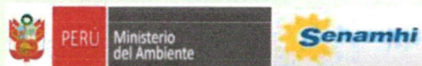


# NOTA TECNICA

## Retroceso Glaciar en los Andes del Centro y Sur del Perú: Mecanismos atmosféricos asociados



Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de  
Glaciares en los Andes Tropicales – PRAA



## **Nota Técnica**

### *Retroceso glacial en los Andes del centro y sur del Perú: mecanismos atmosféricos asociados*

**Autor:** Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI

**Año :** 2011  
**Edición :** SENAMHI

La presente publicación forma parte del Proyecto "Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales – PRAA", implementado en Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú con financiamiento del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) y fondos PHRD del gobierno japonés, a través del Banco Mundial, administrado por la Secretaría General de la Comunidad Andina y liderado en el Perú por el Ministerio del Ambiente (MINAM).

#### **Ministerio del Ambiente – MINAM**

Av. Javier Prado Oeste 1440, San Isidro, Lima.  
Teléfono (51-1) 611600  
<http://www.minam.gob.pe>

#### **Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI**

Jr. Cahuide 785 Jesús María  
Teléfonos: (51 – 1) 6141414 (central) y 6141408 (CPN)  
<http://www.senamhi.gob.pe>

**Diseño :** G. Avalos

**Impresión :** SENAMHI

**Primera edición :** Octubre 2011

**Tiraje:**

El contenido de este documento puede ser reproducido mencionando la fuente del SENAMHI.

**Fotos:** w. Suárez, A. lju

## **NOTA TECNICA**

### **Retroceso Glaciar en los Andes del Centro y Sur del Perú: Mecanismos atmosféricos asociados**

*Por*

**Ángel Cornejo Garrido**

*Contribuciones*

**Grinia Avalos, Wilson Suárez, Amelia Díaz, Félix Cubas y Gabriela Rosas**

*Revisión*

**Mathias Vuille**

**Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes  
Tropicales  
– PRAA –**

Ministro del Ambiente  
**Antonio Brack Egg**

Viceministra de Desarrollo Estratégico de los Recursos Naturales  
**Rosario Gómez Gamarra**

Director General de Cambio Climático, Desertificación y Recursos Hídricos  
**Eduardo Durand López-Hurtado**

Presidente Ejecutivo del SENAMHI  
**Wilar Gamarra Molina**

Directora Científica del SENAMHI  
**Elizabeth Silvestre Espinoza**

Directora General de Meteorología  
**Amelia Díaz Pabló**

Coordinación  
**Grinia Avalos Roldán**

**Secretaría General de la Comunidad Andina**

Adalid Contreras – Secretario General a.i.  
Santiago Cembrano – Director General  
María Teresa Becerra – Responsable del Área de Medio Ambiente

**Unidad Ejecutora del PRAA**

Ricardo Giesecke – Coordinador Regional  
Ana Iju – Especialista Técnico Nacional PRAA/Perú  
Viviana Zaldívar – Especialista en Gestión de Proyectos y Adquisiciones  
Rosario Ponce – Especialista Contable  
Itala Puccio – Asistente

**Banco Mundial**

Departamento de Desarrollo Ambiental y Socialmente Sostenible (LCSES)

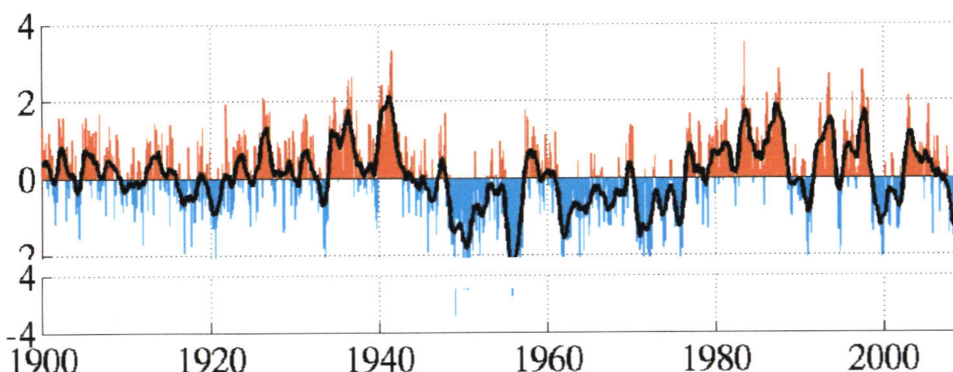
## RETROCESO GLACIAR EN EL CENTRO Y SUR DE PERU: MECANISMOS ATMOSFERICOS ASOCIADOS

### 1. Introducción

En la presente *Nota Técnica* se analizan los mecanismos atmosféricos asociados al retroceso glaciar (Vuille et al., 2000) en la región central y sur del Perú, en el área de influencia de las cuencas de los ríos Mantaro y Urubamba, ambas de interés para el Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales – PRAA. Respecto a la cuenca del río Urubamba, podemos indicar que se ubica dentro de la Región Cusco, capital arqueológica de América, por lo que el turismo es una primordial fuente económica. Tiene una extensión aproximada de 76200 km<sup>2</sup>, y su punto más alto es el Nevado Ausangate a 6384 msnm y el punto más bajo es 240 msnm en la localidad de Atalaya, entre los departamentos de Cusco y el sur de Ucayali en el vértice oriental de los Andes. Está formada a su vez por las cuencas de los Ríos Vilcanota, Yanatili, Cumpirusiata, Yavero, Camisea, Pichá, Mishagua, Sepahua e Inuya, hasta confluir con el río Tambo formando el Río Ucayali uno de los principales tributarios del gran río Amazonas. La cuenca del Urubamba soporta una población de 909,754 habitantes (INANDEP, 2007), y la oferta ambiental de la cuenca se puede considerar como alta por la biodiversidad existente, por el gran número de zonas de vida y variedad de calidad de suelos. La característica que más destaca es su variada topografía, por ejemplo, en la subcuenca Santa Teresa confluyen altas cadenas montañosas como el Salkantay y el Sacsarayoc con más de 5000 m de altura, superficies llanas de ceja de selva y otras con ondulaciones menos abruptas. Respecto a la cuenca del río Mantaro podemos indicar que se encuentra ubicada en los Andes centrales del Perú, y abarca territorios de los departamentos de Junín, Huancavelica, Pasco y Ayacucho. La población estimada es de 1`200.000 habitantes. El área de la cuenca es de 34.550 Km<sup>2</sup>. La gran variabilidad espacial de la temperatura en la cuenca de debe a su ubicación geográfica y compleja topográfica asociada con la Cordillera del los Andes, con un rango de altitudes que va aproximadamente desde los 500 m de altitud, hasta los 5000 m, y con una zona agrícola fértil ubicada alrededor de los 3300 msnm, la cual está expuesta a grandes variaciones del clima.

Durante las últimas décadas, cambios substanciales del clima han estado ocurriendo en diferentes partes del mundo incluyendo América del Sur. Como consecuencia de esos cambios, se está produciendo un retroceso acelerado de los glaciares andinos, particularmente los ubicados en el trópico. En esta sección, se analizan los mecanismos físicos responsables que podrían explicar tales reducciones, con énfasis en los glaciares del centro y sur del Perú.

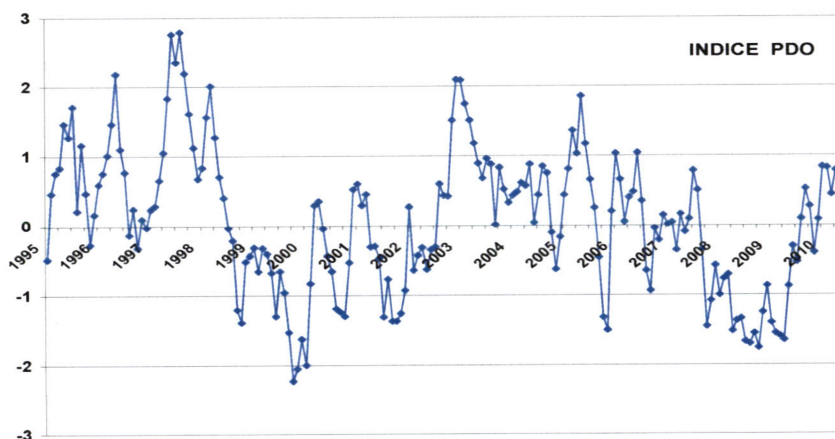
La temperatura superficial del mar (TSM) en el Océano Pacífico juega un papel preponderante en las variaciones del clima en zonas adyacentes tal como en los Andes de Perú (Garreaud, 1999; Francou et al., 1995; Vuille et al., 2003; Cardoso y Silva Dias, 2006). Estas variaciones pueden darse en diferentes escalas de tiempo, es decir, pueden estar relacionadas con cambios estacionales, pasando por variaciones interanuales en el rango de 3 a 7 años asociadas al ENOS (El Niño-Oscilación del Sur). Sin embargo, otras oscilaciones más lentas en escalas de tiempo de décadas, han sido identificadas con el nombre de **Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)**, por sus siglas en inglés). La figura 1.1 muestra el índice PDO obtenido a partir de las oscilaciones lentas de la TSM en el Océano Pacífico (Universidad de Washington).



**Figura 1.1** Valores mensuales del Índice de Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) 1900 -2008.  
Fuente: Universidad de Washington EE.UU.

La figura 1.1 muestra que durante el periodo 1900-1948 (1949-1975), la PDO se encontraba en su fase positiva (negativa) indicando que en el Pacífico Tropical predominaron las temperaturas relativamente calidas (frías), mientras que en las regiones polares las condiciones térmicas se ubicaron en la fase opuesta. Posteriormente durante el periodo 1976-2007, el Pacífico tropical (polar) regreso nuevamente a su fase calida (fría).

Con el objetivo de percibir con mayor detalle las variaciones de la PDO en los últimos años, en la figura 1.2 se muestra los valores mensuales del índice PDO sólo para el periodo 1995-2010. Puede apreciarse la presencia de la fase positiva con cambios hacia la fase negativa durante los periodos 2000-2002 y 2008-2010. Dichos cambios hacia valores negativos sugieren, tal como lo mencionan otras fuentes científicas como la Universidad de Washington, que el 2010 se enmarca dentro de la fase negativa de la PDO, sin embargo, debemos indicar que ante la actual coyuntura del fenómeno de Calentamiento Global, eventualmente se podrían presentar cambios temporales hacia la fase positiva, tal como se muestra en la figura 1.2 en la que se aprecian aproximadamente dos periodos con fase positiva y otros dos con la fase opuesta.



**Figura 1.2** Índice Mensual de Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), periodo 1995-2010.

Las configuraciones espaciales correspondientes a las fases calidas y frías de la PDO se muestran en la figura 1.3 con dos patrones típicos. Durante periodos con valores positivos (negativos) del índice de la PDO, el Pacífico Tropical es relativamente cálido (frío) y al mismo tiempo en las regiones polares predominan condiciones relativamente frías (calientes).

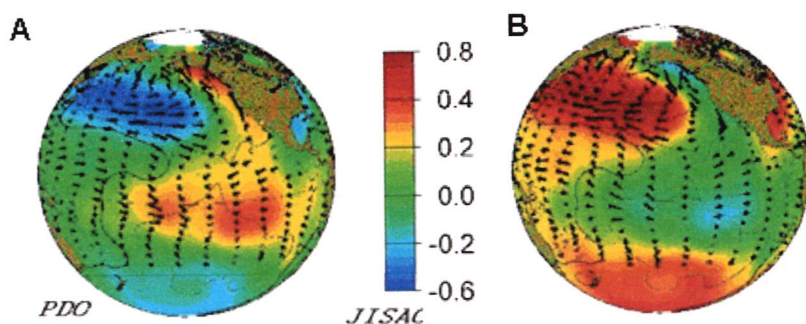


Figura 1.3 Variaciones Espaciales de la PDO. Fuente: Universidad de Washington EE.UU.

El retroceso glaciar puede tener las siguientes posibles causas: mayor derretimiento de nieve y/o menor precipitación sólida. Al respecto Francou et al. (1995), sugieren que las temperaturas atmosféricas máximas y mínimas aumentan sensiblemente durante los eventos ENOS, los cuales estarían asociados con negativos balances de masa en glaciares ubicados en la Cordillera Real de Bolivia así como en la Cordillera Blanca de Perú. Asimismo los autores también sugieren la reducción de precipitaciones durante dichos episodios en las regiones mencionadas lo que contribuye a acentuar el efecto ENOS sobre los balances.

Mark y Seltzer (2005), usaron una combinación de imágenes de satélite, fotografías aéreas, y datos de GPS con el objetivo de cuantificar el volumen de hielo perdido entre 1962 y 1999 para tres glaciares en la Cordillera Blanca y encontraron que alrededor de  $9.3 \text{ Watts/m}^2$  era la cantidad de energía requerida para derretir el hielo perdido y que esa cantidad podría ser explicada por un aumento de temperatura del aire de  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  combinada con un decrecimiento de calor latente asociada a un incremento de humedad específica de  $0.14 \text{ g/kg}$ . Un análisis de los registros de temperaturas de 29 estaciones en la Cordillera Blanca mostró una tendencia promedio de  $0.26 \text{ }^\circ\text{C}$  por década sobre el intervalo de 37 años, la cual es más que adecuada para proporcionar la transferencia de calor sensible necesaria para el retroceso glaciar.

Otro aspecto importante en el contexto del presente reporte es el reportado por Francou et al. (1995). Los autores realizaron un balance de masa del glaciar Zongo en la Cordillera Real de Bolivia así como de los glaciares Yanamarey y Uruashaju en la Cordillera Blanca de Perú para disponer de series de 15-20 años de balance de masa. Las conclusiones más importantes se refieren al rol de las temperaturas máximas y mínimas en los balances de masa. El análisis de la información sugiere que durante los eventos El Niño las temperaturas aumentan sensiblemente lo cual afecta el término ablación del balance de masa. Debemos enfatizar el resultado de que todos los años El Niño en los 20 años de registros, estuvieron asociados a balances negativos de masa.

Otro artículo de singular importancia en el entendimiento del retroceso glaciar es el correspondiente al uso de modelos atmosféricos para entender los cambios climáticos en los glaciares andinos, escrito por Vuille et al. (2003). Los autores realizaron diagnósticos climáticos utilizando el modelo atmosférico ECHAM-4 forzado con Temperaturas de la Superficie del Mar (TSM) observadas, obteniendo resultados que reproducen las tendencias espaciales y temporales cálidas apreciadas en las regiones glaciares.

Los resultados sugieren que en los glaciares andinos, una significativa fracción de la tendencia del calentamiento atmosférico observado puede ser explicada por un aumento de la TSM en el Océano Pacífico ecuatorial. En resumen, el modelo atmosférico ECHAM-4 sugiere que cambios en temperatura y humedad atmosféricas, son la causa principal del retroceso glaciar observado en los Andes Tropicales.

En la metodología científica se parte de identificar una Hipótesis de Trabajo, la cual en base a la literatura revisada consiste en lo siguiente:

- El principal mecanismo para explicar el retroceso glaciar es el correspondiente a un aumento de temperatura atmosférica en la zona de los glaciares. Un aumento del orden de 1 °C podría ser suficiente para dicho retroceso observado. Basados en estos cálculos, en el presente estudio centraremos nuestra atención especial en el análisis y diagnósticos de procesos de calentamiento atmosférico en las zonas glaciares del sur del Perú, como elemento importante del retroceso glaciar.
- Otro aspecto importante en el retroceso glaciar es el correspondiente al cambio de humedad en la atmósfera glaciar asociado al cambio de intercambio de calor latente.
- El aumento de temperatura del aire estaría asociado con los cambios de circulación atmosférica relacionados con aumentos de temperatura de superficie del mar en el Pacífico correspondientes a la fase cálida del ENOS.
- Otro aspecto que también tiene importancia en el retroceso glaciar es la disminución de precipitación también asociadas con ENOS (Francou et al, 1995).

## 2. Análisis y diagnóstico

Se analizan los mecanismos y procesos del retroceso glaciar con varios casos denominados en la metodología científica como Casos Estudio (CE), utilizando escalas sinópticas de tiempo y espacio. Con fines de comparación, uno de los CE analizados se presentó en un año cálido (1998), mientras que los otros casos ocurrieron en años en los que ENOS estuvo ausente. Posteriormente, en base a estos análisis se utilizan escalas mensuales para analizar si en esta nueva escala también se cumplen los mecanismos y procesos físicos encontrados en los CE. En este punto es necesario discutir lo relacionado con el hecho de que en base a sólo algunos CE, podemos o no inferir conclusiones más amplias. Al respecto, podemos indicar que nuestras conclusiones no sólo se obtienen a partir de CE, sino que también consideramos otros análisis adicionales que se presentaran posteriormente. Por ejemplo las observaciones meteorológicas locales nos proporcionan información de primera importancia tal como los registros de la estación Granja Kayra (3219 msnm) en la cuenca del río Urubamba nos permiten conocer detalles de los fenómenos denominados “veranillos” en la sierra de Perú, consistentes en periodos de algunos días con carencia de lluvias. Se logra identificar que ellos están asociados con aumentos de temperatura máxima, para lo cual se han considerado diez episodios entre 1981 y 1994, con las características de dichos “veranillos” y se ha calculado el promedio tanto de temperaturas máximas como de precipitación durante dichos episodios. Tal procedimiento se conoce como “compuesto” de los eventos y permite identificar las características comunes de tales episodios.

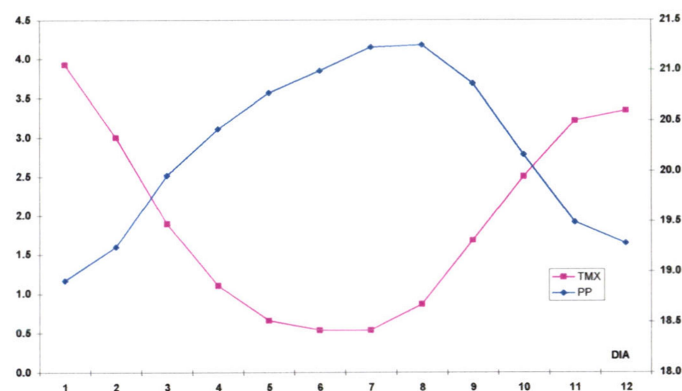


Figura 2.1 Compuesto de Temperaturas Máximas en °C (derecha) y Precipitación en mm (izquierda) durante “Veranillos” en la estación Granja Kayra (Cusco).

La figura 2.1 sugiere que los días con menor precipitación durante los “veranillos” están asociados con mayores valores de las temperaturas máximas. Nuestra hipótesis corroborada



por otros argumentos presentados posteriormente en esta Nota Técnica, establece que los mayores valores de la temperatura máxima estarían relacionados con días con baja nubosidad los cuales estarían a su vez asociadas con movimientos descendentes de la atmósfera media. De esta manera, información proveniente de observaciones locales se conjugarán con aquellas proporcionadas por los Reanálisis (Kalnay et al., 1996) y posteriormente con imágenes de Satélites, para obtener nuestras conclusiones.

El primer CE a analizar es el ocurrido en la última semana de febrero de 1998, periodo en el cual se presentó un substancial aumento de temperatura atmosférica en la zona de los Glaciares Andinos de Perú (GAP). La figura 2.2 presenta la evolución de la temperatura ambiental a 500-hPa sobre dicha región (zona GAP: 71.25 °W, 13.75 °S, 5550 msnm) durante ese evento cálido. Puede apreciarse dentro de la elipse en la figura, el periodo de calentamiento atmosférico y tal como se analizará con mayor detalle en las siguientes secciones, la presencia de velocidades atmosféricas descendentes a nivel glaciar durante el episodio (velocidades verticales positivas en color verde figura 2.2).

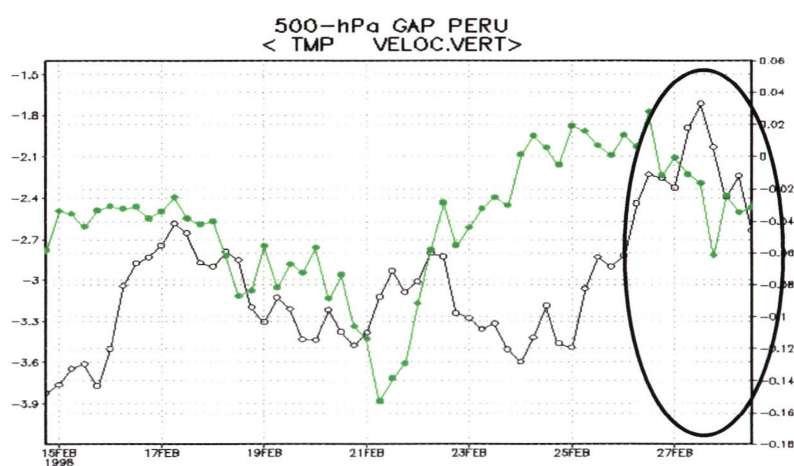


Figura 2.2 Media Corrida 24-hr de Temperatura en los Glaciares Andinos de Perú (GAP) en 500-hPa (negro), Media Corrida de 24 horas de Velocidad Vertical (verde)

Respecto al uso de la temperatura del aire al nivel correspondiente a una presión atmosférica de 500-hPa (cerca de 5000 msnm) como una aproximación a la temperatura atmosférica a nivel glaciar, Vuille et.al. (2008), reportaron que dicha temperatura a 500-hPa, presentaba una alta correlación inversa con los balances de masa en los nevados Chacaltaya (Bolivia) y Antisana (Ecuador), lo cual indica su asociación con el retroceso glaciar en los Andes de América del Sur.

Respecto al uso de Reanálisis atmosféricos en el diagnostico de episodios extremos, debemos indicar que ellos han sido utilizados en diversos estudios; para muestra podemos mencionar su utilización en el diagnostico de incursiones frías a Brasil (Marengo et. al, 1997). Los Reanálisis son obtenidos a partir de observaciones atmosféricas a nivel mundial (no necesariamente en la zona glaciar) las cuales son analizadas junto con un modelo atmosférico el cual le proporciona la fundamentación física necesaria. Por todo ello, los Reanálisis son y serán un elemento fundamental en el estudio de episodios atmosféricos de diversa intensidad. Sin embargo, aun así, algunas de los valores de las variables atmosféricas consideradas en los Reanálisis, pudieran ser cuestionadas debido a la complejidad topográfica de la zona Andina de Perú. Al respecto podemos indicar que tales parámetros, por ejemplo la velocidad vertical de la atmósfera, son corroborados con estimaciones independientes de otros parámetros relacionados. Por ejemplo, las velocidades verticales descendentes son verificadas mediante imágenes satelitales en el canal de vapor de agua, las cuales muestran un color oscuro en la zona, asociada a valores reducidos de humedad atmosférica en niveles medios de la atmósfera.

Considerando que la grilla de los Reanálisis del NCEP (2.5°x2.5°) es bastante gruesa para discriminar el comportamiento específico en cada glaciar, se identifica entonces, un calentamiento promedio en toda el área del punto grilla donde se ubican los glaciares. Sin embargo, después de hacer el análisis macro, se pueden utilizar las salidas de un modelo regional Eta (resolución=22km) o WRF (resolución=30km), con el objetivo de analizar los detalles espaciales del calentamiento atmosférico, lo cual será realizado en análisis posteriores.

En la figura 2.3 se presenta la evolución de la temperatura atmosférica a nivel glaciar de otro episodio similar correspondiente a febrero 2007. Se muestra el aumento preponderante de la media corrida (promedio continuo de 24 horas), lo cual comprueba que este periodo corresponde a un episodio de calentamiento atmosférico a nivel glaciar. También se aprecia en la elipse en la figura, la presencia de movimientos verticales descendentes (velocidades verticales positivas) durante el periodo de calentamiento.

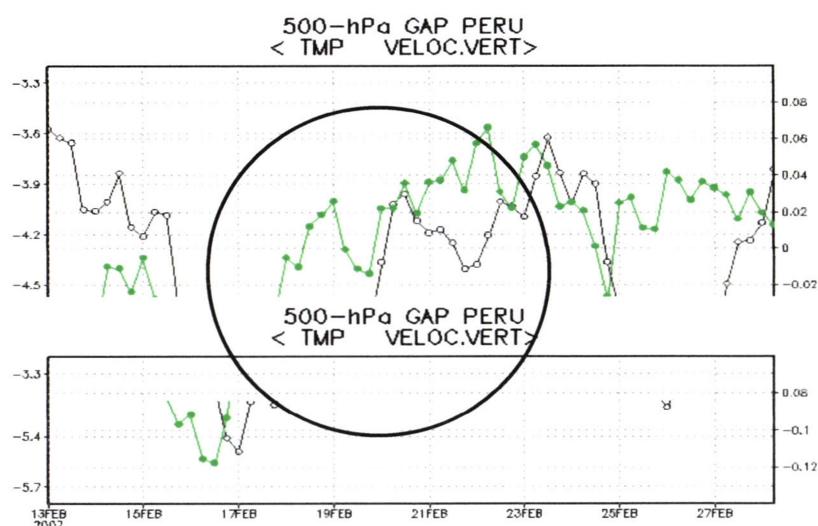


Figura 2.3 Media Corrida 24-hr Temperatura en los Glaciares Andinos de Perú en 500-hPa (negro), Media Corrida de 24 horas de Velocidad Vertical (verde).

Los CE analizados representan una situación típica de los episodios cálidos que se presentan en la sierra andina de Perú. Para poder identificar posibles escenarios futuros para la masa glaciar, es necesario realizar el diagnóstico del fenómeno para lo cual nos preguntamos: ¿Cuales son los procesos físicos responsables?

### 2.1 Mecanismos físicos responsables de aumento de temperatura atmosférica a nivel glaciar

La respuesta fue encontrada en los movimientos verticales del aire en la zona: Cuando el aire en la troposfera media desciende, entonces por causas físicas, se produce un aumento de su temperatura y eso es lo que se ha identificado en los eventos cálidos analizados. Al mismo tiempo, dichos movimientos descendentes tienden a inhibir la precipitación. Tal movimiento de descenso atmosférico puede apreciarse en las figuras 2.2 y 2.3 en los CE considerado. Dicho de otra manera, puede apreciarse en la figura 2.2, que a partir del 24 de febrero de 1998 los movimientos verticales en la atmósfera glaciar, cambiaron de sentido, desde vientos ascendentes antes de esa fecha, a vientos descendentes después.

Otro caso analizado es el correspondiente al mes de Marzo de 2009, cuya figura 2.4, presenta la temperatura en 500-hPa en el punto grilla más cercano a la ubicación de los glaciares del sur de Perú (zona GAP) mostrada en líneas de color negro y cuya escala se puede apreciar en el eje vertical de la izquierda. Puede apreciarse la ocurrencia de cuatro eventos de calentamiento. El

primer episodio se presentó aproximadamente durante los primeros diez días del mes; el segundo, durante la mitad del mes y el tercero y cuarto durante los últimos días del mes.

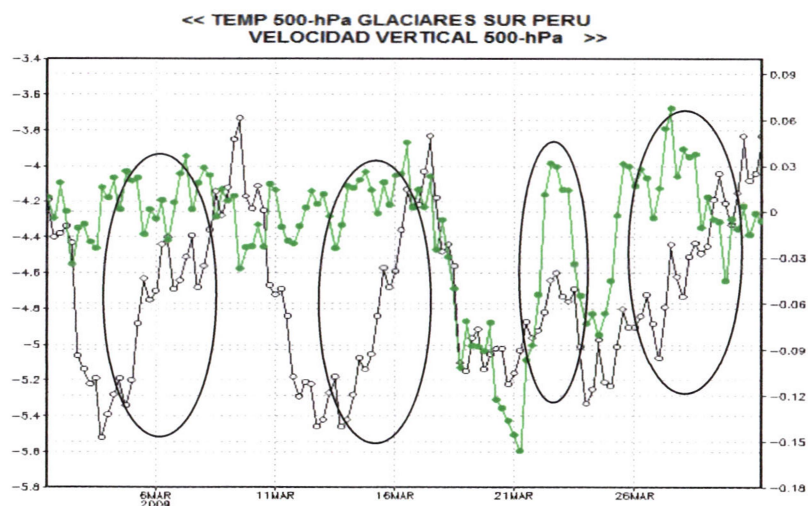


Figura 2.4 Media Corrida de Temperatura del Aire en 500-hPa región GAP (negro), Media Corrida de 24 horas de Velocidad Vertical en 500-hPa (verde).

En la misma figura 2.4, se presenta también la evolución de la velocidad vertical atmosférica a nivel de 500-hPa, cuya escala de medición se ubica en el eje vertical del lado derecho de la figura. Mediante elipses se identifican los periodos correspondientes al aumento de temperatura atmosférica en los cuales puede apreciarse que la velocidad vertical toma valores positivos correspondientes a movimientos atmosféricos descendentes.

## 2.2 Imágenes de Satélite GOES

Para dar mayor soporte a la hipótesis sobre la presencia de movimientos atmosféricos descendentes como un elemento importante para el aumento de temperatura del aire a nivel de los glaciares del centro y sur del Perú, presentamos en la figura 2.5 la imagen de satélite GOES del canal 3 de vapor de agua correspondiente al 17 de marzo de 2009, uno de los días con calentamiento atmosférico a nivel glaciar (ver figura 2.4). La importancia de dicha imagen radica en que ella identifica zonas de carencia de vapor de agua en la atmósfera media, mediante tonos de color negro oscuro, tal como la que se puede apreciar en la zona alrededor de los glaciares en el sur de Perú (región GAP punto Q).

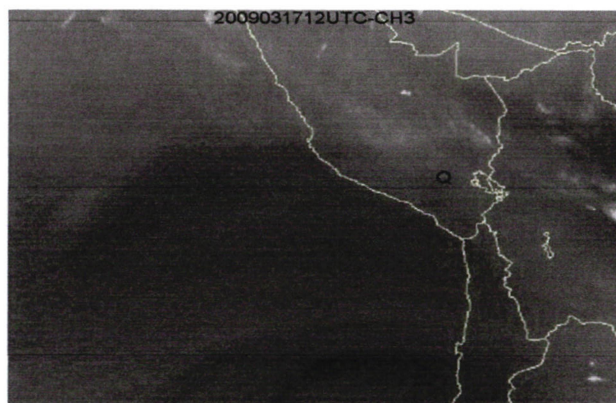


Figura 2.5 Imagen GOES Canal 3 Vapor de Agua 12UTC 17Marzo 2009

La carencia de vapor de agua se asocia con la presencia de movimientos descendentes en la atmósfera alta, corroborando nuestras hipótesis previas. Las imágenes GOES son básicamente un conjunto de puntos con diferentes tonos de gris (píxel) variando entre color blanco identificado con un valor de 255. En el otro extremo se tiene el píxel correspondiente a una zona completamente negra, con un valor de 0. Entre ambos se tienen diferentes tonos de gris con píxeles entre 0 y 255.

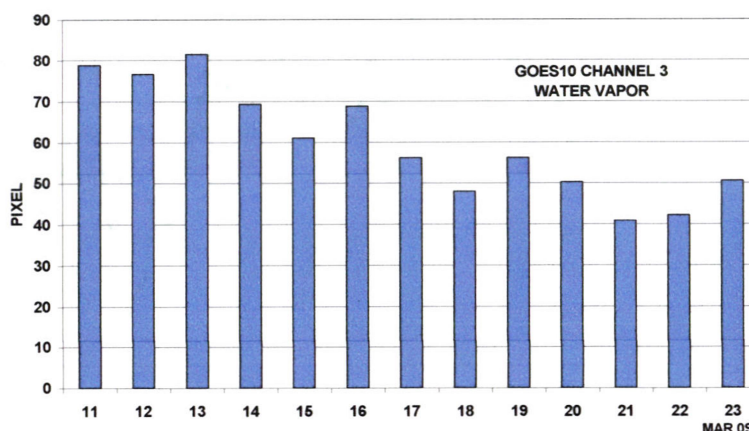


Figura 2.6 Valores de Píxel en Zona GAP. Satélite GOES Imagen Canal 3 Vapor Agua

Para la zona GAP (Punto Q) la evolución de los valores del píxel se presentan en la figura 2.6. Puede apreciarse que durante el periodo de calentamiento atmosférico a nivel glaciar (14-18; 21-23 marzo 2009), los píxeles correspondientes disminuyeron de valor, significando que se acercaban más hacia el negro, indicando que durante el periodo de calentamiento atmosférico a nivel glaciar, las imágenes GOES del canal 3 (vapor de agua) fueron de un color más negro (menores valores de los píxeles) asociadas a movimientos atmosféricos verticales descendentes de la atmósfera alta y media.

### 2.3 Predictores de episodios de calentamiento Glaciar

La siguiente pregunta que es también de singular importancia en el entendimiento del deshielo anómalo en los glaciares, es la correspondiente a los procesos físicos responsables de los movimientos atmosféricos descendentes en las áreas de los Andes del sur del Perú la cual incluye a la zona glaciar, durante los eventos cálidos.

Tal como veremos en secciones posteriores, la ubicación de las tormentas en el Océano Pacífico es de singular importancia para poder diagnosticar la presencia de dichos movimientos atmosféricos descendentes. Debido a la dificultad para localizar estaciones meteorológicas de observación debido a la gran extensión del Océano Pacífico, las observaciones de satélites artificiales son de gran ayuda. El parámetro utilizado se denomina Radiación de Onda Larga Emergente (OLR por sus siglas en Inglés), el cual es un indicador de la temperatura del tope de las nubes. Cuando OLR es de un valor pequeño (alto), ello es una indicación de que dicha nube es de una relativa gran (pequeña) extensión vertical, cuyos toques entonces alcanzan alturas relativamente altas (bajas) y por consiguiente, con valores de precipitación relativamente intensos (débiles). De esta manera OLR se convierte en un excelente indicador de lluvias.

En la figura 2.7a, se muestra el diagrama Hoffmüller de la anomalía de OLR durante los primeros días de 1998. Dicho diagrama permite apreciar el comportamiento en el tiempo (eje vertical) del parámetro anomalía de OLR en una sección transversal ecuatorial Este-Oeste del Pacífico desde una longitud cercana a Australia hasta otra, ubicada en la costa norte de Perú (eje horizontal).

Mostrada con una elipse en la figura 2.7a, se indica el periodo durante el cual se produce un desplazamiento hacia el Este de la zona con reducida OLR (intensas tormentas en color azul) ocurrida alrededor del 16 de febrero de 1998, desde días previos a la ocurrencia del calentamiento atmosférico a nivel glaciar durante el CE producido en febrero de 1998. Esta característica es también un indicador de la activación de la denominada Oscilación Madden-Julian (MJO, por sus siglas en inglés). (ver figura 2.8).

La figura 2.7b muestra la región con intensas tormentas (en color azul) cubriendo el área ecuatorial desde cerca de la línea de cambio de fecha (180° E) hasta cerca de la costa norte de Perú y sur de Ecuador durante el 17 de febrero de 1998, alrededor de una semana previa al presente caso-estudio de calentamiento atmosférico en regiones que incluyen a los glaciares andinos del sur de Perú.

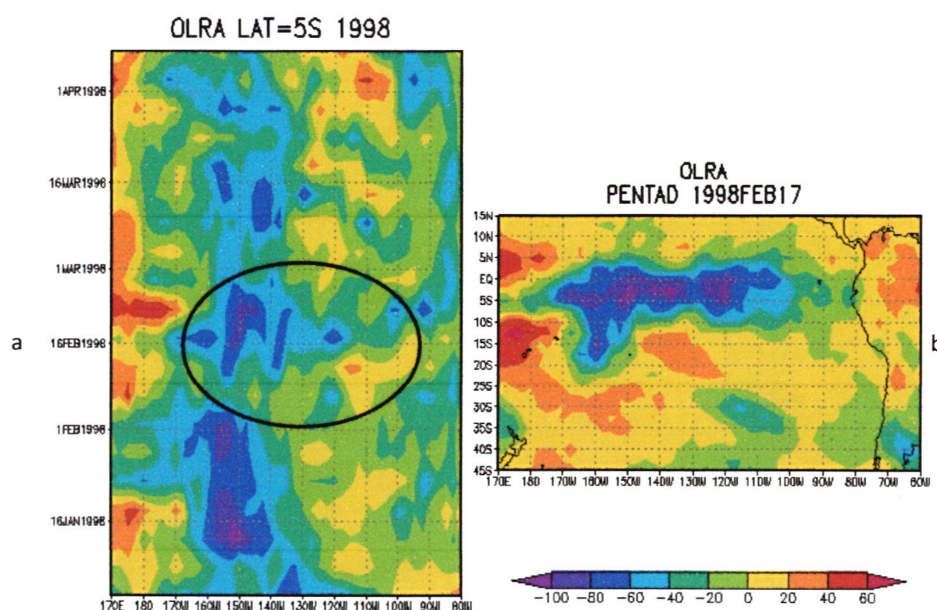


Figura .2.7(a) Hoffmoller de Anomalia de Radiación de Onda Larga Emergente (OLRA);  
(b) Anomalia de Radiación de Onda Larga Emergente (OLRA) 1998FEB17

En otras palabras, un precursor del calentamiento atmosférico en las regiones glaciares, consiste en que intensas tormentas cerca de la línea ecuatorial ubicadas sobre la longitud del cambio de fecha (180° E), se desplazan hacia el Este en lo que se conoce como la activación de la MJO (figura 2.8). Al Sur-Este del área convectiva se forma una vaguada en altura (VAG200 en figura 2.8), la cual está relacionada a una nueva área convectiva en lo que es conocido como la Zona de Convergencia del Pacífico Sur (SPCZ) (no mostrada). Esta cadena de conexiones atmosféricas, basadas en las tormentas de la zona ecuatorial del Pacífico occidental, se encuentran asociadas con el episodio atmosférico cálido en la zona glaciar de Perú a través de los movimientos atmosféricos descendentes asociados descritos en secciones anteriores. Obviamente con un sólo caso no podemos obtener conclusiones más generales respecto a la vinculación entre la MJO y el calentamiento atmosférico en los Andes de Perú.

Para una mayor fundamentación de los argumentos presentados en el párrafo anterior, en una sección posterior, específicamente en la figura 2.13, se presentan argumentos para la existencia de una relación importante entre la OLR en la región Niño4, en el Pacífico ecuatorial occidental, muy cercanamente a la zona con OLR bajos en la figura 2.7 y la temperatura atmosférica a 500 hPa, en la región Andina de Perú. Ello corrobora fuertemente los argumentos presentados alrededor de la figura 2.7, en el sentido de que no sólo un CE está soportando la hipótesis de trabajo. Por el contrario, dicha hipótesis tiene bases físicas sólidas.

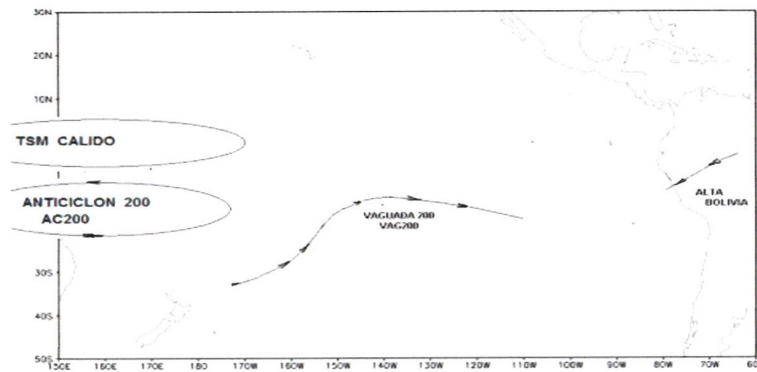


Figura 2.8 Oscilación de Madden-Julian (MJO).

La presencia de los procesos físicos descritos en los párrafos anteriores se ven favorecidos o desfavorecidos por oscilaciones climáticas tales como la PDO. En la figura 1.1 se apreciaba que 1976 fue un año de cambio de fase, desde valores negativos (fase fría) antes de 1976 a valores positivos (fase caliente) posterior a ese año. Para fundamentar tal proposición, la figura 2.9 muestra la evolución del promedio enero-febrero-marzo de la TSM en la región Niño-4.

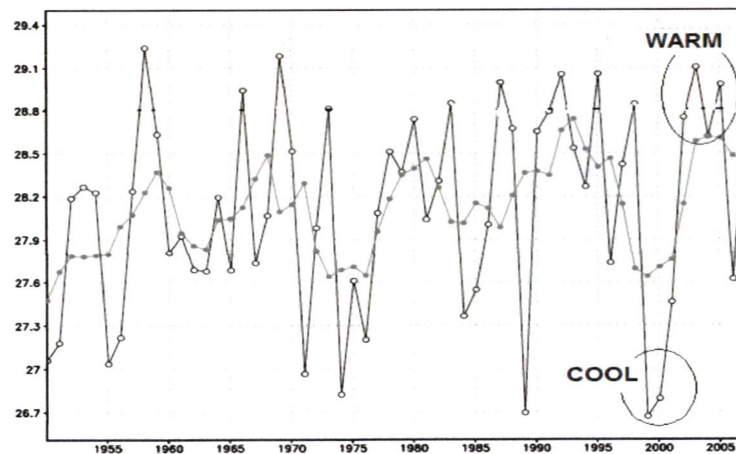


Figura 2.9 Promedio ene-feb-mar TSM Región Niño4. Media corrida 4 años.

En la figura 2.10 se muestran los correspondientes histogramas de la TSM en región Niño-4 antes y después de 1976.

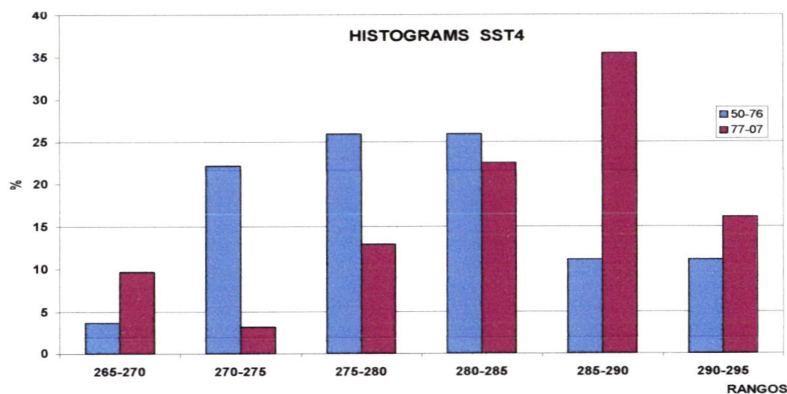


Figura 2.10 TSM NIÑO4 Histogramas periodos 1950-1976 (azul); 1977-2007 (rojo) (TSM\*10)

Puede apreciarse que las mayores temperaturas (mayores que 28.5 °C) fueron más frecuentes después de 1976 (barras color rojo), mientras que, por consiguiente, TSM menores de 28°C fueron más frecuentes antes de 1976 (barras color azul). Por ejemplo podemos apreciar que TSM en el rango 27 - 27.5 °C, la frecuencia de ocurrencia antes de 1976 fueron de 22%, mientras que después de ese año, ella fue de solo 3%. Valores similares se observaron en el rango de 27.5 – 28 °C.

Ahora nos preguntamos, qué es lo que sucede con la atmósfera del Pacífico cuando un episodio cálido se presenta en el Pacífico Tropical. Para ese análisis, en la figura 2.9 se consideran dos periodos con opuesta TSM en Niño4. Uno durante 1999-2000 (2002-2005) con TSM relativamente frías (cálidas). Ambos episodios son denominados en este reporte como COOL y WARM respectivamente.

Para tener una idea de la distribución espacial del calentamiento del Pacífico durante el periodo WARM respecto al COOL, mostramos en la figura 2.11 la diferencia en TSM durante el mes de febrero de ambos periodos. Puede apreciarse que el calentamiento ocurrió fundamentalmente en la región cercana a la línea ecuatorial y con mayor intensidad en la parte occidental-central del Pacífico, aunque también se extiende hasta el Pacífico oriental con menor intensidad.

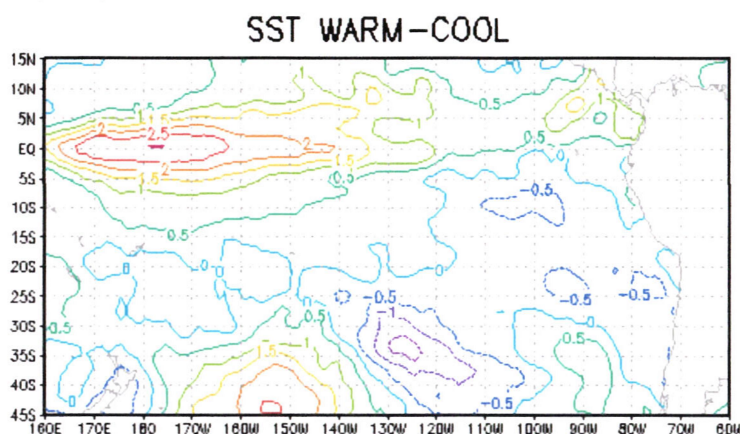


Figura 2.11 Diferencias de TSM entre periodos WARM and COOL (mes febrero).

La influencia de una mayor TSM en la parte occidental-central del Pacífico ecuatorial sobre la atmósfera es la de facilitar una mayor convección, es decir favorecer intensas tormentas sobre esa zona. Las figuras 2.12a y 2.12b muestran la OLR durante los periodos COOL (fríos) y WARM (calientes) respectivamente.

Como era de esperarse, en la región centro-occidental del Pacífico ecuatorial y asociada a la mayor TSM en esa zona durante el periodo WARM, se observaron menores valores de OLR, tal como se aprecia en las elipses de la figura 2.12. Los episodios de calentamientos de los glaciares se caracterizan por patrones de OLR similares a los del periodo WARM de la presente sección. Debemos enfatizar que los periodos tipo WARM no son necesariamente los correspondientes a episodios ENOS.

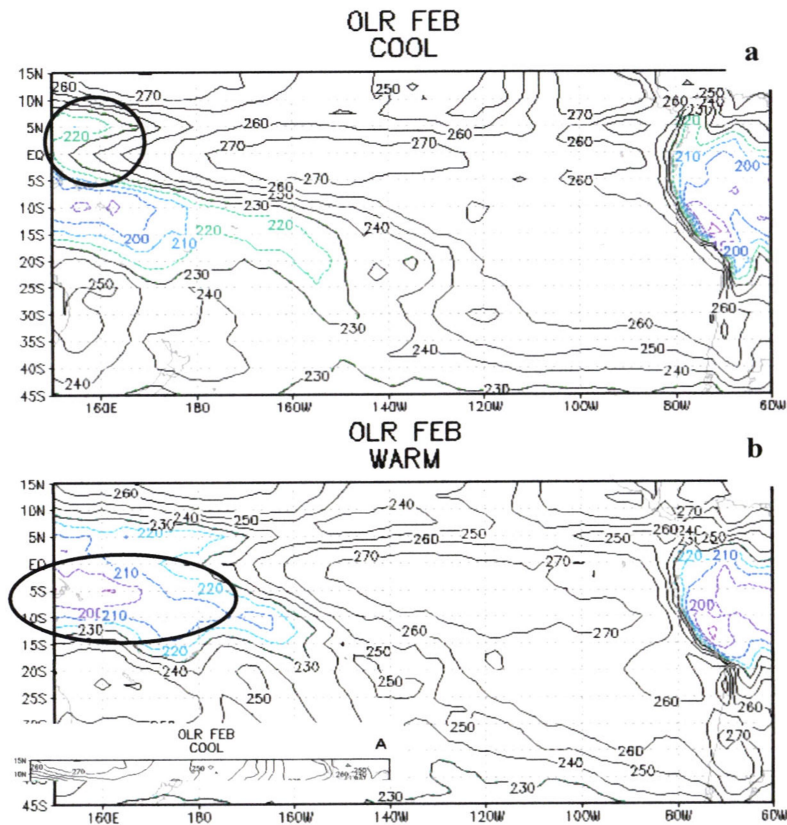


Figura 2.12 (a) Mapa de OLR durante Febrero COOL (Frio); (b). Ídem durante Febrero WARM (Cálido)

Uno de los aspectos más saltantes de la presente investigación es la que corresponde a la existencia de precursores en la atmósfera y en el Océano Pacífico ecuatorial, de los episodios de calentamiento atmosférico glaciar en Perú. En la figura 2.13, se muestra la estrecha relación entre los eventos de calentamiento glaciar y la presencia de relativamente bajos valores de OLR en el Pacífico ecuatorial occidental durante los meses de febrero del periodo 1975-2009.

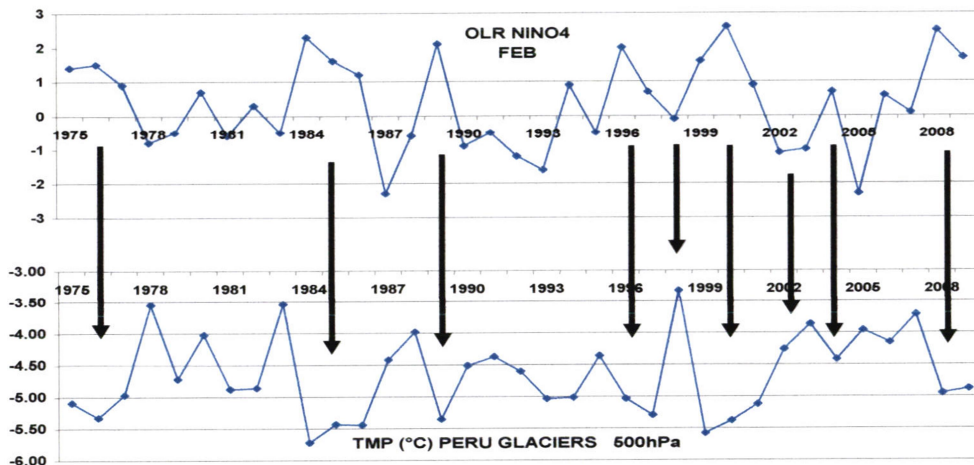


Figura 2.13 OLR Niño4 Feb; Temperatura 500hPa región GAP



Quisiéramos enfatizar el hecho de la asociación entre el comportamiento del parámetro OLR definido en una zona del Pacífico Ecuatorial Occidental cerca de Australia (Niño4) con el correspondiente a la temperatura del aire en los glaciares andinos de Perú, tal como la figura 2.13 lo muestra. Mediante las flechas en dicha Figura, puede apreciarse la correspondencia entre aumentos (disminuciones) de OLR en Niño-4 y disminuciones (aumentos) de temperatura atmosférica glaciar andina en el sur de Perú.

La activación de la MJO, se produce cuando intensas tormentas en la vecindad de la longitud de cambio de fecha (180° E), se desplazan hacia el Este alcanzando longitudes del Pacífico central y eventualmente durante episodios ENOS extremos, pudiendo alcanzar las costas de Perú y Ecuador.

Investigaciones independientes realizadas por Vuille et al. (2000) y Francou et al. (2003, 2004) corroboran los resultados presentados en la figura 2.13.

Para mayor análisis se presenta en la figura 2.14, el diagrama de dispersión entre las variables de la figura 2.13. Puede demostrarse la significación estadística de la relación que tiene un coeficiente de correlación de 0.64, mostrando en Tabla 1 que las temperaturas de la atmósfera glaciar en la región GAP, con valores relativamente altos (mayores a -4.7 °C) se encuentran asociadas a valores de OLR en la región Niño-4 (OLR4) menores a 0.7, indicadores de la presencia de tormentas relativamente intensas en el Pacífico ecuatorial occidental. Similarmente temperaturas atmosféricas en los glaciares de la zona GAP de Perú relativamente bajas (menores a -4.7 °C) están asociadas a valores de OLR4 mayores a 0.7. La Tabla 1 es denominada Tabla de Contingencia, la cual presenta el número de eventos en cada uno de intervalos considerados en la figura 2.14. La prueba estadística muestra una alta significancia de la relación entre la temperatura a nivel de 500-hPa en zonas del sur del Perú que incluyen la zona glaciar y la actividad convectiva en la región Niño4.

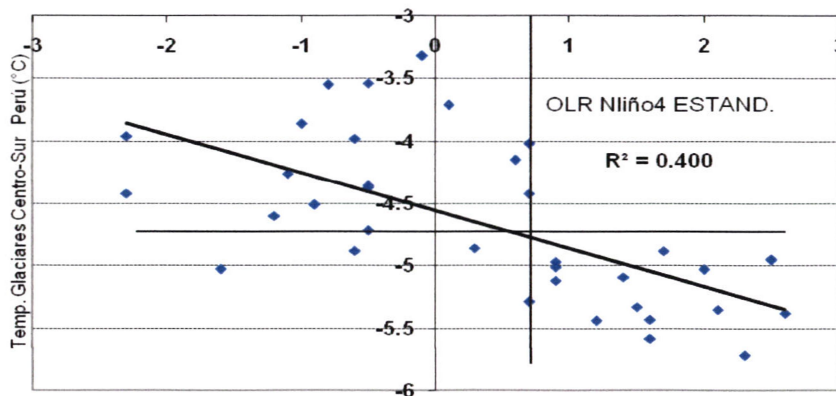


Figura 2.14 Diagrama de Dispersión OLR4 vs Temperatura a 500-hPa en región GAP (TMP500)

Tabla 1 Tabla de Contingencia OLR Niño4 versus Temp. 500-hPa GAP

REGION	OLR_4 < 0.7	OLR_4 > 0.7	TOTAL
TMP 500 hPa REGION CENTRO-SUR PERU	16	0	16
TMP 500 hPa REGION CENTRO-SUR PERU	3	15	18
TOTAL	19	15	34

## 2.4 Episodios fríos en la atmósfera media y baja de la zona andina del centro y sur de Perú

El diagnóstico de los fenómenos de calentamiento atmosférico a nivel glaciar en el centro y sur de Perú, nos ha permitido establecer que perturbaciones atmosféricas de gran energía provenientes del Pacífico en latitudes alrededor de los 50° S desde el Pacífico sur occidental se dirigen hacia el oriente alcanzando la costa sur de Chile tal como la figura 2.15 lo indica. El diagnóstico nos permite también establecer que mediante mecanismos físicos naturales, es posible la generación de vientos alisios de gran intensidad fluyendo del sur a lo largo de la costa de Chile y Perú, transportando el enfriamiento hacia la región andina del centro y sur de Perú. Esos intensos vientos son predecibles con algunos días de anticipación para la toma de acciones adecuadas. Dicha figura ilustra gráficamente los mecanismos propuestos, identificando la propagación de perturbaciones atmosféricas llegando a la Cordillera de los Andes en el sur de Chile, en donde ayudadas por la presencia de las montañas se dirigen hacia el norte por la costa de América del Sur transportando aire frío en la atmósfera media y baja hacia la sierra central y sur de Perú.

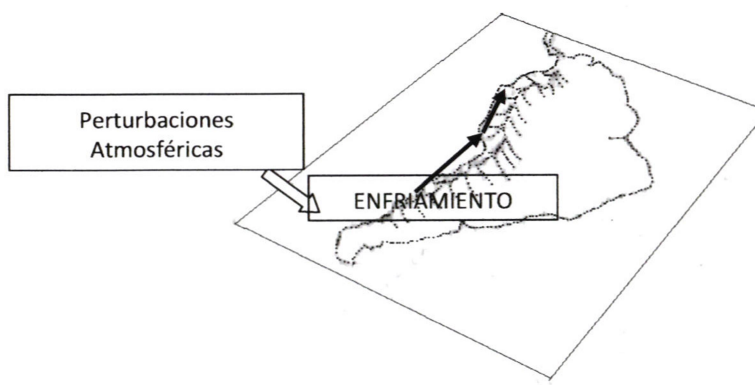


Figura 2.15 Mecanismos de producción de eventos fríos en atmósfera media y baja de Andes de Perú.

La figura 2.16 sustenta lo propuesto en el párrafo anterior mostrando un parámetro directamente relacionado con la temperatura promedio en la atmósfera baja entre aproximadamente 5000m sobre el nivel del mar y la superficie para el caso estudio de febrero 2007. Ese parámetro es el espesor atmosférico entre 500 y 1000-hPa. La misma figura sugiere el transporte de aire frío por la costa de Chile y Perú, penetrando después hacia la sierra del centro y sur de Perú.

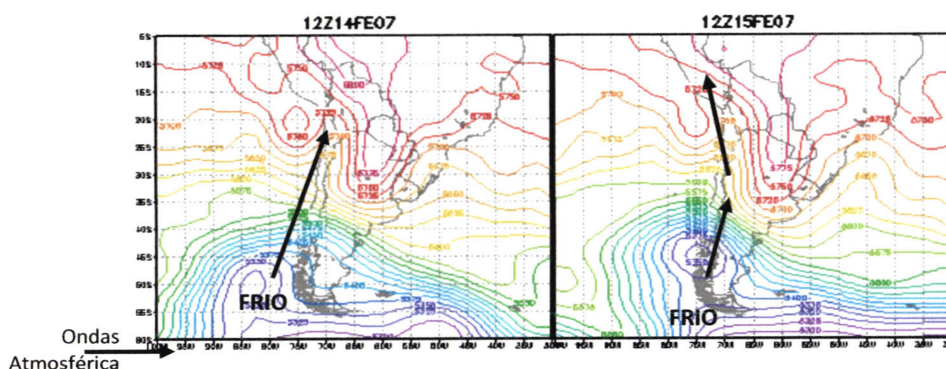


Figura 2.16 Mapas de Espesores atmosféricos 500-1000-hPa.

Dicho transporte frío además de estar asociado con disminuciones importantes de temperatura nocturna en las localidades de la sierra andina de Perú, es capaz de producir movimientos verticales descendentes en la atmósfera alta y media, en base al frío producido en la atmósfera baja.

### Humedad Atmosférica a nivel de glaciares en centro y sur de Perú

En el presente estudio se ha propuesto que uno de los mecanismos físicos responsables del calentamiento de la atmósfera media y alta, es la presencia de movimientos atmosféricos verticales descendentes, tal como se describió en secciones anteriores. Cuando el aire desciende, se producen una serie de cambios físicos liderados por el aumento de presión atmosférica asociados a una menor elevación, los cuales conducen a un aumento de temperatura atmosférica y consecuentemente a una disminución de la humedad relativa. Físicamente, dichos movimientos descendentes están asociados con una disminución de la humedad relativa. Para verificar dicha relación, analizamos el CE correspondiente al periodo enero – marzo de 1998, en el contexto de la fase cálida del ENOS.

La figura 2.18 muestra las series temporales de la temperatura atmosférica en 500-hPa en la región GAP (línea negra), esto es, aproximadamente a 5 km de altura (cerca de la altura media de los glaciares, en la sierra sur de Perú).

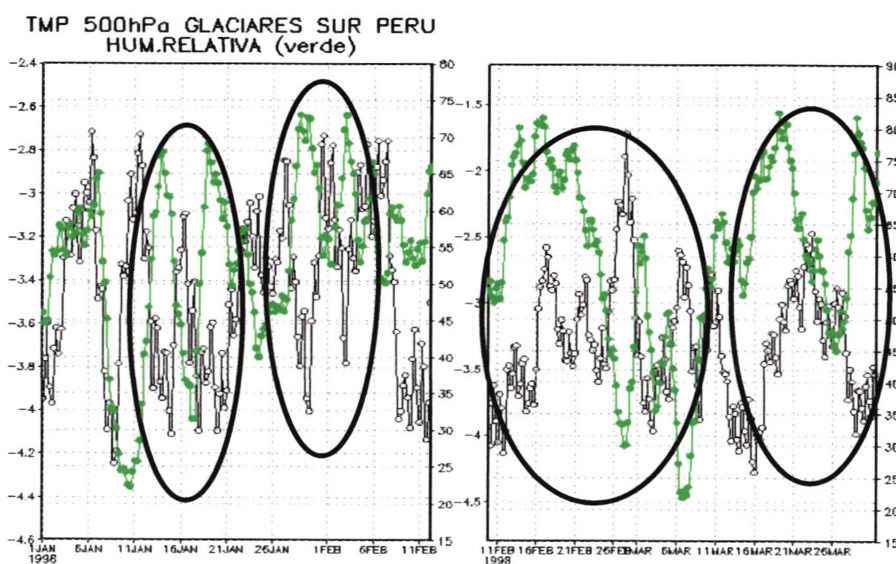


Figura 2.18 Variación de la temperatura y humedad relativa atmosféricas en 500 hPa, entre enero-marzo de 1998.

En la misma figura se presenta la serie temporal de la humedad relativa (línea verde) en la misma ubicación. Puede apreciarse la presencia de una serie de periodos de calentamiento seguidos de otros con enfriamientos (ver elipses en figura 2.18), durante los cuales los episodios de calentamientos (enfriamientos) generalmente estuvieron asociados con disminuciones (aumentos) de humedad relativa. Durante aquellos pocos casos en los que la relación no se cumplió, se puede inferir que dichos eventos de calentamiento y/o enfriamiento no estuvieron relacionados con el descenso de aire y que otros fenómenos pudieron haber estado presentes.

Se verifica entonces, que nuestra propuesta de que el calentamiento atmosférico a nivel glaciar estaría asociado al movimiento atmosférico descendente es coherente con la disminución de la humedad relativa. Sin embargo, un solo caso estudio no es concluyente para establecer la aparente asociación inversa entre la temperatura a nivel glaciar y la humedad relativa en ese nivel. Para responder la pregunta sobre si la relación mencionada en el párrafo anterior en escala sinóptica, podría también manifestarse en una mayor escala de tiempo (meses), debemos tener en cuenta que los periodos de calentamiento generalmente sólo se manifiestan durante unos pocos días del mes, por lo que los valores mensuales pudieran no reflejar los pocos casos diarios. En esa situación, la figura 2.19 muestra que la relación se cumple en la

escala de tiempo de meses (ver elipses), pero que durante el periodo 1994-1999 tal relación no es aparente.

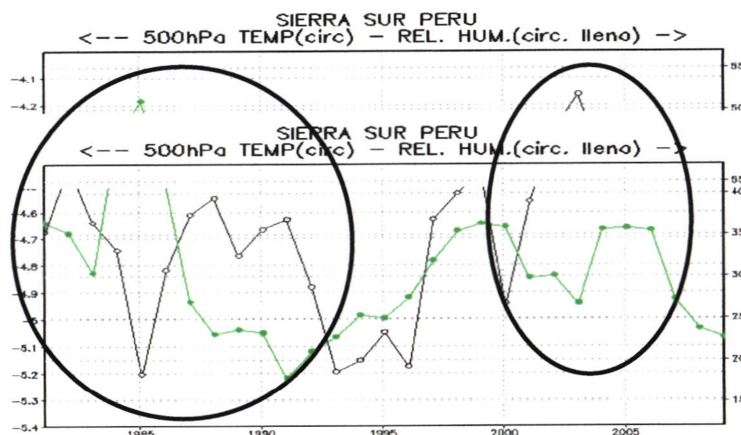


Figura 2.19 Variación de la temperatura y humedad relativa de la atmósfera en 500 hPa, durante febrero 1981-2009.

### 3. Resumen

La literatura sobre retroceso glaciar en los Andes de Perú, ha mostrado evidencias de que dicho fenómeno ha presentado intensificaciones importantes desde fines de la década de los años 70. El presente estudio sugiere que tal ocurrencia puede explicarse en gran medida por las oscilaciones naturales del clima representado por la denominada PDO. Sin embargo el Cambio Climático, (asociado a mayor presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera) ha agregado substanciales impactos a las variaciones naturales.

En este punto, la pregunta más importante del presente reporte es la siguiente: ¿Cuáles son los posibles escenarios futuros del volumen glaciar en los Andes de Perú?

Se han presentado evidencias de:

- La presencia de eventos cálidos en el Océano Pacífico, los cuales se manifiestan con la presencia de tormentas relativamente intensas en el Pacífico Occidental ecuatorial las que se desplazan desde dichas regiones, hacia el Este, llegando en casos extremos, hasta las costas sur de Ecuador y norte de Perú. Adicionalmente se ha logrado identificar que tales desplazamientos son favorecidos por temperaturas cálidas de la superficie del mar en el Océano Pacífico. A su vez dichas TSM cálidas se encuentran relacionadas con fases cálidas de la PDO y/o ENOS.
- El proceso físico descrito en el párrafo anterior, está relacionado, mediante las denominadas teleconexiones atmosféricas con episodios de calentamiento atmosférico en los Andes de Perú (figura 2.17), zona que incluye a las regiones glaciares. Dichas conexiones se han podido evidenciar mediante relaciones estadísticas, sin embargo también existen evidencias físicas de tales teleconexiones.

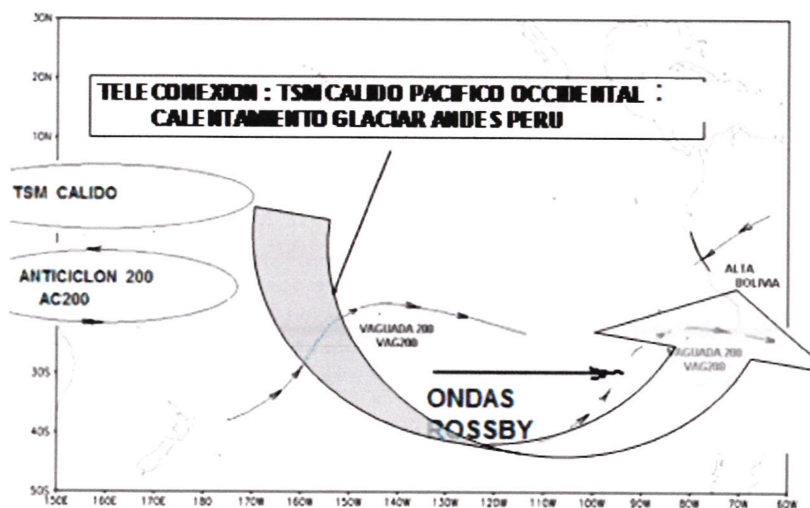


Figura 2.17 Teleconexión Pacífico Occidental vs Calentamiento Glaciar Perú

Para responder la pregunta de cómo todo estos procesos físicos en el Pacífico, cambiarían en los próximos años ante los cambios climáticos asociados al incremento de los gases de tipo invernadero en la atmósfera, tenemos que recurrir a simulaciones climáticas con modelos atmosféricos. Sin embargo, el sistema climático del Pacífico es tan complejo que los modelos normalmente usados no han sido capaces de una simulación aceptable. Si tal como opinan científicos como los de la Universidad de Washington, que la PDO ya ha cambiado a su fase negativa, entonces cabe preguntarnos: ¿ los deshielos anómalos en los glaciares de Perú se reducirían y se podría regresar a condiciones cercanas a las normales de décadas pasadas ?

Respecto a la posible evolución del retroceso glaciar en los Andes de Perú durante las próximas décadas, podemos recurrir a lo que sofisticados modelos matemáticos pueden simular respecto al cambio climático en el Pacífico, el cual tal como sugiere el presente estudio, estaría asociado con el retroceso glaciar. Para ese efecto, un último artículo que ha revisado el estado del conocimiento sobre la posible evolución del clima en el Pacífico, ha sido realizado por Collins et al. (2010). En dicho artículo se reconoce que a pesar de que han existido avances innegables en el entendimiento de los mecanismos físicos responsables del cambio climático en el Pacífico, todavía existe carencia de una serie de elementos, desde computadoras más adecuadas hasta el de un conocimiento todavía incompleto de dichos mecanismos.

Sin embargo una serie de conclusiones son factibles de ser obtenidas, dentro de las cuales mencionamos las siguientes por ser de relevancia al presente estudio.

- El más simple escenario posible consiste en una variabilidad climática así como aquella en escala de tiempo de días a semanas similar a la que hemos estado experimentando en los últimos años, la cual podría estar superpuesta con un gradual calentamiento del clima.
- Todos los modelos atmosféricos consultados por los autores, muestran un calentamiento global de la temperatura superficial del aire así como de la superficie del mar en respuesta al aumento de la concentración de gases de tipo invernadero.
- Una sólida conclusión importante es la relativa a una probable disminución en la precipitación sobre el Pacífico a consecuencia del calentamiento de la superficie del mar en asociación con los cambios en la saturación de vapor de agua en la atmósfera de esa región. En nuestra experiencia, y en base a la relación entre dicha actividad de lluvia en el Pacífico con la correspondiente a la de la sierra de Perú, ello es un indicador de la posible disminución de las lluvias en nuestra sierra. Ello también es coherente con la expresión recogida en nuestros viajes de campo de que los “veranillos” están

aumentando en frecuencia y que los eventos de precipitación son más intensos pero de poca duración.

- Hay mayor acuerdo en la mayoría de las simulaciones en proyectar calentamientos de la superficie del Pacífico, especialmente cerca de la línea ecuatorial en el Pacífico Oriental, asociados a vientos alisios ecuatoriales más débiles.
- Sin embargo los autores reconocen que existen una serie de estimaciones que simplemente no se pueden proyectar hacia el futuro debido a las carencias mencionadas en un párrafo anterior.

En conclusión, nuestros resultados sugieren que dos fenómenos estarían influyendo en el clima de los Andes de Perú: En primer lugar la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), la cual ya estaría en su fase negativa, con la correspondiente reducción en la frecuencia de ocurrencia de eventos cálidos en los Andes de Perú y por ende de disminución del retroceso glaciar.

En segundo lugar, la presencia del Calentamiento Global (CG), estaría influyendo en el sentido de incrementar eventos extremos con episodios de calentamiento atmosférico a nivel de los glaciares en los Andes de Perú. En resumen, durante las últimas décadas del siglo pasado, dos influencias cálidas (PDO y CG) probablemente estuvieron presentes en el continente, mientras que actualmente solamente el CG estaría principalmente activo para la producción de eventos cálidos en los Andes de Perú.

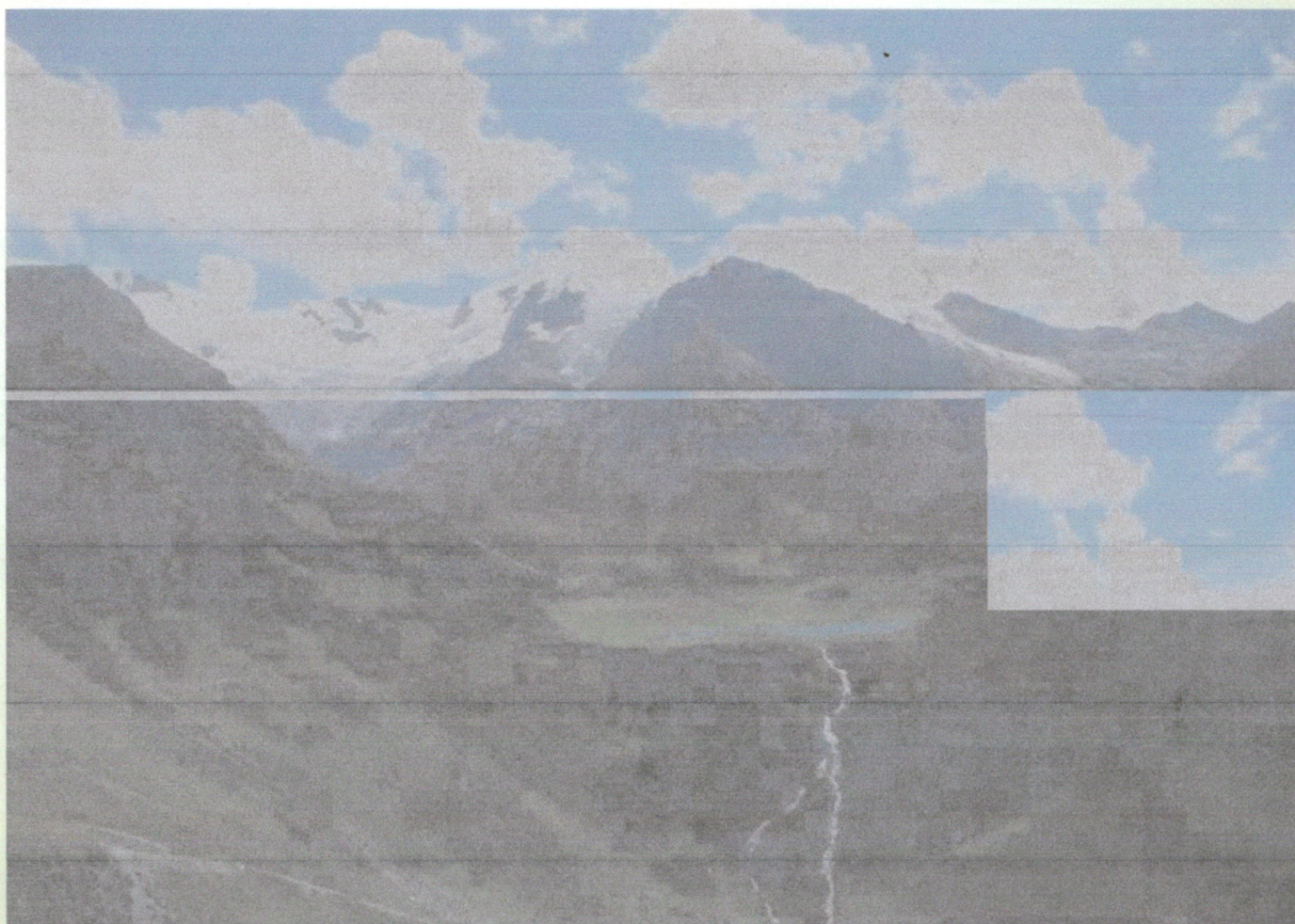
#### 4. Referencias

- Garreaud, R and P. Aceituno, (2001): Interannual Rainfall Variability over the South American Altiplano. *J. Climate*, 14, 2779-2789.
- Garreaud, R (1999): Multiscale Analysis of the Summertime Precipitation over the Central Andes. *MWR Vol 127*, 901-921.
- Matthews, A, B. Hoskins, J.Slingo and M.Blackburn, (1996): Development of Convection along the SPCZ within a Madden-Julian Oscillation. *Q.J.R.M.S.*, 122, 669-688.
- Bell, G, L. Bosart, (1993): A Case Study Diagnosis of the Formation of an Upper-Level Cutoff Cyclonic Circulation over the Eastern United States. *Monthly Weather Review*, 1635-1655.
- Hoskins,A., J.McIntyre and A. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *QJRSM*, 111,877-946.
- Cardoso, A, P.L.Silva Dias, (2006): The relationship between ENSO and Paraná River flow. *Advances in Geosciences*, 6, 189-193.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woolen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetma, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bullet. Amer. Meteorol. Soc.*, 77, 437-471.
- Vuille, M, R. Bradley, M.Werner y F. Keimig (2003): 20th Century Climate Change in the Tropical Andes: Observations and Model Results. *Climate Change* 59: 75-79, 2003.
- Franco B, P Ribstein, H. Semiond, C.Portocarrero, A. Rodriguez (1995): Balance de Glaciares y Clima em Bolivia y Peru: Impacto de los Eventos ENSO. *Bull.Inst.fr. etudes andines*. 24 (3): 661-670.
- Franco, B., Vuille, M., Wagnon, P., Mendoza, J., Sicart, J.E., 2003 - Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S, *Journal of Geophysical Research*, 108, D5-4154.
- Franco B, Wagnon, P (2004): Recul des glaciers dans les Andes tropicales sur dernieres decennies. *Lettre PIGB-PME France*, p 43-49.

Mark, B, G. Seltzer (2005): Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962-1999): spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quaternary Science Reviews* 24 (2005) 2265-2280.

Vuille, M, Bradley, R, Keimig, F, 2000: Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *J. Geophys. Res.* 105(D10): 12,447-12,460.

Timmermann, A, et.al. 1999: Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature*, 399, 694-699, 1999.



**Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú  
SENAMHI**

Jr. Cahuide 785 Jesús María, Lima11 - Perú, Central telefónica: (511)614 1414  
Centro de Predicción Numérica: 6141408  
Consultas: [cpn@senamhi.gob.pe](mailto:cpn@senamhi.gob.pe)