

Boletín Hidrometeorológico

2019-2020



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Presentación

La poca información del impacto del cambio climático en zonas de montaña, la alta variabilidad en la disponibilidad de sus recursos hídricos, el desconocimiento de los mecanismos que ocasionan las avalanchas de hielo y roca, y eventos de aluviones, son los mayores problemas que enfrentan las comunidades altoandinas con alta vulnerabilidad.

El presente Boletín presenta un análisis de los datos históricos recolectados por los equipos profesionales de medición de INAIGEM del sistema Hidrometeorológico de la laguna proglacial Palcacocha, como caso representativo de la Cordillera Blanca. Asimismo, se usa información pública disponible de forma gratuita de los diversos centros de investigación utilizados en el mundo. Así se busca generar nueva información necesaria para la prevención y mitigación de eventos catastróficos.

El análisis presentado está focalizado para el año hidrológico 2019-2020. Entre los resultados relevantes, se muestra que, en diciembre del 2019 se detectaron valores extremos de precipitación, lo cual produjo cambios en el volumen de la laguna Palcacocha a una escala estacional. El caso contrario ocurrió los meses de enero a marzo del 2020, registrando una reducción significativa de la precipitación en comparación a años anteriores. Aunque se presentaron condiciones de vientos del este y la presencia de la Alta de Bolivia (AB) más intensificada, idóneas para el traslado de humedad desde las zonas amazónicas a las regiones de montaña (mecanismo físico para generar precipitación en los Andes), fue la poca humedad en altos niveles de la atmósfera al oeste amazónico del continente sudamericano lo que produjo la poca precipitación en la Cordillera Blanca a inicios del 2020. No se aprecia efectos asociados al ENSO, por el contrario los índices climáticos muestran que durante el año hidrológico 2019-2020 se tuvo un año normal.

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 Ramirez 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 2019-2020	17
2.1 CONDICIONES ATMOSFÉRICAS SINÓPTICAS QUE AFECTARON LA SIERRA DE ANCASH	17
a) Condiciones sinópticas para la época húmeda (Enero a Marzo) 2019 y 2020	18
b) Condiciones para la época seca (Julio a Setiembre) de 2019 y 2020	20
2.2. DINÁMICA CONVECTIVA SOBRE LA CORDILLERA BLANCA	22
Referencias	23

I. MONITOREO HIDROMETEOROLÓGICO EN LA CORDILLERA BLANCA

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).

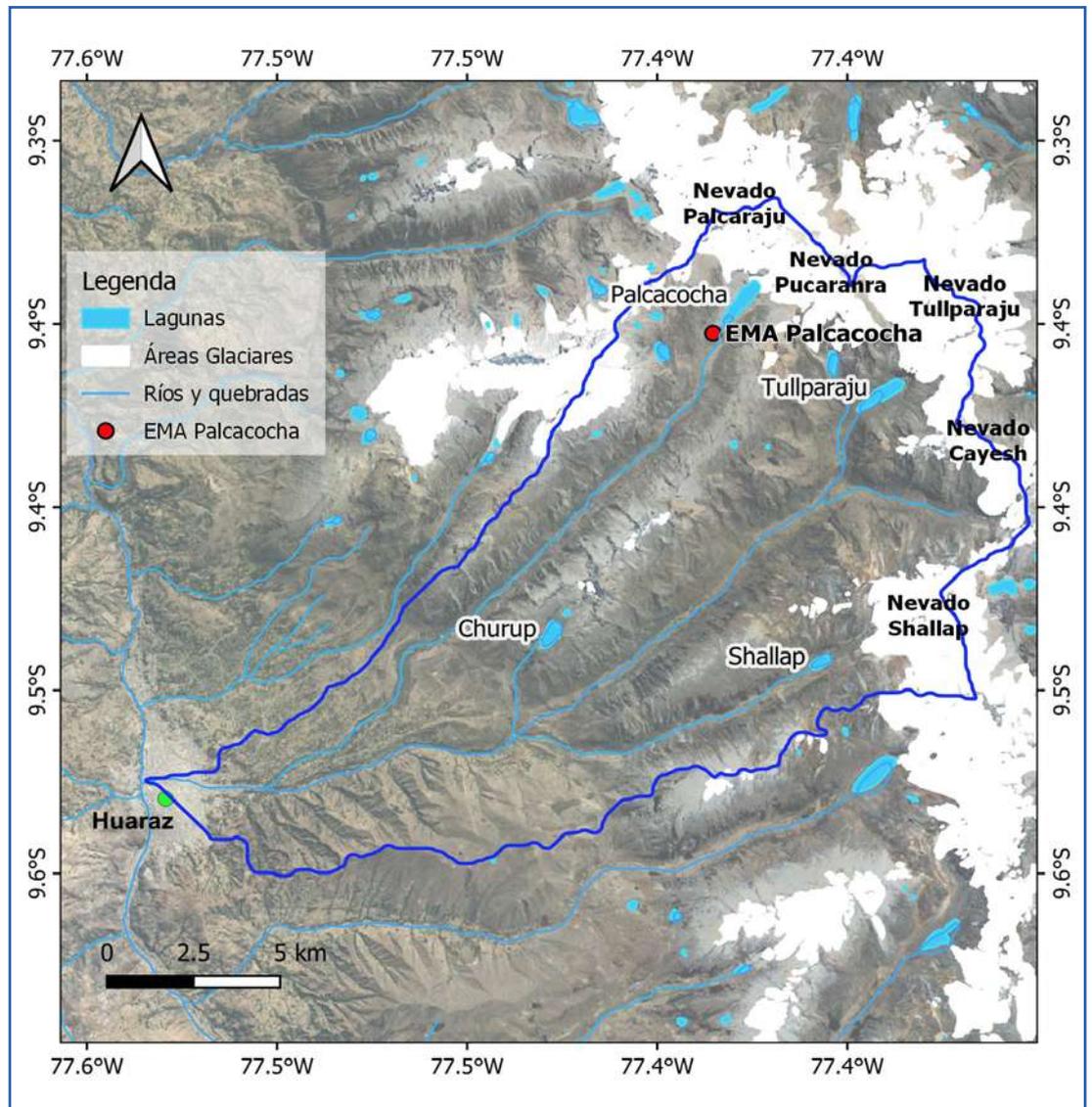


Figura 1. Laguna Palcacocha. Mapa de ubicación de la laguna Palcacocha en la subcuenca del río Quillcay (perímetro en rojo). Palcacocha es una de las muchas lagunas de origen glaciar peligrosas ante futuro desborde o aluvión. El mapa en la derecha muestra parte de la Cordillera Blanca en el departamento de Ancash. A la izquierda se muestran los mapas de ubicación e imagen de la laguna monitoreada en tiempo real por INAIGEM. El perímetro en azul se muestra la Subcuenca Quillcay y el punto en rojo la ubicación de la estación meteorológica automática (EMA) Palcacocha de INAIGEM (Figura 2).

1.1 MONITOREO DE LA LAGUNA PALCACOCHA

Desde febrero del 2017 el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montañas- INAIGEM viene monitoreando la laguna Palcacocha (Figura 2a) mediante una estación meteorológica automática (EMA) (Figura 2c), la cual toma registros cada 5 minutos de diferentes variables meteorológicas entre ellas la precipitación, temperatura y humedad. Además, se tiene instalado dos (02) reglas limnimétricas (Figura 2b) a las orillas de la laguna, de donde se obtienen las variaciones del nivel de agua en época de lluvia y estiaje. También se debe considerar que

el Gobierno Regional de Ancash, entre el 2011 y 2012, instaló 10 sifones (Figuras 2e, 2f, 2g y 2h) que se encargan de drenar el agua de la laguna para regular su volumen. En el verano usualmente son habilitados los 10 sifones, para reducir el nivel de la laguna evitando posibles desbordes en época de lluvia. Caso contrario, durante el invierno, sólo dos o un sifón se encuentran habilitados para conservar el recurso hídrico. Por otra parte, el INAIGEM viene realizando aforos semanalmente con el fin de monitorear la salida de caudales de la laguna Palcacocha.



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 cuadrado amarillo en (a). (c) EMA Palcacocha, ubicado sobre la morrena al suroeste de la laguna, con posición referencial dada por el cuadrado verde en (a). (d), (e) y (f) muestra el sistema de sifoneo, instalado en la ubicación referencial 1, 2 y 3 en (a), respectivamente. (g) punto de desagüe del sistema de sifones río abajo.

1.2 VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA CORDILLERA BLANCA

INAIGEM tiene datos hidrometeorológicos del sistema de la laguna Palcacocha desde el año 2017 hasta el 2020 (Tabla 1), los cuales son usados para el análisis de las variaciones extremas o más significativas del sistema climático andino en este

periodo, como caso representativo de la variabilidad climática de la Cordillera Blanca debido a la elevación que se encuentra instalada (4607 msnm), elevación donde se considera niveles de monitoreo de libre atmósfera.

Tabla 1. Datos de la estación Palcacocha. Datos para tres años hidrológicos (Set-Ago) de precipitación mensual (2017-2020) y temperaturas extremas mensuales (2019-2020). Los valores de temperatura mensual, son los máximos (mínimos) valores en el mes indicado.

Mes/Año	Precipitación acumulada mensual (mm)			Tmáx (°C)	Tmín (°C)
	2017-2018	2018-2019	2019-2020	2019-2020	
Set	27.6	27.4	33.3	13.1	-2.3
Oct	39.3	85.9	53.6	11.0	-2
Nov	70.1	162.3	93.2	12.2	-1.6
Dic	165.9	74.9	182.9	12.7	-0.6
Ene	192.3	156	87.4	12.4	-2
Feb	120.1	166.1	87.6*	12.7*	-2*
Mar	213.1	158	87.8	13.0	-2
Abr	88.4	74.4	22.2	15.0	-1
May	46.2	23.6	30.4	14.0	-1
Jun	8.9	3.8	0	15.0	-1
Jul	3	4.6	4.8	12.3	-0.6
Ago	13.5	0.5	0.8	14.4	-0.9

*Datos completados

a) Precipitación

Durante los años hidrológicos del período 2017 al 2020 (3 años hidrológicos) se registró datos continuos obteniendo una precipitación acumulada de 2609.9 mm (100%) en las cercanías de la laguna Palcacocha. Si se analiza este registro de precipitación acumulada por cada año hidrológico, se muestra que durante los años hidrológicos 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020, se obtuvieron las precipitaciones en cada año hidrológico la cantidad de 988.4 mm (37.9%), 937.5 mm (35.9%) y 683.9 mm (26.2%), respectivamente (% con respecto a lo registrado desde el 2017 al 2020). Es decir, el año hidrológico 2019-2020 tuvo una reducción significativa de la variable de precipitación con respecto a los años hidrológicos previos.

En el periodo 2017-2020 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 213.11 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 (Jun-Ago). Al comparar los años hidrológicos 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020, 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, pero con un aproximado de 77% de precipitación en Palcacocha concentrada durante Nov-Mar. Es también notorio que es durante estos meses que ocurren la mayor cantidad de fenómenos naturales peligrosos como avalanchas y aluviones.

La poca precipitación del año hidrológico 2019-2020 es significativamente menor durante los meses de Enero a Abril, entre un 30 a 40% del valor promedio del periodo 2017-2020. Esto conlleva a una gran actividad de quemadas de pastizales (costumbre andina para producir lluvia) durante los meses de estiaje (Junio a Octubre).

Para analizar en más detalle lo acontecido el año hidrológico 2019-2020, en la Figura 4 se muestra el histograma de precipitación mensual. Se puede observar que las precipitaciones en diciembre del 2019 tuvieron valores máximos registrados mayores a 180mm. 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 2020 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), mientras que para el caso del año 2019-2020 el mes de Diciembre aproximadamente se duplicó en valor en comparación de los meses Noviembre, Febrero y Marzo, es decir, para el 2019-2020 la máxima variabilidad y actividad convectiva se concentró en gran medida en finales del 2019. Específicamente, en la sección 2.2 se puede apreciar los valores máximos regionales que llegaron a ocurrir los días 03 y 19 de Diciembre, alcanzando un valor máximo de precipitación mensual acumulada de 182.88 mm. Por otra parte, el inicio de la época seca comenzó en el mes de Junio donde no se registró precipitación.

Además, se analizó los cambios anuales de precipitación con respecto a los índices climáticos del pacífico, es decir con el Índice Costero El Niño (ICEN, http://met.igp.gob.pe/elnino/lista_eventos.html) y el Índice el Niño Oceánico (ONI, https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

Los índices ICEN y el ONI coinciden en forma general en que durante los periodos hidrológicos 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020, ocurrieron La Niña, El Niño y un año normal, respectivamente. Como se observa en la Figura 3, durante la Niña 2017-2018 se registró niveles altos de precipitación, mientras que para el caso de El Niño 2018-2019 se registró niveles normales de precipitación. Para el año normal 2019-2020 los valores de precipitación descendieron significativamente. Aunque se realizó un análisis más amplio, la poca información es una limitante para llegar a conclusiones finales. Se seguirá con el monitoreo y análisis en los siguientes años para determinar las causas y efectos relacionados a la precipitación y El Niño - La Niña.

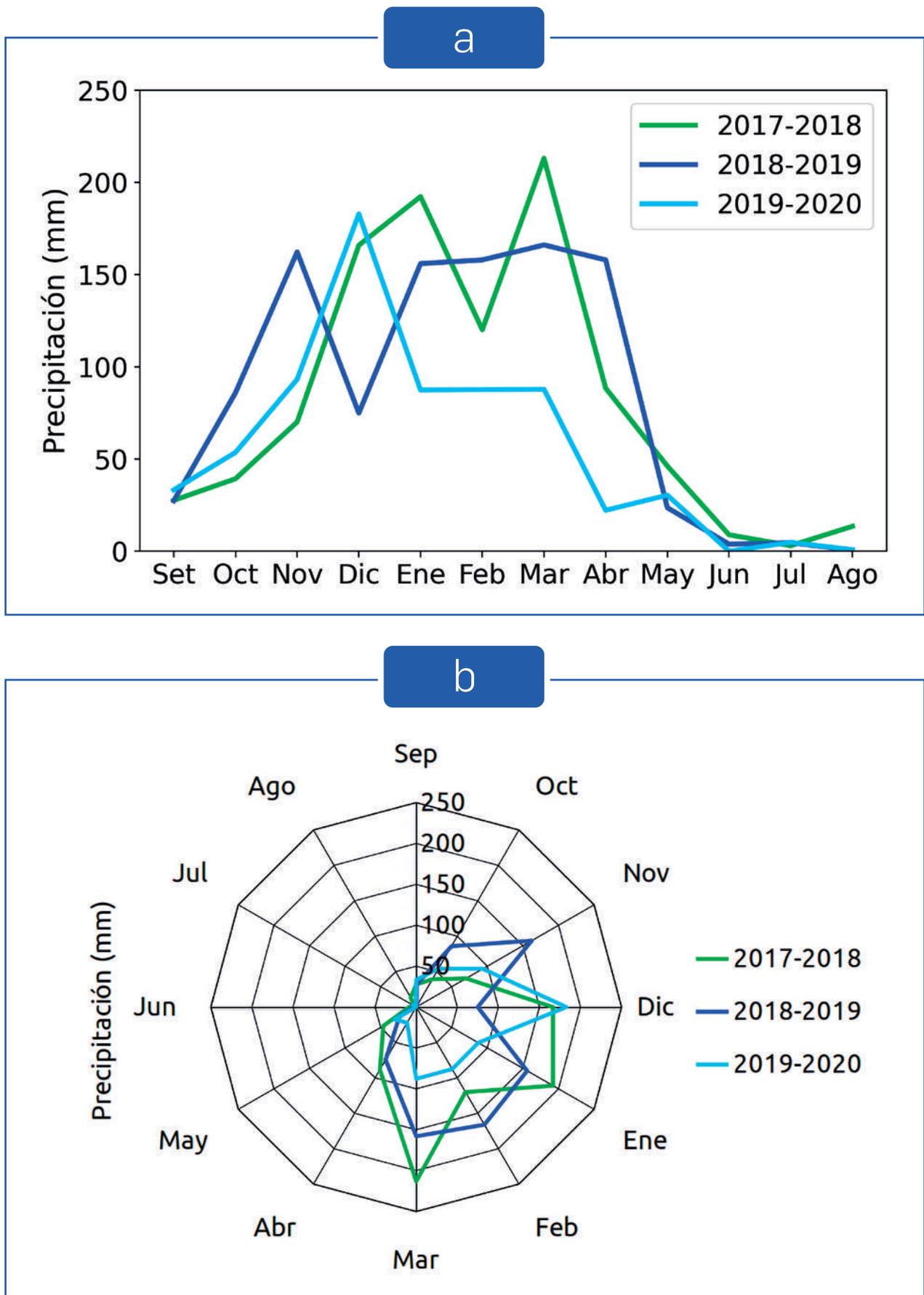


Figura 3. Variabilidad de la Precipitación en Palcacocha.

Análisis temporal de la precipitación de la estación Palcacocha para el periodo 2017-2020. (a) Gráfica de líneas de los datos de precipitación mostrados en la Tabla 1. (b) Gráfica radial de los datos usados en (a).

b) Temperaturas

En la comparación anual, la variabilidad de la temperatura en las cercanías de la laguna Palcacocha se mantiene similar, por lo que a continuación se presenta el análisis de datos solo para el año hidrológico 2019-2020. En este año hidrológico se registraron valores máximos de temperaturas que alcanzaron los 15°C para los meses de Abril y Junio (Tabla 1). Estos valores se

dieron al inicio de la época seca, cuando la cobertura nubosa es escasa, permitiendo así mayor radiación solar incidente sobre la superficie en el mediodía y las primeras horas de la tarde. Por otra parte, las temperaturas mínimas ($T_{mín}$) tienen un comportamiento oscilante, con valores por debajo de los 0°C durante todo el año, donde el descenso más severo se registró en el mes de Septiembre (-2.3 °C).

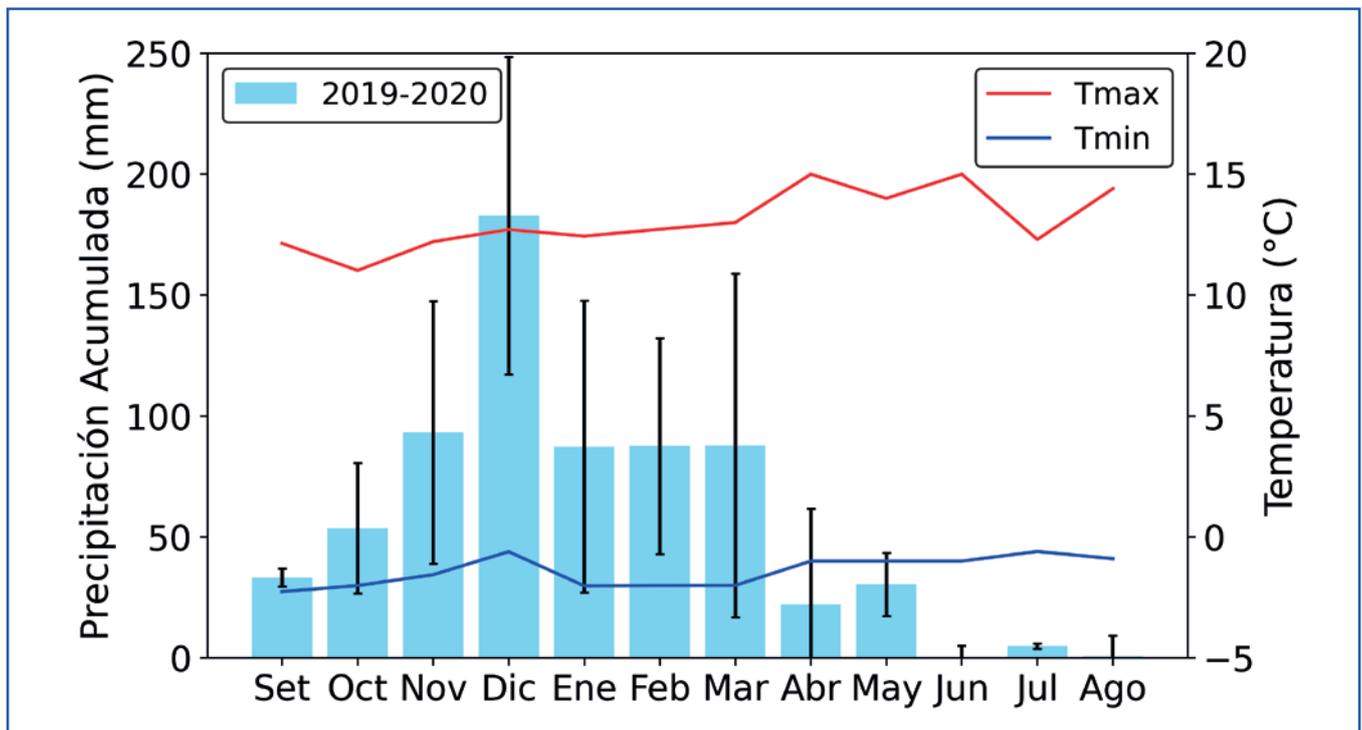


Figura 4.

Precipitación mensual para el año hidrológico (Set-Ago) 2019-2020 (histograma, en celeste) e intervalos de confianza al 95% (barras, en negro) estimado para el periodo 2017-2020, de la la estación Palcacocha. En rojo y azul, se muestran las temperaturas máximas (T_{max}) y mínimas (T_{min}), 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, DEF) se presentan las menores temperaturas máximas, esto se debe 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) produciéndose los mayores valores de temperaturas mínimas ante condiciones de cielos despejados.

1.3 VARIABILIDAD CLIMÁTICA EXTREMA EN LA CORDILLERA BLANCA

Es importante conocer los cambios en los indicadores climáticos en zonas de montaña y su impacto a los elementos de los ecosistemas de montaña, como áreas glaciares o vegetación andina. Para ello se calcularon los indicadores extremos en base a las definiciones dadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio

Climático (IPCC, 2013), considerando los datos diarios registrados por la estación Palcacocha de temperatura y precipitación, para el año hidrológico 2019-2020, 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 2019-2020. Los datos diarios de precipitación y temperaturas de la estación Palcacocha, fueron utilizados para el cálculo de los índices. Nota: En el mes de febrero 2020 se tiene pérdida de datos medidos

ID	NOMBRE DEL ÍNDICE	VALOR	UNIDAD
FDO	Días de heladas	85	Días
TXx	Máximo de temperaturas máximas	15	°C
TNx	Máximo de temperaturas mínimas	3	°C
TXn	Mínimo de temperaturas máximas	4	°C
TNn	Mínimo de temperaturas mínimas	-2.3	°C
DTR	Rango diurno de temperatura	9.3	°C
RX1day	Cantidad máxima de precipitación en un día	17.3	mm
Rx5day	Cantidad máxima de precipitación en 5 días	45	mm
SDII	Índice simple de intensidad diaria	4.6	mm/día
R10	Número de días con precipitación intensa	9	Días
R20	Número de días con precipitación muy intensa	0	Días
CDD	Días secos consecutivos	57	Días
CWD	Días húmedos consecutivos	26	Días
PRCPTOT	Precipitación total anual en los días húmedos	575.9	mm

Como se aprecia en la Figura 4, los valores de $T_{mín}$ mensual son menores que cero durante todo el año. Los índices TNn y TNx muestran que los valores de $T_{mín}$ diaria oscila en el rango de $[-2.3, 3.0]$ para el periodo 2019-2020 de los datos de la estación Palcacocha a 4607 msnm. Además, 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 5000 y 6000 msnm en la Cordillera Blanca, obteniendo los rangos de valores de entre $[-4, -2.4]$ y $[-8.5, -6.7]$, respectivamente. 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. Por otra parte, en el último reporte del IPCC AR6 (2021), las temperaturas superficiales promedios se incrementarán entre 2.1°C a 3.5°C a finales del siglo 21 para escenarios de grado medio (SSP2-4.5) de emisiones de gases de efecto invernadero. Para el caso de escenarios de emisiones muy altas (SSP5-8.5) se tiene unas proyecciones de entre 3.3°C a 5.7°C . Así, que los rangos de valores de temperatura mínima en la Cordillera Blanca estarán alrededor del 0°C , lo cual nos permite inferir que se proyecta una pérdida de los glaciares y cuerpos nevados alrededor de los 5000 msnm y algunos remanentes a 6000 msnm para lo que resta del siglo 21.

El rango de temperatura diurna (diferencia de la media mensual entre $T_{máx} - T_{mín}$) representado por el índice DTR muestra un valor de 9.3°C para Palcacocha, presentándose pequeña diferencia con respecto a la temperatura máxima mensual

alcanzada durante todo el año (TXx). Este resultado se debe a que los valores de temperatura mínima mensual alcanzan una media de -1.41°C , lo que permite un menor contraste entre el DTR y la mayor temperatura máxima registrada para la Cordillera Blanca.

El número de días con precipitación intensa para el 2019-2020 fue de 18 días superando los 10 mm/día (RX1day, RX5day, SDII y R10) y el acumulado anual en los días más húmedos (≥ 1 mm) fue de 575.9 mm, donde el mayor número de días húmedos se dio en el mes diciembre como se puede apreciar en la Figura 4.

La precipitación fue heterogénea en el tiempo, abundante en diciembre que superan los 180 mm y con valores por debajo de los 90 mm en los meses de enero, febrero y marzo, 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.



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. Por ejemplo, el año hidrológico 2019-2020 se observa como un año con poca precipitación acumulada, esto repercute

en la reducción del nivel 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, la cual está asociada 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, entre otros. 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 2020. Se observa un incremento del nivel de la laguna (poca profundidad) en los meses de Enero a Abril de 2020 y una disminución del nivel de la laguna (mayor profundidad) en los meses de Setiembre y Octubre de 2019 (Ver Tabla 3 y Figura 5). Asimismo, se comparó los cambios del nivel de la laguna del año 2019-2020 con los niveles mensuales promedios obtenidos desde el 2017. Se observa que, aunque en el año hidrológico 2019-2020 ocurrió poca precipitación (Figura 3), si hubo un ligero incremento del nivel de espejo de agua durante los meses de Enero a Marzo en comparación con la media del periodo 2017-2020. Esto se debió a la regulación del sistema de sifonamiento (Figura 6) por parte de la administración del gobierno regional de Huaraz. Como se observa en la Figura 6, entre 9 a 10 sifones estuvieron activos desde setiembre del 2019 hasta abril del 2020, por lo que el nivel de la laguna fue contenido para evitar sobrepasar el nivel

de rebose. Luego, alrededor del periodo de estiaje (desde Mayo a Agosto) sólo se tuvieron activos entre 3 a 6 sifones.

Las variaciones mensuales de los niveles de la laguna Palcacocha (Tabla 3 y Figura 5) presentan una relación dependiente 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 2019-2020. 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 del espejo de agua/ mes 2019-2020 (m)			Profundidad media(m) 2017-2020
			Media	Máximo en magnitud	Mínimo en magnitud	
Set	-2.9	-2.9	-2.8	-3.3	-3.0	-2.9
Oct	-2.7	-2.9	-3.2	-3.3	-3.0	-2.9
Nov	-2.6	-2.4	-2.9	-2.9	-2.0	-2.6
Dic	-2.6	-2.2	-2.5	-2.3	-2.1	-2.4
Ene	-2.7	-1.9	-1.5	-1.9	-1.3	-2.1
Feb	-2.5	-1.6	-1.2	-1.8	-0.9	-1.7
Mar	-2.6	-1.6	-1.0	-1.5	-0.6	-1.7
Abr	-2.9	-1.2	-1.7	-1.7	-1.5	-1.9
May	-2.6	-0.8	-2.5	-2.8	-1.6	-2.0
Jun	-2.7	-0.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.1
Jul	-3.1	-1.0	-2.9	-3.0	-2.8	-2.3
Ago	-3.2	-1.5	-3.0	-3.0	-2.8	-2.5

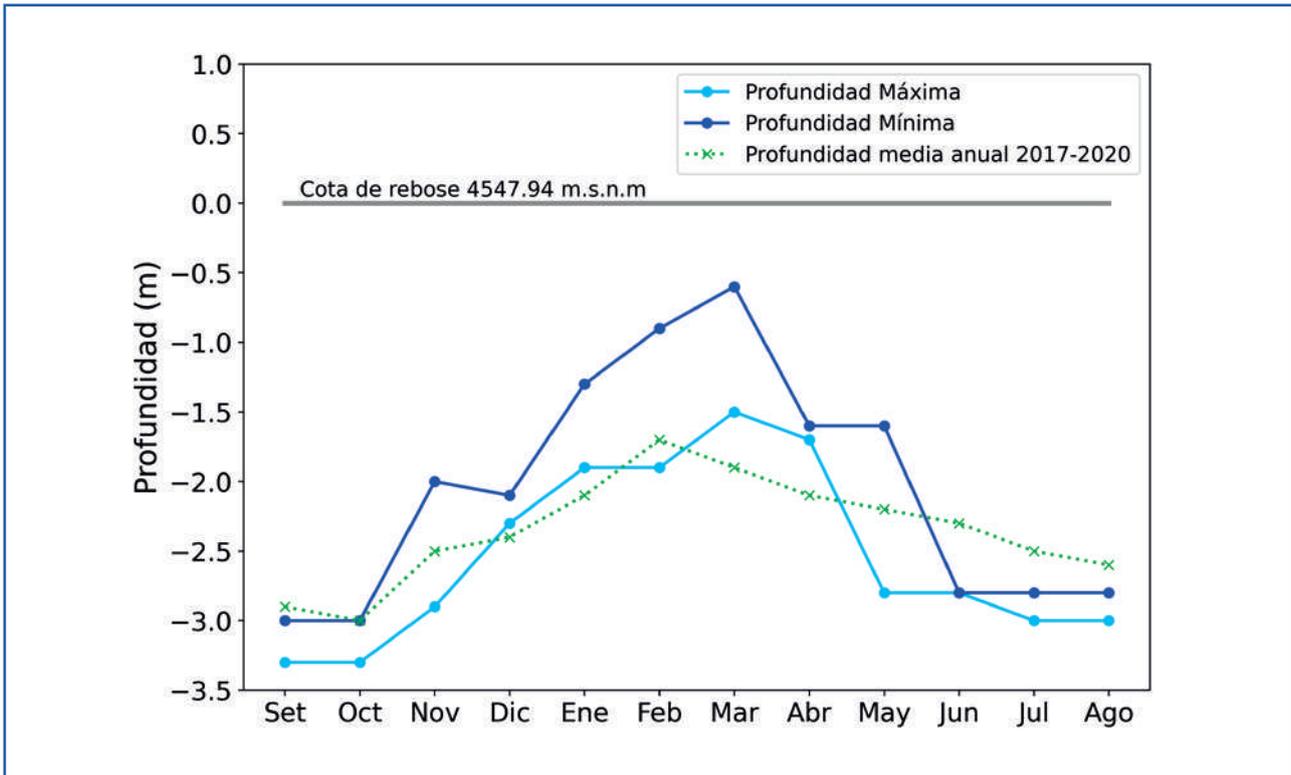


Figura 5. Hidrograma de incrementos de nivel (o cota o espejo) de agua de la laguna Palcacocha. Profundidad Mínima y Máxima se refieren a los valores mínimos y máximos en magnitud. Los valores de profundidad son dados con respecto al nivel de rebose (Profundidad=0.0) en unidades de metros lineales (m).

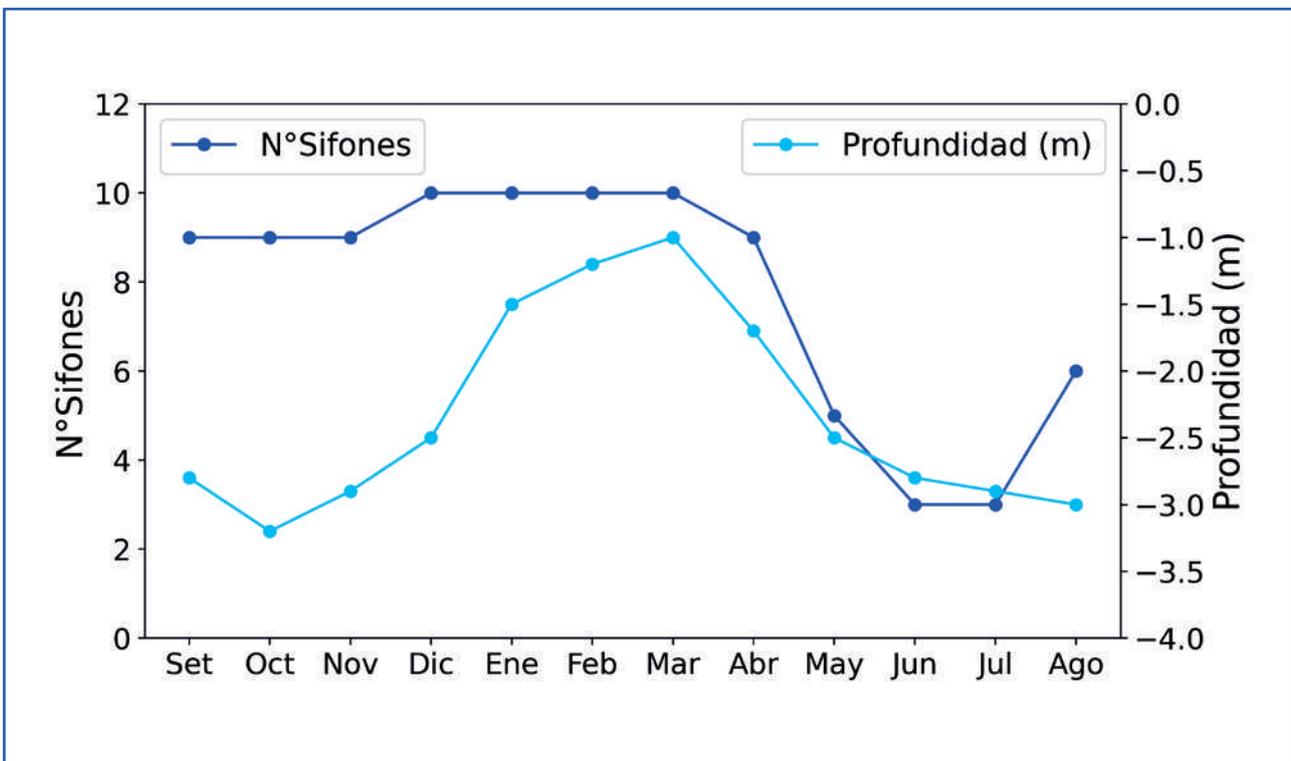


Figura 6. Comparación de los números de sifones activos por mes. El sistema de sifonaje contiene 10 sifones (Figura 2), por lo que 10 es el valor máximo de SIFONES activos. Los valores de profundidad son dados con respecto al nivel de rebose (Profundidad=0.0) en unidades de metros lineales (m).

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).

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 sifonaje (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 sifonaje 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 datos que solo contienen variabilidad natural (Figura 7).

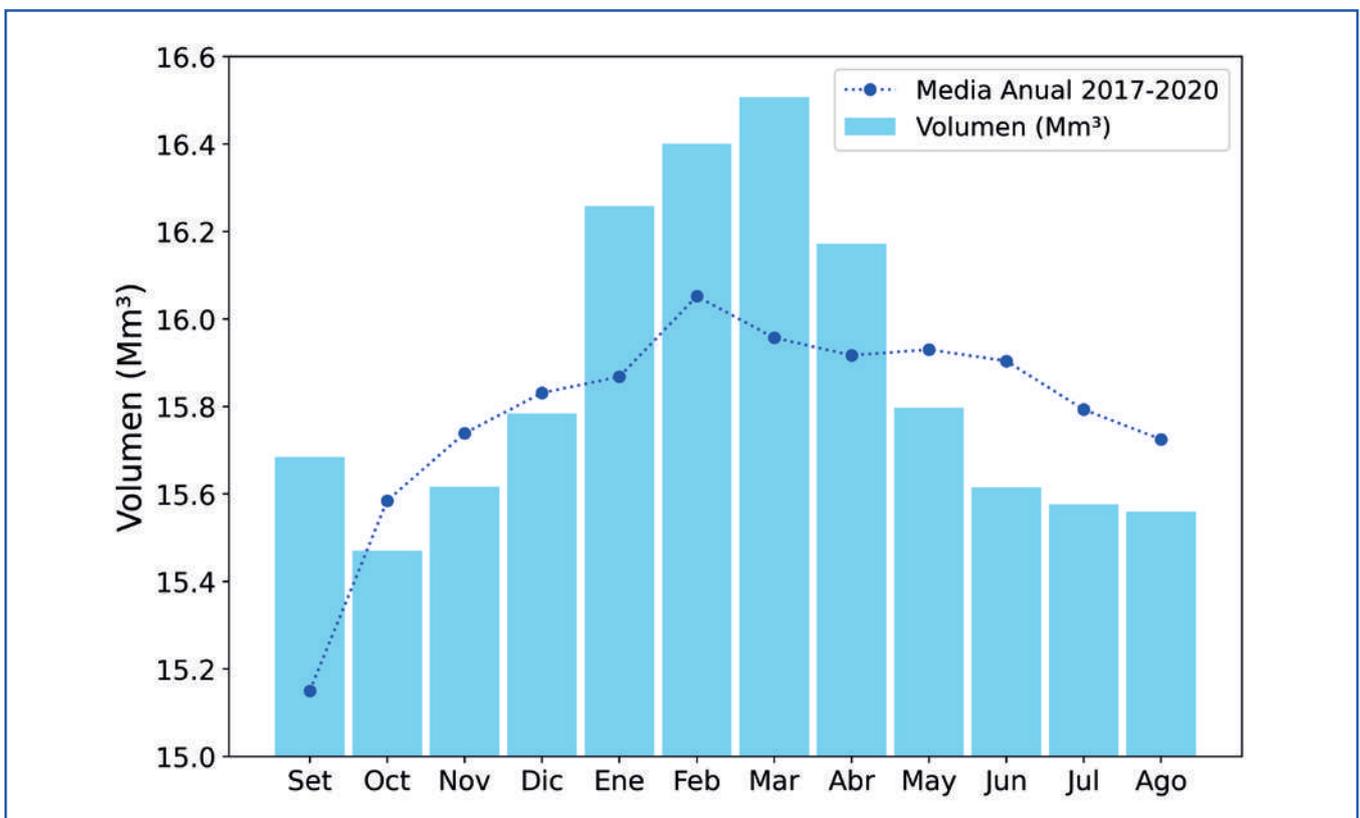
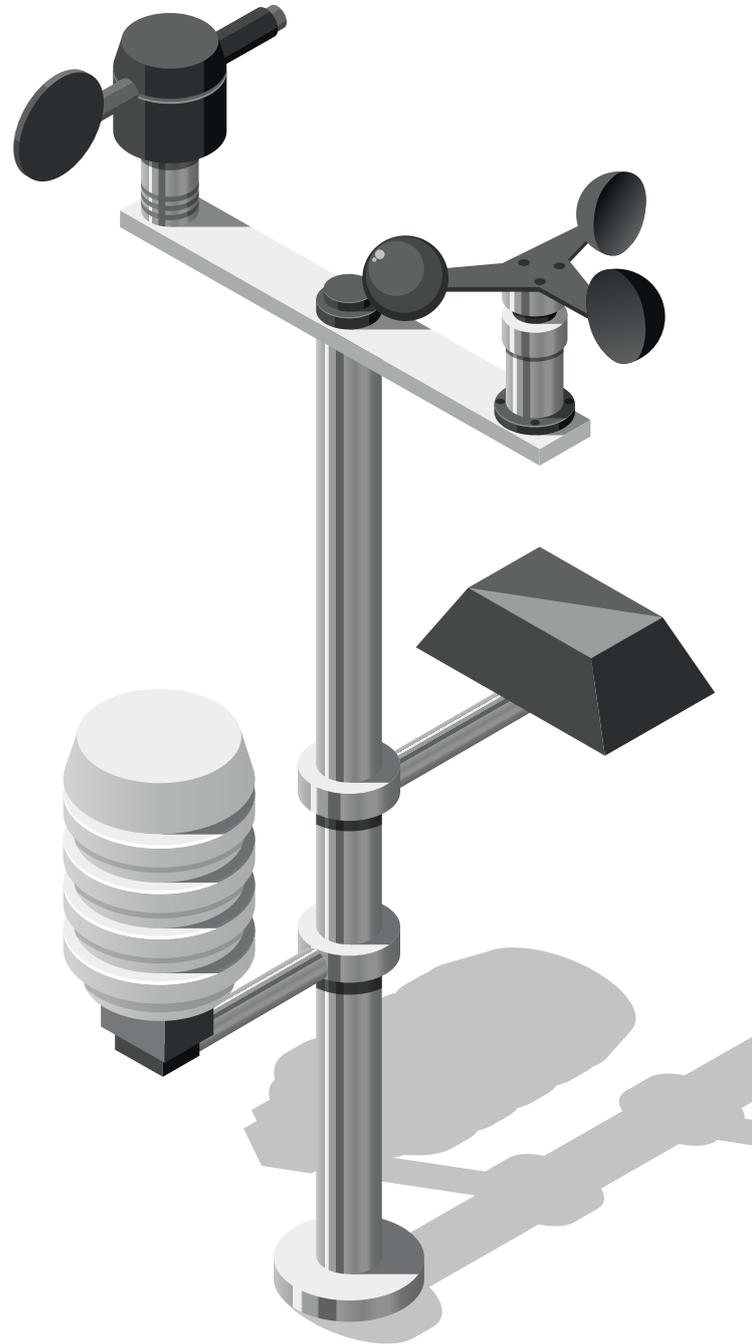


Figura 7. Volumen de la laguna Palcacocha.

Volumen en unidades de Millones de metros cúbicos (Mm³). Las barras indican el volumen mensual en Mm³ durante el periodo 2019 - 2020, mientras que las líneas punteadas muestran los valores medios de volumen por mes para el periodo hidrológico 2017-2020.

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 Enero a Marzo de 2020 ($\approx 16.5 \text{ Mm}^3$, en el mes de Marzo); mientras que el menor valor de volumen almacenado ocurrió en el mes de Octubre de 2019 ($\approx 15.5 \text{ Mm}^3$). Por otra parte, se observa que el nivel de agua, en la laguna Palcacocha presenta valores ASCENDENTES durante los meses de Octubre del 2019 a Febrero del 2020, superior a lo mostrado por el gradiente de la media histórica 2017-2020, mientras que valores descendentes, el resto del año. La alta variabilidad y mayores valores del volumen de la laguna se centra en los meses de la estación de verano (Enero a Marzo), y aunque el pico de precipitación fue dado el mes de Diciembre, el impacto en el incremento de la laguna se observa en una escala temporal mayor y retardado.

El impacto del volumen de la laguna por la precipitación es directo e indirecto. Directo, cuando precipita directamente en le área de la laguna, e indirectamente, cuando precipita a los alrededores como en las áreas glaciares, y otras regiones que aportan a la laguna posteriormente debido al deshielo cuando se tiene cielos descubiertos con gran incidencia de radiación solar, y cuando es saturado los sistemas subterráneos de acuíferos y napa freática, filtrando el recurso hídrico en el subsuelo y niveles interiores de la laguna.



II. PATRONES SINÓPTICOS DOMINANTES DEL AÑO HIDROLÓGICO 2019-2020

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. Como se mencionó antes, en Diciembre del 2019 se concentró la mayor actividad convectiva del año hidrológico 2019-2020 (Figura 3), mes con alta intensidad de la AB (similar a Figura 8b) y significativa incursión de humedad desde el centro del Continente y Amazonía (Figura 8c, 8e y 8g) hacia

la Cordillera Blanca, habiendo ocurrido el máximo valor de precipitación para ese mes (Figura 4).

Se observa que la actividad convectiva de diciembre del 2019 influyó en la disminución de la temperatura máxima promedio, 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 (ver Figura 4).

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 (500 hPa). 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 de viento 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) 2019 y 2020

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 2019 y 2020, 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 2020 (Figura 8b) fue más intenso en comparación al año 2019 (Figura 8a), gráficamente esto se puede observar en las líneas de altura geopotencial que están más apiñadas alrededor del AB, indicativo de que los vientos son más fuertes. Sin embargo, los máximos acumulados de precipitación sobre la Cordillera Blanca se presentaron en el verano 2019 a diferencia del año 2020, esto se puede apreciar en la 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 2019 concentrados más hacia el oeste del continente sudamericano. Por otra parte, en los niveles medios a bajos la humedad se mantuvo similar en ambos veranos (Figura 8g y 8h).

Aunque la circulación anticiclónica Alta de Bolivia (AB) produzca la circulación para el transporte de humedad sobre la zona andina del Perú, es necesario encontrar los niveles altos de humedad en la atmósfera Amazónica para garantizar la ocurrencia de actividad convectiva sobre la Cordillera Blanca.

En resumen, para el periodo de Enero a Marzo del año 2019, se observó que los flujos de vientos húmedos desde el este, favorecieron la ocurrencia de precipitaciones sobre la sierra de Ancash, teniéndose superávits (SENAMHI, 2019) principalmente hacia el mes de Febrero. 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 2019 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.



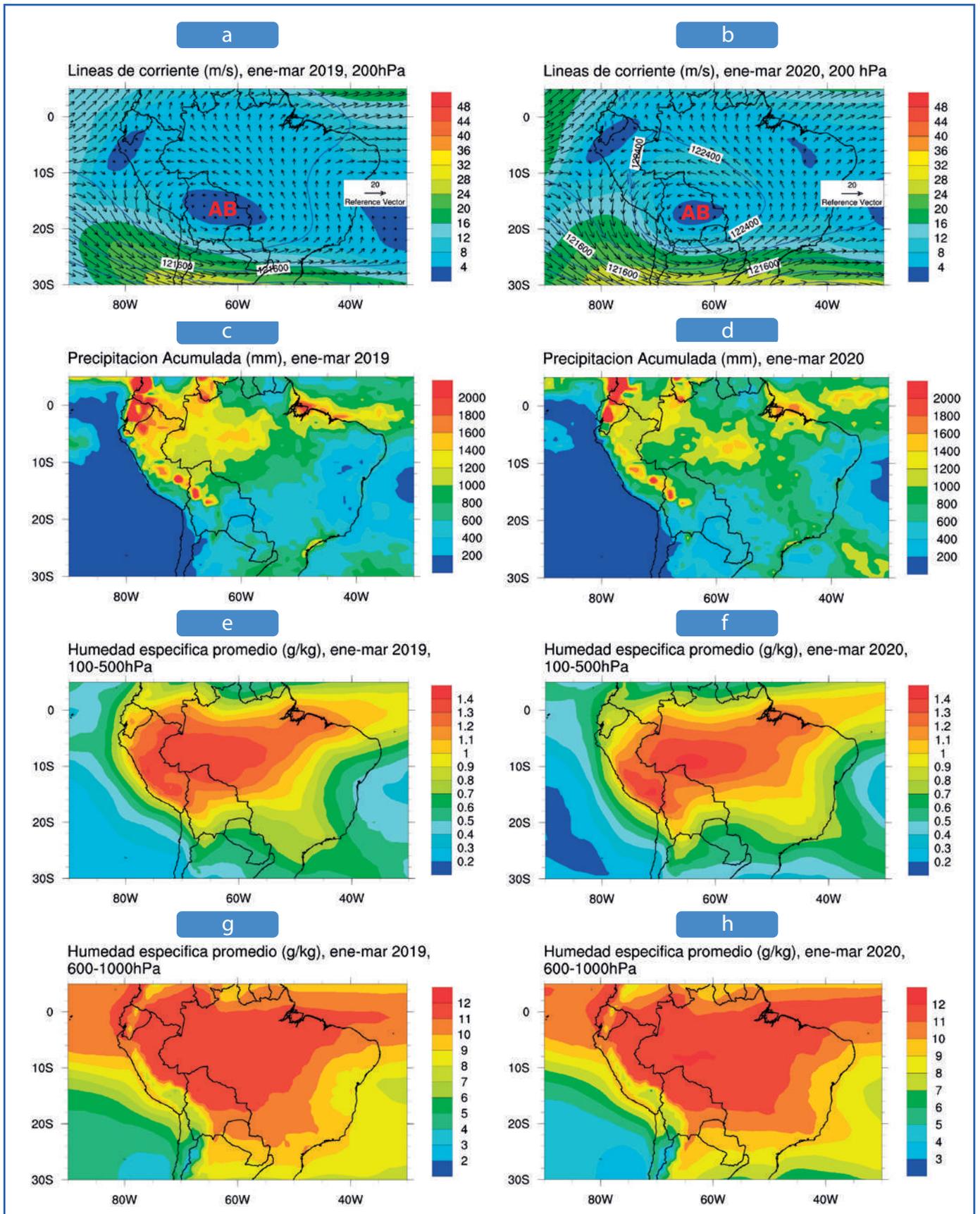


Figura 8. Sinóptica de Sudamérica que influye en el clima de la Cordillera Blanca.

Líneas de corriente (m/s) con líneas de geopotencial (m^2/s^2), promedio de ene-mar a 200 hPa para los años (a) 2019 y (b) 2020. Se indica la ubicación central de la Alta de Bolivia (AB). Precipitación total (mm) acumulada de enero a marzo para los años (c) 2019 y (d) 2020. Humedad específica (g/kg) para los meses de enero a marzo promedio de 100 hPa a 500 hPa para los años (e) 2019 y (f) 2020. Humedad específica(g/kg) promedio, para el rango de enero a marzo promedio de 500 hPa a 1000 hPa para los años (g) 2019 y (h) 2020.

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 ocurren 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, fue el mes de Diciembre de 2019 el que presentó un alto valor, 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 2019 y 2020

En el 2019, 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 del promedio climatológico, al igual que el mes de Agosto. Hacia el mes de Septiembre 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 Septiembre del 2019 y 2020 utilizando datos del ERA5, donde se continúa observando flujos del noroeste sobre la sierra central del Perú (Figura 9a y 9b) ocasionando valores bajos de precipitación (Figura 9c y 9d) y humedad específica a bajos (Figura 9e y 9f) y altos niveles (Figura 9g y 9h), los cuales son condiciones naturales del periodo de estiaje.

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.



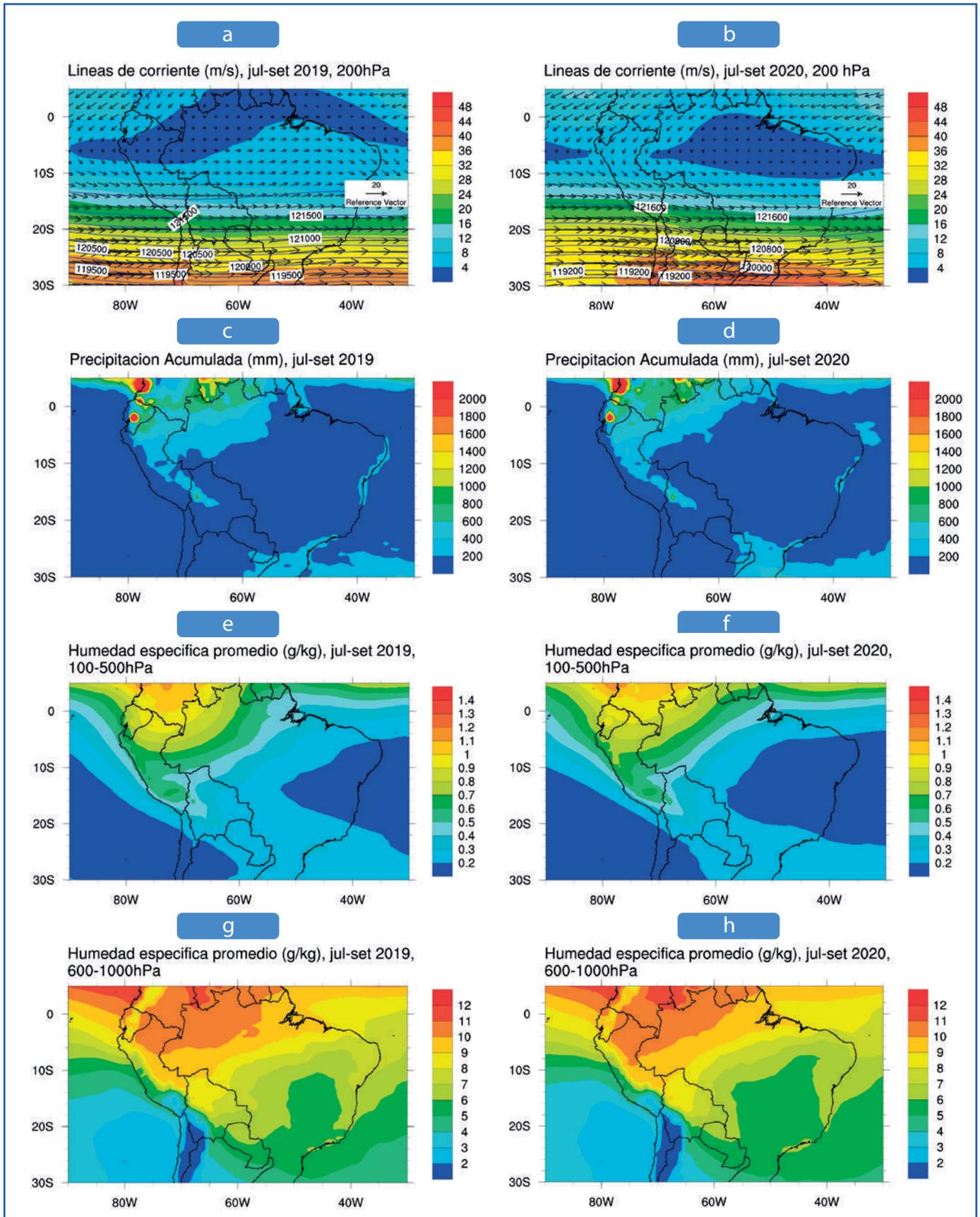


Figura 9. Sinóptica de Sudamérica que influye en el clima de la Cordillera Blanca durante el invierno austral.

Líneas de corriente (m/s) con líneas de geopotencial (m^2/s^2), promedio de jul-set a 200 hPa para los años (a) 2019 y (b) 2020. Precipitación total (mm) acumulada de julio a setiembre para los años (c) 2019 y (d) 2020. Humedad específica (g/kg) para los meses de julio a setiembre promedio de 100 hPa a 500 hPa para los años (e) 2019 y (f) 2020. Humedad específica (g/kg) promedio, para el rango de julio a setiembre promedio de 500 hPa a 1000 hPa para los años (g) 2019 y (h) 2020.

2.2. 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. La Figura 10 nos muestra numerosas tormentas de medianas a gran intensidad convectiva que se formaron en la sierra central del Perú para los días 3 y 19 de Diciembre. Si nos situamos en la zona oriental de Ancash cerca a la cordillera, se puede observar la EMA Palcacocha representada por un punto rojo (Figura 10a y 10b). Para el día 19 de Diciembre se presentaron los topes más fríos y por

consiguiente mayor número de tormentas convectivas en la sierra de Ancash en comparación al día 3 del mismo mes. Además, esto se puede verificar por la menor temperatura de brillo que presentan las tormentas sobre la sierra de Ancash, por lo que para esa fecha la precipitación fue mayor (Figura 10b). 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) (Figura 8a y 8b), además otro factor importante para la convección en esas fechas es el transporte de calor y humedad en niveles medios a altos que alcanzan la cordillera, humedad proveniente de la selva del país por los flujos de vientos del este. De esta forma se generaron lluvias intensas y tormentas de nieve en las zonas más altas de la Cordillera Blanca.

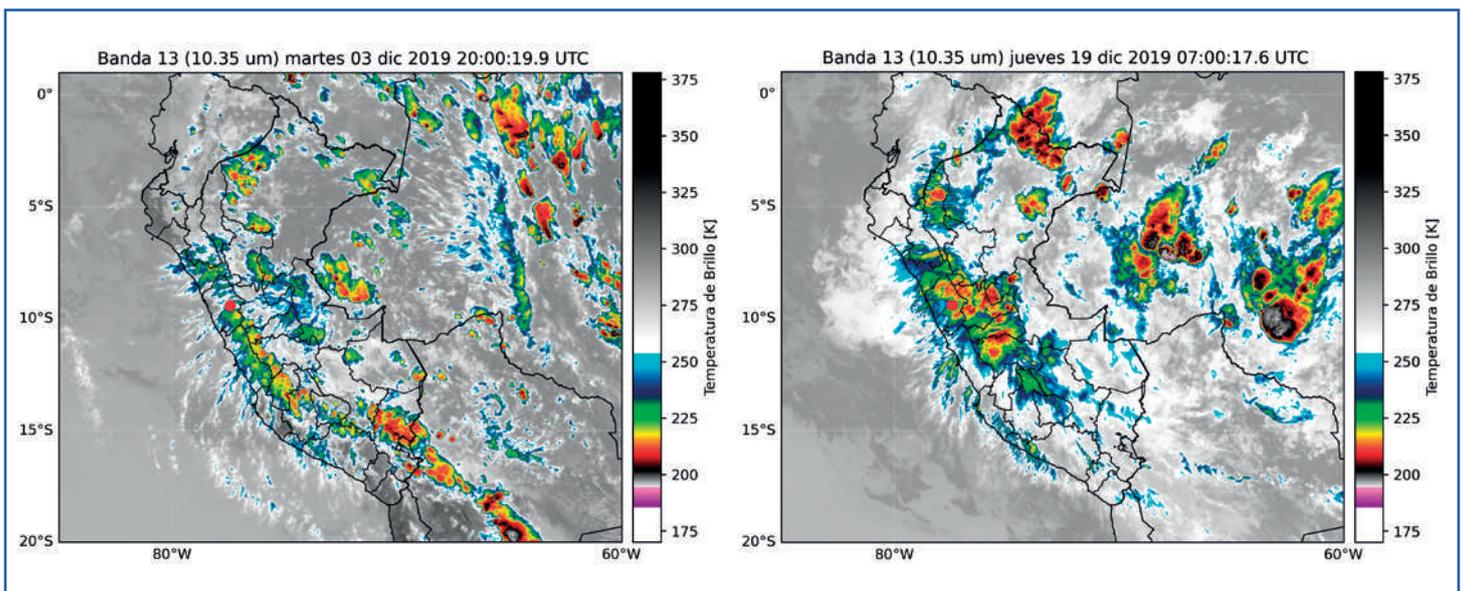


Figura 10. Actividad convectiva usando datos de satélite. Imagen de temperatura de brillo (banda 13 del GOES-16) de los sistemas convectivos generados para los días (a) 3 y (b) 19 de Diciembre de 2019. El punto rojo indica la ubicación referencial de la EMA Palcacocha (Figura 2).

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
- 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>
- 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.
- SENAMHI (2019). *Boletín Climático Nacional: Monitoreo y pronóstico*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Agosto 2019, 1–14.
- 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.

