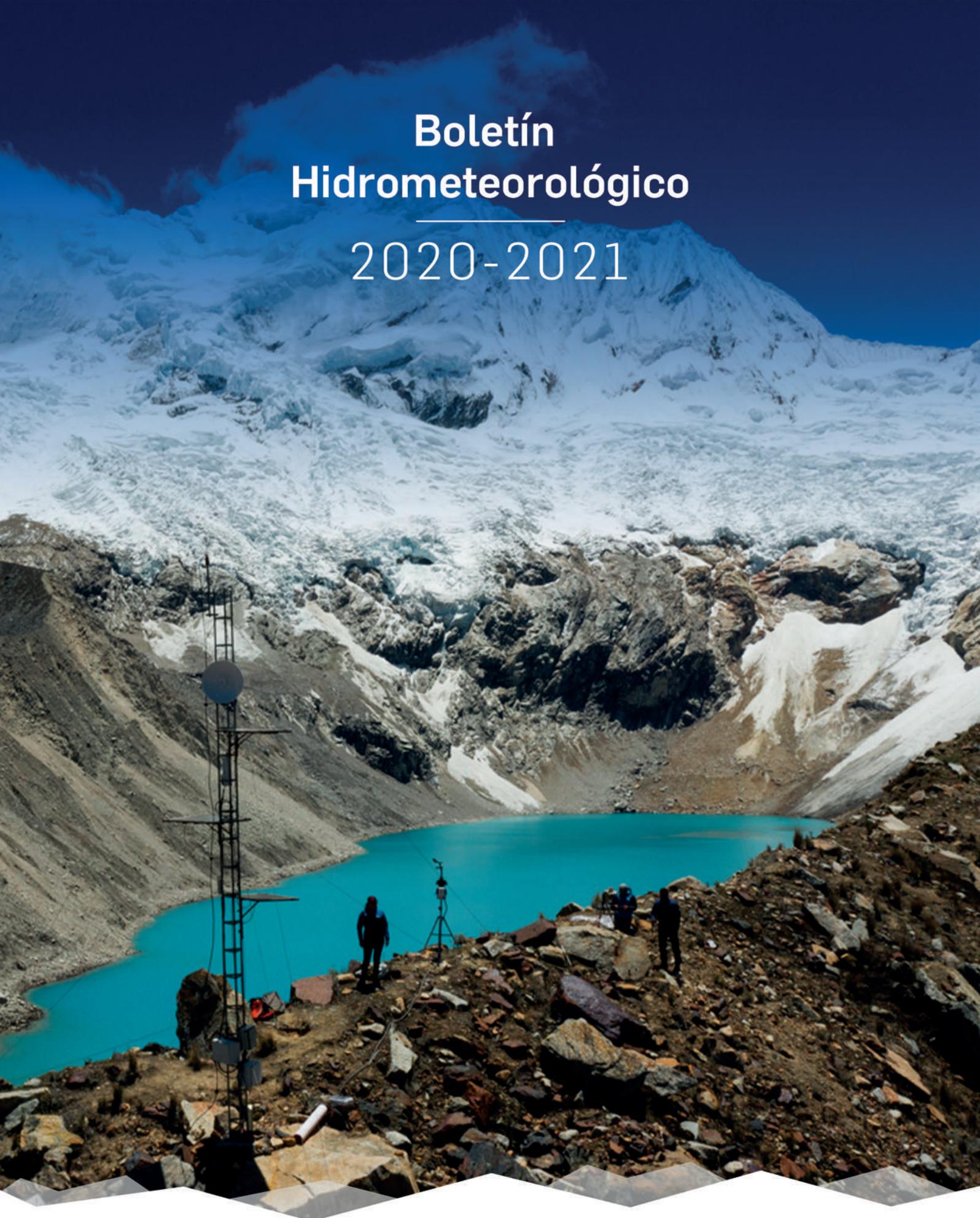


# Boletín Hidrometeorológico

---

## 2020-2021



**INAIGEM**  
INSTITUTO NACIONAL DE  
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y  
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

# Presentación

El presente Boletín muestra mecanismos que han impactado en el clima del año hidrológico 2020-2021, definiendo la palabra mecanismo a las condiciones o dinámica atmosférica que causan cambios anómalos. La palabra clima es entendida como las condiciones atmosféricas de una cierta región, mientras que la palabra sistema climático se refiere al conjunto de interacciones entre la litósfera, hidrósfera, biósfera, atmósfera y criósfera. Así, en el presente Boletín solo se muestran los datos y análisis del clima, y evaluación y detección de cambios en los componentes del sistema climático de la hidrósfera y atmósfera, principalmente.

En ese sentido, los cambios en precipitación (lluvia, nieve o mixta) están impactando fuertemente las zonas andinas, produciendo en el periodo 2020-2021 escasez del recurso hídrico en una zona tan vulnerable como es la Cordillera Blanca (CB). Lo más notorio es como los cambios en flujos de aire seco proveniente desde el oeste, de las costas del Océano Pacífico, vienen causando gran impacto en la reducción en cantidad de precipitación en los Andes. En una escala estacional, el inicio de precipitación intensa se atrasó y terminó tarde, inclusive con precipitaciones significativas para el periodo de estiaje (de junio a agosto del 2021). Además, los valores de temperatura diurna y nocturna fueron más cálidos que otros años hidrológicos, lo cual ha traído una ligera reducción en el rango diurno de temperatura.

Adicionalmente, se muestra un análisis del impacto de la dinámica sinóptica en épocas de precipitación y ausencia de la misma para la CB. Entre las mayores conclusiones, se observa que las precipitaciones son dadas cuando se tiene vientos del este en niveles altos (200hPa) y medios (500hPa), y la humedad específica se encuentra presente en la atmósfera sobre las cordilleras. Es decir, la circulación a altos niveles no es suficiente para asegurar la precipitación en la CB, y un condicionante importante es la humedad específica necesaria para la generación de actividad convectiva durante el verano austral.

El presente documento fue elaborado por el grupo de trabajo de la Subdirección de Información y Análisis (SDIA), perteneciente a la Dirección de Información y Gestión del Conocimiento (DIGC), del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM).

## Edición / Autores

Subdirector de Información y Análisis, **Christian Yarleque**

Especialista en Meteorología, **Susan Coaguila Agurto**

Especialista en Geomática, **Stephany Callañaupa Gutiérrez**

Practicante en el área de Meteorología, **Gustavo Adolfo Limay Gonzales**

## Diseño

Técnico en Publicaciones, **Joan Ramírez Romero**

# Indice

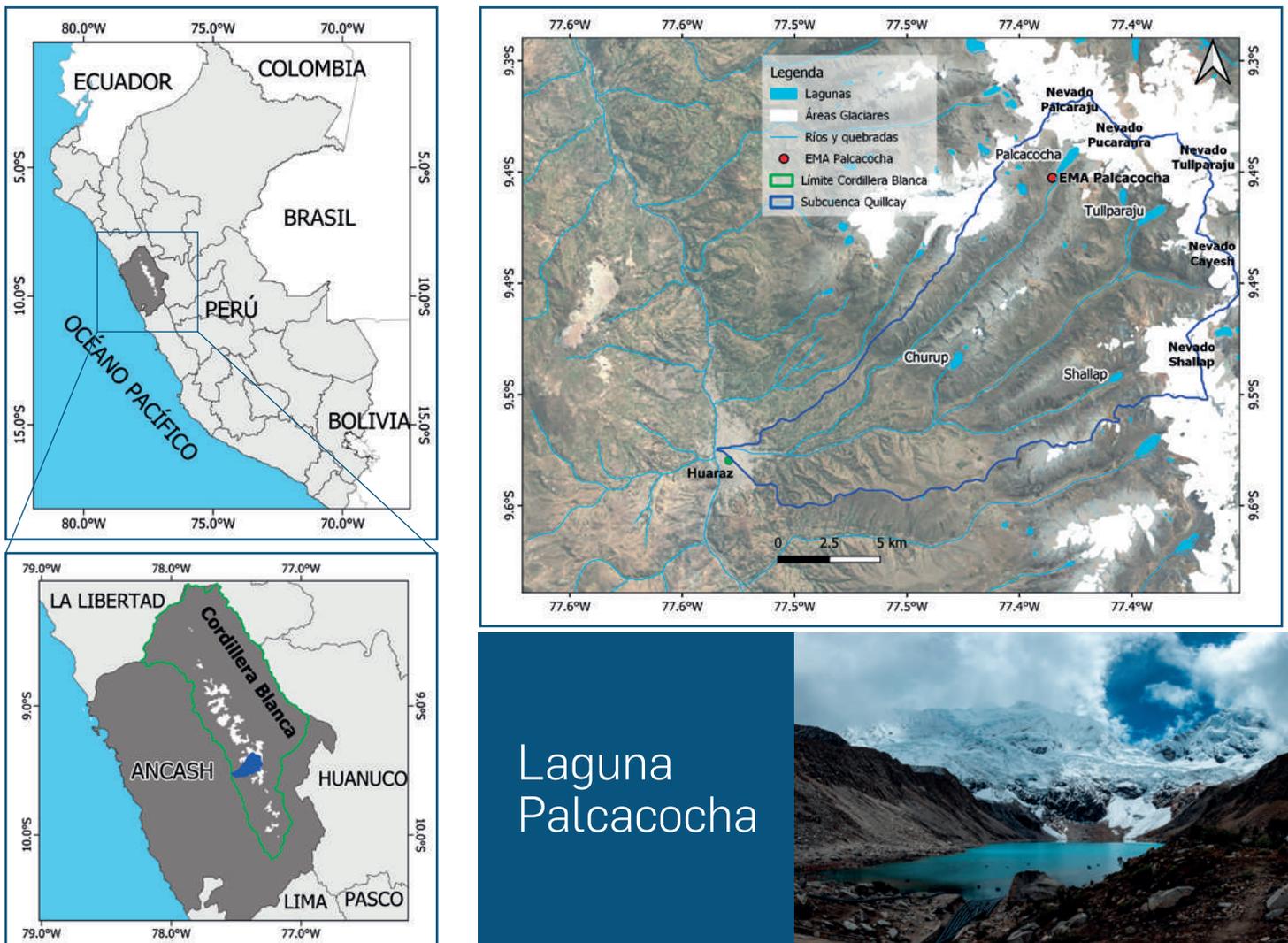
I. MONITOREO HIDROMETEOROLÓGICO EN LA CORDILLERA BLANCA	4
1.1 MONITOREO DE LA LAGUNA PALCACOCHA	5
1.2 VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA CORDILLERA BLANCA	6
a) Precipitación	7
b) Temperaturas	9
1.3 VARIABILIDAD CLIMÁTICA EXTREMA EN LA CORDILLERA BLANCA	10
1.4 VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA LAGUNA PROGLACIAR PALCACOCHA	12
a) Nivel de espejo de agua de la laguna Palcacocha	12
b) Volumen de laguna Palcacocha	15
II. PATRONES SINÓPTICOS DOMINANTES DEL AÑO HIDROLÓGICO 2020-2021	17
2.1 CONDICIONES ATMOSFÉRICAS SINÓPTICAS QUE AFECTARON LA SIERRA DE ANCASH	17
a) Condiciones sinópticas para la época húmeda (enero a marzo) 2020 y 2021	18
b) Condiciones para la época seca (julio a setiembre) de 2020 y 2021	20
2.2. MONITOREO DE LA DINÁMICA CONVECTIVA SOBRE LA CORDILLERA BLANCA	22
Referencias	24

# I. MONITOREO HIDROMETEOROLÓGICO EN LA CORDILLERA BLANCA

Desde febrero del 2017 el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montañas- INAIGEM viene monitoreando la laguna Palcacocha mediante una estación meteorológica automática (EMA) (Figura 2), la cual toma registros cada 5 minutos de diferentes variables meteorológicas entre ellas la precipitación, temperatura y humedad.

En el Perú el monitoreo de variables hidrometeorológicas (precipitación, temperatura,

caudal, nivel de lagunas, etc.) es limitado, especialmente sobre zonas montañosas o los Andes. Desde hace unos años, INAIGEM viene monitoreando varias cordilleras andinas, comenzado por la instalación de sensores en la Cordillera Blanca, y específicamente en la Subcuenca del río Quillcay, donde se localiza la laguna Palcacocha (Figura 1), laguna que tiene una historia recurrente de aluviones, los cuales han producido pérdidas estructurales, económicas y de vidas humanas (INAIGEM, 2018).



**Figura 1. Laguna Palcacocha.** (imagen superior izquierda) se muestra el mapa del Perú, y (a la izquierda) en más detalle la región de Ancash (área sombreada) y la Cordillera Blanca (perímetro en verde). Dentro del área de la Cordillera Blanca se muestran las áreas glaciares (en blanco). En la imagen satelital de fondo se muestra la ciudad de Huaraz, la Subcuenca del río Quillcay (perímetro azul), la laguna Palcacocha y la estación meteorológica automática (EMA) Palcacocha de INAIGEM (punto rojo). Finalmente, se presenta una imagen (fotografía inferior derecha) de la laguna Palcacocha y áreas glaciares circundantes.

# 1.1 MONITOREO DE LA LAGUNA PALCACOCHA

El sistema proglaciar Palcacocha es un laboratorio natural donde INAIGEM ha implementado una serie de sensores para poder registrar la dinámica ambiental y climática. Los sensores se han instalado desde el 2017, y se tiene planeado instalar la misma tecnología en otros ambientes de ecosistemas de montaña a nivel nacional y así ayudar a la prevención mediante información en tiempo real para obtener nuevo conocimiento de estos sistemas de montaña y como el impacto climático viene transformándolos.

Entre los equipos que se han instalado se puede listar dos (02) reglas limnimétricas a las orillas norte y sur de la laguna, de donde se obtienen las variaciones del nivel de agua en época de lluvia y estiaje, la estación meteorológica automática (EMA), sistema de telecomunicaciones que ayuda a la transmisión de datos registrados en tiempo real. Todo esto desarrollo tecnológico de INAIGEM que año a año se ha venido implementando y optimizado.



**Figura 2. Sistema Palcacocha y Estación meteorológica automática (EMA).**

(a) vista de laguna Palcacocha, (b) regla limnimétrica, ubicado en el perímetro suroeste de la laguna, su posición referencial es indicado por el rectángulo amarillo en (a). (c) EMA Palcacocha, ubicado sobre la morrena al suroeste de la laguna, con posición referencial dada por el rectángulo verde en (a). (d), (e) y (f) muestra el sistema de sifonamiento, instalado en la ubicación referencial 1, 2 y 3 en (a), respectivamente. (g) punto de desagüe del sistema de sifones río abajo.

Por otro lado, en base al Decreto Supremo 002-2011 del 5 de enero de 2011, el Gobierno Regional de Ancash ejecutó los trabajos del proyecto de sifonamiento de las aguas de la laguna Palcacocha en julio de 2011 (Figura 2), cuando se instaló un sistema de sifonaje para regular el volumen de la laguna Palcacocha. Este sistema consta de 10 sifones, los cuales son usualmente habilitados en

su totalidad durante la época de lluvia durante el verano austral (diciembre a febrero), drenando agua río abajo para reducir el nivel de la laguna evitando posibles desbordes. Durante el invierno austral (junio a agosto), entre uno a tres sifones se encuentran habilitados para conservar el recurso hídrico y asegurar la disponibilidad de agua potable a la ciudad de Huaraz.

## 1.2 VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA CORDILLERA BLANCA

**Tabla 1. Datos de la estación Palcacocha.** Datos para cuatro años hidrológicos (setiembre a agosto) de precipitación mensual (2017-2021) y temperaturas extremas mensuales (2020-2021).

Mes/Año	Precipitación mensual (mm)				T.máx (°C)	T.mín (°C)
	2017-2018	2018-2019	2019-2020	2020-2021	2020-2021	
Set	27.6	27.4	33.3	14.2	12.9	-0.7
Oct	39.3	85.9	53.6	18.4	13.0	0.0
Nov	70.1	162.3	93.2	34.8	14.8	-0.1
Dic	165.9	74.9	182.9	91.6	11.7	-1.2
Ene	192.3	156.0	87.4	166.2	11.9	-0.8
Feb	120.1	166.1	87.6*	52.0	13.7	-2.1
Mar	213.1	158.0	87.8	121.2	12.4	-2.0
Abr	88.4	74.4	22.2	65.5	12.8	-0.8
May	46.2	23.6	30.4	25.6	13.4	-2.2
Jun	8.9	3.8	0.0	45.5	13.3	-2.2
Jul	3.0	4.6	4.8	0.4	13.1	-1.8
Ago	13.5	0.5	0.8	34.8	12.3	-0.9

\*Datos completados

## a) Precipitación

Durante el período 2017 al 2021 se registró una precipitación anual acumulada de cuatro años hidrológicos de 3280.1 mm (100%) en las cercanías de la laguna Palcacocha. Si se divide esta precipitación acumulada por cada año hidrológico, se muestra que durante los años hidrológicos 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020 y 2020-2021, se obtuvieron las precipitaciones en cada año hidrológico la cantidad de 988.4 mm (30.1%), 937.5 mm (28.6%), 683.9 mm (20.9%) y 670.2 mm (20.4%), respectivamente (% con respecto a lo registrado desde el 2017 al 2021). Es decir, se continúa con una reducción de la variable de precipitación para el año hidrológico 2020-2021, respecto a los años hidrológicos previos.

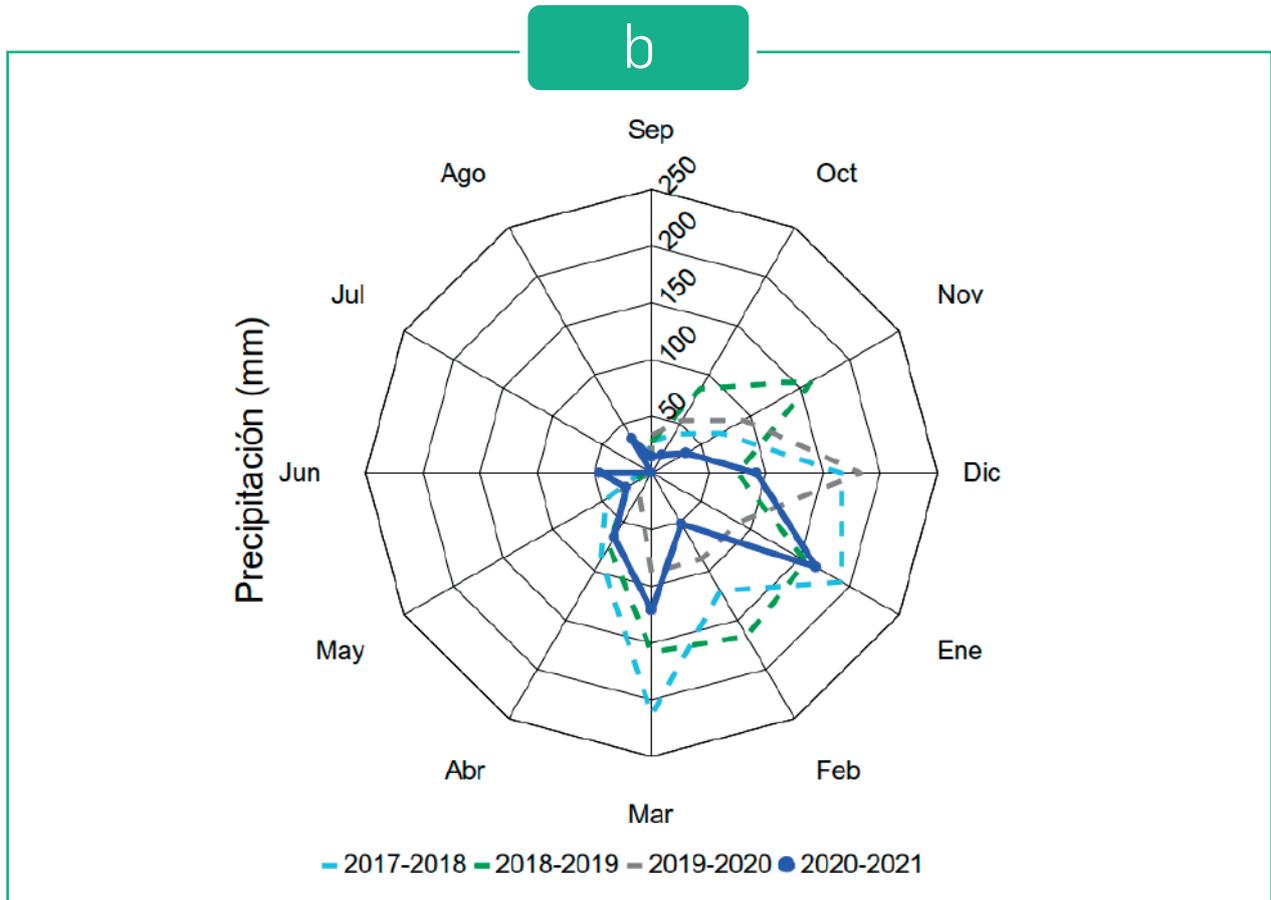
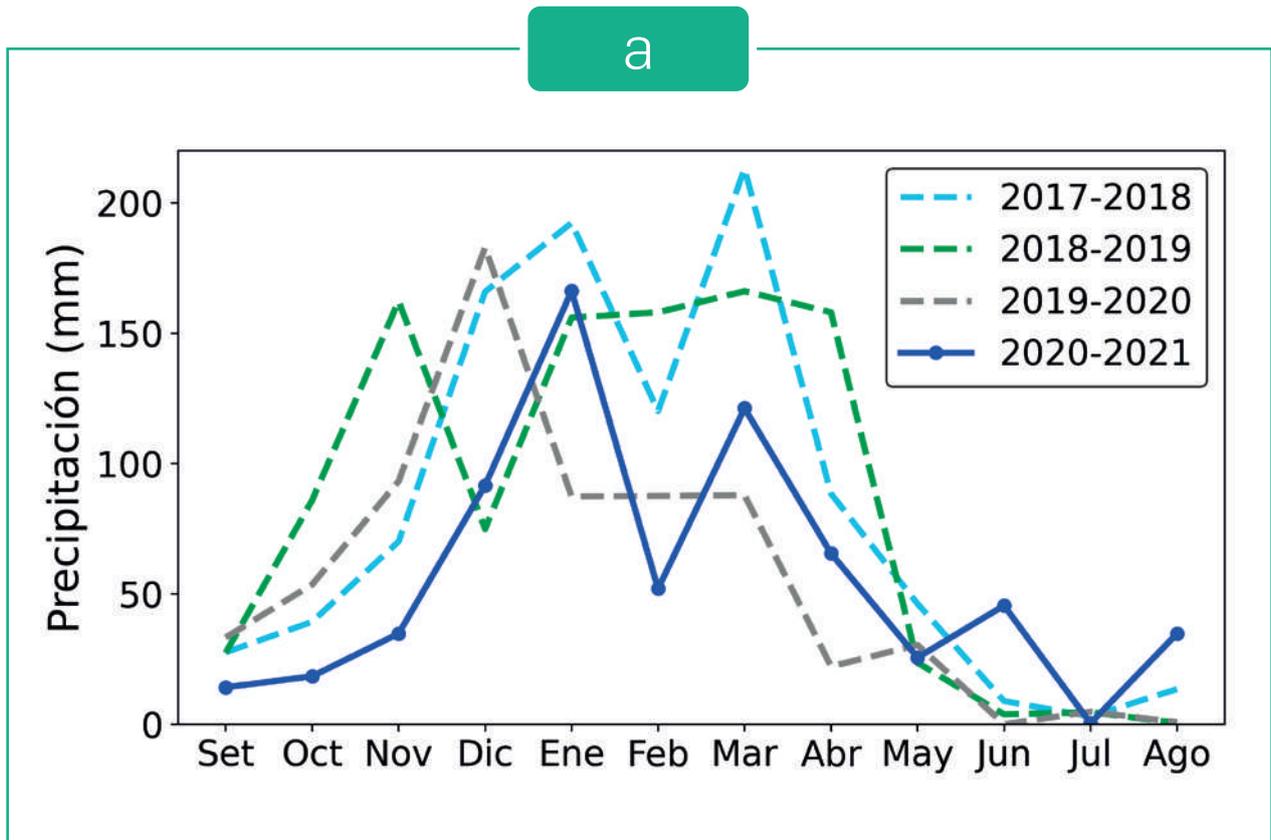
En el periodo 2017-2021 se observa que durante el mes de marzo del año hidrológico 2017-2018 se registró la mayor precipitación mensual de este periodo con un valor de 213.1 mm (Tabla 1, Figura 3). Aunque es inusual, esto permitió que la masa glaciaria y más recursos hídricos en los ecosistemas de montaña cercanos logren mantenerse en mayor cantidad durante el periodo de estiaje (junio a agosto). Al comparar los años hidrológicos 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020 y 2020-2021 se aprecia en la Figura 3a, que durante el 2017-2018 se tuvo mayor actividad convectiva en la Cordillera Blanca, sobre Palcacocha. La Figura 3b nos muestra que desde el 2017 el periodo de precipitación se concentra entre los meses de octubre a abril, en su mayor parte, con un aproximado de 88.5% de precipitación respecto al periodo 2017-2021. Es también notorio que es durante estos meses que ocurren la mayor cantidad de fenómenos naturales peligrosos como avalanchas y aluviones.

Como se registró en el Boletín Hidrometeorológico 2019-2020 de INAIGEM la precipitación fue reducida, y para el periodo 2020-2021 esta tendencia se mantiene. Si se compara los periodos 2019-2020 y 2020-2021, se observa una reducción anual de precipitación del 2% del año hidrológico 2020-2021 respecto al del 2019-2020. Más aún se observa un retraso en el inicio de las precipitaciones (Figura 3), esto es verificado cuando se analizan las diferencias mes a mes entre el

periodo 2020-2021 con el de 2019-2020. Por ejemplo, la diferencia de precipitación mensual para los meses de setiembre, octubre, noviembre, diciembre, febrero, mayo y julio del año hidrológico 2020-2021 tiene una reducción acumulada de -248.8 mm/mes con respecto a los meses del año 2019-2020, mientras que los meses de enero, marzo, abril, junio y agosto mostraron un aumento de precipitación mensual acumulada de +235 mm/mes.

Además, se analizó los cambios de precipitación anual acumulada con respecto a los índices climáticos del pacífico, es decir con el Índice Costero El Niño (ICEN, [http://met.igp.gob.pe/elniño/lista\\_eventos.html](http://met.igp.gob.pe/elniño/lista_eventos.html)) y el Índice el Niño Oceánico (ONI, [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)). El ICEN muestra valores neutros de actividad, durante el año hidrológico 2020-2021. Mientras que el ONI muestra un periodo frío (tipo La Niña) en las aguas del Océano Pacífico, lo cual indicaría la presencia de un evento La Niña. Es decir, no hay congruencia entre los índices para este año.

Para analizar en más detalle lo acontecido el año hidrológico 2020-2021, en la Figura 4 se muestra el histograma de precipitación mensual (mm/mes). Se puede observar que la precipitación del mes de enero del 2021 fue la máxima registrada de alrededor de 166.2 mm. En la Figura 4 se empleó un intervalo de confianza de la media en base a los datos de los años hidrológicos comprendidos entre el 2017 a 2021 con una significancia al 95%, donde se puede observar que la mayor variabilidad se da entre los meses de noviembre a marzo (ver intervalos de confianza en Figura 4). De lo anterior, para el periodo 2020-2021 la máxima variabilidad y actividad convectiva se concentró en gran medida a inicios del 2021.



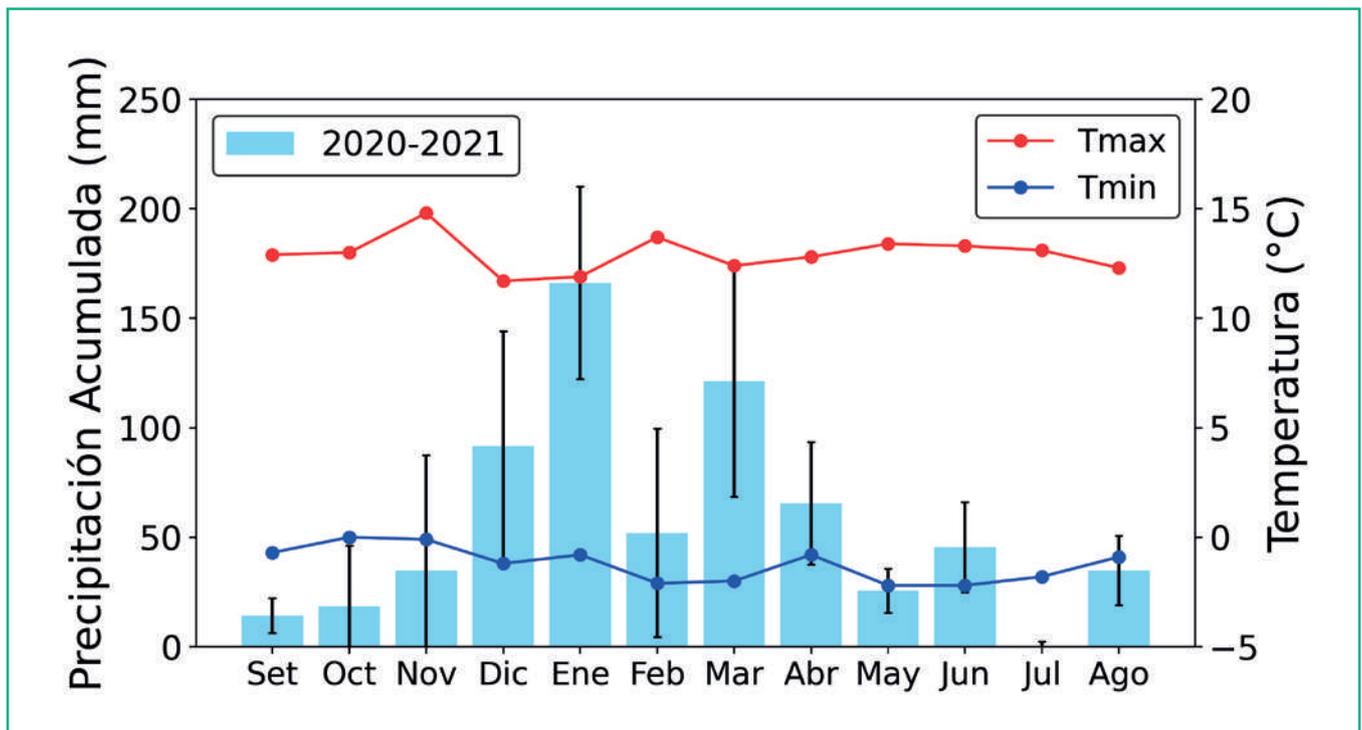
**Figura 3. Variabilidad de la Precipitación en Palcacocha.**

Análisis temporal de la precipitación de la estación meteorológica Palcacocha para los años hidrológicos en el periodo 2017-2021. (a) Gráfica de líneas de los datos de precipitación mensual mostrados en la Tabla 1, y (b) Gráfica radial de los datos usados en (a).

## b) Temperaturas

En este año hidrológico 2020-2021 se registró el valor máximo de temperatura que alcanzó 14.8°C en noviembre (Tabla 1), valor menor a los valores máximos alcanzados un año hidrológico anterior de 15°C para los meses de abril y junio (Tabla 1, INAIGEM 2021). En general, durante el año hidrológico 2020-2021 se observan valores menores de temperatura máxima en comparación

al año 2019-2020. Por otra parte, las temperaturas mínimas ( $T_{mín}$ ) tienen un comportamiento oscilante, con valores promedios por debajo de los 0°C durante todo el año, donde los descensos más severos se registraron en los meses de mayo y junio (-2.2 °C). En general, los valores de  $T_{mín}$  fueron mayores y más variantes en comparación al año 2019-2020.



**Figura 4. Climograma de la laguna Palcacocha**

Precipitación mensual para el año hidrológico (Set-Ago) 2020-2021 (histograma, en celeste) e intervalos de confianza al 95% (barras, en negro) estimado para el periodo 2017-2021, de la estación meteorológica Palcacocha. Las líneas en rojo y azul, muestran las temperaturas máximas ( $T_{máx}$ ) y mínimas ( $T_{mín}$ ), respectivamente. Unidades de precipitación en mm en el eje izquierdo, y Temperaturas en °C en el eje de la derecha.

En la Figura 4 se observa que en los meses donde se tiene mayor porcentaje de precipitación (verano austral, diciembre, enero y marzo) se presentan las menores temperaturas máximas, esto asociado al mayor grado de humedad y nubosidad presentes en niveles medios de la atmósfera. Caso contrario ocurre en los meses de

invierno austral (JJA) donde hubo menor probabilidad de ocurrencia de precipitación (esto es, menor actividad convectiva y poca humedad, debido a la incursión de aire seco en niveles medios y altos de la atmósfera) cuando se presentaron los mayores valores de temperaturas mínimas ante condiciones de cielos despejados.

## 1.3 VARIABILIDAD CLIMÁTICA EXTREMA EN LA CORDILLERA BLANCA

Aunque la precipitación en la CB se muestra escasa para el periodo 2020-2021, se muestra gran variabilidad respecto al periodo 2017-2021 (Figura 4). Similarmente, se aprecia alta variabilidad en los datos de temperatura (Figura 4), principalmente durante los meses de mayor precipitación (noviembre a marzo) respecto al año hidrológico 2019-2020. Se calcularon indicadores climáticos extremos en base a las definiciones

dadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), considerando los datos diarios registrados por la estación Palcacocha de temperatura y precipitación, para el año hidrológico 2020-2021, como caso representativo a las condiciones climáticas de la Cordillera Blanca. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos del cálculo de los índices extremos definidos por el IPCC.

**Tabla 2. Análisis estadístico de los índices climáticos extremos del IPCC para el año hidrológico 2020-2021.** Los datos diarios de precipitación (Prec) y temperaturas de la estación Palcacocha, fueron usados para estimar los índices.

ID	NOMBRE DEL ÍNDICE	VALOR	UNIDAD
FD0	Días de heladas	83	días
TXx	Max T <sub>máx</sub>	14.8	°C
TNx	Max T <sub>mín</sub>	4.2	°C
TXn	Min T <sub>máx</sub>	1.3	°C
TNn	Min T <sub>mín</sub>	-2.2	°C
DTR	Rango diario de temperatura	9.2	°C
RX1day	Cantidad máxima de precipitación en un día	19	mm
Rx5day	Cantidad máxima de precipitación en 5 días	48	mm
SDII	Índice simple de intensidad diaria	4.9	mm/día
R10	Número de días con precipitación intensa (Prec $\geq$ 10mm/día)	17	días
R20	Número de días con precipitación muy intensa (Prec $\geq$ 20mm/día)	0	días
CDD	Días secos consecutivos (cuando Prec $\leq$ 0.1)	37	días
CWD	Días húmedos consecutivos (con Prec $\geq$ 1mm)	14	días
PRCPTOT	Precipitación total anual en los días húmedos	638.8	mm

Como se aprecia en la Figura 4 y Tabla 1, los valores de  $T_{mín}$  mensual fueron  $\leq 0$  durante todo el año hidrológico. Los índices TNn y TNx muestran que los valores de  $T_{mín}$  oscilan en el rango de  $[-2.2, 4.2]$  para el periodo 2020-2021 de los datos de la estación Palcacocha a 4607 msnm, rango que muestra noches más cálidas al reportado para el año 2019-2020. La importancia de registrar los rangos de temperatura mínima en la Cordillera Blanca durante el verano austral es debido a que la mayor parte de actividad convectiva (precipitación) ocurre en horas de la tarde-noche, generando con más frecuencia nevadas necesarias para la conservación de los nevados y glaciares, ya que proporcionan un incremento en el espesor de hielo y nieve. En base al trabajo de Navarro-Serrano et al. (2020), se puede estimar que en la zona norte del Perú se tiene un aproximado de  $-4.5^{\circ}\text{C}/\text{Km}$  de tasa de cambio de temperatura respecto a la elevación (Lapse rate) por lo que podemos inferir valores de  $T_{mín}$  a elevaciones de 5500 msnm en la Cordillera Blanca con las mediciones de la estación Palcacocha (a 4607 msnm), obteniendo los valores de entre  $[-6.2, 0.2]$ . Por otra parte, en el último reporte del IPCC AR6 (2021), las temperaturas superficiales promedio se incrementarían entre  $3.3^{\circ}\text{C}$  a  $5.7^{\circ}\text{C}$  a finales del siglo 21 para escenarios de grado muy alto (SSP5-8.5) de emisiones de gases de efecto invernadero. Así, para el caso de escenarios SSP5-8.5 se tiene unas proyecciones de temperatura mínima en niveles de Palcacocha de  $[-0.7, 8.13]^{\circ}\text{C}$  y para niveles de 5500 msnm donde se ubican la mayoría de los glaciares y cuerpos nevados se tendría un rango de valores de la  $T_{mín}$  de  $[-2.9, 5.9]^{\circ}\text{C}$  a finales del siglo 21, en base a los datos del año hidrológico 2020-2021. Este ejercicio es empírico y solo realizado para mostrar el cambio relativo que se presentaría en la CB, en el contexto de calentamiento global, y mostrar el futuro potencial de los ambientes glaciares alrededor de los 5500 msnm, los cuales tendrían un escenario sin glaciares como es el caso actual donde se ubica la estación Palcacocha (Figura 1).

El rango de temperatura diurna (diferencia de la media mensual entre  $T_{máx}$  -  $T_{mín}$ ) representado por el índice DTR (Tabla 2) muestra un valor de  $9.2^{\circ}\text{C}$  para Palcacocha el cual es ligeramente

menor que la del año 2019-2020. Este resultado se debe a que los valores de temperatura máxima y mínima mensual alcanzaron valores menores y mayores, respectivamente con respecto al año hidrológico anterior.

En general, los índices climáticos muestran mayor frecuencia de precipitaciones intensas (RX1day, RX5day, SDII y R10, PRCPTOT), asimismo, dichos índices muestran una gran reducción de días secos y húmedos consecutivos (CDD y CWD), con respecto al año hidrológico anterior.

El número de días con precipitación intensa para el 2020-2021 fue de 17 días superando los 10 mm/día (RX1day, RX5day, SDII y R10) y el acumulado anual en los días más húmedos ( $\geq 1$  mm) fue de 638.8 mm, donde el mayor número de días húmedos se dio en el mes enero como se puede apreciar en la Figura 4, es decir la precipitación mensual fue heterogénea en el tiempo, abundante en enero superando los 166 mm y con valores por debajo de los 100 mm en los meses de diciembre, febrero, marzo y abril, mientras que el resto de los meses no superan los 50 mm, con lo cual se puede considerar que la estación de verano austral para el año hidrológico 2019-2020 tuvo escasez de lluvias.

El mayor día con precipitación fue el 25 de diciembre de 2020 con un valor de 19 mm.



## 1.4 VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA LAGUNA PROGLACIAR PALCACOCHA

El cambio en los niveles y volumen de la laguna Palcacocha son efectos de los cambios climáticos producidos en los últimos años. Para el caso del año hidrológico 2020-2021 se observó como un año con poca precipitación acumulada, esto

repercute en la profundidad (o nivel del espejo de agua) y volumen de la laguna, así como cambios de escorrentía que llega a la laguna desde áreas glaciares producida por deshielo, principalmente en el periodo de estiaje (junio a agosto).

### a) Nivel de espejo de agua de la laguna Palcacocha

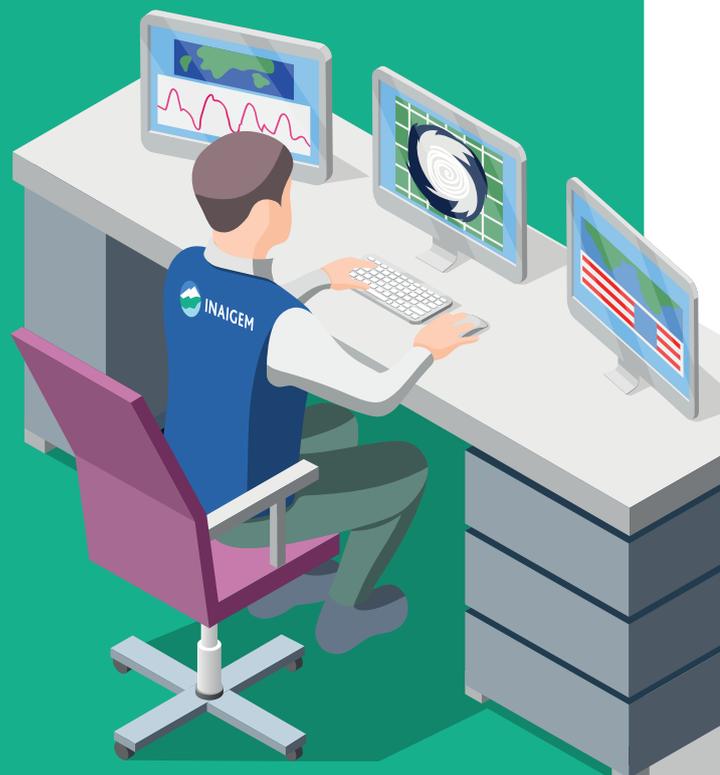
Una variable de gran interés es el nivel de agua (o cota) de la superficie de la laguna Palcacocha para observar la variabilidad (natural y antropogénica) de la laguna, la cual está asociada principalmente a cambios en el flujo de agua que ingresa a la laguna debido al deshielo de los glaciares, la precipitación y evaporación causada por los cambios en temperatura, además de la intervención preventiva del drenaje de la laguna mediante el sistema de sifonamiento instalado el 2011 por el gobierno regional de Ancash (detalles en sección 1.1).

Estos niveles se estiman tomando de referencia el nivel de rebose (4547.94 msnm, nivel con alta probabilidad de que empiece un desborde de la laguna, Figura 5), así se toma la elevación del nivel de la laguna con respecto al del rebose (profundidad) como medida para el presente análisis.

En la Tabla 3 se presentan estadísticas de los registros obtenidos desde el 2017 hasta el 2021. Se observa un nivel (profundidad) medio de la laguna el año 2020-2021 similar al nivel medio del periodo 2017-2021 (Tabla 3 y Figura 5). Por otra parte, el resto de los meses presentan una disminución del nivel de la laguna (mayor profundidad), y significativamente entre los meses de abril a julio (Tabla 3 y Figura 5). Como se observa en la Figura 6, el sistema de sifonamiento fue al 100% (10 sifones) activos durante los meses de mayor precipitación, y regulado a menor drenaje (entre 8 a 4 sifones activos) desde el mes de abril hasta agosto, sumado a la reducción de precipitación para el año 2020-2021. Esto conlleva a que este año

hidrológico se tengan niveles de laguna muy bajos (mayor profundidad) con respecto al promedio multianual (Figura 5).

Las variaciones mensuales de los niveles de la laguna Palcacocha (Tabla 3 y Figura 5) presentan una relación con las variables meteorológicas y deglaciación principalmente (efectos naturales), y el número de sifones activos (efectos antropogénicos).



**Tabla 3. Nivel de agua de la superficie de la laguna Palcacocha.**

La profundidad es estimada como la medida directa de la regla limnimétrica (Figura 2b) respecto del nivel de rebose (Nr=4547.94 msnm) para el año hidrológico 2020-2021. La regla limnimétrica se encuentra instalada en el perímetro de la laguna (Figura 2).

La medida de profundidad mensual es estimada a partir de los datos de monitoreo diario. El signo negativo indica que el nivel de la laguna estuvo por debajo del nivel de rebose en todos los meses. Valores positivos corresponden al caso que el nivel de la laguna sobrepase el nivel de rebose, es decir cuando ocurre un desborde.

Mes	Profundidad media (m) 2017-2018	Profundidad media (m) 2018-2019	Profundidad media (m) 2019-2020	Profundidad del espejo de agua/mes 2020-2021 (m)			Profundidad media(m) 2017-2021
				Media	Mínimo en magnitud	Máximo en magnitud	
Sep	-2.9	-2.9	-2.8	-3,2	-3,0	-3,3	-3,0
Oct	-2.7	-2.9	-3,2	-3,1	-3,0	-3,3	-3,0
Nov	-2.6	-2.4	-2,9	-2,3	-2,0	-3,0	-2,5
Dic	-2.6	-2.2	-2,5	-2,2	-2,1	-2,3	-2,3
Ene	-2.7	-1.9	-1,5	-2,2	-1,9	-2,4	-2,1
Feb	-2.5	-1.6	-1,2	-1,9	-1,8	-2,1	-1,8
Mar	-2.6	-1.6	-1	-2,3	-2,1	-2,6	-1,9
Abr	-2.9	-1.2	-1,7	-2,8	-2,6	-3,0	-2,2
May	-2.6	-0.8	-2,5	-2,9	-2,8	-3,0	-2,2
Jun	-2.7	-0.8	-2,8	-3,0	-2,9	-3,1	-2,3
Jul	-3.1	-1.0	-2,9	-3,1	-2,9	-3,2	-2,5
Ago	-3.2	-1.5	-3	-3,0	-2,9	-3,1	-2,7

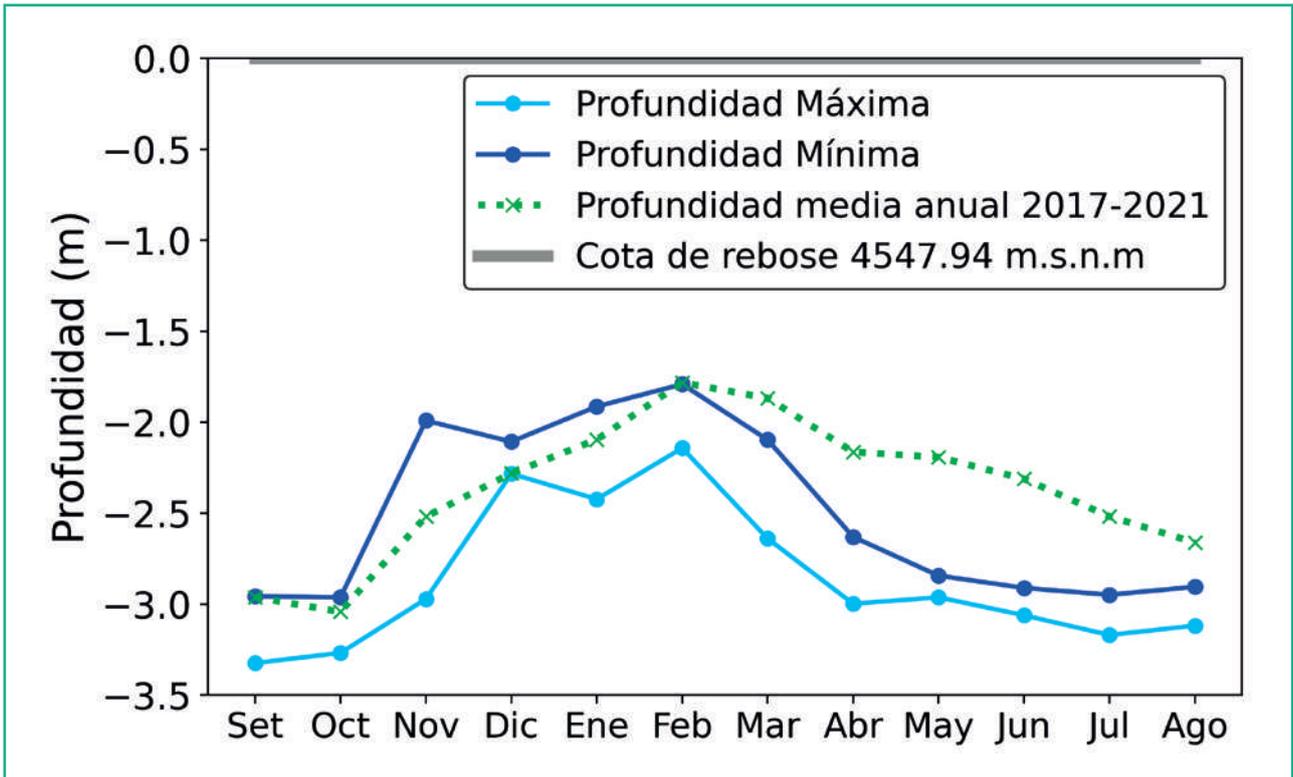


Figura 5. Hidrograma de incrementos de nivel (o cota o espejo) de agua de la laguna Palcacocha. Profundidad mínima y máxima se refieren a los valores mínimos y máximos en magnitud.

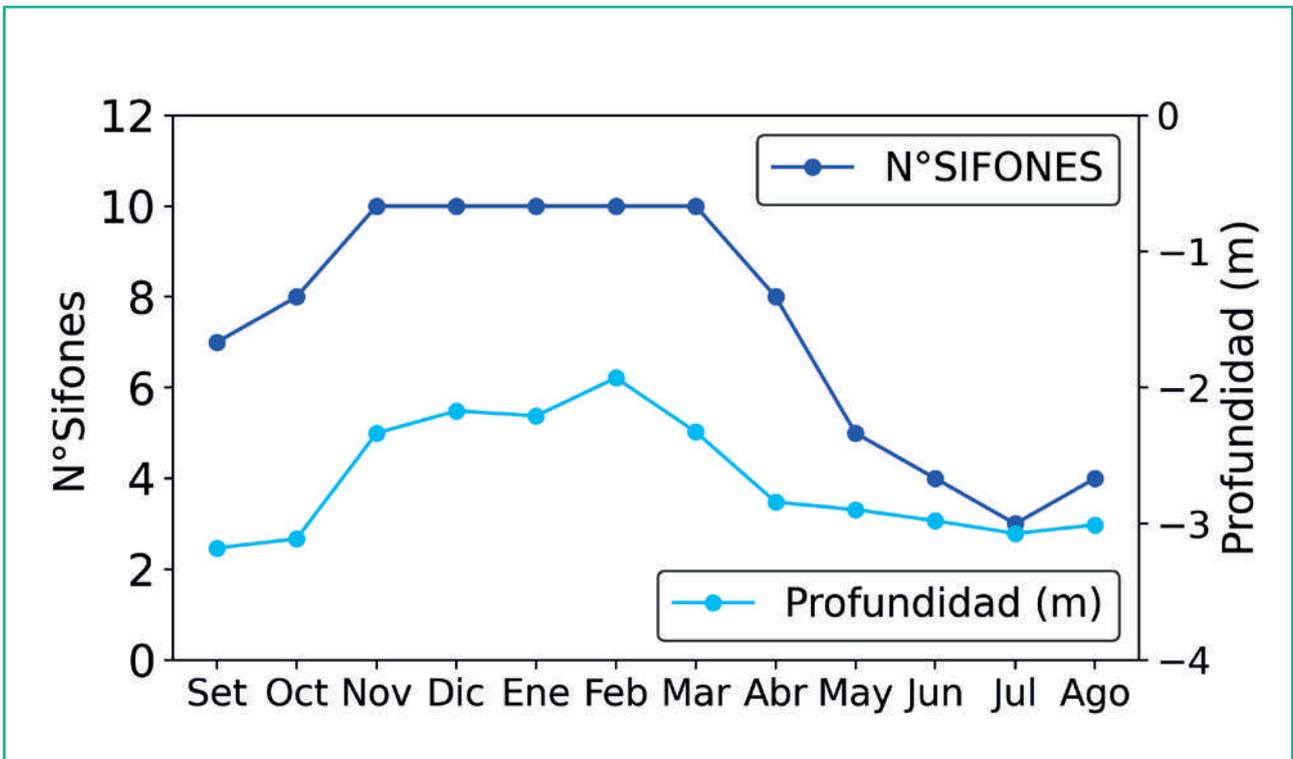


Figura 6. Comparación de los números de sifones activos por mes.

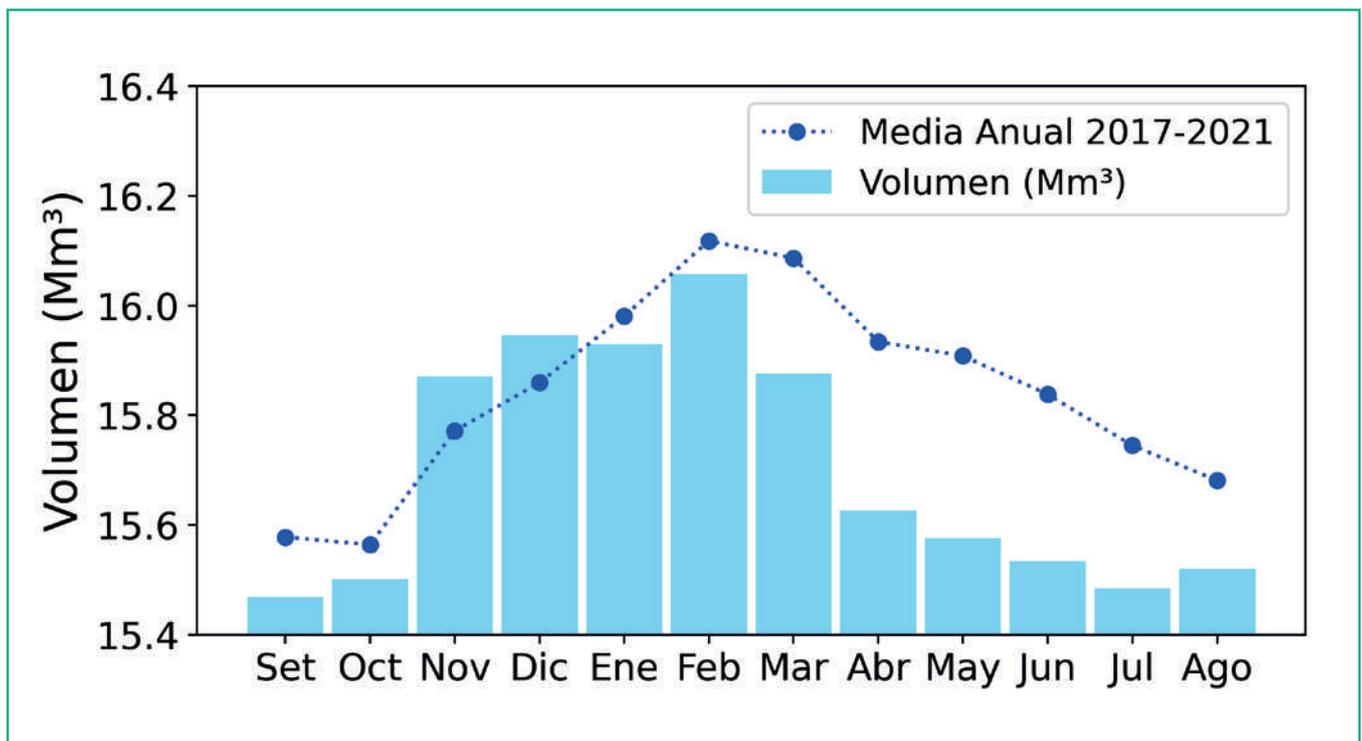
El sistema de sifonamiento contiene 10 sifones (Figura 2), por lo que 10 es el valor máximo de SIFONES activos. Los valores de profundidad son dados con respecto al nivel de rebose (Profundidad=0.0) en unidades de metros lineales (m).

## b) Volumen de laguna Palcacocha

La estimación de los valores de volumen de la laguna Palcacocha es calculada a partir de los datos de nivel de la laguna y la última batimetría realizada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) en el 2016.

Para el caso del análisis del volumen de la laguna, es importante discernir entre la variabilidad natural y antropogénica. La variabilidad natural del volumen es causada por los cambios en las variables climáticas (precipitación, evaporación, sublimación, etc.) e hidrológicas (cauces de escorrentías que ingresan a la laguna desde las

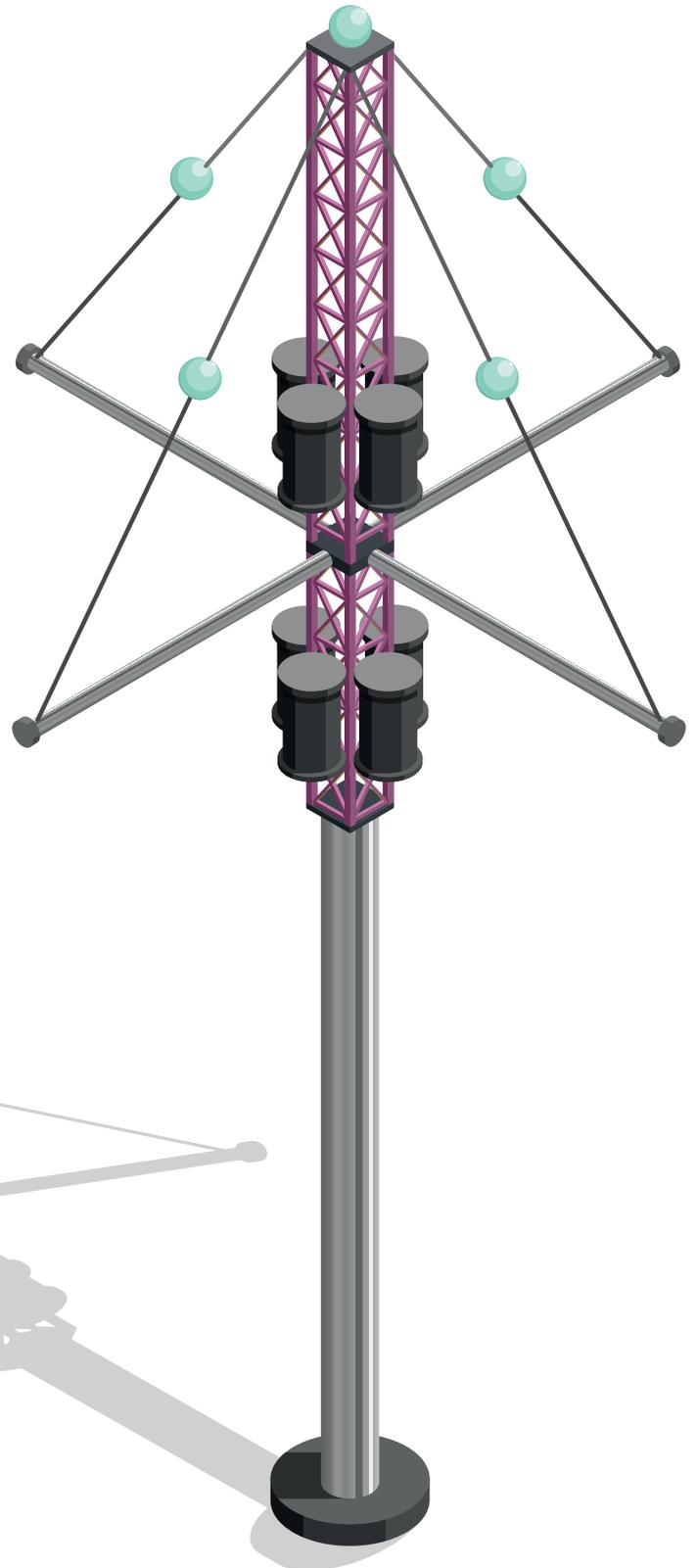
regiones glaciares). La variabilidad antropogénica del volumen se debe a la manipulación del sistema de sifonamiento (Figura 5), principalmente. Es de interés analizar el cambio de volumen debido a causas naturales, que es el caso representativo de los demás sistemas de lagunas proglaciares en la Cordillera Blanca. Por lo que, se estimó el volumen perdido por el sistema de sifonamiento en el tiempo, y este volumen fue agregado al volumen estimado inicialmente, así se elimina la variabilidad antropogénica de los datos de volumen. En adelante, los datos de volumen son los valores que solo contienen variabilidad natural (Figura 7).



**Figura 7. Volumen de la laguna Palcacocha.**

Volumen en unidades de Millones de metros cúbicos (Mm³). Las barras indican el volumen mensual en Mm³, mientras que las líneas punteadas muestran los valores medios de volumen por mes para el periodo hidrológico 2017-2021.

En la Figura 7, se muestran los valores mensuales del volumen de la laguna. Los mayores volúmenes de la laguna fueron registrados durante los meses de noviembre a marzo ( $\approx 15.9$  Mm<sup>3</sup>, en promedio); mientras que el menor valor de volumen almacenado ocurrió en el mes de setiembre del 2020 ( $\approx 15.45$  Mm<sup>3</sup>). Por otra parte, se observa que el nivel de agua, en la laguna Palcacocha presenta valores ASCENDENTES durante los meses de setiembre a diciembre del 2020, siguiendo el gradiente de la media histórica 2017-2021, mientras que valores descendentes se observa desde febrero a julio del año 2021. Aunque el pico de precipitación fue dado el mes de enero, la poca precipitación del año hidrológico 2020-2021 ha impactado significativamente en la reducción del volumen de la laguna a mitad del año, específicamente desde marzo a agosto del 2021. Es decir, esto implica que el impacto negativo del volumen de la laguna por la precipitación fue directamente por la escasez de precipitación.



## II. PATRONES SINÓPTICOS DOMINANTES DEL AÑO HIDROLÓGICO 2020-2021

El principal sistema sinóptico que contribuye a la ocurrencia de eventos de precipitación (convectiva y/o estratiforme) durante el verano austral sobre la sierra central del país se conoce como Alta de Bolivia (AB). Como se indica en Lenters y Cook (1999), Garreaud (2009), Vuille et al. (2008), entre otros, la presencia y posición de este sistema anticiclónico al sureste de Perú y noroeste de Bolivia, origina transporte de humedad desde la cuenca Amazónica hacia las cordilleras.

Los meses de enero y marzo fueron donde se concentró la mayor actividad convectiva del año

hidrológico 2020-2021 (Figura 3), con alta intensidad de la AB (similar a Figura 8b) y significativa incursión de humedad desde el centro del Continente y Amazonía (Figura 8d, 8f y 8h) hacia la Cordillera Blanca, presentándose el máximo valor de precipitación para enero (Figura 4). Además, se observa que esta actividad convectiva de enero 2021 influyó en la disminución de la temperatura máxima promedio (Figura 4), este comportamiento también se detectó a una escala diaria, en donde los días lluviosos presentaron un descenso en los valores de temperatura máxima y un ascenso en la temperatura mínima.

### 2.1 CONDICIONES ATMOSFÉRICAS SINÓPTICAS QUE AFECTARON LA SIERRA DE ANCASH

En niveles altos, el sistema predominante es la Alta de Bolivia (AB), anticiclón ubicado al noroeste de Bolivia, sobre el Altiplano, cuya influencia se observa a partir de los niveles medios de la atmósfera. La AB es una circulación anticiclónica que se presenta en la troposfera superior en la región de Sudamérica, como respuesta a la actividad convectiva concentrada en el centro del continente en la cuenca Amazónica, su circulación es predominante en el verano del Hemisferio Sur y ayuda a transportar humedad hacia la sierra Ancash en la época húmeda (Saavedra et al. 2011).

Hacia el segundo trimestre del año, se tiene una migración del sistema sinóptico hacia el norte, como el sol se aleja del paralelo del hemisferio sur llamado Trópico de Capricornio, iniciando el debilitamiento o extinción de la AB. Luego, se inicia el predominio de flujos de aire frío y seco desde el oeste, en niveles medios y altos, con una

disminución en los valores de temperatura, debido a que en junio se inicia la estación de invierno austral, con muy escasas precipitaciones. En el tercer trimestre, durante julio y agosto (que son los meses más fríos) los flujos del oeste continúan siendo los predominantes.

Los valores de temperatura comienzan a aumentar progresivamente en el mes de setiembre, al acercarse la primavera (el sol inicia el retorno a las proximidades del trópico de Capricornio), de este modo los flujos del este se intensifican y empiezan a transportar humedad desde zonas Amazónicas, así se inicia el restablecimiento de la configuración sinóptica a inicios de esta temporada, en donde una nueva AB vuelve a formarse. Para noviembre y diciembre, los flujos del este a niveles medios vienen a ser la circulación predominante, sobre la sierra de Ancash (Gilford et al. 1992), iniciando el periodo de precipitación en la región Andina.

## a) Condiciones sinópticas para la época húmeda (enero a marzo) 2020 y 2021

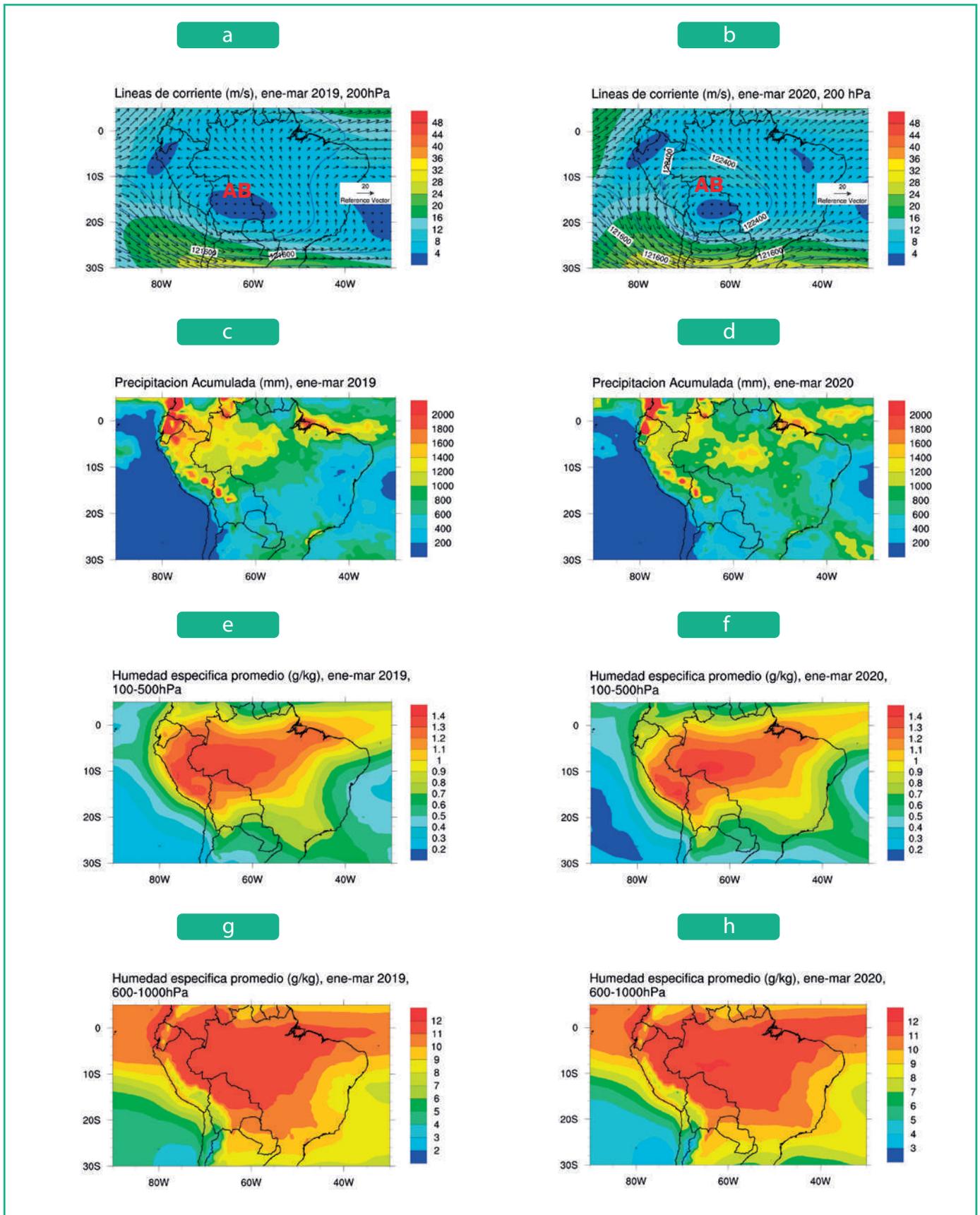
En la sierra es de gran importancia el estudio de las condiciones a escala sinóptica, ya que muchos fenómenos de tiempo severo como las tormentas convectivas son a consecuencia de estos sistemas. En la Figura 8 se representa el comportamiento promedio para los meses de enero a marzo para los años 2020 y 2021, utilizando los datos de reanálisis del ERA5 (Hersbach et al., 2019). Para la época húmeda se puede observar en la Figura 8a y 8b, los vectores de viento promedio donde se muestra bien definida la formación de la AB, presente en los meses de verano y genera arrastre de humedad desde el centro del continente hacia las cordilleras peruanas, debido a los mecanismos de su circulación anticiclónica en niveles altos de la atmósfera (200 hPa). Su núcleo se sitúa aproximadamente entre los 20°S y 60°W (Figura 8a y 8b). No obstante, este sistema cambia su posición a los alrededores durante todo el verano. El comportamiento de la AB para el primer trimestre del año 2021 (Figura 8b) fue similarmente intenso en comparación al año del 2020 (Figura 8a). Sin embargo, los máximos acumulados de precipitación sobre la Cordillera Blanca se presentaron en la época de precipitación entre enero y marzo 2021, lo cual se puede observar en las Figuras 8c y 8d, lo cual se debió a un mayor porcentaje de humedad en las capas altas (100-500 hPa) (Figuras 8e y 8f) del 2021 concentrados más hacia el norte-este del Perú. Por otra parte, en los niveles medios a bajos la humedad específica siguió con similar patrón que los niveles altos (Figura 8g y 8h). De lo anterior se puede intuir que aunque la AB produzca la circulación para el transporte de humedad sobre la zona Andina, los niveles de humedad en la atmósfera Amazónica son de gran importancia para garantizar la ocurrencia de actividad convectiva sobre la Cordillera Blanca.

En resumen, para el periodo de enero a marzo del año 2021, se observó que los flujos de vientos húmedos desde el este, favorecieron la ocurrencia de precipitaciones sobre la sierra de Ancash, teniéndose superávits principalmente hacia los

meses de enero y marzo. Este transporte de humedad puede ser corroborado con el promedio de humedad específica para los meses de enero a marzo (Figura 8e y 8f), en donde se muestran altas concentraciones de humedad sobre toda la sierra peruana y la cuenca amazónica para el 2021 en comparación al 2020. Se puede intuir que esta zona presenta gran cantidad de vapor de agua para alcanzar la saturación y formar posibles nubes convectivas principalmente en la selva norte y centro.

El mapa de precipitación muestra una correlación espacial alta con las gráficas de humedad específica (comparar Figuras 8c y 8d con Figuras 8e y 8f), reflejándose valores de precipitación alrededor de los 300 mm para los tres meses de verano en zonas glaciares.



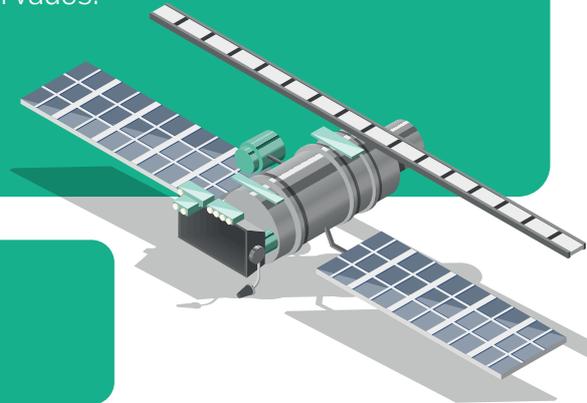


**Figura 8. Sinóptica de Sudamérica que influye en el clima de la Cordillera Blanca.**

Líneas de corriente (m/s) con líneas de geopotencial (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) , promedio de ene-mar a 200 hPa para los años (a) 2020 y (b) 2021. Se indica la ubicación central de la Alta de Bolivia (AB). Precipitación total (mm) acumulada de enero a marzo para los años (c) 2020 y (d) 2021. Humedad específica (g/kg) para los meses de enero a marzo promedio de 100 hPa a 500 hPa para los años (e) 2020 y (f) 2021. Humedad específica(g/kg) promedio, para el rango de enero a marzo promedio de 500 hPa a 1000 hPa para los años (g) 2020 y (h) 2021.

Las observaciones complementarias de este análisis son:

- Las oscilaciones en los valores de temperatura máxima son más frecuentes en el periodo lluvioso, ya que la incidencia de la radiación solar sobre la superficie se ve disminuida ante la presencia de cobertura nubosa al mediodía, ocasionando descensos en los valores.
- Los valores más bajos de temperatura mínima se tienen en los meses de invierno (principalmente en el mes de julio), en donde generalmente ocurren las heladas meteorológicas, luego los valores se elevan debido a la presencia de cobertura nubosa durante el amanecer, disminuyendo así la pérdida de radiación termal, proveniente de la superficie, hacia el espacio.
- Aunque los mayores valores de precipitación acumulada se concentraron en los meses de verano, fueron los meses de enero y marzo del 2021 los que presentaron altos valores, debido a que se generaron los mayores flujos húmedos de los vientos del este propiciados por la Alta de Bolivia.
- Es difícil aún observar una correlación entre las variables meteorológicas y las variaciones del nivel de la laguna, debido al corto registro de datos observados.



## b) Condiciones para la época seca (julio a setiembre) de 2020 y 2021

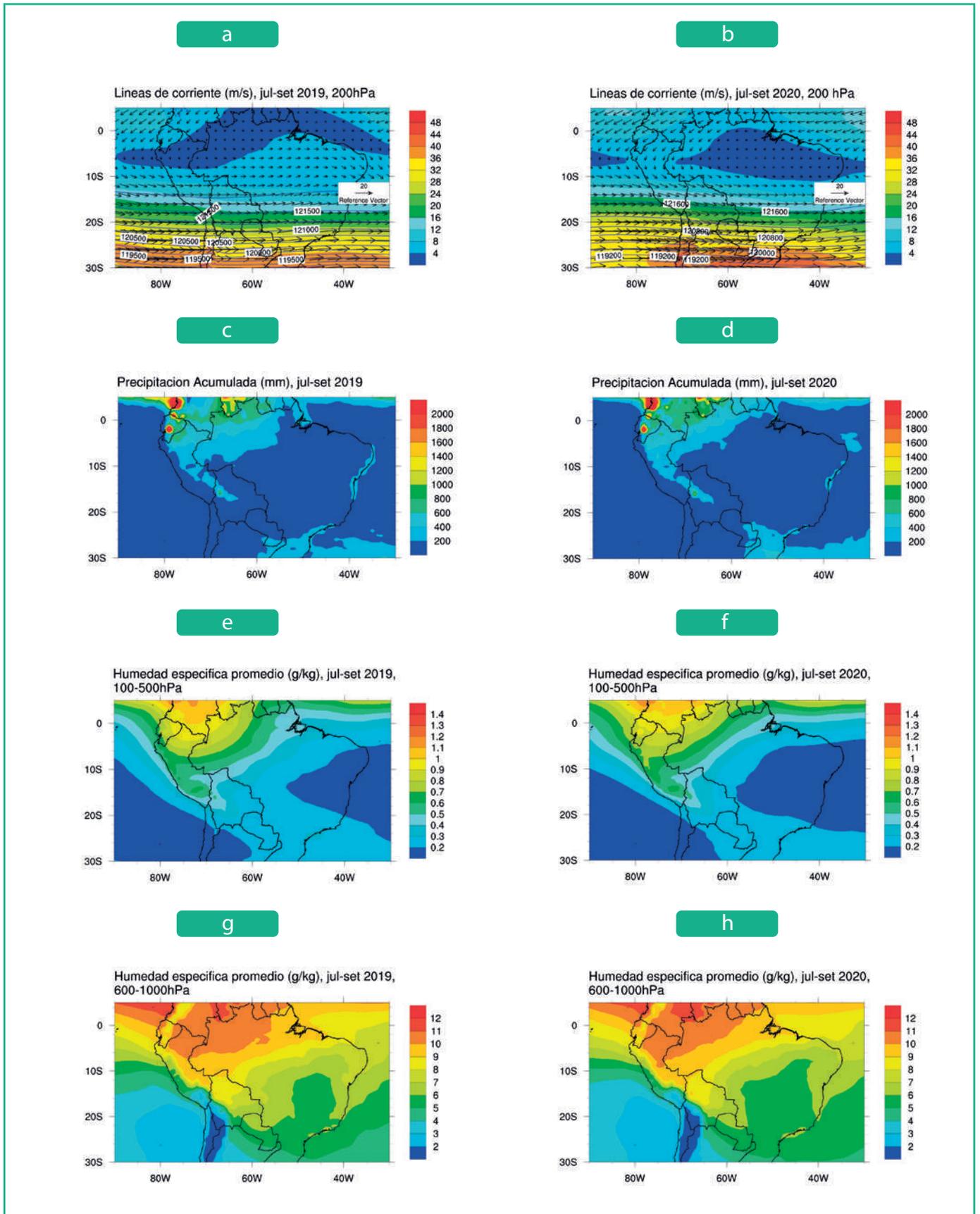
Durante los meses de julio a setiembre (invierno austral), los vientos fríos del oeste dominan gran parte del continente sudamericano en los niveles medios y altos de la atmósfera, contribuyendo la advección de aire seco, con poca actividad convectiva limitada sobre las crestas más altas de las cordilleras, siendo julio y agosto los meses más secos.

En el 2020, el mes de julio presentó ingreso de aire seco y frío en niveles altos ocasionando la disminución de la humedad, con valores de precipitación y temperatura mínima por debajo de su normal climatológica, al igual que el mes de agosto. Hacia el mes de noviembre se dio el ingreso de flujos de aire húmedos del este, con lo que se generaron lluvias aisladas.

La Figura 9, representa el comportamiento promedio de la atmósfera para los meses de julio a setiembre del 2020 y 2021 utilizando datos del

ERA5, donde se continúa observando flujos del noroeste sobre la sierra central del Perú (Figuras 9a y 9b) ocasionando valores bajos de precipitación (Figuras 9c y 9d) y humedad específica a bajos (Figuras 9e y 9f) y altos niveles (Figuras 9g y 9h), los cuales son condiciones naturales del periodo de estiaje.





**Figura 9. Sinóptica de Sudamérica que influye en el clima de la Cordillera Blanca durante el invierno austral.**

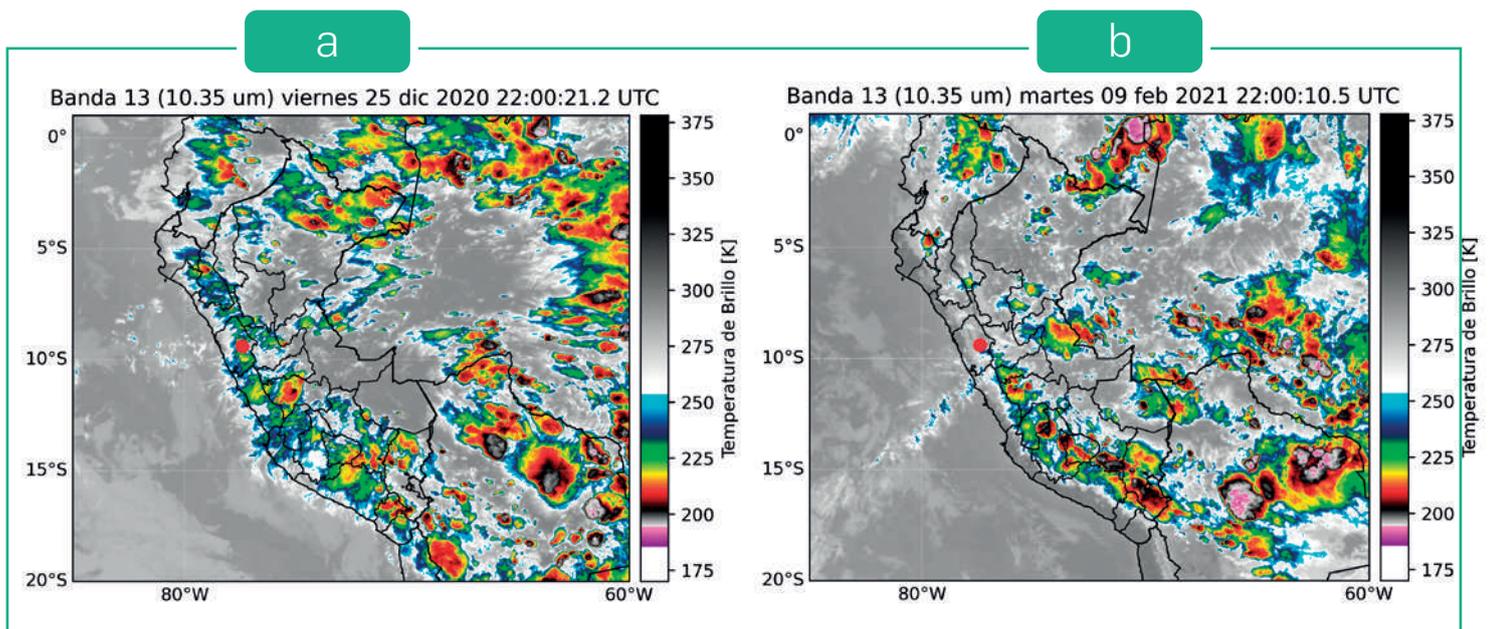
Líneas de corriente (m/s) con líneas de geopotencial (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>), promedio de julio a setiembre a 200 hPa para los años (a) 2020 y (b) 2021. Precipitación total (mm) acumulada de julio a setiembre para los años (c) 2020 y (d) 2021. Humedad específica (g/kg) para los meses de julio a setiembre promedio de 100 hPa a 500 hPa para los años (e) 2020 y (f) 2021. Humedad específica (g/kg) promedio, para el rango de julio a setiembre promedio de 500 hPa a 1000 hPa para los años (g) 2020 y (h) 2021.

## 2.2. MONITOREO DE LA DINÁMICA CONVECTIVA SOBRE LA CORDILLERA BLANCA

En los Andes del Perú, el régimen de lluvias está principalmente determinado por las tormentas convectivas profundas que se desarrollan sobre las cordilleras (Garreaud, 2009). La convección es el mecanismo físico responsable del ascenso de masas de aire que acaban formando las nubes. La microfísica de nubes controla la formación y crecimiento de las gotas nubosas y partículas de hielo que dan lugar a la precipitación.

La Figura 10 presenta información de la temperatura de brillo (°C) satelital de la banda 13 del satélite GOES-16, la cual es un indicador de actividad convectiva. En el día con la mayor precipitación registrada en la estación Palcacocha durante el periodo 2020-2021, el 25 de diciembre

del 2020 (Figura 10a), se presentaron un gran número de tormentas convectivas sobre la mayor parte de las Cordilleras. Houze (1993) menciona que las nubes de tormenta pueden producir precipitaciones continuas en un área de 100 km o más. Estos sistemas convectivos que se forman están relacionados con los fenómenos a escala sinóptica de gran circulación como la Alta de Bolivia (AB) (Figuras 8a y 8b), además otro factor importante para la convección en esas fechas es el transporte de humedad en niveles medios a altos que alcanzan la cordillera, humedad proveniente de la selva del país por los flujos de vientos del este, principalmente. De esta forma se generaron lluvias intensas y tormentas de nieve en las zonas más altas de las Cordilleras.



**Figura 10. Actividad convectiva usando datos de satélite.**

Imagen de temperatura de brillo (banda 13 del GOES-16) de los sistemas convectivos generados para los días (a) 25 de diciembre de 2020, cuando se presentó la precipitación máxima diaria del año hidrológico 2020-2021, y (b) 09 de febrero de 2021, cuando no ocurrió lluvia en la CB durante días. El punto rojo indica la ubicación referencial de la EMA Palcacocha (Figura 2).

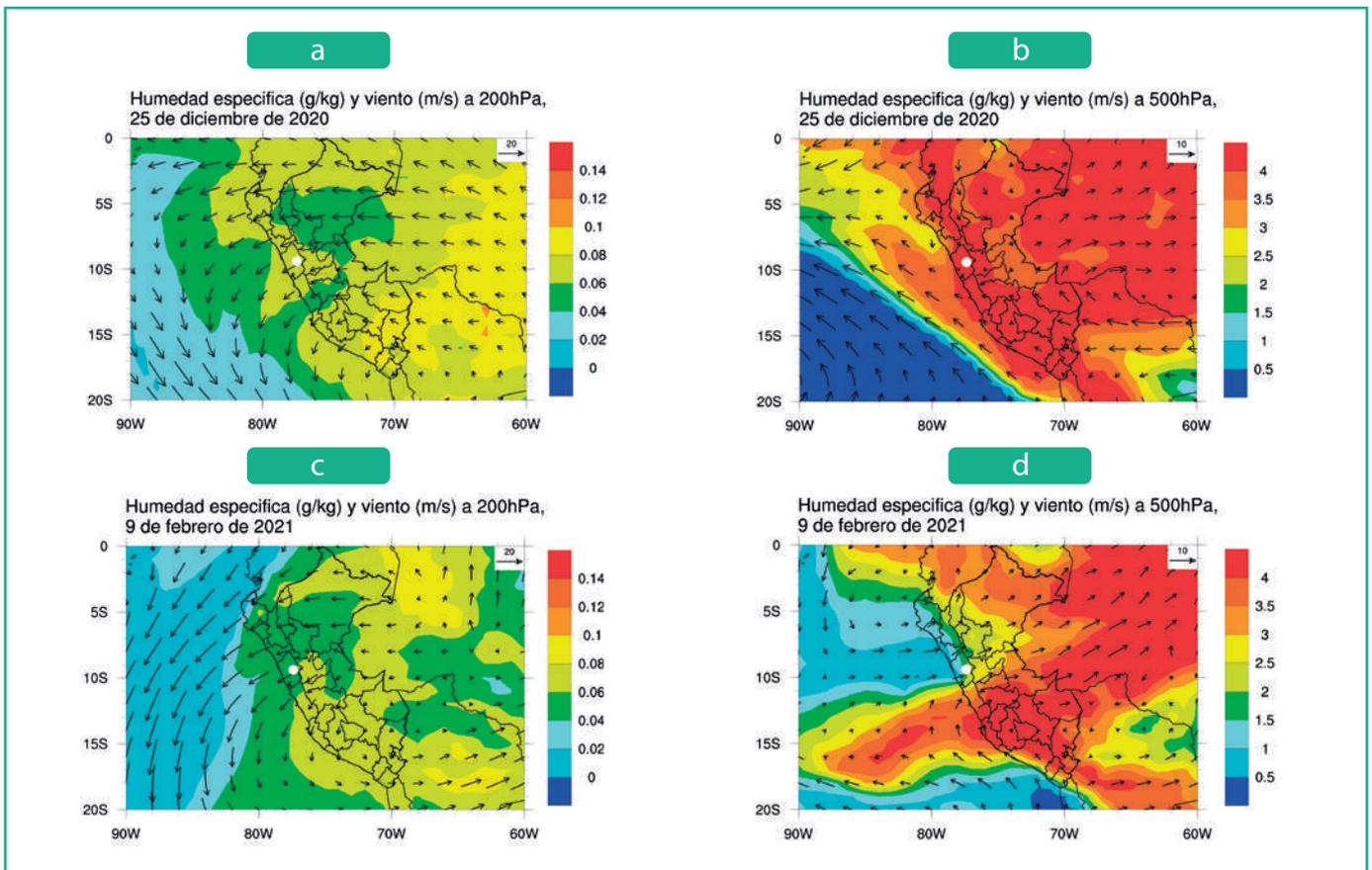
La Figura 10b también muestra la imagen GOES-16 del 9 de febrero cuando no hubo precipitaciones en varios días. Aunque días antes y después del 9 de febrero fueron días con nula precipitación sobre la CB, esta ausencia de precipitación no se cumple necesariamente para otras regiones del Perú. Este último fenómeno climático que afecta la CB es explicado analizando la humedad específica y el viento (Figura 11).

Mientras para el 25 de diciembre de 2020 se tiene una circulación anticiclónica en niveles altos con intensidad de vientos del este (Figura 11a), a niveles medios se tiene vientos del sureste del Perú y sobre la región costera se observan vientos de este a oeste, lo cual genera arrastre de humedad desde el continente hacia las cordilleras y la CB (Figuras 10a y 11b). Por otro lado, el 9 de febrero de 2021, aunque se presentaron vientos significativamente fuertes a niveles altos desde el este de las cordilleras (Figura 11c), la precipitación fue nula sobre la CB, esto se explica debido a que la circulación en esos días generaron vientos del oeste a niveles

medios (desde el Pacífico tropical hacia la Selva Peruana, Figura 11d) sobre la región Ancash y el resto del norte del Perú hasta Tumbes.

Caso contrario se observa en la Figura 10b para el 9 de febrero 2021 que en el Centro y Sur del Perú si se presentaron precipitaciones en zonas de montañas, coincidiendo con los datos de reanálisis que muestra que la humedad específica es alta sobre el centro y sur del Perú en esta fecha (Figura 11d), y aunque se muestra alta humedad desde el Pacífico y vientos del oeste arrastrando dicha humedad sobre las cordilleras Centrales y al Sur, para el caso del norte se observa baja humedad específica, debido principalmente a que el viento del Pacífico arrastró aire seco hacia las cordilleras del Norte.

Se puede observar claramente en la Figura 11d como el aire seco del oeste impacta todo Ancash, inhibiendo actividad convectiva alguna sobre la CB.



**Figura 11. Análisis de humedad en niveles medios y altos de la atmósfera.**

Viento (m/s) y humedad específica (g/kg) para el (a) 25 de diciembre de 2020 (día de mayor precipitación en la CB durante el 2020-2021) a 200 hPa y (b) 500 hPa. Igualmente para (c) y (d) pero para el día 9 de febrero de 2021 (día de nula precipitación o día seco en la CB). El punto blanco en todas las gráficas indica la ubicación referencial de la estación Palcacocha. Datos utilizados son reanálisis de ERA-5 del ECMWF.

Existe una inconsistencia entre la relación de precipitación andina y los vientos del este a niveles altos (200hPa), la cual era lineal y bien definida hasta finales de la década de los 90s (Garreaud 2009; Vuille et al. 2008), pero ahora vienen apareciendo casos más frecuentes que no cumplen esta relación, y la tendencia es que se debe considerar condiciones a niveles medios.

A diferencia de la escala estacional mostrado antes, el análisis diario muestra que actualmente los valores altos de humedad y viento a niveles medios son variables condicionantes para generar la actividad convectiva.

En general, se entiende que sobre la CB los cambios en el clima han generado cambios en los mecanismos condicionantes para la generación de precipitación.

## Referencias

Garreaud, R and Seluchi, M. 2003. Pronóstico de la convección en el altiplano Sud Americano empleando el modelo regional ETA/CPTEC. *Meteorológica*. 26.26, N°1 y 2(2001) 25 – 38.

Garreaud, R. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 7, 1-9. [http://www.dgf.uchile.cl/rene/PUBS/Andes\\_weather&climate.pdf](http://www.dgf.uchile.cl/rene/PUBS/Andes_weather&climate.pdf)

Gilford, M. T., Vojtesak, M. J., Myles, G., Bonam, R. C., y Martens, D. L. (1992). *South America South of the Amazon River: A Climatological Study*. USAF Environmental Technical Applications Center, 716p.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. (2019). ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on < Jul-2021 >), doi:10.24381/cds.6860a573.

Houze, R. A. (1993). *Dinámica de nubes*, Academic Press, San Diego, Cal.

INAIGEM (2018). *Inventario nacional de glaciares: Las cordilleras glaciares del Perú*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), 354p. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/5176>

INAIGEM (2021). *Boletín hidrometeorológico 2019-2020*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), 25p.

IPCC AR6 (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Lenters, J. D., y Cook, K. H. (1997). On the Origin of the Bolivian High and Related Circulation Features of the South American Climate. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54, 656–678.

Lenters, J. D., y Cook, K. H. (1999). Summertime precipitation variability over south america: role of the large-scale circulation. *Monthly Weather Review*, 127, 409-431.

Navarro-Serrano F, López-Moreno JI, Domínguez-Castro F, et al. (2020). Maximum and minimum air temperature lapse rates in the Andean region of Ecuador and Peru. *Int J Climatol*. 2020;1–19. <https://doi.org/10.1002/joc.6574>

Saavedra, M., Calvo, M., y Jiménez, C. (2011). Caracterización climática de la circulación atmosférica en América del Sur Climatic characterization of the atmospheric circulation in South America. *Revista de Investigación de Física*, 14, 1–7.

Vuille, M., Kaser, G., and Juen, I. (2008). Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global Planet. Change*, 62(1-2), 14-28. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.11.003.

