

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“PERIODOS HÚMEDO Y SECO DE LA SIERRA SUR DEL PERÚ
EN EL VERANO DE EL NIÑO 2015-2016”**

Presentada por:

Luis Martin Suarez Sotelo

Trabajo Monográfico para Optar el Título de

INGENIERO METEORÓLOGO

Lima - Perú

2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“PERIODOS HÚMEDOS Y SECO DE LA SIERRA SUR DEL PERÚ
EN EL VERANO DE EL NIÑO 2015-2016”**

Presentada por:

Luis Martin Suarez Sotelo

Trabajo Monográfico para Optar el Título de

INGENIERO METEORÓLOGO

Sustentado y aprobado ante el siguiente Jurado:

Dr. Ernesto Ever Menacho Casimiro
Presidente

Mg. Sc. Eusebio Cisneros Tarmeño
Miembro

M. Sc. Victoria Calle Montes
Miembro

M. Sc. Victoria Calle Montes
Asesora

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. RÉGIMEN DE PRECIPITACIONES	2
2.2. VARIACIÓN INTRAESTACIONAL DE LAS PRECIPITACIONES	4
2.3. ALTA DE BOLIVIA (AB).....	4
2.4. ANTICICLÓN DEL PACÍFICO SUR ORIENTAL	5
2.5. AGUA PRECIPITABLE	7
III. DESARROLLO DEL TEMA	8
3.1. DATOS Y METODOLOGÍA.....	8
3.2. RESULTADOS Y DISCUSIONES	10
3.2.1. Comportamiento de la precipitación	10
3.2.2. Precipitación y agua precipitable total	11
3.2.3. Correlaciones entre el agua precipitable total y las alturas geopotenciales en 2000 y 500 hPa	13
3.2.4. Configuraciones sinópticas en días con lluvias escasas y en días con lluvias abundantes	15
3.2.5. Análisis de niveles bajos e ingreso de humedad del océano Pacífico	20
IV. CONCLUSIONES	26
V. RECOMENDACIONES	27
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
VII. ANEXOS	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.....	9
---	---

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo conceptual de las precipitaciones en el Altiplano.	3
Figura 2: Alta de Bolivia en 200 hPa.	5
Figura 3: Presión a nivel medio del mar en enero.	6
Figura 4: Presión a nivel medio del mar en julio.	6
Figura 5: Zona de estudio y estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.	8
Figura 6: Flujograma de la metodología.	10
Figura 7: Precipitación mensual (barras verdes) y la media climática 1981-2010 (barras azules) de las estaciones utilizadas en el estudio.	11
Figura 8: Serie diaria de la precipitación total de las 14 estaciones utilizadas (barras verdes) y del agua precipitable total promediado en el área en el área comprendida entre 25-15°S y 75- 65°W (línea azul)	12
Figura 9: Coeficiente de correlación entre el agua precipitable (promedio en el área comprendida entre 25-15°S y 75- 65°W) con la altura geopotencial en 200 hPa. Periodo: diciembre 2015-marzo 2016	14
Figura 10: Coeficiente de correlación entre el agua precipitable (promedio en el área comprendida entre 25-15°S y 75- 65°W) con la altura geopotencial en 200 hPa. Periodo: diciembre 2015-marzo 2016	14
Figura 11: Altura Geopotencial promedio en mgp (línea negra) y viento promedio en m/s (barbas) en 200 hPa promediado entre 1 y 15 de diciembre del 2015.	16
Figura 12: Altura Geopotencial promedio en mgp (línea negra) y viento promedio en m/s (barbas) en 200 hPa promediado entre el 1 y 9 de marzo del 2016.	16
Figura 13: Altura Geopotencial promedio en mgp (línea negra) y viento promedio en m/s (barbas) en 200 hPa promediado entre el 6 y 12 de febrero del 2016.	17
Figura 14: Altura Geopotencial promedio en mgp (línea negra) y viento promedio en m/s (barbas) en 200 hPa promediado entre el 15 y 25 de febrero del 2016.	17
Figura 15: Altura Geopotencial (línea sólida negra) y viento en m/s (barbas) en 500 hPa para los días entre el 1 y 15 de diciembre del 2015.	18
Figura 16: Altura Geopotencial (línea sólida negra) y viento en m/s (barbas) en 500 hPa para los días entre el 1 y 9 de marzo del 2016.	18
Figura 17: Altura Geopotencial (línea sólida negra) y viento en m/s (barbas) en 500 hPa para los días entre el 6 y 12 de febrero del 2016.	19

Figura 18: Altura Geopotencial (línea sólida negra) y viento en m/s (barbas) en 500 hPa para los días entre el 15 y 25 de febrero del 2016.	19
Figura 19: Diagrama de Hovmoller: Viento promedio entre 800/700 hPa (m/s, vectores), agua precipitable (mm, matiz de colores) y presión a nivel medio del mar (hPa, líneas azules) en latitud de 16°Sur.	21
Figura 20: Viento en m/s en 850 hPa (vectores) y agua precipitable en mm (matiz de colores), promedio entre el 1 y 15 de diciembre del 2015.....	22
Figura 21: Viento en m/s en 850 hPa (vectores) y agua precipitable en mm (matiz de colores), promedio entre el 1 y 9 de marzo del 2016.....	22
Figura 22: Viento en m/s en 850 hPa (vectores) y agua precipitable en mm (matiz de colores), promedio entre el 6 y 12 de febrero del 2016.	23
Figura 23: Viento en m/s en 850 hPa (vectores) y agua precipitable en mm (matiz de colores), promedio entre el 15 y 25 de febrero del 2016.	23
Figura 24: Presión a nivel medio del mar en hPa (matiz de colores), viento en m/s en 850 hPa (barbas), promediado entre el 1 y 15 de diciembre del 2015.....	24
Figura 25: Presión a nivel medio del mar en hPa (matiz de colores), viento en m/s en 850 hPa (barbas), promediado entre el 1 y 9 de marzo del 2016.....	24
Figura 26: Presión a nivel medio del mar en hPa (matiz de colores), viento en m/s en 850 hPa (barbas), promediado entre el 6 y 12 de febrero del 2016	25
Figura 27: Presión a nivel medio del mar en hPa (matiz de colores), viento en m/s en 850 hPa (barbas), promediado entre el 15 y 25 de febrero del 2016	25

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Series de precipitación diaria para el periodo diciembre 2015 – marzo 2016 de las estaciones utilizadas en el estudio	30
Anexo 2: Imágenes de satélite Goes 13	35

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el análisis de las condiciones secas y húmedas en el periodo comprendido entre diciembre 2015 y marzo 2016. Condiciones atmosféricas favorecieron un corto periodo de superávit de lluvias en el mes de febrero, sin embargo, para el resto del verano, se presentó deficiencia de lluvias. En el análisis de las condiciones meteorológicas en la escala sinóptica, se encontró que para el mes de febrero predominaron sistemas de baja presión a lo largo de la costa lo que permitió que haya flujos del norte en niveles bajos (850-700 hPa) provenientes de la región ecuatorial que transportaron aire húmedo, lo que incrementó el contenido agua precipitable total en la vertiente occidental de la sierra sur.

Además, se observó que patrones de circulación sinóptica en niveles medios y altos fueron favorables para las precipitaciones en cortos periodos de tiempo (semanas), como una buena circulación de la Alta de Bolivia y flujos del este. En cambio, predominaron flujos del oeste durante los periodos de escasas precipitaciones.

Palabras clave: Agua precipitable, altura geopotencial, sierra sur del Perú, precipitación, Anticiclón del Pacífico Sur, Alta de Bolivia.

ABSTRACT

In the present work the analysis of the dry and humid conditions was carried out in the period between December 2015 and March 2016. Atmospheric conditions favored a short period of surplus of rains in the month of February, however, for the rest of the summer, there was rainfall deficiency. In the analysis of the meteorological conditions in the synoptic scale, it was found that for the month of February, low pressure systems predominated along the coast, which allowed low flows from the north (850-700 hPa) coming from the equatorial region that transported humid air, which increased the total precipitable water content in the western slope of the southern highlands.

In addition, it was observed that synoptic circulation patterns at medium and high levels were favorable for rainfall in short periods of time (weeks), such as good circulation of Bolivia's Upper and eastern flows. In contrast, western flows predominated during periods of low rainfall.

Keywords: Precipitable water, geopotential height, southern Peruvian Andes, precipitation, South Pacific High, The Bolivian high.

I. INTRODUCCIÓN

El clima en los Andes del Perú presenta durante el año dos periodos bien diferenciados, el periodo seco y el húmedo. El periodo húmedo suele iniciar con las primeras precipitaciones en setiembre, luego éstas se incrementan entre diciembre y marzo para luego disminuir a partir de abril. Por lo tanto, los meses de mayo a agosto conforman el periodo seco. Sin embargo, el periodo húmedo no tiene el mismo comportamiento todos los años, ya que, puede ser deficitario, estar dentro de lo normal o por encima. Incluso, dentro del periodo húmedo, los meses pueden presentar comportamientos diferentes.

En el presente trabajo se busca estudiar las causas que originaron variaciones en la escala intraestacional del comportamiento de la precipitación en la vertiente occidental del sur de los Andes del Perú durante el periodo comprendido entre diciembre 2015 y marzo 2016. Este periodo presentó un comportamiento particular, ya que, a pesar de ser caracterizado en su totalidad como deficitario, en febrero 2016, llovió por encima de lo normal, incluso con lluvias extremas entre los días 19 y 23 de ese mes.

Cabe resaltar que el periodo diciembre 2015 – marzo 2016 transcurrió durante la fase cálida del Fenómeno El Niño (FEN), fase asociada a precipitaciones deficitarias en la región Andina del sur del Perú (Vuille *et al.* 2000, Garreaud y Aceituno 2001, Garreaud *et al.* 2003, Vuille y Keimig 2004, Falvey y Garreaud 2005, Lagos *et al.* 2008, Lavado y Espinoza 2014). Sin embargo, las lluvias no fueron deficitarias durante todo el periodo, ya que, en febrero 2016 se incrementaron drásticamente. Este cambio abrupto en el patrón de las precipitaciones perjudicó a la sociedad. Tanto el déficit de precipitación como las lluvias abundantes significaron pérdidas económicas. Los cultivos de secano y campos de pastoreo se vieron perjudicados por la falta de agua durante los meses de déficit, así mismo, se disminuyó el agua para el abastecimiento de la población y se redujeron los niveles de los reservorios. Por otra parte, las lluvias abundantes en febrero 2016 no beneficiaron a la agricultura generaron daños debido a los desbordes de ríos, deslizamientos y aniegos que se presentaron.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. RÉGIMEN DE PRECIPITACIONES

El sector suroccidental del Perú comprende los territorios hiperáridos y áridos en la costa y áridos a semiáridos en la sierra. (SENAMHI s.f.) Esta aridez se debe a su ubicación geográfica, la cual coincide con el área de muy fuerte subsidencia atmosférica (movimientos descendentes del aire) asociada al Anticiclón del océano Pacífico Sureste, además, a su lejanía a las fuentes de humedad (evaporación y transpiración del bosque amazónico y evaporación del océano atlántico). El Océano Pacífico es una fuente muy importante de humedad, pero esta humedad, está mayormente confinada debajo de la capa de inversión, en la capa límite marina, debajo de los 800 a 1500 msnm. Por lo tanto, la humedad que llega a ingresar por los valles y quebradas secas hacia las pampas desérticas y estribaciones andinas normalmente es diluida en el aire muy seco de la subsidencia local y en el aire seco proveniente del desierto de Atacama (el más seco del mundo).

La vertiente occidental de la sierra sur incrementa de altitud en dirección al noreste, y entre los 2800 a más de 5000 msnm las precipitaciones tienen una tendencia a incrementar con la altitud hasta alcanzar valores de 500 mm/año aproximadamente. Esto se debe a las fuentes de humedad se ubican al este/noreste. (Garreaud y Aceituno 2001, Garreaud *et al.* 2003).

La precipitación en esta zona es del tipo lluvia, granizo y llovizna. Sobre los 4500 msnm un alto porcentaje de la precipitación es en la forma de aguanieve y nieve, principalmente en los meses de invierno.

En la estación de verano ocurre más del 70% de las precipitaciones, principalmente, debido a cambios en los vientos zonales en la tropósfera media y alta, determinantes para el transporte de humedad (figura 1). En los meses de otoño, las precipitaciones son muy escasas

y estas se restringen a las primeras semanas de marzo. En abril y mayo no precipita a excepción de días en los que se configura un sistema atmosférico denominado DANA (depresión atmosférica de niveles altos) en el mar territorial norte de Chile y sur de Perú (Quispe y Avalos 2006), la que favorece al transporte de aire húmedo desde el este y noreste, por lo que, se induce precipitaciones tipo nevada, algunas veces generalizadas.

En el invierno las precipitaciones son insignificantes, pero ocasionalmente ocurren precipitaciones generalizadas tipo nieve, cuando aparece una DANA sobre el océano Pacífico Tropical, al oeste del litoral norte de Chile. En la estación de primavera empiezan a ocurrir las primeras precipitaciones de la temporada húmeda, pero éstas son aisladas y ligeras.

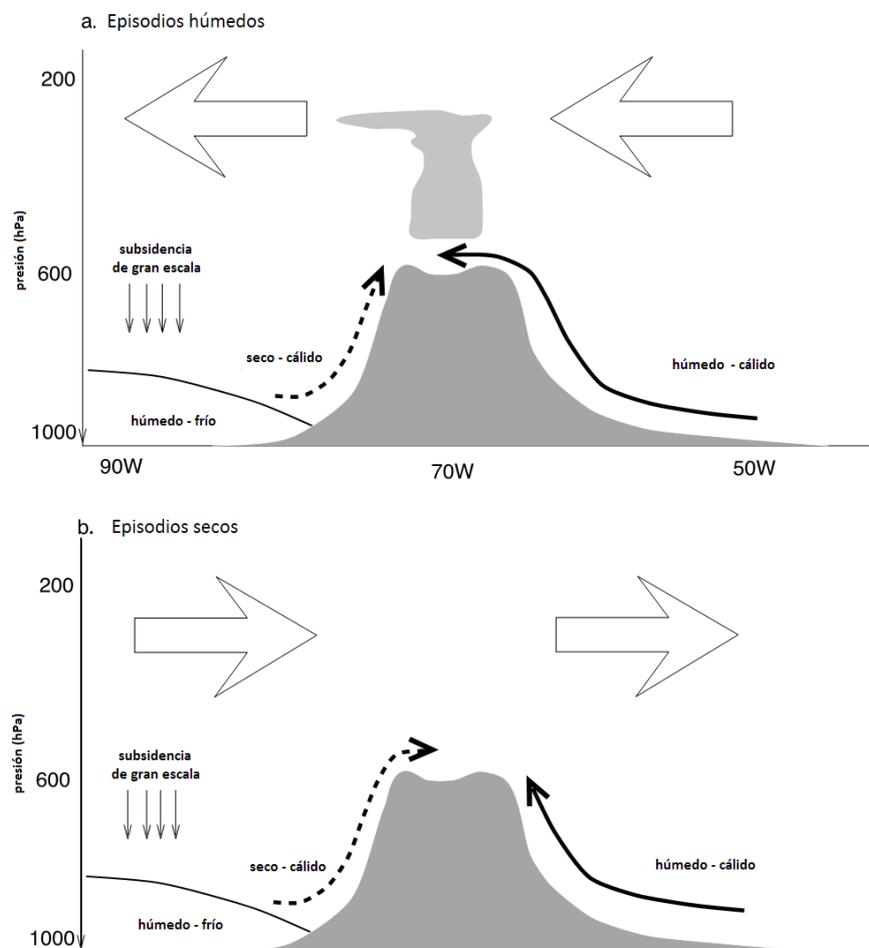


Figura 1: Modelo conceptual de las precipitaciones en el Altiplano.

FUENTE: Garreaud *et al.* (2003).

2.2. VARIACIÓN INTRAESTACIONAL DE LAS PRECIPITACIONES

A escala intraestacional, dentro de la estación de verano austral, los días lluviosos tienden agruparse en secuencias de alrededor de una semana de duración (episodios de lluvia), que son separados por episodios de sequía de similar tamaño (Garreaud *et al.*, 2003), esto debido a la frecuencia de tormentas convectivas que se organizan en bandas de mesoescala que abarcan gran parte de los Andes Centrales. Garreaud *et al.* (2003) resalta además la característica relación de mayor (menor) humedad asociada a vientos del este (oeste) influenciado por los cambios en la posición e intensidad del sistema de presión en altura denominada Alta de Bolivia. Los flujos del este en la troposfera alta (300 - 100 hPa) sobre los Andes Centrales conducen a un mayor (débil) flujo cuesta arriba sobre la vertiente este (oeste) y vientos del este de bajo nivel en el Altiplano, incrementando así el transporte de humedad desde las tierras bajas continentales que alimenta la convección profunda. El efecto opuesto de esta circulación regional es visto en casos cuando los vientos de altos niveles del oeste obstaculizan el transporte de humedad del este suprimiendo la convección húmeda sobre el Altiplano

2.3. ALTA DE BOLIVIA (AB)

Este sistema atmosférico es generado, por la combinación del calentamiento de los Andes/Altiplano y la liberación de calor latente de la condensación sobre el oeste de cuenca Amazónica, Los Andes Centrales y la Zona de Convergencia de Atlántico Sur (Lenter and Cook, 1997). Según Michael T. Gilford *et al* (1992) se forma en diciembre y permanece la mayor parte del tiempo hasta abril, cuando es desplazada al norte. Se posiciona en promedio alrededor de 13°S y 68°W. Los vientos en su centro son generalmente débiles, pero en la periferia el viento alcanza velocidades de 30 nudos. Estas velocidades son mayores debido a la presencia de la Corriente en Chorro Subtropical, que conjuntamente con la AB generan ventilación en los niveles altos de la tropósfera que favorece la convección. La AB es un anticiclón termal y es la responsable de que haya flujos del este en niveles altos y medios que llegan hacia la sierra sur occidental del Perú trayendo humedad de la Amazonía.

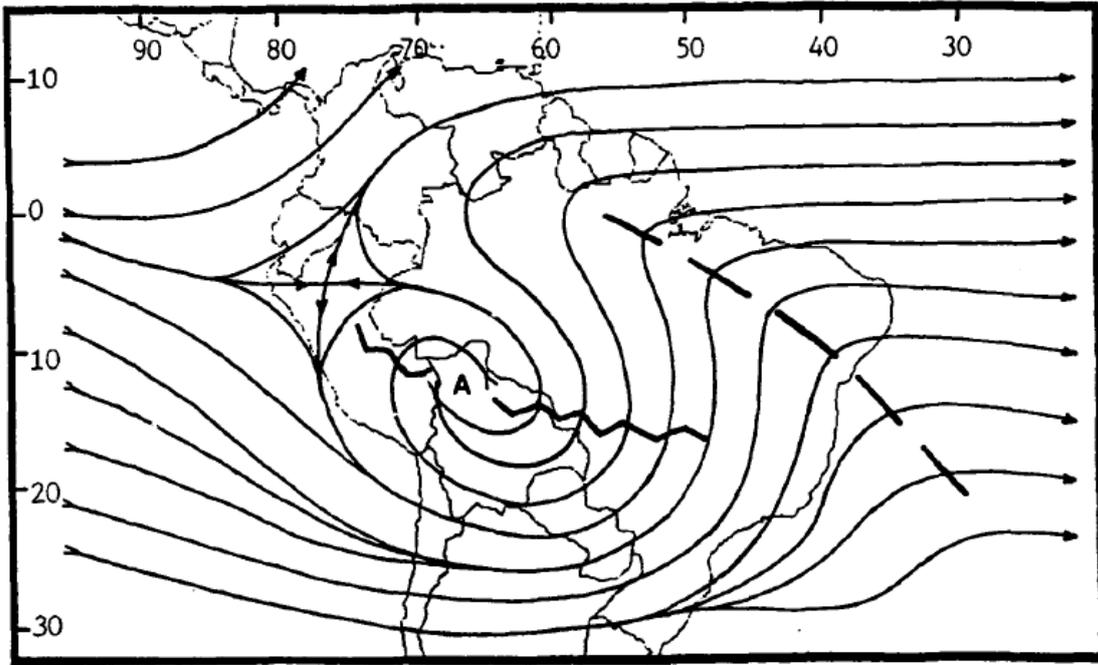


Figura 2: Alta de Bolivia en 200 hPa.

FUENTE: Gilford, *et al* (1992)

2.4. ANTICICLÓN DEL PACÍFICO SUR ORIENTAL

Este sistema semipermanente de alta presión se encuentra en la zona suroccidental del océano Pacífico, y es parte del cinturón de altas presiones de latitudes medias formado por la zona subsidente de la célula de Hadley. La Alta del Pacífico Sur es un sistema de núcleo cálido que gira en sentido contrario a las agujas del reloj. En la zona oriental de este sistema, los vientos del sur, paralelos a la costa de Chile y Perú, permiten que haya advección de aire frío y de humedad. Estos vientos impulsan la corriente fría de Humboldt, y produce el afloramiento costero, debido a ello, el mar frente a las costas occidental de Sudamérica es frío. El APSO es más intenso en los meses de setiembre y octubre y más débil entre marzo y junio. Su núcleo se encuentra más cerca al Perú los meses de mayo a junio, mientras que, en los meses de noviembre a febrero está más lejos. Cuando el APSO se debilita y se aleja del continente favorece el ingreso de flujos del norte en las capas de 850 y 700 hPa, frente a las costas de Perú, lo que permite el ingreso de aire cálido y húmedo proveniente de zonas más tropicales. Hay veces que el APSO puede verse influenciado por vaguadas en niveles más altos promoviendo su ingreso al continente por territorio chileno y argentino, cuando esto ocurre el sistema de alta presión es llamado Alta Migratoria.

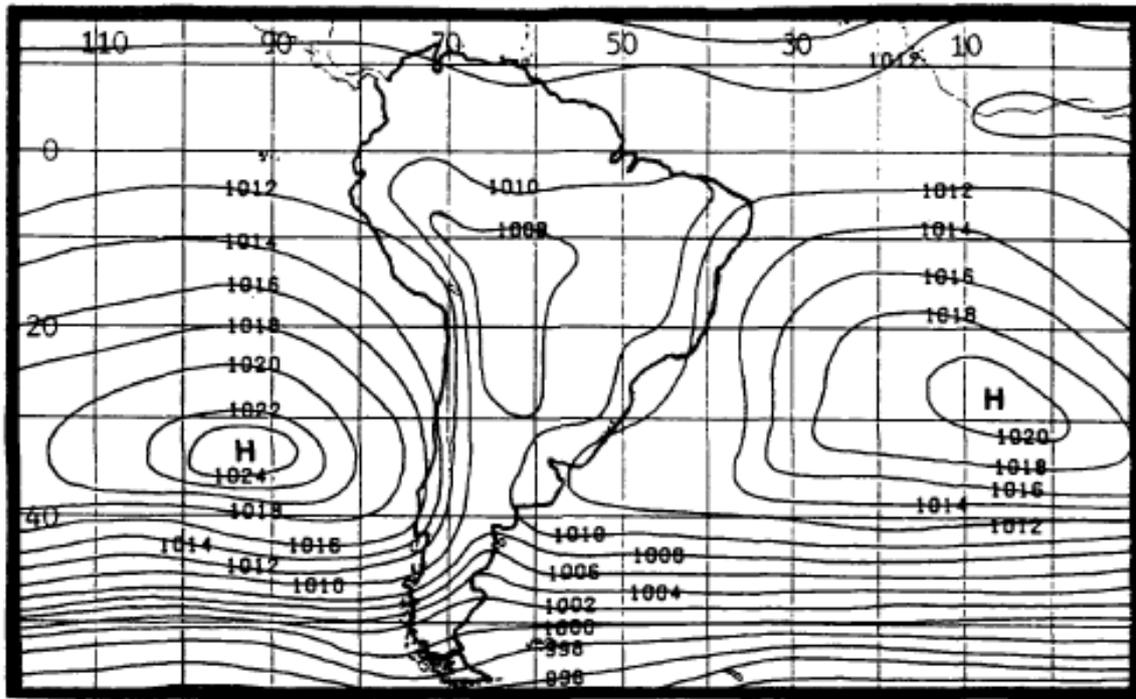


Figura 3: Presión a nivel medio del mar en enero.

FUENTE: Gilford, *et al* (1992)

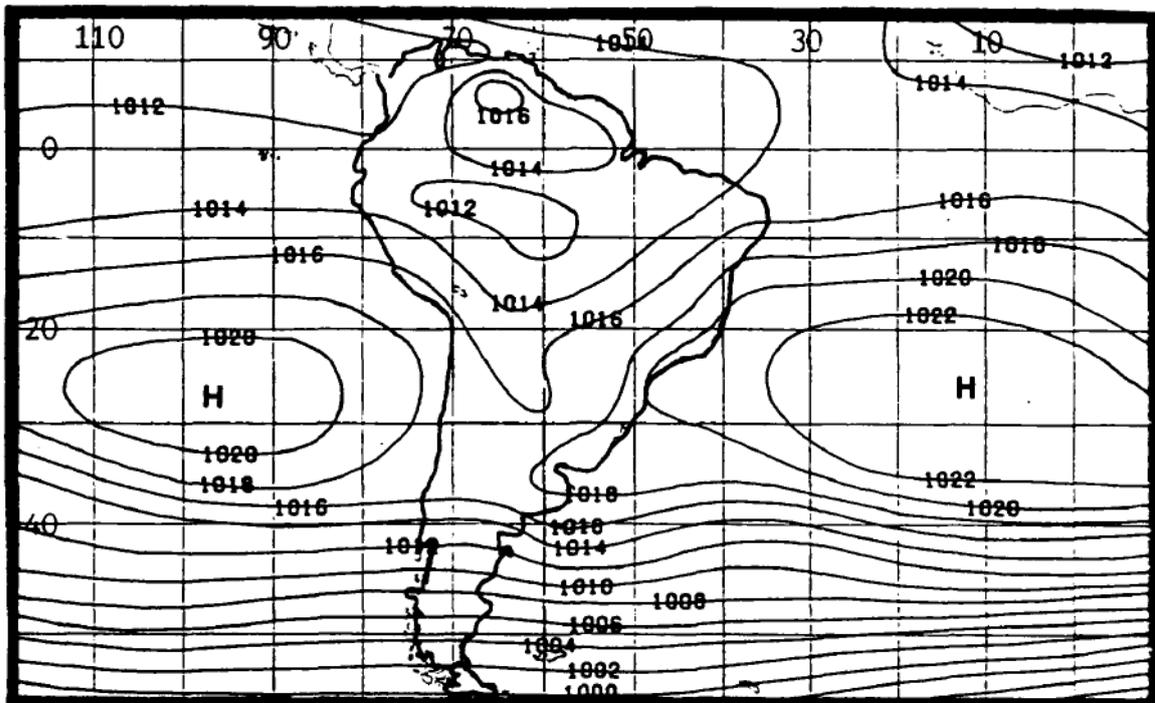


Figura 4: Presión a nivel medio del mar en julio.

FUENTE: Michael T. Gilford, *et al* 1992

2.5. AGUA PRECIPITABLE

Es todo el vapor de agua contenido en una columna vertical con una unidad de área de sección transversal entre dos niveles especificados. Comúnmente se expresa en términos de la altura que alcanzaría si todo este vapor de agua es condensado y colectado en un recipiente de área igual a la de la columna. (Meteorology Glossary, American Meteorological Society, 2017)

El agua precipitable total es el vapor de agua contenido en toda la columna atmosférica, desde la superficie de la Tierra hasta el tope de la atmósfera. Matemáticamente, si r es la relación de mezcla en el nivel de presión, p , entonces el vapor de agua precipitable, W , contenido en una capa delimitada por las presiones p_1 y p_2 está dado por:

$$W = \frac{1}{\rho} \int_{p_1}^{p_2} r dp$$

Donde ρ representa la densidad del agua y g es la aceleración de la gravedad. En tormentas reales las cantidades de lluvia muy a menudo exceden el agua precipitable total de la atmósfera. Esto se debe a la convergencia que lleva hacia la tormenta el vapor de agua del área circundante, que con frecuencia es bastante grande. Sin embargo, generalmente existe una correlación entre las cantidades de precipitación y el vapor de agua precipitable de las masas de aire involucradas en esas tormentas, en términos generales, cuanto mayor sea el agua precipitable total, tanta más humedad estará disponible para crear precipitación.

III. DESARROLLO DEL TEMA

3.1. DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos de precipitación diaria de 14 estaciones meteorológicas de la red observacional del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) ubicadas en la sierra sur del Perú en los departamentos de Arequipa, Moquegua, Tacna y sur de Puno (figura 5). Información acerca de la ubicación, altitud, de cada estación es mostrada en la Tabla 1.



Figura 5: Zona de estudio y estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 1: Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

ESTACIÓN	DISTRITO	PROVINCIA	DEPARTAMENTO	LATITUD (°S)	LONGITUD (°W)	ALTITUD (msnm)
CANDARAVE	CANDARAVE	CANDARAVE	TACNA	-17.271	-70.254	3435
CHUAPALCA	TARATA	TARATA	TACNA	-17.305	-69.644	4177
SUSAPAYA	SUSAPAYA	TARATA	TACNA	-17.351	-70.133	3420
PIZACOMA	PISACOMA	CHUCUITO	PUNO	-16.915	-69.373	3940
CAPAZO	CAPASO	EL COLLAO	PUNO	-17.186	-69.746	4419
MAZOCRUZ	SANTA ROSA	EL COLLAO	PUNO	-16.746	-69.712	3970
CALACOA	SAN CRISTOBAL	MARISCAL NIETO	MOQUEGUA	-16.735	-70.683	3260
UBINAS	UBINAS	GRAL SANCHEZ CERRO	MOQUEGUA	-16.383	-70.857	3491
LA PAMPILLA	AREQUIPA	AREQUIPA	AREQUIPA	-16.403	-71.517	2400
IMATA	SAN ANTONIO DE CHUCA	CAYLLOMA	AREQUIPA	-15.837	-71.088	4445
CHIVAY	CHIVAY	CAYLLOMA	AREQUIPA	-15.638	-71.597	3661
SIBAYO	SIBAYO	CAYLLOMA	AREQUIPA	-15.486	-71.453	3827
CABANACONDE	CABANACONDE	CAYLLOMA	AREQUIPA	-15.619	-71.969	3379
LA ANGOSTURA	CAYLLOMA	CAYLLOMA	AREQUIPA	-15.180	-71.649	4256

FUENTE: Elaboración propia

Para obtener los patrones de circulación atmosférica se utilizó las salidas del análisis del modelo numérico Global Forecast System (GFS) con una resolución temporal de 06hrs desde el 01 de diciembre del 2015 al 31 de marzo del 2016. Este modelo tiene una resolución espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, con cuatro corridas al día y es corrido operativamente por el National Center for Environmental Prediction (NCEP).

Para encontrar las diferencias entre las condiciones húmedas y las secas en el periodo diciembre 2015-marzo 2016 se realizó lo siguiente:

- a. Se describió el comportamiento de las lluvias con los datos de las estaciones meteorológicas.
- b. Se comparó las precipitaciones con el agua precipitable total en promedio en el área comprendida entre $25-15^{\circ}\text{S}$ y $75-65^{\circ}\text{W}$.
- c. Una vez que se haya demostrado la relación que hay entre el agua precipitable total y la precipitación en la zona de estudio, se realizó un mapa espacial de correlaciones entre el agua precipitable y la altura geopotencial en 200 hPa y 500 hPa con la finalidad de encontrar zonas relacionadas a las lluvias en la zona de estudio.

- d. Se analizará las condiciones sinópticas en niveles medios y altos para días con lluvias abundantes y para días con lluvias escasas, a través de mapas de altura geopotencial y viento en 200 y 500 hPa.
- e. Para estudiar los niveles bajos de la tropósfera y el ingreso de humedad proveniente del océano Pacífico se hará un diagrama hovmoller con los flujos promedio en la capa entre 700 y 850h Pa y con el agua precipitable. Así mismo, se elaborarán mapas de viento y agua precipitable en el nivel isobárico de 850 hPa. Adicionalmente, se realizará mapas de presión reducida al nivel medio del mar y vientos en 850 hPa con la finalidad de analizar las configuraciones que favorecen el incremento del aporte de agua precipitable desde el océano Pacífico.

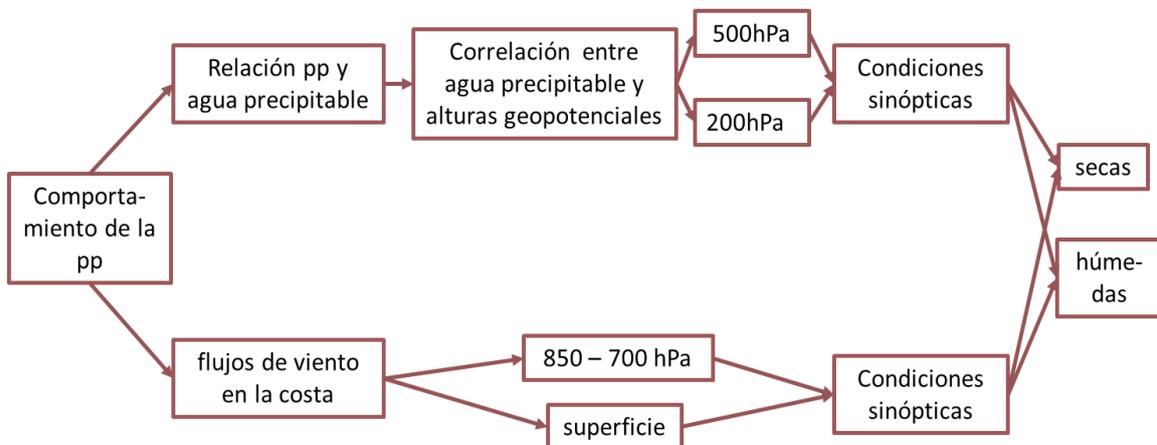


Figura 6: Flujograma de la metodología.

FUENTE: Elaboración propia

3.2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.2.1. Comportamiento de la precipitación

El comportamiento temporal de las precipitaciones desde el mes de diciembre del 2015 hasta marzo del 2016, es mostrado en la figura 6, donde se observa que el acumulado mensual para los meses de diciembre 2015, enero 2016 y marzo 2016, son muy deficitarias, ya que, alcanzan valores entre el 0 y 30 % de su media climática en la mayoría de estaciones. En cambio, en el mes de febrero 2016 la situación es completamente

opuesta, ya que, en algunas estaciones la precipitación estuvo dentro de lo normal y en otras se superó en 90% la media climática. En resumen, el periodo diciembre 2015-marzo 2016 presentó dos comportamientos claramente diferenciados: el de lluvias abundantes en febrero 2016 y el de lluvias escasas que ocurrió el resto del periodo.

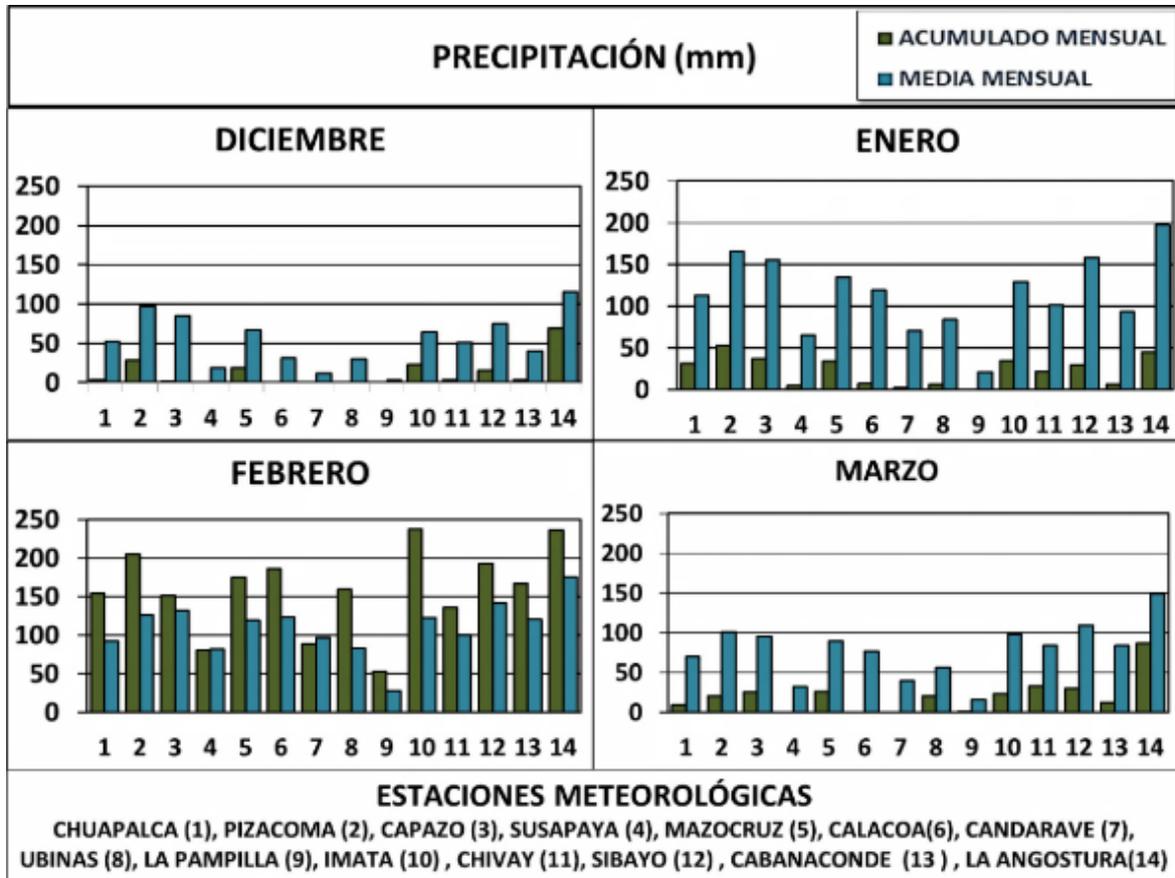


Figura 7: Precipitación mensual (barras verdes) y la media climática 1981-2010 (barras azules) de las estaciones utilizadas en el estudio.

FUENTE: Elaboración propia

3.2.2. Precipitación y agua precipitable total

En la figura 7, se muestra el comportamiento diario de la suma de la precipitación diaria de las 14 estaciones, junto con el del agua precipitable total estimada por el modelo en el área de la zona de estudio. Se evidencia que el incremento del acumulado total de la precipitación en el mes de febrero es correspondido con el comportamiento similar de la variación diaria del agua precipitable total, incluso en los días del 19 a 23 de febrero 2016, que son los días más lluviosos. El coeficiente de correlación de Pearson entre estas dos

variables es de 0.76, lo que indica una buena relación lineal. Como la precipitación en la zona de estudio para el período 2015-2016 tiene una buena asociación con el incremento sustancial de agua precipitable, entonces, se deduce que el contenido de humedad es uno de los principales factores para la ocurrencia de precipitaciones en esta región. Esto concuerda con lo encontrado por Garreud (1999) quien señala que el contenido de humedad y la compleja topografía crean las condiciones necesarias para la ocurrencia de la convección húmeda. Por lo tanto, el análisis del agua precipitable, como indicador del contenido de humedad de la atmósfera, es, en gran medida, un reflejo del comportamiento de las precipitaciones. Por esta razón, la relación entre la alturas geopotenciales en 500 hPa y 200 hPa con el agua precipitable es un indicador de la relación entre estas alturas geopotenciales y la precipitación.

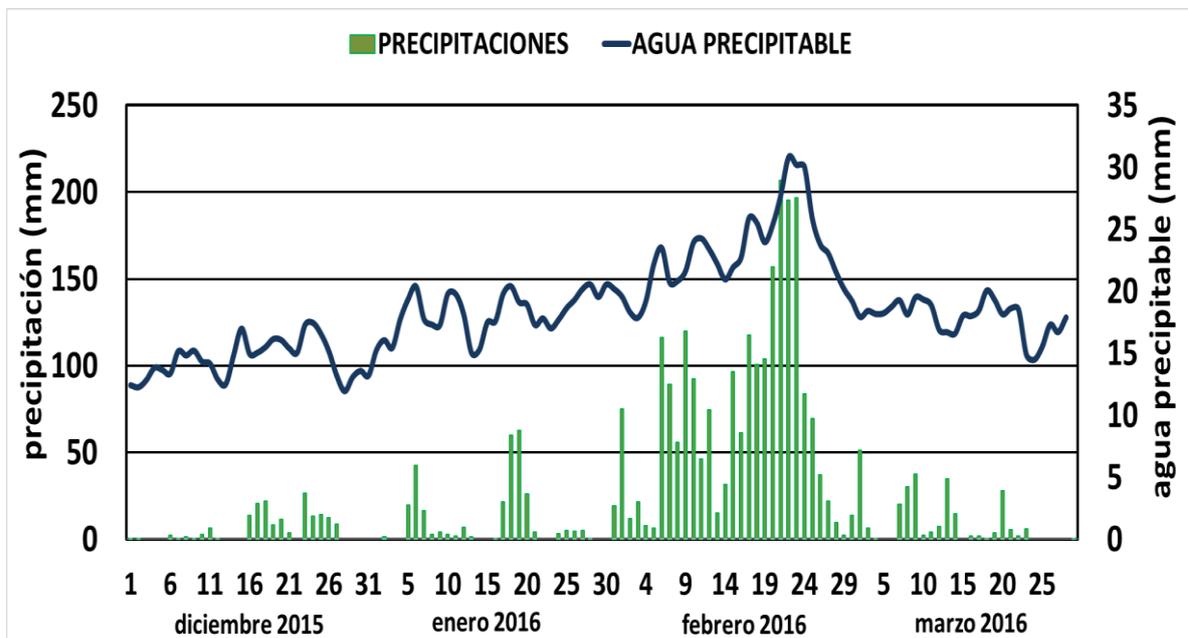


Figura 8: Serie diaria de la precipitación total de las 14 estaciones utilizadas (barras verdes) y del agua precipitable total promediado en el área en el área comprendida entre 25-15°S y 75- 65°W (línea azul)

FUENTE: Elaboración propia

3.2.3. Correlaciones entre el agua precipitable total y las alturas geopotenciales en 2000 y 500 hPa

Dos zonas de buena correlación entre la altura geopotencial en 200 hPa y el agua precipitable total de la región de estudio han sido encontradas (Figura 8). Una de estas dos zonas se ubica sobre el sur del Perú, norte de Chile y de Argentina, así como gran parte de Bolivia. Esto se debe a la posición e intensidad de la Alta de Bolivia que tiene valores altos de altura geopotencial. Esto concuerda con los estudios de Lenters y Cook (1997, 1999). Es decir, cuando la Alta de Bolivia se mostró al suroeste de su posición normal y con valores de altura geopotencial altos se presentaron los episodios de mayor precipitación. La otra zona donde se encontró una relación directa fue en el océano Pacífico, entre las latitudes 50 – 25°S y las longitudes 140 – 100°W. Esta zona con coeficientes de correlación altos está asociada a una dorsal. Cuando esta dorsal se posiciona y se intensifica genera que la vaguada que está flujo abajo se profundice. Esto permite que la circulación se torne más meridional y da lugar a que la Alta de Bolivia se intensifique y se desplace al sureste de su posición habitual favoreciendo las lluvias en la zona de estudio.

En la figura 9 se muestra los coeficientes de correlación entre el agua precipitable sobre la zona de estudio y la altura geopotencial en 500 hPa. También se encontraron dos zonas de buena correlación. Una se encuentra al norte de Chile y noroeste de Argentina. Los valores altos del coeficiente de correlación en esta zona demuestra que durante los días de más lluvias se configura en ese sector un anticiclón que permite que haya flujos del este que traen la humedad hacia la zona de estudio. La otra zona responde a la ubicación de la dorsal que es un reflejo de la dorsal en niveles altos. Esta dorsal también ayuda a la profundización de la vaguada, en respuesta a esto es posible que el anticiclón se posicione al norte de Chile y noroeste de Argentina.

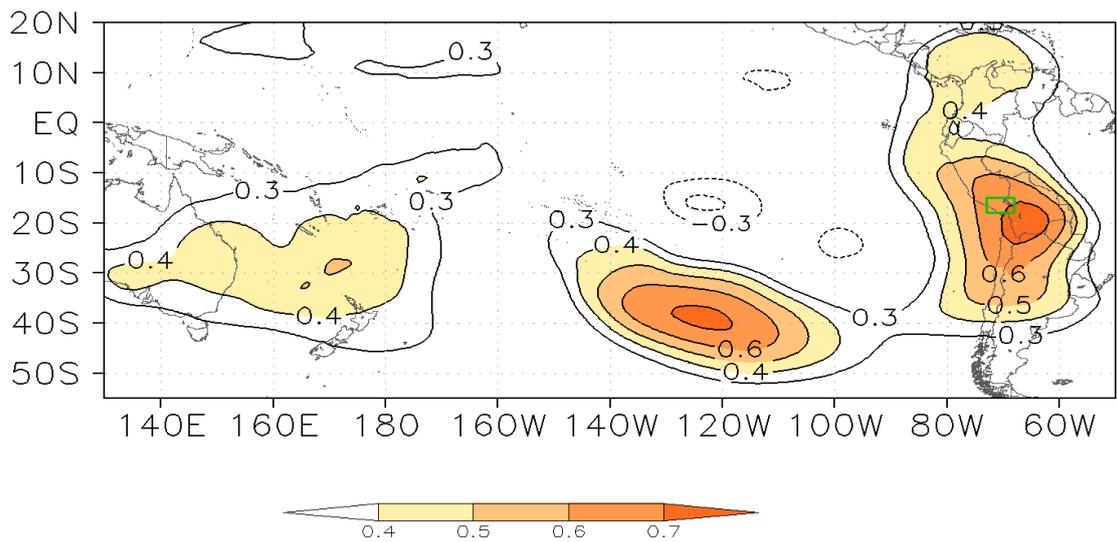


Figura 9: Coeficiente de correlación entre el agua precipitable (promedio en el área comprendida entre 25-15°S y 75- 65°W) con la altura geopotencial en 200 hPa. Periodo: diciembre 2015-marzo 2016

FUENTE: Elaboración propia

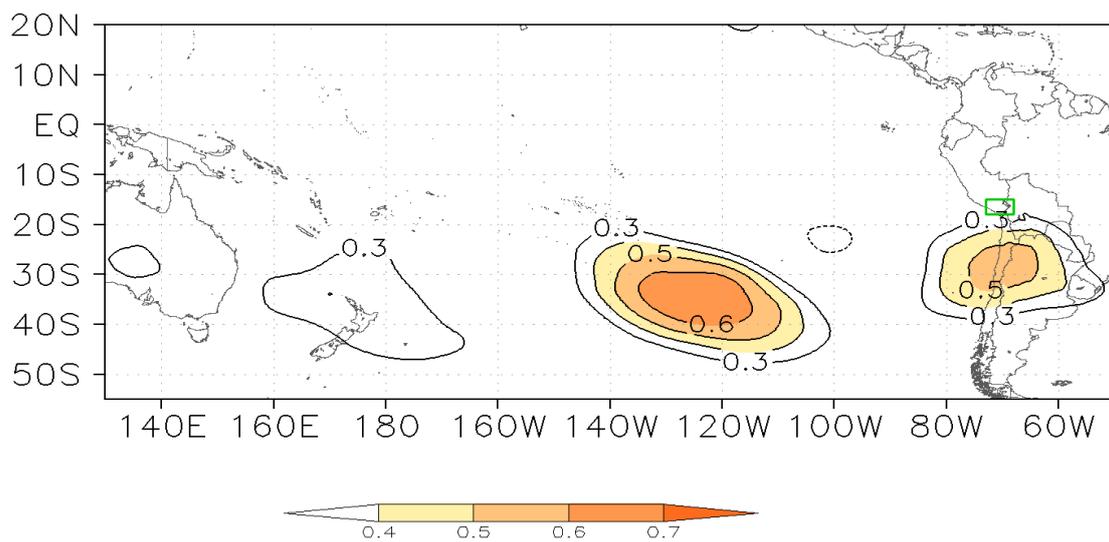


Figura 10: Coeficiente de correlación entre el agua precipitable (promedio en el área comprendida entre 25-15°S y 75- 65°W) con la altura geopotencial en 200 hPa. Periodo: diciembre 2015-marzo 2016

FUENTE: Elaboración propia

3.2.4. Configuraciones sinópticas en días con lluvias escasas y en días con lluvias abundantes

Para analizar las condiciones sinópticas durante los días con lluvias escasas y los días con lluvias abundantes se graficó el promedio de la altura geopotencial y del viento en los niveles de 200 y 500 hPa, para cuatro periodos. Dos de estos periodos corresponden a días secos: del 1 al 15 de diciembre 2015, periodo en que no llovió nada; y del 1 al 9 de marzo 2016, periodo en que se presentaron lluvias escasas y leves. Los otros periodos corresponden a los días con más lluvia y son del 6 al 12 de febrero 2016 y del 15 al 25 de febrero 2016. Este último periodo es el más lluvioso.

En la figura 10 que corresponde al periodo entre el 1 al 15 de diciembre, se tuvo que la configuración del viento en 200 hPa es zonal, ya que, no se tiene vaguadas ni dorsales de gran amplitud. Adicionalmente, la Alta de Bolivia no se encontró bien configurada. Para el periodo entre el 1 al 9 de marzo se tuvo la Alta de Bolivia, pero al norte de posición habitual y las ondas en el océano Pacífico no fueron de gran amplitud (figura 11).

En contraste, para el periodo entre el 6 al 12 de febrero en que se presentó un notable incremento de la precipitación, se tuvo una Alta de Bolivia muy intensa y que abarcó el sector ubicado sobre Paraguay, norte de Argentina y norte de Chile, así como, el sur de Perú. Esta Alta de Bolivia está asociada a una dorsal muy amplia sobre el continente formada por la Corriente en Chorro, mientras que en sobre el Pacífico esta corriente en Chorro se posicionó entre las latitudes 20 y 5 °S con configuración zonal, pero formando una dorsal entre las longitudes 150 y 140 °W. (figura 12). En el periodo del 15 al 25 de febrero, que fue el periodo más lluvioso, la dorsal sobre el océano Pacífico se amplificó profundizando la vaguada flujo abajo, esto permitió que la dorsal sobre el continente se expanda al igual que la Alta de Bolivia (figura 13).

De acuerdo a los mapas en 500 hPa (figuras 14, 15,16 y 17) la configuración sobre el océano Pacífico corresponde al reflejo a la circulación en niveles altos. Sobre el continente, la posición del anticiclón fue importante porque al ubicarse más al sur los días más lluviosos permitió que se configurase flujos del este sobre la zona de estudio que

trajeron la humedad desde la Amazonía, mientras que, la posición más al norte de este anticiclón generó flujos del oeste durante los días sin lluvias o lluvias escasas.

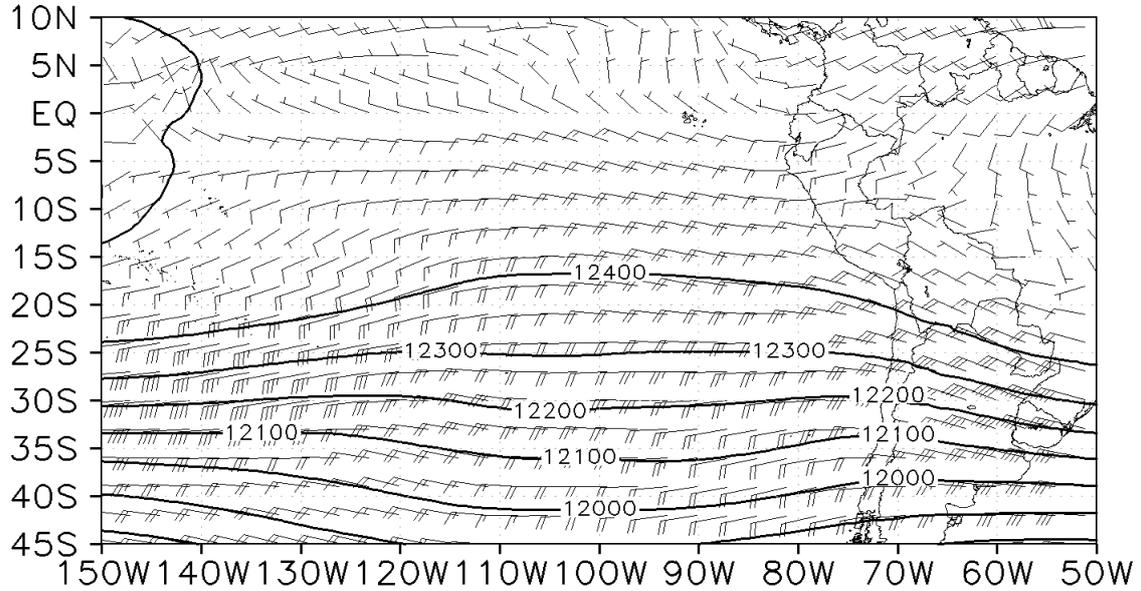


Figura 11: Altura Geopotencial promedio en mgp (línea negra) y viento promedio en m/s (barbas) en 200 hPa promediado entre 1y 15 de diciembre del 2015.

FUENTE: Elaboración propia

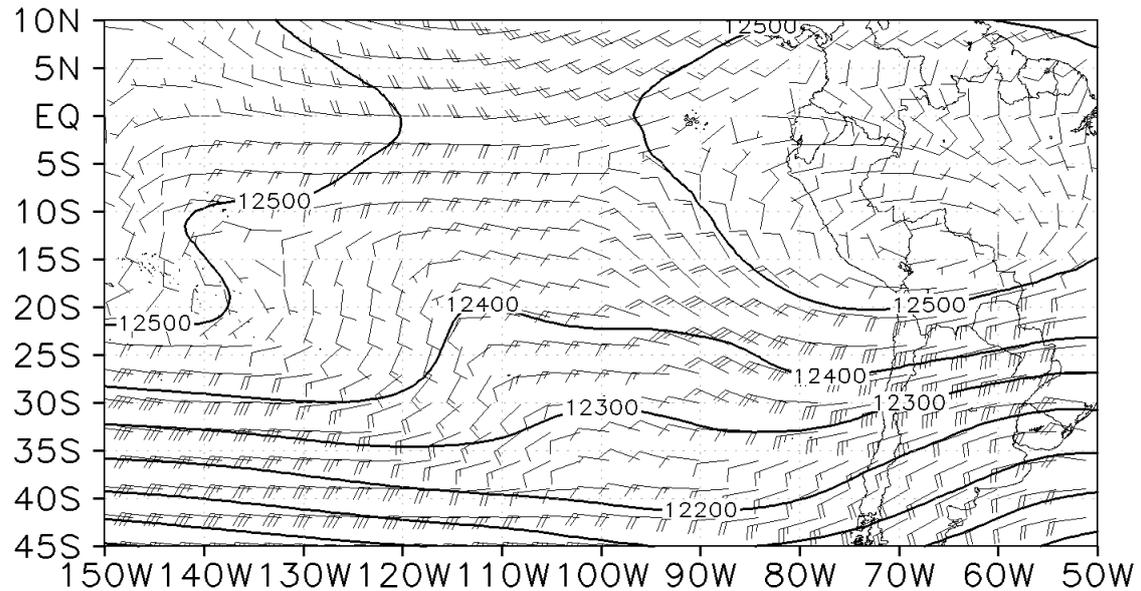


Figura 12: Altura Geopotencial promedio en mgp (línea negra) y viento promedio en m/s (barbas) en 200 hPa promediado entre el 1 y 9 de marzo del 2016

FUENTE: Elaboración propia

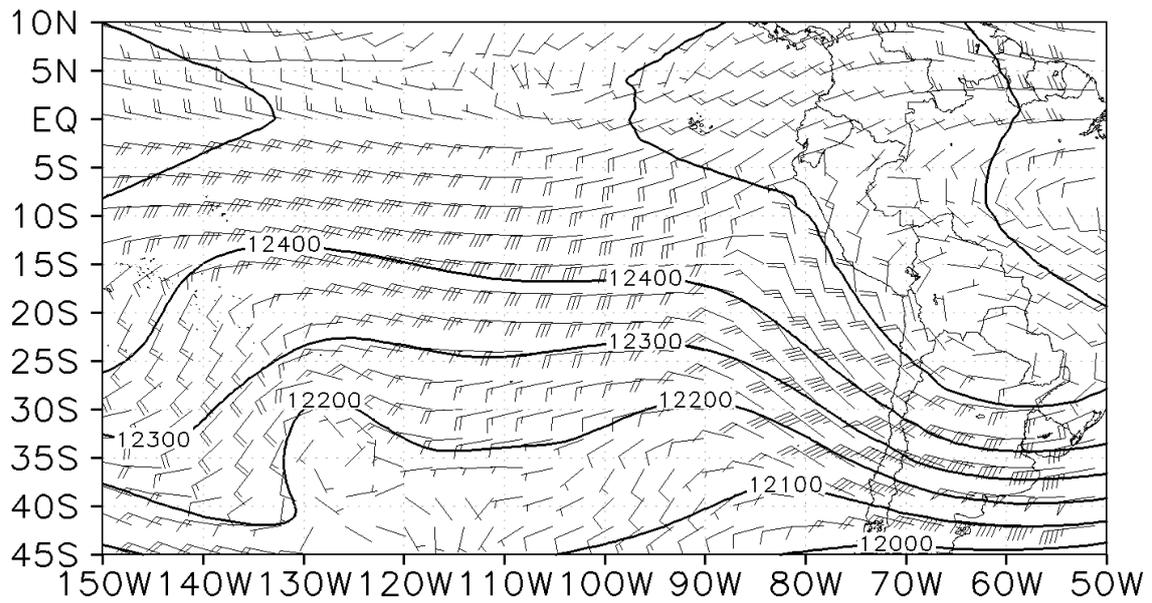


Figura 13: Altura Geopotencial promedio en mgp (línea negra) y viento promedio en m/s (barbas) en 200 hPa promediado entre el 6 y 12 de febrero del 2016

FUENTE: Elaboración propia

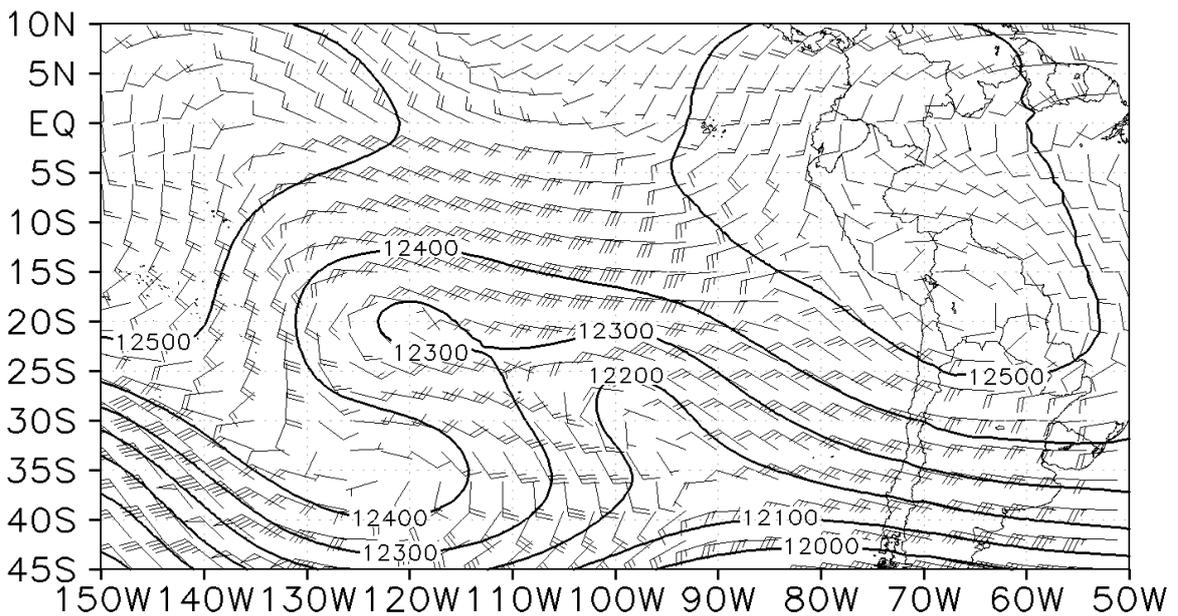


Figura 14: Altura Geopotencial promedio en mgp (línea negra) y viento promedio en m/s (barbas) en 200 hPa promediado entre el 15 y 25 de febrero del 2016

FUENTE: Elaboración propia

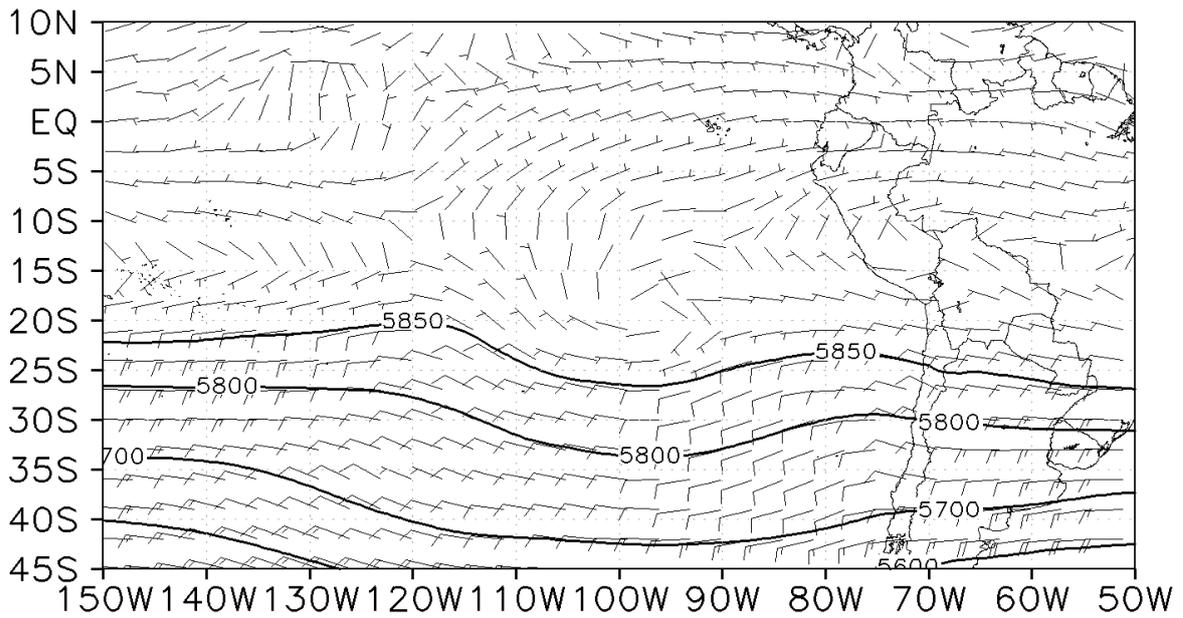


Figura 15: Altura Geopotencial (línea sólida negra) y viento en m/s (barbas) en 500 hPa para los días entre el 1 y 15 de diciembre del 2015

FUENTE: Elaboración propia

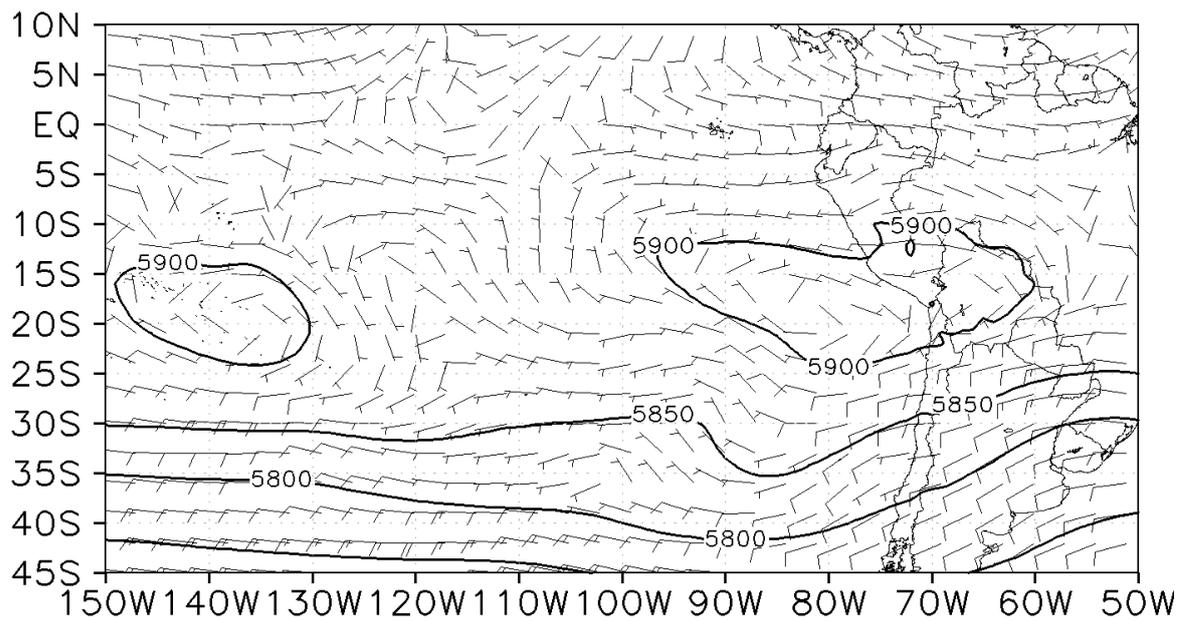


Figura 16: Altura Geopotencial (línea sólida negra) y viento en m/s (barbas) en 500 hPa para los días entre el 1 y 9 de marzo del 2016.

FUENTE: Elaboración propia

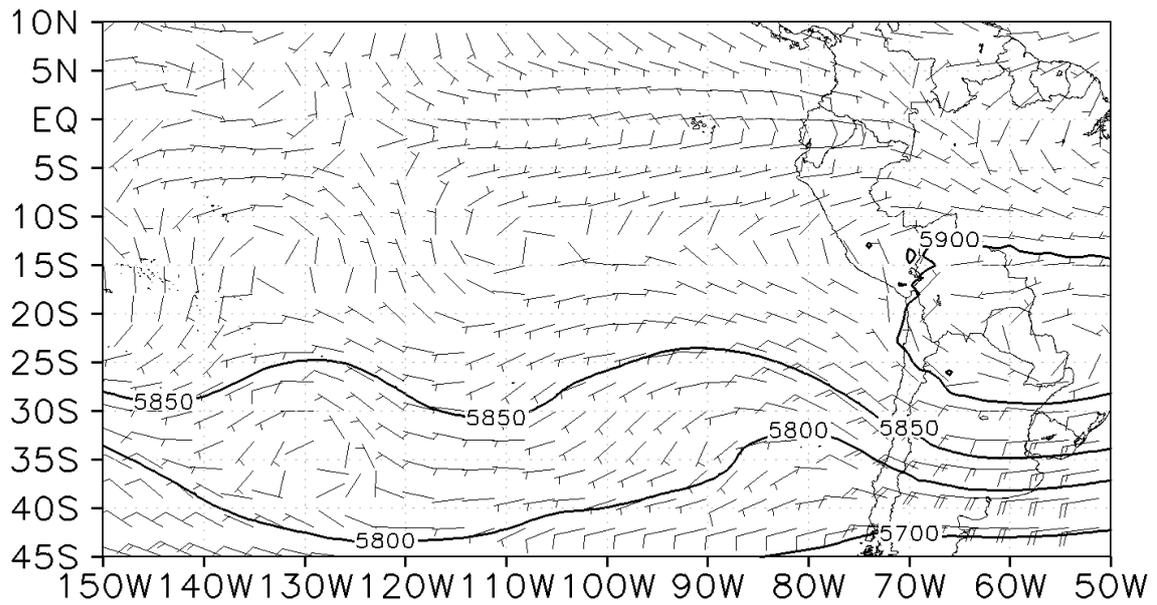


Figura 17: Altura Geopotencial (línea sólida negra) y viento en m/s (barbas) en 500 hPa para los días entre el 6 y 12 de febrero del 2016.

FUENTE: Elaboración propia.

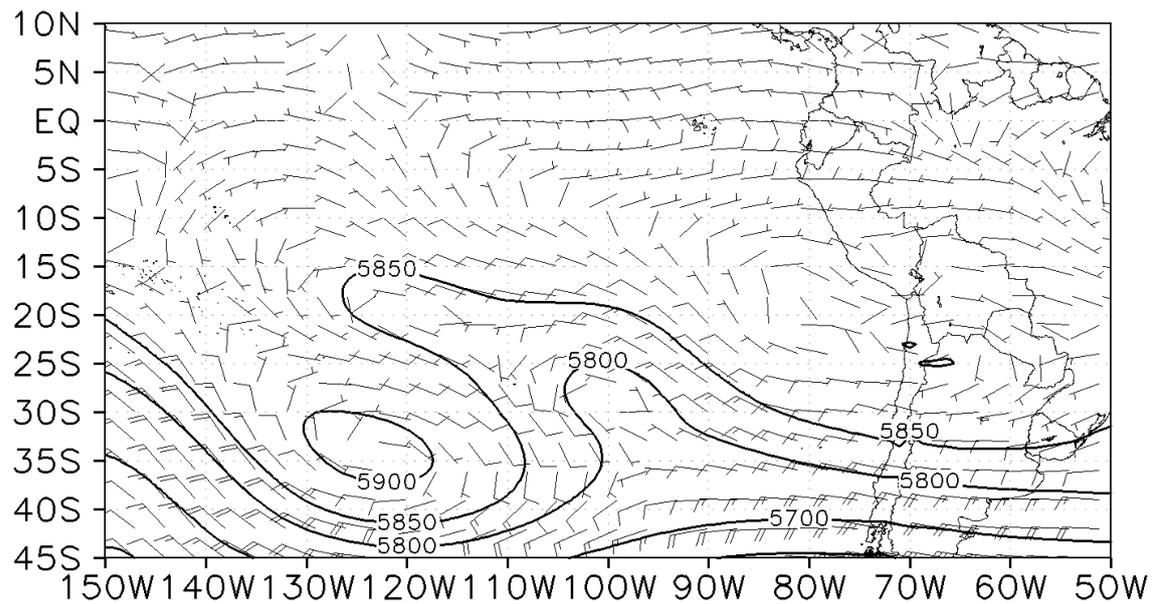


Figura 18: Altura Geopotencial (línea sólida negra) y viento en m/s (barbas) en 500 hPa para los días entre el 15 y 25 de febrero del 2016.

FUENTE: Elaboración propia.

3.2.5. Análisis de niveles bajos e ingreso de humedad del océano Pacífico

El diagrama hovmoller de la figura 18 muestra el agua precipitable en la latitud 16°S que corresponde a la latitud de la zona de estudio y se ve como se incrementa durante los días que más lluvia hubo alrededor de los 76°W conjuntamente con mayores flujos del norte. El agua precipitable aumenta en esta zona, debido a, los flujos que ingresen del norte frente a la costa del Perú en los niveles entre 850 y 700 hPa que traen la humedad desde la zona ecuatorial. El agua precipitable fue máximo entre el 19 y 23 de febrero, que fueron los días que más llovió y en que se produjeron lluvias extremas. De esta manera se comprueba la importancia de los flujos del norte que traen humedad hasta latitudes del sur del Perú y que ingresa por los valles gracias a las brisas de mar.

En las figuras 19, 20, 21 y 22 se grafica el viento en 850 hPa y el agua precipitable en los mismos periodos analizados en la sección 4.2.4. En estas figuras se observa que durante el 1 y 15 de diciembre, periodo que no llovió en la zona de estudio, el agua precipitable frente a la costa sur del Perú es menor a 30 mm, en el periodo entre el 1 y 9 de marzo el agua precipitable en esta zona del Pacífico estuvo entre 30 y 40 mm, sin embargo las lluvias fueron escasas en este periodo porque las condiciones en niveles altos y medios no fueron favorables. Durante el periodo entre el 6 y 12 de febrero el agua precipitable frente a la costa sur del Perú estuvo también entre 30 y 40 mm, y las condiciones en niveles altos y medios sí fueron favorables para que se produzca el incremento de las lluvias durante estos días. Finalmente, entre el 15 y 25 de febrero el agua precipitable en la costa llegó hasta 50 mm, y con circulaciones favorables en los niveles superiores se genera las condiciones adecuadas para presentar lluvias extremas en la zona de estudio.

Las figuras 23, 24, 25 y 26 muestran la presión en el nivel medio del mar y el viento en 850 hPa en los mismos periodos analizados anteriormente. En estas figuras se aprecia que los flujos del norte en la costa peruana es favorecido por el debilitamiento y el alejamiento del continente del APSO.

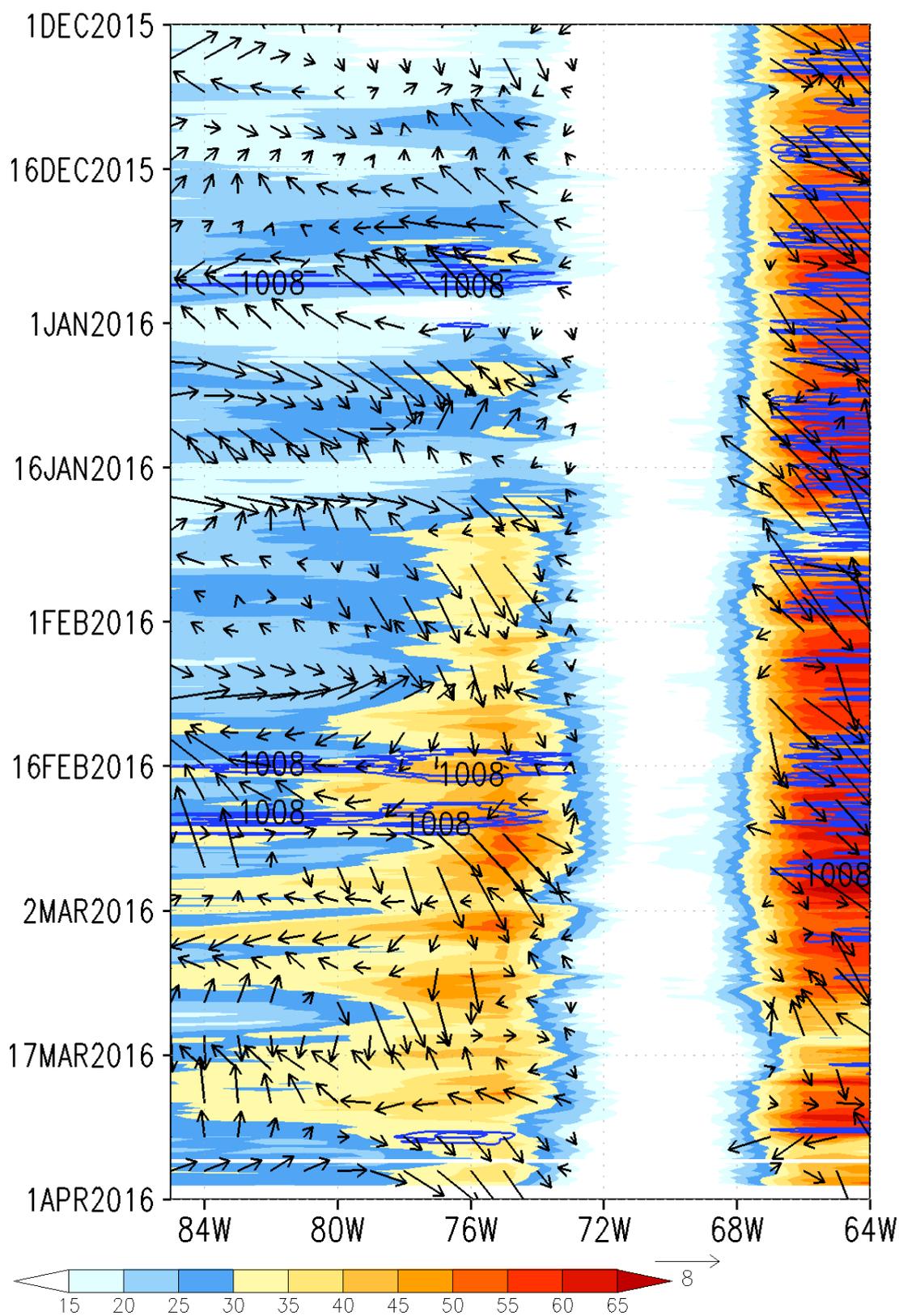


Figura 19: Diagrama de Hovmoller: Viento promedio entre 800/700 hPa (m/s, vectores), agua precipitable (mm, matiz de colores) y presión a nivel medio del mar (hPa, líneas azules) en latitud de 16°Sur.

FUENTE: Elaboración propia

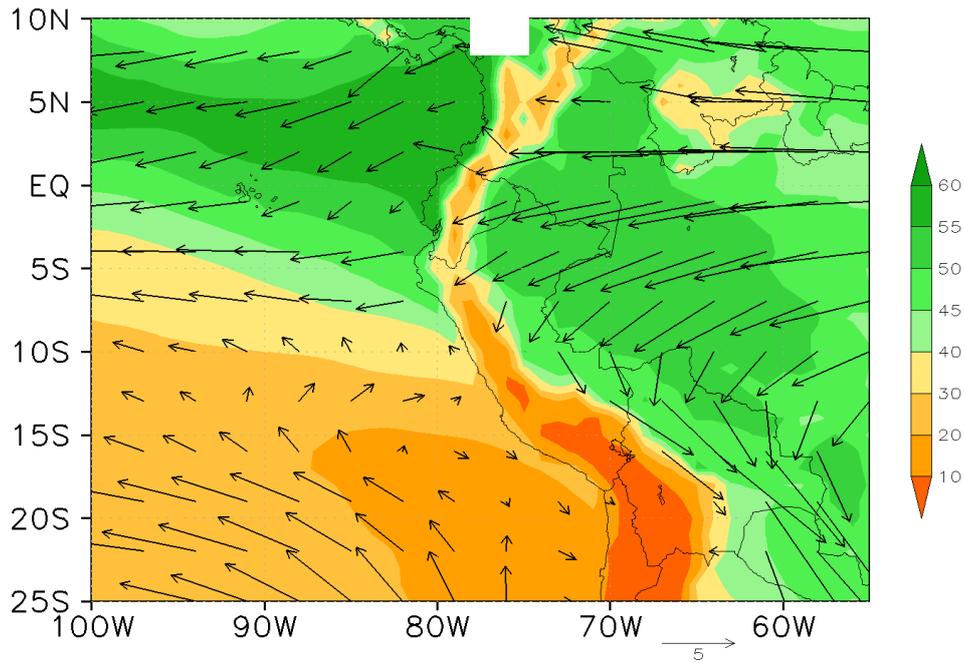


Figura 20: Viento en m/s en 850 hPa (vectores) y agua precipitable en mm (matiz de colores), promedio entre el 1 y 15 de diciembre del 2015.

FUENTE: Elaboración propia

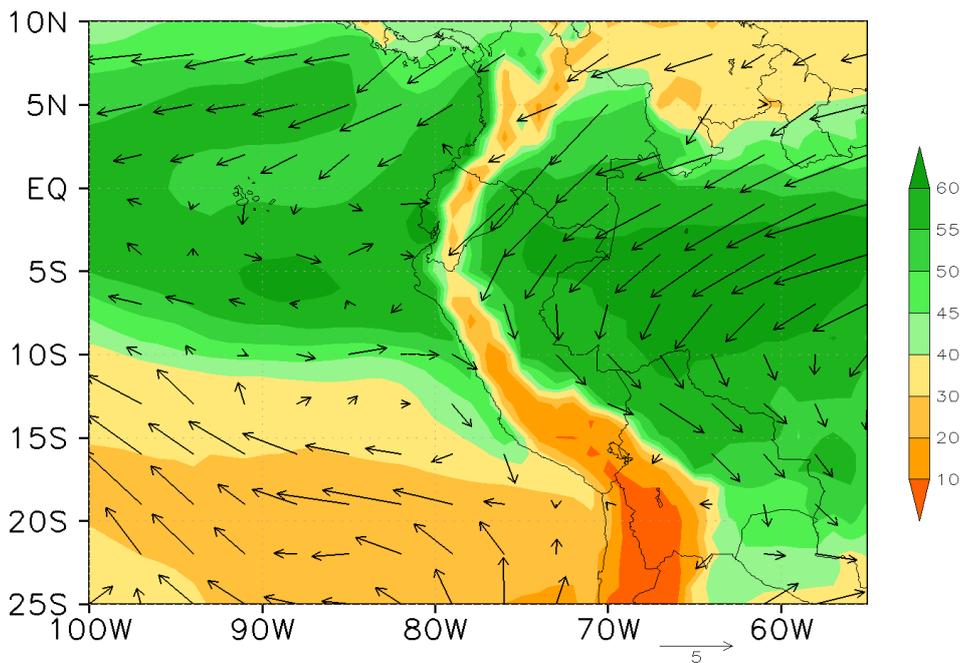


Figura 21: Viento en m/s en 850 hPa (vectores) y agua precipitable en mm (matiz de colores), promedio entre el 1 y 9 de marzo del 2016.

FUENTE: Elaboración propia

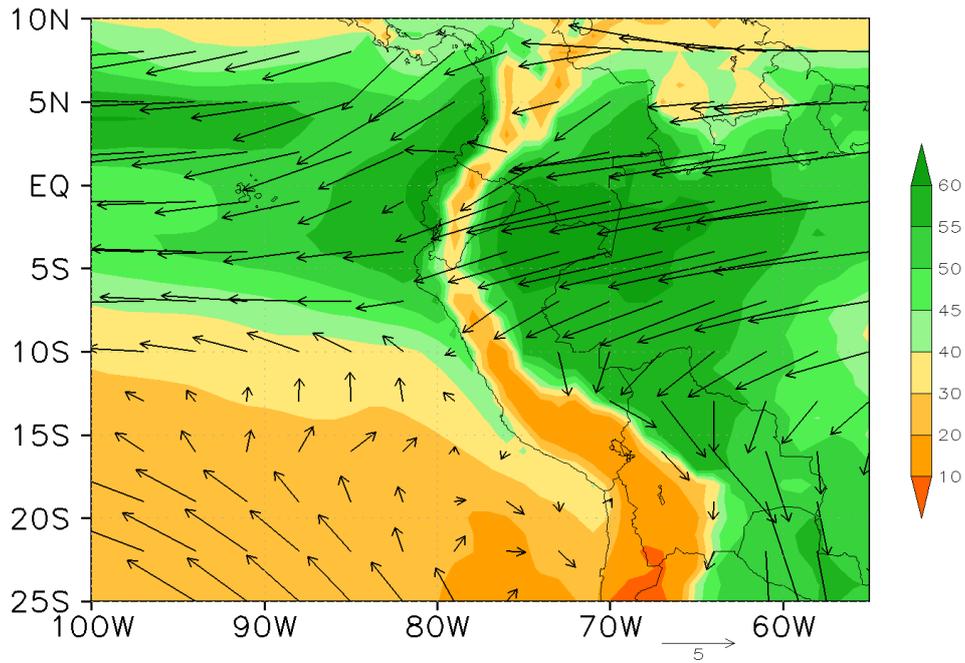


Figura 22: Viento en m/s en 850 hPa (vectores) y agua precipitable en mm (matiz de colores), promedio entre el 6 y 12 de febrero del 2016.

FUENTE: Elaboración propia

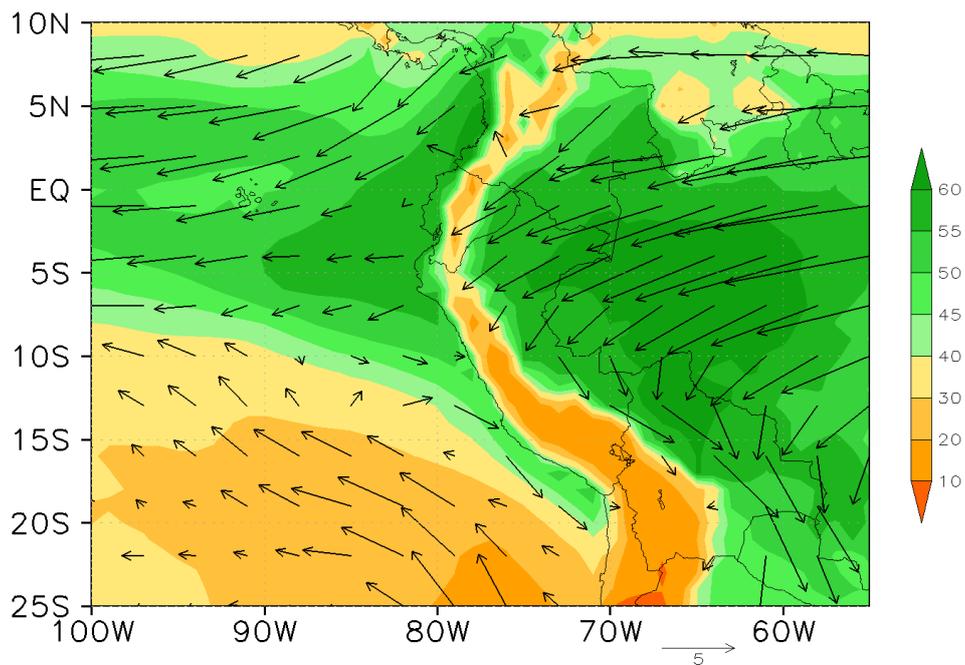


Figura 23: Viento en m/s en 850 hPa (vectores) y agua precipitable en mm (matiz de colores), promedio entre el 15 y 25 de febrero del 2016.

FUENTE: Elaboración propia

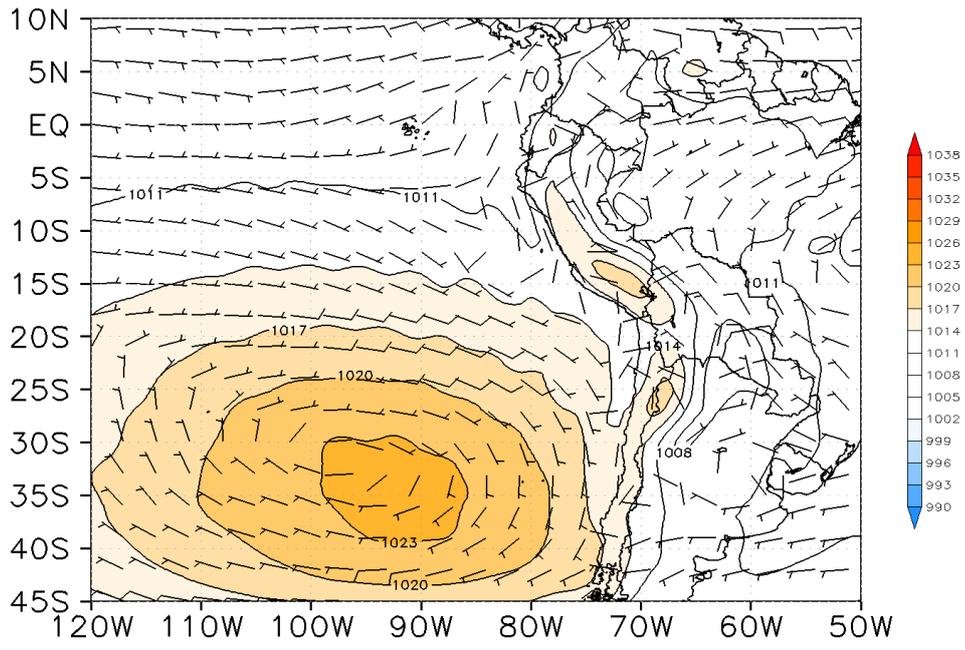


Figura 24: Presión a nivel medio del mar en hPa (matiz de colores), viento en m/s en 850 hPa (barbas), promediado entre el 1 y 15 de diciembre del 2015.

FUENTE: Elaboración propia

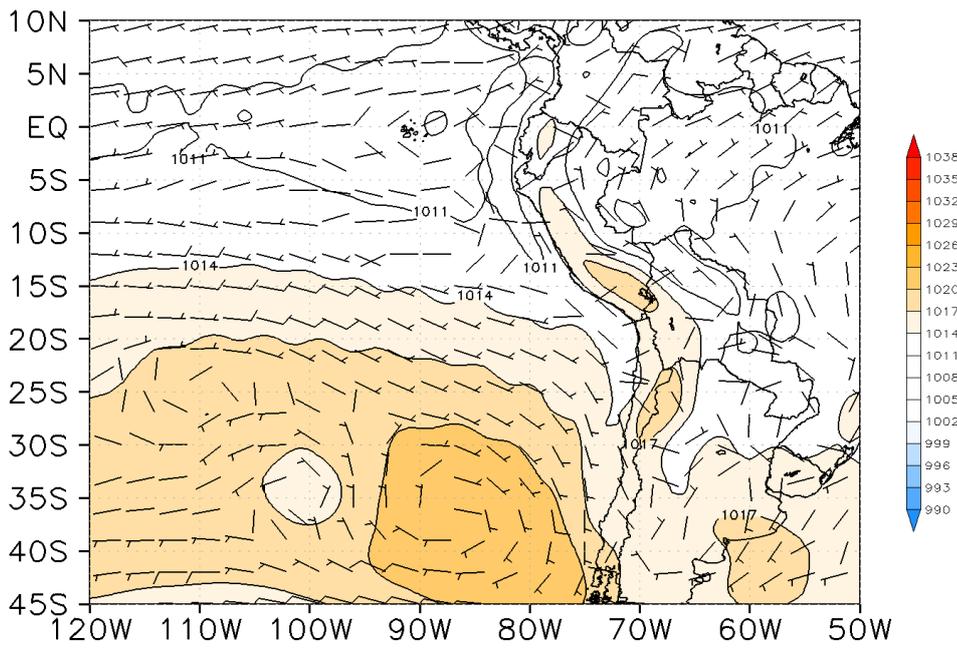


Figura 25: Presión a nivel medio del mar en hPa (matiz de colores), viento en m/s en 850 hPa (barbas), promediado entre el 1 y 9 de marzo del 2016.

FUENTE: Elaboración propia

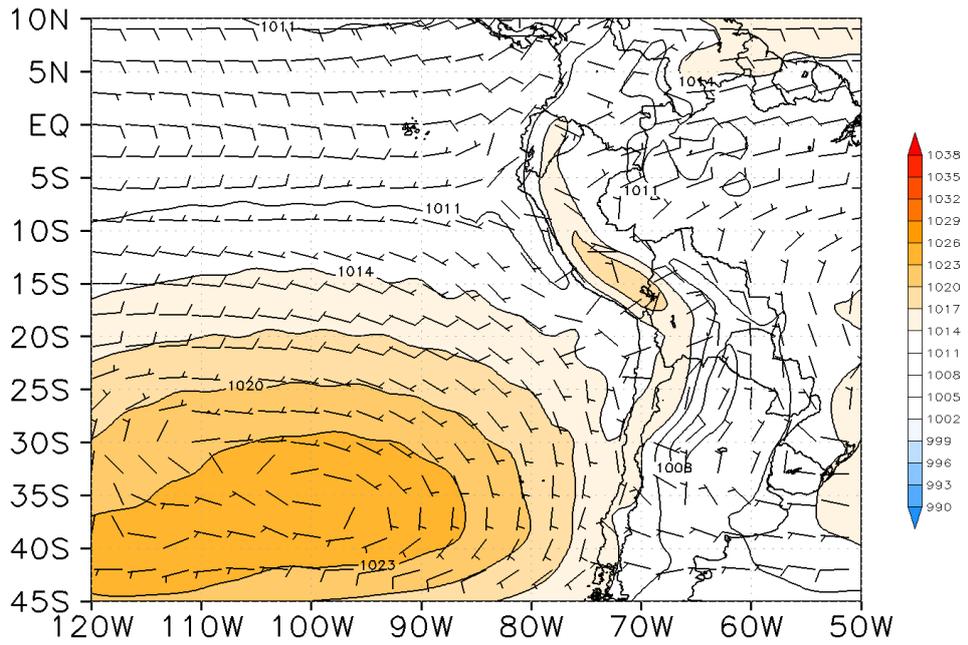


Figura 26: Presión a nivel medio del mar en hPa (matiz de colores), viento en m/s en 850 hPa (barbas), promediado entre el 6 y 12 de febrero del 2016

FUENTE: Elaboración propia

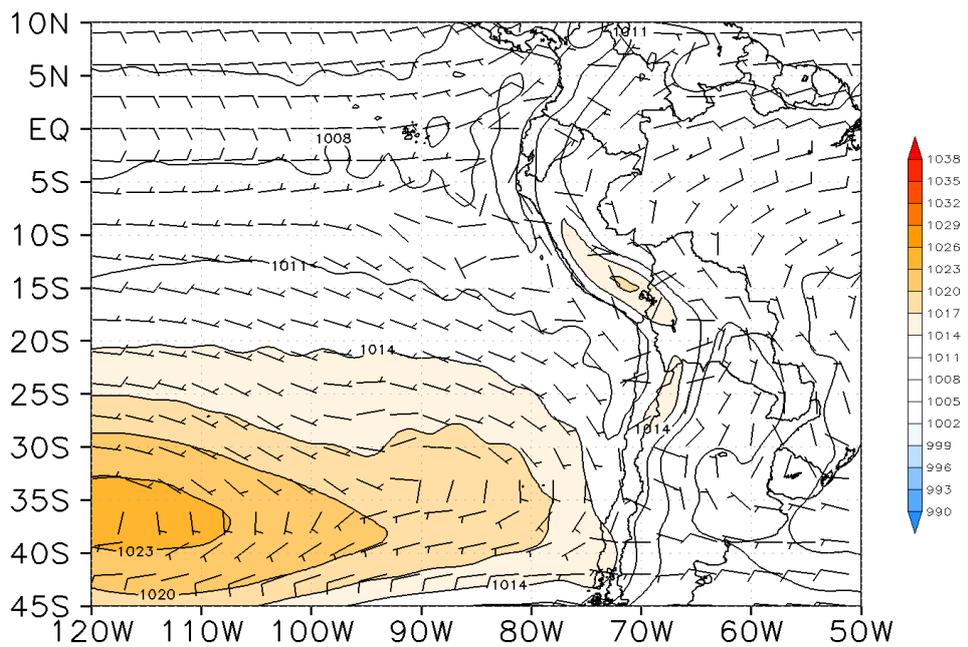


Figura 27: Presión a nivel medio del mar en hPa (matiz de colores), viento en m/s en 850 hPa (barbas), promediado entre el 15 y 25 de febrero del 2016

FUENTE: Elaboración propia

IV. CONCLUSIONES

Las precipitaciones fueron deficitarias en la sierra occidental sur en el periodo comprendido entre diciembre 2015 y marzo 2016, ya que la precipitación en estos meses estuvo entre el 0 y 30% de su media climática, sin embargo, en el mes de febrero 2016, la lluvia se incrementó notablemente y se tuvo precipitaciones que estuvieron de lo normal y por encima hasta en un 90%.

Las precipitaciones en la sierra occidental sur del Perú dependen de la cantidad de agua precipitable total presente sobre ese sector. Esto se comprobó graficando la precipitación diaria total de todas las estaciones junto con el agua precipitable sobre la zona de estudio y se encontró una relación directa.

Las lluvias en la zona de estudio durante el periodo analizado se correlacionan con la altura geopotencial en 200 hPa en dos zonas. Una zona se ubica sobre el continente abarcando Perú, Bolivia, Paraguay y norte de Chile y de Argentina, asociado a la intensificación y desplazamiento al suroeste de la Alta de Bolivia, y la otra zona está se encuentra sobre el océano Pacífico asociado a la intensificación de una dorsal. Estas lluvias también se correlacionan con la altura geopotencial en 500 hPa en dos zonas, una sobre el norte de Chile y de Argentina, asociada un anticiclón que genera flujos del este que transporta humedad a la zona de estudio durante los episodios de lluvias abundantes. La otra zona se ubica en el océano Pacífico y está asociado a la dorsal en altura.

Las lluvias extremas en la zona de estudio no se dieron cuando solamente se tuvo condiciones favorables en niveles medios y altos, sino también cuando flujos del norte en la costa peruana en la capa entre 850 y 700 hPa transportan humedad hacia la zona de la costa sur del Perú y esta humedad fue advectada hacia la sierra por los valles gracias a las brisas marinas.

V. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio similar de lluvias en la sierra occidental sur, para temporadas de lluvias de otros años con la finalidad de investigar si lo encontrado en el presente estudio es aplicable.

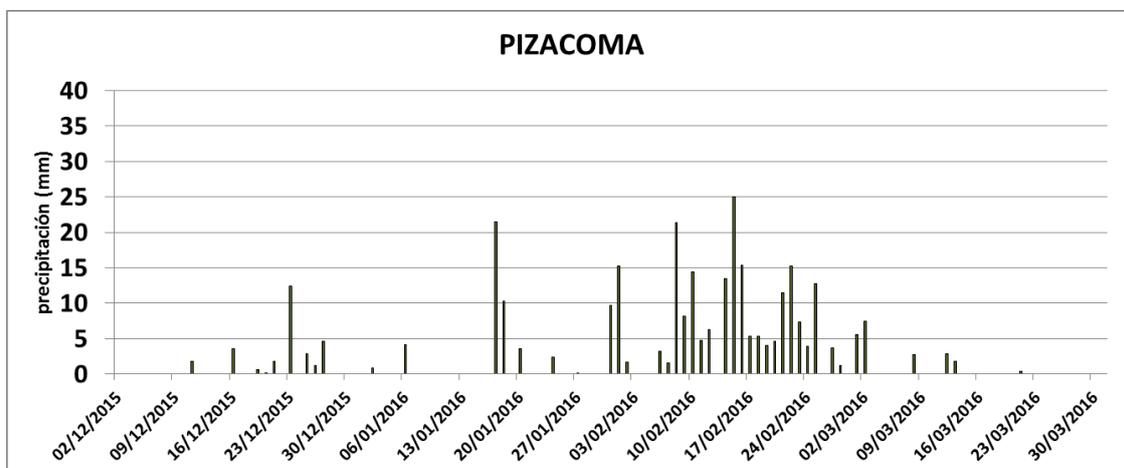
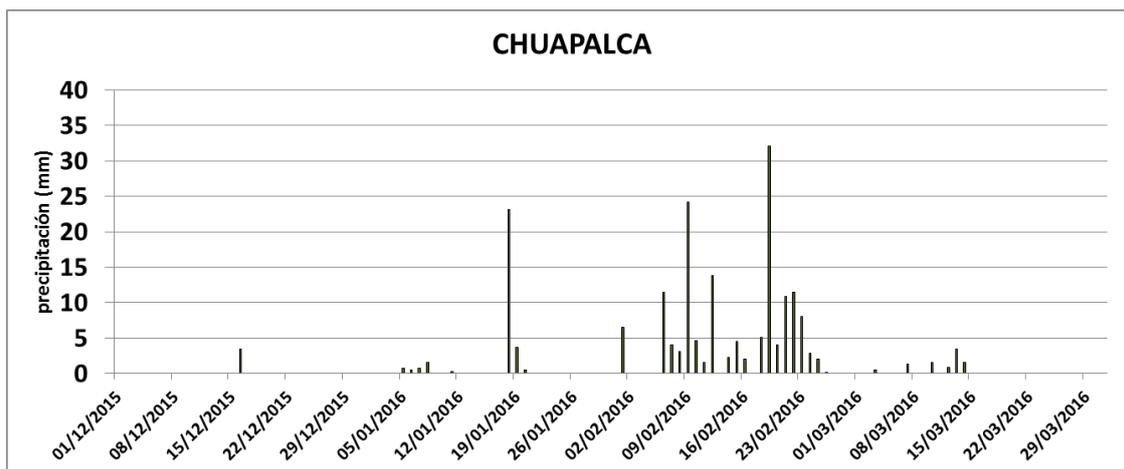
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

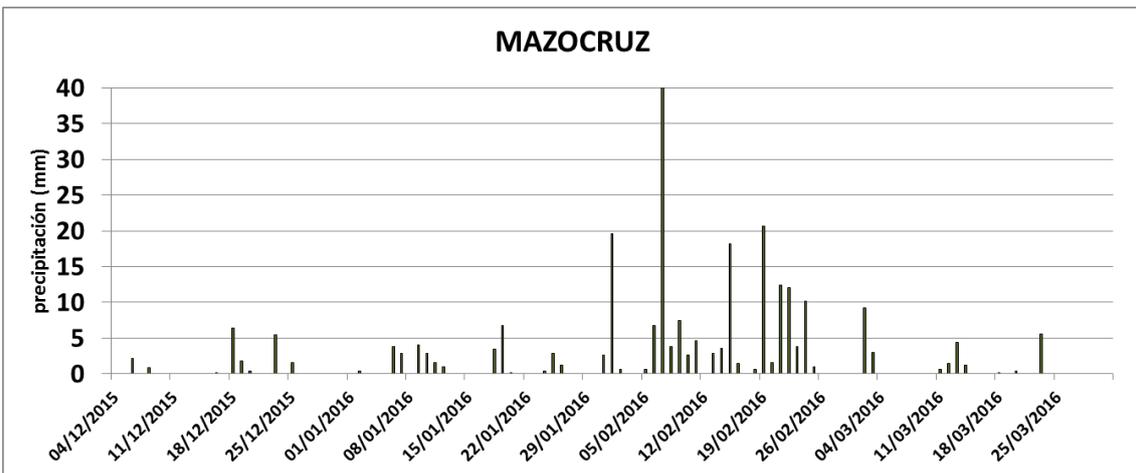
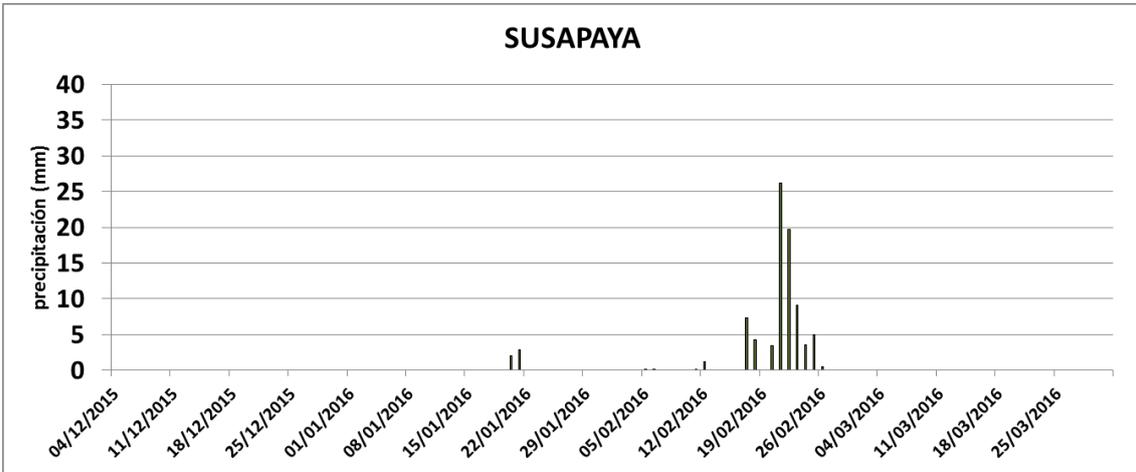
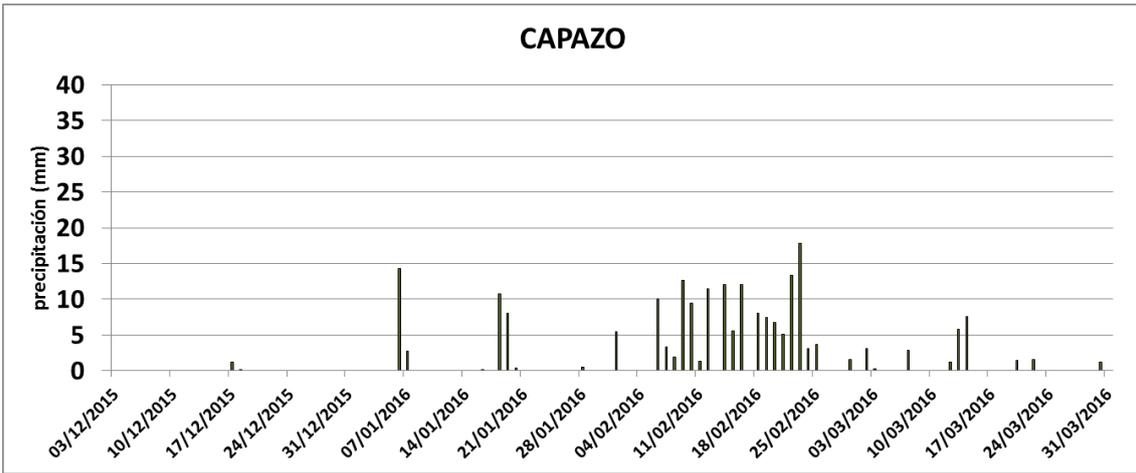
- American Meteorological Society, cited (2017): *Precipitable water. Glossary of Meteorology*. Recuperado el 24 de Agosto del 2017 <http://glossary.ametsoc.org/wiki/climatology>.]
- Falvey, M., Garreaud, R., (2005). *Moisture variability over the South American Altiplano during the SALLJEX observing season*. J. Geophys. Res. 110, D22105. doi:10.1029/2005JD006152.
- Garreaud, R., Vuille, M., Clement, A., (2003). *The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanism of past changes*. Paleogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 194 (3054), 1–18.
- Garreaud, R. and Aceituno, P. (2001): *Interannual Rainfall Variability over the South American Altiplano*. J. Climate, 14, 2779–2789.
- Garreaud, R., Vuille, M., Compagnucci, R., Marengo, J., (2008) *Present-day South American climate*, Paleogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.
- Lagos, P., Silva, Y., Nickl, E., y Mosquera, K., (2008): *El Niño - related precipitation variability in Perú*. Advances in Geosciences 14, 231-237.
- Lavado, C. W. S., y J.C. Espinoza, (2014): *Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007)*, Revista Brasileira de Meteorologia, v.29, n.2, 171 - 182, 2014
- Lenters J., and Cook K., (1997). *On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American climate*. J. Atmos. Sci., 54, 656–677
- Lenters J, Cook K (1999) *Summertime precipitation variability over South America: role of the large-scale circulation*. Mon Weather Rev 127:409–431
- Michael T. Gilford, Michael J. Vojtesak, Gregory Myles, Richard C. Bonam, David IL Martens. (1992). *South America South of the Amazon River--A Climatological Study*.

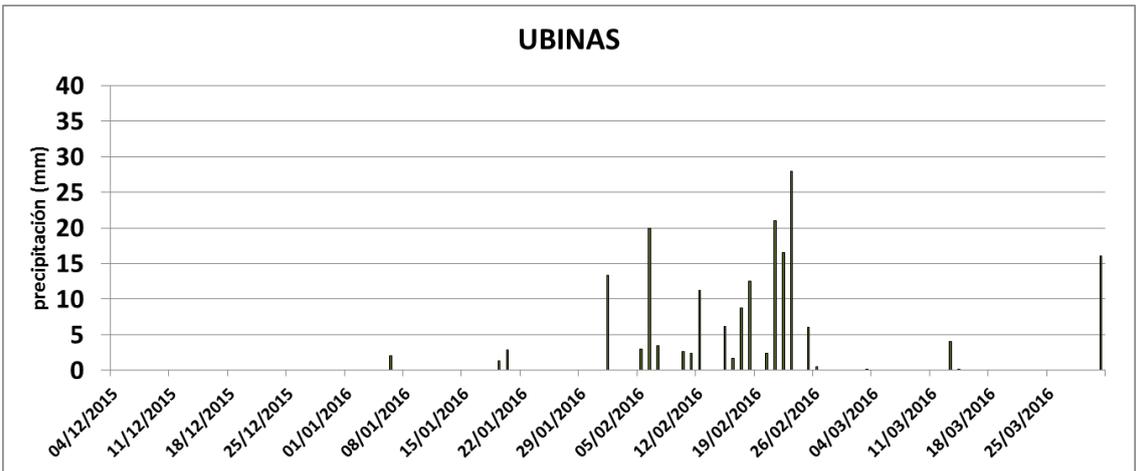
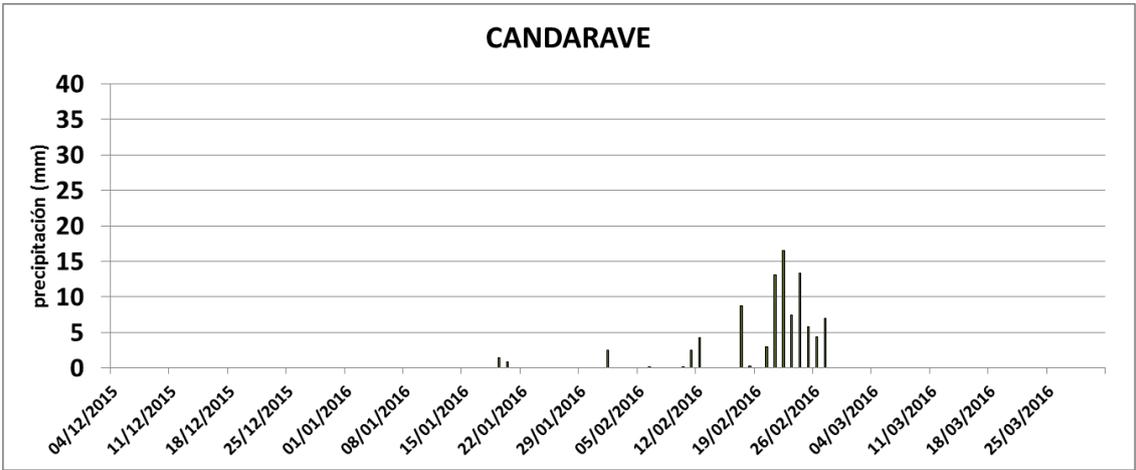
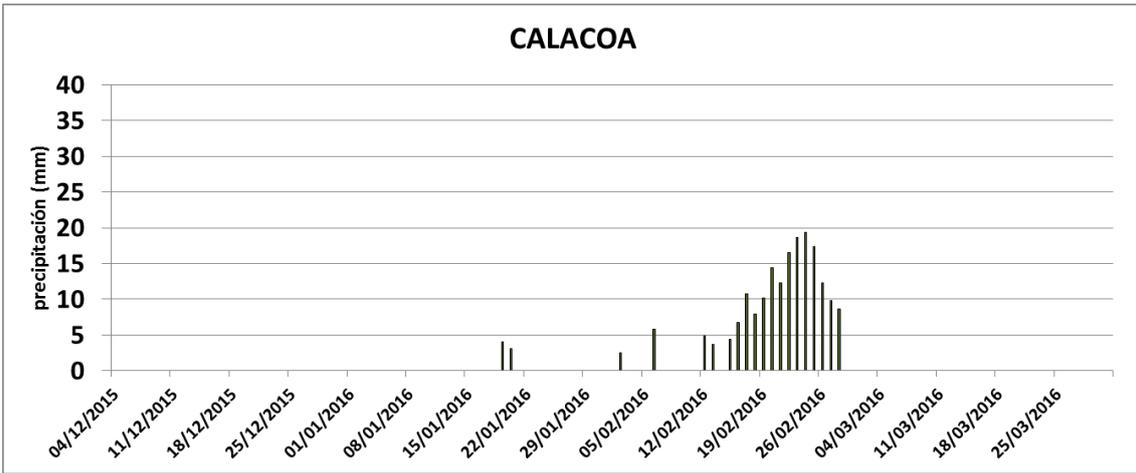
- Quispe, N.; Avalos, G. (2006) *Intense snowstorm in the southern mountains of Peru associated to the incursion a cut-off low pressure system at upper level*. Proceedings 8th ISHCMO, 4, 2006, Foz do Iguacu, Anais... Brasil: Editora,
- Vuille, M., Bradley, R.S., Keimig, F., (2000). *Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing*. J. Geophys. Res. 105, 12,447–12,460.
- Vuille, M., Keimig, F., (2004). *Interannual variability of summertime convective cloudiness and precipitation in the central Andes derived from ISCCP-B3 data*. J. Climate 17, 3334–3348.

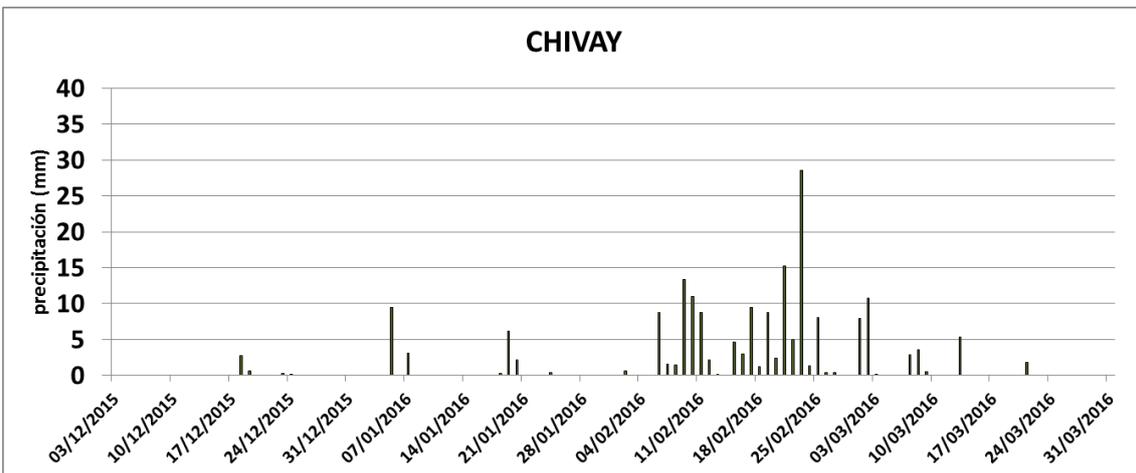
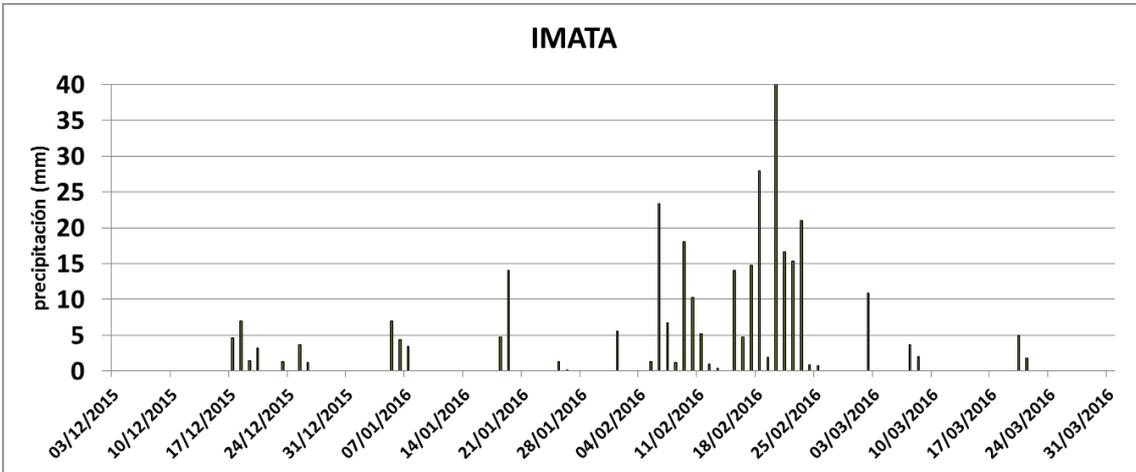
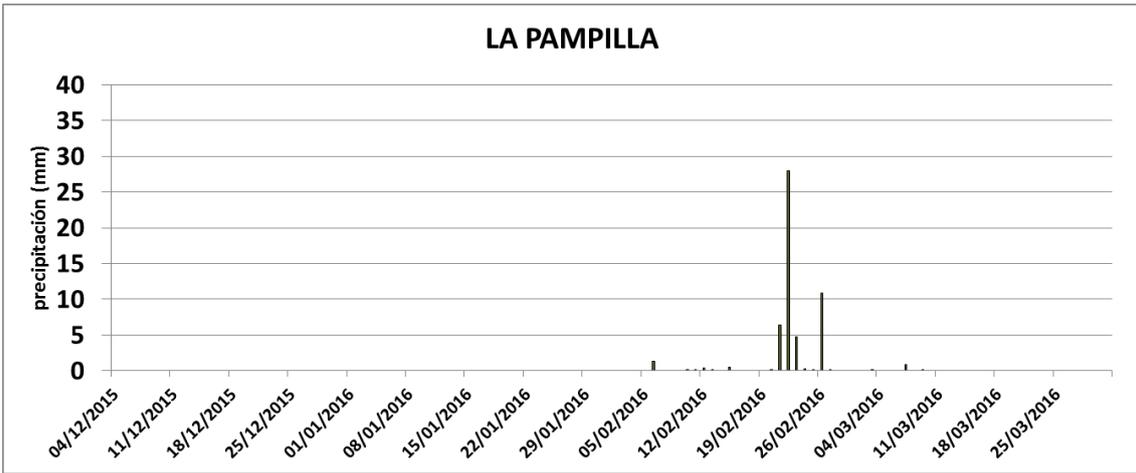
VII. ANEXOS

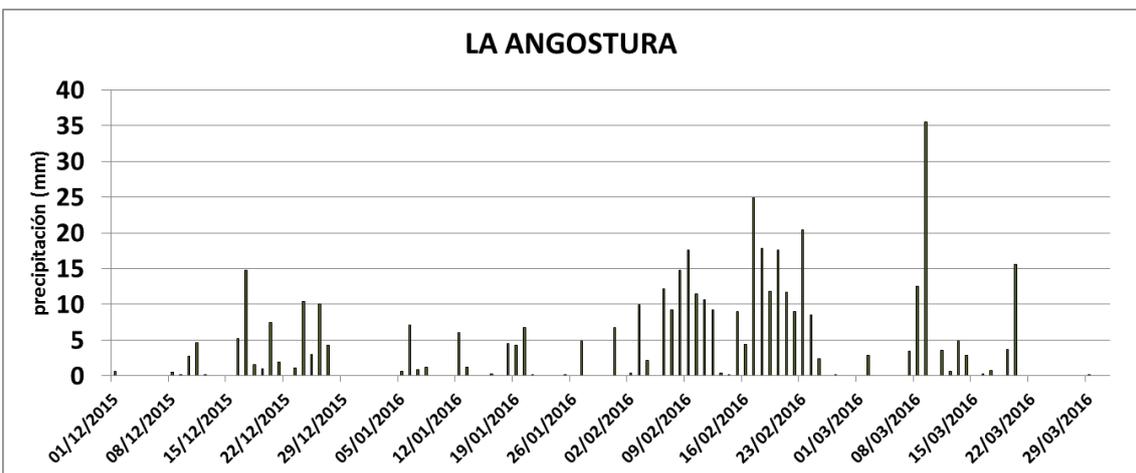
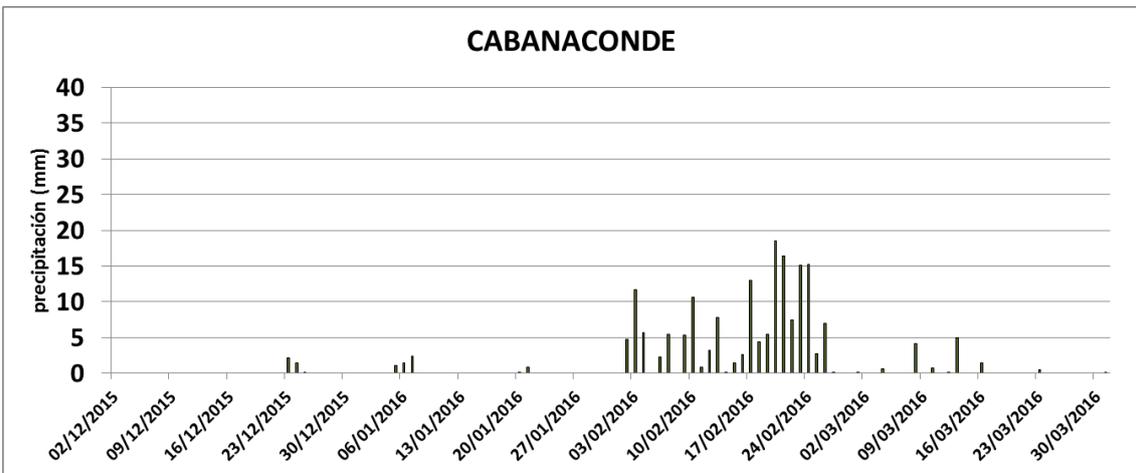
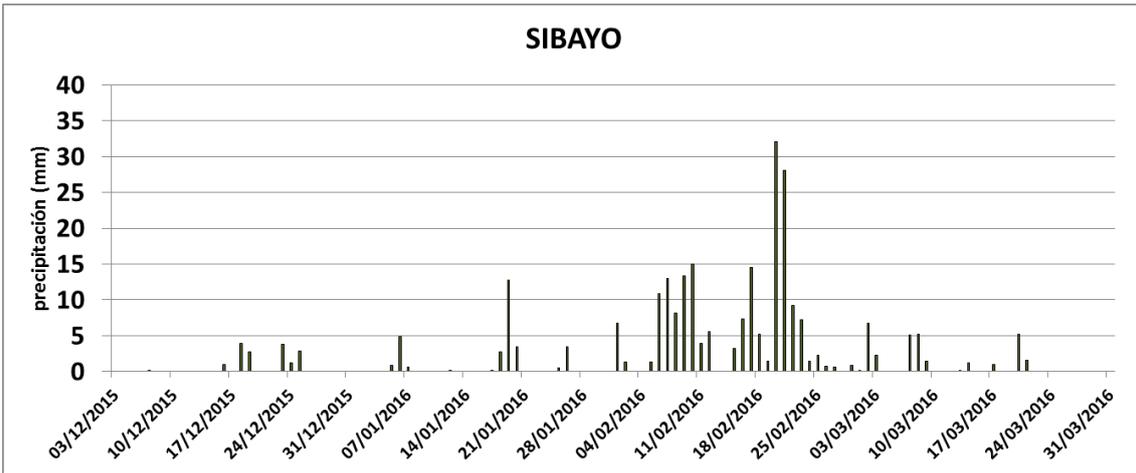
Anexo 1: Series de precipitación diaria para el periodo diciembre 2015 – marzo 2016 de las estaciones utilizadas en el estudio





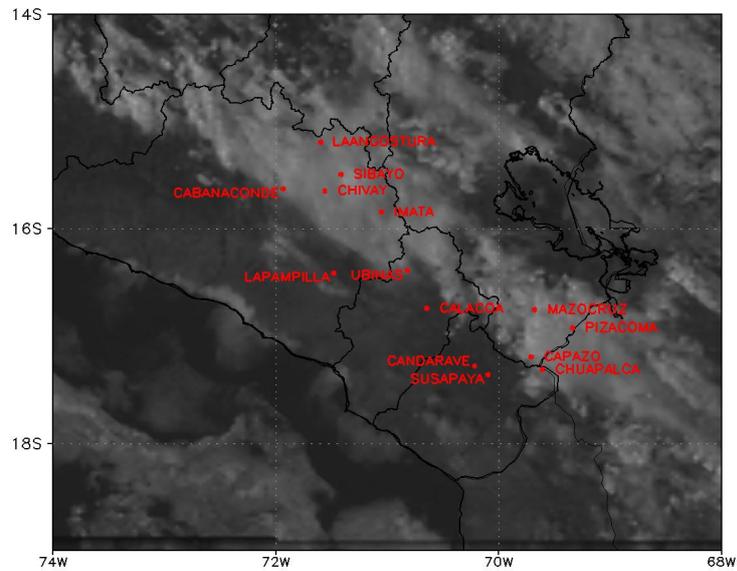




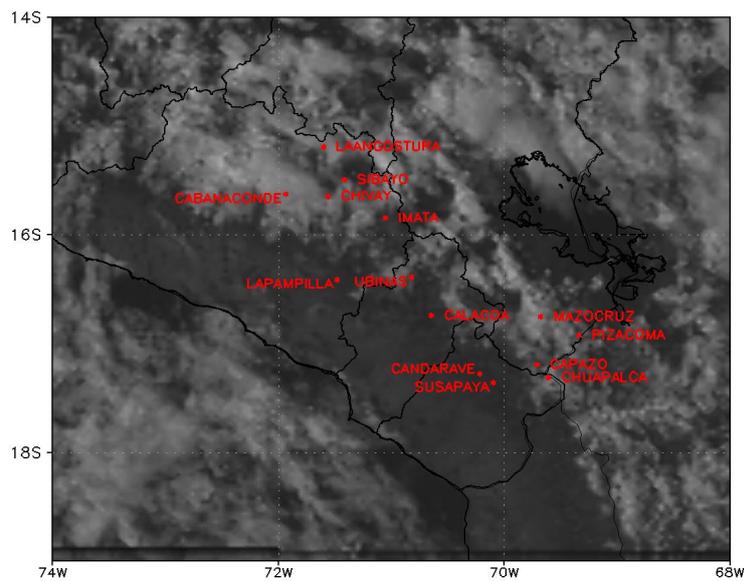


Anexo 2: Imágenes de satélite Goes 13

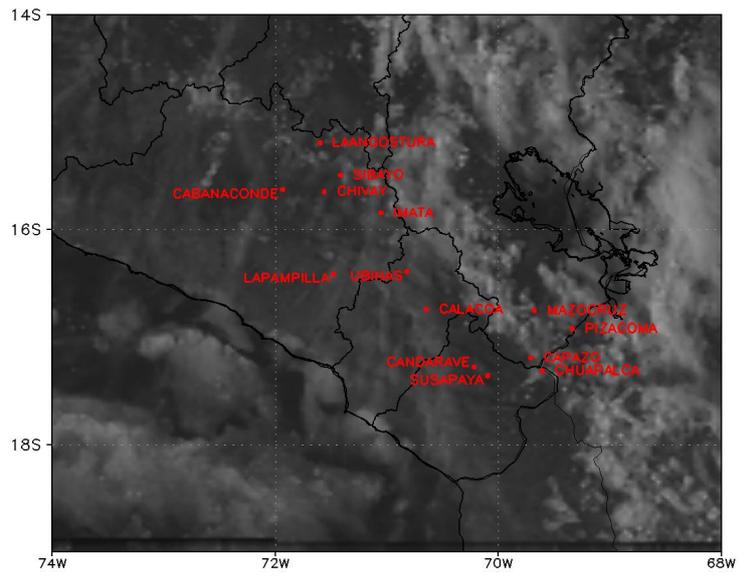
a. Días con escasa precipitación



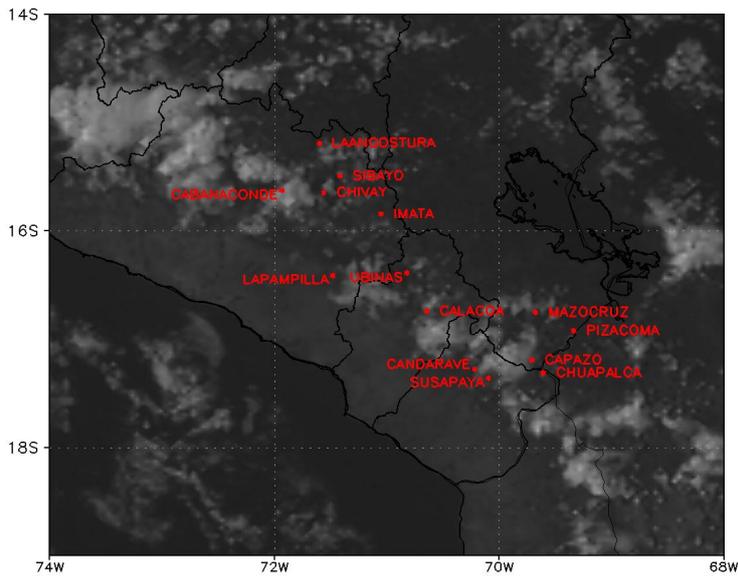
7 de diciembre del 2015 a las 19:45 UTC



25 de diciembre del 2015 a las 19:45 UTC



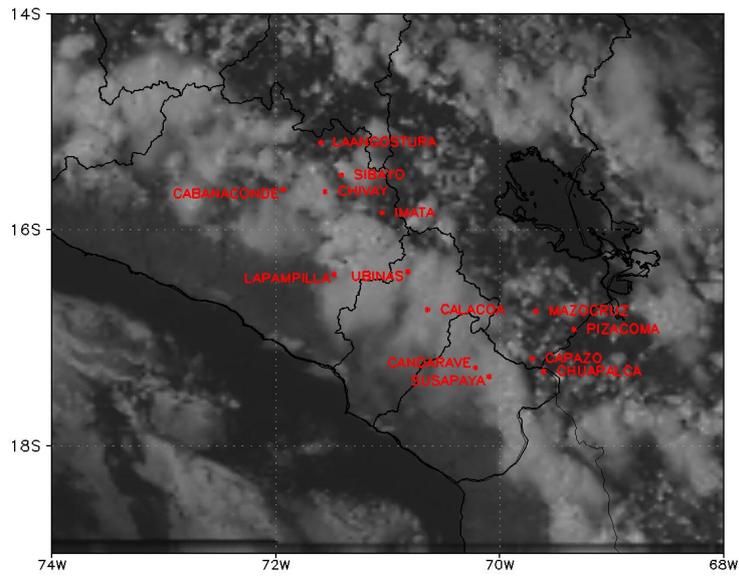
10 de enero del 2016 a las 19:45 UTC



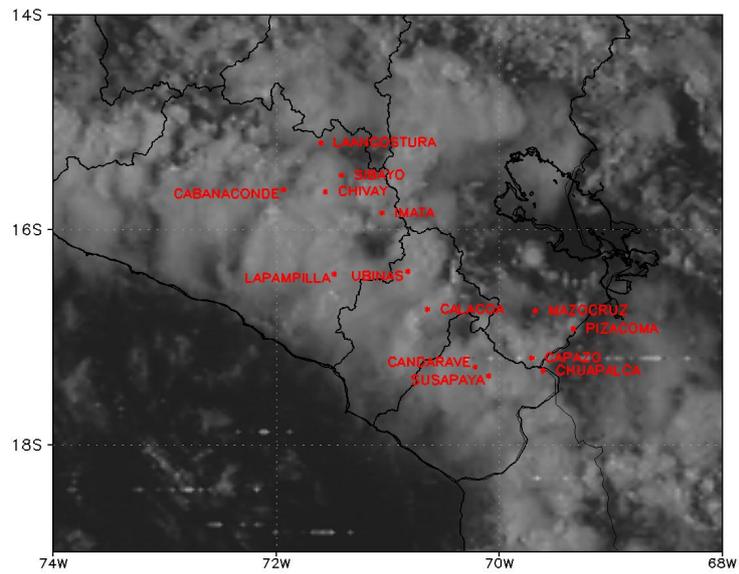
15 de marzo del 2016 a las 19:45 UTC

FUENTE: SENAMHI

b. Días con abundante precipitación



19 de febrero del 2016 a las 19:45 UTC



23 de febrero del 2016 a las 19:45 UTC

FUENTE: SENAMHI