de alta montaña (Gade, 1999).



Apacheta de Pirhuacarca

HISTORIA Y CONOCIMIENTO

Con la independencia del Perú, en el siglo XIX se intensificaron los sistemas de explotación laboral en las haciendas altoandinas cercanas al glaciar (Flores Galindo, 1988); pero este entorno glaciar también comenzó a ser observado desde una óptica moderna y científica. Durante este periodo comenzaron las primeras exploraciones científicas de la región por parte de naturalistas e investigadores como Antonio Raimondi, quien en 1865 documentó aspectos geológicos y botánicos del entorno del Quelccaya, aunque sin centrarse específicamente en él (Raimondi, 1874).

La reforma agraria de 1969 cambió el sistema de haciendas y devolvió las tierras a las comunidades indígenas (Mayer, 2009), muchas de las cuales dependían directa o indirectamente de las aguas del deshielo del Quelccaya. Exploradores mineros, topógrafos y geólogos se acercaron al glaciar con la finalidad de medirlo, cartografiarlo y entenderlo como una zona con alto potencial de recursos naturales.

Este suceso coincidió con los inicios de los estudios del glaciólogo Lonnie Thompson y su equipo. El Quelccaya se volvió un referente mundial en paleoclimatología. Sus núcleos de hielo ofrecieron datos sobre lluvias, sequías, erupciones volcánicas y cambios atmosféricos en los últimos 1800 años.



QUELCCAYA HOY:

PRÁCTICAS VIVAS FRENTE A UN FUTURO INCIERTO

A pesar de los cambios de la percepción humana sobre los glaciares, el vínculo con estos sigue vivo en las comunidades altoandinas de Pitumarca, Checacupe y Corani, que habitan alrededor del glaciar, manteniendo una relación ambivalente con el Quelccaya.

Por un lado, preservan prácticas tradicionales como la *ch'alla* (libación ritual) y las ofrendas a la *Pachamama* (Madre Tierra) en agradecimiento por el agua que proporciona. Por otro, enfrentan una creciente preocupación por el acelerado retroceso glaciar, que pone en peligro sus medios de subsistencia basados en el pastoreo de camélidos sudamericanos y la agricultura de altura (Orlove et al., 2019).

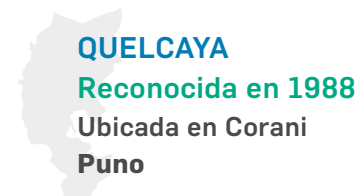
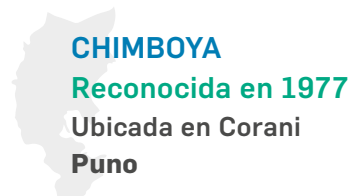
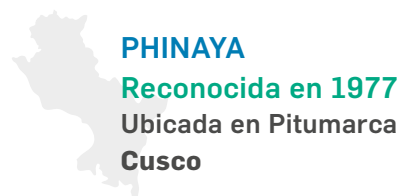
OCUPACIÓN EN EL TERRITORIO

El Quelccaya, además de ser un indicador climático global, también es sustento para miles de personas. Su relación con la población local abarca comunidades quechuas ubicadas en los distritos de Pitumarca y Checacupe en Cusco y Corani en Puno, que mantienen una estrecha conexión con el glaciar y sus recursos. Vivir alrededor del Quelccaya no es simplemente una cuestión de geografía: es una forma de habitar, sentir y ver el mundo.

Un hombre de la zona carga a una alpaca bebé durante su recorrido habitual cerca del glaciar.



El territorio combina la propiedad comunal con tierras privadas. Según registros oficiales del Organismo de Formalización de la Propiedad Informal (COFOPRI) y del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI, 2024), existen tres comunidades campesinas reconocidas que colindan con los alrededores del glaciar:



La población local configura un paisaje humano que ha sabido convivir durante siglos con la elevada altitud de la zona, la presencia de fuertes heladas y los cambios estacionales. Mantienen una sociedad profundamente enraizada en estructuras colectivas como el *ayllu* (unidad familiar extendida), y prácticas ancestrales de trabajo como el *ayni* (reciprocidad) y la *minka* (trabajo comunal). Estos esquemas organizativos no solo sostienen la vida económica local y la cohesión social, sino una adaptación ambiental (Bolin, 2009) que en conjunto articulan redes de solidaridad y gobernanza frente a las duras condiciones del entorno.

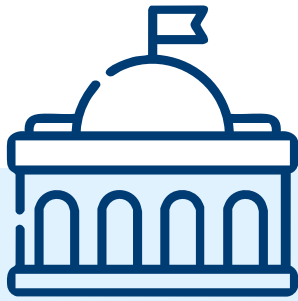


Centro poblado de la comunidad de Phinaya después de una tormenta de nieve.

Este sistema organizativo permite una gestión horizontal y participativa, aunque no está exenta de desafíos como los conflictos por límites comunales, presiones de proyectos extractivos o disputas internas entre generaciones. No obstante, estos espacios de decisión siguen siendo claves para sostener formas de vida resilientes frente al cambio climático.



Centro poblado de la comunidad de Quelccaya, al fondo el glaciar Quelccaya vista desde Puno



GOBERNANZA EN EL ENTORNO DEL QUELCCAYA

La gobernanza sobre el glaciar se configura en una red de actores nacionales, regionales, locales y comunitarios que interactúan sobre un mismo territorio. Esta superposición de competencias y normas refleja tanto la importancia estratégica del Quelccaya como las tensiones que emergen al gestionar este recurso en un contexto de cambio climático.

En el ámbito nacional, el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), es la máxima autoridad en investigación científica de los glaciares y ecosistemas de montaña. Además existen diversas instituciones como la Autoridad Nacional del Agua (ANA), SERNANP, Gobiernos Regionales y Locales que cuentan con competencias específicas sobre el monitoreo, la gestión del territorio.

En el plano subnacional, los gobiernos regionales de Cusco y Puno, junto con las municipalidades distritales de Pitumarca, Checacupe y Corani, comparten responsabilidades sobre el territorio glaciar. No obstante, la falta de articulación entre estos niveles de gobierno ha generado demoras para implementar estrategias integradas frente a los desafíos ambientales y sociales (Gobierno Regional de Cusco, 2017; Gobierno Regional de Puno, 2015).

En este territorio, también se superpone parte del Área de Conservación Regional Ausangate, gestionado por el Gobierno Regional de Cusco. Fue creado mediante el Decreto Supremo N.º 012-2019-MINAM para conservar y proteger los recursos hídricos, la biodiversidad, el entorno natural, la cultura, la fauna y la flora de la ecorregión Puna.

Frente a esta complejidad institucional, las comunidades campesinas juegan un rol clave con sus propias formas de organización territorial. Comunidades como Phinaya, Chimboya y Quelccaya mantienen derechos reconocidos por la Ley General de Comunidades Campesinas (Ley N.º 24656) y ejercen una gobernanza basada en sistemas tradicionales en los que destacan prácticas como los comités de regantes y turnos consuetudinarios de distribución del agua (Verzija & Quispe, 2013).

Sin embargo, la disminución de las fuentes hídricas producto del retroceso glaciar ha comenzado a generar tensiones crecientes, exacerbadas por la presión de actividades extractivas como la minería. En distritos como Corani, esta actividad representa el 3.9 % de la población económicamente activa (PEA), lo que ha dado lugar a conflictos socioambientales documentados por la Defensoría del Pueblo (INEI, 2007; Defensoría del Pueblo, 2019).

Esta situación revela la urgencia de avanzar hacia modelos de gobernanza más integrados, que no solo reconozcan la pluralidad de actores, sino también los saberes y prácticas locales, esenciales para lograr la sostenibilidad del Quelccaya y las poblaciones que dependen de él.

Las proyecciones demográficas señalaron que, para el 2024, los distritos de Pitumarca, Checacupe y Corani albergarían cerca de 18 672 personas, distribuidas en su mayoría en zonas rurales: 44% en Pitumarca, 50% en Checacupe y 73% en Corani. Esto refleja una fuerte dependencia del entorno natural (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2024). Los centros poblados varían en tamaño y nivel de servicios. En Pitumarca, departamento de Cusco, destaca Phinaya con solo 312 habitantes y con una importancia estratégica en la actividad ganadera. En Corani, departamento de Puno, se encuentran centros poblados como Aymaña (966 habitantes), Isivilla (875 habitantes), Corani (622 habitantes) y Quelccaya (263 habitantes) que cuentan con educación, salud y comercio básico (INEI, 2018).

Esta asimetría evidencia un mayor desarrollo socioeconómico en el lado puneño, donde hay mejores servicios e infraestructuras; a diferencia del sector cusqueño, caracterizado por su dispersión y aislamiento. Esto se debe a que la población cercana al glaciar, localizada en Cusco, presenta mayor distancia de las capitales distritales de Pitumarca y Checacupe, que concentran la administración y los servicios de mayor jerarquía.



Personal de INAIGEM presentando propuestas de estudios ante la asamblea de la Comunidad campesina Quelccaya



La economía local continúa basándose en la actividad agropecuaria, particularmente en la ganadería de camélidos sudamericanos, concentrando entre 58% y 73% de la PEA según distrito, y llegando a un 81% en comunidades como Phinaya en Pitumarca (LQA Consultoría y Proyectos Ambientales, 2018). En las punas altas predomina un sistema extensivo con pastoreo rotativo de alpacas y llamas, principalmente las alpacas Huacaya y Suri; mientras que en zonas con mejor acceso a mercados, como las de Checacupe, se ha desarrollado una ganadería semiintensiva que introduce cercos y cultivos forrajeros. La fibra de alpaca representa el producto estrella, acompañado del charqui y otros derivados.

En paralelo, la agricultura de subsistencia se adapta a los pisos ecológicos con una notable diversidad de papas y granos andinos resistentes al clima riguroso. En las alturas de Corani y Pitumarca, así como en el entorno del Quelccaya, se cultivan papas nativas, oca, mashua, olluco y cañihua. Estas labores siguen el calendario de lluvias (octubre a abril) y se apoyan en herramientas tradicionales como la *chakitaklla* y el trabajo colectivo (*ayni* y *minka*).

Los sistemas de propiedad y uso de la tierra combinan la herencia comunal con arreglos familiares, lo que refleja una estructura agraria compleja, donde prevalece la fragmentación de parcelas. Las ferias semanales, como las de las comunidades de Phinaya (Cusco) , Quelccaya (Puno) y Chimboya (Puno), constituyen nodos clave del intercambio, donde el trueque coexiste con la economía monetaria, lo que refuerza las redes sociales e identidades compartidas. En Laripampa existe una feria semanal de productos para el intercambio entre las poblaciones de Cusco y Puno, que produce una dinámica similar.

Mujer conduce un rebaño de alpacas en los alrededores del glaciar Quelccaya, ejemplo del manejo tradicional de camélidos sudamericanos en ecosistemas altoandinos.





Con esfuerzo, una mujer prepara la tierra para sembrar los cultivos que alimentarán a su familia.

La dinámica poblacional también está marcada por flujos migratorios temporales. Los jóvenes que salen a estudiar o trabajar a ciudades como Sicuani, Cusco o Arequipa mantienen vínculos intermitentes con sus comunidades, generando un modelo de residencia escalonada que modifica patrones tradicionales de cohesión familiar. Este fenómeno introduce tensiones, pero también nuevas posibilidades, como el acceso a redes de comunicación más amplias o la transferencia de conocimientos técnicos para mejorar las condiciones locales.

No obstante, estas comunidades enfrentan severas condiciones de pobreza (monetaria y estructural), y una constante presión sobre los recursos. La pobreza monetaria alcanza al 46% en Pitumarca y hasta 68% en Corani (INEI, 2020), mientras que la pobreza no monetaria también es elevada reflejando carencias estructurales en vivienda, servicios básicos y educación (Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social, 2013).

Además de la ganadería y agricultura, la minería, especialmente en el distrito de Corani, ha introducido nuevas dinámicas económicas, pero también tensiones ambientales. El turismo, aún incipiente pero en ascenso, especialmente en Pitumarca por la popularidad de la Montaña de Siete Colores “Vinicunca”, ofrece una vía emergente para diversificar

ingresos, aunque limitada por carencias en infraestructura y capacitación. La comunidad de Phinaya, ha comenzado a gestar una oferta básica de servicios turísticos para aquellos turistas de aventura que buscan experiencias auténticas en entornos montañosos.

En conjunto, las comunidades del entorno del Quelccaya revelan una notable resiliencia. Aún frente al retroceso glaciar, la globalización y las actividades extractivas, continúan desplegando saberes ancestrales, formas de cooperación y estrategias híbridas que permiten adaptar su forma de vida en este entorno adverso.



En Corani (Puno), una niña combina con naturalidad su identidad local con íconos mundiales del pop.

ECOSISTEMAS DEL QUELCCAYA

La relación entre las comunidades y el Quelccaya también se expresa en la manera en que interactúan con un territorio conformado por diversos ecosistemas. El Quelccaya actúa como eje principal de esta red ecológica, pues influye en la disponibilidad de agua, nutrientes y condiciones climáticas que sostienen tanto las actividades humanas como a la biodiversidad local.

En el entorno se aprecian ecosistemas glaciares, periglaciares, bofedales, pajonales y lagunas que son interdependientes entre ellos para mantener su equilibrio, y en donde se desarrollan las actividades humanas. Estas interacciones hacen que el glaciar forme parte de un corredor ecológico y que sea una fuente de agua para otros ecosistemas en un contexto creciente de vulnerabilidad climática.



EL GLACIAR COMO ECOSISTEMA CENTRAL

El glaciar Quelccaya, con sus 38 km² de hielo, es un ecosistema con características ambientales difíciles. Bajo su superficie, que alcanza profundidades máximas que se aproximan a 209 ± 10 m (Vilca, 2025b), habitan comunidades microbianas capaces de sobrevivir en condiciones extremas como a bajas temperaturas y alta radiación ultravioleta. Las bacterias psicrófilas (Takeuchi et al., 2019), arqueas (Miteva, 2008) y hongos (S. K. Schmidt et al., 2009) metabolizan nutrientes a temperaturas bajo cero, formando la base de una red ecológica interconectada con el resto del paisaje andino.

EN EL GLACIAR Y SU ENTORNO, LA VIDA SE MANIFIESTA EN DIVERSAS FORMAS DE ADAPTACIÓN, CREANDO DIFERENTES ECOSISTEMAS PROPIOS DE LAS ZONAS DE ALTA MONTAÑA.

Este ecosistema glaciar cumple funciones esenciales para la región, como el almacenamiento de agua que libera gradualmente durante la temporada seca, con lo que el caudal se mantiene en cuencas bajas (Buytaert et al., 2017). Sus formaciones de hielo como penitentes (columnas puntiagudas de nieve y hielo formadas por sublimación diferencial), grietas (fracturas profundas que se producen por el movimiento del glaciar), morrenas superficiales (acumulaciones de rocas y sedimentos transportados por el hielo) y agujeros de crioconita (pequeñas depresiones oscuras llenas de polvo y microorganismos que absorben más radiación solar) albergan organismos que a su vez alimentan a otros organismos mayores, como el fringilo glaciar (D. R. Hardy & Hardy, 2008; Hotaling et al., 2017). Además, sus capas de hielo preservan datos climáticos de 1800 años (Thompson et al., 2013), útiles para estudiar cambios ambientales.

ECOSISTEMA PERIGLACIAR

A medida que el glaciar se retira, surgen nuevas condiciones ecológicas en el suelo recién liberado. Es un espacio dinámico donde el suelo se congela y descongela diariamente (suelo crioturbado), con lo que crea un paisaje único de morrenas y rocas pulidas por el glaciar (Ballantyne, 2018; Matthews, 1992).

Esta zona periglacial se convierte en un laboratorio natural, donde nuevas formas de vida se abren paso en condiciones extremas. Las primeras especies en colonizar estos suelos jóvenes y pobres son plantas como la *Deschampsia ovata*² y *Werneria dactylophyllum*³, entre otras, que crecen en forma de matas bajas para resistir el viento, el frío y la radiación (Mendoza, 2022). Junto a ellas, pequeños artrópodos como colémbolos, ácaros y arañas (Gobbi et al., 2006) habitan estas zonas, lo que demuestra que, aunque haya condiciones extremas, existen especies capaces de adaptarse. Este ecosistema, de transición entre el hielo glaciar y los pajonales altoandinos, atrae también a visitantes mayores. Se puede apreciar hasta animales mayores como las vicuñas que utilizan estas áreas como refugio temporal durante las horas de mayor radiación solar (Seimon et al., 2017). Todos estos seres vivos, desde los más pequeños hasta los más visibles, conforman una red de vida que interconectan los ecosistemas.



Como características claves, del ecosistema periglacial se tiene:



Suelos jóvenes con poca materia orgánica, constantemente remodelados por el hielo (Egli et al., 2006)



Clima extremo: amplias fluctuaciones diarias de temperatura, vientos fuertes y alta radiación solar (Körner, 2003; Nagy & Grabherr, 2009)



Crecimiento de plantas en forma de cojín: atrapan calor diurno y reducen pérdida de agua.



Proceso ecológico: ejemplo visible de sucesión primaria tras el retroceso glaciar.

² Esta especie, anteriormente se denominaba *Calamagrostis ovata*.

³ La especie vegetal *Werneria dactylophyllum*, anteriormente, se conocía como *Xenophyllum dactylophyllum*.



Zonas periglaciares en el glaciar
Quelccaya, Cusco





ECOSISTEMA BOFEDAL ALTOANDINO

Los bofedales altoandinos son alimentados principalmente por el deshielo del Quelccaya, las lluvias y las aguas subterráneas. Este ecosistema se extiende entre los 3800 y 5000 m s. n. m., lo que crea un contraste sorprendente con el paisaje circundante. Son como esponjas naturales que almacenan agua durante las lluvias y la liberan gradualmente en temporadas secas, con lo que se regula el caudal de los ríos y quebradas de la zona (Polk et al., 2017).

Su funcionamiento se basa en sus suelos turbosos, capaces de almacenar entre 600 y 1500 toneladas de carbono por hectárea (Hribljan et al., 2015), con lo que contribuyen significativamente a la mitigación del cambio climático. Tienen una capacidad hidrológica que sustenta una vegetación única, que a su vez forma densos cojines verdes que retienen hasta 85% del agua disponible (Hribljan et al., 2015), siendo las especies dominantes la *Distichia muscoides* y la *Festuca sp* (Mendoza, 2022).

Los bofedales altoandinos, por su vegetación, atraen a diferentes especies de aves como la perdiz de puna, la bandurria andina, entre otras, que encuentran allí su alimento; así como también a mamíferos más grandes como las vicuñas, que utilizan estos espacios como refugio y zona de pastoreo (LQA Consultoría y Proyectos Ambientales, 2018).

A PESAR DE LAS BAJAS TEMPERATURAS Y ELEVADA ALTITUD, LOS BOFEDALES MANTIENEN UNA ALTA PRODUCTIVIDAD BIOLÓGICA DURANTE TODO EL AÑO (MALDONADO, 2014), CONVIRTIÉNDOSE EN SUSTENTO ESENCIAL PARA LA GANADERÍA DE CAMÉLIDOS.

Bofedales altoandinos en el entorno del Quelccaya, que alimentan a la fauna local en Puno

ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA

Entre los 3000 y 4800 m s. n. m., el pajonal altoandino constituye el ecosistema dominante en la zona. Estas gramíneas bajas y duras, que apenas alcanzan los 30 cm de altura, forman un tapiz continuo que ocupa terrenos desde planicies y superficies ligeramente onduladas, hasta colinas de pendiente suave a moderada (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2015). Las plantas, en este ecosistema, han desarrollado hojas delgadas como agujas y raíces profundas para soportar el clima que oscila con variaciones de más de 20 °C entre el día y la noche (Seimon et al., 2007). Este paisaje, muchas veces visto por los ojos humanos como monótono, es en realidad un complejo mosaico de vida adaptada a la escasez.

Bajo la superficie, los suelos delgados de apenas 20 cm y pobres en nutrientes (Zimmermann et al., 2010) esconden una estratificación vegetal. En la base, líquenes y musgos forman una capa protectora. Sobre ellos, pequeñas plantas como la *Paranephelius spp.* y *Werneria nubigena* se pegan al suelo en forma de rosetas, almacenando agua en sus raíces engrosadas. Por encima de este conjunto, las duras gramíneas de los géneros *Cinnagrostis*, *Deschampsia*, *Festuca* y *Stipa*, constituyen la matriz estructural del ecosistema dominando el paisaje (LQA Consultoría y Proyectos Ambientales, 2018; MINAM, 2019b).

Entre las hojas y estructura vegetal de los pajonales de puna húmeda, se aprecian diversas aves como el canastero de Junín, lagartijas del género *Liolaemus* así como el sapo *Pleurodema marmoratum*. Se puede observar con suerte a mamíferos como al zorro colorado y con gran facilidad a roedores como las vizcachas. En estas zonas, el gato andino, uno de los felinos más amenazados del mundo, encuentra uno de sus pocos refugios (LQA Consultoría y Proyectos Ambientales, 2018).

ESTE ECOSISTEMA, AUNQUE APARENTEMENTE RESISTENTE, DEPENDE DEL DELICADO EQUILIBRIO ENTRE LAS LLUVIAS ESTACIONALES Y EL AGUA QUE PROVIENE DEL DERRETIMIENTO DEL QUELCCAYA.

Ecosistema de pajonales altoandinos localizados en el entorno del Quelccaya, Puno.









ECOSISTEMA ACUÁTICO DE ALTA MONTAÑA

En el territorio del Quelccaya, existen numerosas lagunas glaciares que emergen como cuerpos de agua formados por las depresiones en morrenas que dejó el retroceso del glaciar Quelccaya (Emmer et al., 2016). Estos cuerpos de agua, alimentados principalmente por el deshielo glaciar (entre 50 - 80% de su volumen), funcionan como reservorios naturales que regulan el flujo hídrico durante las temporadas secas. Aunque sus aguas son pobres en nutrientes, albergan especies vulnerables como la rana *Telmatobius marmoratus*, que ha desarrollado adaptaciones para sobrevivir en estas condiciones extremas de frío y baja disponibilidad de recursos (Seimon et al., 2017).

Desde estas lagunas nacen los ríos Salcca, en Cusco; y Corani, en Puno. Sus aguas heladas descienden por las laderas andinas, conectando las zonas periglaciares con ecosistemas de menores elevaciones. Estos ríos presentan una dinámica particular, con caudales que fluctúan notablemente entre el día y la noche, así como entre estaciones (Baraer et al., 2012; Bury et al., 2013; Mark et al., 2005). Durante el día, el aumento del deshielo incrementa su volumen, mientras que en las noches su flujo disminuye considerablemente.

Estos ecosistemas acuáticos cumplen funciones ecológicas fundamentales para toda la región. Además de regular el flujo de agua hacia las zonas bajas (Buytaert et al., 2017), son reservorios de biodiversidad y sirven como corredores biológicos que conectan los distintos pisos altitudinales.

LAS LAGUNAS ACTÚAN COMO OASIS PARA AVES MIGRATORIAS Y RESIDENTES, COMO LOS PATOS DE LA PUNA Y LAS GALLARETAS, QUE ENCUENTRAN EN AQUELLAS ALIMENTO Y REFUGIO. LOS RÍOS, POR SU PARTE, TRANSPORTAN NUTRIENTES Y SEDIMENTOS QUE ENRIQUECEN LOS ECOSISTEMAS AGUAS ABAJO, MANTENIENDO LA PRODUCTIVIDAD DE TODO EL SISTEMA.

2

IMPORTANCIA DEL

QUELCCAYA

EN LA INVESTIGACIÓN

CÉSAR PORTOCARRERO | PATRICIA BARROS





El conocimiento sobre el Quelccaya se remonta a las primeras ocupaciones del ser humano en la zona, quienes a través de sus vivencias se adaptaron durante miles de años a las condiciones extremas del entorno. Estos quedaron plasmados en conocimientos, saberes y prácticas ancestrales que han sido transmitidos de generación en generación.

Con la primera expedición científica realizada en los años 70, se puso al Quelccaya como un glaciar tropical de interés ante el mundo, siendo considerado como un laboratorio natural para la ciencia. Este capítulo explora los primeros trabajos de investigación realizados en el glaciar, así como los hallazgos más relevantes que se han publicado en un poco más de 70 investigaciones científicas durante los últimos 50 años.



LAS TRAVESÍAS INICIALES EN LA INVESTIGACIÓN

La historia de las primeras investigaciones en el glaciar Quelccaya está marcada por el esfuerzo, la incertidumbre y la perseverancia. Gran parte de lo que se conoce sobre aquellos inicios proviene del relato del ingeniero César Portocarrero, quien fue testigo directo de las dificultades y logros de las primeras incursiones científicas en este glaciar. Su testimonio se sitúa en una época en la que la glaciología en el Perú se encontraba en sus primeras etapas y el estudio de los glaciares tropicales era un campo poco desarrollado.



LONNIE G. THOMPSON

PIONERO DE LAS INVESTIGACIONES EN EL GLACIAR QUELCCAYA

Profesor universitario de la Facultad de Ciencias de la Tierra e investigador científico sénior del Centro de Investigación Polar Byrd de la Universidad Estatal de Ohio. Su investigación ha impulsado el campo de la paleoclimatología de núcleos de hielo desde las regiones polares hasta los campos de hielo tropicales y subtropicales de mayor altitud.

Pionero en la creación de equipos de perforación ligeros alimentados por energía solar, ha posibilitado la recuperación de registros climáticos de alta resolución en los glaciares andinos, entre ellos el Quelccaya, el mayor glaciar tropical del mundo. Los registros obtenidos confirman que el acelerado retroceso glaciar observado en las últimas décadas constituye evidencia inequívoca de un calentamiento global sin precedentes en miles de años.

Sus estudios en el Quelccaya se iniciaron en el año 1974, donde logró reconstruir el clima de 1800 años atrás, una de sus últimas expediciones se llevó en agosto del 2025, año en el que además presentó “Canary”, un documental que, a través de su relato nos plantea el reto de asumir un compromiso con el planeta.

En la década de **1970**, el investigador estadounidense Lonnie Thompson, de la Universidad de Ohio, propuso una idea sin precedentes: perforar el glaciar Quelccaya, en la cordillera Vilcanota, para extraer testigos de hielo y analizar los cambios climáticos del pasado. Esta propuesta no fue recibida con mucho entusiasmo. Como recuerda Portocarrero, en aquel tiempo la investigación glaciológica en los Andes estaba más enfocada en la prevención de desastres, dado el historial de avalanchas y desbordes de lagunas glaciares en otras regiones del Perú, como las ocurridas en la cordillera Blanca.

Desde el inicio, la expedición enfrentó numerosas dificultades. En el ámbito científico, existían dudas sobre la viabilidad de realizar perforaciones a más de 5600 m s. n. m. , debido a que nunca se había intentado realizar una actividad de este tipo en glaciares tropicales. A nivel local, algunos sectores veían la expedición con recelo, sospechando que la verdadera intención era la búsqueda de minerales valiosos o uranio.

Además de la falta de financiamiento y la incredulidad de la comunidad científica, el equipo tuvo que enfrentar las duras condiciones climáticas del entorno. El frío extremo, la altitud y la complejidad del terreno hicieron que la primera expedición fuera un verdadero reto. A pesar de ello, la determinación del equipo, con el apoyo de especialistas del Instituto Geológico Minero (INGEOMIN), permitió que la investigación siguiera adelante. Y es así que, en 1974, el Instituto de Estudios Polares de la Universidad de Ohio (Estados Unidos) estableció un convenio con INGEOMIN del Perú para iniciar la investigación.

TRAS MÚLTIPLES OBSTÁCULOS, SE LOGRÓ EL COMETIDO: EL QUELCCAYA SE CONVIRTIÓ EN EL PRIMER GLACIAR TROPICAL EN SER PERFORADO PARA ESTUDIOS PALEOCLIMÁTICOS.



Los testigos de hielo extraídos revelaron información invaluable sobre el clima de los últimos milenios y consolidaron al glaciar Quelccaya como un archivo natural de la historia climática del planeta. Hoy, más de 40 años después, los descubrimientos de aquella expedición siguen siendo una referencia clave para comprender los efectos del cambio climático en los Andes y en el mundo.



Primera perforadora de hielo accionada por energía solar en 1983

«El glaciar Quelccaya es único porque se asemejaba a una capa de hielo de latitudes bajas.»

Ing. César Portocarrero

La elección del Quelccaya como sitio de estudio no fue casualidad. En la década de 1970, el glaciólogo inglés John Mercer identificó, en fotografías aéreas, a este casquete de hielo en el sur del Perú como una oportunidad única para obtener registros paleoclimáticos.

La primera expedición de reconocimiento se realizó entre junio y julio del mismo año, teniendo como principal objetivo explorar las rutas de acceso y evaluar la logística. El equipo, liderado por Mercer y Thompson, viajó desde Lima hasta Sicuani y luego avanzó a pie con el apoyo de mulas durante dos días, hasta llegar a la base del Quelccaya. Junto a ellos estuvieron el geólogo Marino Zamora Cobos y el glaciólogo Alcides Ames Márquez, ambos de la ex Unidad de Glaciología y Seguridad de Lagunas de INGEOMIN.



Vehículo en el que se realizó parte del recorrido del primer viaje de exploración científica al Quelccaya, en la ruta Lima - Sicuani, 1974.

«Los primeros viajes se efectuaron siguiendo la ruta Sicuani, Baños de Uyurmiri, Santa Bárbara hasta el lugar denominado Socopalca que era el final de la vía carrozable. A partir de este lugar, se iniciaba la caminata de dos días, la primera jornada era hasta la localidad de Marcapatilla en ocho horas aproximadamente, donde se pernoctaba en carpas y el siguiente día se cumplía el viaje hasta la base del glaciar Quelccaya.»

Ing. César Portocarrero

En esa primera expedición, se excavó un pozo en la cúpula del glaciar para medir la densidad y la temperatura de la nieve. Además, se recolectaron muestras para análisis de micropartículas e isótopos. En los siguientes años, se llevaron a cabo expediciones glaciológicas durante la temporada seca (junio - julio) de los años 1976, 1977 y 1978. Cada campaña requirió de al menos 20 animales de carga para transportar víveres y equipos.

1



2



Campamento base a partir del que se inició la travesía hacia la cumbre del Quelccaya, en 1978 (fotografía 1). La fotografía 2, capturada en junio de 2025, muestra el mismo lugar donde se localizó dicho campamento.



Estación meteorológica instalada para los trabajos de perforación realizados en la cumbre del glaciar en 1978.



Traslado de logística en una de las expediciones del glaciar Quelccaya (1978).

En ese entonces, el trabajo en el Quelccaya no solo consistió en recolección de muestras. Se cartografió la meseta de hielo con teodolito y se completó un mapa a escala 1:25 000, con curvas de nivel adicionales. Se realizó la primera estimación de la elevación de la cumbre en aproximadamente 5650 m s. n. m. Además, se instalaron estacas de acumulación y ablación para evaluar cambios en la capa de hielo; y estaciones meteorológicas automáticas para registrar temperatura, viento y radiación solar.

En esos años, el monitoreo de los glaciares en el Perú aún estaba en sus primeras etapas. Eran tiempos en los que el fenómeno del calentamiento global todavía no era ampliamente aceptado en la comunidad científica. Sin embargo, el equipo tuvo una visión acertada sobre el acelerado derretimiento de los glaciares, por lo que en 1977 comenzó a documentar con fotografías los cambios en las lenguas glaciares y la formación de lagunas en las áreas que dejaban los hielos en retroceso. Las imágenes tomadas desde 1977 evidenciaron con claridad la disminución progresiva de la capa glaciar del Quelccaya.



Fotografías que muestran el retroceso en la capa glaciar del Quelccaya en el sector Paco. En la fotografía 1, de 1978, se observa el glaciar, mientras que en la fotografía 2 (2025), se observa una laguna como evidencia de lo que alguna vez fue glaciar. Por otra parte, en la fotografía 3, del año 2006, se observa que entre el glaciar y la roca se había formado una laguna. En la fotografía 4, tomada el 2025, el acelerado retroceso glaciar.

En 1983, tras años de intentos y mejoras en la metodología, se logró la primera perforación profunda en el Quelccaya, alcanzando la roca base a 164 m de profundidad. En dicho año, se extrajeron núcleos de hielo que revelaron información sobre los cambios climáticos de los últimos 1500 años. A partir de los análisis de isótopos, micropartículas y composición química en los núcleos, se reconstruyeron patrones climáticos pasados, confirmando periodos de sequía, variaciones de temperatura y correlaciones con eventos históricos.

El éxito del proyecto posicionó al Quelccaya como un archivo natural invaluable y sentó las bases para futuras investigaciones en glaciares tropicales de todo el mundo. Hoy, más de 50 años después, este trabajo sigue siendo una referencia clave en la paleoclimatología y la comprensión del cambio climático en los Andes.

ANÉCDOTAS Y DESAFÍOS INICIALES

Las primeras expediciones al Quelccaya no solo enfrentaron retos científicos, sino también situaciones inesperadas que pusieron a prueba la creatividad y resiliencia del equipo. Un desafío fue el transporte de materiales, herramientas y víveres.

Cada expedición necesitaba entre 20 y 40 acémilas para trasladar todo lo necesario hasta el glaciar, lo cual no siempre era fácil de conseguir.

En 1978, la situación mejoró, debido a que la comunidad de Santa Bárbara facilitó animales de carga y guías locales para el equipo.

En ese entonces, llegar hasta el Quelccaya tomaba dos días a pie, con jornadas de hasta diez horas y una noche de descanso en Marcapatilla. Mientras los materiales y equipos eran transportados en acémilas, los investigadores realizaban la ruta caminando, enfrentando las condiciones del clima y la falta de oxígeno del lugar.



Caminata con caballos para carga entre Socopalca y Marcapatilla (1978)

Uno de los momentos más retadores sucedió en **1979**, cuando se intentó usar un helicóptero para llevar un grupo electrógeno hasta la cumbre y facilitar las perforaciones de hielo. Todo estaba listo: un cielo despejado y el equipo esperando. Pero tras un vuelo de reconocimiento, el piloto decidió cancelar la operación, debido a que las condiciones climáticas adversas ponían en riesgo el despegue del helicóptero. Aunque la noticia fue un golpe duro, el equipo tuvo que continuar las labores sin el grupo electrógeno y con los métodos tradicionales.



Intento fallido del uso del helicóptero para llevar el grupo electrógeno a la cumbre del Quelccaya (1979).

Los trabajos de investigación en Quelccaya evolucionaron, a través del tiempo, conforme la ciencia y tecnología han avanzado en los últimos años. Durante los primeros años, los trozos de hielo se derretían en el campamento y se almacenaban en pequeñas botellas de plástico, para luego ser transportadas en acémilas hasta Cusco y ser enviadas al extranjero. Después, esta técnica fue reemplazada por el uso de tubos térmicos, que permitieron trasladar muestras más grandes y mejor conservadas. Asimismo, en 1983, se logró perforar hasta la roca base del glaciar gracias a una perforadora manual impulsada por energía solar, que fue diseñada en la Universidad de Lincoln de Estados Unidos.

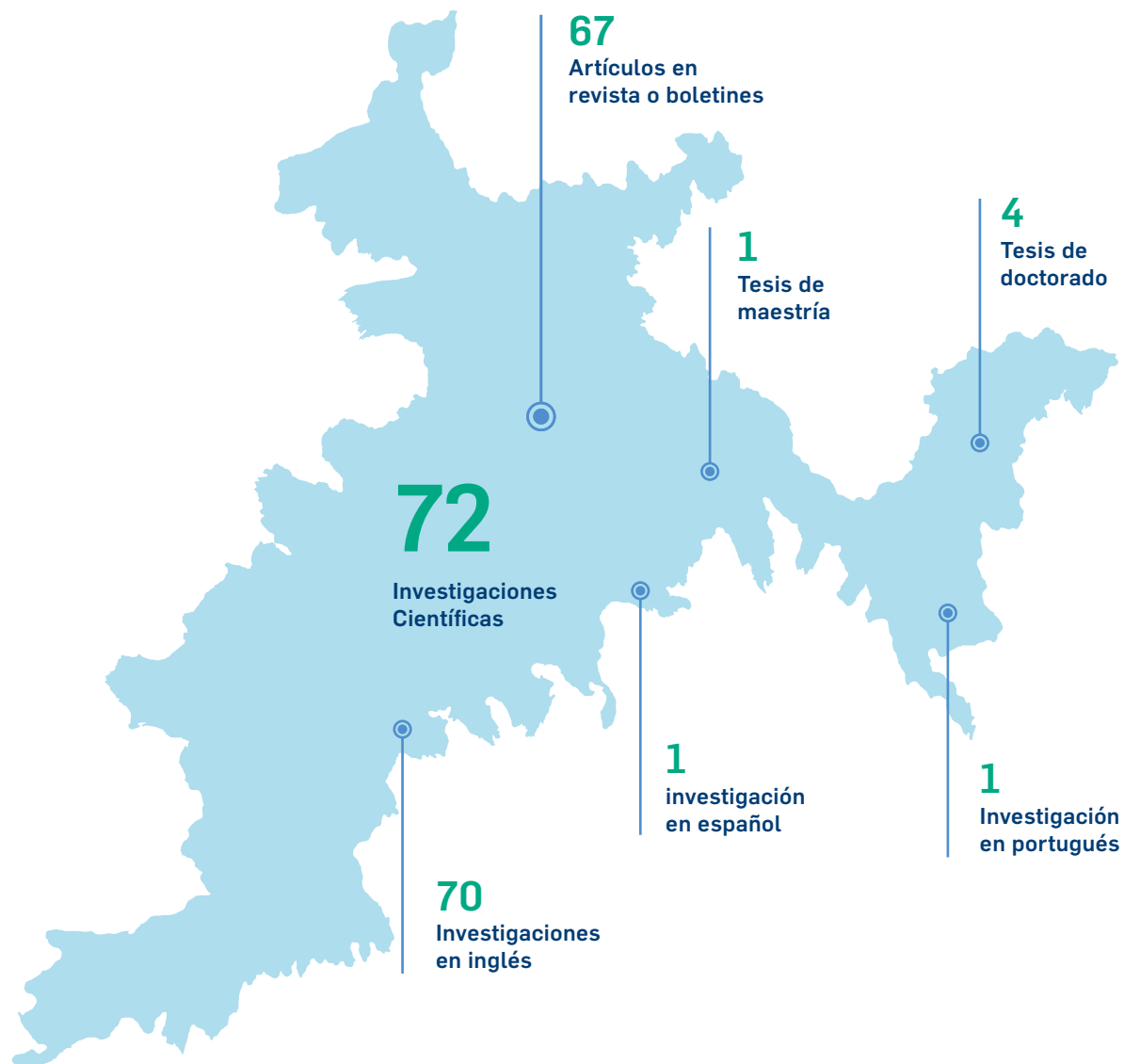
INVESTIGACIONES EN EL GLACIAR

Desde la primera expedición científica en los años setenta hasta la actualidad, el Quelccaya ha sido uno de los laboratorios naturales más estudiados en los trópicos. En estas cinco décadas, investigadores de distintas partes del mundo han analizado su evolución, su interacción con el clima y su impacto en los ecosistemas circundantes.

Los primeros estudios se centraron en la extracción de núcleos de hielo para reconstrucciones paleoclimáticas, revelando cambios climáticos del último milenio. Sin embargo, en las últimas dos décadas, la preocupación por el retroceso glaciar y su impacto en los recursos hídricos ha llevado a un aumento significativo en la producción científica sobre el Quelccaya. Hasta el 2024, se han identificado más de 70 estudios científicos dedicados exclusivamente a este glaciar, que han aportado información clave para entender el pasado y estimar escenarios para el futuro (ver figura 2-1).

Figura 2-1

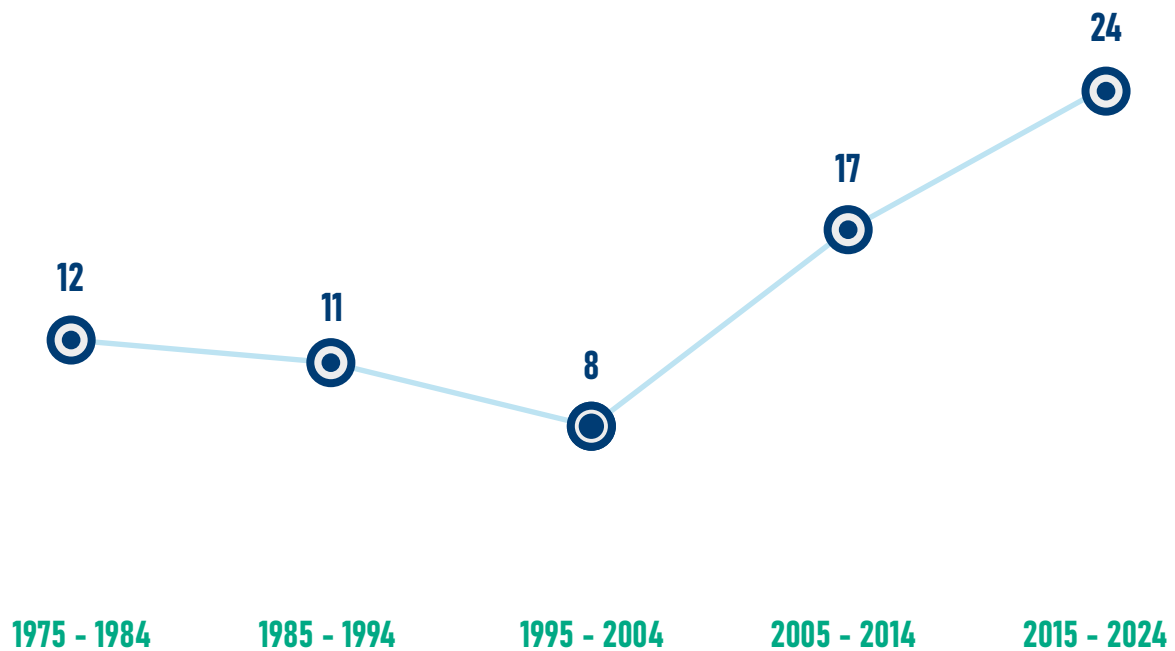
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS SOBRE EL QUELCCAYA.



Entre 1975 y 2004, la producción científica sobre el Quelccaya avanzó lentamente (ver figura 2-2), con un promedio de una publicación por año, enfocada principalmente a temas climatológicos, como la paleoclimatología y cambios climáticos pasados. A partir del 2005, las investigaciones aumentaron notablemente, alcanzando un pico de cinco publicaciones en 2015. En este período, las temáticas más recurrentes fueron la climatología, abordando la paleoclimatología y el cambio climático actual; y la glaciología con el retroceso glaciar, reflejándose así la creciente preocupación sobre los cambios acelerados que está sufriendo el Quelccaya.

Figura 2-2

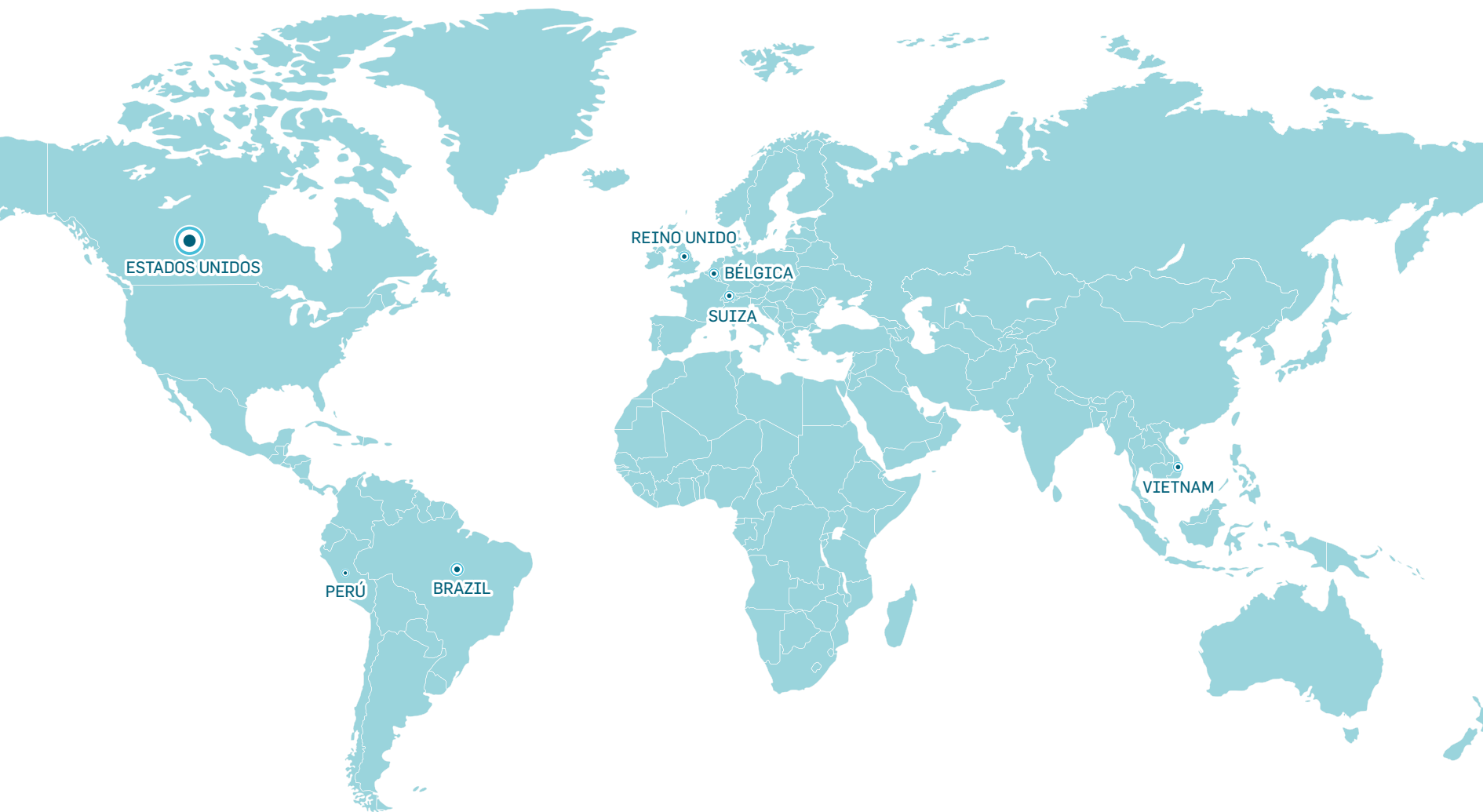
EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



Estados Unidos, Brasil, Suiza y otros países han contribuido con estudios clave, liderados por instituciones como la Universidad Estatal de Ohio, Universidad de Dartmouth y Universidad de Wisconsin (ver figura 2-3). Esta diversidad de actores refleja la importancia global del Quelccaya en la investigación científica. A través de métodos que van desde el análisis de núcleos de hielo hasta el uso de imágenes satelitales, la ciencia ha revelado tendencias alarmantes en la disminución de la masa glaciar, la variabilidad de sus acumulaciones de nieve y la influencia de fenómenos como El Niño y el calentamiento global.

Figura 2-3

DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE PUBLICACIONES SEGÚN LA AFILIACIÓN DE LOS AUTORES PRINCIPALES



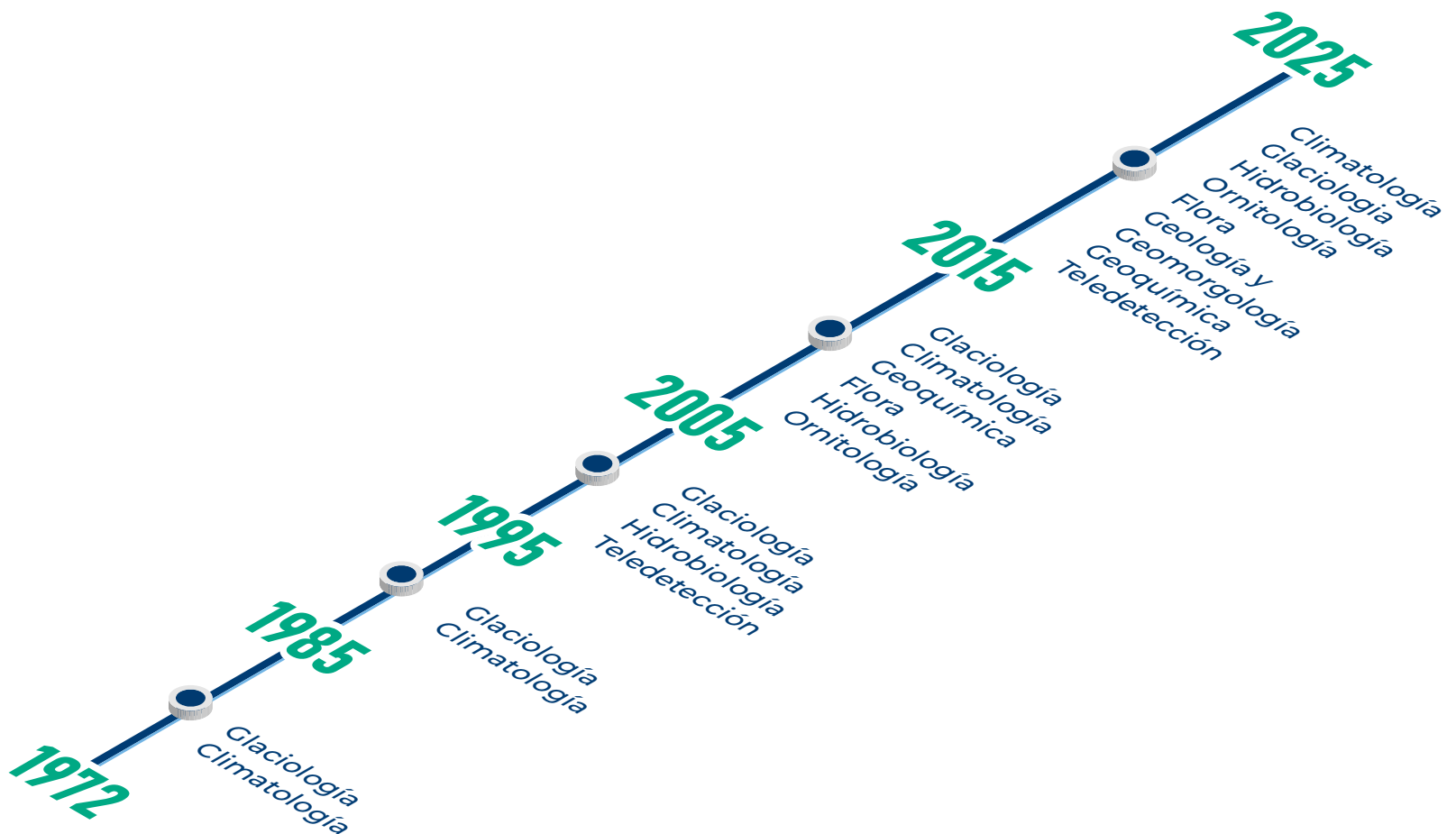
Aunque la mayor parte de estos estudios ha sido liderada por instituciones extranjeras, el Perú ha tenido participación en estas investigaciones. Desde 1977, expertos peruanos han participado como autores principales en una publicación y como coautores en 13 estudios. Las instituciones nacionales que han contribuido con estas investigaciones provienen del Instituto de Geología y Minería (actual Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico), Electro Perú (actual Empresa de Electricidad del Perú), la ANA, el INAIGEM y universidades como la Universidad Nacional Agraria La Molina, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Universidad Peruana Cayetano Heredia, Pontificia Universidad Católica del Perú, entre otras.

Uno de los investigadores más influyentes en el estudio del Quelccaya es Lonnie Thompson, climatólogo y glaciólogo estadounidense de la Universidad Estatal de Ohio. Tras participar en 34 investigaciones realizadas en el glaciar y al menos 18 como autor principal, ha sido un pionero en la perforación de núcleos de hielo para el estudio del cambio climático y la paleoclimatología en los Andes peruanos.

Durante los primeros 20 años, el interés se centró principalmente en la glaciología y la climatología, especialmente en la reconstrucción del clima histórico a través del análisis de núcleos de hielo. Aunque estas disciplinas siguen siendo relevantes, a partir de 1995 su abordaje se ha centrado en el retroceso glaciar, la pérdida de masa de hielo y los efectos del cambio climático. Además, en las últimas décadas se han explorado nuevos temas de investigación como la teledetección, hidrobiología, geoquímica, botánica, ornitología, geología y geomorfología, ampliándose así el conocimiento sobre el Quelccaya (ver figura 2-4).

Figura 2-4

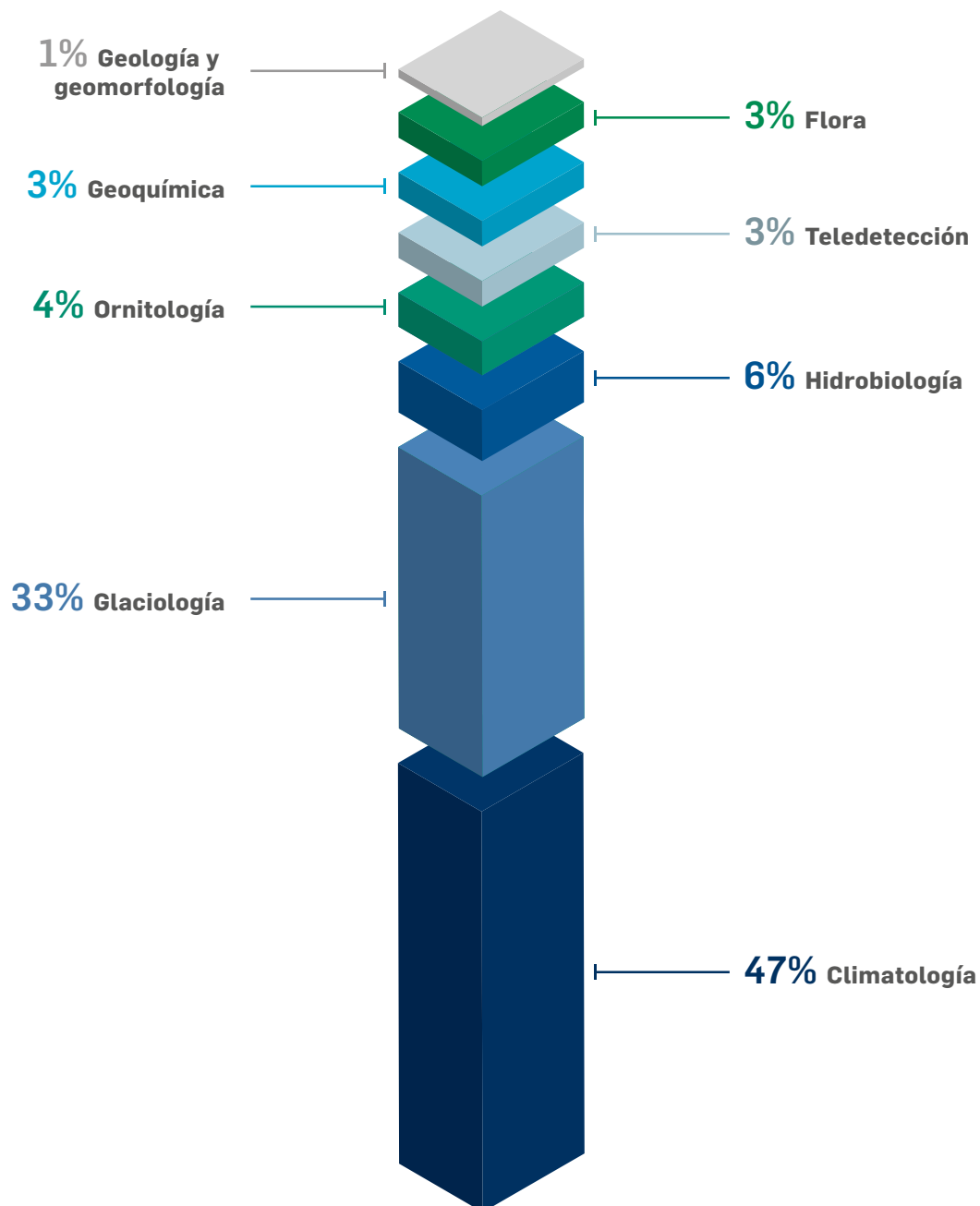
LÍNEA DE TIEMPO DE LOS TEMAS ABORDADOS EN LAS INVESTIGACIONES



Sin embargo, esta aparente diversidad temática esconde una gran desproporción, ya que los temas emergentes abordados en las últimas décadas solo representan el 20% del total de estudios científicos. En cambio, la climatología (47%) y la glaciología (33%) siguen dominando la investigación del glaciar, con 58 de los 72 estudios identificados (ver figura 2-5). Esta concentración evidencia una gran necesidad de ampliar y profundizar en temas críticos como los relacionados a los servicios ecosistémicos, los procesos de degradación, y su relación con otros ecosistemas presentes en su entorno. Comprender estos aspectos sería clave para entender no solo al Quelccaya, sino también a todo lo que depende de este glaciar.

Figura 2-5

DISTRIBUCIÓN DE LOS TEMAS ABORDADOS EN LAS INVESTIGACIONES



A continuación, presentamos un resumen de los principales hallazgos científicos sobre uno de los glaciares tropicales más extensos del mundo.

PUBLICACIONES DE LOS AÑOS 1975 A 1984

Las primeras publicaciones sobre el glaciar Quelccaya se centraron en las perforaciones de hielo, las mediciones de micropartículas, isótopos de oxígeno y radiactividad beta para analizar su registro climático. Para esos años, era considerado el casquete tropical de hielo más grande del mundo, con unos 70 km² de superficie.

Uno de los principales hallazgos en este periodo fue que la acumulación de nieve varió estacionalmente. Las micropartículas y la radiactividad beta fueron más altas en la temporada seca, mientras que los valores de isótopos de oxígeno mostraron un patrón inverso al de los glaciares de las regiones polares. Además, dataciones de carbono-14 en las morrenas indicaron que el casquete de hielo no era significativamente más grande hace 11 000 años.

Los estudios también establecieron que el Quelccaya contenía un valioso registro paleoclimático, debido a su estratigrafía bien conservada. Se determinó que la radiación solar y el albedo influían en la ablación del hielo, aunque esta fue mínima en el casquete por causa de las temperaturas bajo cero. Además, en este periodo, se determinó que su superficie presentaba una gran variedad de microformas, cuya distribución estaba muy influenciada por el balance térmico y las condiciones de temperatura.

El análisis de un núcleo de hielo, evidenció que las condiciones climáticas locales y regionales, así como los patrones de precipitación y circulación atmosférica, influyen en la preservación de estos registros de hielo.

Por otro lado, en el sector Qori Kalis del Quelccaya se evidenció un retroceso glaciar significativo de más de 100 m, producido entre 1963 y 1978. Esto coincidía con el comportamiento de otros glaciares tropicales. Asimismo, se registró una disminución del 30% en la acumulación de nieve entre 1964 y 1983, especialmente en años de eventos como El Niño, sugiriendo una posible relación con la Oscilación del Sur (ENOS).

PUBLICACIONES DE LOS AÑOS 1985 A 1994

Los estudios en el glaciar Quelccaya continuaron proporcionando información valiosa sobre su estratigrafía, su respuesta a variaciones climáticas pasadas y su papel como archivo paleoclimático. Se determinó que los perfiles de silicato reactivo, hierro reactivo y sodio en el hielo coincidían con las concentraciones de micropartículas, lo que indicaba un origen común asociado a la meteorización local de la corteza terrestre. Además, se confirmó que la acumulación de estos elementos estaba influenciada por la dirección del viento y la acumulación de la nieve, con concentraciones más altas en la temporada seca. El análisis de isótopos de oxígeno, que abarcó aproximadamente 1500 años, desde alrededor del 480 a.C. hasta 1983, permitió comprender mejor la influencia de la circulación atmosférica sobre la cuenca del Amazonas y los procesos locales de evaporación y sublimación en el casquete de hielo, revelando un patrón estacional que contrastaba con los glaciares en latitudes medias y altas.

Uno de los avances tecnológicos más significativos de esta década fue la implementación de paneles solares fotovoltaicos, cuyo fin fue alimentar un taladro de perforación de núcleos de hielo a gran altitud. Un sistema de 2 kW permitió perforar hasta el lecho rocoso en condiciones extremas sin fallos operativos, lo que demostró la viabilidad de esta fuente de energía, que evita la contaminación asociada por el uso de combustibles fósiles.

En este periodo, el estudio de los núcleos de hielo reveló que la Pequeña Edad de Hielo fue un evento climático significativo y de alcance global; y que los cambios climáticos abruptos ocurrieron de manera rápida en el trópico de América del Sur, con tres períodos clave:

- **El inicio de la Pequeña Edad de Hielo, alrededor de 1490, marcado por un aumento abrupto en las partículas solubles e insolubles.**
- **La terminación de este período alrededor de 1880, con una disminución brusca en las partículas y un aumento en las temperaturas medias.**
- **La sequía de 1933 - 1945, caracterizada por un aumento en las concentraciones de micropartículas y conductividad, y una disminución en la acumulación de nieve.**

Los análisis también evidenciaron la influencia de la variabilidad climática en la acumulación de hielo y en la deposición de partículas en Quelccaya. Se identificaron episodios de polvo en los años 920 y 600 d.C., que coincidieron con períodos de sequía y cambios ambientales significativos en la región, posiblemente asociados con la actividad agrícola preincaica. Asimismo, se estableció una relación entre los registros de acumulación neta de nieve en los últimos 1500 años y las fluctuaciones en los niveles del lago Titicaca, lo que reforzó la utilidad de Quelccaya como un proxy climático para la región andina.

La interacción entre actividad volcánica y clima también quedó reflejada en los registros de hielo. Se detectó la señal de la erupción del Tambora, volcán localizado en Indonesia, que en 1815 tuvo un impacto global en el clima. Se identificó, en los núcleos de hielo del Quelccaya, picos en la conductividad y el sulfato en 1817, probablemente relacionados con la erupción.

Otro hallazgo clave fue la relación entre cambios climáticos y sociedades prehispánicas. Se determinó que una sequía extrema entre 562 y 594 d.C. tuvo un impacto significativo en la cultura Mochica, contribuyendo a su declive y a la reubicación de asentamientos hacia zonas con mayor acceso a fuentes de agua. Asimismo, se identificaron dos eventos importantes de polvo alrededor de los años 920 y 600 d.C., cuyas causas podrían estar relacionadas con actividades humanas prehistóricas, como el uso de campos elevados cerca del lago Titicaca. Estos datos sugirieron que las variaciones climáticas jugaron un papel determinante en la evolución de civilizaciones andinas, afectando directamente su desarrollo y supervivencia.

Finalmente, estudios comparativos con otros núcleos de hielo en Asia Central revelaron que el calentamiento reciente en los trópicos y subtrópicos es más acelerado que en las zonas polares, sin precedentes en el Holoceno. Este hallazgo indica que los glaciares tropicales son particularmente sensibles a los cambios climáticos; y que su rápida desintegración podría llevar a la pérdida irreversible de registros paleoclimáticos esenciales para comprender la historia del clima en la región andina y el mundo.

PUBLICACIONES DE LOS AÑOS 1995 A 2004

Durante este decenio, los estudios en el glaciar Quelccaya avanzaron en la comprensión de su papel en las teleconexiones climáticas y la dinámica atmosférica. Se descubrió que los registros de acumulación neta del Quelccaya y del casquete de hielo de Guliya, en el Tíbet, presentaban sorprendentes similitudes en sus períodos de sequía y humedad durante los últimos 2000 años, lo que sugería una conexión climática de baja frecuencia entre ambos sistemas, a pesar de estar separados por más de 20 000 km. Además, se identificó una relación entre eventos de alta frecuencia, como el ENOS y estos patrones de acumulación, proporcionando una perspectiva temporal más amplia sobre los vínculos climáticos a escala global. Otro estudio mostró que la variabilidad decenal en la actividad de El Niño, registrada en el Quelccaya, tenía una correlación significativa con los patrones de precipitación en el oeste de Estados Unidos durante los últimos 1200 años.

El balance energético del glaciar también fue objeto de investigación. Se encontró que el alto albedo superficial en las zonas de mayor elevación limitaba la absorción de radiación solar, promoviendo la sublimación como el principal mecanismo de ablación mientras que, en zonas más bajas, la disminución del albedo aumentaba la fusión del hielo. Este proceso se veía acentuado por el crecimiento del tamaño de los granos de nieve y la acumulación de impurezas, lo que reducía aún más el albedo y favorecía la pérdida de masa glaciar. Además, en los núcleos de hielo, se analizaron

ciclos climáticos significativos en la serie isotópica de oxígeno, identificando patrones de variabilidad decenal en los últimos 500 años. Estas variaciones mostraron una fuerte correlación con la temperatura superficial del mar en el Atlántico Norte tropical. Se concluyó que estos cambios eran el resultado del transporte de vapor de agua desde el océano hasta el glaciar, reforzando la idea de que el Quelccaya es un registro confiable de las condiciones climáticas oceánicas con influencia en la región andina.

Los avances tecnológicos en la medición de la extensión de la superficie glaciar permitieron mejorar la precisión en la delimitación de los bordes glaciares mediante imágenes satelitales. Se comprobó que las imágenes Landsat podían estimar la extensión glaciar con más del 90% de precisión con un procesamiento mínimo, lo que facilitó el monitoreo de los cambios a lo largo del tiempo. Estos avances contribuyeron a obtener hallazgos sobre la rápida deglaciación del Quelccaya, identificando que las tasas de deglaciación más rápidas (entre 39×10^{-5} y 247×10^{-5} km³/año) ocurrieron durante los últimos siglos, coincidiendo con el retroceso acelerado de los glaciares desde la Pequeña Edad de Hielo. Estas tasas eran consistentes con las observaciones modernas en el Quelccaya, donde se ha registrado un aumento exponencial en la pérdida de volumen glaciar desde la década de 1960.

Se obtuvo un registro excepcional de polen en el casquete de hielo de Quelccaya, con concentraciones que superaban cualquier otro entorno glaciar conocido, presentando valores que oscilaron entre 17 250 y 55 400 granos por litro. Se encontró que la distribución del polen estaba influenciada por los vientos predominantes y las dinámicas locales de los vientos diurnos, sugiriendo que estos registros pueden proporcionar información detallada sobre cambios en la vegetación y los patrones de viento en el pasado. Por otro lado, se identificaron errores en la datación de los núcleos de hielo previos debido al uso de metodologías subjetivas. Por ello, se optó por alinear y fusionar los perfiles de isótopos de oxígeno de distintos núcleos para la comparación de anomalías de polvo con eventos de terremotos históricos, lográndose una datación más precisa, mejorando la resolución subanual de los registros y permitiendo una reconstrucción más detallada de eventos climáticos como el ENOS.

PUBLICACIONES DE LOS AÑOS 2005 A 2014

Durante el decenio 2005 - 2014, la investigación sobre los glaciares tropicales andinos reveló cambios ambientales sin precedentes. El retroceso del Quelccaya fue un tema central, con estudios que demostraron que su reducción no tuvo precedentes en los últimos 5000 años. La exposición de plantas previamente cubiertas por el hielo, desde hace aproximadamente 1800 años, mostraron un retroceso significativo desde 1978, y revelaron que, el glaciar es más pequeño ahora que en cualquier momento de los últimos seis milenios. Los hallazgos de restos vegetales indicaron que, hace 5000 años, la zona albergó vegetación característica de humedales antes de ser cubierta por el glaciar.

Los glaciares andinos mostraron variaciones significativas como respuesta al cambio climático a lo largo de milenios. El Quelccaya comenzó su retroceso tras el Último Máximo Glacial hace 17 200 años, con avances puntuales como el registrado durante el Dryas Reciente⁴. El análisis de núcleos de hielo del Quelccaya permitió reconstruir la química atmosférica pasada, aunque el último calentamiento está alterando estos registros. Los estudios en el sector Qori Kalis del glaciar sugieren que la temperatura, más que la acumulación de nieve, ha sido el principal motor de los cambios glaciares en el Holoceno tardío, en sincronía con otros eventos fríos globales.

El Quelccaya experimentó un ascenso de su línea de nieve y un acelerado retroceso en los sectores de menor altitud, lo que favoreció el crecimiento de lagos periglaciares con riesgos asociados de inundaciones. El impacto del calentamiento también se reflejó en la vegetación y las comunidades locales. En los Andes, el ascenso del límite altitudinal de las plantas y la homogeneización de la vegetación han sido impulsados por el aumento de temperaturas y la reducción de la temporada de lluvias. Frente a estos cambios, las comunidades locales han desarrollado estrategias de adaptación como el manejo del ganado y la modificación de cultivos, aunque la falta de integración de estos conocimientos en políticas regionales sigue siendo un desafío.

Se evidenció que el calentamiento global no tiene precedentes en los últimos 2000 años, con una elevación progresiva del nivel de congelación en los glaciares tropicales que ha intensificado el derretimiento glaciar. En los Andes tropicales, las temperaturas aumentaron a un ritmo de aproximadamente 0.1 °C por década en los últimos 50 años, lo que llevó a un aumento en el derretimiento superficial de los glaciares. Esta tendencia, sumada al acelerado retroceso del hielo, demuestra que los glaciares tropicales se encuentran en una fase de pérdida irreversible, con importantes implicaciones para la disponibilidad de agua y los ecosistemas de la región.

Otro punto clave hallado en las investigaciones publicadas en este decenio, fue la relación entre los cambios climáticos y la dinámica atmosférica. Los registros isotópicos en los núcleos de hielo del Quelccaya mostraron que las variaciones en la temperatura superficial del océano Pacífico y el nivel del lago Titicaca influyeron en la composición del hielo, más que los cambios locales de temperatura y precipitación. La conexión entre los eventos climáticos extremos y la acumulación de hielo también quedó en evidencia. Durante los años de El Niño y La Niña, las concentraciones de polen en el Quelccaya variaron de forma notable, pues reflejaron alteraciones en los patrones de viento y en la floración de los ecosistemas circundantes.

A nivel histórico, la actividad minera ha dejado una huella notable en la cordillera Vilcanota, a la que pertenece el glaciar Quelccaya. Registros en la laguna no glacial Yanacocha, localizada en el entorno del glaciar,

⁴ El Dryas Reciente fue una fase glacial fría y seca que expandió los hielos en montañas globalmente (Davis et al., 2009; mencionado por García-Ruiz et al., 2016)

muestran un incremento en la deposición de mercurio desde el 1450 a.C., hecho vinculado a la minería preincaica y, posteriormente, a la explotación colonial.

Por último, uno de los descubrimientos más llamativos en este periodo fue el hallazgo de un ave que hacía su nido en el hielo del Quelccaya. Esta ave, White-winged diuca finch (*Diuca speculifera*), hecho considerado un comportamiento sin precedentes en aves paseriformes, lo que sugiere una sorprendente adaptación a condiciones extremas.

PUBLICACIONES DE LOS AÑOS 2015 A 2024

En este último decenio de investigaciones se reveló la profunda sensibilidad del Quelccaya a los cambios climáticos, particularmente a las variaciones de temperatura. Los estudios mostraron que un enfriamiento de apenas 1 °C puede provocar un avance glaciar entre uno y cuatro veces mayor que un aumento del doble en la precipitación, destacando el papel dominante de la temperatura en la dinámica glaciar. Sin embargo, en las últimas décadas, la capa de hielo del Quelccaya ha experimentado un retroceso acelerado, perdiendo el 37% de su área total y el 58% de su cobertura de nieve entre 1985 y 2022, exacerbando estas pérdidas en los años que se ha producido el fenómeno El Niño. Las proyecciones climáticas bajo escenarios de altas emisiones sugirieron que la capa de hielo del Quelccaya podría desaparecer hacia mediados de este siglo, una vez que la línea de equilibrio glaciar supere su cumbre.

Se evidenció que la acumulación de nieve en el Quelccaya estaba estrechamente vinculada a patrones atmosféricos complejos, donde más del 70% de la precipitación se asoció con incursiones de aire frío desde latitudes medias, las cuales también influyeron en la humedad de la cuenca amazónica. El aumento de las temperaturas aceleró el adelgazamiento del hielo, con una pérdida promedio de 4.4 m en la cima y hasta 63.4 m en los márgenes occidentales. Los sedimentos en lagos como Challpacocho revelaron que los periodos de retroceso glaciar, como el ocurrido desde ~1490 a 1970, están marcados por un aumento en la deposición de sedimentos clásticos, evidenciando una mayor erosión asociada al deshielo. Estos registros mostraron cómo los glaciares tropicales actúan como indicadores sensibles de las fluctuaciones climáticas.

Una de las observaciones importantes de esta última década fue la presencia de aves que anidan directamente sobre el hielo del Quelccaya, como el fringilo glaciar (*Diuca speculifera*) y la dormilona de frente blanca (*Muscisaxicola albifrons*), especies que han desarrollado adaptaciones únicas para sobrevivir en condiciones extremas a más de 5200 m s. n. m. Estas observaciones no solo mostraron la biodiversidad de los ecosistemas glaciares, sino también su vulnerabilidad ante el calentamiento global, ya que la retracción de los glaciares podría eliminar hábitats críticos para estas aves.

Los núcleos de hielo del glaciar proporcionaron valiosos registros paleoclimáticos, aunque su interpretación requiere precaución. Las diatomeas preservadas en el hielo, principalmente de géneros como *Hantzschia*, *Pinnularia* y *Aulacoseira*, sugieren un transporte por viento desde lagos o humedales altoandinos, ofreciendo pistas sobre los patrones de transporte eólico en el pasado. Además, en este decenio, los estudios indicaron que las señales isotópicas en el hielo están más influenciadas por la dinámica del monzón sudamericano y no estrictamente relacionada con la temperatura, lo que redefine su uso en reconstrucciones climáticas. Sin embargo, el calentamiento reciente de los Andes está afectando de forma significativa la preservación de los registros climáticos en los glaciares peruanos, en especial durante eventos fuertes como El Niño de 2015/16, que enriqueció isotópicamente la nieve y redujo la acumulación neta en un 64%.

La contaminación antropogénica también ha dejado huella en el Quelccaya, con niveles elevados de antimonio, zinc y cromo en el hielo, particularmente durante la temporada húmeda, lo que demuestra el alcance del impacto de la industrialización y la urbanización incluso en ecosistemas remotos. Pese a esto, los registros de elementos traza (como hierro, magnesio, potasio) en núcleos profundos permitieron reconstruir variaciones climáticas con precisión, incluso en capas cercanas al lecho rocoso, donde podrían preservarse hasta mil años adicionales de historia climática. Estos avances técnicos, junto con el uso de modelos climáticos como ERA5, han mejorado la comprensión de las interacciones entre la atmósfera y los glaciares, aunque persisten desafíos debido a la rápida degradación de estos archivos naturales.

El retroceso glaciar en los Andes tropicales ha transformado drásticamente el paisaje. La cordillera Vilcanota, a la que pertenece el Quelccaya, perdió un 48% de su área glaciar entre 1975 y 2015, especialmente en altitudes inferiores a 5000 m s. n. m. Bajo escenarios de calentamiento global, se proyectó que los glaciares podrían reducirse entre 40% y 93% para 2100, dejando solo remanentes en las cumbres más altas. Este declive tendría implicaciones profundas para los recursos hídricos, ya que los glaciares son cruciales para el suministro de agua durante la temporada seca. Curiosamente, las turberas altoandinas, alimentadas principalmente por aguas subterráneas y no por deshielo glaciar, podrían ser más resilientes de lo esperado, aunque su futuro depende de cambios en los patrones de lluvia. Estos hallazgos resaltan la urgencia de fortalecer las estrategias de adaptación en un escenario de pérdida acelerada de glaciares y creciente incertidumbre climática.



3

LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL

QUELCCAYA

WILFREDO CHÁVEZ | RICARDO VILA
ARACELY MACHACA | RENNY DÍAZ
BRUSS HUACHACA | YAQUELINE ABRELLA



Para entender la complejidad del Quelccaya no basta solo con observar la superficie extensa y casi plana del casquete de hielo. También es necesario sumergirse en los ecosistemas de su entorno,, su historia geológica y las dinámicas del clima que lo moldean y lo transforman.

Este capítulo explora las características físicas del glaciar: desde su topografía y formas del terreno, hasta su geología profunda y su comportamiento frente al clima. Es una mirada integral para entender las condiciones naturales que condicionan su existencia.



UN CLIMA DE CONTRASTES

Para los pueblos quechua, el clima no es solo una condición ambiental, sino una presencia viva que orienta decisiones, ciclos agrícolas, rituales e incluso el ánimo cotidiano. Las heladas intensas, las lluvias o los días inusualmente cálidos son interpretados no solo como fenómenos físicos, sino como señales enviadas por los *Apus*, las deidades montañosas que habitan el paisaje andino, y rigen los ciclos de cultivo y pastoreo (Carey, 2010).

A lo largo de generaciones, estas comunidades han desarrollado un conocimiento ecológico tradicional que les permite interpretar sutiles indicadores climáticos: desde el comportamiento de ciertas aves hasta patrones de floración, de acuerdo a los ritmos que marca el glaciar.



Una mujer avanza firme hacia su estancia, envuelta en el aire gélido, mientras el paisaje andino se encuentra cubierto de nieve.

Este saber ancestral no está desvinculado del conocimiento científico moderno, que encuentra en el Quelccaya un laboratorio natural único, donde ambas perspectivas pueden complementarse. Las capas de hielo almacenan registros milenarios de la atmósfera, revelando no solo cambios climáticos, sino también su impacto en las sociedades humanas y su entorno. Como señalan Thompson et al. (2013), el Quelccaya es uno de los “archivos naturales del clima pasado”, donde el hielo preserva la historia atmosférica de siglos. En un contexto de crisis climática global, estudiar su clima no es solo una tarea técnica, sino una herramienta para anticipar cambios, adaptarse y proteger los modos de vida que dependen de él.

Para mantener el hielo perenne, el glaciar requiere condiciones climáticas específicas. Su equilibrio depende de factores clave como el calor que lo derrite, los vientos de aire frío o cálido (Bradley et al., 2009) que aceleran o frenan el deshielo, y las nevadas que lo alimentan. Esto último solo ocurre si la temperatura es lo suficientemente baja para que el agua caiga como nieve y no como lluvia.



CLIMA DE EXTREMOS ALTITUDINALES

Según la clasificación climática de Thornthwaite, la zona donde se sitúa el Quelccaya presenta un clima “semifrígido, lluvioso en verano y deficitario en precipitaciones durante el otoño y el invierno” (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2012). Sin embargo, esta es una categorización general, porque en las montañas el clima cambia mucho según la altura. Como señalan Drenkhan et al. (2015), “los sistemas de clasificación climática tradicionales suelen pasar por alto la variabilidad espacial única de los Andes tropicales, donde condiciones contrastantes pueden coexistir a distancias horizontales de pocos kilómetros”.

En este entorno de extremos del Quelccaya, se destacan tres tipos de clima principales (Machaca, 2023):



El clima glacial de alta montaña, por encima de los 5000 m s. n. m



Temperaturas muy frías con promedios anuales por debajo de los 0 °C; y oscilaciones térmicas diarias pronunciadas.



Este ambiente representa el límite para la existencia de glaciares en los trópicos. Cualquier aumento de temperatura, por más mínimo que sea, puede hacer que el hielo se derrita rápidamente (Kaser & Osmaston, 2002).



Precipitaciones de entre 800 y 1200 mm/año, predominantemente en forma de nieve



El clima periglacial entre 4400 y 5000 m s. n. m.



Temperaturas un poco menos frías que la anterior, con promedios anuales de 2 a 5 °C y heladas recurrentes.



Esta franja es una zona de transición activa, moldeada por procesos vinculados al hielo (llamados criogénicos), que ocurren por los constantes ciclos de congelamiento y descongelamiento del suelo que modifican activamente el paisaje (K. M. Schmidt & Montgomery, 1996).



Precipitaciones de entre 600 y 900 mm/año, con presencia de lluvia y nieve.





El clima de puna húmeda (entre 3800 y 4400 m s. n. m.)



Temperaturas con promedios anuales de 5 a 8 °C y con heladas estacionales entre mayo y septiembre.



Este ambiente climático sostiene la presencia de los ecosistemas de pajonales naturales y los bofedales altoandinos que existen en la zona.



Precipitaciones que van de los 700 a 900 mm/año, con presencia de lluvia y nieve.



LA TEMPERATURA

En el entorno del Quelccaya, la radiación solar, intensificada por la reducida densidad atmosférica a gran altitud, puede incrementar la temperatura máxima durante el día hasta 7 °C aproximadamente, generando procesos de fusión en la superficie glaciar. Por otro lado, tras la ausencia de radiación solar, la pérdida de calor hacia la atmósfera se produce con rapidez, ocasionando descensos térmicos marcados que alcanzan valores mínimos cercanos a -11 °C.

EL QUELCCAYA PRESENTA UNA DUALIDAD TÉRMICA EXTREMA: TEMPERATURAS CÁLIDAS DURANTE EL DÍA QUE CONTRASTAN CON NOCHES GÉLIDAS PROPIAS DEL INVIERNO, UN GRADIENTE TÉRMICO QUE SE PRESENTA CADA DÍA.

Las variaciones térmicas a lo largo de un mismo día son mucho más intensas que las diferencias entre estaciones: mientras que entre invierno y verano la temperatura media cambia apenas unos 5 °C, entre el día y la noche puede haber contrastes superiores a 20 °C. Esto es identificado por Vuille et al. (2008) como una característica de los Andes tropicales, donde la estacionalidad climática está definida principalmente por los regímenes de precipitación más que por variaciones significativas en temperatura.

Como señalan Kaser & Osmaston (2002), el glaciar se encuentra en el límite del equilibrio térmico, donde un pequeño aumento de temperatura puede desencadenar un retroceso irreversible. Este gradiente altitudinal sigue un patrón bien definido: por cada 100 m de descenso, la temperatura aumenta aproximadamente 0.6 °C (Hardy et al., 1998), creando microclimas que van desde el gélido ambiente glacial hasta los valles interandinos a 3500 m s. n. m., donde las temperaturas medias son de 16 °C.

La intensidad de la radiación solar en estas altitudes, que supera los 1200 W/m² en días despejados, es aproximadamente un 40% más intensa que la experimentada a nivel del mar (Hardy et al., 2003), lo que explica en parte estas marcadas variaciones térmicas. Este fenómeno no solo modela el paisaje, sino que también acelera la ablación (pérdida de hielo por derretimiento y evaporación), en particular cuando las superficies glaciares pierden su capa protectora de nieve y quedan expuestas a la acción directa del sol.

1



2



El descenso de la temperatura durante los meses de junio - agosto ocasiona el congelamiento superficial de los cuerpos de agua (fotografía 1), un azul profundo acentúa las texturas glaciares; de noche (fotografía 2), un manto de estrellas se observa desde la base cerca de la capa de hielo.

LAS LLUVIAS Y NEVADAS

El ámbito del Quelccaya recibe en promedio 1199 mm de precipitación al año (Machaca, 2023), pero la lluvia o nevada no llega de manera constante al glaciar. Estas se encuentran condicionadas por los vientos amazónicos y la altura, presentando precipitaciones que tienen un ciclo predecible pero desigual. De noviembre a abril, las tormentas descargan hasta el 85% del agua anual, cubriendo ocasionalmente al Quelccaya con nieve fresca que alimenta sus reservas. Enero y febrero son los meses más generosos, con picos de 300 mm mensuales.



Laguna Sibinacocha luego de una tormenta, febrero del 2025

Durante los meses de mayo a octubre, el panorama cambia radicalmente. Las precipitaciones se vuelven escasas, con apenas 30 mm al mes (menos del 10% de lo que cae durante los meses húmedos). En junio y julio, el aire es tan seco que casi no precipita nieve. Sin embargo, ocasionalmente en esta temporada, el Quelccaya recibe nevadas de unos 20 mm por evento que, según Thompson et al. (2013), actúan como “un vendaje temporal” sobre el hielo expuesto, protegiéndolo parcialmente del sol.



Vista del sector Ruita del glaciar Quelccaya antes de una tormenta, octubre del 2021

Incluso en la temporada de lluvias, las precipitaciones muestran una marcada variabilidad. Según Espinoza et al. (2015), pueden observarse secuencias de días secos que alternan con eventos de precipitación intensa, siendo esta variabilidad especialmente influenciada por regímenes de viento meridionales y septentrionales en la región amazónica. Perry et al. (2017) advierten que estos periodos secos inesperados aceleran el derretimiento glaciar, pues sin la protección de la nieve fresca, el hielo queda expuesto a la radiación solar.

El patrón de lluvias no solo varía por meses, sino también por años, de acuerdo a la aparición del fenómeno ENOS. Durante El Niño, las precipitaciones regionales disminuyen hasta un 30% con respecto al promedio (Vuille et al., 2000), lo que priva al glaciar de su recarga y acelera su retroceso durante estos episodios climáticos. En contraste, la Niña trae lluvias más abundantes, ayudando a compensar las pérdidas de hielo. Estas variaciones extremas tienen consecuencias directas: cuando las lluvias faltan, no solo se pierde masa glaciar, sino que se reduce el agua disponible para los ecosistemas y comunidades que dependen de ella.

LA AUSENCIA DE PRECIPITACIONES SÓLIDAS EN EL QUELCCAYA AMENAZA LA EXISTENCIA DEL GLACIAR, Y POR TANTO AUMENTA EL RIESGO PARA LOS ECOSISTEMAS Y PUEBLOS QUE DEPENDEN AGUAS ABAJO.



EL CLIMA DEL QUELCCAYA ESTÁ CAMBIANDO A UN RITMO SIN PRECEDENTES

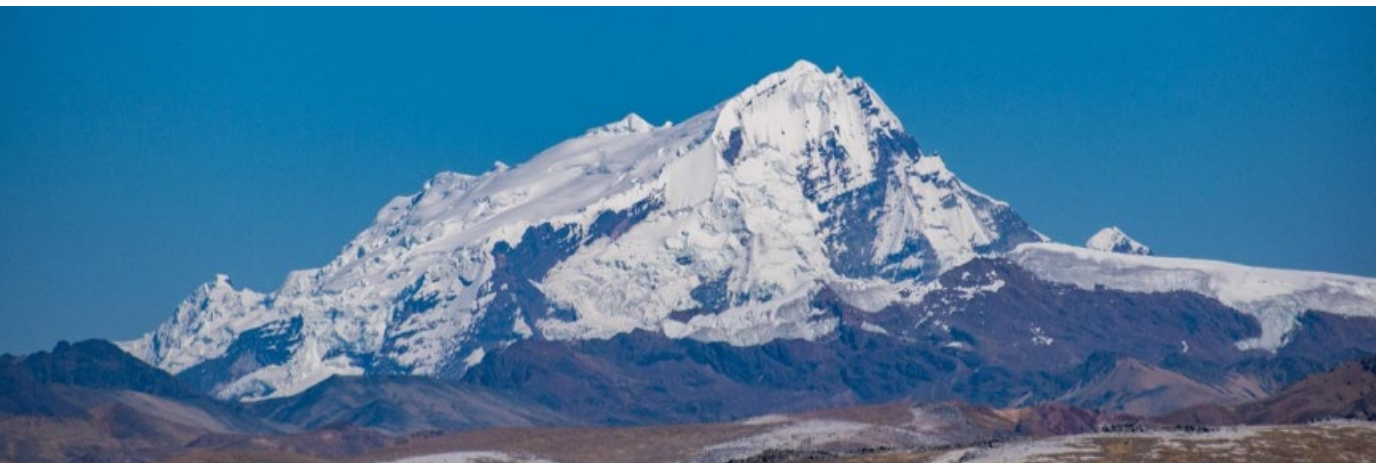
Los estudios científicos revelan cambios alarmantes en el clima local, pues registros instrumentales muestran un aumento de temperatura de 0.2°C por década, el doble del promedio global, con temperaturas mínimas que se elevan más rápido que las máximas (Bradley et al., 2006; Vuille et al., 2015). Las lluvias siguen patrones más extremos: temporadas húmedas más intensas, pero sequías más prolongadas (Haylock et al., 2006).

El acelerado deshielo afecta directamente a comunidades que dependen del agua del Quelccaya, pues alteran los ciclos agrícolas y reduce la disponibilidad hídrica. Lo que ocurre en este glaciar no es solo un indicador climático, sino una advertencia sobre el futuro del agua en los Andes peruanos.

UNA POSICIÓN ESTRATÉGICA EN EL PLANETA

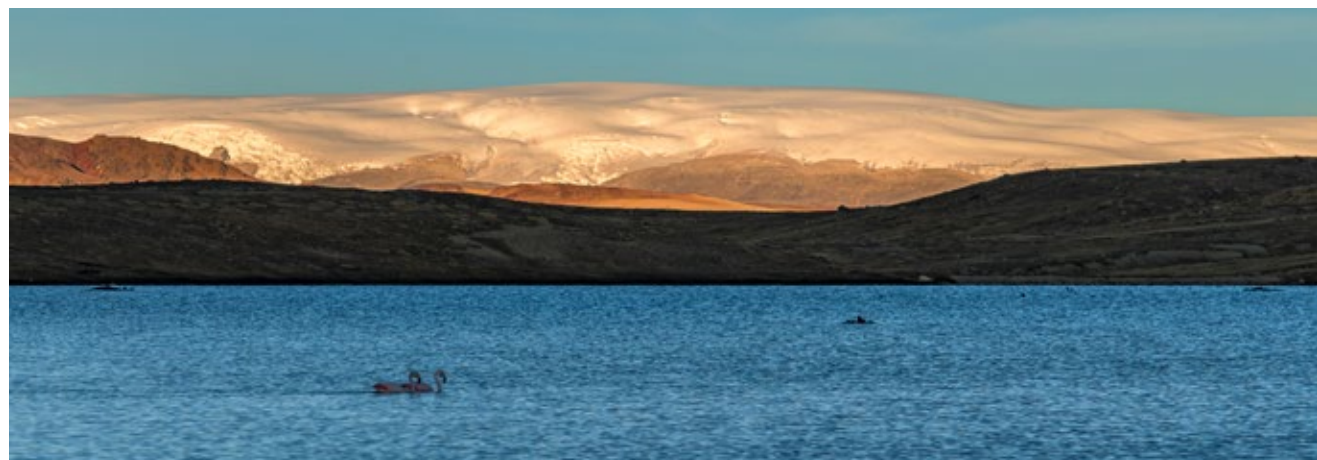
Así como el clima modela el comportamiento del Quelccaya, su forma física determina cómo el glaciar responde a estos cambios. A diferencia de los glaciares de montaña, como el Ausangate o el Allin Capac, que se originan en las cumbres elevadas, el Quelccaya es un casquete glaciar: una masa de hielo que no se restringe a la forma del terreno, que cubre áreas extensas con una geometría más o menos circular y que fluye radialmente alimentando a múltiples lenguas glaciares.

Las dos
montañas más
importantes en
el entorno del
Quelccaya:
Los nevados Allin
Capac



Ausangate con la
forma típica de
los glaciares de
montaña

El casquete
glaciar Quelccaya
con su peculiar
forma semi plana



El perfil del terreno que se muestra en la figura 3-1 compara tres altitudes máximas en el entorno cercano al casquete glaciar: Ausangate (6324 m s. n. m.), Allin Capac (5799 m s. n. m.) y Quelccaya (5659 m s. n. m.). Esto evidencia contrastes marcados en las coberturas glaciares. Mientras el Ausangate y Allin Capac exhiben perfiles escarpados típicos de glaciares de montaña, el Quelccaya se despliega como una meseta de hielo con pendientes más suaves.

La forma física de la tierra bajo el Quelccaya (topografía) ejerce una influencia directa en su comportamiento. Las pendientes pronunciadas aceleran el flujo glaciar, mientras las laderas orientadas al sol sufren mayor derretimiento por la radiación solar directa. Esta topografía oculta bajo el glaciar condiciona desde donde se acumula la nieve hasta cómo nacen las lagunas proglaciares. Por ello, entender estos rasgos es esencial para determinar si el glaciar crece, se fractura o retrocede (Benn & Evans, 2014).

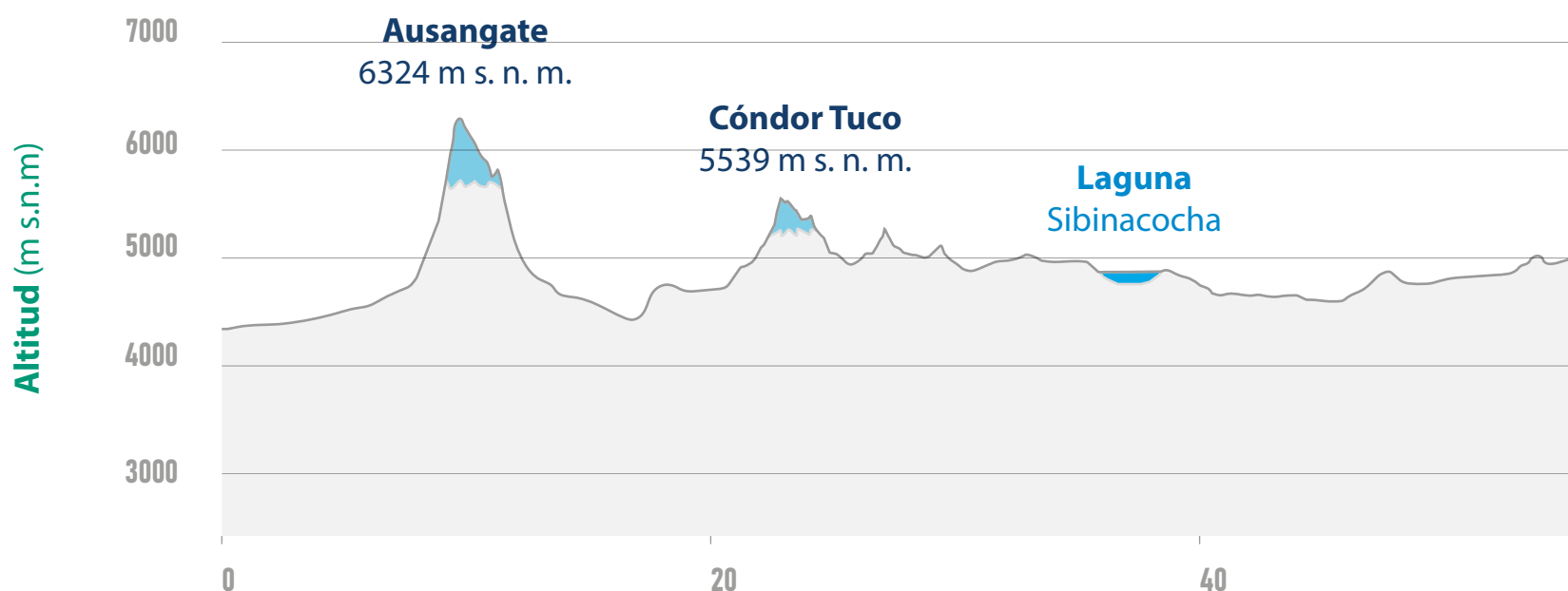
Para medir cómo el Quelccaya se transforma, el INAIGEM despliega tecnología de vanguardia: drones de alta resolución, equipos de sistemas de navegación por satélite y el uso de imágenes satelitales de alta resolución. Gracias a esta tecnología, hoy se tienen mapas que revelan cambios y detalles del Quelccaya. Los modelos de elevación digital de alta resolución, muestran los cambios que ocurren en el incremento de grietas hasta el crecimiento de lagunas proglaciares.

Esta cartografía no solo documenta los últimos cambios del glaciar, sino que también orienta la toma de decisiones. Los ortomosaicos georreferenciados y las curvas de nivel cada cinco metros permiten:

- Identificar zonas críticas (como el sector suroeste, prioritario para monitoreo).
- Medir pérdidas de volumen de hielo.
- Evaluar peligros asociados a glaciares (lagunas potencialmente peligrosas).

Figura 3-1

PERFIL TOPOGRÁFICO LONGITUDINAL DEL NEVADO AUSANGATE AL NEVADO ALLIN CAPAC.



La recolección de datos topográficos en los alrededores del glaciar Quelccaya ha requerido extensas y exigentes expediciones científicas por parte del INAIGEM desde el 2018 al 2025. Como resultado, se ha establecido una red geodésica local que sirve como base fundamental para el desarrollo de trabajos topográficos y cartográficos a largo plazo, proporcionando referencias precisas y confiables para futuras investigaciones.



PLACA DE IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO GEODÉSICO

Las placas colocadas en un punto geodésico tipo “C” cumple una función de identificación, permanencia y referencia física oficial.

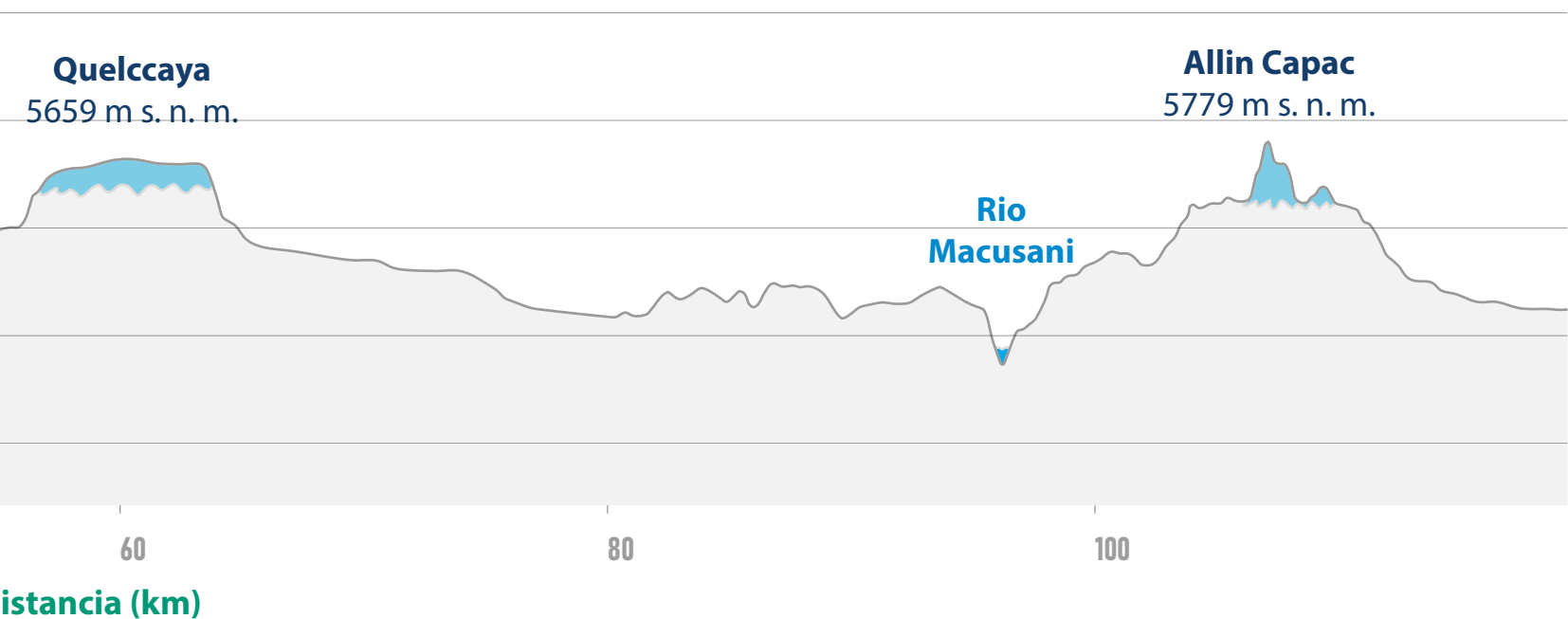
Su propósito es materializar en el terreno el punto geodésico certificado, garantizando que pueda ser fácilmente reconocido y utilizado en futuras mediciones o verificaciones. En esta placa se graban datos esenciales como:

- El número o código del punto dentro de la red geodésica nacional.
- La institución responsable
- El año de establecimiento.
- Designación de tipo “C”



Esta marca metálica, empotrada en una base de concreto, permite que el punto tenga estabilidad y durabilidad a largo plazo, resistiendo condiciones climáticas y evitando alteraciones de su posición original.

La placa de bronce da identidad y autenticidad al punto geodésico, asegurando su trazabilidad y uso estandarizado como referencia oficial dentro de la Red Geodésica Nacional del Perú.



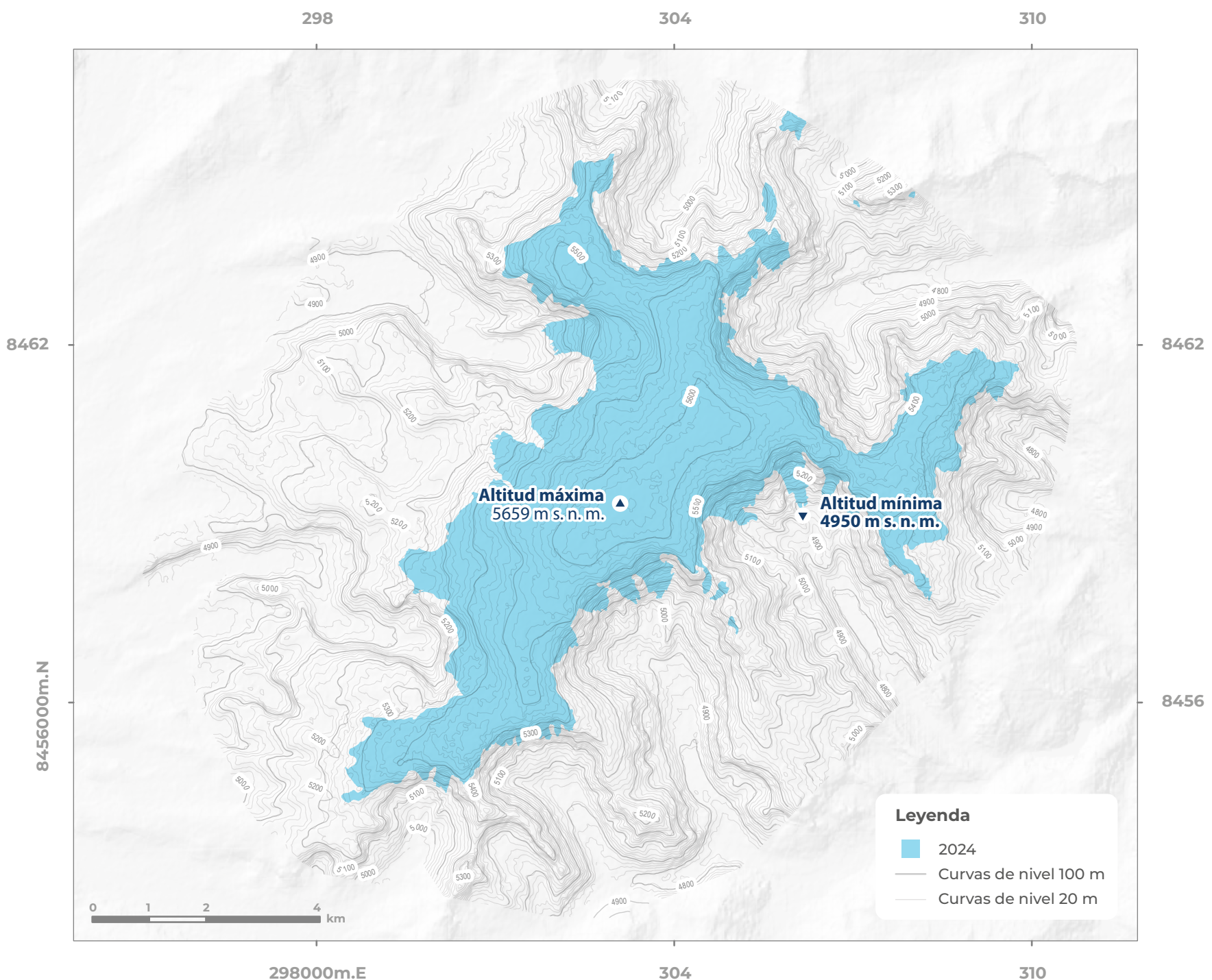


Ciencia en altura. Registro del trabajo geodésico para medir la cumbre del Quelccaya con GNSS de alta precisión.

La cartografía local producida para el Quelccaya, generada en sistemas de referencia UTM WGS 84, zona 19 Sur; presenta altos niveles de precisión planimétrica y altimétrica, superiores a los disponibles en cartografía convencional, por lo que los datos obtenidos son especialmente valiosos para los trabajos científicos, educativos y de gestión ambiental. La figura 3-2 muestra la altitud continua a detalle del Quelccaya y su entorno inmediato, con una cumbre que alcanza los 5659 m s. n. m. El punto más bajo del glaciar es 4950 m s. n. m. localizado al noreste sobre Phacu Cucho Bajo.

Figura 3-2

MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL CREADO CON IMÁGENES SATELITALES Y DRONES.



La altitud exacta de la cumbre es un dato clave, pues este valor permite medir con precisión los cambios que ocurren en la zona de menor impacto del glaciar Quelccaya. La obtención del valor de altitud de la cumbre se logró mediante el uso de un sistema GNSS Trimble R12i, en julio de 2024, que registró datos durante dos horas y se ajustó con información de una estación geodésica de rastreo permanente del IGN. El resultado es preciso, con un margen de error de solo ± 0.027 m, lo que lo convierte en una referencia confiable para la cartografía en el entorno.

La red geodésica permitirá comparar cambios futuros, mientras las imágenes obtenidas de satélites y drones muestran el retroceso glaciar y balance de masa, esta red garantiza que todos los datos, estén alineados con la misma precisión.

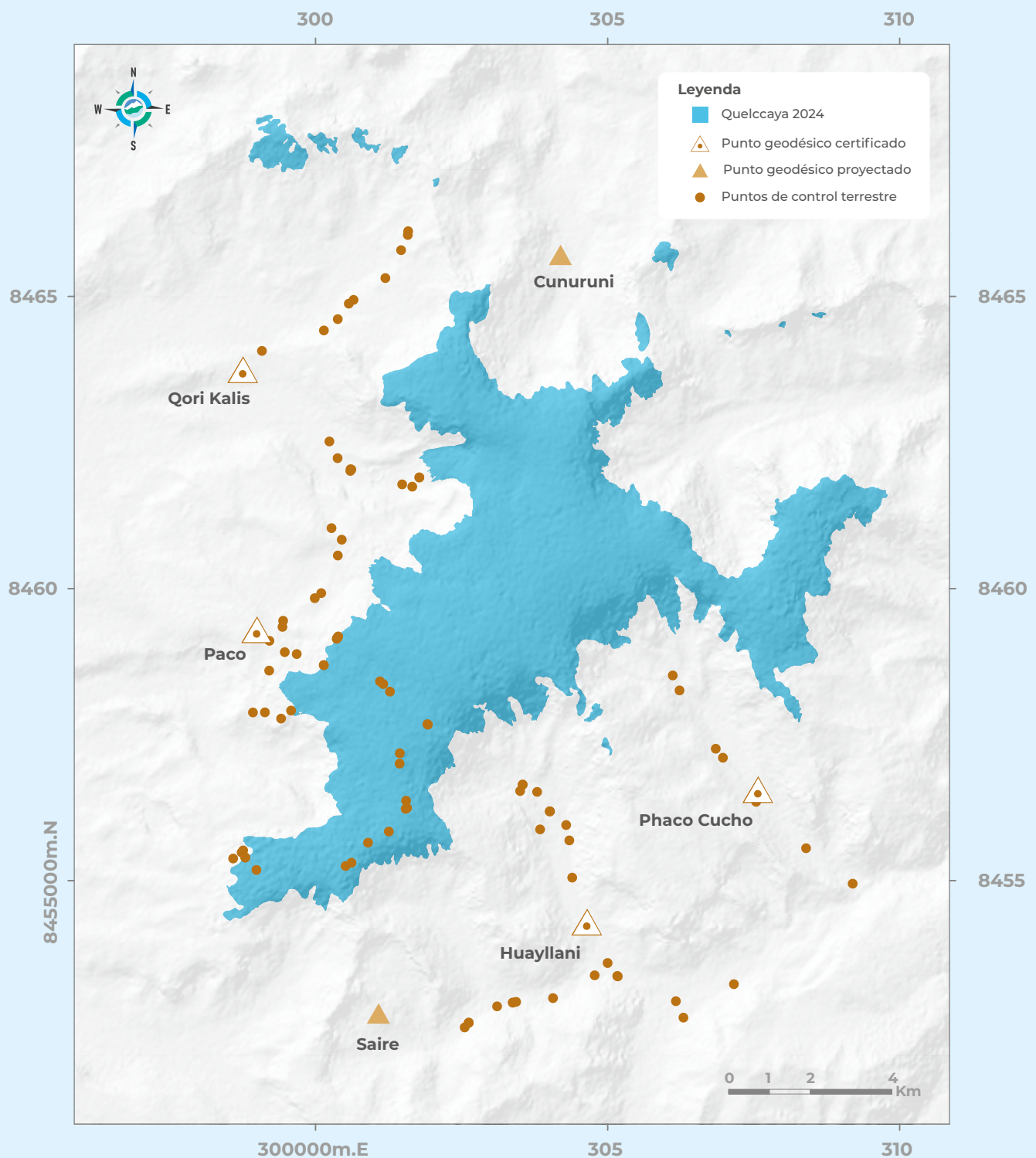


Puntos geodésicos monumentados para la corrección de modelos de elevación del terreno.
(1) Paco (2) Huayllani

METODOLOGÍA PARA EL MONITOREO GEODÉSICO

Para capturar cada detalle de la transformación del glaciar Quelccaya, los investigadores del INAIGEM han establecido una red de precisión alrededor del glaciar.

Esta red constituye el marco de control espacial sobre el cual se apoyan todos los trabajos de investigación en el ámbito. Las cuatro estaciones geodésicas (triángulo marrón y blanco), certificadas por el Instituto Geográfico Nacional del Perú (IGN), forman la red principal de este sistema, complementadas por 99 puntos de control terrestre (puntos marrones) distribuidos alrededor del Quelccaya para mejorar la calidad de la cartografía local generada a partir de vuelos con drones. Las estaciones geodésicas proyectadas (triángulo marrón) fortalecerán aún más la red principal.



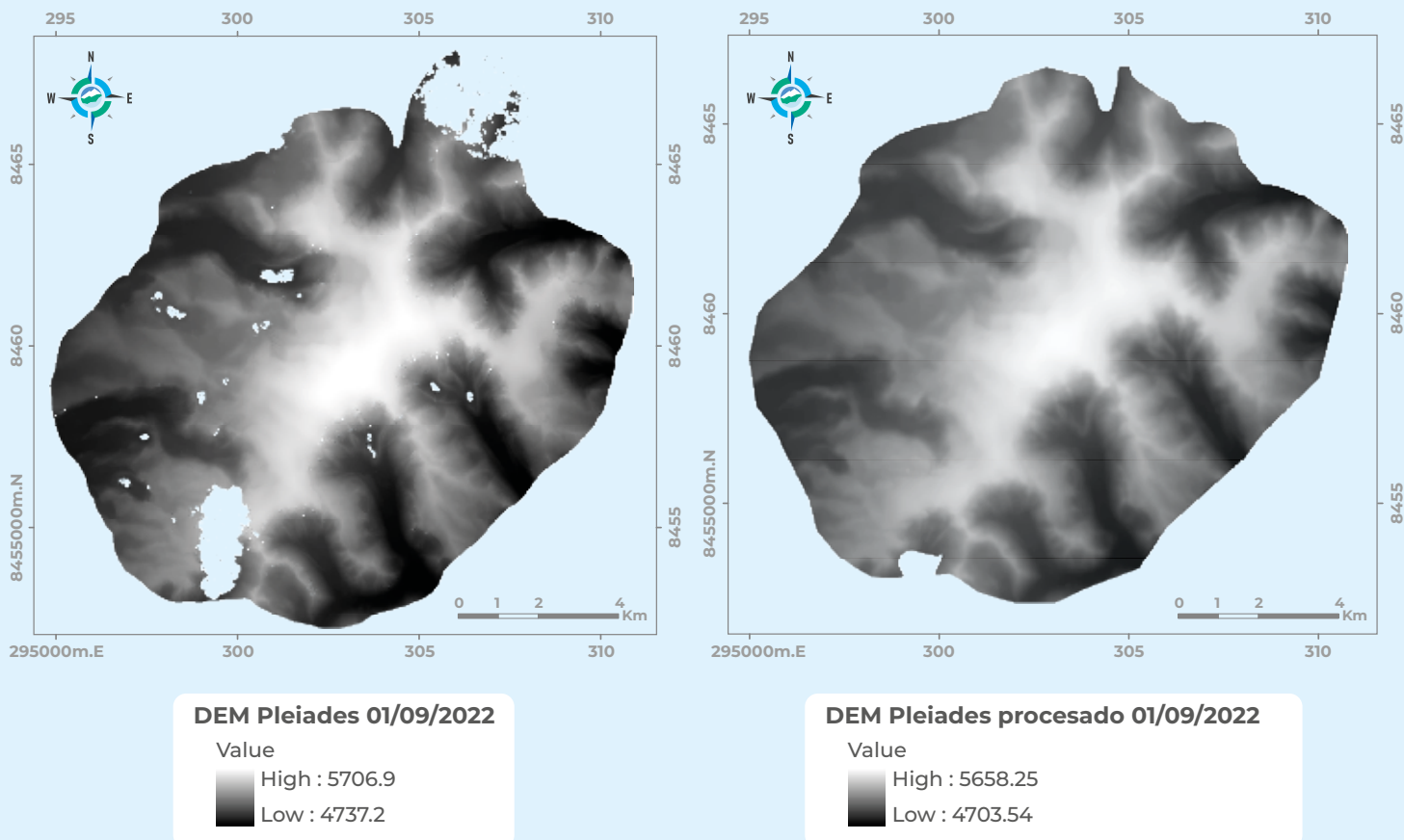
En este contexto, se han utilizado alturas ortométricas. Estas medidas establecidas por el IGN aseguran la coherencia de los levantamientos con el sistema geodésico y vertical nacional y garantizan la compatibilidad de los datos con la cartografía y las normativas vigentes.

Se cuenta con drones que sobrevuelan regularmente el glaciar, y capturan imágenes de alta resolución con un 75% de superposición para crear modelos tridimensionales detallados. Estos vuelos se sincronizan con adquisiciones satelitales realizadas por PeruSAT-1 y Pleiades en 2022, cuyas imágenes con resolución de 0.7 y 0.5 m, respectivamente permiten monitorear zonas inaccesibles. El resultado es un retrato del glaciar, que permite delimitar la extensión actual, identificar zonas de retroceso activo y generar una base cartográfica confiable para futuras comparaciones (Figura 3-3).

Los productos cartográficos del Quelccaya, corregido geodésicamente; y cada modelo digital de elevación, capturan un instante del glaciar. Las curvas de nivel, revelan cómo algunas zonas pierden altura mientras otras colapsan.

Figura 3-3

FUSIÓN DE IMÁGENES SATELITALES Y ORTOMOSAICOS OBTENIDOS CON DRONES PARA CUBRIR VACÍOS DE INFORMACIÓN EN EL QUELCCAYA



LA HISTORIA ESCRITA EN ROCAS

Hace cientos de millones de años, mucho antes del surgimiento de los Andes, el territorio que hoy alberga el glaciar Quelccaya se encontraba bajo el mar. Durante las eras Paleozoica y Mesozoica (541 a 66 millones de años atrás), este antiguo mar acumuló sedimentos que, con el tiempo, se compactaron en lutitas oscuras, areniscas y calizas fosilíferas (Chávez V. et al., 1997). Entre estas rocas destacan las pizarras negras de la Formación Ananea (Silúrico-Devónico), que indican un ambiente marino profundo y tranquilo (Laubacher, 1978); y los conglomerados del Grupo Ambo (Carbonífero), evidencia de flujos submarinos turbulentos (Newell, 1949).

La colisión entre las placas de Nazca y la Sudamericana, iniciada hace ~140 millones de años, transformó radicalmente el paisaje. Este choque tectónico levantó, fracturó y plegó los sedimentos marinos, mientras intrusiones magmáticas y erupciones volcánicas, como las del Grupo Mitu (Pérmico), cubrieron la región con lavas y depósitos piroclásticos (Soberón et al., 2022). Las vetas de sílice y pirita, que se encuentran hoy en rocas del Grupo Copacabana, son vestigios de los procesos hidrotermales que se dieron lugar en esa época.

El último gran capítulo geológico se escribió en el Neógeno (hace ~20 millones de años), cuando el paisaje andino ya comenzaba a tomar su forma actual. Violentas erupciones volcánicas cubrieron la región con gruesas capas de ceniza volcánica compactadas, formando las ignimbritas de la formación Quenamari. Estas rocas, extraordinariamente resistentes, se convirtieron en el cimiento perfecto para que, durante las glaciaciones del Cuaternario, se desarrollara el imponente glaciar Quelccaya que hoy se conoce (Li, 2016).

LAS ROCAS QUE SOSTIENEN AL QUELCCAYA CONTIENE LA HISTORIA GEOLÓGICA DE MILLONES DE AÑOS, MIENTRAS QUE LA CAPA DE HIELO DEL GLACIAR ENCAPSULA LOS ÚLTIMOS MILES DE AÑOS: JUNTOS CONTIENEN LA INFORMACIÓN PASADA DE LA TIERRA CON LA ERA MÁS RECIENTE DEL CLIMA.

¿CÓMO LEER LA HISTORIA EN LAS ROCAS?

La geología sirve para “leer” las rocas como si fueran las páginas de un gran libro, donde cada capa cuenta una parte de la historia. Para entenderlo, los geólogos estudian:

- El tipo de roca (sedimentaria, ígnea o metamórfica) que revela su origen (marino, volcánico y tectónico).
- Su posición y edad, ya que las capas más profundas suelen ser las más antiguas (como las calizas del Grupo Copacabana).
- Las estructuras y fósiles, que delatan ambientes pasados (olas, volcanes o glaciares).

Una formación geológica es una unidad de rocas con características únicas, de acuerdo a su tipo, edad u origen. Por ejemplo, la formación Quenamari reúne las cenizas compactadas de erupciones volcánicas que sucedieron hace 10 - 4 millones de años atrás. Un “grupo” se refiere a varias formaciones emparentadas (como un paquete de libros de una misma serie), como es el caso del Copacabana, que es como una “trilogía” de rocas marinas (calizas + fósiles) que se depositaron juntas en el Paleozoico.



Vista del cerro Cóndor Puñuna





Bosque de rocas Jaylluhua

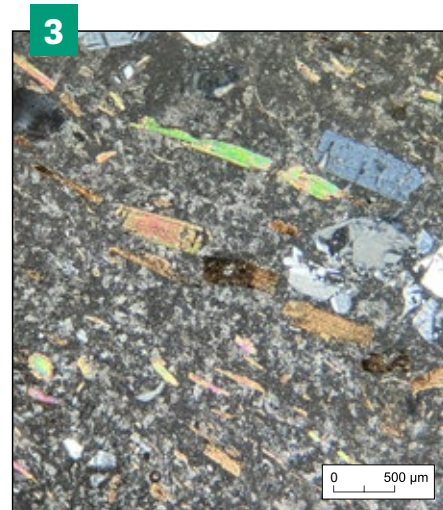
LA FORMACIÓN QUENAMARI MERECE ESPECIAL ATENCIÓN POR SU GRAN DETALLE CRONOLÓGICO

Sus tres miembros (Chacacuniza, Sapanuta y Yapamayo) representan diferentes fases consecutivas de actividad volcánica:

Sobre este sustrato volcánico, las glaciaciones del Cuaternario escribieron el último capítulo visible en las rocas. El avance y retroceso de los hielos originó valles, depositó morrenas (montículos de roca suelta, grava y arcilla sin clasificar) y creó lagos. Los depósitos glaciáricos, como mezclas caóticas de rocas de todos los tamaños, contrastan marcadamente con los sedimentos más ordenados dejados por el deshielo.

El miembro Chacacuniza (10 ± 1 millones de años)

es evidencia de las primeras erupciones importantes. Sus tobas riolíticas blancas y grises, hoy parcialmente convertidas en arcilla por la acción del agua y la atmósfera, revelan que los materiales iniciales eran ricos en sílice y poco consolidados (Li, 2016).



La fotografía 1 muestra la vista panorámica de los afloramientos del miembro Chacacuniza, mientras que la 2 es un fragmento de roca de la quebrada Huayllani, que corresponde a una riolacita porfirítica de color gris verdoso. La fotografía 3 es una vista microscópica de la roca de la 2, donde se muestran cristales de cuarzo, plagioclasas (minerales claros con rayas internas), biotitas (láminas oscuras oxidadas) y fragmentos de otras rocas en una matriz fina.

El miembro Sapanuta (8 - 6 millones de años)

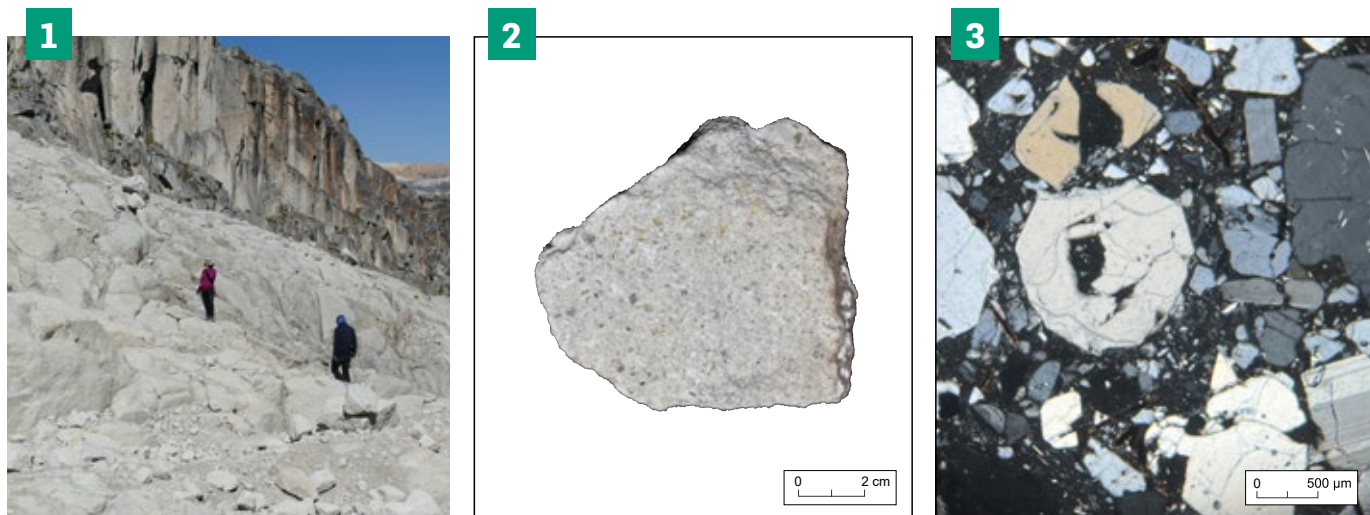
representa el clímax del vulcanismo en la región. Con un espesor de hasta 350 m y una característica fractura columnar, estas rocas muestran una buena consolidación (Soberón et al., 2022). Presenta numerosos fragmentos de lapilli, desde pequeños granos de 0.5 cm hasta trozos del tamaño de 10 cm (Li, 2016), que quedaron atrapados en la roca como testigos de la violencia eruptiva.



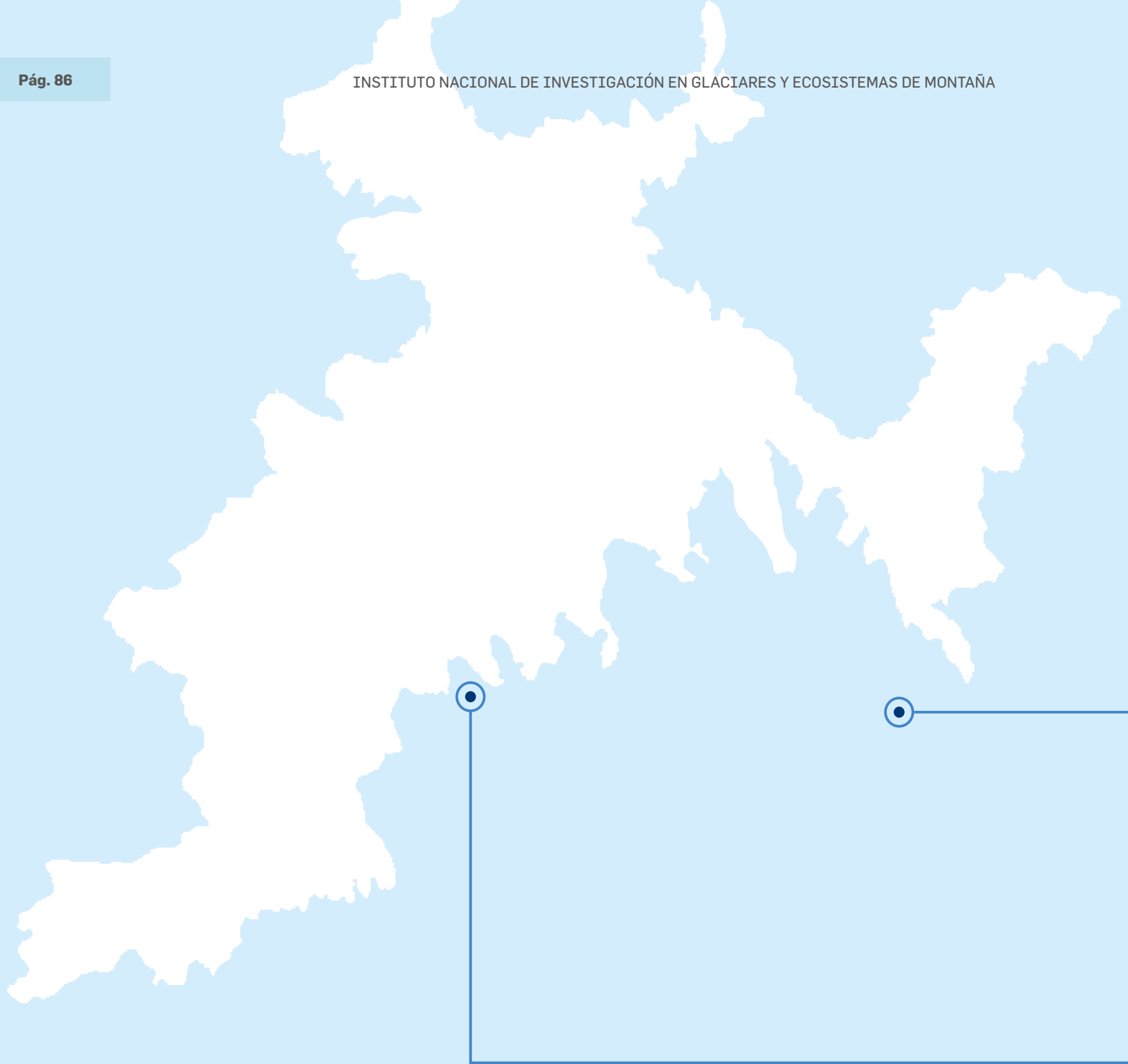
La fotografía 1 muestra la vista panorámica de las tobas columnares del miembro Sapanuta; mientras que la 2 es un fragmento de una toba riolítica cristalina de color gris claro, obtenida en la quebrada Phacu Cucho. La fotografía 3 es una vista microscópica de la muestra de la 2, donde se revela la información de esta toba: cristales fracturados, biotita oxidada y circones resistentes, además fragmentos líticos de diferente composición, testigos de erupciones, presiones y transformaciones químicas a lo largo del tiempo.

El miembro Yapamayo (4 ± 1 millones de años)

señala el fin de esta actividad volcánica intensa. Separado del miembro Sapanuta por una clara superficie de erosión, indica un periodo de calma relativa antes de las últimas grandes erupciones (Li, 2016). Sus tobas ricas en cristales de sanidina, cuarzo y micas, con fragmentos líticos y lapilli en la base, sugieren que los eventos finales fueron particularmente explosivos (Soberón et al., 2022).



La fotografía 1 muestra el afloramiento de las tobas del miembro Yapamayo, de color pardo blanquecino; mientras que la 2 es un fragmento de toba riolítica cristalina, ubicada en Phacu Cucho. La fotografía 3 muestra el detalle microscópico del fragmento de roca, donde se observan cristales de cuarzo, feldespatos potásicos y biotitas tabulares alteradas.



DEPÓSITOS CUATERNARIOS

Los depósitos fluvioglaciares son más ordenados, debido a que el agua ayudó a separar los sedimentos de acuerdo a su tamaño: las arenas y gravas más pesadas se depositaron primero, mientras que los limos y arcillas fueron llevados más lejos, a las zonas más bajas, formando depósitos aluviales. Los depósitos lacustres presentan estratos finos y uniformes de sedimentos, como limo y arcilla, que llegaban arrastrados por el agua del deshielo, pudiendo incluir a veces materia orgánica, como hojas o pequeños organismos acuáticos.

Hoy, cuando se observa al **QUELCCAYA**, se ve el resultado de una evolución geológica prolongada, que abarca desde la sedimentación marina del **PALEOZOICO**, los procesos volcánicos del **NEÓGENO**, hasta la modelación glacial ocurrida durante los periodos más recientes del **CUATERNARIO**.



En la quebrada Phacu Cucho (fotografía 1) afloran sedimentos laminados de un antiguo lago de origen glaciar, expuestos tras los procesos de erosión ocurridos luego de un aluvión que arrastró bloques rocosos de más de 2 m de diámetro (fotografía 2)

EL PAPEL ACTIVO DE LA FORMACIÓN QUENAMARI EN LA ESTABILIDAD DEL QUELCCAYA

- Hoy, estas antiguas rocas volcánicas cumplen un rol fundamental como base del glaciar. Su composición y estructura determinan cómo se acumula y fluye el hielo: las zonas más resistentes, como las del miembro Sapanuta, forman acantilados que dirigen el movimiento glaciar, mientras que las áreas más fracturadas condicionan el flujo de aguas subglaciares. La formación Quenamari no solo guarda el registro del violento pasado volcánico andino, sino que resulta clave para entender la dinámica actual del glaciar y su futuro como reservorio de agua dulce en los Andes tropicales.

Esta extraordinaria formación geológica revela: el paisaje que se contempla hoy es solo un instante en la inmensidad del tiempo geológico. Procesos aparentemente destructivos como las erupciones volcánicas terminaron esculpiendo el escenario perfecto para nuevos ecosistemas, demostrando la asombrosa capacidad de la naturaleza para crear nuevas formas de vida.

UNA MIRADA RÁPIDA DE LA GEOLOGÍA LOCAL DEL QUELCCAYA

El Quelccaya tiene en sus profundidades:

Rocas provenientes del caos tectónico que originó la Cordillera de los Andes:

- Grupo Mitu (Pérmico): Lavas andesíticas, conglomerados y lutitas rojas de erupciones violentas.

Rocas originadas como producto de grandes explosiones volcánicas, que son parte de la formación Quenamari y se componen por tres miembros volcánicos:

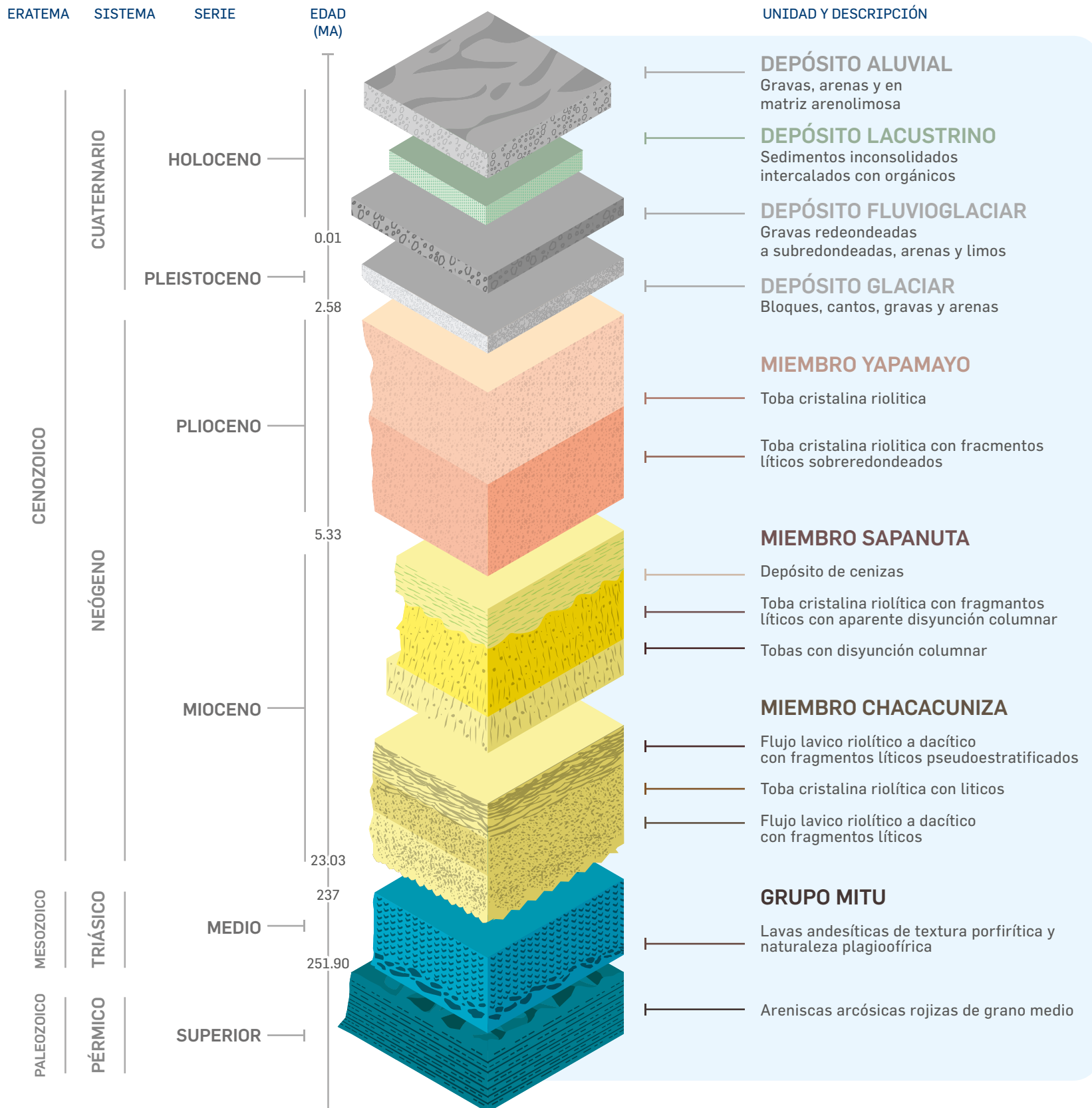
- Chacacuniza (10 ± 1 Ma): Tobas riolíticas porfiríticas blancas, con estructura poco compacta y elevada porosidad, alteradas a arcilla.
- Sapanuta (8 - 6 Ma): Tobas riolíticas de grano fino con fracturas columnares y lapilli.
- Yapamayo (4 ± 1 Ma): Capas de tobas riolíticas con cristales de cuarzo, de erupciones finales.

Sobre estas tres formaciones geológicas, durante las épocas glaciares de la era cuaternaria, se formó el Quelccaya junto a otros glaciares de la región. Cuando estas masas de hielo avanzaban, arrancaban rocas y las arrastraban dejando tras de sí, al retroceder:

- Sedimentos fluvio-glaciares: arenas y gravas ordenadas por ríos de deshielo.
- Lagos temporales o permanentes: donde se acumularon sedimentos de arcillas finas y restos de plantas (estratos como hojas de libro).
- Depósitos aluviales: mezcla de gravas, arenas, limo y ocasionalmente bloques grandes.

La figura 3-4 presenta gráficamente el perfil geológico del entorno donde se formó el Quelccaya, desde la era Paleozoica hasta la actualidad.

Figura 3-4
PERFIL GEOLÓGICO LOCAL.





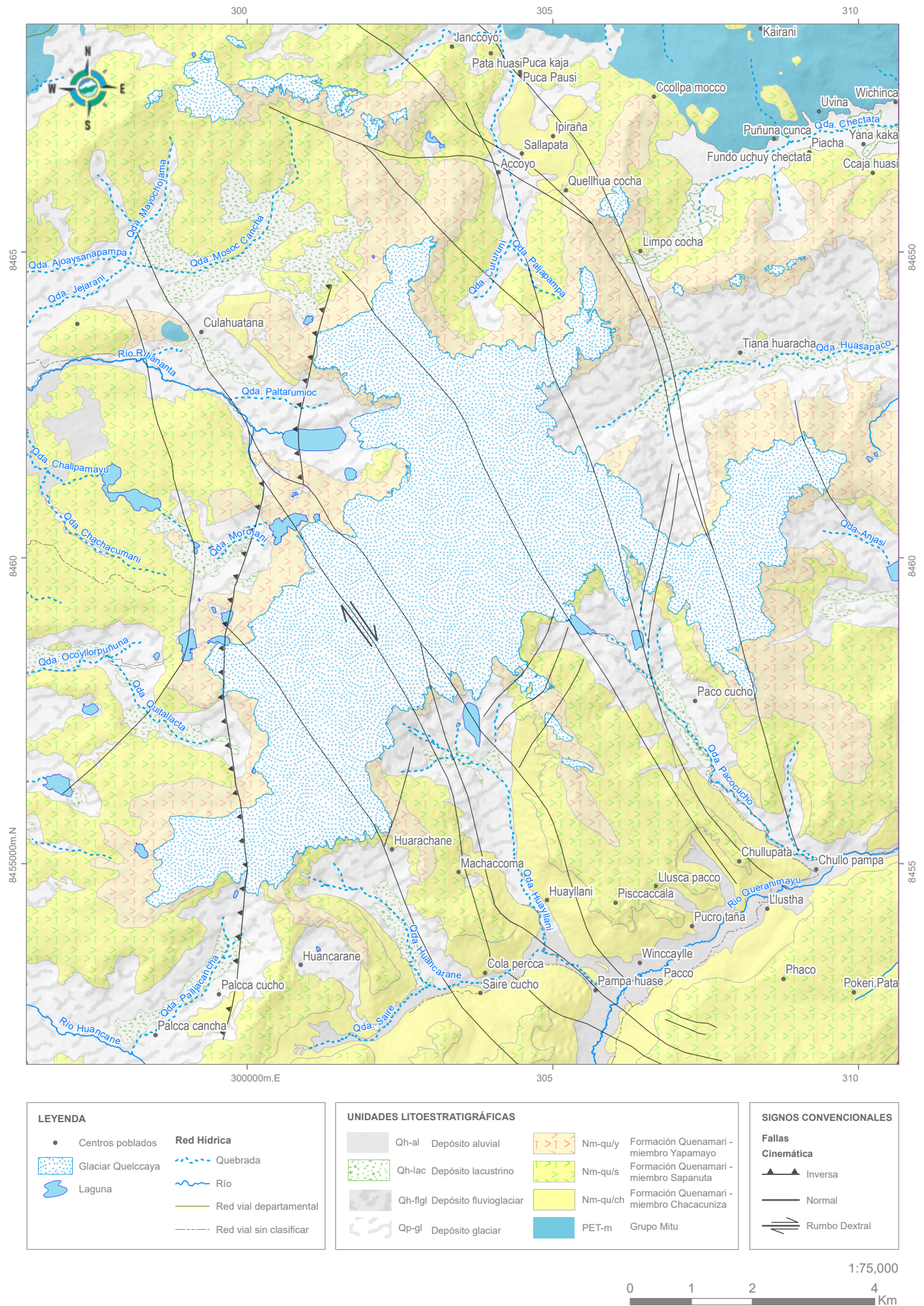
El mapa geológico del Quelccaya (ver figura 3-5) revela cómo esta cronología histórica quedó grabada en el paisaje. Dominado por los tonos amarillentos de la formación Quenamari, el mapa muestra que estas rocas volcánicas no solo forman la base del glaciar, sino que están atravesadas por una red de fallas noroeste-sureste de los últimos eventos tectónicos. Estas fracturas, activas entre el Mioceno y Plioceno, han actuado como líneas guía que los glaciares posteriores siguieron al esculpir el terreno.

Esta influencia estructural es evidente al comparar los valles de Puno y Cusco. En el primero, quebradas como Huancarane, Huayllani y Phacu Cucho se alinean perfectamente con las fallas, formando corredores estrechos y profundos donde el hielo encontró menor resistencia. En cambio, hacia el departamento del Cusco, la ausencia de fracturas marcadas dio lugar a valles más abiertos y suaves como Ritiananta y Morojani, excepto donde fallas locales como en Quitallacta volvieron a concentrar la erosión glaciar. Así, el mapa no solo ilustra la distribución de rocas, sino que explica por qué el Quelccaya y sus lagunas asociadas adoptaron las formas que hoy se observan.

**EL PAISAJE ALREDEDOR DEL GLACIAR
QUELCCAYA NO FUE ESCULPIDO
SOLO POR EL CLIMA Y EL HIELO, SINO
TAMBIÉN POR FALLAS GEOLÓGICAS QUE
GUIARON LA EROSIÓN Y DEFINIERON
LOS VALLES Y LAGUNAS DE LA ZONA.**

Figura 3-5

GEOLOGÍA LOCAL DEL GLACIAR.



EL MOLDEADO DEL PAISAJE

La actividad glaciar ha dejado una huella profunda en el paisaje del Quelccaya.

La erosión glaciar se evidencia con la presencia de rocas pulidas y estriadas en la zona, como producto de la constante fricción entre las rocas y el hielo cargado con sedimentos (Benn & Evans, 2014; Glasser & Bennett, 2004). Aunque el retroceso glaciar ha expuesto zonas antes cubiertas de hielo, el Quelccaya sigue siendo un testimonio clave de la interacción entre el hielo, la geología y el clima.

El deshielo del Quelccaya ha dejado al descubierto superficies rocosas con pulidos glaciares y estrías paralelas, testimonio inequívoco de la intensa acción erosiva ejercida por el hielo en movimiento.

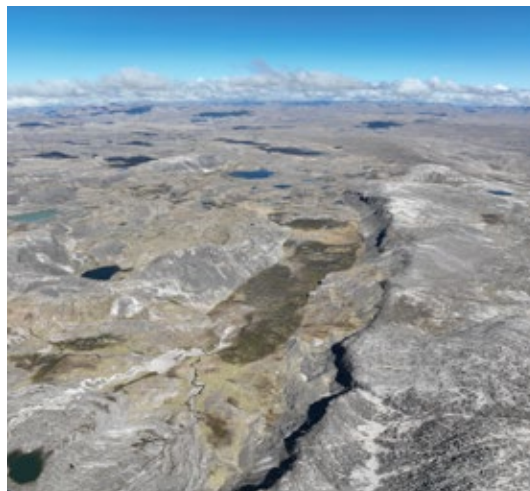
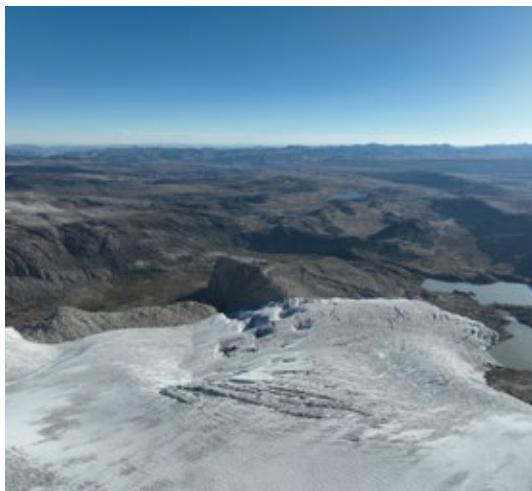


La acción modeladora del glaciar no solo se manifiesta en la superficie, sino que queda registrada en los sedimentos que deja a su paso. Bajo la masa de hielo, las morrenas de fondo atestiguan el transporte constante de materiales, mientras que las morrenas laterales en los bordes del glaciar revelan sus antiguas dimensiones. Al frente glaciar, las morrenas de ablación y terminales marcan claramente las pausas y el retroceso reciente del hielo (Mark & Seltzer, 2005).

Estas morrenas funcionan como verdaderos archivos geológicos: mediante técnicas de datación, especialmente por isótopos de berilio, se ha determinado que, durante el Último Máximo Glacial, hace más de 20 mil años, el Quelccaya llegó más allá del actual valle de Huanané, a aproximadamente 7.5 km de su actual borde (Mark et al., 2002). Así, mientras las formas glaciares visibles hablan de los procesos actuales, estos depósitos sedimentarios completan la historia, mostrando cómo el Quelccaya ha respondido a los cambios climáticos a lo largo de milenios, manteniendo una interrelación constante entre hielo, roca y clima.

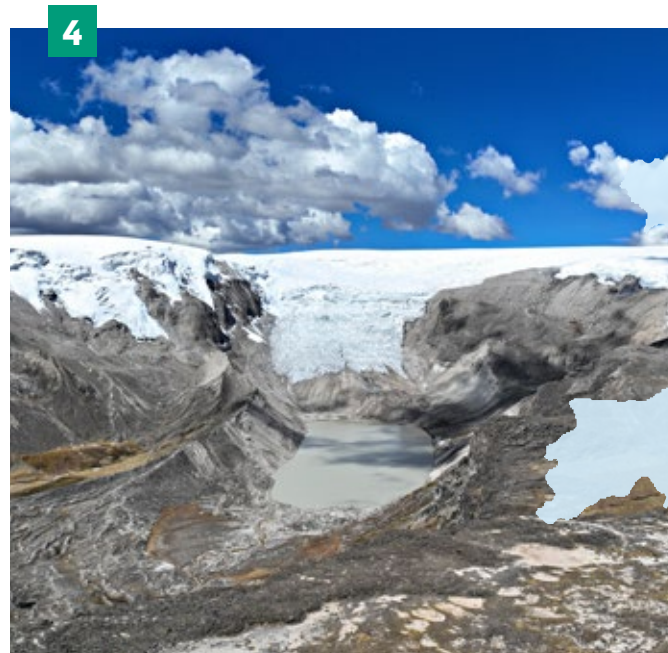
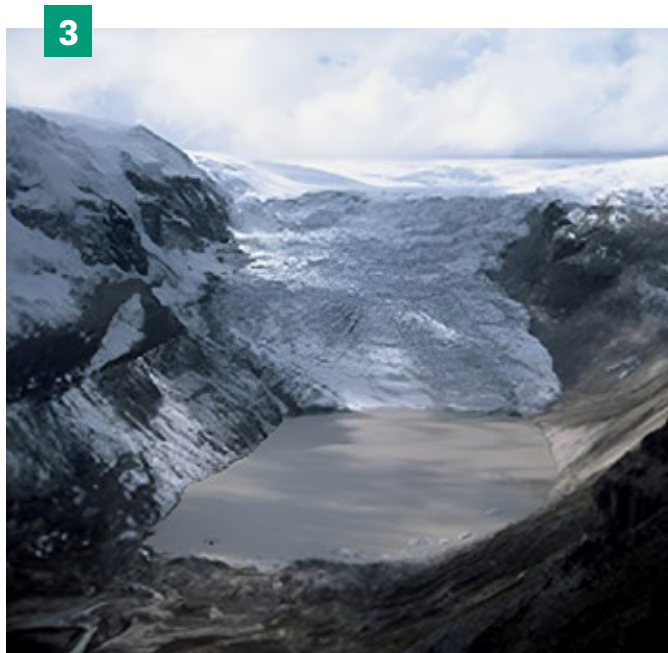
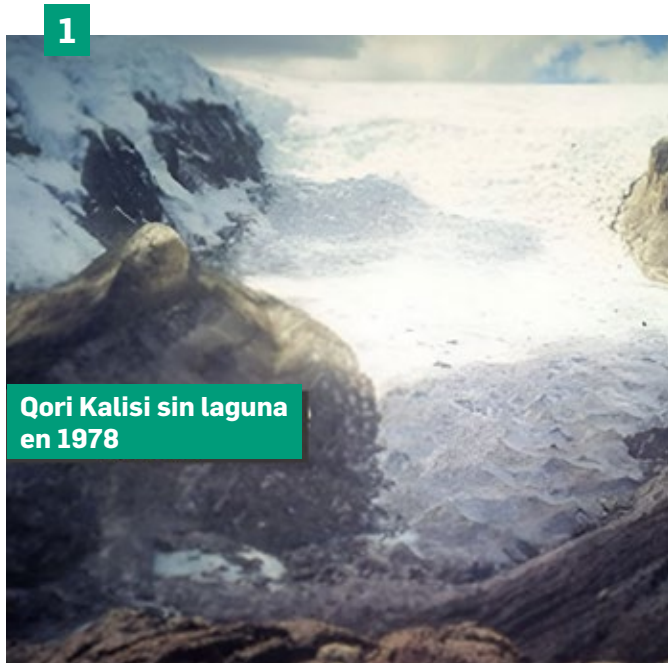


Las morrenas del Quelccaya forman crestas de sedimentos que trazan su antigua extensión y retroceso, mostrando cómo el hielo esculpió este paisaje andino durante milenios



El valle de Huancané muestra hoy las huellas que dejó el antiguo glaciar que lo recorrió hace más de 20 mil años.

La pérdida de hielo ha transformado drásticamente el paisaje del Quelccaya, dando origen a nuevas lagunas proglaciares que son testigos visibles del cambio climático. La más emblemática, Qori Kalis, comenzó a formarse a fines de los años 1980 frente a su lengua glaciar homónima y ha crecido de manera acelerada: de ser casi imperceptible en 1985 pasó a cubrir más de 0.3 km² para 2012 (Hanshaw & Bookhagen, 2014). Este crecimiento sostenido refleja la rápida contracción del hielo y se ha convertido en un caso de estudio paradigmático para entender los impactos del calentamiento global en los glaciares tropicales (Thompson et al., 2000, 2011).



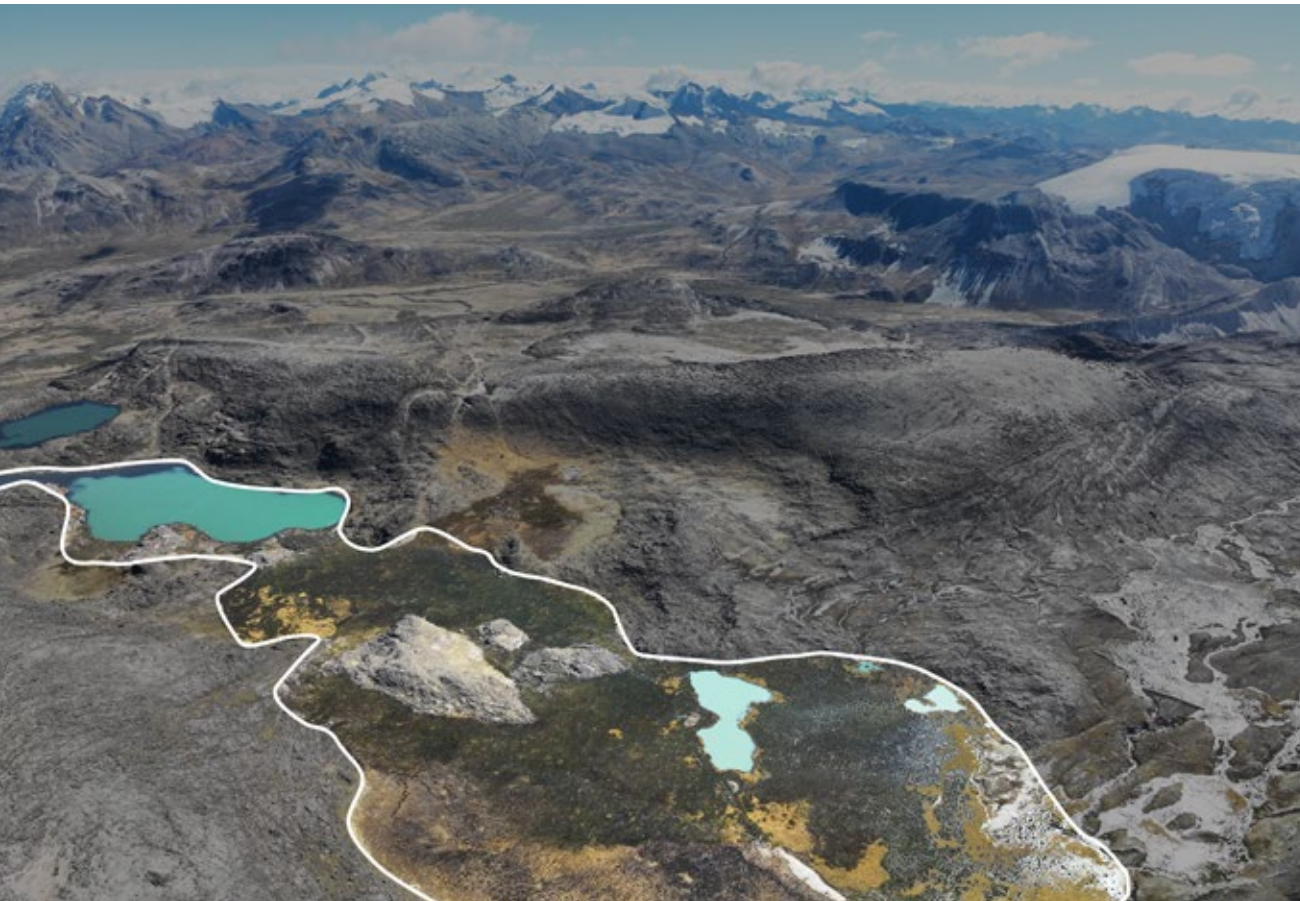
Imágenes de laguna Qori Kalis, nacida a fines de los años ochenta por el deshielo del Quelccaya. La fotografía 1 corresponde al año 1978, donde aún no existe la laguna. La fotografía 2, de 1983, muestra una lengua glaciar ligeramente más delgada, pero aún sin dar formación a la laguna Qori Kalis. En las fotografías 3 y 4, obtenidas respectivamente en el 2002 y 2022, se aprecia una amplia laguna, evidenciándose en la última imagen que la capa de hielo del Quelccaya ya no se encuentra en contacto con la laguna Qori Kalis.

Sin embargo, estas lagunas no son solo indicadores pasivos del cambio climático, sino también agentes activos en la transformación del paisaje. Su formación modifica los patrones hidrológicos, creando nuevos cuerpos de agua permanentes donde antes solo había hielo (Hanshaw & Bookhagen, 2014). Además, presentan riesgos potenciales: el represamiento natural por morrenas y la inestabilidad de bloques de hielo pendientes hacen que lagunas como Phacu Cucho puedan originar peligrosos aluviones glaciares en caso de colapso (Carey et al., 2012; Vilca, 2022). Así, mientras documentan el retroceso glaciar, estas lagunas están reescribiendo activamente la geografía y la dinámica de riesgo en la región, mostrando la compleja interacción entre el deshielo, la geomorfología y los sistemas hidrológicos andinos.



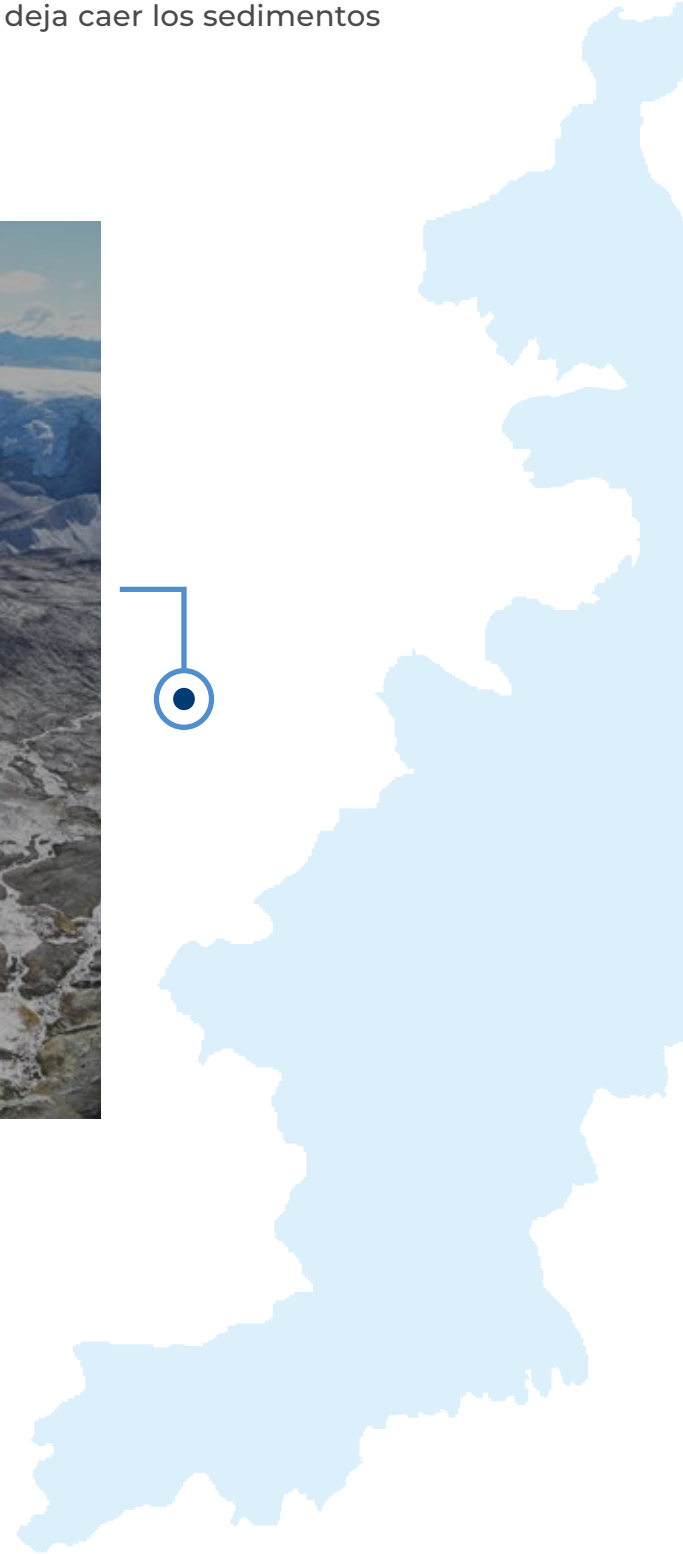
Marcas frescas de un aluvión reciente al este del Quelccaya revelan la fuerza destructiva de estos eventos en la alta montaña. Phacu Cucho, noviembre 2022.

El retroceso del glaciar Quelccaya no solo ha formado lagunas, sino también extensas llanuras de sedimentos en las zonas bajas llamadas llanuras de obturación. Estas áreas se crearon cuando el material fino, como arcillas y limos, fue arrastrado por el agua de deshielo, depositándose en antiguos valles glaciares o en zonas represadas por morrenas. Esto se produjo debido a la disminución de la fuerza del agua, proveniente del deshielo, por encontrarse sobre un terreno con una pendiente más suave que deja caer los sedimentos que lleva.



Las llanuras de obturación, en el sector Morojani al oeste del Quelccaya, actúan como esponjas naturales, al absorber y retener agua para formar suelos saturados, que a su vez sostienen frágiles ecosistemas altoandinos únicos.

En el Quelccaya, estas llanuras funcionan como esponjas naturales: durante las lluvias absorben y retienen agua, con lo que se forman suelos saturados de agua que albergan ecosistemas altoandinos especiales, que a su vez incluyen turberas de gran valor ecológico (Glas et al., 2018). Así, mientras el glaciar retrocede, deja tras de sí no solo paisajes transformados, sino también nuevos hábitats que cumplen funciones vitales en el frágil entorno de montaña.



Los procesos periglaciares también moldean el paisaje, con crioclastos que son fragmentos de roca fracturados por los ciclos de congelación – descongelación, donde las temperaturas se encuentran alrededor de los 0 °C (Anderson & Anderson, 2010). Estos bloques angulares se acumulan en laderas y bordes de morrenas, y crean los llamados canchales.

La arquitectura tectónica del basamento andino también se manifiesta en el entorno del Quelccaya a través de escarpes de falla bien definidos. Estas fracturas, algunas antiguas y otras aún activas, controlan la dirección de los valles, el drenaje del agua e incluso influyen en cómo retrocede el glaciar (Benavente et al., 2013). También actúan como líneas de debilidad donde la erosión trabaja más rápido, creando paredes abruptas y afectando la estabilidad de las lagunas glaciares. Así, mientras el hielo esculpe la superficie, estas fuerzas profundas siguen dando forma a la superficie andina.



La fotografía señala bloques de roca fracturados por el hielo y deshielo. Los crioclastos forman bloques angulares que se acumulan en laderas y morrenas, creando los característicos canchales del paisaje periglaciar. Quebrada Huayllani.

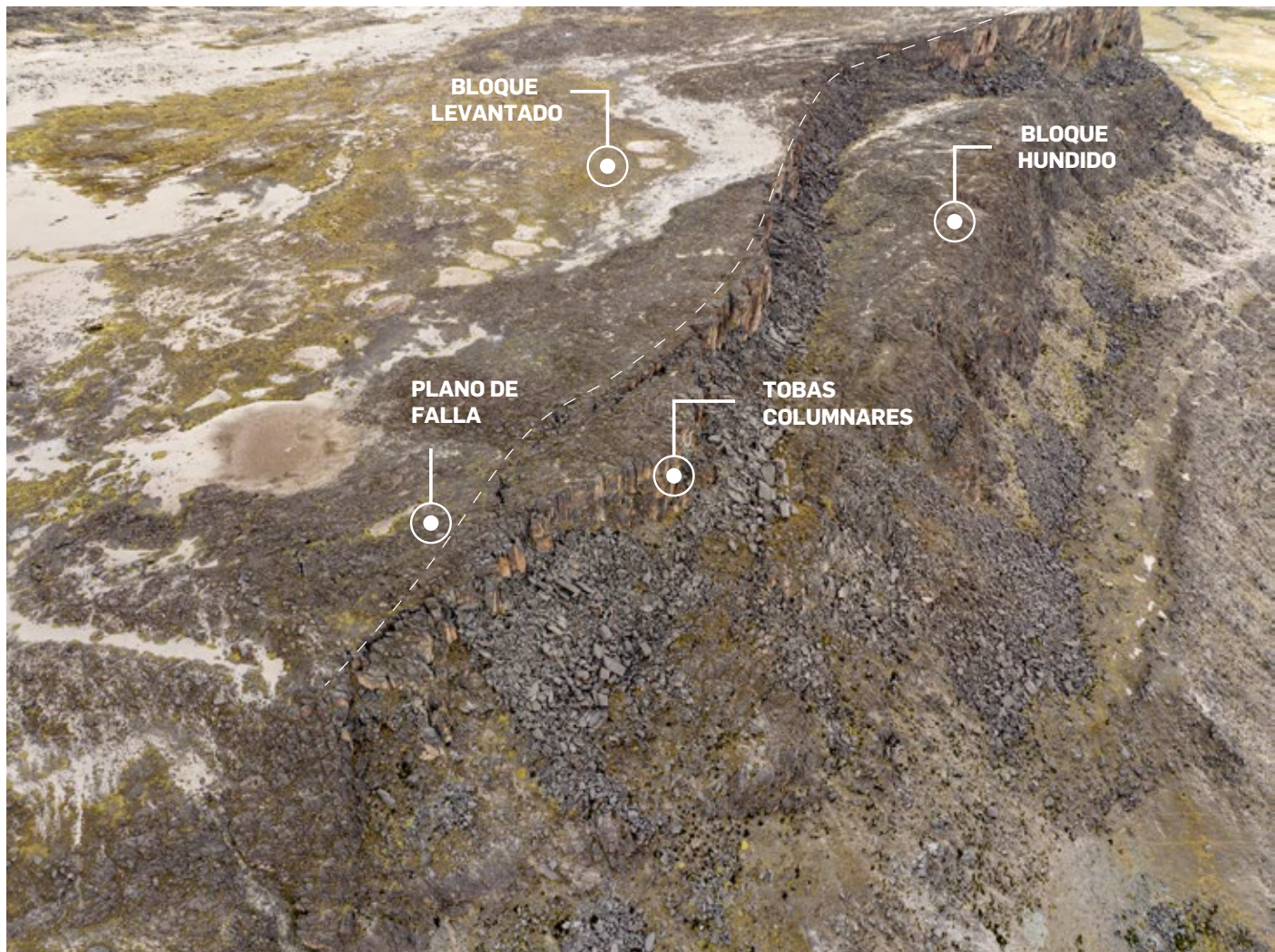
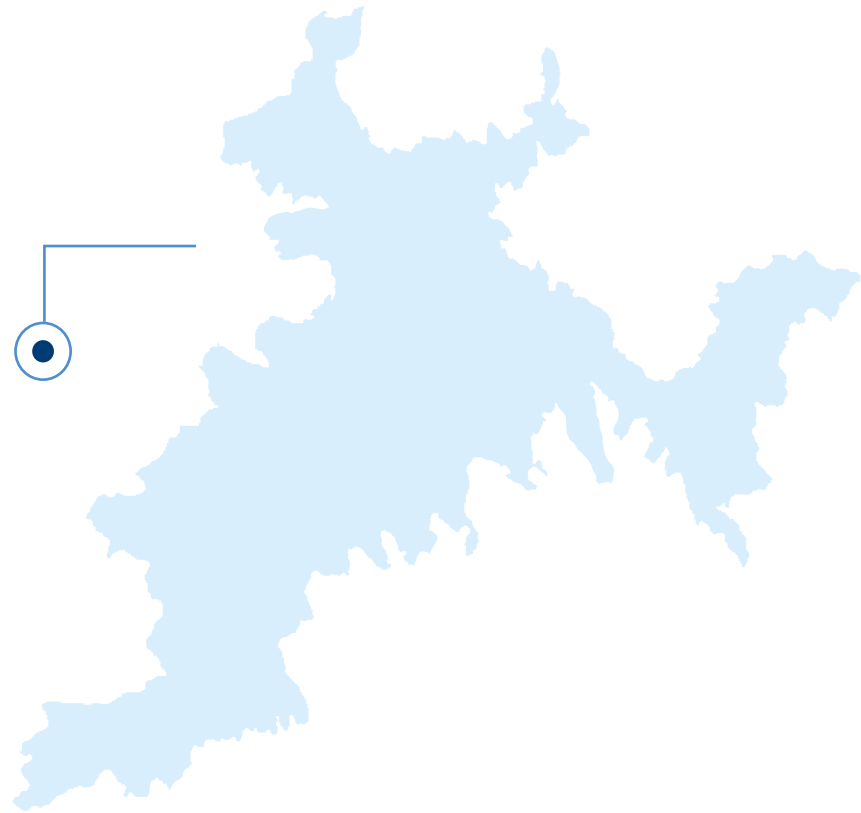


Simbología

-  Falla normal
-  Falla inversa
-  Falla de rumbo
-  Falla inferida

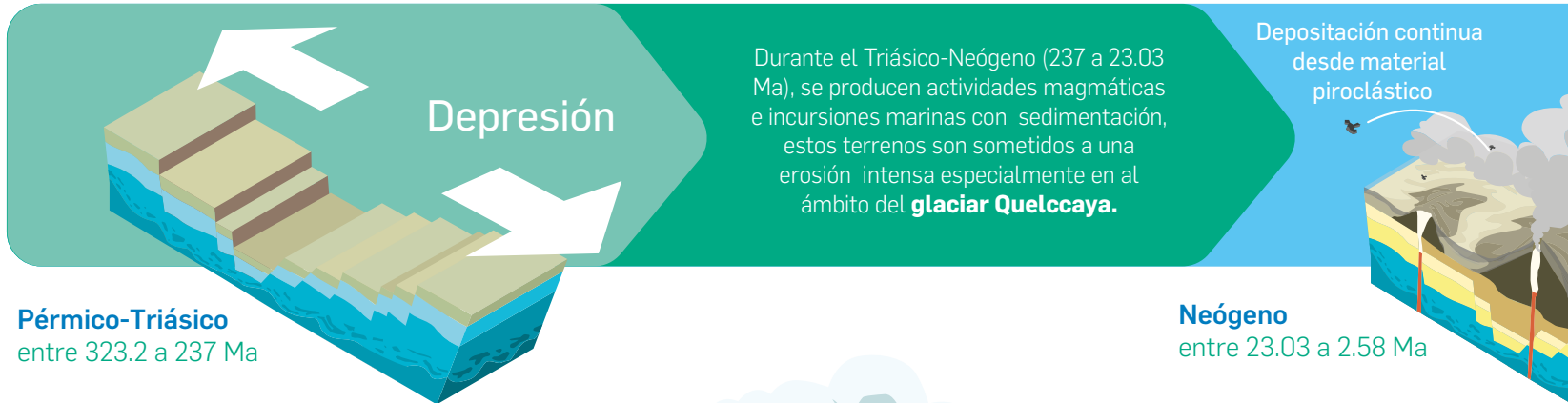
En el ámbito del glaciar Quelccaya se reconocen estructuras formadas en distintos periodos. Las fallas normales reflejan la descompresión del macizo tras el retroceso glaciar; las inversas, la prolongada compresión andina; y las fallas de rumbo, la reactivación de fracturas antiguas bajo nuevos esfuerzos.

Estos escarpes de falla muestran las fracturas abruptas en las rocas que delatan la tectónica de los Andes, dando formas escalonadas al relieve y controlando la disposición de valles, lagunas y afloramientos rocosos en el entorno del Quelccaya.



HISTORIA GEOLÓGICA DE

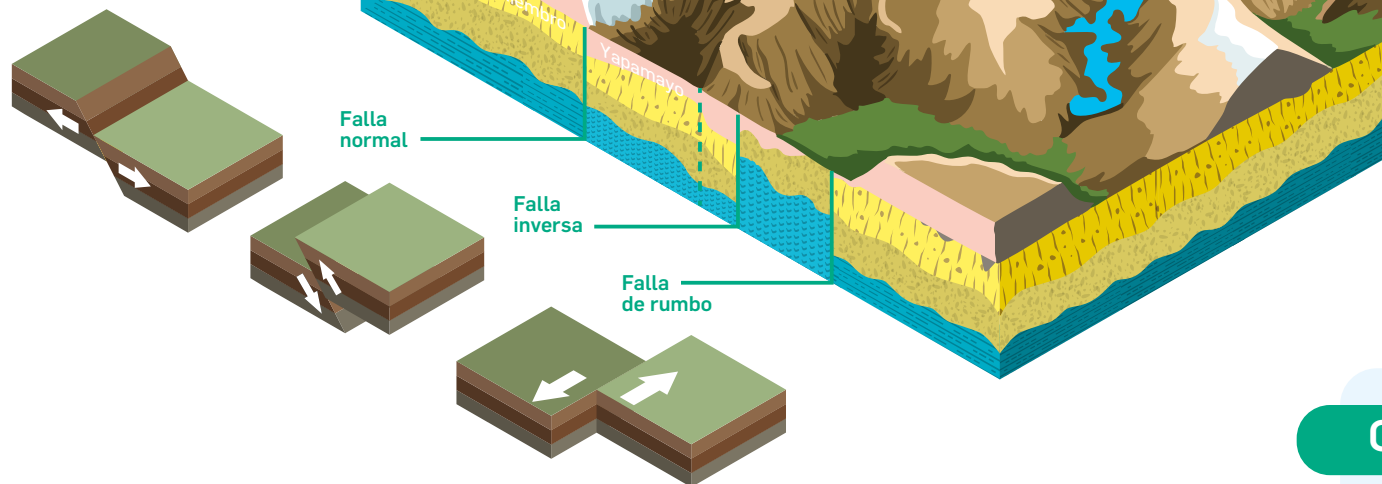
CÓMO SE FORMO



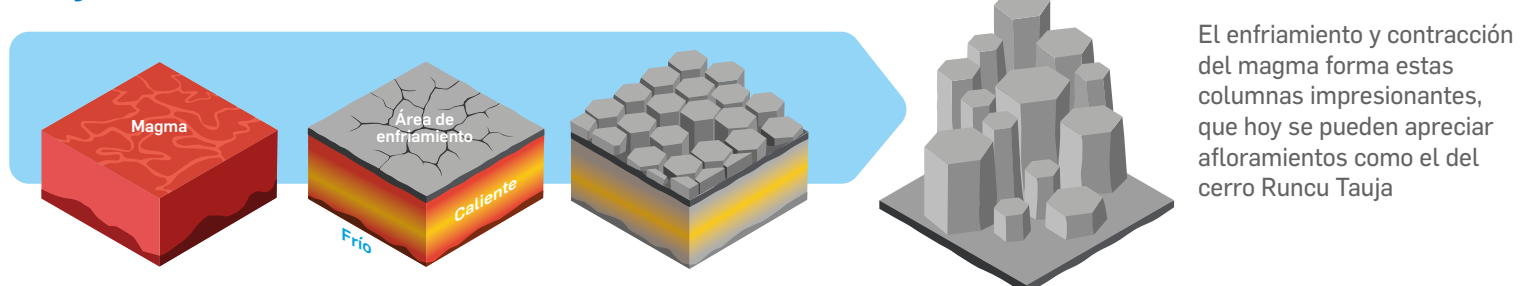
Estructuras geológicas

Hace referencia a la disposición de los materiales rocosos, abarcando su forma, tamaño, orientación y las relaciones que existen entre ellos.

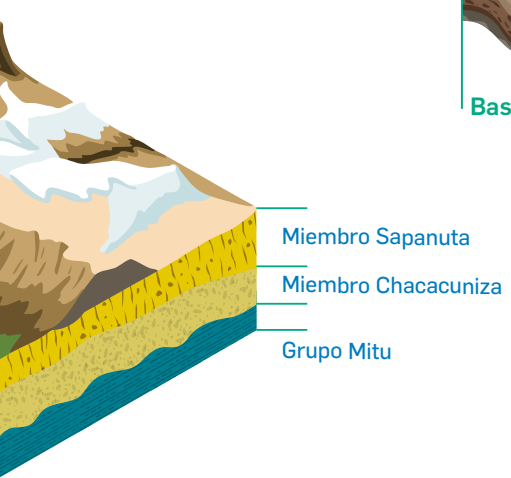
Falla geológica



Disyunción columnar



E UN GLACIAR TROPICAL

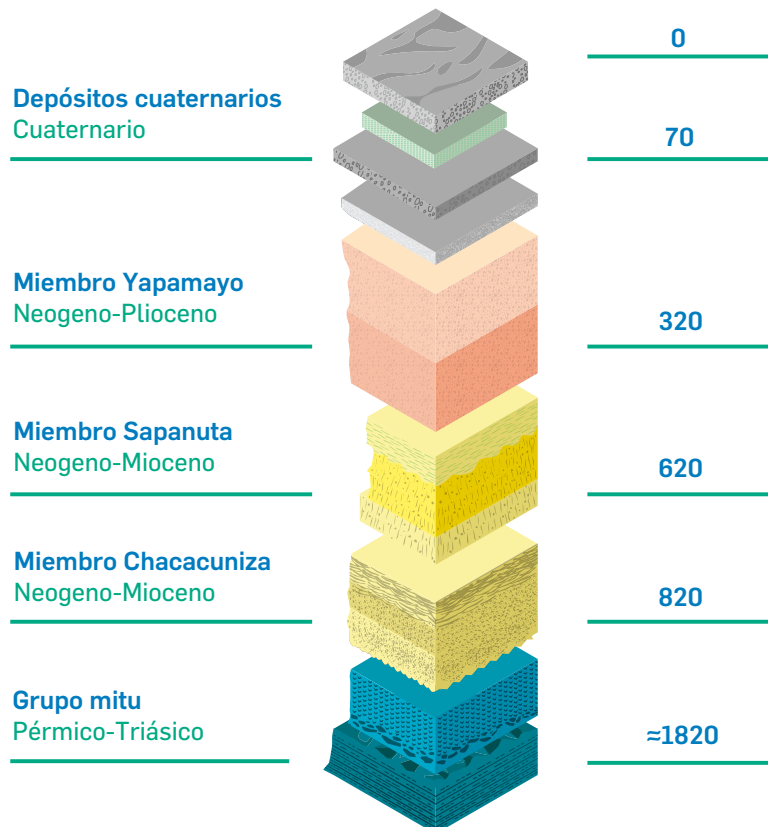


Bosque de rocas



Litología (edad)

Espesor (m)



Composición mineralógica



4

QUELCCAYA

A TRAVÉS DE LOS AÑOS

OSCAR VILCA | RICARDO VILA | VELNIA CHACCAI | LUIS QUISPE



El casquete glaciar Quelccaya es una masa de hielo que se expande y se retrae, de acuerdo a los cambios del clima global. Reconocido como uno de los glaciares tropicales más extensos del planeta, su retroceso acelerado lo ha convertido en un indicador indiscutible de los efectos del Cambio Climático. Los cambios son visibles, incluso desde el espacio.

Comprender su dinámica es una inquietud científica y además una necesidad crucial para valorar su rol como reserva estratégica de agua dulce, anticipar los riesgos asociados al retroceso glaciar, y reconocer por qué su monitoreo constante, minucioso y con recursos tecnológicos innovadores resulta cada vez más indispensable.

Este capítulo propone una mirada cercana a esa transformación: desde su evolución registrada a través de imágenes satelitales, geoindicadores y huellas dejadas por el movimiento del hielo en sus diferentes etapas, hasta la cantidad de agua dulce que almacena en la capa de hielo y en las lagunas de su entorno.



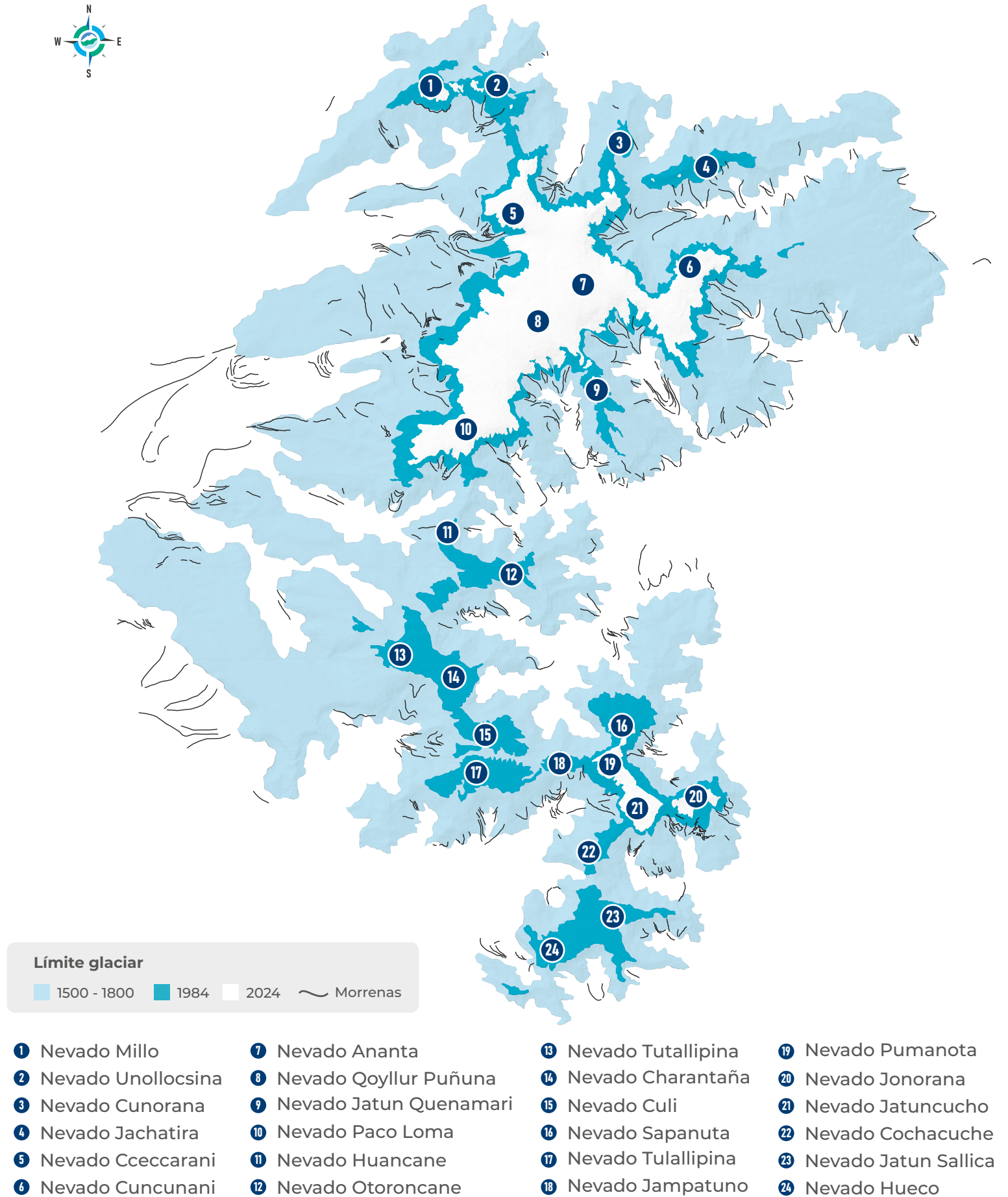
DE LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO A LA ACTUALIDAD

La historia de la transformación del casquete glaciar tiene una larga data. Estudios previos han revelado que la zona del Quelccaya ha sido escenario de ciclos glaciales y retrocesos durante milenios. Según Mercer & Palacios (1977), en la cordillera Vilcanota y cerca del casquete glaciar, la última glaciación culminó entre hace 28 000 y 14 000 años. Sin embargo, el evento más relevante para entender el contraste actual, ocurrió durante la última Pequeña Edad de Hielo (1500 – 1800 d. C.), cuando los glaciares que conforman el gran casquete Quelccaya alcanzaron una de sus máximas extensiones recientes (ver figura 4-1).



Figura 4-1

RECONSTRUCCIÓN DEL AVANCE MÁXIMO DEL QUELCCAYA EN LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO.



Lo que ahora se ve como glaciares aislados, en su momento fue una superficie continua ocupada por un gran casquete de hielo. Se estima que, alrededor de los años 1800, llegó a cubrir aproximadamente 420 km² (Vilca,2025), de acuerdo con los vestigios morfológicos que aún persisten (Thompson & Mosley-Thompson, 1987). Esta etapa marcó el último gran avance del hielo antes del proceso de retroceso moderno. La comparación con datos actuales resalta el impacto de las últimas décadas sobre la masa glacial.

LOS CAMBIOS EN LOS ÚLTIMOS 40 AÑOS

En las últimas cuatro décadas, el Quelccaya ha experimentado una transformación visible y medible. Gracias al esfuerzo de especialistas dedicados al estudio de los glaciares y su trabajo mediante el análisis de imágenes satelitales y registros en campo, hoy es posible trazar con precisión cómo y cuánto ha retrocedido esta masa de hielo milenaria, revelando el ritmo y la magnitud de un proceso que redefine el paisaje andino. Pero este retroceso reciente es solo un capítulo de una historia glacial que aún continúa desarrollándose.

1



Las transformaciones que ocurren en un glaciar dejan huellas evidentes sobre el paisaje: morrenas que marcan los límites antiguos del glaciar, sedimentos acumulados en los depósitos en forma de valles, lagunas de origen glaciar y estrías sobre las rocas que delatan el paso del hielo. Todo ello conforma un registro natural de su dinámica.

2

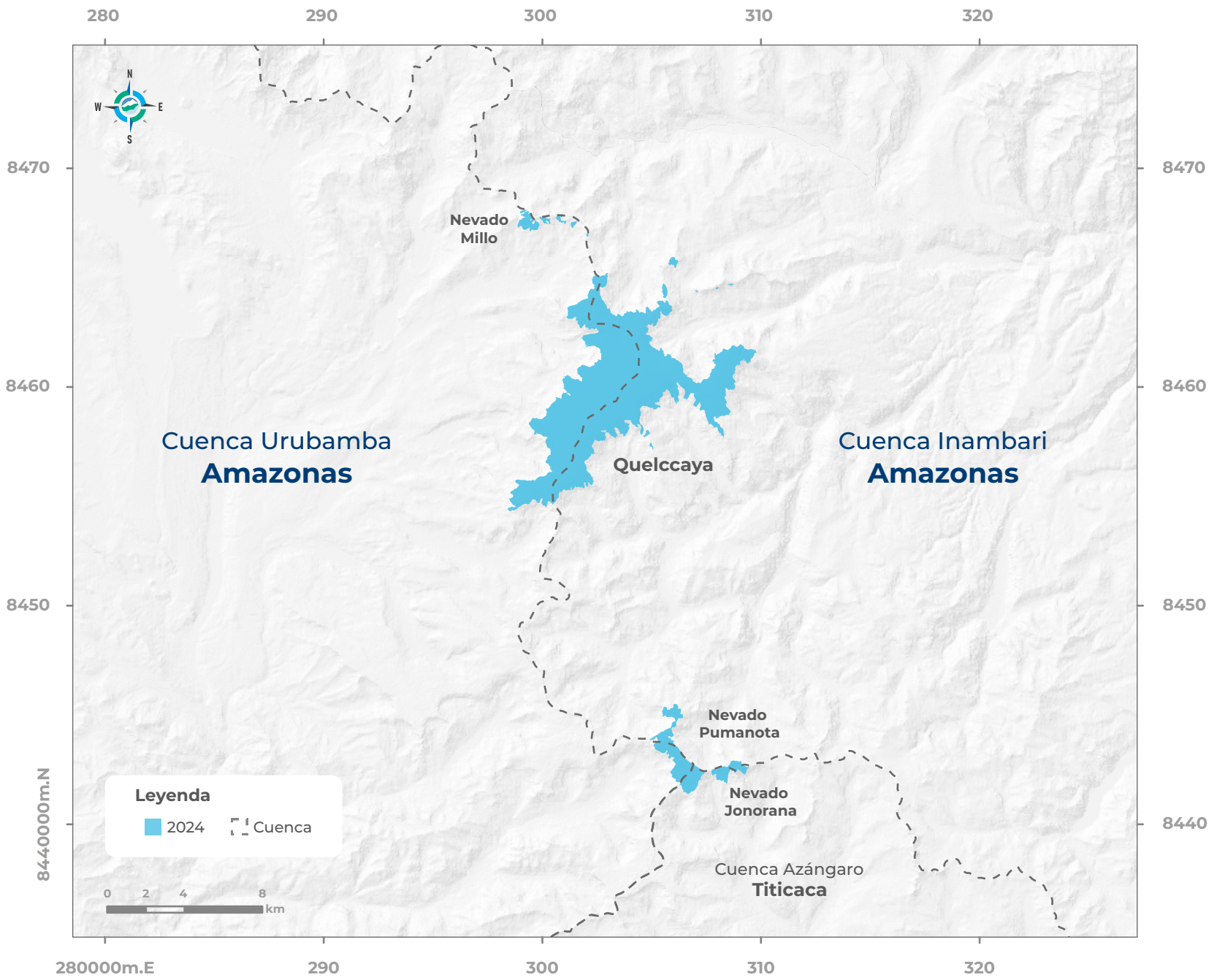


El análisis multitemporal con imágenes Landsat TM5 (1984) y Sentinel (2024) revela cambios alarmantes. Lo que en 1984 era un solo casquete unificado, se fragmentó en cuatro bloques aislados (Millo al norte; Pumanota y Jonorana al sur; y el núcleo central - conocido actualmente como Quelccaya), tal como se muestra en la figura 4-2. Esta fragmentación va más allá de la pérdida de hielo, pues está redefiniendo el paisaje, la hidrología y los microclimas en el entorno.

Frente del glaciar Killawasi en los últimos siete años, septiembre 2018 (1), julio 2025 (2).

Figura 4-2

FRAGMENTACIÓN DEL GRAN CASQUETE DE HIELO AL 2024



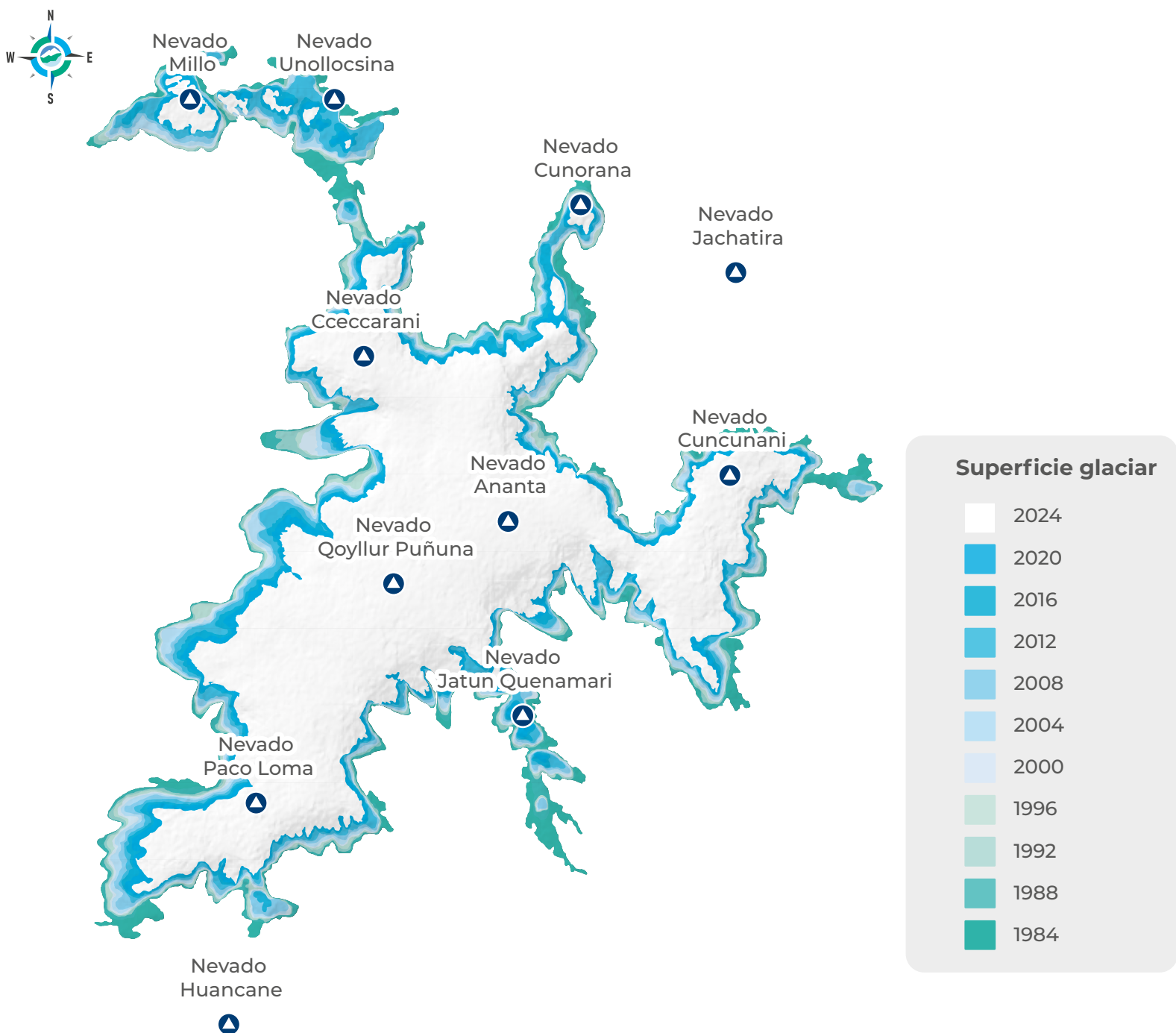
EN EL CONTEXTO ACTUAL, EL RETROCESO DE LOS GLACIARES SE EVIDENCIA CON LA FRAGMENTACIÓN DE LOS GRANDES CUERPOS DE HIELO QUE OCURRE COMO UN PROCESO INEXORABLE.

El bloque del núcleo central del Quelccaya ha sufrido los cambios más críticos en tres frentes entre 1984 y 2024, tal como se puede apreciar en la figura 4-3:

- **Frente oeste:** la combinación de pendientes moderadas y lagunas glaciares son factores que condicionan y aceleran la pérdida de hielo.
- **Frente norte:** se evidencia la desconexión con los nevados Millo, Unollocsina y Cunorana.
- **Frente sureste:** el nevado Jatun Quenamari muestra una reducción acelerada, dejando un conjunto de fragmentos glaciares o glaciaretos.

Figura 4-3

SUPERFICIE GLACIAR EN LA CAPA DE HIELO QUELCCAYA ENTRE 1984 Y 2024



Sobre la superficie señalada en la figura 4-3, las cifras son evidentes: entre los años 1984 y 2024, el casquete glaciar Quelccaya perdió 26 km² (41% de su área), con un ritmo que se ha intensificado drásticamente en los últimos años. Las tasas de retroceso glaciar durante los últimos 40 años brindan los siguientes datos:

- 1984–2012: 0.6 km²/año
- 2012–2024: 0.9 km²/año (+50% de aceleración)

EL RETROCESO GLACIAR DEL QUELCCAYA DURANTE LOS ÚLTIMOS 40 AÑOS OCASIONA UN CAMBIO ACELERADO EN EL EQUILIBRIO DEL ECOSISTEMA ANDINO. LA TRANSFORMACIÓN ES TAN EVIDENTE QUE PUEDE VERSE INCLUSO DESDE EL ESPACIO.

Tal como se muestra en las figura 4-4 y figura 4-5, en las primeras dos décadas, el retroceso glaciar fue más lento; pero a partir del año 2000 se aceleró, en especial entre los años 2012 y 2024. En este último periodo la reducción ha sido significativa, lo que marca una etapa crítica en la historia reciente del Quelccaya

Figura 4-4

RETROCESO GLACIAR DEL CASQUETE QUELCCAYA DURANTE LOS AÑOS 1984 Y 2024

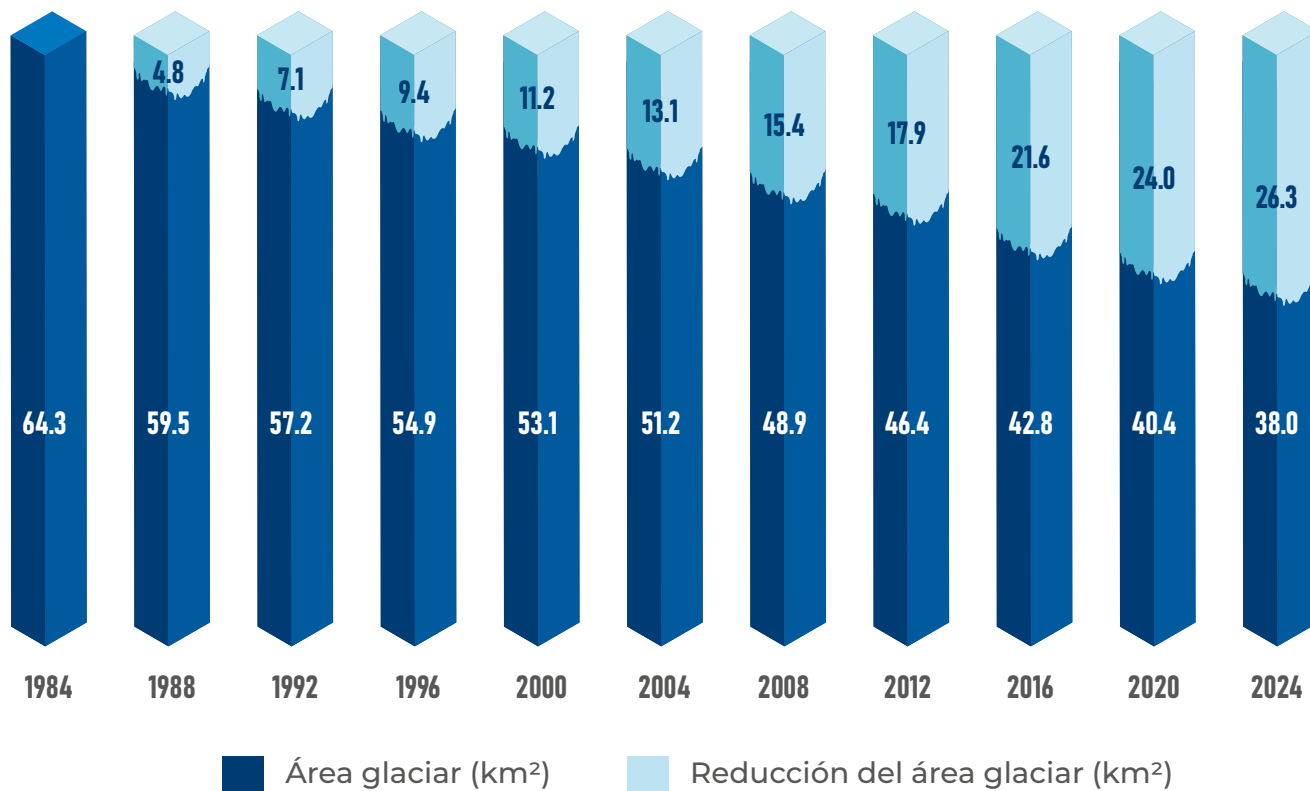


Figura 4-5

MONITOREO DE LOS CAMBIOS DEL GLACIAR, DESDE LA CIMA DEL DOMO QOYLLUR PUÑUNA.



El análisis multitemporal no solo traza un antes y un después, sino que permite entender las tendencias. Gracias a la comparación de datos en distintos años, se puede visualizar cómo y en qué dirección se ha reducido la masa glaciar. Por ello, este enfoque no solo muestra cifras, sino también patrones que ayudan a anticipar escenarios futuros.

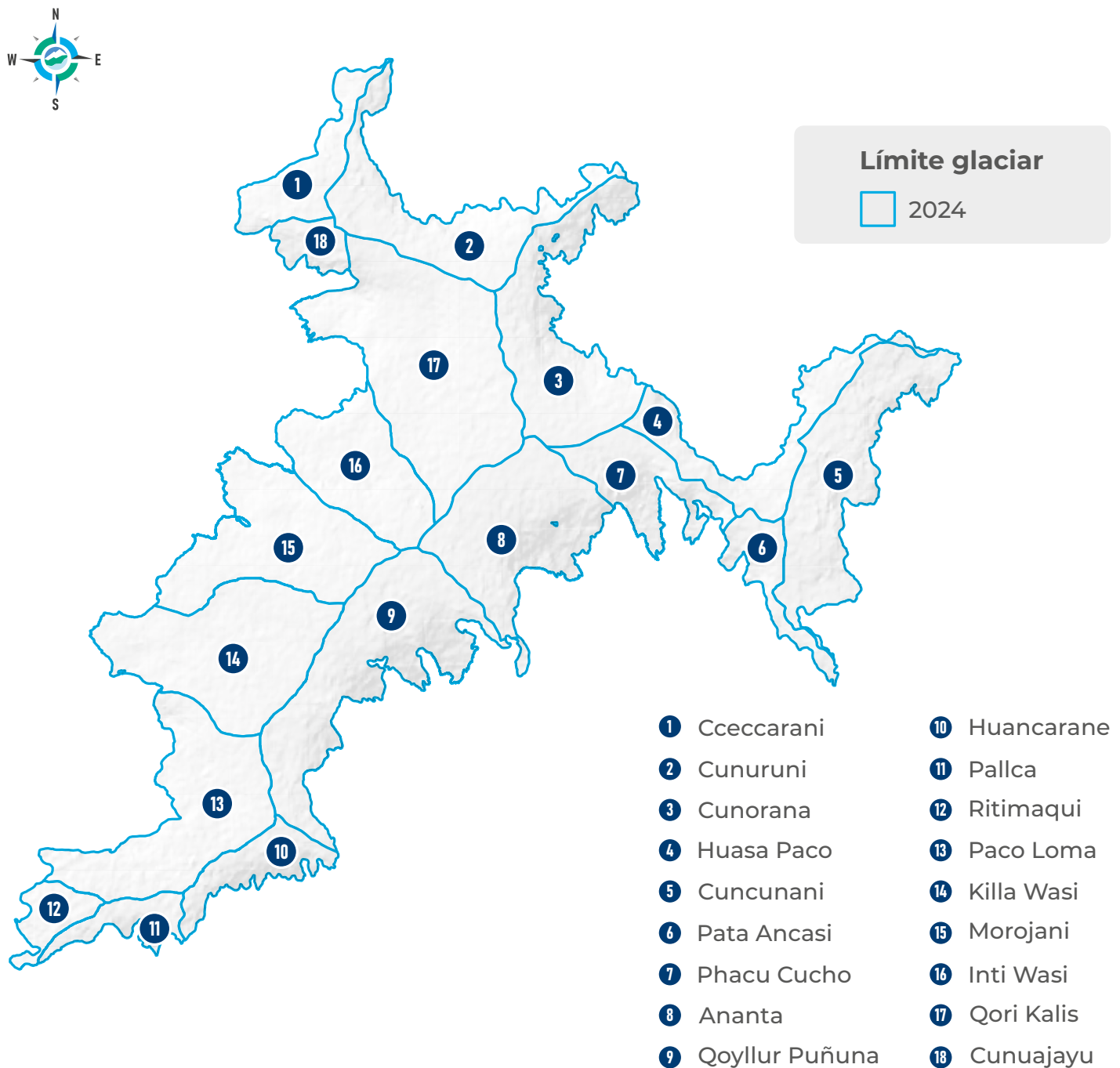
EVALUAR LA VARIACIÓN DEL GLACIAR A TRAVÉS DE LOS AÑOS ES FUNDAMENTAL PARA LA GESTIÓN DE RIESGOS, PORQUE DONDE HAY RETROCESO GLACIAR, TAMBIÉN HAY AMENAZAS LATENTES.

ANATOMÍA DEL CASQUETE GLACIAR QUELCCAYA

En el año 2024, el área mayor del casquete glaciar Quelccaya está conformado por 18 glaciares delimitados de acuerdo a las líneas de flujo, forma de frentes y zonas de acumulación-ablación (ver figura 4-6). Estas masas de hielo se reparten equitativamente entre Cusco (18.4 km²) y Puno (18.5 km²), siendo el Qori Kalis el glaciar con mayor extensión con 4.6 km²; seguido del Qoyllur Puñuna, con 3.5 km².

Figura 4-6

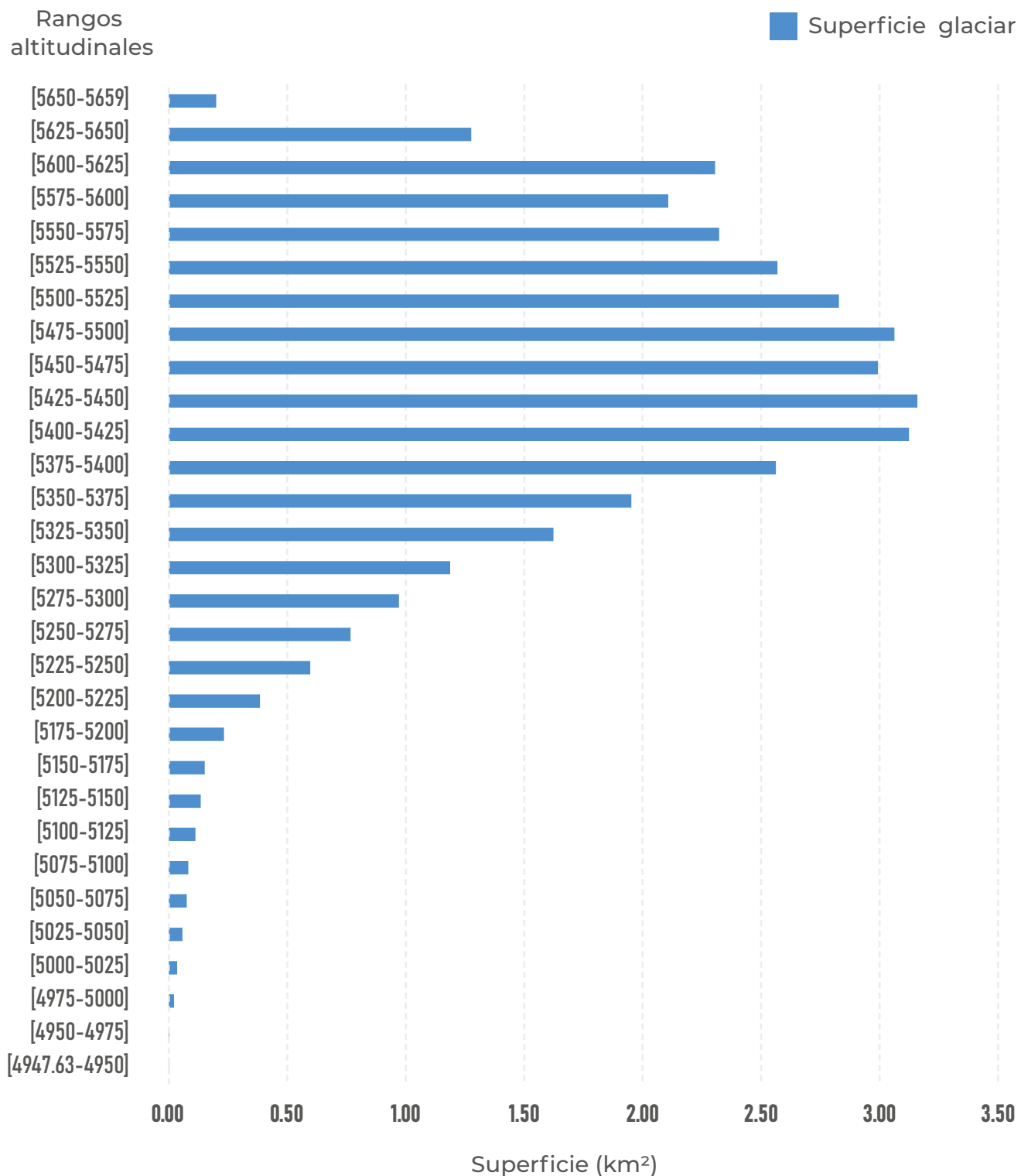
DELIMITACIÓN DE GLACIARES EN EL QUELCCAYA



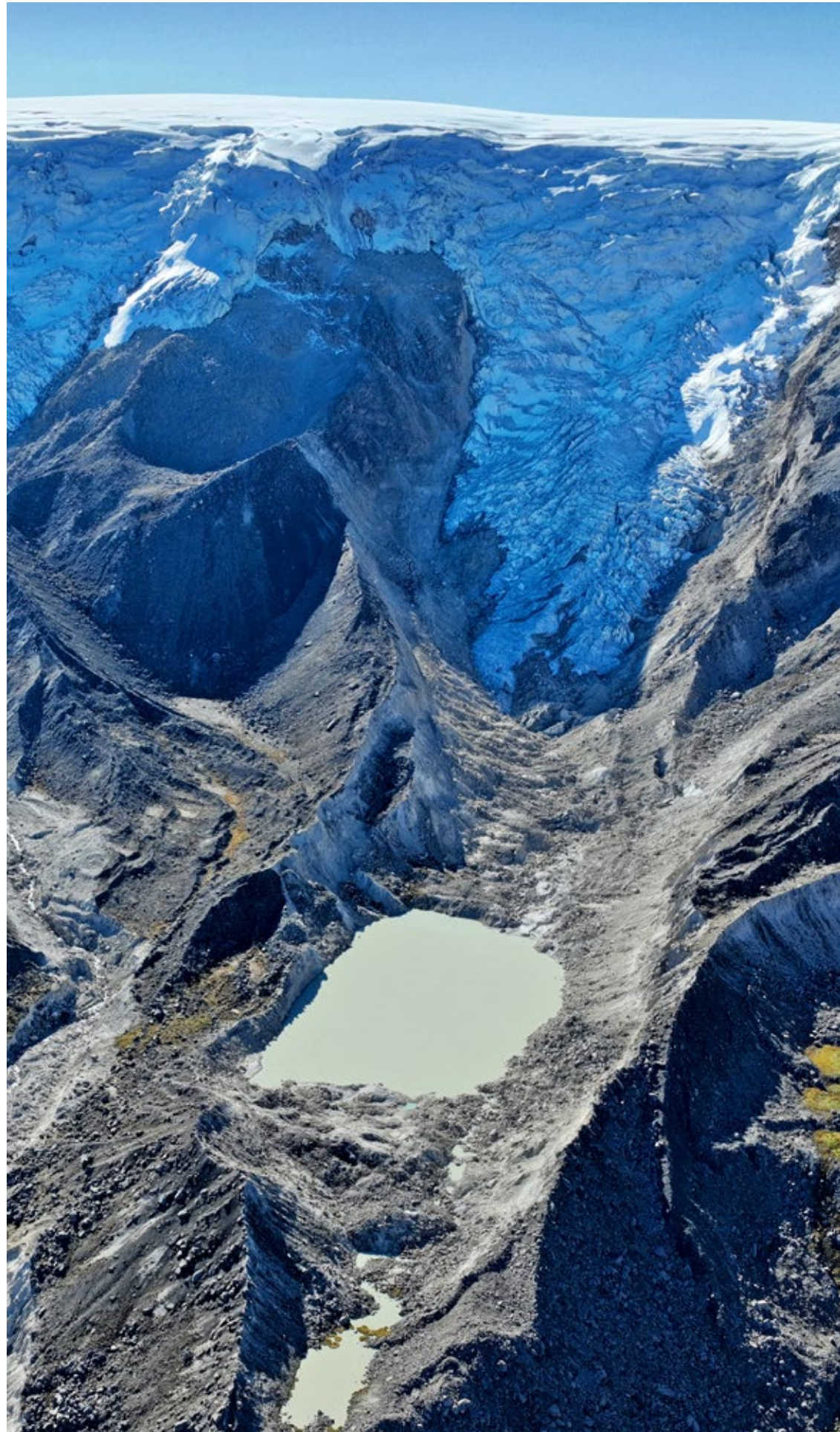
El corazón del Quelccaya tiene una altitud máxima de 5659 m s. n. m. en el domo Qoyllur Puñuna, “Donde duermen las estrellas”; mientras que las zonas más bajas, que alcanzan solamente los 4950 m s. n. m., se localizan en el glaciar Phacu Cucho, “El rincón resplandeciente”. Sin embargo, los glaciares en general se concentran en mayor proporción sobre los 5300 m s. n. m., tal como se aprecia en la figura 4-7.

Figura 4-7

DISTRIBUCIÓN, SEGÚN ALTITUD, DE LA SUPERFICIE DE LA CAPA DE HIELO DEL QUELCCAYA



LA ALTITUD MÁS BAJA DEL CASQUETE GLACIAR QUELCCAYA, A 4950 M S. N. M ., SE ENCUENTRA EN PHACU CUCHO, PRÓXIMO A LA LAGUNA DEL MISMO NOMBRE, QUE NO EXISTÍA ANTES DEL 2000. UNA SEÑAL INEQUÍVOCA DEL RETROCESO ACELERADO DEL QUELCCAYA





La topografía del Quelccaya condiciona una morfología glaciar única, donde cada grado de inclinación determina el destino del hielo. A diferencia de la mayoría de los glaciares tropicales, el casquete revela lo siguiente:

- El 53% de la superficie glaciar tiene pendientes moderadas (8° - 25°), una singularidad que lo diferencia de otros glaciares tropicales, lo que marca su sello característico.
- Los frentes situados hacia el departamento de Puno exhiben pendientes muy fuertes ($> 50^{\circ}$), generando un glaciar con bloques de alta inestabilidad (seracs).
- El retroceso glaciar se acentúa con la pérdida de superficie en aquellos frentes que presentan pendientes bajas (0° - 8°), que representan el 13% de la superficie del casquete.
- La cota crítica de la línea de nieve, alcanzada a finales de octubre del 2024, fue de 5580 m s. n. m. Esta actúa como un indicador: toda la capa de hielo que se encuentre por debajo de esta línea es altamente susceptible a la pérdida acelerada de masa glaciar o ablación.

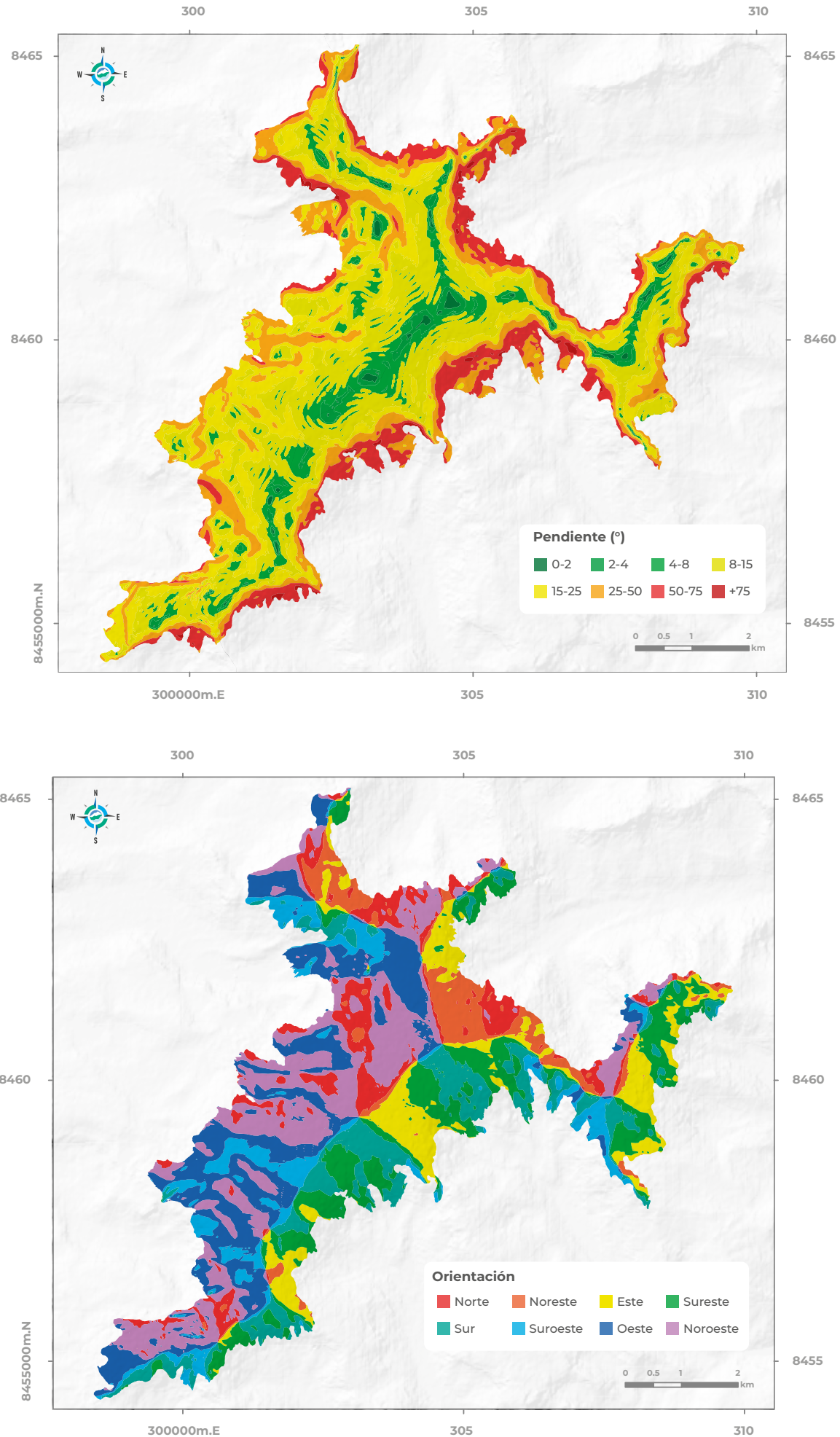
Además, la orientación de los glaciares del Quelccaya evidencian también su vulnerabilidad (ver figura 4-8):

- El 39% de la superficie mira al noroeste y oeste, y recibe el impacto directo del sol entre las 11:00 y 15:00 horas, las más críticas del día en relación a la incidencia solar.
- Los glaciares Cceccarani, que probablemente signifique “lugar antiguo”; Qori Kalis⁵; “Lengua de oro” e Inti Wasi “Casa del Sol” son los que lideran esta exposición, con superficies que funcionan como espejos para la radiación.

⁵ Llamado probablemente Qori Kalis en las primeras expediciones del Quelccaya en lugar de Qori K´allu “lengua de oro”

Figura 4-8

DISTRIBUCIÓN DE PENDIENTES Y DE LAS ORIENTACIONES SOBRE LA SUPERFICIE DEL QUELCCAYA



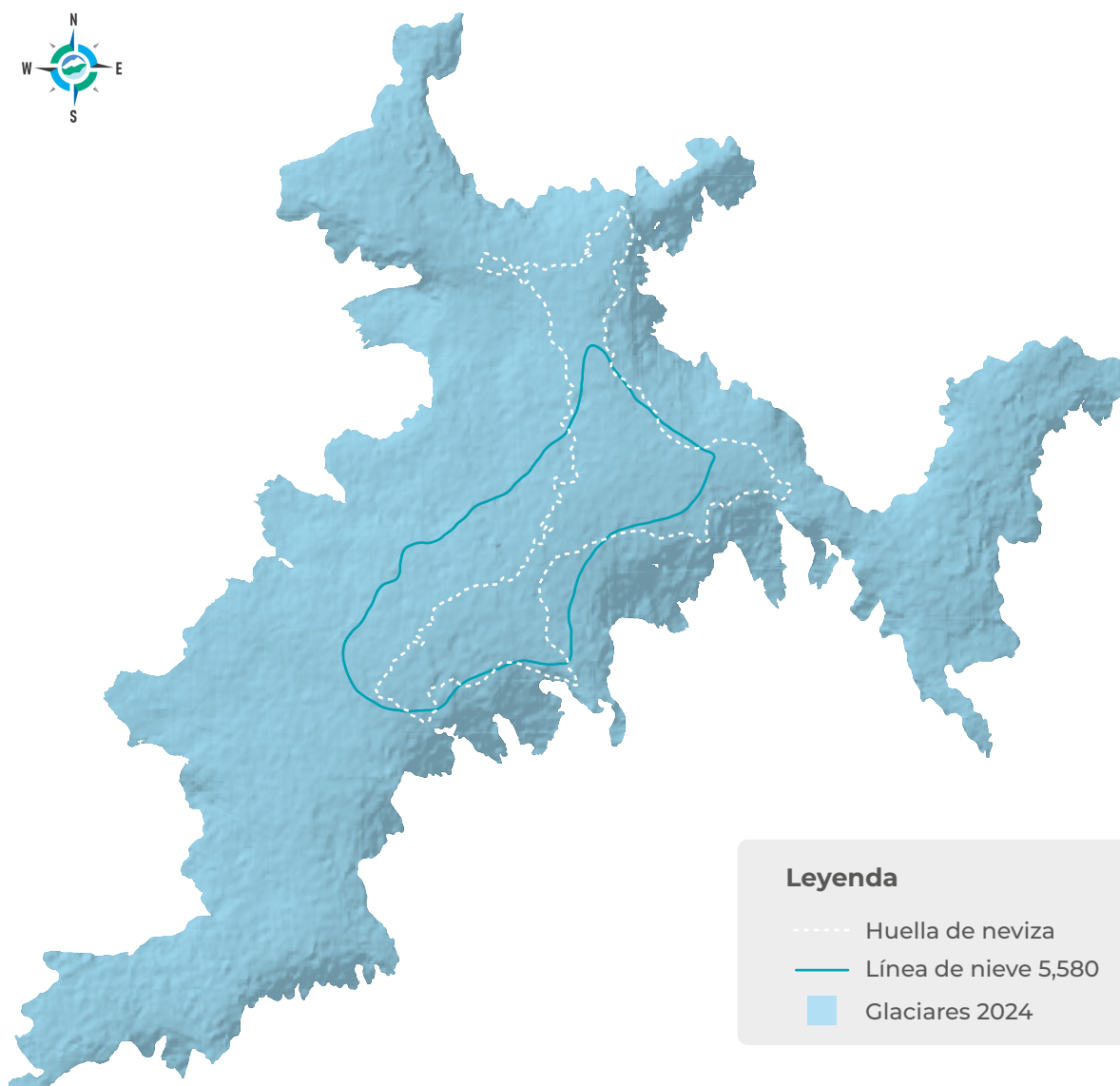
LAS HUELLAS EN EL HIELO GLACIAR

Mientras la topografía define la estructura básica del Quelccaya, su morfología superficial revela la diversidad de formas que adopta el hielo bajo las condiciones climáticas extremas de los Andes. Domos, lenguas glaciares, penitentes y grietas no son solo accidentes geográficos, sino también indicadores claves de los procesos de acumulación y ablación que moldean este sistema glaciar.

En la actualidad, el Quelccaya presenta un delicado equilibrio entre ganancia y pérdida de hielo. El monitoreo realizado por el INAIGEM entre 2023 y 2024 ha permitido observar con claridad las transformaciones morfológicas más recientes del casquete glaciar. Uno de los hallazgos más relevantes es el comportamiento de las zonas de acumulación y ablación, que evidencian un retroceso sostenido del glaciar. A pesar de la presencia de áreas donde aún se deposita nieve, su permanencia ha disminuido de forma considerable, en muchos de sus glaciares ya no existe una zona de acumulación permanente (ver figura 4-9).

Figura 4-9

LÍNEA DE NIEVE CERCANA A LA CUMBRE DEL CASQUETE GLACIAR, INDICADOR DEL ESTADO CRÍTICO EN OCTUBRE DEL 2024





LOS GLACIARES QUE CONFORMAN EL QUELCCAYA, COMO EL RITIMAQUI (MANO DE HIELO), PACO LOMA (COLINA DE LA ALPACA), CUNUAJAYU (ALMA DE NIEVE) Y CCECCARANI (LUGAR ANTIGUO) EN CUSCO, JUNTO CON EL PALLCA (DONDE SE SEPARA), HUANCARANE (LUGAR CON TAMBOR), GUNCUNANI (LUGAR DEL GUSANO) Y PATA ANCASI (MIRADOR DEL ÁGUILA) EN PUNO, YA NO CONSERVAN NIEVE PERMANENTE EN SUS CUMBRES.

En la actualidad el Quelccaya está dominado por una gran zona de ablación. Los registros mensuales obtenidos con drones muestran que incluso en sus partes más elevadas, el hielo está expuesto a procesos de fusión. En estos sectores, la superficie glaciar revela signos claros de fusión intensa: grietas, penitentes, manchas oscuras de crioonita y pequeñas lagunas que se forman sobre el hielo. Esta situación ha desplazado hacia arriba la línea de nieve, y en consecuencia la línea de equilibrio (ELA). Hoy, se estima que esta línea alcanza los 5580 m s. n. m., una altitud que antes se consideraba estable para la acumulación (Vilca, 2025a). Este ascenso refleja un desequilibrio cada vez más marcado en el balance del glaciar.

Figura 4-10

LA LÍNEA DE NIEVE ALCANZÓ LA CUMBRE DEL QUELCCAYA Y EXPONE UN GRAN PORCENTAJE DE LA CAPA DE HIELO A CONDICIONES DE ABLACIÓN. SE OBSERVA LA HUELLA DE LA LÍNEA DE NIEVE EN EL GLACIAR KILLA WASI.



La observación in situ, realizada por los especialistas del INAIGEM, ha permitido identificar con mayor precisión las formas superficiales y estructurales del glaciar (ver Tabla 4-1). Elementos como grietas, seracs, ondulaciones o cavernas glaciares, además de lagunas supraglaciares, se están convirtiendo en signos distintivos de un glaciar en retroceso. Estas formaciones no solo reflejan la pérdida de volumen de hielo, sino también un reacomodo interno que evidencia procesos de fusión, tanto en la superficie como en el interior del glaciar.

A nivel superficial de la capa de hielo también aparecen formas influenciadas por la topografía y el clima. Desde los penitentes de hielo (estructuras delgadas y afiladas formadas por sublimación) hasta glaciaretos que se fragmentan de masas mayores, todos estos elementos apuntan hacia una rápida transformación del entorno glaciar (ver Tabla 4-1). El ascenso de la línea de nieve, particularmente en octubre y noviembre, coincide con los meses de mayor fusión, convirtiendo a este periodo en el más crítico registrado en las últimas décadas, y posiblemente desde el final de la Pequeña Edad de Hielo.





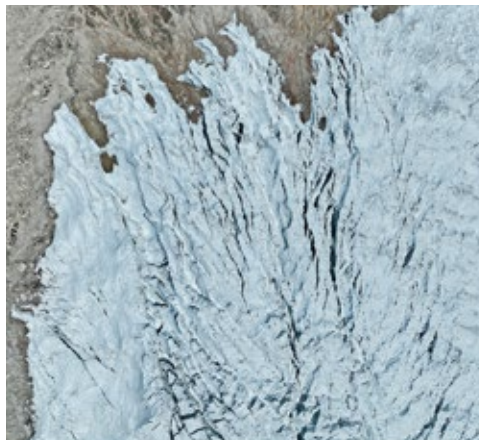
Seracs

Bloques de hielo separados por grietas profundas, que suelen formarse en zonas de ruptura del glaciar, en especial en pendientes pronunciadas.



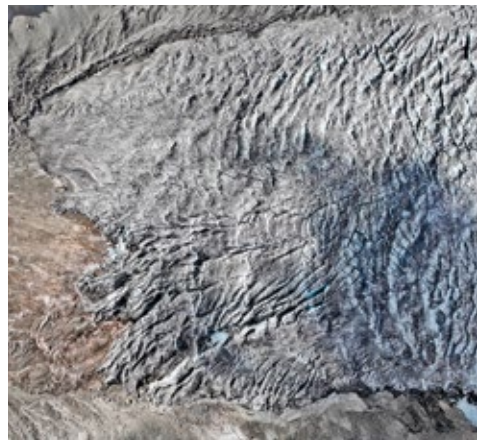
Ondulaciones

Deformaciones en la superficie glaciar relacionadas con variaciones en el flujo y con la topografía del terreno.



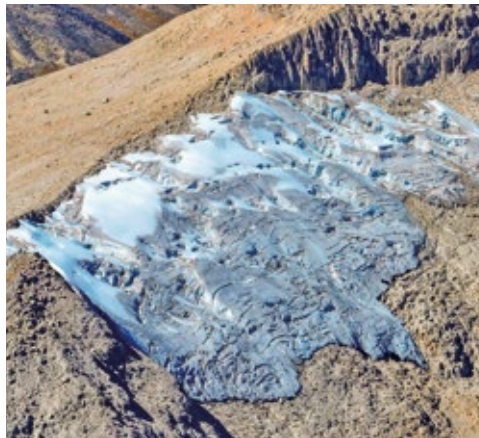
Grietas (crevasses)

Fracturas abiertas por tensiones frecuentes en zonas con cambios de pendiente. Todo esto es habitual en el Qori Kalis.



Lengua glaciar

Parte inferior del glaciar que se adentra pendiente abajo en un valle y adopta la forma de una "lengua". El Qori Kalis es un ejemplo claro.



Glaciaretas

Fragmentos de hielo aislados. Se originan por la pérdida de masa de glaciares mayores.





Lagunas supraglaciares

Cuerpos de agua que se forman en la superficie de los glaciares dentro de depresiones que retienen el agua de fusión. Son indicadores de fusión e inestabilidad térmica.



Cavernas glaciares

Formaciones internas causadas por erosión hídrica dentro o debajo del glaciar. Algunas albergan fauna y flora adaptada.



Penitentes de hielo

Láminas altas y delgadas de nieve endurecida, esculpidas por el sol. Aparecen con más frecuencia desde el año 2020. Se distribuyen en mayor frecuencia en la zona de transición de la ELA (5300 – 5600 m s. n. m.), en particular en el sector oeste.



Morrenas

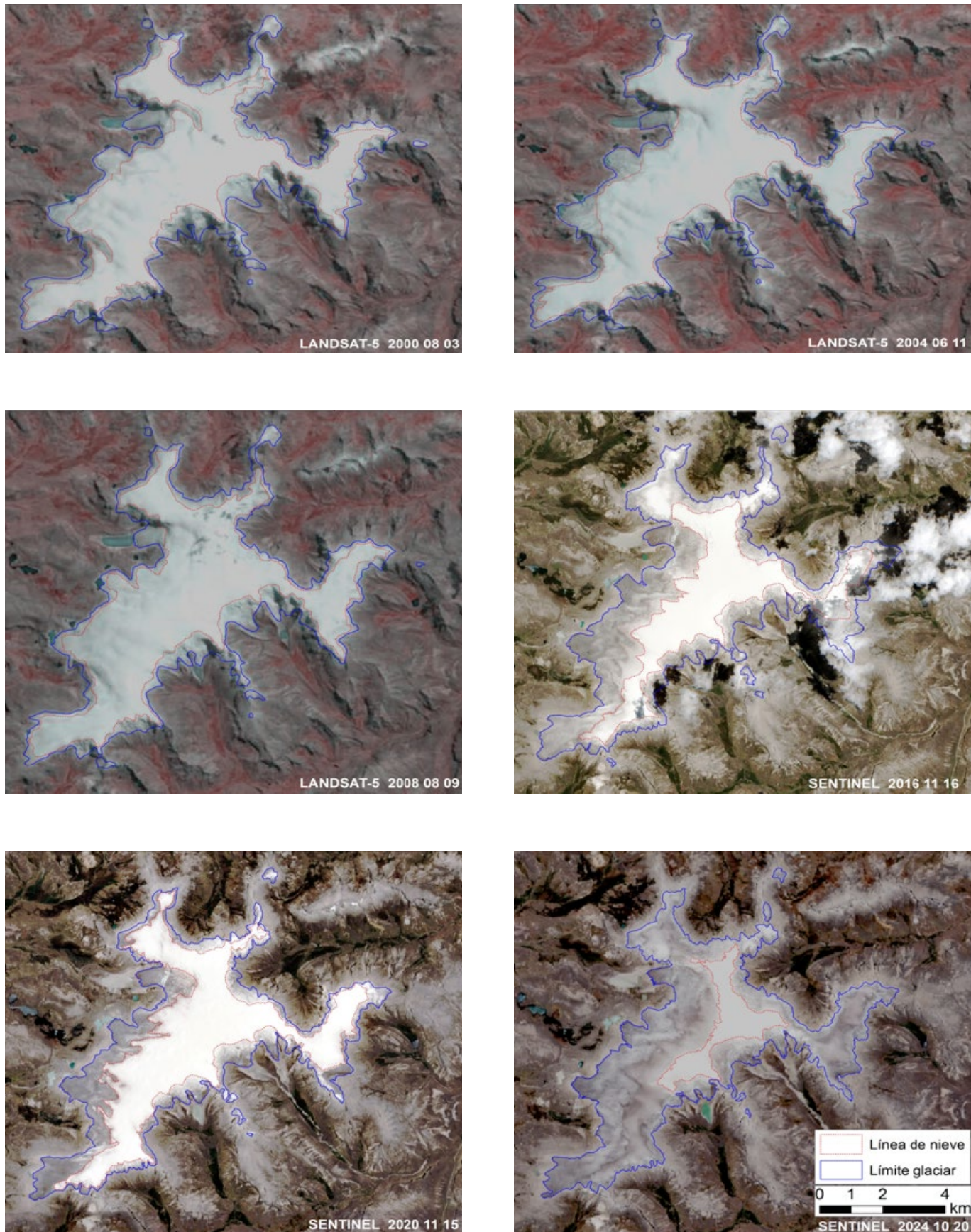
Acumulaciones de sedimentos glaciares (laterales, frontales, centrales).

Los meses de octubre y noviembre marcan una temporada crítica para el Quelccaya, ya que es cuando existe mayor persistencia de días despejados y el sol despliega su mayor energía sobre el glaciar. Durante estos meses, la fusión del hielo se incrementa de forma súbita, lo que hace retroceder en forma dramática la línea de nieve, ese límite natural que separa la nieve perenne del hielo expuesto. Los registros muestran un ascenso continuo: desde el año 2000, este límite ha subido más de 200 m, con saltos alarmantes en 2016 y 2024. Este último año marcó un hito, estableciéndose probablemente como un periodo más seco en cuatro siglos.



Figura 4-11

VARIACIÓN TEMPORAL DE LA LÍNEA DE NIEVE EN EL QUELCCAYA ENTRE LOS AÑOS 2000 Y 2024, QUE EVIDENCIA LA DINÁMICA DE LOS ÚLTIMOS 24 AÑOS.



RESERVA DE AGUA PARA LA VIDA

El Quelccaya es agua almacenada en estado sólido que, al derretirse, alimenta diversos ecosistemas como pajonales, bofedales, lagunas y ríos, así como también la demanda hídrica de los departamentos de Cusco y Puno. Las estimaciones más recientes del volumen de agua que contiene el glaciar, y las lagunas periglaciares, muestran el potencial hídrico para el presente y futuro de las poblaciones que se benefician de este recurso.

AGUA ALMACENADA EN EL QUELCCAYA

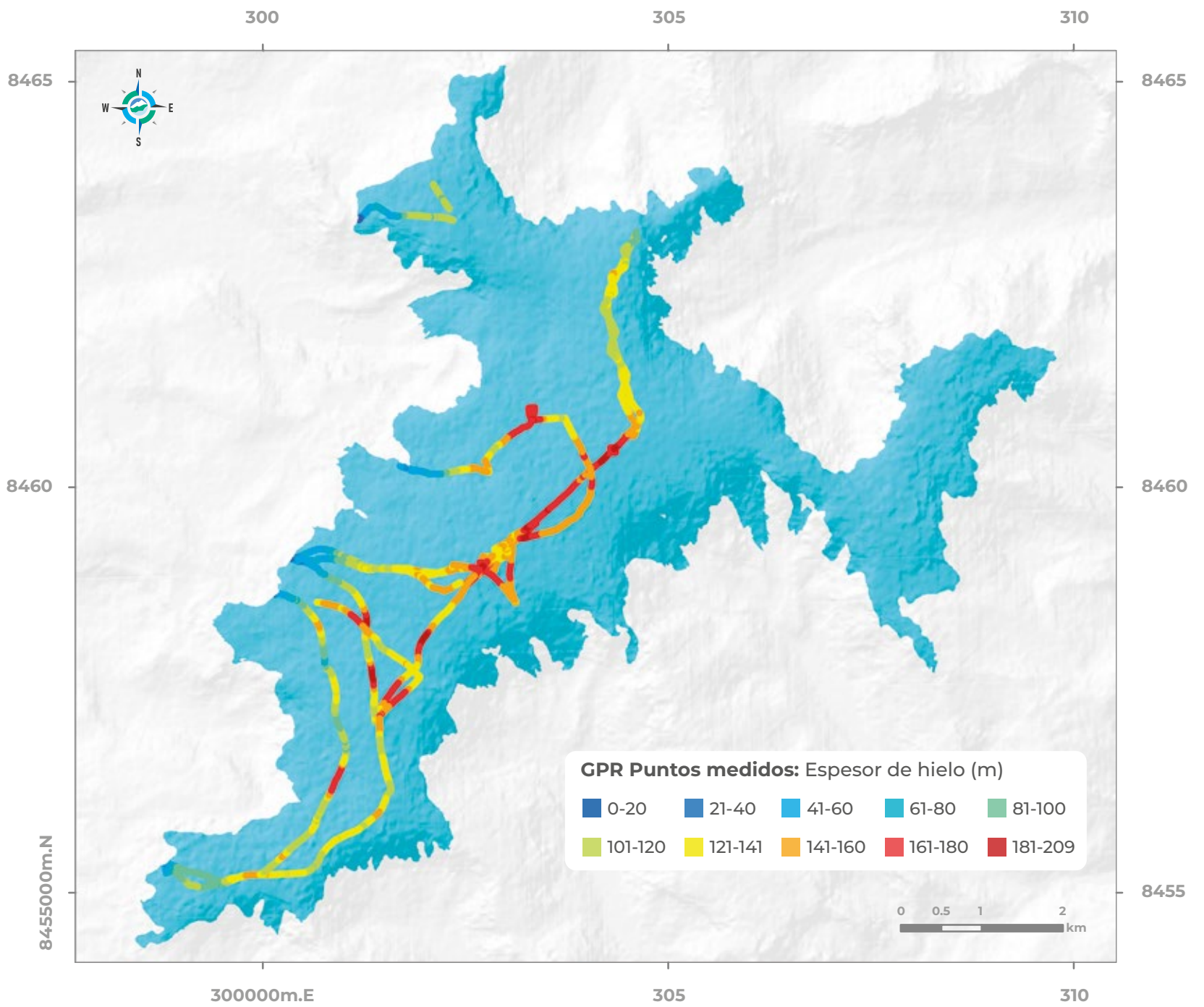
Esta masa de hielo cumple un rol vital: regula el flujo hídrico en los ecosistemas de altura y abastece de agua dulce a los ecosistemas que se benefician de ella. Saber cuánta agua aún conserva es una tarea urgente y estratégica. El INAI GEM ha dado un paso importante en esa dirección. A través de una investigación desarrollada entre 2018 y 2024, buscó estimar con mayor acercamiento a la realidad el volumen de agua que se almacena en el hielo del Quelccaya. Este esfuerzo no solo implica un avance en términos científicos, sino también una herramienta de gestión para los territorios que dependen de él.

Para calcular la cantidad de hielo presente, se combinaron técnicas de radiosondaje que permitieron obtener mediciones puntuales del espesor de hielo; y una optimización del modelo GlabTop (*Glacier Bed Topography Model*), herramienta diseñada para el modelamiento del espesor glaciar y la topografía del lecho subyacente, a partir de datos como el Modelo de Elevación Digital de la superficie del glaciar, la delimitación de glaciares y las líneas de flujo.

Sin embargo, este espesor no es uniforme en toda su extensión. En ciertas zonas, el hielo alcanza profundidades superiores a los 170 metros, lo que revela la complejidad de su estructura interna. A través de mapas generados durante la investigación, se evidencian las zonas más profundas entre los domos Qoyllur Puñuna y Ananta, donde se registraron espesores de hielo de aproximadamente $\sim 209 \pm 10$ m (Vilca, 2025b), así como aquellas con menor espesor, aportando una visión más detallada de su morfología (ver figura 4-12). Cabe precisar que durante las diferentes campañas de radiosondaje, se acumuló un registro total de 44 km de barrido, con algo más de 30 000 registros, dato indispensable para la validación de los resultados obtenidos en diferentes salidas del modelo.

Figura 4-12

ESPEORES MEDIDOS DE LA PROFUNDIDAD DEL HIELO EN EL QUELCCAYA



El volumen total de agua almacenada en el glaciar fue estimado en 2430 millones de metros cúbicos (ver Tabla 4-1). Vilca, 2025b) una estimación compleja debido a las diferentes densidades del hielo que cambia constantemente a nivel superficial. Esta cifra es difícil de dimensionar, pero equivaldría al suministro de agua para consumo de la población de la ciudad de Cusco por 100 años, que en 2021 fue de 23.9 millones de m³ (EPS SEDACUSCO, 2022) . Este reservorio natural libera agua durante la temporada seca, con lo que desempeña un papel clave en la regulación del caudal de los ríos de la zona.

Tabla 4-1**VOLUMEN DE AGUA ALMACENADA EN LA CAPA DE HIELO QUELCCAYA**

Cuenca	Volumen de agua	Porcentaje
Urubamba – Salcca (Cusco)	1291 hm ³	53.1%
Inambari – Corani (Puno)	1139 hm ³	46.9%
Total	2430 hm³	100.0%



La información generada constituye un avance significativo. Nunca antes se había realizado una estimación del volumen de agua almacenada en el Quelccaya que contemple una validación con datos medidos in situ. Esto permite no solo entender mejor al glaciar, sino también integrar esta información en planes de ordenamiento territorial, gestión de riesgos y seguridad hídrica.

Además, la importancia de conocer este volumen se extiende más allá del propio glaciar. El Quelccaya, como el resto de los glaciares de la cordillera Vilcanota, alimenta las cabeceras de cuenca de los ríos Urubamba e Inambari, que forman parte de sistema hídrico del Amazonas. Una gestión adecuada impactará directamente en la seguridad hídrica de regiones extensas y diversas.

Figura 4-13

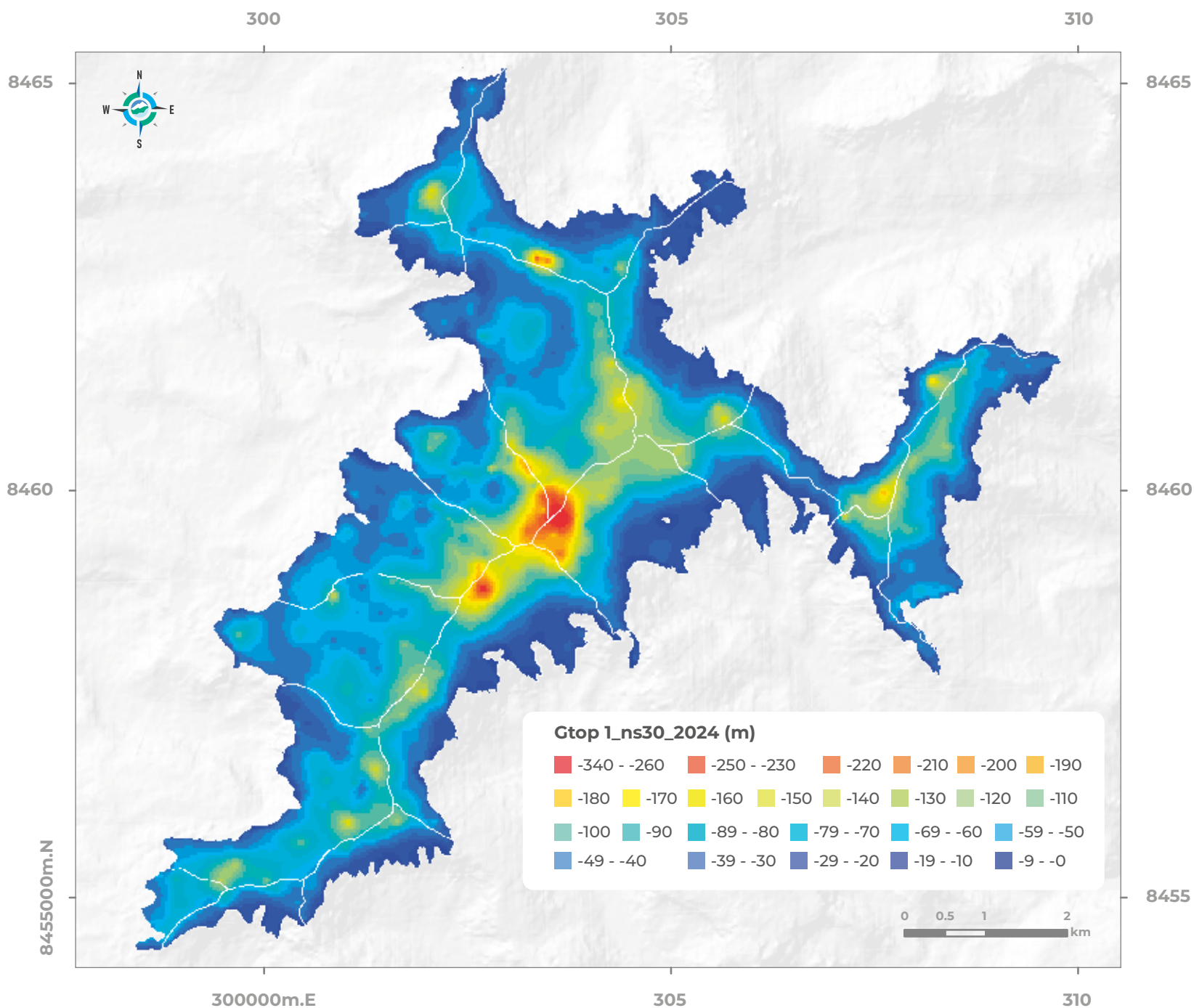
BRIGADA DE CAMPO PARA LA MEDICIÓN DE ESPESORES DE HIELO



Con el modelo GlabTop, se relacionó el esfuerzo cortante basal con la elevación del glaciar para distribuir espesores. El volumen total de hielo se estimó en 2963 hm³, equivalente a 2430 hm³ de agua, con una densidad de 820 kg/m³ (ver figura 4-14).

Figura 4-14

PROFUNDIDAD DEL ESPESOR DEL HIELO EN EL QUELCCAYA



El modelado se realizó para cada uno de los glaciares que conforman el casquete de hielo Quelccaya, por lo que la Tabla 4-2 presenta los resultados obtenidos por cada uno de ellos.

Tabla 4-2

**RESULTADOS DEL VOLUMEN DE HIELO MODELADO
POR CADA GLACIAR QUE CONFORMAN EL QUELCCAYA**

N°	Nombre	Espesor mínimo (m)	Espesor máximo (m)	Media (m)	Volumen de hielo (m ³)	Volumen de agua (m ³)
1	Cceccarani	6	161	67	73 858 500	60 563 970
2	Cunuruni	1	154	67	151 353 900	124 110 198
3	Cunorana	2	174	69	182 358 000	149 533 560
4	Huasa Paco	1	189	71	108 274 500	88 785 090
5	Cuncunani	6	184	79	217 377 000	178 249 140
6	Pata Ancasi	5	162	63	45 056 700	36 946 494
7	Phacu Cucho	1	160	58	73 757 700	60 481 314
8	Ananta	4	255	94	259 017 300	212 394 186
9	Qoyllur Puñuna	1	245	88	304 046 100	249 317 802
10	Huancarane	3	156	55	47 279 700	38 769 354
11	Pallca	6	114	58	34 721 100	28 471 302
12	Ritimaqui	14	144	86	45 898 200	37 636 524
13	Paco Loma	5	169	80	236 847 600	194 215 032
14	Killa Wasi	14	224	95	309 984 300	254 187 126
15	Morojani	6	248	86	238 661 100	195 702 102
16	Inti Wasi	1	223	91	178 596 000	146 448 720
17	Qori Kalis	4	255	94	434 971 800	356 676 876
18	Cunuajayu	3	110	46	21 406 500	17 553 330
Total					2 963 466 000	2 430 042 120

La figura 4-15, presenta las líneas de flujo que sirvieron como base para delimitar los 18 glaciares que conforman el Quelccaya.

Figura 4-15

DELIMITACIÓN DE GLACIARES EN EL QUELCCAYA

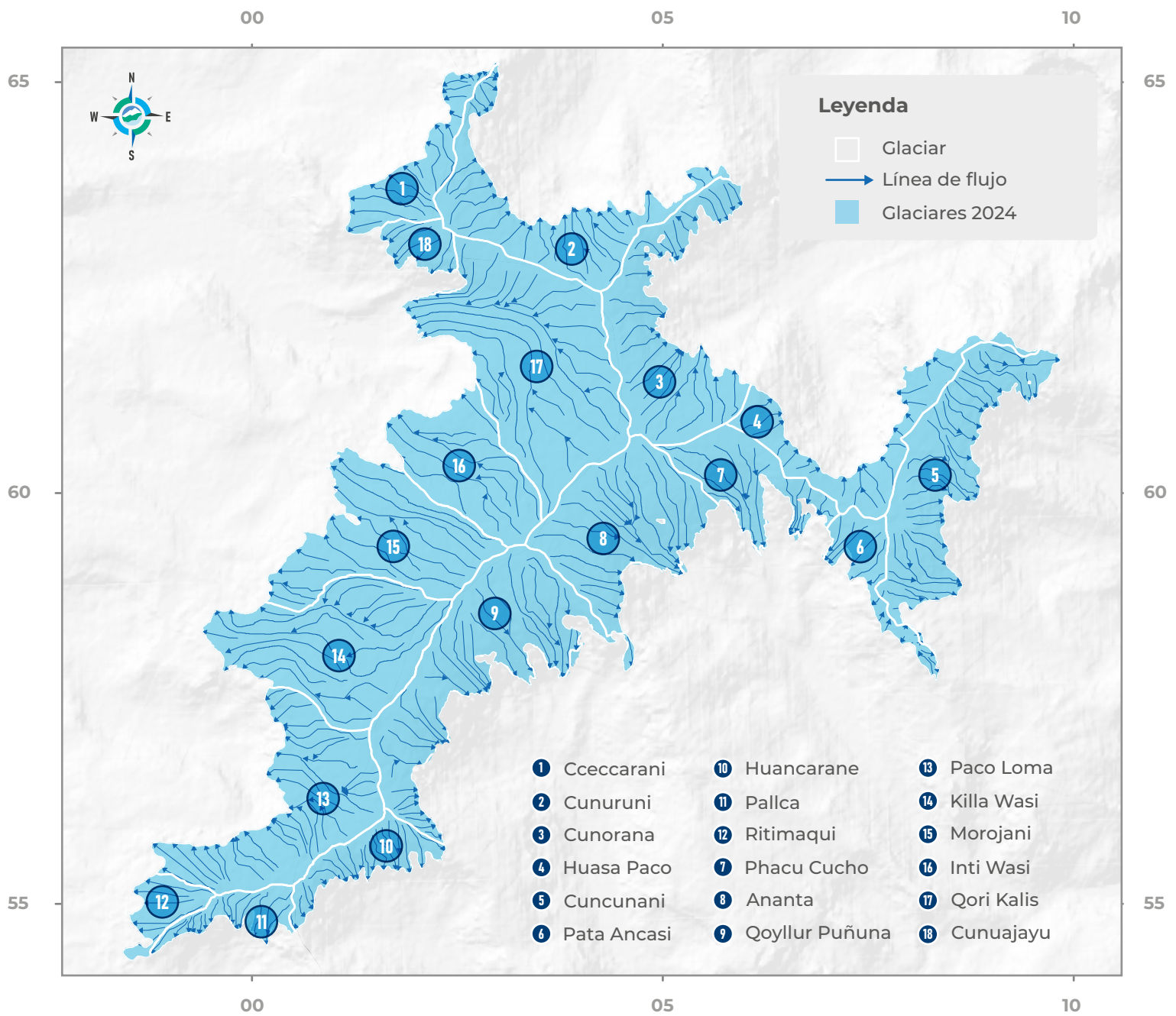




Figura 4-16

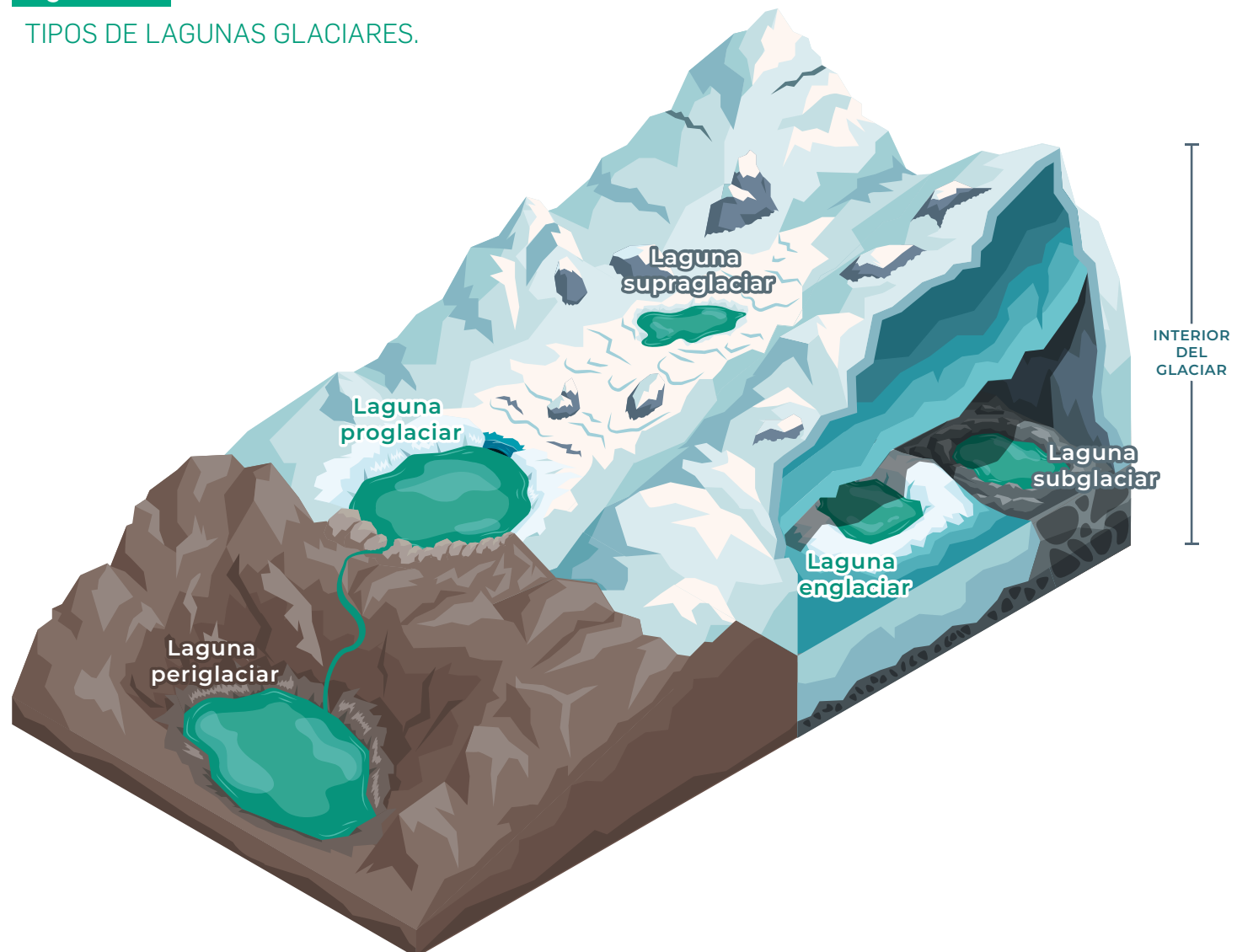
BRIGADA DE CAMPO RECUPERANDO TESTIGOS DE HIELO EN COLABORACIÓN INAIGEM – INSTITUTO DE CAMBIO CLIMÁTICO DE LA UNIVERSIDAD DE MAINE

LAGUNAS GLACIARES COMO RESERVORIOS DE AGUA DULCE

Las lagunas glaciares son depósitos de agua dulce formados por el retroceso glaciar del Quelccaya. Cumplen un rol estratégico para enfrentar los desafíos del cambio climático, siendo actores clave en la dinámica hídrica del territorio. Entre ellas, destacan las lagunas proglaciares, que están en contacto directo con el frente del glaciar; las lagunas supraglaciares, que se forman en las depresiones sobre el mismo hielo; y las lagunas periglaciares, que aunque no tienen contacto directo con el glaciar, su origen y dinámica están influenciados por el deshielo (ver figura 4-13). Esta variedad de lagunas plantea distintos retos y oportunidades para el monitoreo y la gestión del agua.

Figura 4-17

TIPOS DE LAGUNAS GLACIARES.

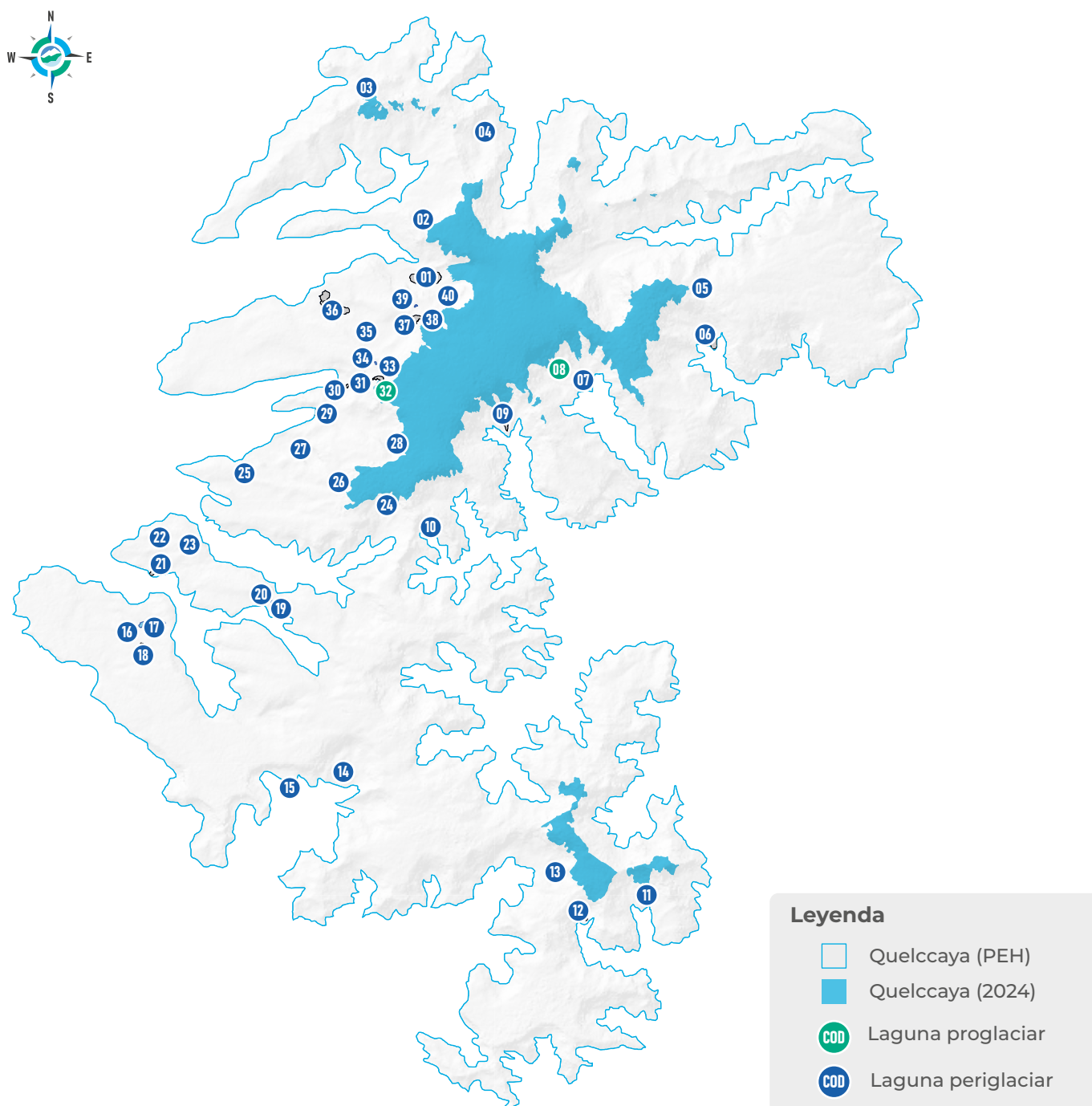




Las variaciones en el volumen de agua almacenada en las lagunas glaciares registran los cambios en los procesos de fusión glaciar y la redistribución hídrica en los ecosistemas de alta montaña, lo que evidencia su sensibilidad a los efectos del cambio climático. Por tanto, conocer este dato en las lagunas del entorno del Quelccaya (ver figura 4-14) permite analizar su rol como reserva estratégica, sobre todo en condiciones de falta de agua; así como el riesgo de desborde que podría impactar a las poblaciones localizadas aguas abajo.

Figura 4-18

LAGUNAS DE ORIGEN GLACIAR EN EL QUELCCAYA





El uso de imágenes satelitales y fotografías con dron durante 2022 y 2024, permitieron identificar dos lagunas proglaciares y 38 periglaciares en la superficie que ocupó la máxima extensión del glaciar durante la Pequeña Edad de Hielo (~ 1500 y 1800 d. C.). En este análisis se excluyeron las lagunas con superficies menores a 3000 m². Por ello, aunque se identificaron lagunas supraglaciares, estas fueron desestimadas debido a su reducida extensión.

Para la estimación del volumen de estas lagunas proglaciares y periglaciares, se emplearon dos enfoques. En cinco de ellas (Qori Kalis, Ananta Cucho, Huancané, Qoyllur Wampuy y Killa Wampuy) se realizaron mediciones directas de profundidad durante los trabajos de campo. En las restantes, el cálculo del volumen se realizó mediante métodos indirectos, utilizando fórmulas de escalamiento área-volumen a partir del área superficial estimada (Vila, 2025).

Las 40 lagunas glaciares de la zona albergan un total de 22 545 258 m³ de agua dulce (ver Tabla 4-3), de las cuales 31 se localizan en el departamento de Cusco y nueve en Puno. Por tanto, Cusco posee un mayor volumen de reserva de agua, al concentrar el 84.2% del total; a comparación de Puno, que posee un volumen conjunto de 3.5 millones de m³, lo que equivale a un 15.8% (ver figura 4-19). Esta asimetría refleja la topografía glacial y procesos de ablación en ambas regiones.

Tabla 4-3

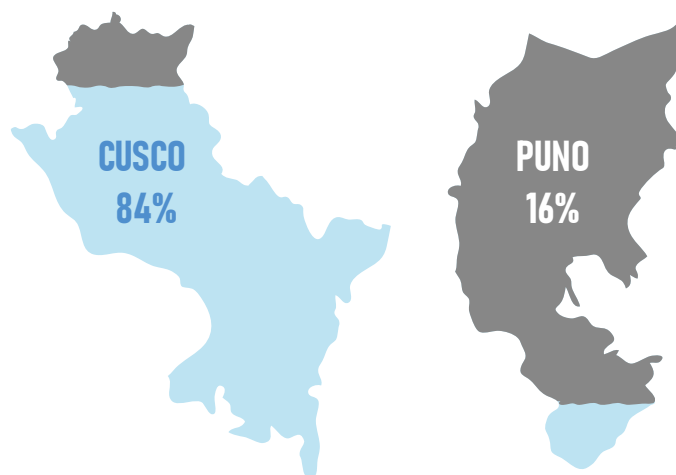
VOLUMEN DE AGUA EN LAS LAGUNAS GLACIARES

Departamento	Cantidad de lagunas	Volumen total (m ³)
Cusco	31	18 995 960.33
Puno	9	3 549 297.80
Total	40	22 545 258.13

Batimetría en la laguna Killawampuy

Figura 4-19

DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN DE RESERVA DE AGUA EN LAS LAGUNAS GLACIARES



Las lagunas Qori Kalis, Ananta Cucho, Paco, Morojani Bajo y Morojani son las de mayor tamaño, con superficies que superan los 100 000 m². En conjunto, concentran un volumen estimado de 17 960 359.4 m³ de agua, lo que representa aproximadamente el 80% del volumen total calculado (ver Tabla 4-4). Entre ellas, Qori Kalis destaca como la laguna con mayor capacidad de almacenamiento, mientras que Paco registra el volumen más reducido del grupo.

Tabla 4-4VOLUMEN DE AGUA EN LAS LAGUNAS CON SUPERFICIE MAYORES A 100 000 M²

Laguna	Volumen total (m ³)
Qori Kalis	9 144 399.21
Ananta Cucho	2 290 624.67
Paco	1 133 537.96
Morojani Bajo	3 762 283.39
Morojani	1 629 514.13
Total	17 960 359.36



Si bien más de la mitad de las lagunas identificadas (55%) se encuentran en los rangos de menor tamaño, con volúmenes estimados de entre 3000 y 20 000 m³, su aporte conjunto representa apenas el 3% del volumen total almacenado. No obstante, estas lagunas son clave para mantener la dotación hídrica de los ecosistemas altoandinos, sustentando la biodiversidad local (flora y fauna). En contraste, las cinco lagunas más extensas, que constituyen solo el 13% del total, concentran cerca del 80% del volumen inventariado (ver Tabla 4-5). Esta marcada desigualdad en la distribución resalta su valor estratégico, tanto para la seguridad hídrica como para la gestión de riesgos en la zona de influencia del Quelccaya.

Tabla 4-5

**VOLUMEN DE AGUA EN LAS LAGUNAS GLACIARES
CON UNA SUPERFICIE MAYOR A 3000 M²**

Rango de superficie (m ²)	Cantidad de lagunas	Volumen total (m ³)	Porcentaje del total (%)
3000 a 10 000	15	248 040.19	1.10
10 000 a 20 000	7	417 700.25	1.85
20 000 a 50 000	9	1 651 078.55	7.32
50 000 a 100 000	4	2 268 079.77	10.06
Mayor a 100 000	5	17 960 359.36	79.67
Total	40	22 545 258.13	100.00

Esta información no solo fortalece la comprensión científica del entorno glaciar, sino que también orienta la toma de decisiones en torno a la seguridad hídrica, la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático. La integración de estos datos en plataformas abiertas, el monitoreo multitemporal y la articulación con las comunidades locales son pasos clave hacia una gobernanza del agua más resiliente.

LAGUNA GLACIAR QORI KALIS

Ubicada a 4918 m s. n. m., la laguna Qori Kalis es una de las más importantes y extensas del entorno, con una superficie de 321 529 m² en el 2024.

Mediante una campaña de batimetría de precisión, se determinó que esta laguna almacena 9.1 millones de m³ de agua.

Su forma alargada y su profundidad, que alcanza casi 56 m, la convierten en uno de los cuerpos de agua más significativos en el entorno del glaciar, tanto por su capacidad de almacenamiento como por los riesgos que podría representar.



PELIGROS ASOCIADOS AL RETROCESO GLACIAR

El retroceso glaciar no es un fenómeno silencioso. A medida que el hielo cede, surgen nuevos cuerpos de agua, se desestabilizan laderas y se alteran los flujos hídricos. Existen riesgos potenciales que pueden emerger en el futuro próximo: desde aluviones hasta cambios abruptos en la disponibilidad de agua. Conocerlos es el primer paso para anticiparlos.

Lo ocurrido con la laguna Phacu Cucho Alto en noviembre de 2022 muestra cómo estos riesgos se materializan en el Quelccaya. Durante la tarde, el desprendimiento de bloques de hielo desde las alturas del glaciar generó una cadena de eventos. El impacto de un bloque de hielo contra el frente glaciar creó oleajes que golpearon repetidamente el talud interior de la laguna. La base, ya debilitada por el derretimiento del hielo enterrado y las filtraciones, cedió de manera abrupta y ocasionó un deslizamiento.



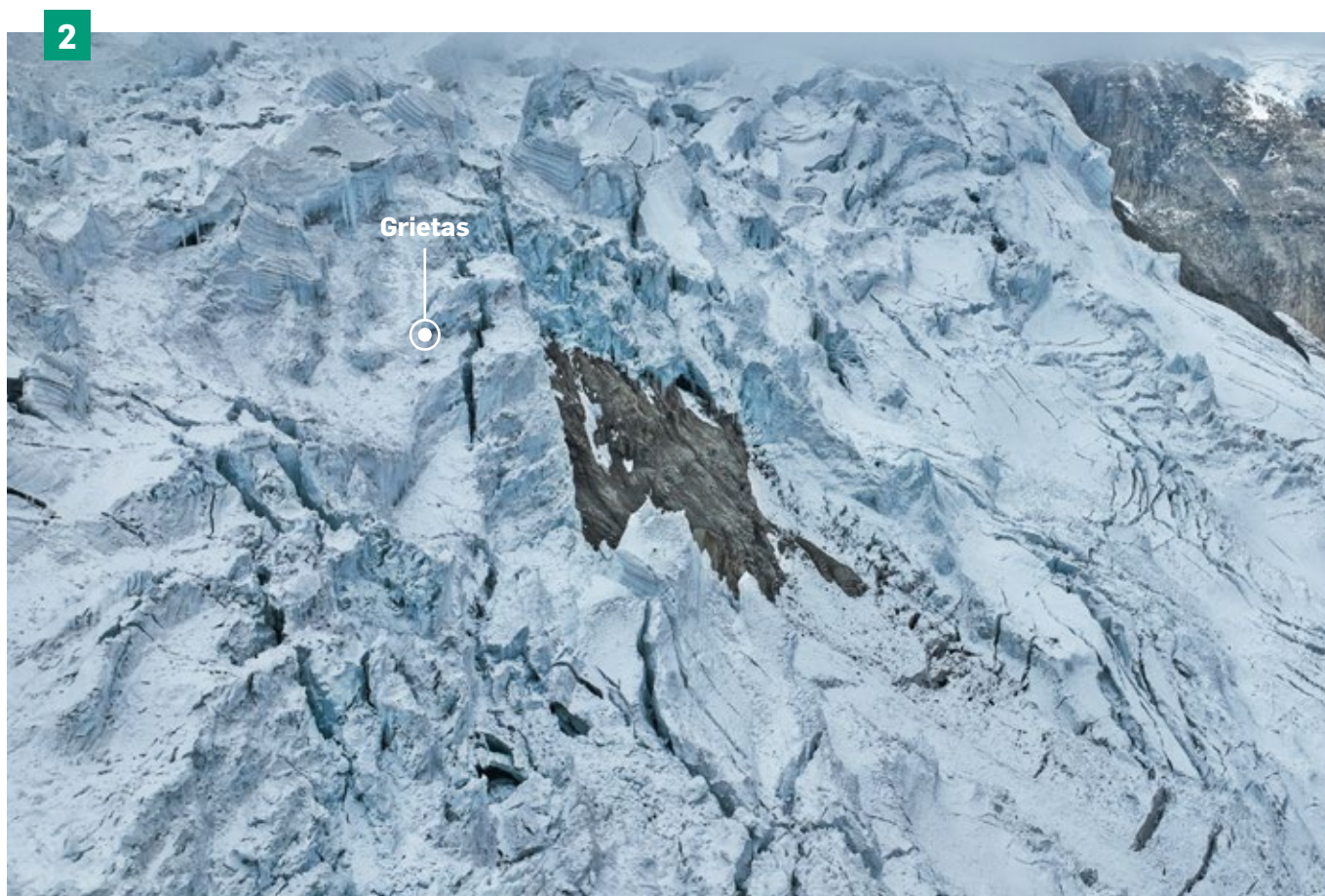
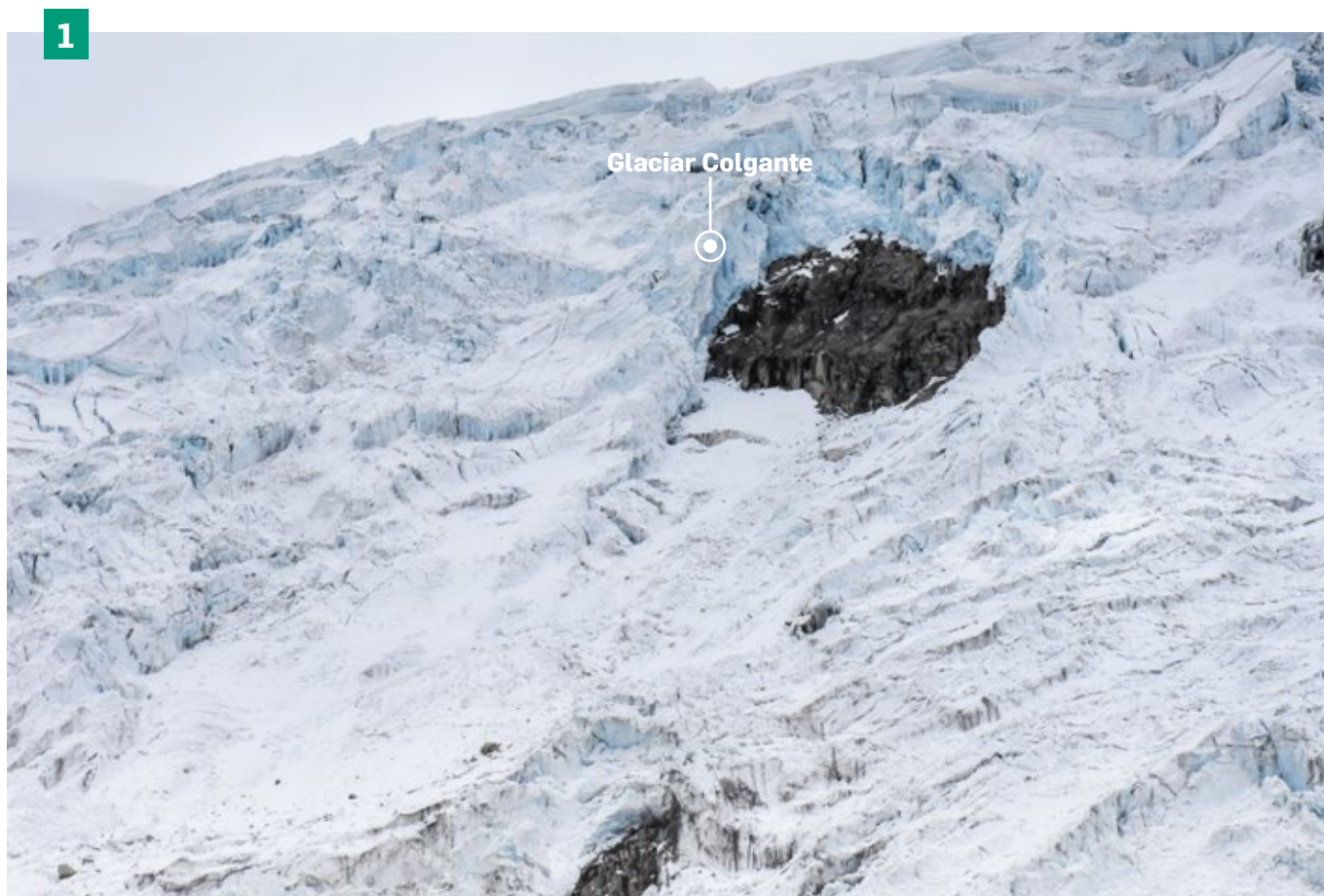
Avalancha de hielo de baja intensidad desde dos zonas en Phacu Cucho, que al impactar con el frente glaciar ocasionó un desprendimiento mayor de hielo “*Calvin*”, lo que generó oleajes que desencadenaron el deslizamiento.

En cuestión de minutos, aproximadamente 600 000 m³ de agua y sedimentos se liberaron con violencia. El flujo descendió por la quebrada y arrastró consigo bloques de hielo y material detrítico. Los pastizales de la zona, vitales para el sustento de la economía de las comunidades locales, quedaron sepultados bajo una capa de escombros. Una vivienda cercana al cauce estuvo a punto de ser arrasada, pero sus ocupantes lograron evacuar a tiempo al percibir el ruido, luego de notar el cambio en el color del agua y ante el ruido que generaba incremento del caudal del río.

Este evento no fue un hecho aislado. Una década antes, en 2012, la misma laguna ya había experimentado un desborde similar. Sin embargo, lo ocurrido en 2022 reveló con mayor claridad los peligros latentes en estas jóvenes lagunas glaciares. Las imágenes aéreas mostraron cómo el frente del glaciar presentaba grietas preocupantes, mientras que bloques de hielo colgantes pendían sobre el espejo de agua. Este evento no fue un hecho aislado. Una década antes, en 2012, la misma laguna ya había experimentado un desborde similar.



Vista general de las principales zonas afectadas por el desborde de la laguna Phacu Cucho Alto, en noviembre de 2022.



Paredes glaciares colgantes (fotografía 1) y evidencias de grietas (fotografía 2), con tendencia a desprenderse.

Se presume que el incremento de las temperaturas jugó un papel determinante. Durante octubre y noviembre de 2022, se registraron días consecutivos de calor inusual, lo que aceleró la fusión del hielo en el casquete y también en aquellos bloques de hielo enterrados bajo los detritos. Este proceso no solo redujo el soporte del talud, sino que saturó el terreno, creando las condiciones perfectas para el deslizamiento. El evento de Phacu Cucho Alto se convirtió así en un ejemplo claro de cómo el cambio climático está reescribiendo la dinámica de las zonas glaciares.

Aguas abajo, la naturaleza propició un espacio con capacidad de contención. A 7.3 km de la laguna, una cubeta natural formada por depósitos glaciares logró detener y amortiguar el flujo de agua y sedimentos. Esta zona, que ya había contenido un desborde años atrás, funcionó como un dique de contención natural que evitó que el evento fuera aún más catastrófico. Sin embargo, el informe alerta que la erosión progresiva y colmatación en esta área podría comprometer su efectividad en futuros eventos.



Zona de embalse que amortiguó el flujo de agua y sedimentos generados por el desborde de la laguna Phacu Cucho Alto.

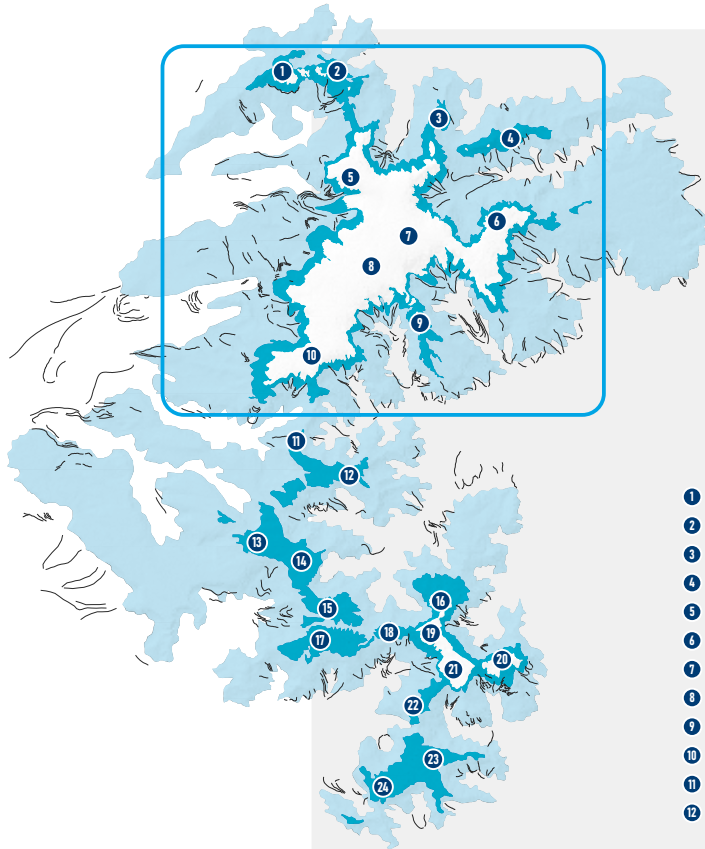


El humedal Phacu Cucho cubierto por detritos, a consecuencia del desborde del 14 de noviembre del 2022.

Los especialistas del INAIGEM identificaron riesgos que aún persisten. Glaciares colgantes con grietas profundas, lagunas en expansión y taludes inestables que conforman un escenario de amenazas múltiples. El monitoreo constante se vuelve esencial no solo para entender la evolución de estos cuerpos de agua, sino para anticipar nuevos eventos. La tecnología, como los drones y las imágenes satelitales, se convierte en aliada clave para esta vigilancia.

Phacu Cucho Alto deja una lección muy clara: el retroceso glaciar está creando nuevos paisajes llenos de incertidumbre. Lo que antes eran lenguas de hielo con una relativa estabilidad, hoy se transforman en lagunas impredecibles y laderas frágiles. Entender estos procesos no es solo un ejercicio científico, sino una necesidad urgente para proteger, en principio, la vida de los habitantes de las comunidades aledañas y los ecosistemas que dependen de estas frágiles zonas de montaña.

EVOLUCIÓN DEL GLACIAR

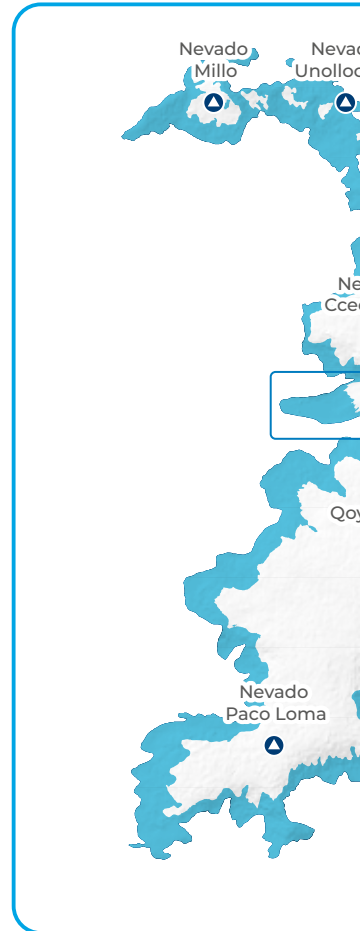


Lo que ahora vemos como glaciares aislados, en algún momento fue una sola superficie. Se estima que entre los años 1500 a 1800, llegó a cubrir una extensión de aproximadamente 420 km, de acuerdo con los vestigios morfológicos que aún persisten (Thompson & Mosley-Thompson, 1987), esta etapa marcó el último gran avance del hielo antes del proceso de retroceso moderno.

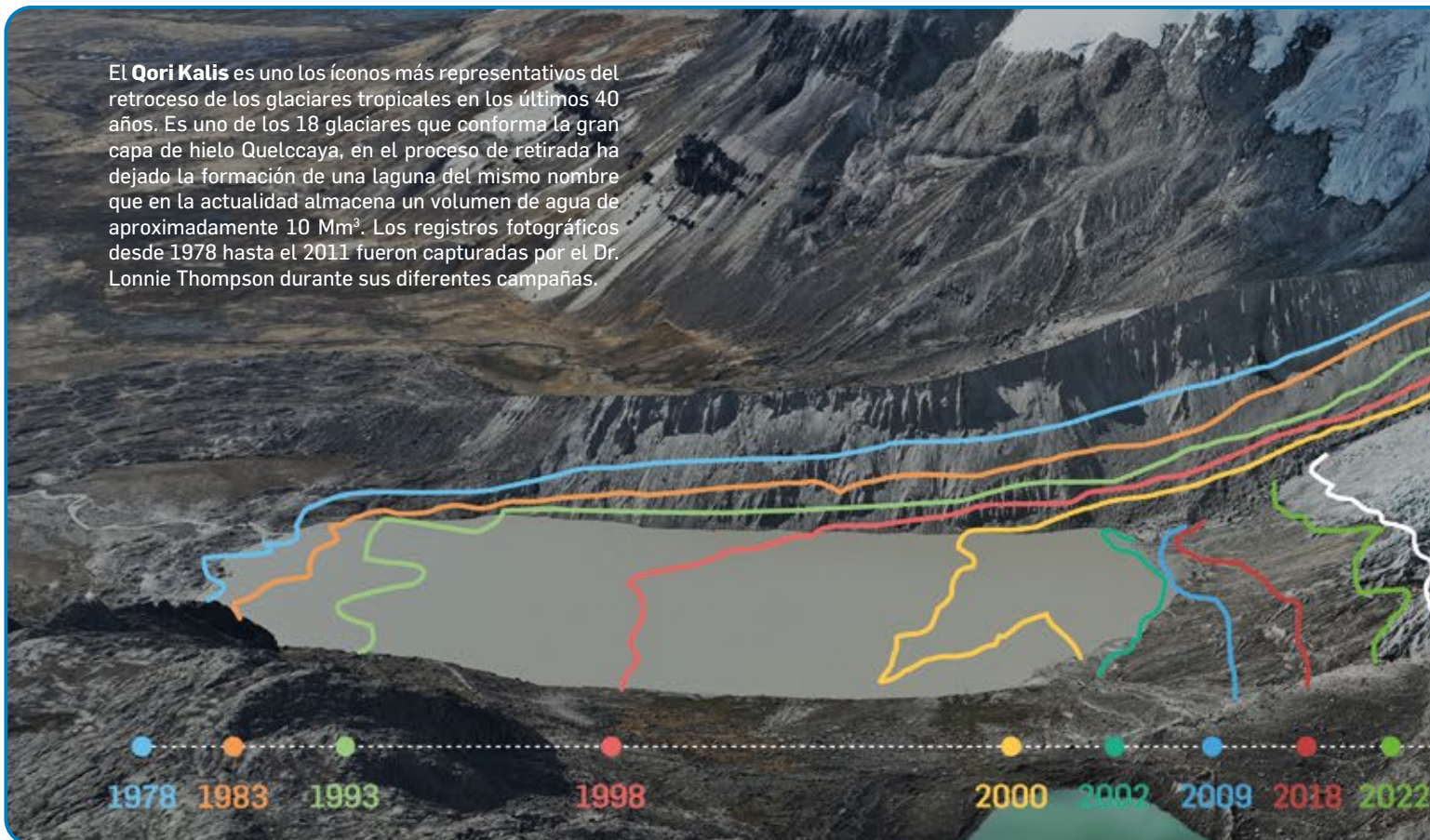
Registros obtenidos desde 1984 nos muestra que este gran glaciar habría perdido el 58% de superficie al 2024, pasando de 100 km a 42 km dejando un gran fragmento que hoy conocemos como capa de hielo Quelccaya.

- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| 1 Nevado Millo | 13 Nevado Tutallipina |
| 2 Nevado Unollocsina | 14 Nevado Charantaña |
| 3 Nevado Cunorana | 15 Nevado Culi |
| 4 Nevado Jachatira | 16 Nevado Sapanuta |
| 5 Nevado Cceccarani | 17 Nevado Tulallipina |
| 6 Nevado Cuncunani | 18 Nevado Jampatuno |
| 7 Nevado Ananta | 19 Nevado Pumanota |
| 8 Nevado Qoyllur Puñuna | 20 Nevado Jonorana |
| 9 Nevado Jatun Quenamari | 21 Nevado Jatuncucho |
| 10 Nevado Paco Loma | 22 Nevado Cochacucho |
| 11 Nevado Huancane | 23 Nevado Jatun Sallica |
| 12 Nevado Otoroncane | 24 Nevado Hueco |

Limite glaciar
 1500 - 1800 1984 2024 ~ Morrenas



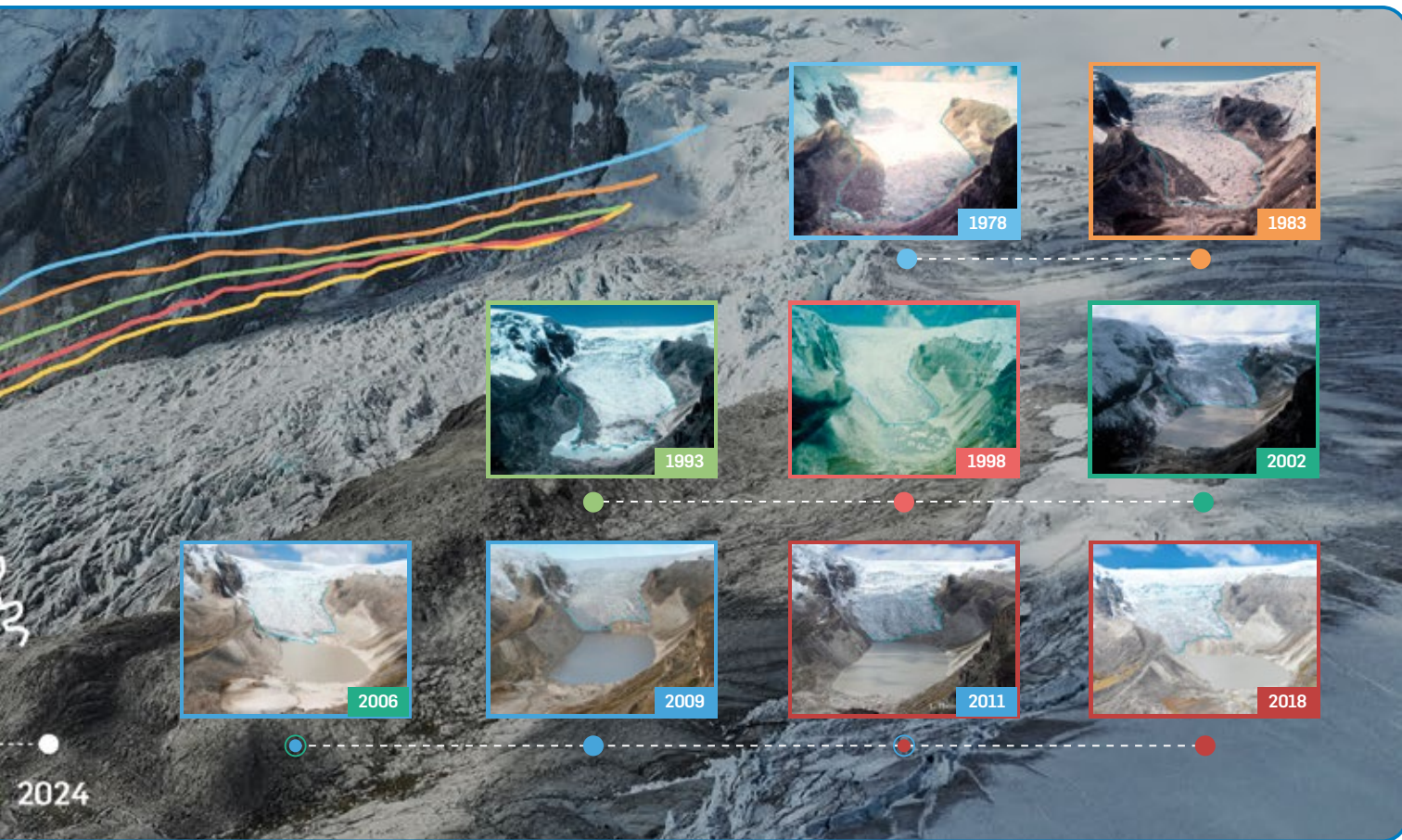
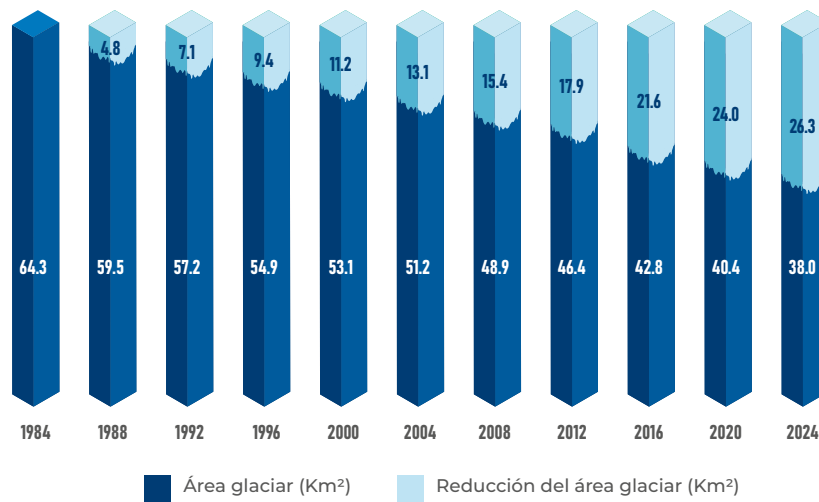
El **Qori Kalis** es uno de los íconos más representativos del retroceso de los glaciares tropicales en los últimos 40 años. Es uno de los 18 glaciares que conforma la gran capa de hielo Quelccaya, en el proceso de retirada ha dejado la formación de una laguna del mismo nombre que en la actualidad almacena un volumen de agua de aproximadamente 10 Mm³. Los registros fotográficos desde 1978 hasta el 2011 fueron capturados por el Dr. Lonnie Thompson durante sus diferentes campañas.



ACIAR QORI KALIS



Un análisis sobre el núcleo de mayor extensión registrado en el año 1984 nos muestra el casquete glaciar con una superficie de 64 km² y una superficie de 38 km al año 2024, lo que se traduce en una pérdida de 26 km es decir el 41%, con un ritmo que se está intensificando drásticamente en los últimos años.





5

LA VIDA SILVESTRE

ENTRE EL GLACIAR Y SU ENTORNO

ÁNGELA MENDOZA | RENNY DÍAZ | CARLOS LAZO
MIGUEL LUZA | GIMI MAMANI

El ámbito del Quelccaya está conformado por ecosistemas de montaña que se interconectan entre sí. Los glaciares, periglaciares, bofedales, pajonales y hábitats acuáticos configuran el paisaje del entorno. La interrelación entre los diferentes ecosistemas del Quelccaya influye en la disponibilidad de agua y de los nutrientes que sostienen la presencia de la biodiversidad local.

La vida silvestre que habita este territorio está constituida por especies adaptadas a las condiciones topográficas y climáticas extremas de la zona, que contribuyen a mantener un equilibrio ecológico. Mientras que las especies vegetales cumplen un rol importante en el ciclo hidrológico (Grizzetti et al., 2016), los animales actúan como dispersores de semillas y controladores biológicos (Smith & Smith, 2007).

En los Andes peruanos, sobre los 3500 m s. n. m., se estima que crecen un poco más de 2000 especies de plantas nativas, de las cuales 32% son endémicas del Perú; y que son habitados por aproximadamente 100 especies de animales (INSIDEO, 2017; Jørgensen et al., 2011). Este capítulo muestra de manera general la flora y fauna observada en el Quelccaya y su entorno durante las expediciones científicas del INAIGEM, así como otras especies documentadas en este paisaje glaciar.



FLORA QUE SE ADAPTA A LOS CAMBIOS

En las zonas de alta montaña de los Andes del sur del Perú que superan los 4000 m s. n. m., como la cordillera del Carabaya, aledaña al Quelccaya, se ha registrado una alta biodiversidad de flora de al menos 500 especies (González et al., 2018). En el entorno del Quelccaya, en este rango altitudinal, se encuentran tres ecosistemas principales: bofedal, pajonal de puna húmeda y zona periglaciár⁶ (MINAM, 2015).

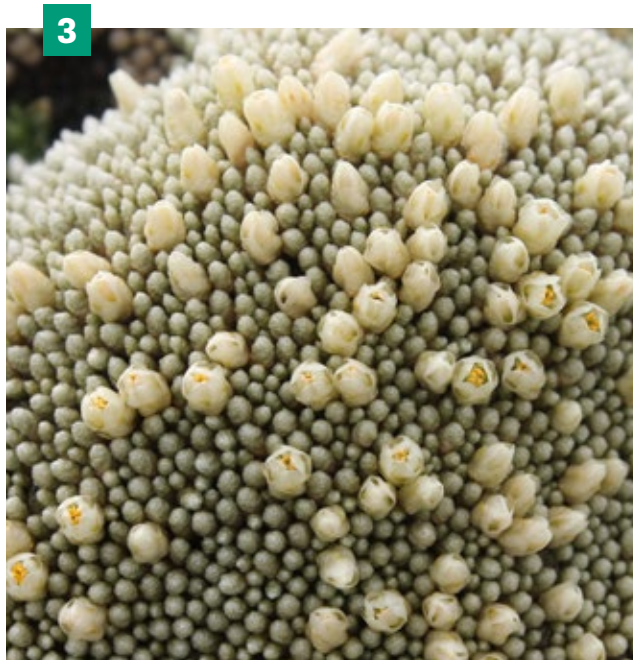
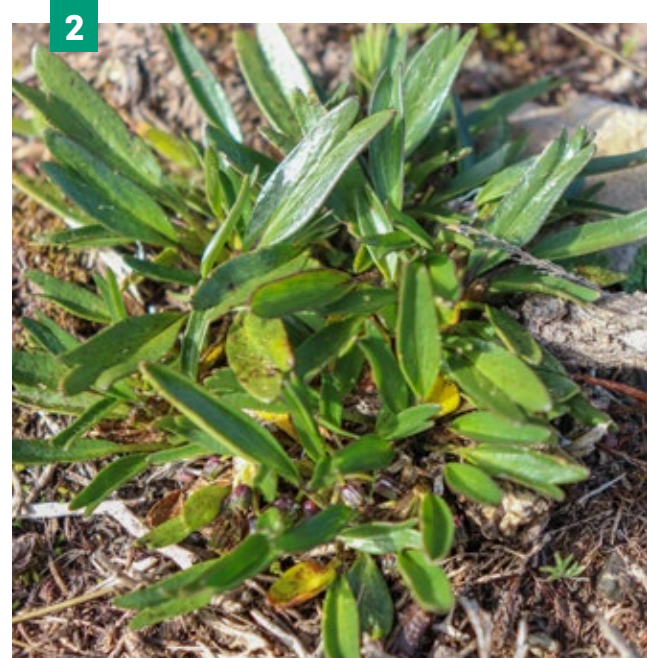
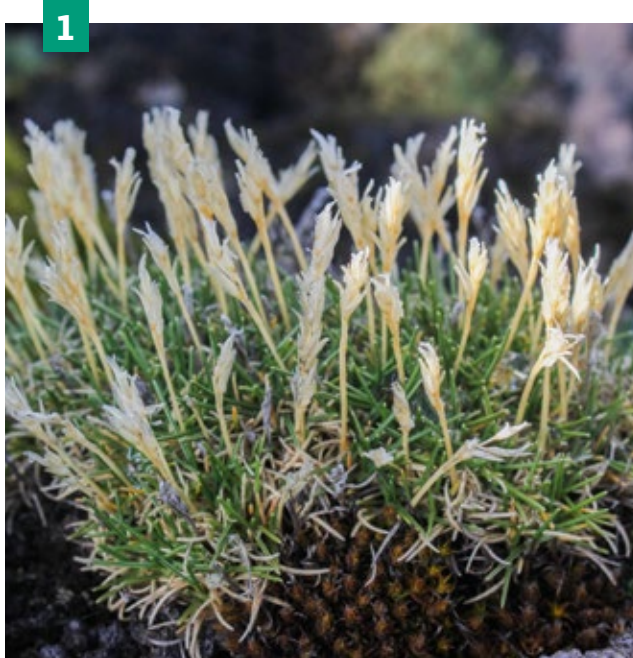
La vegetación de los bofedales depende de las características del agua y suelo (INAIGEM, 2023). Es verde, compacta y con formas que parecen una almohadilla o un cojín con presencia de especies características como *Distichia muscoides*, *Plantago tubulosa* y especies del género *Werneria* (AMEC Perú, 2012; INAIGEM, 2023; MINAM, 2015).



Vista general de cojines o almohadillas que forman las especies características del ecosistema bofedal (fotografía 1). *Distichia muscoides* (2), *Plantago tubulosa* (3) y *Werneria pectinata* (4).

⁶ Para mayor información sobre cada uno de estos ecosistemas, revisar el Capítulo 1 Conociendo el Quelccaya

En el ecosistema pajonal de puna húmeda dominan pastos que crecen formando matas, de los géneros *Cinnagrostis*⁷, *Deschampsia*⁷, *Poa*, *Dissanthelium*, *Muhlenbergia*, *Stipa* y *Festuca*. También presenta hierbas arrosetadas como *Plantago nubicola*⁸ y *Azorella biloba*, junto con representantes del género *Hypochaeris*. Además, está compuesto de cojines de *Pycnophyllum molle* y *Aciachne pulvinata*; así como arbustos tipo *Culcitium rufescens*⁹ y *Baccharis tola* (INSIDEO, 2017).



Algunas especies de pajonal de puna húmeda que se encuentran en las inmediaciones del Quelccaya: *Cinnagrostis minima* (fotografía 1), *Azorella biloba* (2), *Pycnophyllum molle* (3), y un espécimen del género *Lupinus* (4).

7 Anteriormente los géneros *Cinnagrostis* y *Deschampsia* formaban el género *Calamagrostis*

8 La especie *Plantago nubicola* (Decne.) Rahn, anteriormente, era denominada *Bougueria nubicola*

9 La especie *Culcitium rufescens* Bonpl., anteriormente, era denominada *Senecio rufescens*



En cuanto a las zonas periglaciares, la especie *Poa lepidula*¹⁰ es una de las más representativas del lugar. También albergan diversas especies del género *Nototriche*, que presentan el mayor grado de endemismo en la familia Malvaceae (González et al., 2018; León et al., 2006; mencionado por INSIDEO, 2017).



Especies de las zonas periglaciares del Quelccaya: *Poa lepidula* (fotografía 1), *Nototriche carabayensis* (2), *Nototriche turritella* (3), *Nototriche sulphurea* (4)



¹⁰ La especie *Poa lepidula* (Nees & Meyen) Soreng & L.J.Gillespie, anteriormente, era denominada como *Anthochloa lepidula*





Especie nueva *Nototriche* sp. nov. identificada por primera vez por los investigadores de INAGEM (5), la cual se encuentra en proceso de descripción formal.

En los ecosistemas circundantes al glaciar, se han encontrado plantas endémicas del Perú, es decir, especies que no se encuentran en ningún otro país (González et al., 2015; INSIDEO, 2017), entre las cuales se tienen:

- **Familia Asteraceae:** *Senecio collinus*, *Senecio expansus*¹¹ y *Senecio melanandrus*¹²
- **Familia Caryophyllaceae:** *Pycnophyllum aschersonianum*
- **Familia Fabaceae:** *Astragalus dillinghamii* y *Lupinus peruvianus*
- **Familia Gentianaceae:** *Gentianella persquarrosa* y *Gentianella potamophila*
- **Familia Malvaceae:** *Nototriche longituba*, *Nototriche pellicea* y *Nototriche carabayensis*
- **Familia Orobanchaceae:** *Castilleja virgatoides*
- **Familia Poaceae:** *Poa ayacuchensis*



Parches de vegetación en zona periglacial, entre el glaciar Quelccaya y la laguna Qori Kalis.

¹¹ La especie *Senecio expansus* Wedd., anteriormente, fue denominada como *Senecio macrorrhizus*

¹² La especie *Senecio melanandrus* (Wedd.) J.Calvo, A.Granda & V.A.Funk fue denominada, anteriormente, conocida como *Senecio tassaensis*

1



2



Deschampsia ovata (fotografía 1) y *Werneria digitata* (2), colonizadoras de las zonas periglaciares que se identificaron en los estudios realizados por el INAI GEM (Luza et al., 2024).

El retroceso del glaciar reconfigura el paisaje local, expone suelos que antes estuvieron cubiertos con hielo permanente para la colonización de la vegetación altoandina (Erschbamer, 2007; Erschbamer et al., 2009; Ficetola et al., 2024). Por ello, la distribución altitudinal de la vegetación entre los ecosistemas bofedal, pajonal de puna y zona periglaciara se encuentra estrechamente vinculada por el retroceso glaciar.

La vegetación altoandina comienza a colonizar los suelos liberados del hielo. Así, se transforma el entorno que, hasta hace poco, estaba dominado por hielo y roca desnuda. Este proceso da lugar a que las plantas vayan distribuyéndose espacialmente hacia zonas con mayores altitudes, con lo que colonizan el terreno expuesto con suelos pocos desarrollados, y se adaptan a ambientes extremos que los exponen a condiciones ambientales limitantes, debido a temperaturas extremas, agua y vientos (Llambí et al., 2021, Anthelme et al. 2021; mencionado por Hofstede et al., 2023).

Un análisis de la flora en esta variación altitudinal, en los alrededores inmediatos del Quelccaya, permitió a los investigadores del INAI GEM identificar 56 especies distribuidas en 15 familias botánicas. Las especies de plantas de las familias Asteraceae y Poaceae son las que tienen mayor diversidad, seguidas por Caryophyllaceae y Juancaceae. Estas especies no solo se adaptan a la influencia del ecosistema glaciar, sino que encuentran oportunidades para crecer en ambientes donde, según estudios de INAI GEM, la amplitud térmica diaria supera los 20 °C (Lazo et al, 2025).

En las zonas periglaciares, las más cercanas al casquete glaciar Quelccaya, la vegetación aparece dispersa de manera frecuente sobre un paisaje dominado por rocas expuestas y suelos crioturbados, sometidos a constantes ciclos de congelamiento y descongelamiento (MINAM, 2019b). Aquí, donde la diversidad de especies es menos significativa que en los pajonales de puna o bofedales. Predominan especies como *Deschampsia ovata* y *Werneria digitata*, que crecen en forma de matas bajas para resistir los vientos helados y la alta radiación solar. Estas especies de la familia Poaceae y Asteraceae, aunque escasas y discontinuas, son las primeras colonizadoras tras el retroceso glaciar. Estas primeras colonizadoras cumplen un rol esencial: mejoran el ambiente y facilitan con el tiempo la colonización de nuevas especies (Smith & Smith, 2007; Young, 2023).

A medida que se desciende a altitudes entre los 4952 y 5059 m s. n. m., los pajonales de puna comienzan a dominar el paisaje, aunque con una cobertura vegetal baja a intermedia. Las especies como *Deschampsia ovata*, *Epilobium denticulatum*, *Mnioides sp.* y *Werneria pectinata* prosperan entre suelos pedregosos, parches desnudos y costras biológicas, cubriendo extensiones discontinuas. Estas especies, al igual que la vegetación en general, contribuyen a retener la humedad y a proteger el suelo frente a la erosión (Ibarra, 2017; Montgomery, 2007).



Epilobium denticulatum (fotografía 1) y *Mnioides sp.* (2), que habitan en los pajonales de puna, que se identificaron en los estudios realizados por el INAIGEM (Luza et al., 2024).

PEQUEÑOS CURSOS DE AGUA ATRAVIESAN OCASIONALMENTE ESTE GRADIENTE ALTITUDINAL, CON LO QUE OFRECEN UN ENTORNO FAVORABLE PARA EL CRECIMIENTO DE PEQUEÑOS PARCHES DE *DISTICHIA MUSCOIDES*, ESPECIE CONOCIDA LOCALMENTE COMO KUNKUNA. AÚN CON ELLO, NO LLEGAN A PROSPERAR EN COJINES DE TURBERAS ALTOANDINAS BIEN CONSTITUIDAS.

Pequeños parches de *Distichia muscoides* (Kunkuna) sin llegar a constituirse como turbera altoandina, que se identificaron en los estudios realizados por el INAIGEM (Luza et al., 2024).





En el último rango altitudinal, los bofedales o turberas altoandinas crecen como cojines verdes de vegetación densa, con una concentración notable de especies adaptadas a suelos saturados de agua durante gran parte del año. Aquí, la vegetación está dominada por *Distichia muscoides*, acompañada por especies como *Cinnagrostis brevifolia*, *Oxychloe andina*, *Werneria pygmaea*, entre otras. Los bofedales proveen forraje para el ganado y, además, debido a su característico suelo orgánico llamado turba, cumplen funciones ecológicas críticas, como el almacenamiento de agua y el secuestro de carbono (INAIGEM, 2023).



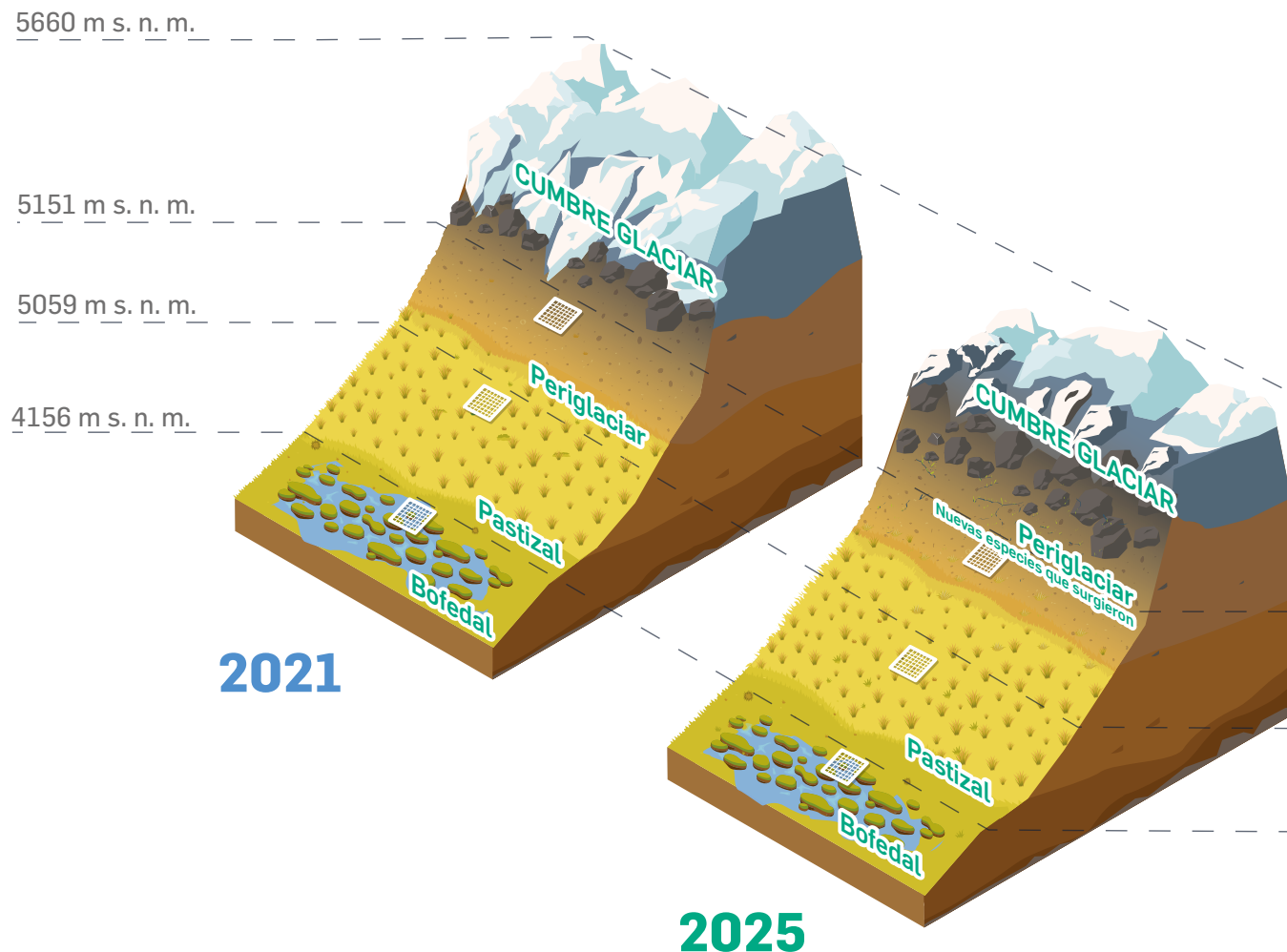
Especies de *Distichia muscoides* (fotografía 1), *Oxychloe andina* (2), *Cinnagrostis brevifolia* (3) y *Werneria pygmaea* (4) que se encuentran en los bofedales, y que fueron registradas en los estudios realizados por el INAIGEM (Luza et al., 2024).

EN ESTE PROCESO DE COLONIZACIÓN, LA ESPECIE VEGETAL *DESCHAMPSIA OVATA* ES LA MÁS FRECUENTE EN LAS ZONAS PERIGLACIARES DEL QUELCCAYA (ENTRE 5058 A 5131 M S. N. M.), MIENTRAS QUE LA *XENOPHYLLUM DACTYLOPHYLLUM* ES UNA ESPECIE SOLITARIA QUE ESTA CRECIENDO DESPUES DEL GLACIAR

A lo largo de la variación altitudinal (ver figura 5-1), la flora muestra un patrón claro: mientras más cerca del glaciar, sobre los 5000 m s. n. m., la vegetación es escasa y especializada, con pocas especies resistentes. A medida que se desciende, la diversidad aumenta gradualmente, llegando a su máximo en los bofedales. Este proceso de colonización altitudinal no solo revela la gran adaptabilidad de la vegetación terrestre, sino también los límites impuestos por los desafíos climáticos y físicos de los ambientes de alta montaña.

Figura 5-1

DISTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN CLAVE EN EL ENTORNO GLACIAR.



FAUNA QUE HABITA EN EL GLACIAR Y SU ENTORNO

La colonización de la vegetación en las zonas donde la capa de hielo del Quelccaya se ha retirado, ha ido transformando los hábitats para la fauna local, debido a que los cambios en la estructura y composición vegetal condicionan la presencia de determinadas especies de fauna (Smith & Smith, 2007).

Según registros de monitoreo realizados durante las últimas dos décadas, incluyendo estudios de impacto ambiental¹³ y las observaciones in situ de los profesionales del INAIGEM, se ha documentado una diversidad de especies que dependen de las conexiones entre el glaciar y los demás ecosistemas de alta montaña.

¹³ Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Corani, elaborado en el 2012 por AMEC Perú; y Segundo Informe Técnico Sustentatorio del Proyecto Corani, elaborado en el 2017 por INSIDEO. Ambos documentos fueron preparados para Bear Creek Mining S.A.C.



Una vizcacha andina (*Lagidium peruanum*) en la zona periglacial

1



2



Condor andino (fotografía 1) y taruca (fotografía 2) en el ecosistema de pajonal de puna húmeda.

Entre los animales avistados, basado en registros bibliográficos y fotografías tomadas durante las expediciones científicas del INAIGEM, destacan especies como el gato andino, el puma, el zorro andino, el cóndor andino, la taruca, entre otros.



Ejemplar de *Pleurodema marmoratum* en el entorno del glaciar Quelccaya

Entre los anfibios adaptados a las condiciones ambientales extremas del Quelccaya, se encuentra a la rana *Telmatobius marmoratus*, categorizada como Vulnerable¹⁴, una de sus especies más emblemáticas. Este anfibio habita en los bofedales, donde el agua de deshielo contribuye a mantener este frágil ecosistema. Además, se tiene evidencia de la presencia del sapo *Pleurodema marmoratum*, que vive también en los bofedales así como en las lagunas y pajonales.

14 De acuerdo a la actualización de la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas (Decreto Supremo N.º 004-2014-MINAGRI)



Ejemplar de *Liolaemus* gr. *signifer* en el entorno del glaciar Quelccaya

El reptil más representativo es la lagartija *Liolaemus* gr. *montanus* *aff. yauri*, que tiene una amplia distribución en el territorio, con una presencia de más del 90% de los reptiles encontrados en la zona. Estos reptiles de tamaño mediano se caracterizan por ser diurnos, se alimentan de invertebrados y vegetales, y eligen cuevas de roedores para refugiarse (Fauna Nativa Consultores, 2019).



Entre los roedores más representativos de esta zona se encuentran las vizcachas (*Lagidium peruanum*), el pericote (*Phyllotis xanthopygus*), el ratón tricolor (*Abrothrix jelskii*), y el ratón endémico¹⁵ *Calomys sorellus*, este último habita en zonas húmedas como los bofedales. Los roedores forman parte de la cadena alimenticia de los mamíferos mayores, como el puma, zorro andino y gato andino.

Ejemplar de vizcacha, roedor fácilmente de avistar en el entorno del Quelccaya.

¹⁵ Según Pacheco et al., 2009, mencionado por INSIDEO (2017)

1



2



Familia de Tarucas (fotografía 1) y una Vicuña con su cría (fotografía 2) transitando sobre el ecosistema periglacial del Quelccaya.

En el entorno del Quelccaya, se puede avistar a grandes mamíferos como la taruca (*Hippocamelus antisensis*), una especie vulnerable en el Perú que habita los ecosistemas de pajonales hasta las zonas periglaciares. Además, las vicuñas (*Vicugna vicugna*), consideradas como una especie casi amenazada¹⁶, presentan una mayor población en la zona respecto a las tarucas, por lo que se observan con mayor frecuencia en estos ecosistemas.

¹⁶ De acuerdo a la actualización de la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas (Decreto Supremo N.º 004-2014-MINAGRI)



Cada año, la población local acopia la fibra de las vicuñas, mediante una técnica ancestral practicada desde la época incaica, denominada *chaku* (Vilcanqui et al., 2010). Esta fibra es muy valorada por su alta calidad, y es considerada una de las más finas del mundo. Por ello, es comercializada por las comunidades locales para la elaboración de prendas textiles de alto valor económico, lo que representa una fuente económica adicional para las familias.



Vicuñas acorraladas en el entorno del Quelccaya (fotografía 2), mientras pobladores de la comunidad campesina de Quelccaya en labores de vigilancia para el chaku de vicuñas.

En la zona también hay registros del zorrino o añas (*Conepatus chinga*), una especie que se moviliza entre los ecosistemas de pajonales hasta las zonas periglaciares, mostrando una amplia capacidad de desplazamiento en el ámbito del Quelccaya.

Entre los depredadores, el puma (*Puma concolor*), especie casi amenazada¹⁷, es un carnívoro estricto y considerado el mayor depredador de los Andes. Su presencia se ha evidenciado en la zona a través de reportes de los pobladores, huellas y excrementos encontrados. Se tiene también a otros carnívoros estrictos como el gato andino *Leopardus jacobita*, con un estado de amenaza en peligro¹⁷; y el gato andino *Leopardus colocolo* como una especie con datos insuficientes¹⁷. El *Leopardus jacobita* es considerado como el fantasma de los Andes, debido a la dificultad para ser registrados y la poca información existente. Finalmente, el zorro colorado (*Lycalopex culpaeus*), carnívoro oportunista, posee una dieta más variada y se alimenta de pequeños mamíferos, insectos, huevos, frutos y carroña.



Un ejemplar de zorro andino bajo la lluvia en el ecosistema de pajonal de puna húmeda

¹⁷ De acuerdo a la actualización de la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas (Decreto Supremo N.º 004-2014-MINAGRI)

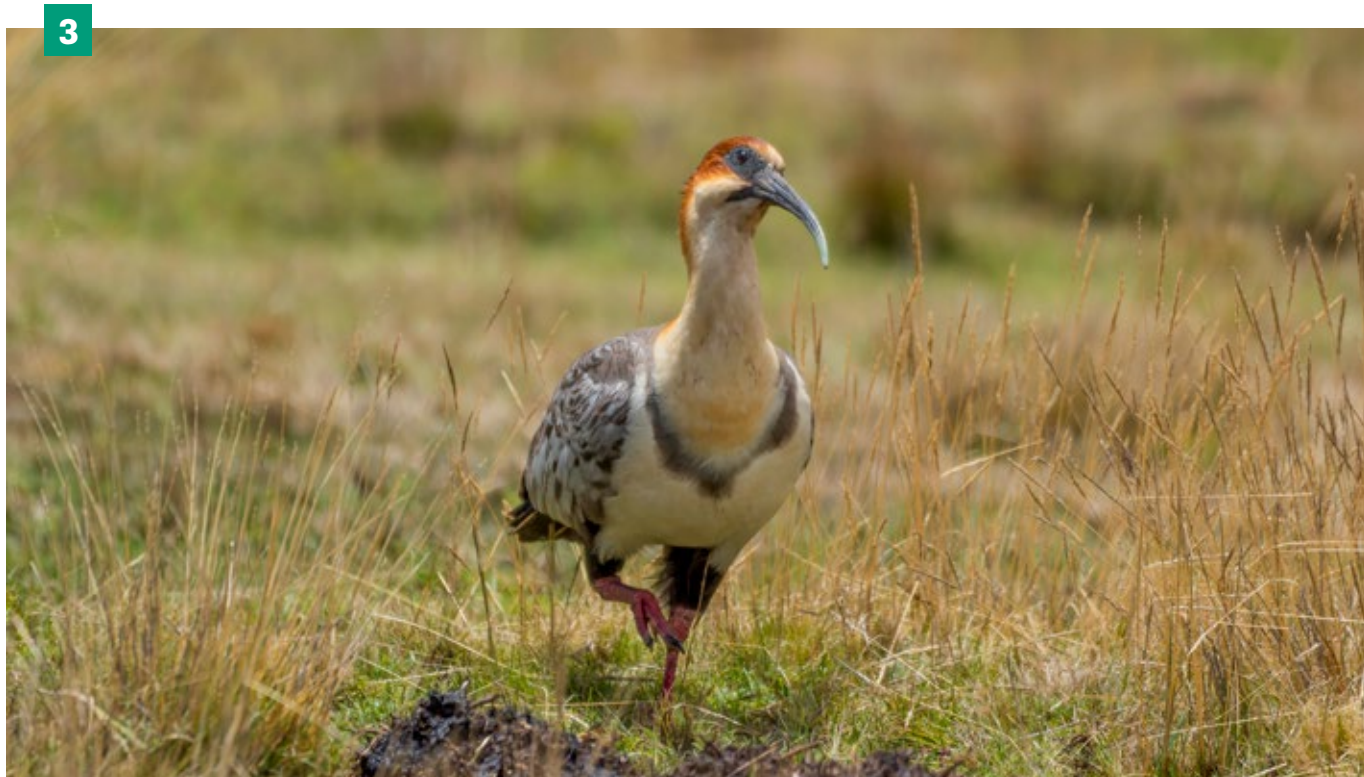
Las aves constituyen el grupo más diverso de las especies de fauna del Quelccaya, con unas 76 especies registradas en las expediciones científicas del INAIGEM. Se resalta la presencia del cóndor andino (*Vultur gryphus*) considerado como una especie en peligro¹⁷. Es una especie que se alimenta de carroña y que es el ave voladora más grande del Perú, con un poco más de tres metros de envergadura. En contraste, también están presentes aves más pequeñas como el chorlo cordillerano (*Phegornis mitchellii*) y la perdiz de puna (*Tinamotis pentlandii*), especies casi amenazadas¹⁷ que se distribuyen entre los pajonales y bofedales.

La estrella andina (*Oreotrochilus estella*), uno de los dos colibríes registrados en el entorno del Quelccaya, es uno de los pocos colibríes que se han adaptado a elevadas altitudes de los Andes, con cambios en su nivel de hemoglobina para fijar mejor el oxígeno.

Otra ave que destaca es el canastero de Junín (*Asthenes virgata*) por ser la única ave endémica del Perú encontrada en la zona. Suele andar por el suelo de los pajonales, donde busca alimento entre las hierbas. El fringilo peruano (*Phrygilus punensis*), un ave ampliamente distribuida en nuestros Andes, también está presente en el entorno del Quelccaya. Se dedica a buscar alimentos forrajeando el suelo para encontrar semillas y artrópodos.

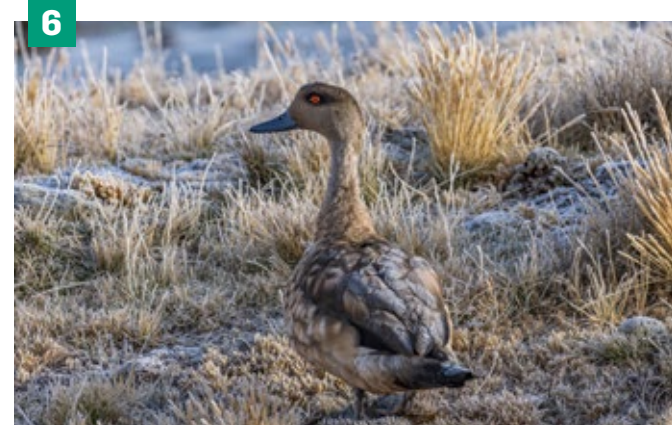
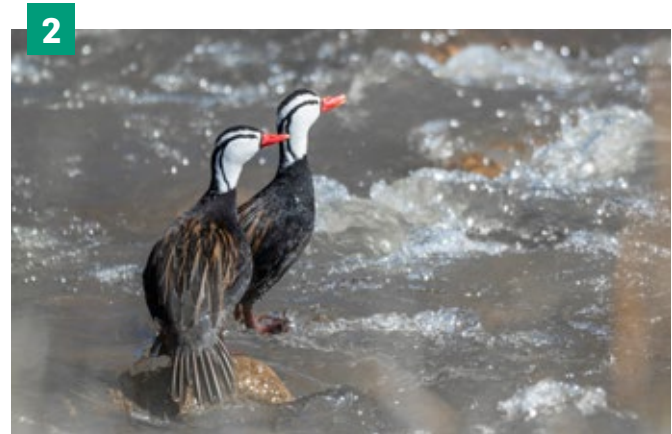
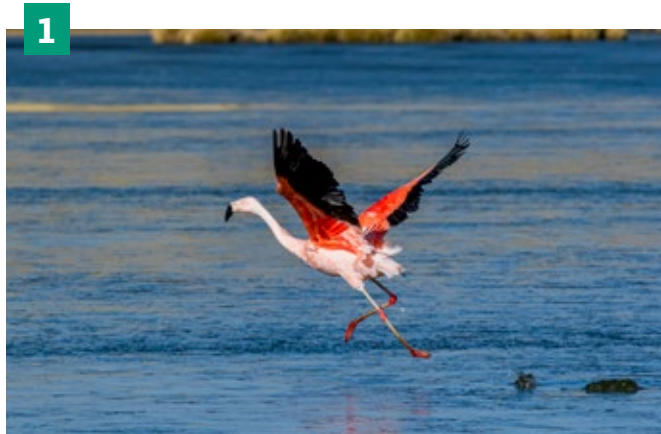
La agachona de vientre rufo (*Attagis gayi*), cuya presencia es poco común, puede pasar desapercibida por su plumaje confuso, que se camufla bien con los colores del entorno. La bandurria andina (*Theristicus branickii*), especie considerada como casi amenazada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), está presente en los bofedales y pajonales sola o en pequeños grupos.





La agachona de pecho gris (fotografía 1), el canastero de Junín endémico del Perú (2) y la bandurria andina o ibis (3). Todas estas aves han sido encontradas en el entorno del glaciar.

Las lagunas altoandinas del entorno atraen una gran variedad de aves acuáticas. Entre ellas, se encuentra el flamenco chileno (*Phoenicopterus chilensis*), una especie clasificada como casi amenazada por la UICN, que utiliza sus patas largas para alimentarse y su pico para filtrar algas microscópicas. Se observa también al pato de los torrentes (*Merganetta armata*) sobre ríos del entorno, al zambullidor plateado (*Podiceps occipitalis*), especie casi amenazada¹⁸. Estas especies conviven con algunas de las aves más abundantes de la zona, como el cauquén huallata (*Oressochen melanopterus*), el pato crestón (*Lophonetta specularioides*) y el pato barcino (*Anas flavirostris*), que se encuentran en bofedales u espejos de agua altoandinos para alimentarse y descansar.



Flamenco chileno que inicia su vuelo sobre una laguna del entorno del Quelccaya (fotografía 1). Pato de los torrentes (macho) en las corrientes de agua del entorno (2) y hembra con sus crías (3). Grupo de Huallatas en temporadas de invierno (4) y verano (5). Un ejemplar del pato crestón caminando sobre la vegetación nativa (6)

¹⁸ De acuerdo a la actualización de la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas (Decreto Supremo N.º 004-2014-MINAGRI)

LAS AVES DEL QUELCCAYA QUE NECESITAN MÁS ATENCIÓN

En el contexto actual de transformación de los ecosistemas por actividades humanas, la conservación de la biodiversidad constituye una responsabilidad prioritaria y un desafío para la sostenibilidad ambiental. La UICN, el Libro Rojo de la Fauna Silvestre Amenazada del Perú y la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas por el Estado peruano (Decreto Supremo N.º 004-2014-MINAGRI), surgen como herramientas clave para proteger a las especies en riesgo.

La UICN, con su emblemático Lista roja (Red list), evalúa el estado de conservación de la fauna a nivel global, y alerta sobre aquellas especies que requieren medidas inmediatas para evitar su extinción. Por su parte, el Perú, a través de su legislación, se suma a este esfuerzo, identificando y protegiendo a las especies amenazadas dentro de su territorio.

Estas categorizaciones no solo buscan informar, sino promover acciones concretas para reducir el impacto en los hábitats, promover la coexistencia responsable y, sobre todo, garantizar que futuras generaciones puedan coexistir en armonía con la riqueza natural del país.

En el entorno del Quelccaya, este llamado a la conservación es relevante, pues alberga aves como el cóndor andino (en estado vulnerable según la UICN y en peligro según la normativa nacional) o la perdiz de puna (casi amenazada por la norma nacional). Hay que recordar que cada especie cumple una función esencial en el equilibrio de los ecosistemas de montaña. La Tabla 5-1 muestra las especies de aves en la zona que presentan algún estado de amenaza.

Tabla 5-1

ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LAS AVES EN EL QUELCCAYA

Nombre común	Según UICN	Libro rojo del Perú	D.S. N.º 004-2014-MINAM
Bandurria andina	Casi amenazada	-	-
Chorlo cordillerano	Casi amenazada	Casi amenazada	-
Cóndor andino	Vulnerable	En peligro	En peligro
Flamenco chileno	Casi amenazada	Casi amenazada	-
Perdiz de puna	Preocupación menor	Casi amenazada	Casi amenazada
Playero pata amarilla mayor	Casi amenazada	-	-
Playero pata amarilla menor	Vulnerable	-	-
Zambullidor plateado	Preocupación menor	Casi amenazada	Casi amenazada

Todos estos animales, que habitan el glaciar y su entorno, cumplen roles importantes como la dispersión de semillas, el control de insectos, la limpieza de carroña, entre otros, conectando entre sí los diferentes ecosistemas de la zona. Entre las aves, hay un grupo importante que destaca por ser migratoria y que llega temporalmente de acuerdo a los ciclos estacionales.

Algunas provienen del extremo norte del continente (migratorias boreales), como el playerito de Baird (*Calidris bairdii*), el playero pectoral (*Calidris melanotos*), el falaropo tricolor (*Phalaropus tricolor*) y los playeros de patas amarillas (*Tringa melanoleuca* y *Tringa flavipes*). Estos últimos se encuentran en estado de amenaza, siendo el playero de pata amarilla mayor una especie casi amenazada y el de pata amarilla menor un ave vulnerable, según la UICN. Otras especies de aves son las migratorias australes, porque llegan desde el sur. Entre estas se encuentra a la dormilona cinérea (*Muscisaxicola cinereus*) y la dormilona de nuca ocrácea (*Muscisaxicola flavinucha*).

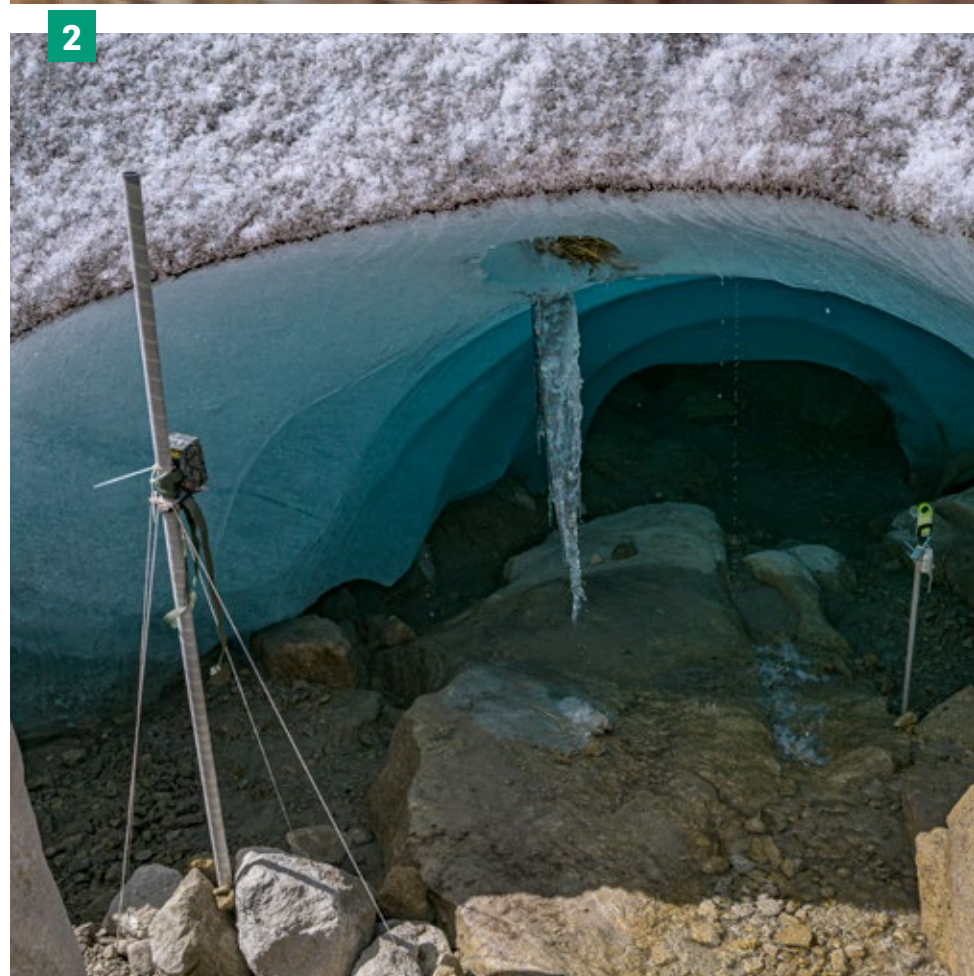
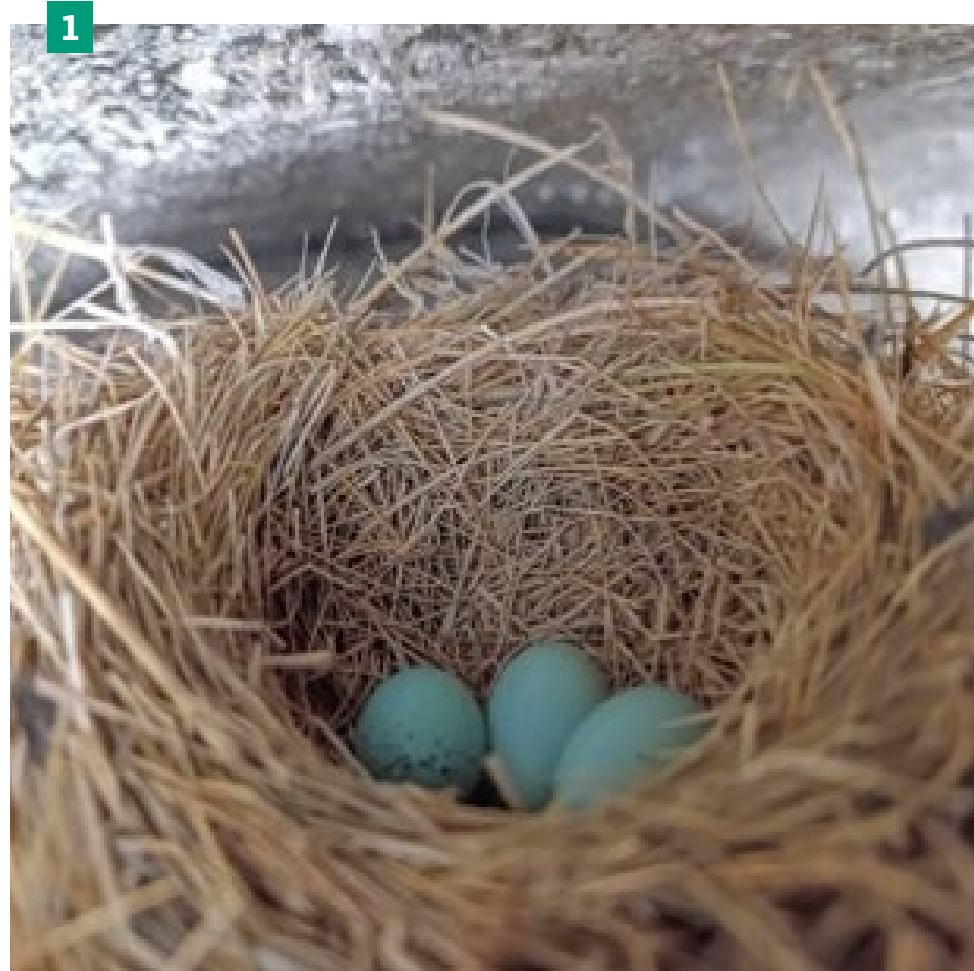
La presencia de la avifauna en el entorno del Quelccaya, ya sea como residentes permanentes o visitantes estacionales, revela la gran capacidad de adaptación de la vida en los Andes y las amplias conexiones ecológicas que unen al Quelccaya con otros lugares del continente.



EL FRINGILO GLACIAR: UN CASO EXCEPCIONAL DE ANIDACIÓN EN HIELO

En el Quelccaya existe una especie muy particular que ha desarrollado una estrategia reproductiva que no se observa en otra especie: el fringilo glaciar (*Idiopsar speculifer*). Aunque habita los pastizales de puna, entre los 4000 y 5300 m s. n. m. (Hardy & Pantoja-Maggi, 2024), revela en época reproductiva un comportamiento muy singular: elige las grietas y cavernas de los glaciares tropicales para construir sus nidos. A más de 5200 m s. n. m., estas cavidades de hielo ofrecen un microclima estable, algo fundamental para la supervivencia de sus crías.

El fringilo glaciar elabora sus nidos principalmente con pastos andinos (*Cinnagrostis nitidula*). Estos alcanzan unos 30 cm de diámetro y 8.5 cm de altura, con una cavidad interna cuidadosamente moldeada para albergar los huevos. Las paredes vegetales, reforzada ocasionalmente con arbustos como el *Senecio rufescens*, crean un aislamiento térmico en este ambiente extremo de humedad y temperatura. Estos hallazgos, documentados por el INAIGEM, no solo mejoran la comprensión de la adaptación de las aves a entornos glaciares, sino que resalta la importancia de esta especie como un indicador clave para evidenciar los impactos del cambio climático sobre los ecosistemas.



Vista interna del primer plano del nido con tres huevos del fringilo glaciar (fotografía 1) y vista general de la ubicación del nido dentro de la grieta del glaciar (2).

Dentro de estas cavidades de hielo, el microclima muestra un equilibrio que protege a los huevos y pichones del exterior. Mientras fuera de las cavidades se tienen fluctuaciones diarias amplias de temperatura que van desde $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $14\text{ }^{\circ}\text{C}$; en el interior el nido se mantiene a una temperatura estable, cercana a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, con variaciones mínimas de apenas medio grado. Asimismo, dentro de las cavidades, la humedad relativa se mantiene alta (93 a 100%), mientras que afuera varía entre 58% y 88%.

El cuidado biparental del fringilo glaciar es notable. Ambos padres trabajan en equipo: realizan entre ocho y nueve visitas diarias al nido para alimentar a los pichones, siempre durante el día (entre las 5:39 y 17:39 horas). Cada visita dura poco más de un minuto, con intervalos de aproximadamente 90 minutos. Este ritmo es crucial para la supervivencia de las crías.

ESTA DINÁMICA ECOLÓGICA ENFRENTA AMENAZAS COMO LA DEPREDACIÓN POR ZORROS ANDINOS Y EL RETROCESO ACELERADO DEL GLACIAR QUELCCAYA. POR ELLO, ESTA ADAPTACIÓN DEL FRINGILO GLACIAR CONVIERTE A ESTA ESPECIE EN UN INDICADOR CLAVE PARA MONITOREAR EL ESTADO DE LOS GLACIARES TROPICALES, ECOSISTEMAS FRÁGILES ANTE EL CALENTAMIENTO GLOBAL.

Nido activo del fringilo glaciar en el hielo del Quelccaya, con tres pichones en espera de su alimento.

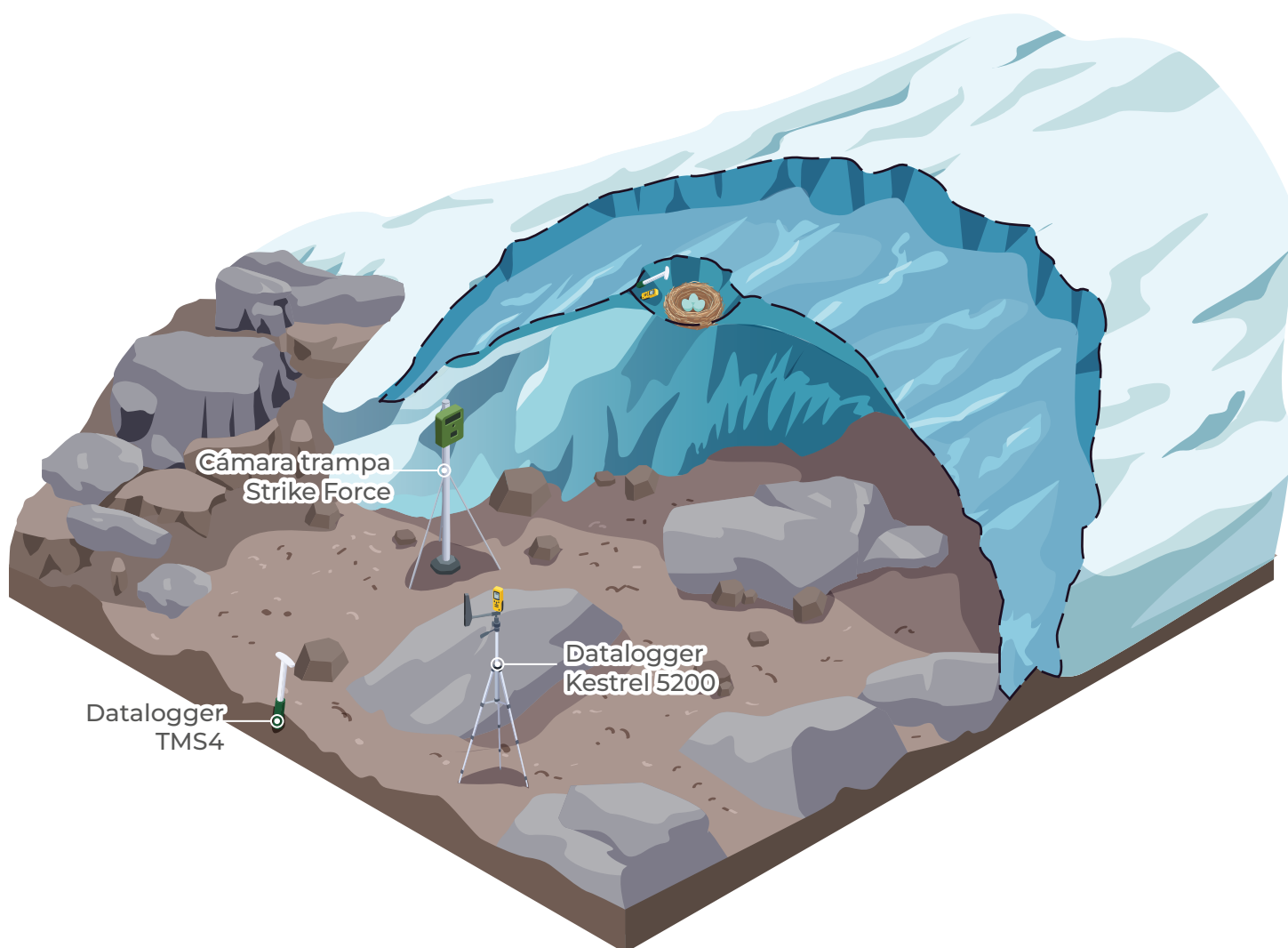


REVELANDO LOS SECRETOS DEL FRINGILO GLACIAR

Investigadores del INAIGEM han descubierto datos inéditos sobre esta ave, que transforma las grietas de hielo en nidos para sus crías. Durante las expediciones realizadas al Quelccaya entre 2024 y 2025, se usaron sensores microclimáticos de alta precisión junto a cámaras trampa, para documentar por primera vez el microclima de un nido activo, tal como se muestra en la Figura 5-2.

Figura 5-2

ESQUEMA DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS PARA EL ESTUDIO DEL MICROCLIMA DE LAS ZONAS DE NIDIFICACIÓN DEL FRINGILO GLACIAR.



Estos datos, recogidos sin interferir en el frágil ecosistema (ver Tabla 5-2), no solo exponen su comportamiento único ante temperaturas bajo cero, sino que establece una línea base para monitorear cómo el retroceso acelerado del glaciar podría afectar a esta especie que depende de los glaciares tropicales para reproducirse.

El retroceso glaciar del Quelccaya podría estar reduciendo los espacios de anidación de esta especie, debido al incremento de la inestabilidad del hielo, así como por exponerlo a depredadores como el zorro andino. Estas nuevas condiciones pondrían poner en riesgo la supervivencia de esta especie en el Quelccaya.

Tabla 5-2

HALLAZGOS SOBRE EL FRINGILO GLACIAR

Característica	Hallazgo	Método
Ubicación de nidos	Cavidades en hielo del Quelccaya a 5200 - 5350 m s.n.m.	GPS
Composición del nido	+80% <i>Cinnagrostis nitidula</i> + otras especies vegetales (en 6 nidos analizados)	Recolección in situ
Regulación térmica	Amplitud térmica de solo 0.5 °C vs. 16.17 °C exterior	Sensores de temperatura y humedad
Cuidado biparental	8.5 visitas diarias (5:39 - 17:39 h), ausencia nocturna	Cámaras trampa (27 días)
Nuevos depredadores documentados	Depredación por zorro <i>Lycalopex culpaeus</i> (registrada el 04/04/2025 a las 21:49 h)	Cámaras trampa (27 días)



El Fringilo Glaciar (*Idiopsar speculifer*) es un ave paseriforme que habita en los glaciares tropicales entre los 4000 y 5300 m s. n. m.

Es la única especie de ave en el mundo con evidencia documentada de anidación consistente directamente en glaciares andinos, específicamente en el casquete de hielo Quelccaya, al sureste del Perú.

UN HOGAR EN EL HIELO



Este estudio se realizó entre 2024 y 2025 en el glaciar Quelccaya (Cusco, Perú), a más de 5200 m s. n. m.



Las temperaturas fluctúan entre -7 °C por la noche y 15 °C de día. El ave anida en **cuevas, grietas y cornisas.**



GLACIAR QUELCCAYA



GLACIAR QUELCCAYA

VIDA SOBRE



ANIDACIÓN EN EL HIELO

Ambos padres cuidan activamente a los pichones:



Alimentan y retiran sacos fecales



Las visitas ocurren entre las 05:39 y 17:39 h



Visitan el nido entre 8 y 9 veces por día

En condiciones adversas, los pichones pueden morir por competir por la comida entre ellos.

EL FRINGILO

ADAPTACIONES REPR...

UNA INCUBADORA NATURAL



Las cavidades glaciares crean un microclima protegiendo a huevos y pichones de las condiciones extremas del exterior.

El Fringilo Glaciar es un símbolo de adaptación extrema.

Su estudio revela cómo incluso en ambiente...



EL HIELO

LO GLACIAR EN EL QUELCCAYA

PRODUCTIVAS DE UN AVE ÚNICA EN LOS GLACIARES TROPICALES ANDINOS

AL

ares
a estable,
os y
diciones
or.

	DENTRO DEL NIDO	AFUERA (ZONA PERIGLACIAR)
Temperatura media diaria	-0.16 °C	2.3 °C
Amplitud térmica diaria	0.82 °C	13.9 °C
Humedad relativa diaria	98%	79.6%
Evaporación diaria	0.15 Kg/m ² /h	0.35 Kg/m ² /h

o la vida puede prosperar
s gélidos y cambiantes.

NIDOS SOBRE HIELO

MATERIALES PREDOMINANTES



80% *Deschampsia ovata*
(pasto andino)

Otros: *Cinnagrostis nitidula*,
Senecio rufescens, *Agrostis gigantea* y plumas

MEDIDAS PROMEDIO



Diámetro exterior: 29.7 cm

Diámetro del cuenco: 10.7 cm

Profundidad: 3.9 cm

Peso: 174 g

RIESGOS EN EL HIELO



Cambio climático: el retroceso del glaciar Quelccaya pone en riesgo los hábitats de anidación.



Depredadores naturales: se registró la depredación de un nido por un zorro andino (*Lycalopex culpaeus*).

Es un bioindicador clave frente al
cambio climático.




6

UNA MIRADA AL FUTURO

OBSERVATORIO CIENTÍFICO QUELCCAYA

RENNY DÍAZ | WILFREDO CHÁVEZ | OSCAR VILCA
RICARDO VILA | ÁNGELA MENDOZA | VÍCTOR BUSTINZA



El glaciar Quelccaya posee una ubicación estratégica en los Andes tropicales. Desde los inicios de su investigación, en los años 70, ha sido considerado por los científicos como un referente y un archivo climático natural, permitiendo reconstruir fragmentos del pasado de la Tierra y comprender el clima a lo largo de siglos. Al tener una forma muy particular de casquete glaciar, el Quelccaya es extremadamente vulnerable al cambio climático. Como prueba de ello, su retroceso acelerado, en las últimas décadas, evidencia no solo su fragilidad frente al calentamiento global, sino también la necesidad de profundizar su estudio, para la toma de decisiones informadas.

Este ecosistema glaciar se encuentra interrelacionado e interconectado con los ecosistemas circundantes de su entorno de alta montaña (periglacial, pajonal de puna húmeda, bofedales y ecosistemas acuáticos), por lo que la investigación y análisis entre estos debe abordarse de manera integrada. Solo así será posible entender las dinámicas que los vinculan, evaluar sus respuestas frente al cambio climático y diseñar estrategias efectivas para una gestión sostenible.

Este capítulo propone una mirada al futuro, con la creación de un observatorio en el glaciar Quelccaya que servirá para registrar, analizar y mitigar los impactos del cambio climático sobre los glaciares y ecosistemas de montaña en esta región de los Andes peruanos.



Bofedal y laguna del sector Ancasi (Puno)

DESAFÍOS Y AVANCES ACTUALES

El retroceso del glaciar Quelccaya plantea desafíos significativos no solo ambientales, sino también sociales y económicos. Su acelerada deglaciación, además de representar la pérdida de un archivo natural invaluable para reconstruir el clima del pasado, también afecta directamente a los ecosistemas altoandinos interconectados con su dinámica. La reducción en la disponibilidad de agua, producto de la disminución de la masa glaciar, impacta en la regulación hídrica de las cuencas de Inambari y Vilcanota, poniendo en riesgo el abastecimiento de agua para actividades como la agricultura, la ganadería y la generación hidroeléctrica.



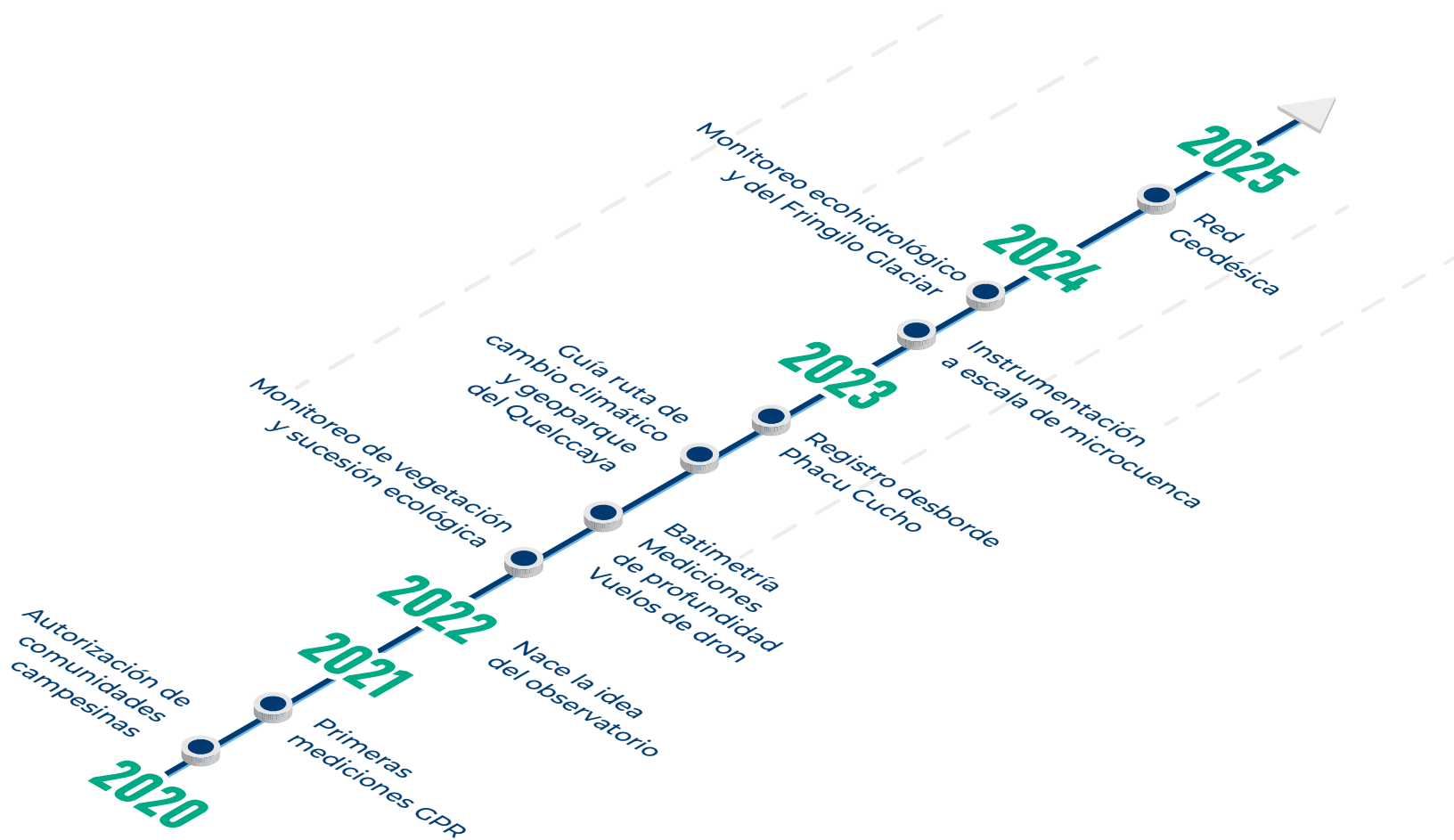
Monitoreo realizado por el INAIGEM en los bofedales que se alimentan del glaciar Quelccaya.

Al mismo tiempo, las comunidades que habitan en su entorno enfrentan retos crecientes para sostener sus modos de vida tradicionales. El conocimiento ecológico ancestral, construido a lo largo de generaciones en interacción con este entorno glaciar, representa un recurso cultural que debe ser reconocido e integrado en las políticas de gestión ambiental. Además, el Quelccaya alberga un potencial aún poco explorado para el desarrollo de actividades como el turismo científico y de naturaleza, que podrían contribuir a la diversificación de la economía local. En este contexto, los desafíos actuales exigen enfoques de gestión interdisciplinarios que reconozcan el valor de esta zona como un sistema ecológico, cultural y económico interdependiente.

En respuesta a esta complejidad, el INAI GEM ha venido fortaleciendo sus capacidades técnicas y científicas para estudiar el glaciar Quelccaya y sus ecosistemas asociados. A partir de 2020, ha consolidado su presencia institucional en la zona con un enfoque de monitoreo ambiental a largo plazo, obteniendo el consentimiento de las comunidades de Quelccaya y Phinaya para los trabajos a realizarse. La primera expedición científica, realizada el año 2020, incluyó mediciones con el Radar de Penetración Terrestre (GPR) para estimar la profundidad del hielo. En el 2022, se establecieron transectos de monitoreo de vegetación para el análisis de la sucesión primaria, se realizaron estudios batimétricos y se incorporó el uso de drones como herramientas para el levantamiento de datos de alta resolución (ver Figura 6-1).

Figura 6-1

CRONOLOGÍA DE LOS AVANCES CIENTÍFICOS REALIZADOS EN EL QUELCCAYA



Durante el 2023, se establecieron transectos adicionales para el monitoreo de la sucesión ecológica y se evaluaron el estado de los bofedales de la quebrada Qori Kalis. Además, se avanzó en el monitoreo ecohidrológico con la implementación de una red de estaciones hidrometeorológicas y en el estudio de las zonas de nidificación del fringilo glaciar. En el 2024, se completó la instalación de una red geodésica que permite registrar con precisión los cambios físicos del casquete glaciar y se establecieron cuadrantes de monitoreo de vegetación en los bofedales de la quebrada Qori Kalis. Esta base técnica permite sostener, en la actualidad, un sistema de monitoreo ambiental integrado que articula tres componentes fundamentales: glaciológico, hidrológico y ecológico. Este sistema comprende cinco estaciones meteorológicas ubicadas en gradientes altitudinales estratégicos; 11 estaciones hidrométricas distribuidas en ocho microcuencas para mediciones continuas de caudales que buscan comprender las conexiones entre de los glaciares y los ecosistemas de montaña, como los bofedales y pajonales; varios puntos de monitoreo del nivel de agua en lagunas glaciares que buscan determinar el aporte hidrológico de los glaciares; y una red de 17 piezómetros que permiten registrar el comportamiento del nivel freático de los bofedales (ver Figura 6-2). Esta plataforma de observación genera datos fundamentales para entender cómo se conecta el glaciar con los ecosistemas de montaña, y cómo evolucionan bajo las presiones del cambio climático.

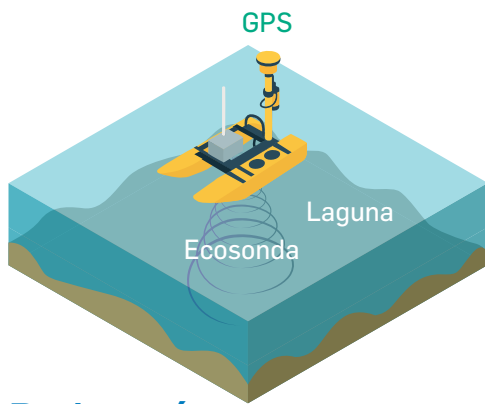


Monitoreo de caudales de los ríos que vienen del glaciar Quelccaya

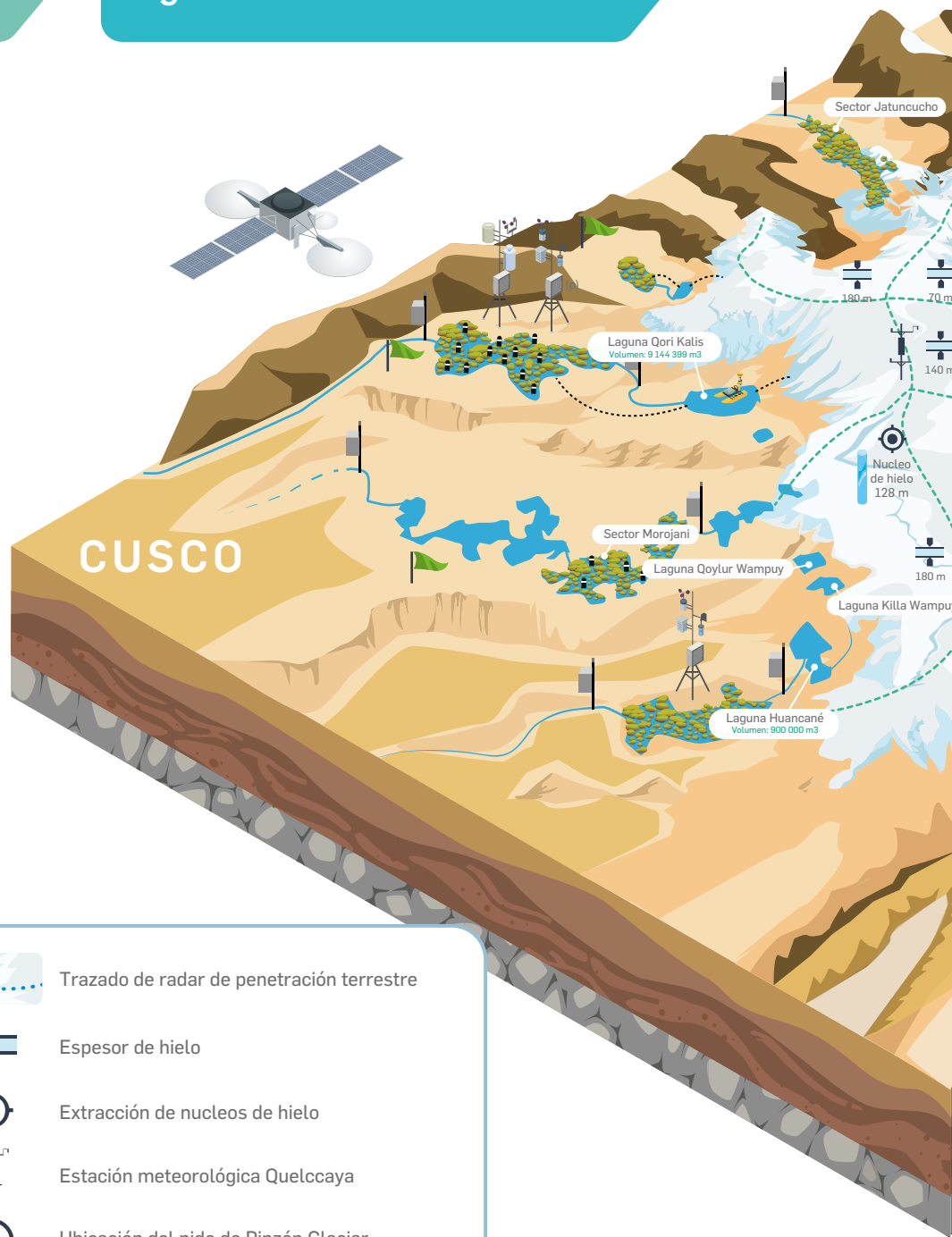
OBSERVATORIO DEL INVESTIGACION

Reserva de agua en el
glaciar Quelccaya

Evaluación de la conexión
glaciar - ecosistema



**Batimetría
de las lagunas**



LEYENDA

- | | | | |
|--|---------------------------------|--|---|
| | Glaciar Quelccaya | | Trazado de radar de penetración terrestre |
| | Bofedales | | Espesor de hielo |
| | Lagunas glaciares | | Extracción de núcleos de hielo |
| | Formaciones periglaciares | | Estación meteorológica Quelccaya |
| | Ríos | | Ubicación del nido de Pinzón Glaciar |
| | Transectos de sucesión primaria | | Puntos Geodésicos |

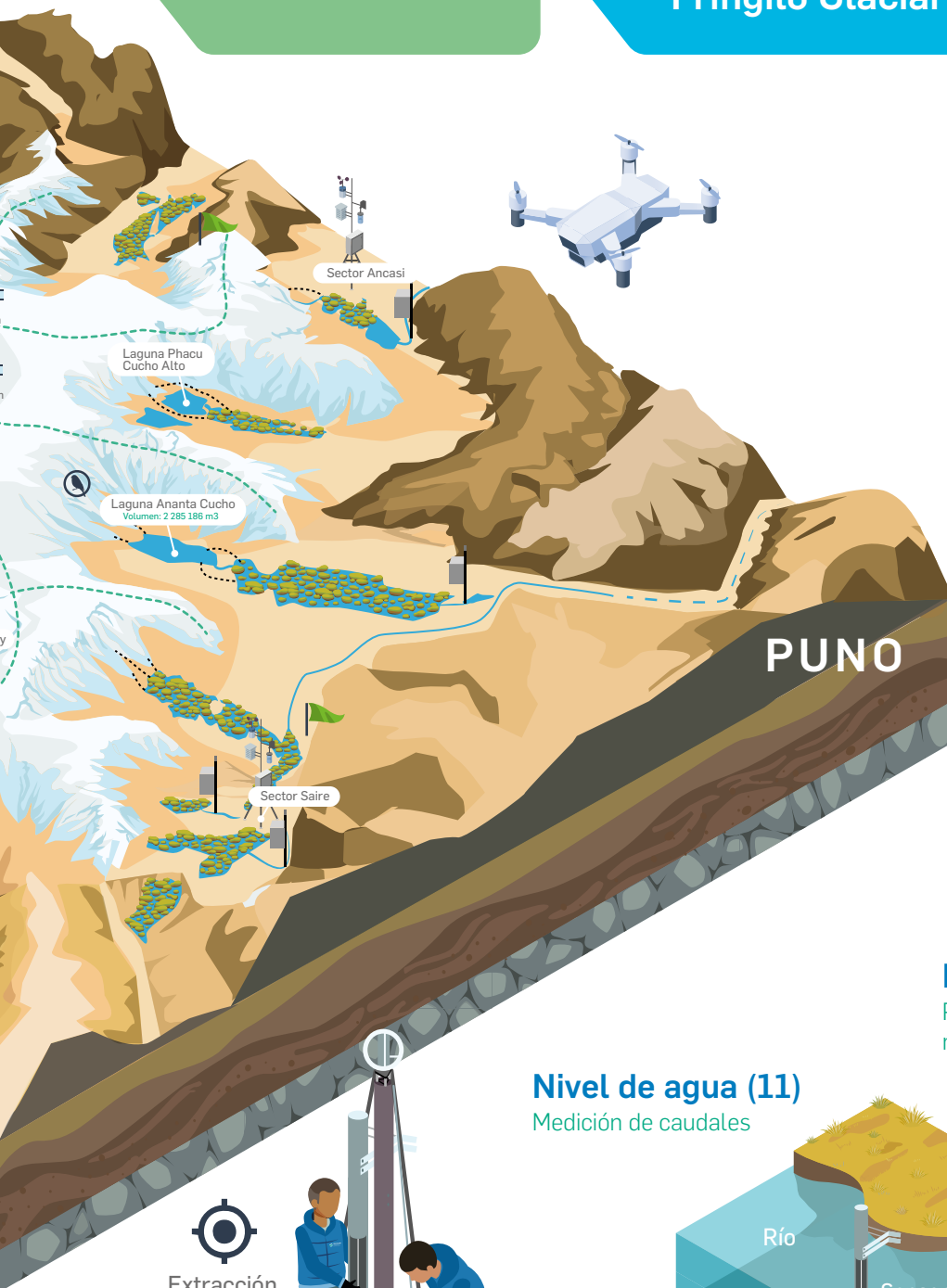
GLACIAR QUELCCAYA

NES EN CURSO

Sucesión primaria

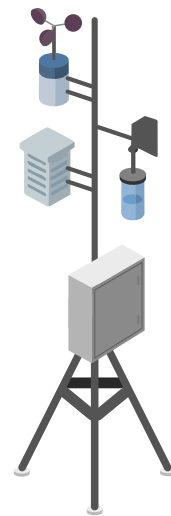
Reproducción del Fringilo Glaciar

Dinámica y stock de carbono

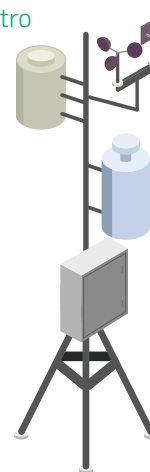


Estación meteorológica (3)

Precipitación
Temperatura
Humedad relativa
Velocidad del viento



Pluviómetro de pesaje

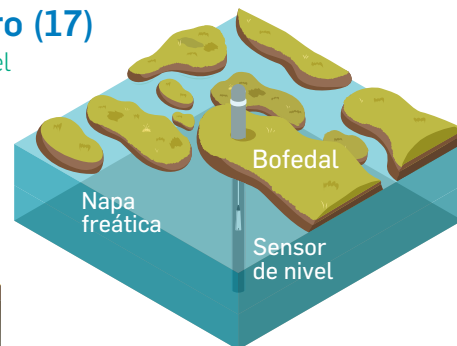


Colector de precipitación para análisis isotópico

Estación pluviométrica (1)

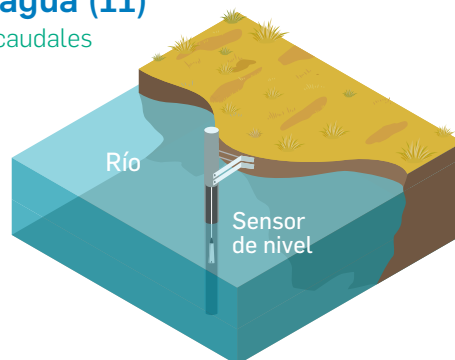
Piezómetro (17)

Profundidad del nivel freático



Nivel de agua (11)

Medición de caudales



Extracción de núcleos de hielo



La recolección sistemática de datos de campo en las expediciones científicas realizadas en el Quelccaya ha permitido establecer una base sólida para el desarrollo de diversas áreas de investigación, con implicancias directas para la población que depende del glaciar:

Dinámica Glacial y estimación volumétrica: se enfoca en el análisis de los patrones de retroceso glaciar y la cuantificación de las reservas de agua almacenadas en el glaciar y lagunas, proyectando su evolución futura. Es una investigación fundamental para garantizar la disponibilidad hídrica de las poblaciones aguas abajo y optimizar la gestión del recurso ante el cambio climático.

- **Dinámica de vegetación:** investiga los procesos de sucesión primaria en áreas deglaciadas y los patrones de colonización vegetal posglacial, así como el estado de los ecosistemas frágiles como los bofedales. Estos humedales altoandinos son esenciales para la ganadería de camélidos (llamas y alpacas), ya que sustentan la economía local.
- **Ecohidrología y servicios ecosistémicos:** analiza las interacciones entre los flujos hídricos glaciares y la funcionalidad de los ecosistemas de montaña, evaluando su impacto en los servicios que brindan las montañas, como la disponibilidad de agua, la agricultura de subsistencia y los medios de vida tradicionales.
- **Con la implementación del observatorio,** se busca integrar las diferentes líneas de investigación en una plataforma común que permita comprender de manera integral al glaciar y sus interacciones con los ecosistemas altoandinos que lo rodean. Esta integración facilitará una visión más articulada del territorio, que fortalecerá la capacidad de respuesta ante los posibles impactos del cambio climático.

Aunque es valiosa la diversidad de instituciones nacionales e internacionales que realizan investigaciones en la zona, esta ha generado superposición de esfuerzos, falta de estandarización metodológica y dificultades en el intercambio de datos. En este escenario, la creación de un observatorio podrá ser un espacio estratégico para articular y coordinar estos esfuerzos, consolidando una red de investigación colaborativa que optimice recursos y amplifique el impacto científico del trabajo realizado en el Quelccaya.

**EL OBSERVATORIO SE CONCIBE COMO UN CENTRO DE INVESTIGACIÓN QUE
GENERE CONOCIMIENTO CIENTÍFICO APLICABLE A POLÍTICAS PÚBLICAS PARA LA
GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS NATURALES EN LOS ANDES PERUANOS,
CON PROYECCIÓN HACIA OTRAS REGIONES MONTAÑOSAS DEL MUNDO.**

PROPUESTA DEL OBSERVATORIO

Frente a los desafíos de la acelerada deglaciación del Quelccaya en un contexto de cambio climático, se plantea la creación del Observatorio, que permitirá reunir capacidades técnicas, saberes locales e innovación científica para generar conocimiento estratégico sobre la dinámica glaciar y sus interacciones ecosistémicas.

Este observatorio busca tener un enfoque ecosistémico y participativo, pues integra las dimensiones glaciológica, ecológica, hidrológica y sociocultural del entorno. De esta manera, se propone incorporar un modelo de gestión adaptativa y ciencia ciudadana que promueva la colaboración entre investigadores, instituciones y comunidades altoandinas. La visión es convertir al observatorio en un referente regional en investigación en glaciares y ecosistemas de montaña en un contexto de cambio climático, con la articulación del conocimiento académico, políticas públicas y saberes tradicionales.





Personal de investigación dirigiéndose a las zonas de trabajo de campo en compañía con la población local.

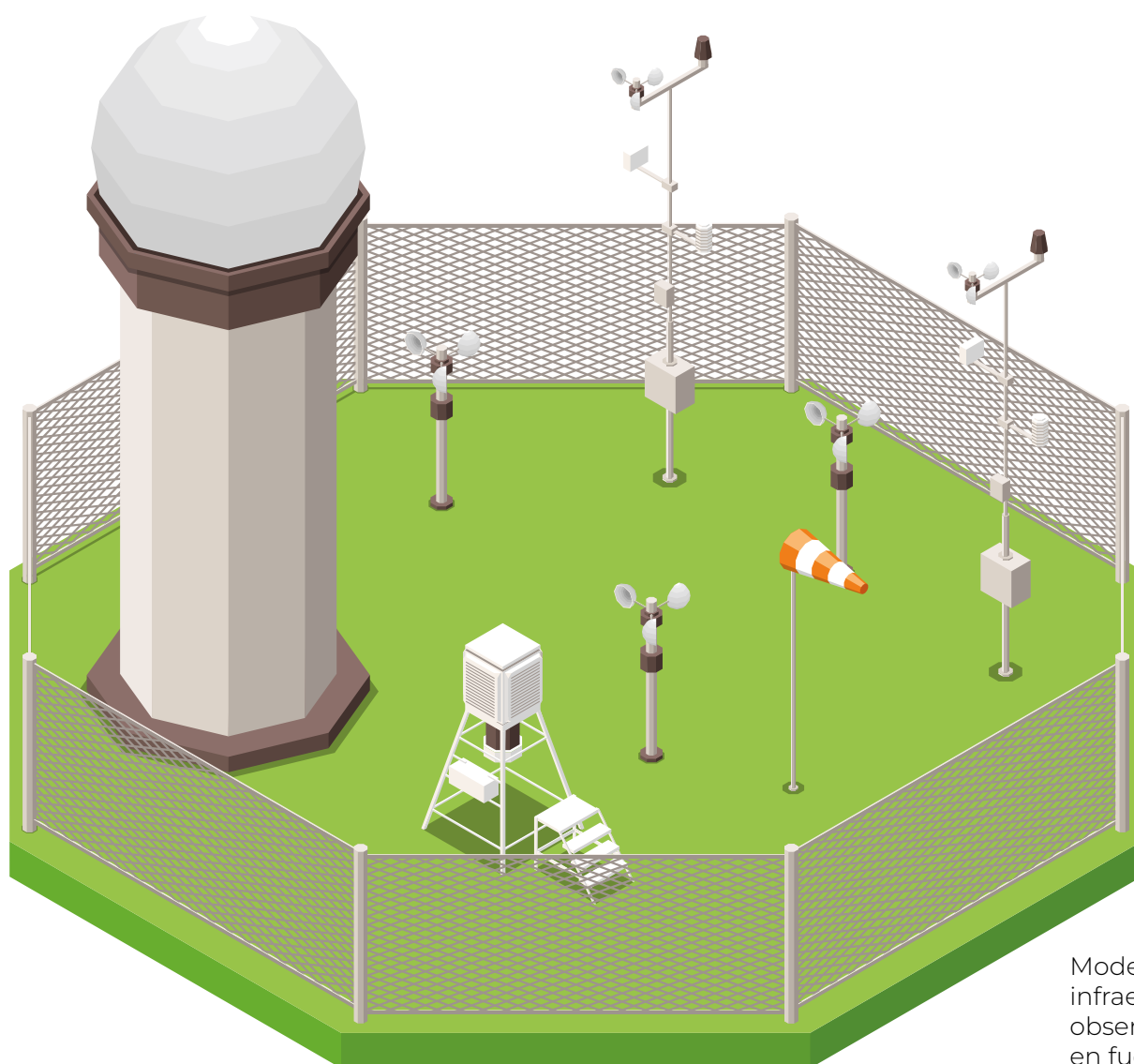


Inspección de los equipos y monitoreo en campo de las condiciones ambientales del Quelccaya.



A corto plazo, la meta es consolidar una infraestructura operativa robusta: estaciones de monitoreo automáticas, protocolos validados, un equipo profesional interdisciplinario y sobre todo el involucramiento de la comunidad en el observatorio. La implementación de una infraestructura como base que permita acoger a grupos de investigadores nacionales e internacionales, sumada a la modernización de redes de observación para glaciares, bofedales, lagunas y cobertura vegetal, permitirá contar con datos en tiempo real que fortalezcan la capacidad de análisis y respuesta frente a los impactos del cambio climático.

A mediano plazo, se proyecta posicionar al observatorio como un centro modelo regional, con impactos tangibles en la formulación de políticas públicas sobre adaptación climática, gestión del agua y de ecosistemas. La documentación y difusión de estos impactos será clave para facilitar la transferencia del conocimiento generado hacia actores científicos, tomadores de decisiones y la ciudadanía. Asimismo, se fomentará el desarrollo de redes internacionales de colaboración científica, así como la transferencia tecnológica hacia otras regiones de los Andes tropicales.



Modelo de infraestructura del observatorio basado en fuentes de energía renovables

En el largo plazo, el observatorio aspira a convertirse en un nodo científico de referencia global. Se prevé su integración a redes internacionales de observatorios de alta montaña y la implementación de estrategias de cooperación que permitan replicar el modelo en otros países. El fortalecimiento institucional será una prioridad, pues asegura su sostenibilidad a través de la oferta de servicios técnicos especializados, programas de formación avanzada, asesorías y producción científica de alto impacto.

Además, con la creación de este observatorio, se tendrá un potencial para dinamizar la economía local mediante el turismo científico, generar empleo a través de servicios vinculados al desarrollo sostenible, e involucrar a las comunidades en el monitoreo ambiental mediante programas de ciencia ciudadana. La apropiación del conocimiento por parte de la población permitirá fortalecer la resiliencia social frente a escenarios climáticos inciertos.

En definitiva, el Observatorio Científico Quelccaya representa una oportunidad estratégica para posicionar al Perú como líder en la investigación de ecosistemas de montaña tropical. Su puesta en marcha responde a una necesidad científica concreta, repotenciando los recursos actuales y las capacidades técnicas instaladas con el fin de responder a una demanda urgente de información para la gestión territorial sostenible. Invertir en su desarrollo no solo fortalece la ciencia nacional, sino que abre un camino para enfrentar de forma articulada los desafíos del cambio climático en uno de los ecosistemas más frágiles y emblemáticos de los Andes del sur peruano.



Investigador del
INAIGEM analizando la
próxima zona de trabajo.

EL GEOPARQUE DEL GLACIAR QUELCCAYA



Bosque de rocas Sillatira, distrito de Corani, al fondo el glaciar Quelccaya.

MÁS ALLÁ DEL PAISAJE: LOS GEOPARQUES COMO VOZ DE LA SOSTENIBILIDAD

Los Geoparques Mundiales de la UNESCO son áreas geográficas únicas y unificadas donde los sitios y paisajes de importancia geológica internacional se gestionan con un concepto holístico de protección, educación y desarrollo sostenible. Un Geoparque Mundial de la UNESCO utiliza su patrimonio geológico, en conexión con todos los demás aspectos del patrimonio natural y cultural del área, para mejorar la conciencia y la comprensión de los problemas clave que enfrenta la sociedad, como el uso sostenible de los recursos de nuestra tierra, la adaptación y mitigación al cambio climático y la reducción de riesgos relacionados con peligros naturales.

Al crear conciencia sobre la importancia del patrimonio geológico del área en la historia y la sociedad actual, los Geoparques Mundiales de la UNESCO brindan a la población local un sentido de orgullo por su región y fortalecen su identificación con el área. Se estimula la creación de empresas locales innovadoras, nuevos puestos de trabajo, se generan y diversifican las fuentes de ingresos a través del geoturismo, el turismo científico, mientras se protegen el patrimonio geológico, el patrimonio natural y el patrimonio cultural del área.



El nevado Ausangate y la laguna de Upisocha, vista del lado del distrito de Ocongate.

QUELCCAYA: LA CONSTRUCCIÓN DE UN GEOPARQUE PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

La creación de un Geoparque es un desafío enorme que, una vez creado, puede contribuir al desarrollo sostenible de un territorio, en beneficio de las poblaciones que la habitan.

El objetivo general es impulsar el desarrollo sostenible en el área de influencia del glaciar Quelccaya, en beneficio de las comunidades locales. Para ello, se buscará promover la gestión sostenible del patrimonio geológico de valor internacional; desarrollar cadenas de valor basadas en los ecosistemas de montaña como estrategia de adaptación al cambio climático y diversificación de medios de vida; así como revalorar los aspectos culturales de la zona, incluyendo su historia, festividades, tradiciones y costumbres, como parte fundamental de su identidad y riqueza sociocultural.

DESDE LA BASE HACIA LA CIMA: UN ENFOQUE DE ABAJO HACIA ARRIBA

Los Geoparques Mundiales de la UNESCO empoderan a las comunidades locales y les brindan la oportunidad de desarrollar asociaciones cohesivas con el objetivo común de valorar, proteger y difundir el patrimonio geológico, junto con las características, los períodos geológicos, los procesos naturales y los elementos históricos o paisajísticos vinculados a la geología que confieren identidad y singularidad al territorio.. Los Geoparques Mundiales de la UNESCO se establecen a través de un proceso de abajo hacia arriba que involucra a todas las partes interesadas y autoridades locales y regionales relevantes en el área. Este proceso requiere un compromiso firme por parte de las comunidades locales, una fuerte asociación local múltiple con apoyo público y privado a largo plazo, y el desarrollo de una estrategia integral que cumpla con todos los objetivos de las comunidades mientras muestra y protege el patrimonio geológico del área.



Directivos de la comunidad de Phinaya, distrito de Pitumarca, en el acto de socialización de la Guía del Geoparque del Glaciar Quelccaya.

LA VOZ DE LOS ANDES: DONDE NACE EL HIELO Y FLORECE LA VIDA, UN TERRITORIO DE CIENCIA, CULTURA Y SOSTENIBILIDAD

Considerando el inmenso potencial para la ciencia y el conocimiento, que ofrece el glaciar Quelccaya y su entorno, se propone como área de influencia del Geoparque del Glaciar Quelccaya, los distritos de Ocongate, Marcapata, Cusipata, Pitumarca, Checacupe, Combapata, Tinta, San Pedro y San Pablo en la Región Cusco; y, los distritos de Corani y Macusani en la Región Puno. Este territorio ofrece, por sus formaciones geológicas, por la presencia de una inmensa masa glaciar, por la diversidad de los ecosistemas y biodiversidad, por su cultura y tradiciones, una oportunidad de desarrollo para las poblaciones que la habitan, como una forma de mejorar sus indicadores de desarrollo.



Bosque de rocas Pacunasa, distrito de Macusani.

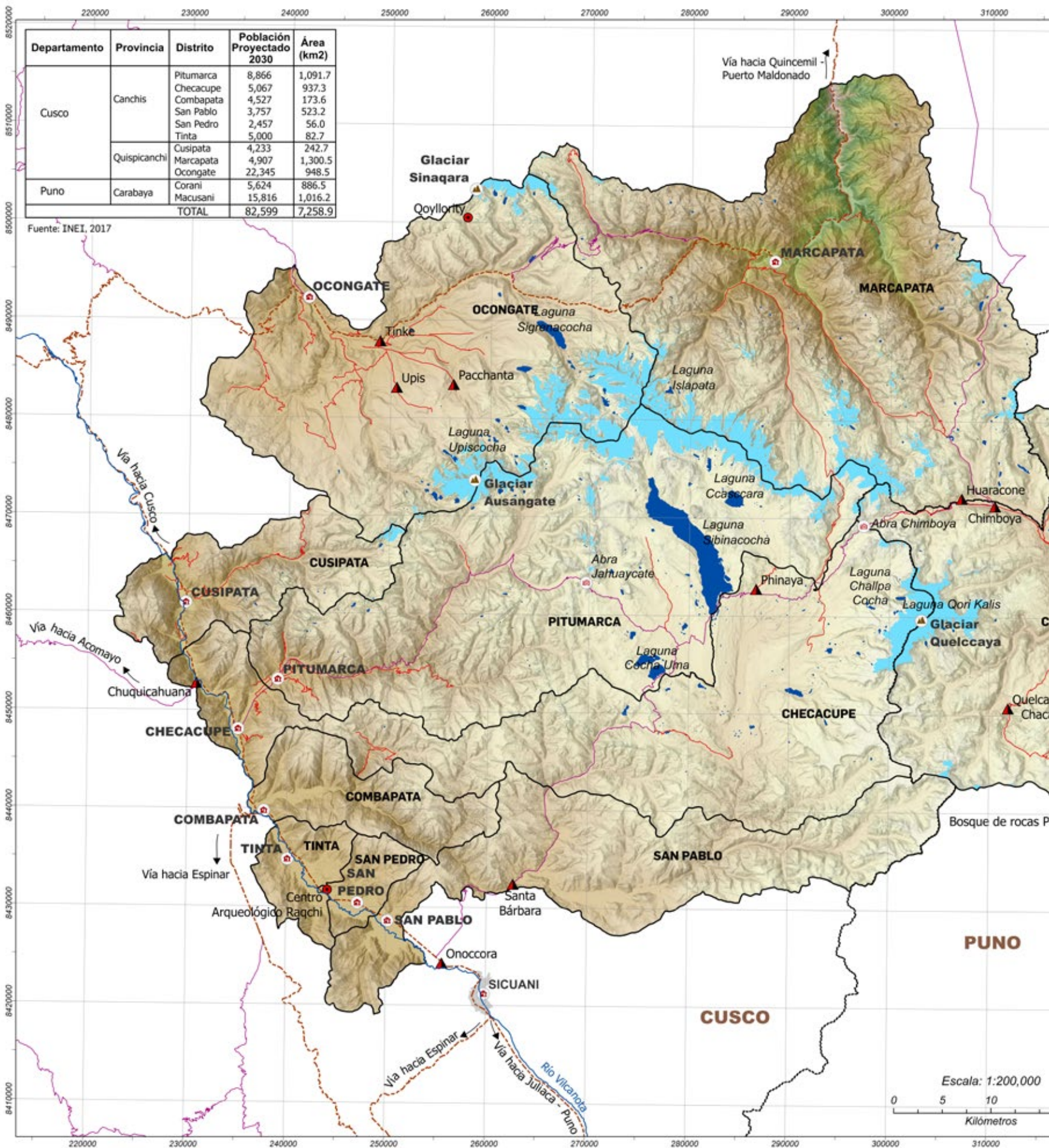
QUELCCAYA BAJO LA MIRADA CIENTÍFICA: INVESTIGACIÓN Y CONOCIMIENTO PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

La investigación en el patrimonio geológico, la biodiversidad y la cultura proporcionan la base de conocimientos necesarios para la gestión integral y sostenible de un Geoparque Mundial de la UNESCO, garantizando su conservación a largo plazo y su contribución al desarrollo sostenible de los once distritos involucrados.

La investigación en el Geoparque del Glaciar Quelccaya, además del estudio del patrimonio geológico, integrará el análisis de la biodiversidad, el cambio climático, los procesos socioambientales y el conocimiento ancestral. Esta mirada interdisciplinaria permitirá diseñar estrategias de gestión adaptadas al contexto local, fundamentadas en evidencia científica y saberes tradicionales. Además, fomentará la participación de universidades, centros e institutos de investigación, gobiernos locales y comunidades, promoviendo una ciencia inclusiva y útil para la toma de decisiones. El Geoparque del Glaciar Quelccaya, de por sí es un verdadero laboratorio natural, impulsará la educación, la innovación y la cooperación internacional, contribuyendo a resolver desafíos globales desde lo local.









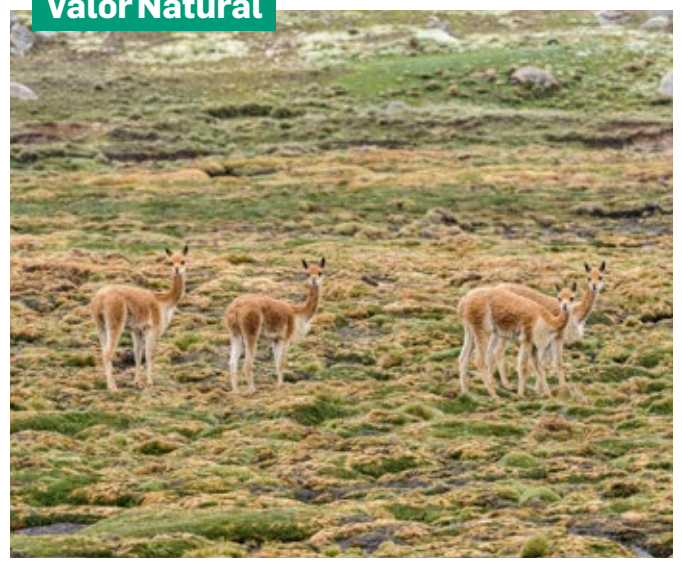
Mapa de ubicacion geoparque Quelccaya

Valor Geológico



Cañón de Ananiso - Pitumarca

Valor Natural



Bofedales y fauna en el área del Geoparque.

Valor Cultural



Peregrinación al Santuario del Señor de Qoylluriti. Martí Chambi, 1934
Colección Asociación Martín Chambi

BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO 1

- Ballantyne, C. K. (2018). *Periglacial geomorphology*. Wiley-Blackwell.
- Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K. I., Portocarrero, C., Gómez, J., & Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134–150. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J186>
- Bolin, I. (2009). The Glaciers of the Andes are Melting: Indigenous and Anthropological Knowledge Merge in Restoring Water Resources. En S. A. Crate & M. Nuttall (Eds.), *Anthropology and Climate Change* (1a ed., 228–239). Left Coast Press.
- Bury, J., Mark, B. G., Carey, M., Young, K. R., McKenzie, J. M., Baraer, M., French, A., & Polk, M. H. (2013). New Geographies of Water and Climate Change in Peru: Coupled Natural and Social Transformations in the Santa River Watershed. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(2), 363–374. <https://doi.org/10.1080/00045608.2013.754665>
- Buytaert, W., Moulds, S., Acosta, L., De Bièvre, B., Olmos, C., Villacis, M., Tovar, C., & Verbist, K. M. J. (2017). Glacial melt content of water use in the tropical Andes. *Environmental Research Letters*, 12(11). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa926c>
- Defensoría del Pueblo. (2019). Reporte de Conflictos Sociales N° 188. http://www.defensoria.gob.pe/areas_te
- Dillehay, T. D., & Kolata, A. L. (2004). Long-term human response to uncertain environmental conditions in the Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(12), 4325–4330. <https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.0400538101>
- Duviols, P. (1986). *Cultura andina y represión: procesos y visitas de idolatrías y hechicerías Cajatambo, siglo XVII*. Centro de Estudios Rurales Andinos "Bartolomé de las Casas."
- Egli, M., Wernli, M., Kneisel, C., & Haeberli, W. (2006). Melting Glaciers and Soil Development in the Proglacial Area Morteratsch (Swiss Alps): I. *Soil Type Chronosequence*. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 38(4), 499–609. [https://doi.org/https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2006\)38\[499:MGASDI\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1657/1523-0430(2006)38[499:MGASDI]2.0.CO;2)
- Emmer, A., Klimeš, J., Mergili, M., Vilímek, V., & Cochachin, A. (2016). 882 lakes of the Cordillera Blanca: An inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods. *Catena*, 147, 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.032>
- Flores G, A. (1988). *Comunidades Campesinas: Cambios y permanencias*. (2ª. Ed.). Centro de Estudios y Promoción del Desarrollo.
- Gade, D. W. (1999). *Nature and culture in the Andes* (1a. Ed.). University of Wisconsin Press). <https://archive.org/details/naturecultureina0000gade/page/n3/mode/2up>
- Glave, L. M., & Remy, M. I. (1983). *Estructura agraria y vida rural en una región andina Ollantaytambo entre los siglos XVI y XIX*. Centro de Estudios Rurales Andinos "Bartolomé de las Casas".
- Gobbi, M., De Bernardi, F., Pelfini, M., Rossaro, B., & Brandmayr, P. (2006). Epigeal arthropod succession along a 154-year Glacier foreland chronosequence in the Forni Valley (Central Italian Alps). *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 38(3), 357–362. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2006\)38\[357:EASAA Y\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2006)38[357:EASAA Y]2.0.CO;2)
- Gobierno Regional de Cusco. (2017). *Estrategia Regional de Cambio Climático de Cusco*. <https://predes.org.pe/wp-content/uploads/2019/07/57.pdf>
- Hardy, D. R., & Hardy, S. P. (2008). White-winged Diuca Finch (*Diuca specularis*) nesting on Quelccaya Ice Cap, Peru. *Wilson Journal of Ornithology*, 120(3), 613–617. <https://doi.org/10.1676/06-165.1>
- Hostnig, R. (2003). *Arte rupestre del Perú: inventario nacional*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Hotaling, S., Hood, E., & Hamilton, T. L. (2017). Microbial ecology of mountain glacier ecosystems: biodiversity, ecological connections and implications of a warming climate. *Environmental Microbiology*, 19(8), 2935–2948. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13766>
- Hribljan, J. A., Cooper, D. J., Sueltenfuss, J., Wolf, E. C., Heckman, K. A., Lilleskov, E. A., & Chimner, R. A. (2015). Carbon storage and long-term rate of accumulation in high-altitude Andean peatlands of Bolivia. *Mires and Peat*, 15(12), 1–14. <http://www.mires-and-peat.net/>

- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *Censos nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. Sistema de Consulta de Base de Datos.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *Mapa de pobreza monetaria provincial y distrital 2018* (1era ed.). https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1718/Libro.pdf
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2024). *Sistema de Información Distrital para la Gestión Pública*. Población proyectada al año 2025. <https://estadist.inei.gov.pe/report>
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2018). *Inventario nacional de glaciares. Las cordilleras glaciares del Perú*. https://drive.google.com/file/d/1iDp4axm_eKn0FytwsY5V5ZVSiCNLxT3o/view
- Körner, C. (2003). *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems* (2a. ed.). Springer.
- LQA Consultoría y Proyectos Ambientales. (2018). *Estudio de Impacto Ambiental Detallado del Proyecto Línea de Transmisión para la Conexión de la Central Hidroeléctrica San Gabán III al SEIN*.
- Machaca, A. D. (2023). Estudio de generación de mapas climáticos para un periodo actual y futuro de acuerdo a escenarios de cambio climático del IPCC para el ámbito del glaciar Quelccaya.
- Maldonado, M. S. (2014). An introduction to the bofedales of the Peruvian High Andes. *Mires and Peat*, 15(4), 1–13. <http://www.mires-and-peat.net/>
- Mark, B. G., McKenzie, J. M., & Gómez, J. (2005). Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejon de Huaylas, Peru. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6). <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.975>
- Matthews, J. A. (1992). *The Ecology of Recently-deglaciated Terrain: A Geoecological Approach to Glacier Forelands*. Cambridge University Press.
- Mayer, E. (2009). *Ugly Stories of the Peruvian Agrarian Reform*. Duke University Press. <https://doi.org/10.1215/9780822390718>
- Mendoza A. (2022). *Caracterización de la vegetación altoandina en el gradiente altitudinal desde la zona periglacial del Quelccaya hasta los ecosistemas de bofedal*.
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2024). *Sistema de Información Geográfica de Comunidades Campesinas [Conjunto de datos geoespaciales]*. Geoportal MIDAGRI. <https://georural.midagri.gov.pe/sicar/>
- Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social. (2013). *Empadronamiento Distrital de Población y Vivienda 2012-2013*. Sistema de Focalización de Hogares (SISFOH).
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Mapa nacional de cobertura vegetal. Memoria descriptiva*. <https://www.gob.pe/minam>
- Ministerio del Ambiente. (2019). *Mapa nacional de ecosistemas del Perú. Memoria descriptiva* (1a ed.). <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru>
- Miteva, V. (2008). Bacteria in snow and glacier ice. En *Psychrophiles: From Biodiversity to Biotechnology* (pp. 31–50). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74335-4_3
- Nagy, L., & Grabherr, G. (2009). *The Biology of Alpine Habitats*. Oxford.
- Orlove, B., Milch, Kerry, Zaval, L., Ungemach, C., Brugger, J., Dunbar, K., & Jurt, C. (2019). Framing climate change in frontline communities: anthropological insights on how mountain dwellers in the USA, Peru, and Italy adapt to glacier retreat. *Regional Environmental Change*, 19, 1295–1309. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10113-019-01482-y>
- Polk, M. H., Young, K. R., Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Bury, J., & Carey, M. (2017). Exploring hydrologic connections between tropical mountain wetlands and glacier recession in Peru's Cordillera Blanca. *Applied Geography*, 78, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.11.004>
- Raimondi, A. (1874). *El Perú (Vols. 1–3)*. Imprenta del Estado. https://archive.org/details/b24872696_0002/page/n7/mode/2up
- Ricker, J. (1970). Cordillera Vilcanota-1969. *The American Alpine Journal*, 16(2), 42–47. <http://publications.americanalpineclub.org/articles/12197004200/>
- Rowe, J. H. (1946). Inca culture at the time of the Spanish conquest. En J. H. Steward (Ed.), *Handbook of South American Indians* (Vol. 2, pp. 183–330).

- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P., & Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *Cryosphere*, 7(1), 103–118. <https://doi.org/10.5194/tc-7-103-2013>
- Schmidt, S. K., Nemergut, D. R., Miller, A. E., Freeman, K. R., King, A. J., & Seimon, A. (2009). Microbial activity and diversity during extreme freeze-thaw cycles in periglacial soils, 5400 m elevation, Cordillera Vilcanota, Perú. *Extremophiles: life under extreme conditions*, 13(5), 807–816. <https://doi.org/10.1007/s00792-009-0268-9>
- Seimon, T. A., Seimon, A., Daszak, P., Halloy, S. R. P., Schloegel, L. M., Aguilar, C. A., Sowell, P., Hyatt, A. D., Konecky, B., & Simmons, J. E. (2007). Upward range extension of Andean anurans and chytridiomycosis to extreme elevations in response to tropical deglaciation. *Global Change Biology*, 13(1), 288–299. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01278.x>
- Seimon, T. A., Seimon, A., Yager, K., Reider, K., Delgado, A., Sowell, P., Tupayachi, A., Konecky, B., McAloose, D., & Halloy, S. (2017). Long-term monitoring of tropical alpine habitat change, Andean anurans, and chytrid fungus in the Cordillera Vilcanota, Peru: Results from a decade of study. *Ecology and Evolution*, 7(5), 1527–1540. <https://doi.org/10.1002/ece3.2779>
- Suarez, W., Cristoba, L., & Villacorta, M. (2025). Weather stations on tropical glaciers: A multivariate dataset for cryospheric and climate research on Peruvian glaciers. *Frontiers in Earth Science*, 13, 1563983. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1563983>
- Takeuchi, N., Tanaka, S., Konno, Y., Irvine-Fynn, T. D. L., Rassner, S. M. E., & Edwards, A. (2019). Variations in phototroph communities on the ablating bare-ice surface of glaciers on Brøggerhalvøya, Svalbard. *Frontiers in Earth Science*, 7(4). <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00004>
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E. S., Davis, M. E., Zagorodnov, V. S., Howat, I. M., Mikhalenko, V. N., & Lin, P. N. (2013). Annually Resolved Ice Core Records of Tropical Climate Variability over the Past ~1800 Years. *Science*, 340 ((6135), 945–950. American Association for the Advancement of Science. <https://doi.org/10.1126/science.1234210>
- Verziji, A., & Quispe, S. G. (2013). The system nobody sees: Irrigated wetland management and alpaca herding in the Peruvian Andes. *Mountain Research and Development*, 33(3), 280–293. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00123.1>
- Vilca, O. (2025a). *Estudio de la dinámica de los glaciares en la capa de hielo Quelccaya*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Cusco.
- Vilca, O. (2025b). *Estudio para la estimación de la reserva de agua almacenada en el glaciar Quelccaya*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Cusco.
- Wagnon, P., Ribstein, P., Francou, B., & Pouyaud, B. (1999). Annual cycle of energy balance of Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 104(D4), 3907–3923. <https://doi.org/10.1029/1998JD200011>
- Zimmermann, M., Meir, P., Silman, M. R., Fedders, A., Gibbon, A., Malhi, Y., Urrego, D. H., Bush, M. B., Feeley, K. J., Garcia, K. C., Dargie, G. C., Farfan, W. R., Goetz, B. P., Johnson, W. T., Kline, K. M., Modi, A. T., Rurau, N. M. Q., Staudt, B. T., & Zamora, F. (2010). No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. *Ecosystems*, 13(1), 62–74. <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9300-2>

CAPÍTULO 2

García-Ruiz, J. M., Palacios, D., González-Sampérez, P., De Andrés, N., Moreno, A., Valero-Garcés, B., & Gómez-Villar, A. (2016). Evidencias de actividad glaciar durante el Dryas Reciente (12,9-11,7 ka BP) en la Península Ibérica. *Cuaternario y Geomorfología*, 30(1-2)) 9–21. Asociación Española para el Estudio del Cuaternario (AEQUA). <https://doi.org/10.17735/cyg.v30i1-2.39250>

Gargurevich, P. G. (2017, Abril 14). *Héroe de la montaña*. Redagráfica. <https://redagricola.com/hero-la-montana/>

CAPÍTULO 3

Anderson, R., & Anderson, S. (2010). *Geomorphology: The Mechanics and Chemistry of Landscapes* (Cambridge, Ed.). Cambridge University Press.

Benavente, C. L., Delgado, F., Taipe, E., Audin, L., & Pari Pinto, W. (2013). Neotectónica y peligro sísmico en la región Cusco. *Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo Geológico*, 55,1–263. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12544/296>

Benn, D., & Evans, D. J. A. (2014). *Glaciers and Glaciation* (2a2a. ed.). <https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9780203785010>

- Bradley, R. S., Keimig, F. T., Diaz, H. F., & Hardy, D. R. (2009). Recent changes in freezing level heights in the Tropics with implications for the deglaciation of high mountain regions. *Geophysical Research Letters*, 36(17). <https://doi.org/10.1029/2009GL037712>
- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F., & Vergara, W. (2006). Threats to water supplies in the tropical andes. *Science*, 312(5781), 1755–1756. <https://doi.org/10.1126/science.1128087>
- Carey, M. (2010). *In the Shadow of Melting Glaciers: Climate Change and Andean Society*. Oxford University Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195396065.001.0001>
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C., & Haeberli, W. (2012). An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 112(3–4), 733–767. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0249-8>
- Chávez V., A., Salas A., G., Gutiérrez S., E., & Cuadros P., J. (1997). Geología de los cuadrángulos de Corani y Ayapata. Hojas 28-u y 28-v. Serie A: Carta Geológica Nacional, Boletín 90, 128 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/47>
- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., & Oré, M. T. (2015). The changing water cycle: climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(6), 715–733. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1105>
- Espinoza, J. C., Chávez, S., Ronchail, J., Junquas, C., Takahashi, K., & Lavado, W. (2015). Rainfall Hotspots over the Southern Tropical Andes: Spatial Distribution, Rainfall Intensity, and Relations with Large-Scale Atmospheric Circulation. *Water Resources Research*, 51, 3459–3475.
- Glas, R., Lautz, L., McKenzie, J., Mark, B., Baraer, M., Chávez, D., & Maharaj, L. (2018). A review of the current state of knowledge of proglacial hydrogeology in the Cordillera Blanca, Peru. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(5). <https://doi.org/10.1002/WAT2.1299>
- Glasser, N. F., & Bennett, M. R. (2004). Glacial erosional landforms: Origins and significance for palaeoglaciology. *Progress in Physical Geography*, 28(1), 43–75. <https://doi.org/10.1191/0309133304pp401ra>
- Hanshaw, M. N., & Bookhagen, B. (2014). Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: Status of the cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru. *Cryosphere*, 8(2), 359–376. <https://doi.org/10.5194/tc-8-359-2014>
- Hardy, D. R., Vuille, M., & Bradley, R. S. (2003). Variability of snow accumulation and isotopic composition on Nevado Sajama, Bolivia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(22). <https://doi.org/10.1029/2003jd003623>
- Hardy, D. R., Vuille, M., Braun, C., Keimig, F., & Bradley, R. S. (1998). Annual and Daily Meteorological Cycles at High Altitude on a Tropical Mountain. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(9), 1899–1914. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079%3C1899:AADMCA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079%3C1899:AADMCA%3E2.0.CO;2)
- Haylock, M. R., Peterson, T. C., Alves, L. M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y. M. T., Báez, J., Barros, V. R., Berlato, M. A., Bidegain, M., Coronel, G., Corradi, V., García, V. J., Grimm, A. M., Karoly, D., Marengo, J. A., Marino, M. B., Moncunill, D. F., Nechet, D., Quintana, J., Vincent, L. A. (2006). Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, 19(8), 1490–1512. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JCLI3695.1>
- Kaser, G., & Osmaston, H. (2002). *Tropical Glaciers* (1a ed.). Cambridge University Press.
- Kirkbride, M. P., & Deline, P. (2013). The formation of supraglacial debris covers by primary dispersal from transverse englacial debris bands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(15), 1779–1792. <https://doi.org/10.1002/esp.3416>
- Laubacher, Gerard. (1978). Géologie de la Cordillère orientale et de l'Altiplano au nord et nord-ouest du lac Titicaca (Pérou) [Book]. ORSTOM.
- Li, V. (2016). The Uranium Mineralization of the Macusani District, Southeast Peru: Mineralogy, Geochemistry, Geochronology and Ore-Genetic Model [Degree of Doctor of Philosophy]. Queen's University at Kingston.
- Machaca Condori, A. D. (2023). Estudio de generación de mapas climáticos para un periodo actual y futuro de acuerdo a escenarios de cambio climático del IPCC para el ámbito del glaciar Quelccaya.
- Mark, B. G., & Seltzer, G. O. (2005). Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962–1999): spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quaternary Science Reviews*, 24(20–21), 2265–2280. <https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2005.01.003>

- Mark, B. G., Seltzer, G. O., Rodbell, D. T., & Goodman, A. Y. (2002). Rates of deglaciation during the last glaciation and holocene in the Cordillera Vilcanota-Quelccaya Ice Cap Region, southeastern Perú. *Quaternary Research*, 57(3), 287–298. <https://doi.org/10.1006/qres.2002.2320>
- Newell, N. D. (1949). *Geology of the Lake Titicaca Region, Peru and Bolivia*. Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/MEM36>
- Perry, L. B., Seimon, A., Andrade-Flores, M. F., Endries, J. L., Yuter, S. E., Velarde, F., Arias, S., Bonshoms, M., Burton, E. J., Winkelmann, I. R., Cooper, C. M., Mamani, G., Rado, M., Montoya, N., & Quispe, N. (2017). Characteristics of Precipitating Storms in Glacierized Tropical Andean Cordilleras of Peru and Bolivia. *Annals of the American Association of Geographers*, 107(2), 309–322. <https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1260439>
- Schmidt, K. M., & Montgomery, D. R. (1996). Rock mass strength assessment for bedrock landsliding. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2(3), 325–338. <https://doi.org/https://doi.org/10.2113/gseegeosci.11.3.325>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2012). *Caracterización climática de las regiones Apurímac y Cusco*. Serie de investigación regional # 1. www.paccperu.org.pe
- Soberón, D., Rodríguez, R., Choquehuanca, S., & Gómez, W. (2022). Geología del cuadrángulo de Corani (hojas 28u1, 28u2, 28u3, 28u4). *Boletín, Serie L: Actualización Carta Geológica Nacional (Escala 1:50 000)*, 47, 1–111.
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Davis, M. E., & Brecher, H. H. (2011). Tropical glaciers, recorders and indicators of climate change, are disappearing globally. *Annals of Glaciology*, 52(59), 23–34. <https://doi.org/https://doi.org/10.3189/172756411799096231>
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E. S., Davis, M. E., Zagorodnov, V. S., Howat, I. M., Mikhailenko, V. N., & Lin, P. N. (2013). Annually Resolved Ice Core Records of Tropical Climate Variability over the Past ~1800 Years. *Science*, 340(6135), 945–950. <https://doi.org/10.1126/science.1234210>
- Thompson, L. G., Yao, T., Mosley-Thompson, E., Davis, M. E., Henderson, K. A., & Lin, P.-N. (2000). A High-Resolution Millennial Record of the South Asian Monsoon from Himalayan Ice Cores. *Science*, 289(5486), 1916–1919. <https://doi.org/https://doi.org/10.1126/science.289.5486.1916>
- Vilca, O. (2022). *Informe Técnico No A08*. Laguna Ananta Cucho. Cordillera Vilcanota. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Cusco.
- Vilca, O. (2025). *Estudio de la dinámica de los glaciares en la capa de hielo Quelccaya*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Cusco.
- Vuille, M., Bradley, R. S., & Keimig, F. (2000). Climate Variability in the Andes of Ecuador and its Relation to Tropical Pacific and Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies. *Journal of Climate*, 13(14), 2520–2535.
- Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R., Lavado Casimiro, W. S., & Cáceres, B. (2015). Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research*, 120(9), 3745–3757. <https://doi.org/10.1002/2015JD023126>
- Vuille, M., Kaser, G., & Juen, I. (2008). Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global and Planetary Change*, 62(1–2), 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.11.003>

CAPÍTULO 4

EPS SEDACUSCO. (2022). *Memoria anual 2021*. <https://www.sedacusco.com/transparencia/memoria/2021.pdf>

Mercer, J. H., & Palacios, O. (1977). Radiocarbon dating of the last glaciation in Peru. *Geology*, 5(10), 600–604. [https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1977\)5<600:RDOTLG>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0091-7613(1977)5<600:RDOTLG>2.0.CO;2)

Thompson, L. G., & Mosley-Thompson, E. (1987). Evidence of Abrupt Climatic Change During the Last 1500 Years Recorded in Ice Cores from the Tropical Quelccaya Ice Cap, Peru. En L. D. Berger W. H. and Labeyrie (Ed.), *Abrupt Climatic Change: Evidence and Implications* (pp. 99–110). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3993-6_9

Vila, R. (2025). Estimación del volumen de agua de lagunas glaciares en el entorno del Quelccaya.

Vilca, O. (2025a). *Estudio de la dinámica de los glaciares en la capa de hielo Quelccaya*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Cusco.

Vilca, O. (2025b). *Estudio para la estimación de la reserva de agua en la capa de hielo Quelccaya*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Cusco.

CAPÍTULO 5

AMEC Perú. (2012). *Línea base. En Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Corani* (p. 953). Bear Creek Mining Company.

Erschbamer, B. (2007). Winners and Losers of Climate Change in a Central Alpine Glacier Foreland. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 39(2), 237-244.

Erschbamer, B., Kiebacher, T., Mallaun, M., & Unterluggauer, P. (2009). Short-term signals of climate change along an altitudinal gradient in the South Alps. *Plant Ecology*, 202(1), 79-89. <https://doi.org/10.1007/s11258-008-9556-1>

Fauna Nativa Consultores. (2019). *Clasificación de especies: Liolaemus signifer*. https://clasificacionespecies.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/10/Liolaemus_signifer_15RCE_FINAL.pdf

Ficetola, G. F., Marta, S., Guerrieri, A., Cantera, I., Bonin, A., Cauvy-Fraunié, S., Ambrosini, R., Caccianiga, M., Anthelme, F., Azzoni, R. S., Almond, P., Alviz Gazitúa, P., Ceballos Lievano, J. L., Chand, P., Chand Sharma, M., Clague, J. J., Cochachín Rapre, J. A., Compostella, C., Encarnación, R. C., Carteron, A. (2024). The development of terrestrial ecosystems emerging after glacier retreat. *Nature*, 632(8024), 336-342. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07778-2>

Gonzáles, P., León, B., Cano, A., & Jørgensen, P. M. (2018). Vascular flora and phytogeographical links of the Carabaya Mountains, Peru. *Revista Peruana de Biología*, 25(3), 191-210. <https://doi.org/10.15381/rpb.v25i3.15228>

Gonzáles, P., Navarro, E., Chanco, M., & Cano, A. (2015). *Nototriche carabayensis* (Malvaceae), a new species from the high Andes of Peru. *Darwiniana*, 3(1), 108-113. <https://doi.org/10.14522/darwiniana.2015.31.645>

Grizzetti, B., Lanzanova, D., Liqueste, C., Reynaud, A., & Cardoso, A. C. (2016). Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environmental Science and Policy*, 61, 194-203. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.008>

Hardy, S., & Pantoja-Maggi, V. (2024). Glacier Finch (*Idiopsar speculifer*) . En T. S. Schulenberg & B. K. Keeney (Eds.), *Birds of the World (version 2.0)*. Cornell Lab of Ornithology. <https://doi.org/https://doi.org/10.2173/bow.wwdfin1.02>

Hofstede, R., Llambí, L. D., Peralvo, M., Beltrán, K., Calispa, M., & Mosquera, G. (2023). El cambio climático en el páramo del Ecuador. *En Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro* (pp. 324-352). USFQ Press. <https://doi.org/10.18272/usfqpress.71.c268>

Ibarra, J. M. N. (2017). La vegetación, el agua azul y el agua verde: El papel de los bosques en el ciclo del agua. *Ciencia en Desarrollo*, 8(1).

INSIDEO. (2017). Segundo Informe Técnico Sustentatorio del Proyecto Corani.

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2023). *Memoria descriptiva: Inventario nacional de bofedales*. <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/61d605a3-5bba-4357-a1fc-a716d595af8a>

Jørgensen, P. M., Ulloa, C., León, B., León-Yáñez, S., Beck, S. G., Nee, M., Zarucchi, J. L., Celis, M., Bernal, R., & Gradstein, R. (2011). Regional patterns of vascular plant diversity and endemism (S. K. Herzog, R. Martínez, P. M. Jørgensen, & H. Tiessen, Eds.; pp. 192-203). SCOPE, MacArthur Foundation & IAI. <https://www.researchgate.net/publication/286336685>

Luza, M., Mendoza, A., Tupayachi, A., & Postigo, J. (2024). *Plantas de la Zona Periglacial del Quelccaya hasta los Ecosistemas de Bofedal. Guía # 1641*. Field Museum. <https://fieldguides.fieldmuseum.org>

Ministerio del Ambiente. (2015). *Mapa nacional de cobertura vegetal. Memoria descriptiva*. En Memoria descriptiva. Ministerio del Ambiente. <https://www.gob.pe/minam>

Ministerio del Ambiente. (2019). *Mapa nacional de ecosistemas del Perú*. Memoria descriptiva (1era ed.). Ministerio de Medio Ambiente. <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru>

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

Smith, T. M., & Smith, R. L. (2007). *Ecología* (M. Martín-Romo, Ed.; 6.a ed.). Pearson Educación.

Vilcanqui M, H., Mendoza B, W., & Vilcanqui M, R. (2010). Chaccu de vicuñas en los Andes. Captura y esquila de la vicuña (Vicugna vicugna). *LEISA Revista de agroecología*, 26, 33-36. <https://leisa-al.org/web/wp-content/uploads/vol26n1.pdf>

Young, K. R. (2023). Dinamismo y adaptaciones en los paisajes posglaciares andino: Implicaciones para la sociedad. En Pontificia Universidad Católica del Perú (Ed.), *Pensando la región Andina: diálogos diálogos interdisciplinarios sobre desigualdades y desarrollo* (pp. 541-556). <https://d-nb.info/1325558842/34#page=541>

CAPÍTULO 6

Autoridad Nacional del Agua. (2020). Lagunas: Reservas de agua dulce en Áncash.

Centro Nacional de Estimación, P. y R. del R. de D. (2014). Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales.

Dávila, J. (1995). *Diccionario Geológico* (2.a ed.). Universidad Nacional de Ingeniería.

Figueruelo, J. E., & Dávila, M. M. (2004). Química Física del Ambiente y de los Procesos Medioambientales. Editorial Reverté.

Folke, C., Hahn, T., Olsson, P., & Norberg, J. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 30(1), 441-473.

Gutiérrez, E. M. (2008). *Geomorfología* (M. Martín-Romo, Ed.). Pearson Educación S.A.

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2017). *Informe de la situación de los glaciares y ecosistemas de montaña en el Perú*.

Lugo, J. (2011). *Diccionario geomorfológico* (1.a ed.). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.

Ministerio del Ambiente. (2019). Lineamientos para la formulación de proyectos de inversión en las tipologías de ecosistemas, especies y apoyo al uso sostenible de la biodiversidad. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/319848/RM_N__178-2019.pdf?v=1560174703

Murray, C., & Marmorek, D. (2003). Adaptive management and ecological restoration. *Ecological Restoration of Southwestern Ponderosa Pine Forests*, 2, 417-428.

Naciones Unidas. (1992a). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

Naciones Unidas. (1992b). *Convenio sobre la Diversidad Biológica*. <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf>

Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Glosario hidrológico internacional* (3.a ed.). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization; World Meteorological Organization.

Rojas, O. (2008). *Tiempo Geológico*. <http://www.udec.cl/~ocrojas>

Servicio Nacional de Geología y Minería. (s. f.). *Glosario ilustrado para la comprensión básica de peligros geológicos*. En Servicio Nacional de Geología y Minería (pp. 1-4).

Smith, T. M., & Smith, R. L. (2007). *Ecología* (M. Martín-Romo, Ed.; 6.a ed.). Pearson Educación.

Strahler, A. N., & Strahler, A. H. (1994). *Geografía Física: Vol. 5 reimp.* (3.a ed.). Ediciones Omega.

GUÍA: RUTAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y GEOPARQUE DEL GLACIAR QUELCCAYA

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2022). *Guía Rutas del Cambio Climático y Geoparque del Glaciar Quelccaya* (1st ed.). Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. www.gob.pe/inaigem

SIGLAS Y ABREVIACIONES

±	Más menos	INAIGEM	Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña
>	Mayor que	INGEOMIN	Instituto Geológico Minero
~	Aproximadamente	kW	Kilovatios
3D	Tridimensional	m s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
a.C.	Antes de Cristo	m/año	Metros por año
ANA	Autoridad Nacional del Agua	Ma	Millones de años
COFOPRI	Organismo de Formalización de la Propiedad Informal	MHz	Megahercio
d.C.	Después de Cristo	MIDAGRI	Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego
D.S.	Decreto Supremo	MINAM	Ministerio del Ambiente
ELA	Línea de equilibrio glaciar, por sus siglas en inglés	°C	Grados centígrados
ENOS	El Niño - Oscilación del Sur	PEA	Población económicamente activa
et al.	y otros	SERNANP	Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado
etc.	Etcétera	sp	Especie
GNSS	Sistema Global de Navegación por Satélite	spp.	Especies
GPR	Radar de Penetración Terrestre	STD	Desviación estándar
GPS	Sistema de Posicionamiento Global	UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
gr.	Grupo, usada en taxonomía para denotar complejos de especies cercanamente relacionadas cuyos límites están en revisión.	Vol.	Volumen
ha	Hectáreas	vs.	Versus
Hm³	Hectómetro cúbico	W	Vatios
IGN	Instituto Geográfico Nacional del Perú	W/m²	Vatios por metro cuadrado

GLOSARIO

Ablación: Proceso de meteorización (erosión) producida sobre rocas o materiales por el movimiento de las masas glaciares, debido a su evaporación y fusión. Es solo uno de los procesos de erosión glaciár (Dávila, 1995).

Albedo: Expresa la cualidad de reflexión de una determinada superficie terrestre y se define como la relación entre la intensidad de la luz reflejada y la incidente (Figueroa & Dávila, 2004).

Aluvi3n: Tipo de remoci3n en masa caracterizado por flujo de barro, lodo y/o detritos (fragmentos de roca). Es una oleada r3pida con poder destructivo, debido al material particulado que puede transportar, desde sedimentos finos a bloques angulosos de rocas de mediano a gran tama1o, residuos domiciliarios y vegetaci3n (Servicio Nacional de Geolog3a y Miner3a, s/f).

Avalancha de hielo: Movilizaciones r3pidas de hielo y rocas, frecuentes en monta1as de zonas templadas, que se desarrollan en laderas con pendientes de 25 a 50°. Estas se producen por una rotura que crea nuevas grietas y desprendimientos de bloques de hielo que ocurren semanas antes del evento (Gutierrez, 2008).

Batimetr3a: Es el proceso de medir profundidades de un cuerpo de agua para determinar el relieve del fondo, en este caso particular, de lagunas glaciares (Autoridad Nacional del Agua, 2020).

Biodiversidad: Medida de los diferentes tipos de organismos en una regi3n determinada (Smith & Smith, 2007).

Cambio clim3tico: La Convenci3n Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Clim3tico, en su art3culo 1, lo define como "cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composici3n de la atm3sfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante per3odos de tiempo comparables" (Naciones Unidas, 1992a).

Carn3voro: Organismo que se alimenta de tejido animal (Smith & Smith, 2007).

Cenozoica: Era que transcurre desde hace 65 millones de a1os hasta nuestro presente. Esta se divide en los periodos de Cuaternario y Terciario, que a su vez se dividen en 3pocas (Rojas, 2008).

Cordillera: En geomorfolog3a, t3rmino de uso internacional que se aplica a una cadena monta1osa extensa o a dos o m3s, paralelas, con las que se asocian valles, cuencas, planicies, mesetas, etc. (Lugo, 2011).

Cuaternario: Último periodo de la era Cenozoica, comprendido desde hace 1.8 millones de a1os hasta la actualidad, extendiéndose hasta la actualidad (Rojas, 2008).

Cuenca: Zona geogr3fica delimitada por un l3mite topogr3fico bien definido (parte aguas), donde las condiciones hidrol3gicas generan que el agua se concentre en un punto particular a partir del cual la cuenca se drena (Ministerio del Ambiente, 2019a).

Deglaciaci3n: Proceso de deshielo, fusi3n y extinci3n de los glaciares. Se produce por un incremento de la temperatura media del aire y el consecuente cambio clim3tico (Lugo, 2011).

Deslizamiento: Movimiento lento de una masa de material sobre otra, ambas separadas por un plano de fricci3n. Su constituci3n puede ser de suelo, derrubios o roca. La porci3n que desliza es un bloque que mantiene sus caracter3sticas originales. No se encuentra saturado de agua, a diferencia de lo que ocurre en el plano de fricci3n, y puede fragmentarse en bloques menores (A. A. Collin, 1846; mencionado por Lugo, 2011).

Domo: Elevaci3n en forma de arco redondeado, m3s o menos isom3trica. Su longitud es igual a la anchura, o la supera levemente. Las dimensiones del domo pueden ser muy diversas; en secci3n transversal alcanza algunas decenas de kil3metros. Las capas que lo cubren se inclinan hacia todos lados, con 3ngulos variados (Lugo, 2011).

Ecosistema de monta1a: En el Per3, los ecosistemas de monta1a est3n ubicados sobre los 1500 m s.n.m. distribuidos en la cordillera de los Andes, y ocupan un 20% de la superficie del territorio nacional. Se reconocen cinco tipos principales de ecosistemas: bofedales, bosques andinos relictos, bosques montanos, pajonales o pastizales andinos y matorrales arbustivos. Todos estos cumplen con funciones de provisi3n de servicios ecosist3micos. (Instituto Nacional de Investigaci3n en Glaciares y Ecosistemas de Monta1a, 2017).

Ecosistema: Seg3n el Convenio sobre la Diversidad Biol3gica (Naciones Unidas, 1992b), es un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales, microorganismos y su medio no viviente. Todos estos interact3an como una unidad funcional.

El Niño Oscilación Sur: Evento global causado por interacción a gran escala entre el océano y la atmósfera (Smith & Smith, 2007). Nombre oficial de El Niño.

El Niño: Suceso que consiste en el cese de la afluencia de las aguas tibias procedentes de las profundidades oceánicas que frecuentan las costas del Perú. Su denominación se debe a que suele aparecer cada pocos años, durante las navidades cristianas (Strahler & Strahler, 1994).

Endémico: Organismo u especie restringida a una determina región (Smith & Smith, 2007).

Erosión: Conjunto de procesos mediante los cuales se desprenden y movilizan fragmentos del suelo o de materiales sueltos, ya sean del sustrato original, de depósitos volcánicos o de otros orígenes superficiales no consolidados, como resultado de la acción del agua, el viento o el hielo (Lugo, 2011).

Falla: Plano o zona de ruptura en el sustrato rocoso, a lo largo de la cual se produce un desplazamiento. Las dimensiones de los desplazamientos varían de algunos centímetros de longitud hasta las de fallas profundas que cortan toda la corteza terrestre (Dennis, 1967; mencionado por Lugo, 2011).

Gestión adaptativa: Enfoque de gestión que promueve la participación de múltiples niveles de gobernanza en la toma de decisiones. Los que participan pueden ser desde actores locales hasta autoridades regionales, en el marco de la autonomía y coordinación con objetivos comunes. Se basa en la flexibilidad institucional para responder a las presiones humanas y reducir incertidumbres mediante el aprendizaje continuo. Esto se logra a través del monitoreo constante de los impactos y la eficacia de las intervenciones, ajustando las acciones conforme al comportamiento del sistema ecológico de referencia (Folke et al., 2005; Murray & Marmorek, 2003).

Glaciar: Masa natural de hielo y firn, formada por precipitaciones atmosféricas y con desplazamiento por efecto de la gravedad. Los glaciares se presentan en las regiones de tierra firme, poseen movimiento y son de permanencia prolongada (Lugo, 2011).

Hábitat: Lugar donde vive una planta o animal (Smith & Smith, 2007)

Indicador: Expresión cuantitativa y/o cualitativa que permite observar, describir y evaluar los diferentes aspectos de una situación actual, formular situaciones deseadas o comparar una situación común con relación a una situación deseada, lo que ayuda en la toma de decisiones (Centro Nacional de Estimación, 2014).

La Niña: Fenómeno que consiste en el enfriamiento de la superficie del océano Pacífico ecuatorial, contrario de lo que ocurre con El Niño. A menudo, pero no siempre, La Niña es una continuación de El Niño y viceversa (Lugo, 2011).

Lapilli: Material piroclástico (piro = fuego, caliente; clastos = fragmentos) lanzado por los volcanes eruptivos. El tamaño de los fragmentos es de 5 mm a 5 cm. Su forma puede ser angulosa o redondeada. Los lapilli aparecen en los conos volcánicos, junto a cenizas, bloques y bombas (Dávila, 1995).

Lengua glaciar: Porción móvil de un glaciar montañoso que se extiende a menor elevación que la línea de las nieves permanentes. Por lo general ocupa la zona de ablación del glaciar que fluye a lo largo de un valle. Puede alcanzar longitud de algunos kilómetros, algunas veces de unos metros (Lugo, 2011).

Línea de equilibrio de nieve: Línea o zona de un glaciar en la que la ablación anual equilibra la acumulación anual (Organización Meteorológica Mundial, 2012)., En esa franja, lo que se acumula en forma de nieve durante el año es igual a lo que se pierde por derretimiento u otros procesos. Marca el punto de balance entre ganancia y pérdida de masa glaciar.

Mesozoico: Era transcurrida desde 248 a 65 millones de años atrás. Está formada por tres periodos: el Triásico, el Jurásico y el Cretácico, era donde vivieron los dinosaurios (Rojas, 2008).

Microclima: Clima a una escala muy local, que difiere del clima general de la zona. Influye sobre la presencia y distribución de los organismos (Smith & Smith, 2007).
Monitoreo: Proceso de observación y seguimiento del desarrollo y variaciones de un fenómeno, ya sea instrumental o visualmente (Centro Nacional de Estimación, 2014).

Morfología: Término general que indica la configuración de la superficie del terreno como un factor fundamental en la formación del suelo. Comprende la pendiente del terreno, la orientación, así como el relieve (Strahler & Strahler, 1994).

Morrenas: Conjunto de detritos rocosos transportados o depositados por un glaciar (Lugo, 2011).

Paleozoico: Era comprendida entre el Pre cambriano infrayacente y el Mesozoico suprayacente. Se le denomina también Era Primaria. Los límites son la Revolución Kilarney en el piso y la Revolución Apalachiana en el techo. El Paleozoico tuvo una duración de 300 millones de años y comenzó hace 500 millones de años (Dávila, 1995).

Peligro: Probabilidad de que un fenómeno, potencialmente dañino, de origen natural o inducido por la acción humana, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definidos (Centro Nacional de Estimación, 2014).

Pequeña edad de hielo: Periodo climático comprendido aproximadamente entre los años 1550 y 1860, en el que se produjo un avance de los glaciares de montaña. Hubo intervalos severos como el de principios del siglo XVII, cuando los glaciares tuvieron su máximo avance (Lugo, 2011).

Resiliencia: Capacidad de las personas, familias y comunidades, entidades públicas y privadas, las actividades económicas y las estructuras físicas, para asimilar, absorber, adaptarse, cambiar, resistir y recuperarse del impacto de un peligro o amenaza; así como de incrementar su capacidad de aprendizaje y recuperación de los desastres pasados para protegerse mejor en el futuro (Centro Nacional de Estimación, 2014).

Retroceso glaciar: Desplazamiento de la margen de los glaciares de la periferia hacia el centro. Se produce en el caso de que la ablación supere a la alimentación. Incluye el adelgazamiento del hielo (Lugo, 2011).

Riesgo: Probabilidad de que ocurran daños y víctimas a causa de fenómenos naturales (Lugo, 2011).

Sucesión primaria: Desarrollo de la vegetación que se inicia en un nuevo lugar que nunca antes había sido colonizado por seres vivos (Smith & Smith, 2007).

Tobas: Depósito formado por materiales arrojados por erupciones volcánicas, tales como ceniza, arena y lapilli; que después son compactados y cementados (Lugo, 2011).

Topografía: Estructura física del terreno (Smith & Smith, 2007).

Turbera: Humedal caracterizado por una acumulación de material no consolidado de materia orgánica sin descomponer o ligeramente descompuesta en condiciones de humedad excesiva (Smith & Smith, 2007).

CRÉDITOS FOTOGRÁFICOS

Oscar Vilca

Portada y contraportada, Pág. 2, 12, 15, 16, 21, 26, 29, 36, 38, 60, 65, 69(1), 78(1,2), 90, 94(4), 99, 102, 104, 106(1,2), 113, 114, 117, 118, 119, 120(1,2,3,4,5), 121(1,2,3,4), 122, 127, 131, 133(2,3), 135, 137, 139, 140, 141(1,2), 142, 143, 144, 163(1,2)

Renny Diaz

Pág. 4, 6, 11, 14, 17, 18, 19, 22, 24, 30, 34, 43(2), 45 (2,4), 62, 63, 64, 66, 67, 69(2), 70, 71, 72, 73(1,3), 83, 146, 148(1), 149(4), 150(2,3,4), 151, 152, 155, 158, 160, 162(1), 164, 165, 170(2), 167, 175, 176, 178, 179, 181, 185, 186, 187, 189, 190, 192, 193, 194

Ricardo Vila

Pág. 33, 71, 73(2), 75, 82, 84 (1, 2), 85 (1, 2), 87(1,2), 92, 93(1,2,3), 95, 96, 98(1,2), 110, 126, 133 (1), 191

Miguel Luza

Pág. 148 (2,3), 149(1,2,3), 150(1), 153(1,2), 154(1,2), 156(4)

Lonnie Thompson

Pág. 40, 41, 42, 43(1), 44, 45(1,3), 46, 47, 94(1,2,3)

Carlos Lazo

Pág. 161, 162(2), 166, 169, 171, 173

Bruss Huachaca

Pág. 84 (3), 85 (3), 97

Angela Mendoza

Pág. 148 (4), 156(1, 2, 3)

Patricia Barros

Pág. 13, 25

Luis Quispe

Pág. 76, 138

Gimi Mamani

Pág. 170(1)

AGRADECIMIENTOS

Este libro ha sido posible gracias al compromiso, conocimiento y generosidad de muchas personas e instituciones que han acompañado al INAIGEM en su labor científica en el glaciar Quelccaya.

Un agradecimiento muy especial a todo el equipo técnico de la Oficina Desconcentrada de la Macro Región Sur (ODMRS) del INAIGEM, cuyos trabajos de campo han sido fundamentales para la recolección sistémica de datos y análisis. Han servido como la principal fuente de información para la elaboración del presente libro. El equipo está integrado por Teodulfo Bernal, Gabriela Robles, Cristian Alvarez, Nayda García, Carla Quispe, Giacomo Velazco, Moisés Aníbal Alvarez y Jorge Bellido.

Se agradece también al Instituto de Cambio Climático de la Universidad de Maine, Estados Unidos; en especial a Paul Andrew Mayewski, director del CCI, y a Mariusz Potocki. También extendemos nuestro saludo al Proyecto MOTICE y a sus integrantes Ramón Pellitero Ondicol y José Úbeda Palenque por su colaboración y valiosa experiencia en glaciología tropical. Asimismo, a los investigadores Baker Perry, Gino Cassasa Rogazinski y Jefferson Cardia Simões, a Julio Postigo de la Universidad de Indiana, cuyo conocimiento ha enriquecido los estudios sobre el Quelccaya.

Sin duda, todo este esfuerzo no hubiera sido posible sin el apoyo continuo de las familias y personas de las comunidades de Phinaya (Cusco), Quelccaya y Chimboya (Puno); así como de las autoridades de los centros poblados de Quelccaya y Phinaya, y las rondas campesinas de Phinaya, Quelccaya y Chimboya. A todos ellos, quienes con gran generosidad brindaron su hospitalidad y compartieron sus saberes locales durante las expediciones científicas de INAIGEM, se les extiende un profundo agradecimiento. Su acompañamiento ha sido esencial para hacer posibles los trabajos de campo en un entorno tan exigente.

Equipo técnico de la ODMRS del INAIGEM





LISTADO DE FIGURAS

Figura 2-1. Características generales de las investigaciones científicas sobre el Quelccaya..... 48	Figura 4-8. Distribución de pendientes y de las orientaciones sobre la superficie del Quelccaya..... 114
Figura 2-2. Evolución del número de publicaciones científicas..... 49	Figura 4-9. Zonas de acumulación y ablación estimada en el Quelccaya..... 116
Figura 2-3. Distribución geográfica de publicaciones según la afiliación de los autores principales..... 50	Figura 4-10. La línea de nieve alcanzó la cumbre del Quelccaya y expone un gran porcentaje de la capa de hielo a condiciones de ablación. Se observa la huella de la línea de nieve en el glaciar Killa Wasi..... 118
Figura 2-4. Línea de tiempo de los temas abordados en las investigaciones..... 51	Figura 4-11. Variación temporal de la línea de nieve en el Quelccaya entre los años 2000 y 2024, que evidencia la dinámica de los últimos 24 años..... 123
Figura 2-5. Distribución de los temas abordados en las investigaciones..... 52	Figura 4-12. Espesores medidos de la profundidad del hielo en el Quelccaya..... 125
Figura 3-1. Perfil topográfico longitudinal del nevado Ausangate al nevado Allin Capac..... 74	Figura 4-13. Brigada de campo para la medición de espesores de hielo..... 127
Figura 3-2. Modelo de elevación digital creado con imágenes satelitales y drones..... 77	Figura 4-14. Profundidad del espesor del hielo en el Quelccaya..... 128
Figura 3-3. Fusión de imágenes satelitales y ortomosaicos obtenidos con drones para cubrir vacíos de información en el Quelccaya..... 80	Figura 4-15. Delimitación de glaciares en el Quelccaya..... 130
Figura 3-4. Perfil geológico local..... 89	Figura 4-16. Brigada de campo recuperando testigos de hielo en colaboración INAIGEM – Instituto de Cambio Climático de la Universidad de Maine..... 131
Figura 3-5. Geología local del glaciar..... 91	Figura 4-17. Tipos de lagunas glaciares..... 132
Figura 4-1. Reconstrucción del avance máximo del Quelccaya en la Pequeña Edad de Hielo..... 105	Figura 4-18. Lagunas de origen glaciar en el Quelccaya..... 134
Figura 4-2. Fragmentación del gran casquete de hielo al 2024..... 107	Figura 4-19. Distribución del volumen de reserva de agua en las lagunas glaciares..... 136
Figura 4-3. Superficie glaciar en la capa de hielo Quelccaya entre 1984 y 2024..... 108	Figura 5-1. Distribución de la vegetación clave en el entorno glaciar..... 157
Figura 4-4. Retroceso glaciar del casquete Quelccaya durante los años 1984 y 2024..... 109	Figura 5-2. Esquema de los equipos empleados para el estudio del microclima de las zonas de nidificación del fringilo glaciar..... 172
Figura 4-5. Monitoreo de los cambios del glaciar, desde la cima del domo Qoyllur Puñuna..... 110	Figura 6-1. Cronología de los avances científicos realizados en el Quelccaya..... 180
Figura 4-6. Delimitación de glaciares en el Quelccaya..... 111	
Figura 4-7. Distribución, según altitud, de la superficie de la capa de hielo del Quelccaya..... 112	

LISTADO DE TABLAS

Tabla 4-1.	Volumen de agua almacenada en la capa de hielo Quelccaya.....	126
Tabla 4-2.	Resultados del volumen de hielo modelado por cada glaciar que conforman el Quelccaya.....	129
Tabla 4-3.	Volumen de agua en las lagunas glaciares.....	135
Tabla 4-4.	Volumen de agua en las lagunas con superficie mayores a 100 000 m ²	136
Tabla 4-5.	Volumen de agua en las lagunas glaciares con una superficie mayor a 3000 m ²	137
Tabla 5-1.	Estado de conservación de las aves en el Quelccaya.....	168
Tabla 5-2.	Hallazgos sobre el fringilo glaciar.	175

IMPRESO GRACIAS AL FINANCIAMIENTO DE



**Universidad
Andina
del Cusco**

Sabiduría que vive en ti



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM

INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA



**Universidad
Andina
del Cusco**

Sabiduría que vive en ti