

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“EVENTOS LLUVIOSOS Y SECOS EN LA COSTA NORTE
DE PERÚ DURANTE EL NIÑO 2016”**

Presentado por:

Paul Roberto Alva Suárez

Trabajo Monográfico para Optar el Título de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Lima - Perú

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS

**“EVENTOS LLUVIOSOS Y SECOS EN LA COSTA NORTE
DE PERÚ DURANTE EL NIÑO 2016”**

Presentado por:

Paul Roberto Alva Suárez

Trabajo Monográfico para Optar el Título de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Sustentada y aprobada por el siguiente Jurado:

Dr. Ernesto Ever Menacho Casimiro
PRESIDENTE

M. Sc. Eusebio Cisneros Tarmeño
MIEMBRO

Mg. Sc. Victoria Calle Montes
MIEMBRO

Ing. Franklin Unsihuay Tovar
ASESOR

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. ENSO.....	3
2.1.1. Índices utilizados para monitorear la evolución del ENSO	4
2.1.1.1. Índice Oceánico El Niño (ONI)	4
2.1.1.2. Índice de Oscilación del Sur (IOS)	5
2.1.1.3. Índice Costero El Niño (ICEN).....	6
2.1.1.4. Índice Multivariado ENSO (MEI)	8
2.2. CAPE y Agua precipitable.....	8
2.2.1. Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE, J/Kg)	8
2.2.2. Agua precipitable (mm)	10
2.3. ERA-Interim	11
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
3.1. Materiales	14
3.1.1. Área de estudio.....	14
3.1.2. Información meteorológica	15
3.2. Métodos	15
3.2.1. Identificación de los eventos lluviosos y secos	15
3.2.2. Análisis del entorno sinóptico y termodinámico de los eventos	15
3.3. Discusión	16
3.3.1. Identificación de los eventos lluviosos y secos	16
3.3.2. Análisis del entorno sinóptico y termodinámico de los eventos	17
IV. CONCLUSIONES	31
V. RECOMENDACIONES	33
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
VII. ANEXOS	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Categorías y valores de ICEN	13
Tabla 2: CAPE y potencial convectivo	16
Tabla 3: ERA-Interim: principales características	17
Tabla 4: Días secos y húmedos identificados	22
Tabla 5: Significado de los coeficientes de correlación	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación esquemática del océano superior y la circulación atmosférica durante El Niño (izquierda) y La Niña (derecha)	9
Figura 2: Regiones de monitoreo El Niño.....	11
Figura 3: Variación anual del IOS	12
Figura 4: Índice Costero El Niño. Eventos El Niño y La Niña costeros indicados en rojo y azul respectivamente	13
Figura 5: Serie temporal del índice MEI.....	14
Figura 6: Representación de CAPE.....	15
Figura 7: Compuesto de TPW, Agosto 2005	17
Figura 8: Evolución de la habilidad de pronóstico operacional de ECMWF y por el ERA-Interim (plumas de colores muestran correlaciones de anomalía para 3, 5, 7 y 10 días)	18
Figura 9: Área de estudio	19
Figura 10: Promedio de precipitación acumulada diaria para las estaciones reportadas.....	22
Figura 11: Compuestos: CAPE (J/Kg), día D a) días húmedos (izquierda) b) días secos (derecha)	23
Figura 12: Compuestos: Agua precipitable (mm), día D a) días húmedos (izquierda) b) días secos (derecha)	24
Figura 13: TSM (02-03-16).....	25
Figura 14: Compuestos en 200 hPa: Divergencia ($1/s * 10^5$) y flujo para días D-2, D-1 y D a) días húmedos (izquierda) b) días secos (derecha).....	26
Figura 15: Diferencia de viento zonal (m/s) entre días secos y húmedos, 200 hPa, día D.....	27
Figura 16: Compuestos entre 700 y 500 hPa: Humedad específica (g/Kg) y flujo en vectores, día D a) días húmedos (izquierda) b) días secos (derecha)	27
Figura 17: Compuestos entre 1000 y 800 hPa: Vorticidad ($1/s * 10^5$, sombreado), convergencia ($1/s * 10^5$, contornos verdes) y flujo para días D-2, D-1 y D a) días húmedos (izquierda) b) días secos (derecha).....	30

Figura 18: Imágenes infrarrojas (IR4) para los días húmedos identificados a) 25-02-16 (superior) b) 02-03-16 (centro) c) 04-03-16 (inferior).....	31
Figura 19: Diferencia de flujo de vientos (m/s) entre días húmedos y secos, 800-1000 hPa, día D	32
Figura 20: Compuestos en 850 hPa: Flujo de humedad meridional ($m^*g/ s*Kg$) para días D-2, D-1 y D a) días húmedos (izquierda) b) días secos (derecha)	33
Figura 21: Correlación entre el viento meridional y estaciones que reportan precipitación en la costa norte	34

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Estaciones meteorológicas costeras de Tumbes y Piura	40
--	----

RESUMEN

Dada la gran variabilidad espacial de precipitación en el trópico, se utilizó la metodología descrita por Douglas et al. (2009), con el objetivo de distinguir condiciones sinópticas y termodinámicas asociadas a días húmedos y secos en la costa norte peruana durante El Niño 2016, para lo cual se utilizó compuestos de reanálisis ERA-Interim.

El análisis sinóptico en niveles bajos muestra la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) hacia el sur del Ecuador durante los días húmedos así como la intensificación del flujo meridional de humedad desde El Caribe. Ambos patrones favorecen el desarrollo de la convección. En niveles medios, capa comprendida entre 500 y 700 hPa, se observó valores de humedad específica superiores a los 7.5 g/Kg en los días húmedos con máximos de hasta 8.5 g/Kg, mientras que los días secos muestran valores entre los 6 y 6.5 g/Kg. Así mismo, la incursión de vaguadas invertidas del este, actúan como gatillador de la convección durante los días húmedos. En el nivel de 200 hPa, por otro lado, la posición de la zona de collado ejerce un papel inhibitor de la convección profunda debido a la convergencia de los oestes.

El análisis termodinámico muestra valores de agua precipitable entre 60 y 65 mm durante los días húmedos, en promedio, una diferencia de 5 mm con máximos de hasta 10 mm de agua precipitable con los días secos. Por otra parte, se observó una relación inversa entre CAPE y precipitación, ya sea por efecto del enfriamiento radiativo en el tope de la nube o por el enfriamiento evaporativo en la precipitación.

PALABRAS CLAVES: EL NIÑO, ENOS, EVENTOS LLUVIOSOS, EVENTOS SECOS, CONVECCIÓN PROFUNDA, PRECIPITACIÓN, COSTA NORTE PERUANA

ABSTRACT

Since tropical precipitation can be highly variable in space, the methodology described by Douglas et al. (2009) is used, in order to discern synoptic and thermodynamic conditions associated with wet and dry days in the north coast of Peru during El Niño 2016, for which ERA-Interim reanalysis composites were used.

The synoptic analysis at low levels shows the migration of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) towards the south of the Ecuador during the wet days as well as the intensification of the northern flow of moisture from the Caribbean. Both patterns favor the development of convection. At medium levels, between 500 and 700 hPa, specific humidity values were observed above 7.5 g/Kg on wet days with maximums of up to 8.5 g/Kg, whilst dry days show values between 6 and 6.5 g/Kg. Likewise, the incursion of inverted troughs of the east, act as a convective trigger during wet days. On the other hand, at the 200 hPa level, the position of the col exerts an inhibitory role on deep convection due to the convergence of the westerlies.

The thermodynamic analysis shows values of precipitable water between 60 and 65 mm during the wet days, on average, a difference of 5 mm with maximums of up to 10 mm of precipitable water with dry days. Furthermore, an inverse relationship between CAPE and precipitation was observed, either by the effect of radiative cooling at the cloud top or by evaporative cooling from precipitation.

KEYWORDS: EL NIÑO, ENSO, RAINY EVENTS, DRY EVENTS, DEEP CONVECTION, PRECIPITATION, NORTH COAST OF PERU

I. INTRODUCCIÓN

Durante eventos El Niño, la costa norte peruana suele estar asociada a lluvias torrenciales e inundaciones, normalmente caracterizada por un clima seco durante el año y por un corto período de lluvias especialmente en el verano, en donde la mayor fuente de humedad proviene de la cuenca Amazónica. No obstante, en ciertas ocasiones masas tropicales provenientes desde el Pacífico son orientadas hacia tierra adentro por una fuerte brisa de mar cuando la capa de inversión está ausente.

Predecir días con máximos acumulados de precipitación durante eventos El Niño es de vital importancia para evitar pérdidas económicas y sociales en la región. El objetivo de éste trabajo es analizar el entorno sinóptico y termodinámico asociado a los eventos lluviosos y secos en la costa norte peruana durante El Niño 2016.

Inicialmente, se utilizará la metodología desarrollada por Douglas et al. (2009) para identificar los eventos lluviosos y secos, éste método se basa en la precipitación promedio acumulada y para ello se dispone de 33 estaciones meteorológicas de la costa de Piura y Tumbes.

Así mismo, de acuerdo a los eventos encontrados, se hará uso de datos de reanálisis ERA-Interim, con el objetivo de analizar las condiciones sinópticas y termodinámicas en niveles de baja, media y alta tropósfera influyentes en la formación de los eventos lluviosos y secos. Se analizará el posicionamiento y configuración de los sistemas atmosféricos mediante el visualizador GrADS.

De ésta manera, el conocimiento de los sistemas atmosféricos influyentes será de gran utilidad para los pronosticadores del tiempo y permitirá anticipar situaciones de tiempo severo y emitir avisos a varias instituciones tales como Defensa Civil, Cuerpo de

Bomberos, Direcciones Regionales y otros, posibilitando acciones previas para minimizar los impactos que éstos eventos causen por un determinado lugar.

El objetivo general del presente estudio es 1) Analizar el entorno sinóptico y termodinámico asociado a los eventos lluviosos y secos en la costa norte peruana durante El Niño 2016; siendo los objetivos específicos: i) Identificar los eventos lluviosos y secos y ii) Analizar el entorno sinóptico y termodinámico de los eventos.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENSO

El Niño – Oscilación del Sur (ENSO) es un ciclo natural acoplado en el sistema océano – atmósfera que ocurre en el Océano Pacífico tropical con un ciclo irregular de dos a siete años. Observaciones de los impactos relacionados al tiempo atmosférico por El Niño cerca a Perú se remontan a 1525, siendo observados por los científicos en la década de 1890 (Hanley et al., 2003).

El componente oceánico del ENSO, que se caracteriza por el debilitamiento de los alisios y el calentamiento de la superficie del mar en el Pacífico ecuatorial, se conoce como El Niño, un nombre que proviene del uso local en las costas peruanas y ecuatorianas de referirse a la aparición de aguas cálidas cerca de la época navideña como la Corriente del Niño. En éstas zonas, se observó que en determinados años el calentamiento era más intenso que en otros y perturbaba la pesca local. Los episodios de El Niño suelen durar entre 9 y 15 meses en promedio. La Niña está asociada con un régimen de los alisios más intenso de lo normal y temperatura de la superficie del mar (TSM) anormalmente frías. En promedio, La Niña es una anomalía menos extrema que El Niño, pero tiende a durar más tiempo, entre uno y tres años. Las transiciones de El Niño a La Niña son mucho más rápidas que las de La Niña a El Niño: casi todas las transiciones de El Niño a La Niña se producen en espacio de un año (COMET, 2016).

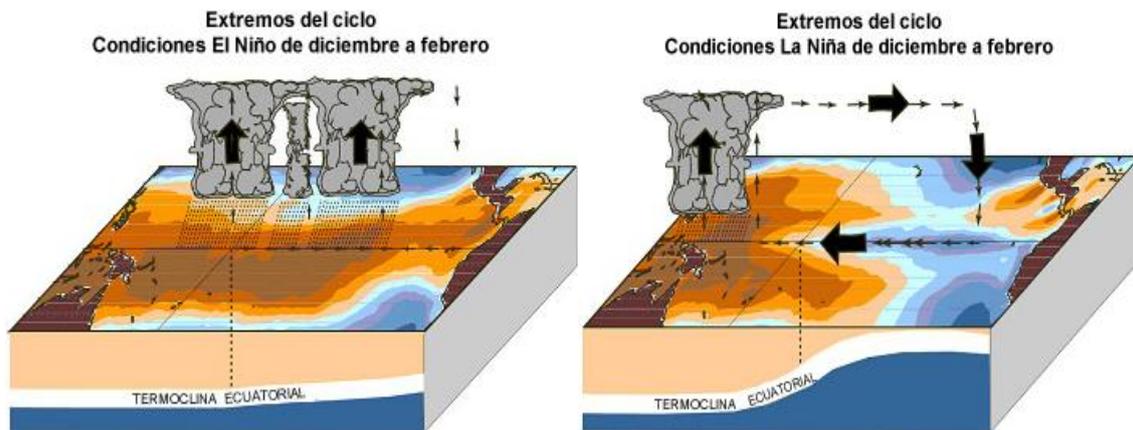


Figura 1: Representación esquemática del océano superior y la circulación atmosférica durante El Niño (izquierda) y La Niña (derecha)

FUENTE: COMET

La Oscilación del Sur (OS) es el componente atmosférico de ENSO, se caracteriza por anomalías de la presión a nivel del mar entre el Pacífico tropical oriental y occidental (Aceituno, 1988). Aunque no queda claro si El Niño provoca la Oscilación del Sur o viceversa, se sabe que la observación de una anomalía en uno de estos fenómenos favorece la llegada del otro. Por lo tanto, se puede describir la relación entre estos fenómenos desde una perspectiva acoplada en términos de una dependencia y modulación mutua.

La OS fue definido por Gilbert Walker a principios del siglo XX. Él encontró que la presión fue inusualmente baja sobre la región del Océano Índico y alta sobre el Pacífico tropical sur-oriental, esta situación corresponde a periodos de lluvias monzónicas en India. Por otro lado, cuando este patrón se invierte, la precipitación no sólo es deficiente en India sino también en países vecinos como Australia e Indonesia (McPhaden, 2002).

2.1.1 Índices utilizados para monitorear la evolución del ENSO

Existen diversos índices que permiten monitorear la evolución del ENSO, desde los más simples a los que utilizan múltiples variables, entre ellos se detalla los principales:

2.1.1.1 Índice oceánico El Niño (ONI)

El ONI se calcula como la media de 3 meses consecutivos de las anomalías de la TSM en la región 3.4 del Niño (5°N - 5°S, 120° - 170°W, ver figura 2), tomando como referencia el periodo de 1981 - 2010.

Se consideran episodios cálidos y fríos cuando las anomalías superan el umbral de +/- 0.5°C. Cuando dicho umbral es cubierto durante un mínimo de 5 meses consecutivos se definen como episodios del Niño o de la Niña.

Aunque la región Niño 3.4 podrá no ser la mejor elección para determinar los episodios de La Niña, el índice ha sido definido por anomalías negativas en ésta área. Una mejor elección podrá ser la región Niño 4, dado que la región normalmente tiene TSM en o sobre el umbral de convección profunda durante el año.

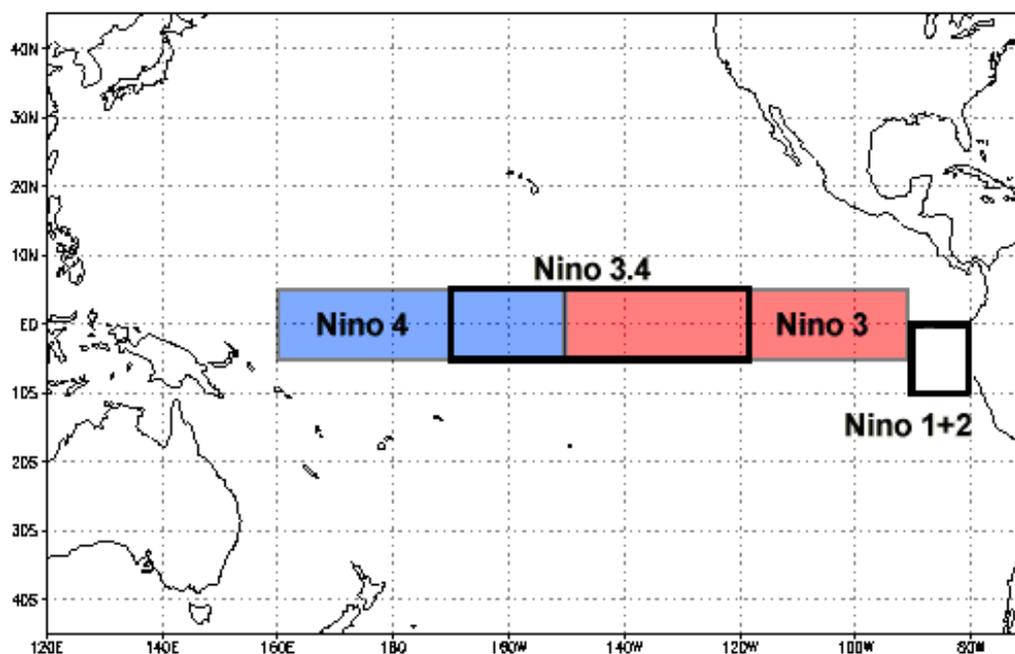


Figura 2: Regiones de monitoreo El Niño

FUENTE: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst.php>

2.1.1.2 Índice de Oscilación del Sur (IOS)

Los cambios en la circulación de los vientos alisios debido a perturbaciones atmosféricas relacionados con cambios en los sistemas de presión a nivel del mar se conocen como Oscilación del Sur. El IOS mide la anomalía de la diferencia de la presión media mensual entre Tahití (Polinesia Francesa) y Darwin (Norte de Australia).

La figura 3 muestra la variación del IOS en el periodo 1860 – 2010.

Los valores en azul indican anomalías positivas de la presión a nivel del mar (PNM) y por consiguiente condiciones de La Niña. Los valores en rojo indican anomalías negativas de la presión a nivel del mar y por consiguiente condiciones de El Niño. La línea negra suavizada indica la variación decanal del índice IOS.

La metodología para calcular el IOS se describe como:

$$\text{IOS} = \frac{(\text{Estandarizado Tahití} - \text{Estandarizado Darwin})}{\text{MSD}}$$

MSD = Desviación estándar mensual

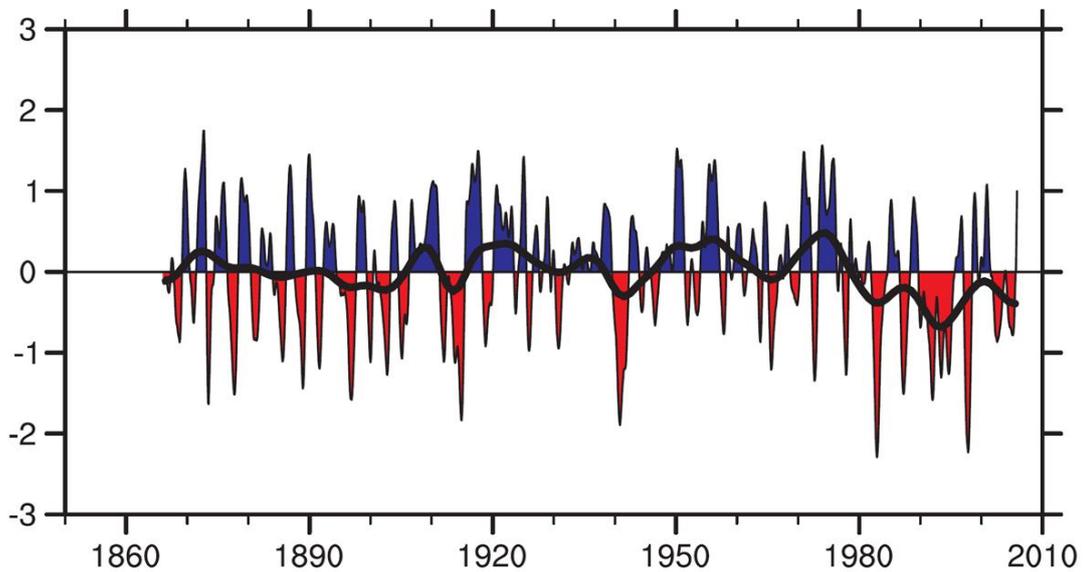


Figura 3: Variación anual del IOS

FUENTE:

https://fjferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion05/1_el_fenmeno_de_la_oscilacin_del_surel_nio_enso.html

$$\text{Estandarizado Tahití} = \frac{(\text{PNM Actual Tahití} - \text{PNM Promedio Tahití})}{\text{Desviación estándar Tahití}}$$

$$\text{Estandarizado Darwin} = \frac{(\text{PNM Actual Darwin} - \text{PNM Promedio Darwin})}{\text{Desviación estándar Darwin}}$$

Mayor información puede ser encontrada en el Centro de Predicción Climática de la NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>).

2.1.1.3 Índice costero El Niño (ICEN)

Consiste en la media corrida de tres meses de las anomalías mensuales de la TSM en la región Niño 1+2. Estas anomalías se calcularán usando la climatología mensual calculada para el periodo base 1981-2010, ver figura 4 (Nota Técnica ENFEN, 2012).

La fuente de datos para este índice son las TSM absolutas del producto ERSST v3b de la NOAA (EEUU) para la región Niño 1+2, las cuales se pueden obtener de internet de: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/ersst3b.nino.mth.ascii>.

A cada mes se le asignará una categoría. La categoría de "Condiciones Frías" incluye las magnitudes de "Débil", "Moderada", y "Fuerte". La categoría "Condiciones Cálidas" incluye las magnitudes de " Débil", "Moderada", " Fuerte" y "Extraordinaria". Las categorías y magnitudes de estas se asignan de acuerdo con el valor correspondiente de ICEN según indicado en la tabla 1.

Tabla 1: Categorías y valores de ICEN

Categorías	ICEN
Fría Fuerte	Menor que -1.4
Fría Moderada	Mayor o igual que -1.4 y menor que -1.2
Fría Débil	Mayor o igual que -1.2 y menor que -1.0
Neutras	Mayor o igual que -1.0 y menor o igual que 0.4
Cálida Débil	Mayor que 0.4 y menor o igual que 1.0
Cálida Moderada	Mayor que 1.0 y menor o igual que 1.7
Cálida Fuerte	Mayor que 1.7 y menor o igual que 3.0
Cálida Extraordinaria	Mayor que 3.0

FUENTE: http://www.met.igp.gob.pe/el_nino/enfen/ICEN-Nota_Tecnica.pdf

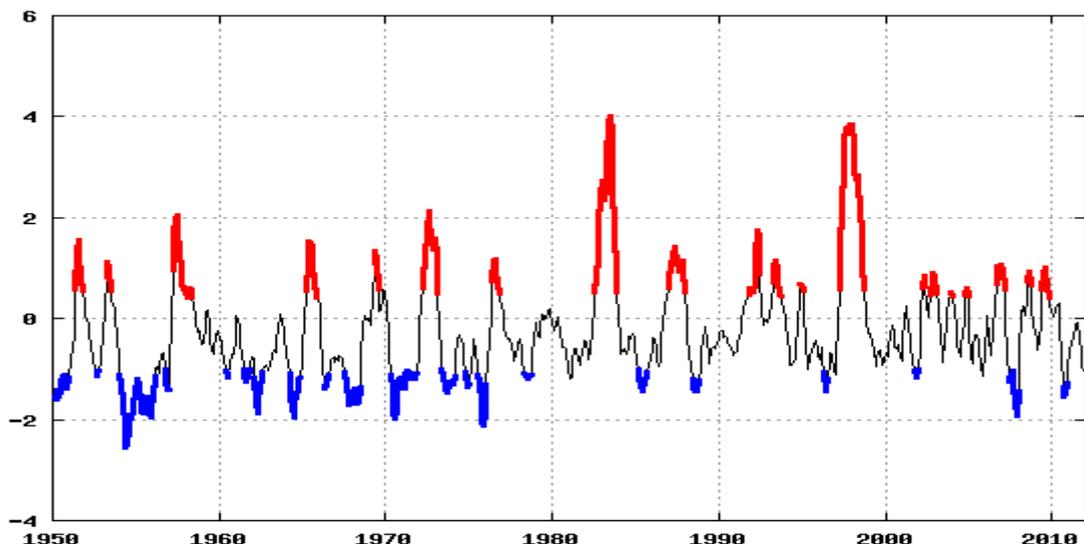


Figura 4: Índice Costero El Niño. Eventos El Niño y La Niña costeros indicados en rojo y azul respectivamente

FUENTE: http://www.met.igp.gob.pe/el_nino/enfen/ICEN-Nota_Tecnica.pdf

2.1.1.4 Índice multivariado ENSO (MEI)

El MEI se basa en las seis principales variables observadas sobre el Pacífico tropical: presión, componente zonal y meridional del viento de superficie, TSM, temperatura del aire en superficie y la fracción de nubosidad total del cielo. El MEI se calcula sobre la base de estaciones bimensuales (diciembre-enero, enero-febrero... noviembre-diciembre) para cada variable. En la figura 5, se calcula el índice como el primer componente principal de los seis campos combinados no invertidos (COMET, 2016).

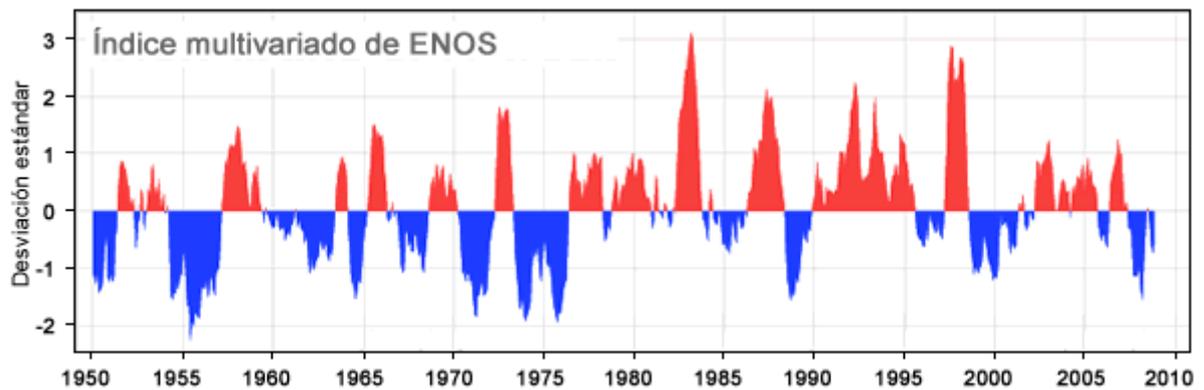


Figura 5: Serie temporal del índice MEI

FUENTE: COMET

También se emplean varios índices de vientos en niveles inferiores, vientos en altura e índices de anomalías de radiación de onda larga saliente para vigilar la evolución de ENSO. Cabe señalar que ningún índice de ENSO individual es capaz de representar toda la variabilidad del fenómeno, sino se precisan hasta ocho modos de variabilidad para caracterizar plenamente el desarrollo de ENSO.

2.2 CAPE y Agua precipitable

2.2.1 Energía potencial convectiva disponible (CAPE, J/Kg)

Es la energía potencial de una parcela elevada por su entorno, aunque CAPE se refiere a la energía potencial convectiva, es conveniente usar el término cuando el ascenso es predominantemente hidrostático y no convectivo (Garner, 2015). CAPE es afectada por todos los procesos físicos que alteran la estructura termodinámica vertical: convección, dinámica a larga-escala, radiación y flujos superficiales (Ye et al., 1998).

Con fines de cálculo, CAPE es definido por Adams y Souza (2009) como sigue:

$$CAPE = \int_{PLNB}^{PLFC} R_d(T_{vp} - T_w) d \ln p$$

Donde:

R_d es la constante de gases de aire seco,

P es presión,

T_{vp} y T_v representan la temperatura de la parcela y virtual del sondaje respectivamente,

LFC es el nivel de convección libre,

LNB es el nivel de equilibrio o nivel de flotabilidad neutral.

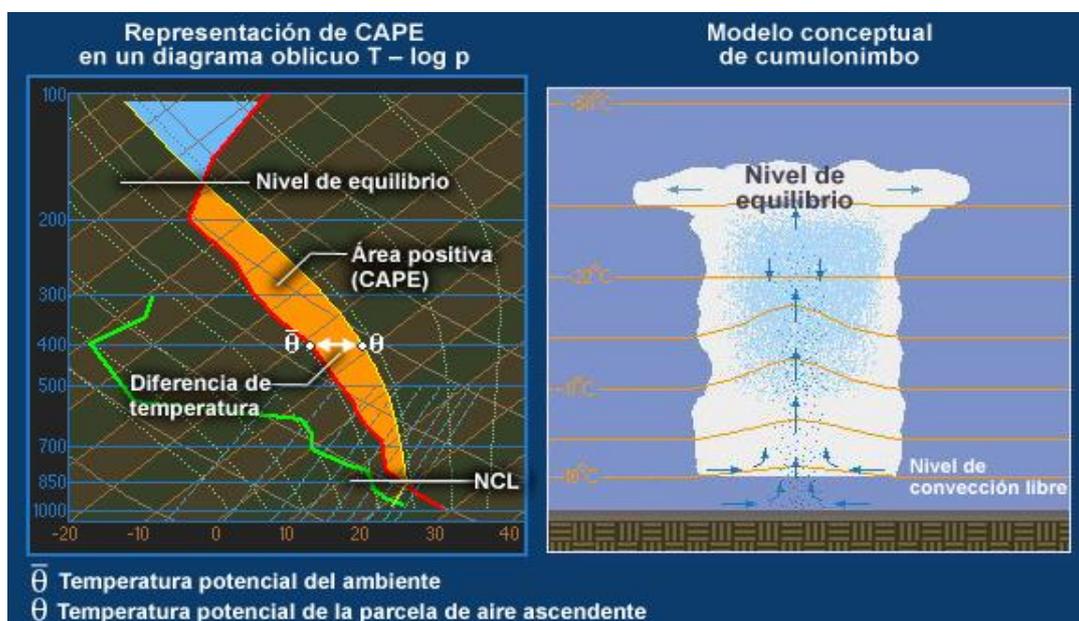


Figura 6. Representación de CAPE

FUENTE: COMET

Por lo tanto, CAPE se determina como el área positiva entre el perfil de temperatura ambiente y la adiabática húmeda que conecta el NCL y NE (LFC y LNB por sus siglas en inglés respectivamente) en un diagrama termodinámico (COMET, 2016), tal como se muestra en la figura 6.

Para que la CAPE sea liberado, la masa de aire debe ser levantada desde su nivel de origen (LO) hasta el LFC, superando la flotabilidad negativa debajo de éste conocida como CIN (Inhibición Convectiva). En ocasiones, un sondaje puede mostrar alternancia de flotabilidad negativa y positiva, cuando existen varias capas de flotabilidad positiva, CAPE es calculada por la integración de la capa que produce el valor de CAPE más alto (Linders y Saetra, 2010).

En las tormentas eléctricas, son frecuentes valores de CAPE en el rango de 1000 a 2000 J/kg, aunque pueden exceder los 4000 J /kg en tormentas muy intensas y sólo llegan a 700 J/kg en cúmulos de escaso desarrollo vertical en la región de los alisios. El parámetro CAPE es muy útil para diagnosticar la convección, porque está directamente relacionado con la velocidad potencial máxima $W_{m\acute{a}x}$ de la corriente ascendente:

$$W_{m\acute{a}x} = \sqrt{2CAPE}$$

Esta ecuación se deriva de una forma simplificada de la ecuación de momento vertical, ignorando los efectos de mezcla, el peso del agua condensada y la presión. Debido a éstas simplificaciones, a menudo $W_{m\acute{a}x}$ sobreestima el valor real de la corriente ascendente por un factor de 2 (COMET, 2002).

Los valores altos de CAPE son indicativos de un alto potencial de convección fuerte o severa, la siguiente tabla muestra el potencial convectivo para determinados valores de CAPE (COMET, 2008).

Tabla 2: CAPE y potencial convectivo

VALOR DE CAPE	POTENCIAL CONVECTIVO
0	Estable
0 – 1000	Marginalmente inestable
1000 – 2500	Moderadamente inestable
2500 – 3500	Muy inestable
3500 o más	Extremadamente inestable

FUENTE: COMET

Así mismo, entre otras utilidades, la CAPE ha sido utilizada por diferentes autores como indicador del cambio climático, como predictor de electrificación en convección profunda, para hacer estimaciones de la energía cinética producida por la convección tropical en estado estable y para estimar la precipitación (Adams y Souza, 2009).

2.2.2 Agua precipitable (mm)

Agua precipitable es la cantidad de vapor de agua integrado en una columna sobre un punto específico en la Tierra, expresado en kg/m² o mm de agua condensada (Kidder y Jones, 2007). En términos generales, cuanto mayor sea el agua precipitable, mayor humedad estará disponible para crear precipitación. El producto agua precipitable total (TPW) se utiliza ampliamente para los pronósticos en regiones costeras, porque muestra los ríos atmosféricos que a menudo traen precipitaciones intensas (COMET, 2012).

TPW es un producto en microonda que representa la profundidad de agua líquida que podría ser acumulado si todo el vapor de agua sobre una posición fuera condensado en un equivalente monto de agua líquida. Tradicionalmente, las imágenes de vapor de agua detectan el vapor de agua principalmente en niveles medios y altos de la tropósfera. Imágenes de TPW, por otro lado, representa la humedad presente en todos los niveles, especialmente en los niveles más bajos donde el vapor de agua está más concentrado (COMET, 2006).

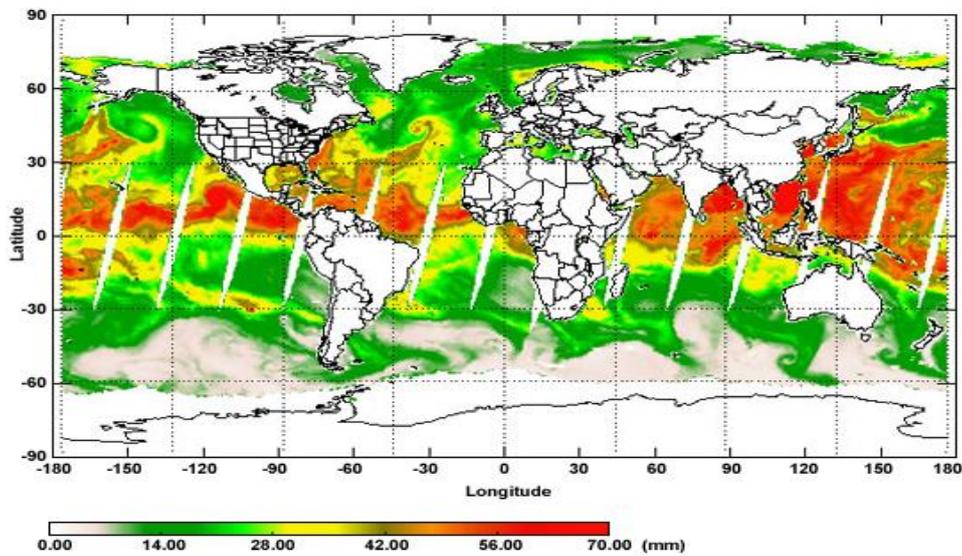


Figura 7: Compuesto de TPW, Agosto 2005

FUENTE: COMET

Expresado en milímetros, TPW tiene valores altos cerca al Ecuador, donde la temperatura de agua de mar es cálida y con altas tasas de evaporación (mostrado en rojo en la figura 7) y con bajos valores cerca a los polos donde existe muy poca evaporación. Gradientes en TPW pueden mostrar la posición de los ríos atmosféricos sobre los océanos.

2.3 ERA-Interim

ERA-Interim es el más reciente reanálisis atmosférico global realizado por *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (Dee et al., 2011). ERA-Interim comprendió inicialmente el período entre el 1 de enero de 1989 hasta la actualidad, una extensión desde 1979 hasta 1989 fue posteriormente preparada.

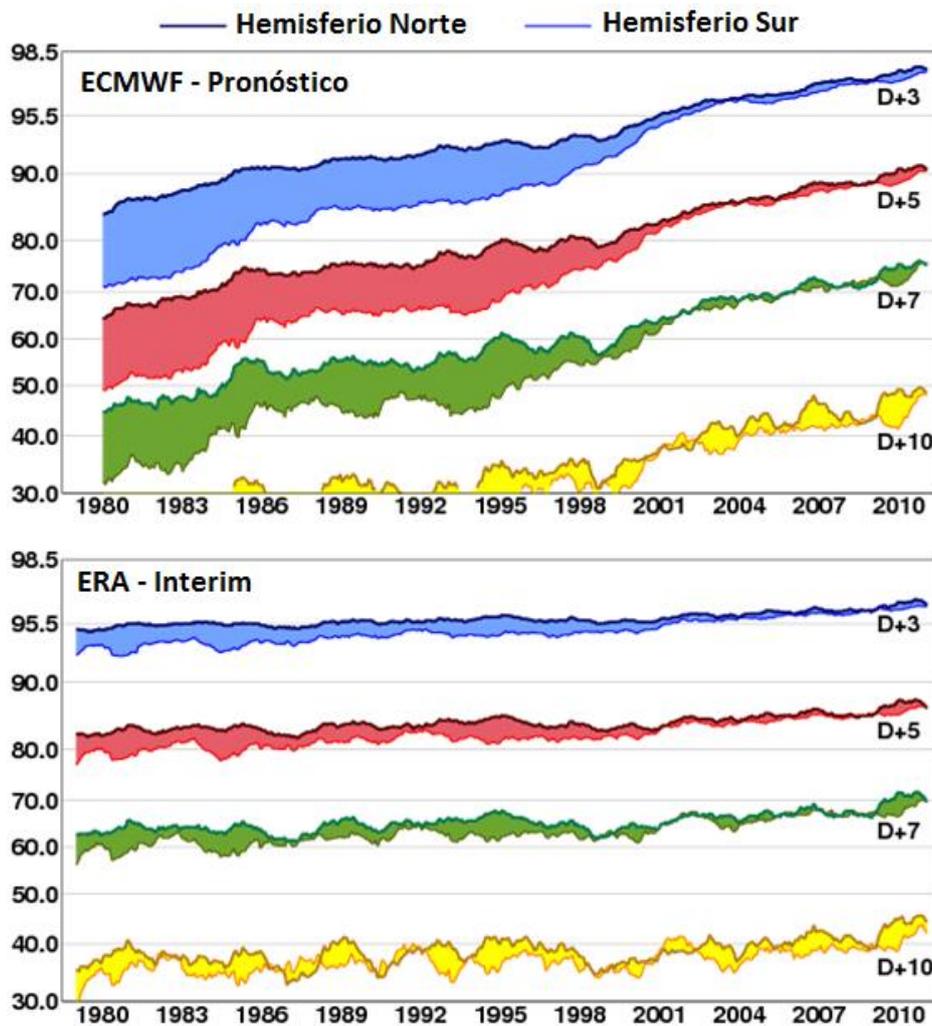
Tabla 3: ERA-Interim: principales características

Período	1979-01-01 hasta la actualidad
Resolución temporal	6 horas
Resolución espacial	0.75° x 0.75°
Longitud geográfica	0.0°E hasta 359.25°E
Latitud geográfica	-89.425°N hasta 89.425°N
Altitudes	37 niveles isobáricos
Formato	NetCDF, GRIB

FUENTE: http://icdc.zmaw.de/era_interim.html?&L=1

ERA-Interim fue realizado en parte como preparación para el futuro, para un proyecto más ambicioso por ECMWF. Su objetivo principal ha sido abordar varios problemas de asimilación de datos encontrados durante la creación del ERA-40. Estos están relacionados principalmente con la representación del ciclo hidrológico, calidad de la circulación estratosférica y con la consistencia en el tiempo de los reanálisis de campos geofísicos. Un segundo objetivo ha sido mejorar varios aspectos técnicos del reanálisis, tales como selección de datos, calidad de datos, corrección de sesgo y rendimiento del monitoreo. La evolución de la habilidad de pronóstico operacional del ERA-Interim puede observarse en la figura 8, incluido del modelo ECMWF.

Reanálisis es relativamente un campo joven, con orígenes en la búsqueda de datos meteorológicos recogidos por el *First GARP Global Experiment* (FGGE) en 1979. Las sucesivas generaciones de reanálisis atmosféricos producidos en diversos institutos han mejorado en calidad como resultado de mejores modelos, datos de entrada y mejores métodos de asimilación.



Correlación de anomalía de geopotencial en 500 hPa

Figura 8: Evolución de la habilidad de pronóstico operacional de ECMWF y por el ERA-Interim (plumas de colores muestran correlaciones de anomalía para 3, 5, 7 y 10 días)

FUENTE: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era-interim>

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Materiales

3.1.1 Área de estudio

De acuerdo al enfoque presente en éste estudio, se investigó los eventos lluviosos y secos en la costa norte peruana durante El Niño 2016, para lo cual se consideró el siguiente área de estudio.

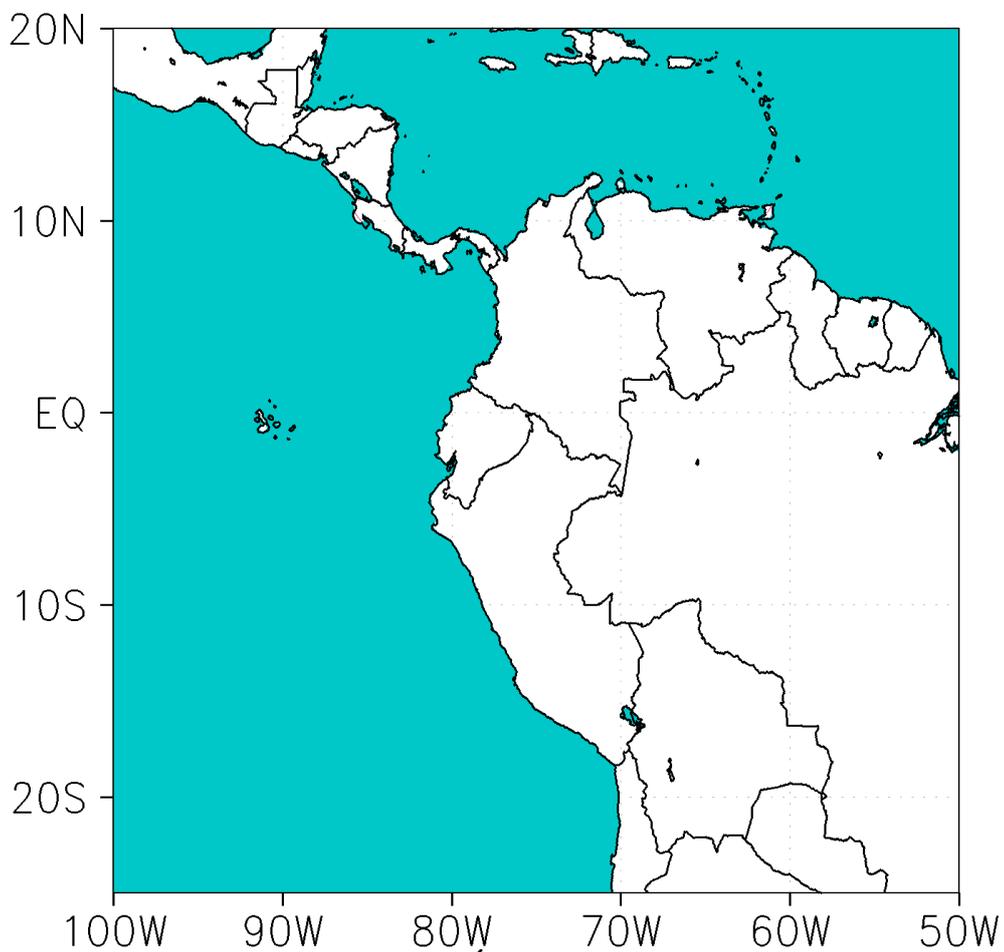


Figura 9: Área de estudio

FUENTE: Elaboración propia

3.1.2 Información meteorológica

- **Reanálisis ERA-Interim**

Se utilizó datos de reanálisis ERA-Interim con una resolución espacial de $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ y resolución temporal de seis horas realizada por ECMWF y disponible en <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>.

- **Estaciones meteorológicas**

Treinta y tres estaciones meteorológicas convencionales de SENAMHI pertenecientes a la región costera de Piura y Tumbes fueron utilizadas. La lista total de estaciones se detalla en el Anexo 1.

3.2 Métodos

3.2.1 Identificación de los eventos lluviosos y secos

La identificación de los eventos lluviosos y secos fue basado en la metodología desarrollada por Douglas et al. (2009), para ello, se utilizó la precipitación acumulada diaria de 33 estaciones meteorológicas de la costa de Piura y Tumbes. Dado que la precipitación convectiva tropical puede ser altamente variable en el espacio, la metodología promedia la precipitación de la red total de estaciones, para obtener una señal más representativa de escalas espaciales más amplias, teniendo así, una variabilidad más evidente.

Aquellos días cuando la precipitación promedio acumulada diaria es un máximo relativo a un día antes y después son considerados como días húmedos, y aquellos con un mínimo relativo son considerados como días secos.

3.2.2 Análisis del entorno sinóptico y termodinámico de los eventos

Para determinar las condiciones sinópticas y termodinámicas de los sistemas atmosféricos se utilizó la información proveniente de reanálisis del modelo ERA-Interim. Se utilizó compuestos de los días húmedos y secos determinados por la metodología de Douglas et al. (2009), con el objetivo de distinguir las condiciones sinópticas y termodinámicas asociados a los eventos.

Mediante el uso del visualizador GrADS se analizó el posicionamiento y configuración de los sistemas atmosféricos en niveles de baja, media y alta tropósfera.

De los datos de reanálisis del ERA-Interim se utilizó las siguientes variables primarias:

Variable Primaria	Unidad
Viento meridional	m/s
Viento zonal	m/s
Relación de mezcla	g/Kg
Temperatura	°C

Para interpretar y comprender mejor los mecanismos físicos del entorno fue necesario disponer de campos derivados, para ello se utilizó parámetros derivados del modelo numérico utilizando el lenguaje escripting del programa GrADS, entre ellos tenemos:

Variable Secundaria	Unidad
Vorticidad relativa	1/s
Divergencia del viento	1/s
Flujo de humedad	m*g/s*Kg

De igual manera, se verificó el potencial de inestabilidad en niveles medios y altos mediante el concepto de CAPE, la cantidad de agua precipitable presente y la TSM durante los eventos.

3.3 Discusión

3.3.1 Identificación de los eventos lluviosos y secos

Un total de 3 eventos húmedos y 4 eventos secos fueron seleccionados, teniendo en cuenta los umbrales determinados en la metodología de Douglas et al. (2009) pero modificando a las condiciones de estudio, el promedio de precipitación en nuestro caso varía desde mayor a 25 mm/día en eventos húmedos y menor a 5 mm/día durante eventos secos (ver figura 10). Esta selección es algo subjetiva, pero lo suficiente para distinguir días secos y húmedos. En círculos representan los días húmedos y en cuadrado los días secos, la línea gris clara discontinua muestra una media móvil de 30 días y el recuadro naranja indica el periodo de estudio.

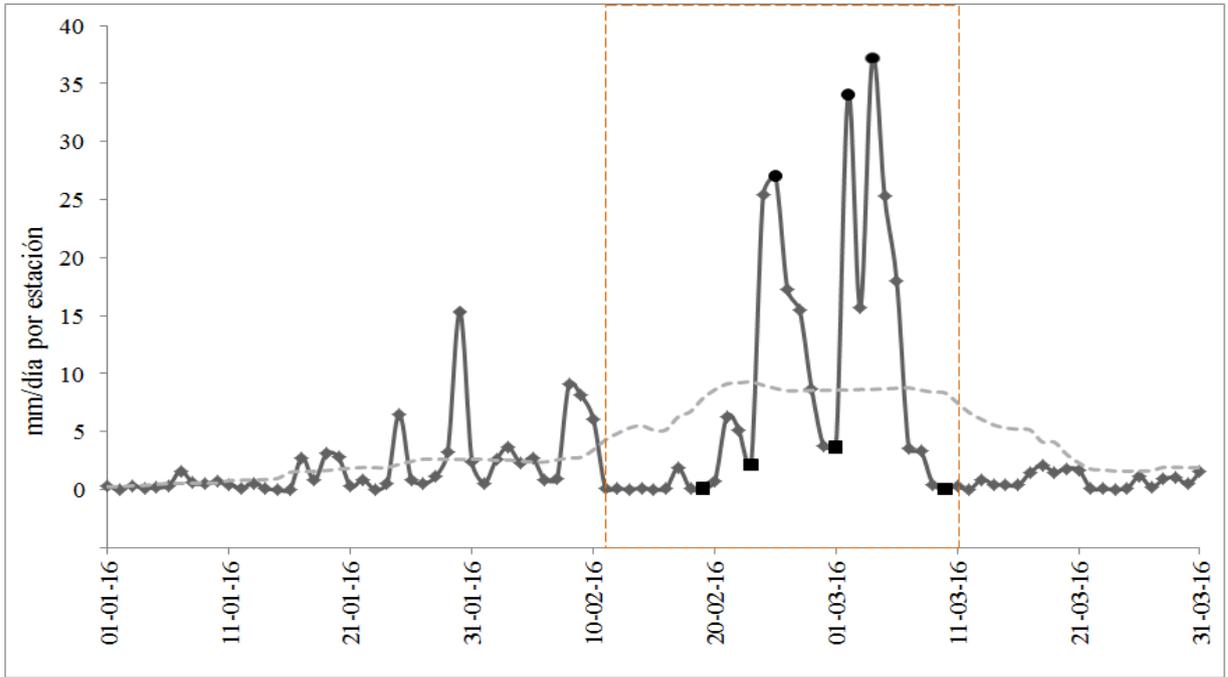


Figura 10: Promedio de precipitación acumulada diaria para las estaciones reportadas

FUENTE: Elaboración propia

La siguiente tabla muestra los días seleccionados:

Tabla 4: Días secos y húmedos identificados

DÍAS SECOS	DÍAS HÚMEDOS
19/02/2016	25/02/2016
23/02/2016	02/03/2016
01/03/2016	04/03/2016
10/03/2016	

FUENTE: Elaboración propia

3.3.2 Análisis del entorno sinóptico y termodinámico de los eventos

- **Análisis termodinámico**

En la figura 11 se muestran compuestos de CAPE para los días húmedos y secos encontrados, se observan menores valores de CAPE durante los días lluviosos (inferiores a 100 J/Kg) frente a la costas de Tumbes y Ecuador que en los días secos. A pesar que cerca de continente existen valores de CAPE próximos a los 600 J/Kg, éstos no representan el potencial convectivo ideal, por lo que en ambos casos, se clasifican como marginalmente inestables según la tabla 2.

Ahora bien, como parte de la prevención por el fenómeno de El Niño 2016, el SENAMHI dispuso de una serie de lanzamientos de radiosondajes en la ciudad de Tumbes (figuras no mostradas), éstos describen valores de CAPE más elevados en días previos a la ocurrencia de los mayores acumulados de precipitación, alcanzando valores de hasta 1738 J/Kg, un ambiente clasificado como moderadamente inestable según la tabla 2, pero presentando valores muy bajos (inferiores a los 400 J/Kg) durante la ocurrencia de precipitación o bajo condiciones de cielo cubierto.

Menores valores de CAPE durante eventos lluviosos es similar a lo encontrado por Adams y Souza (2009), quienes concluyen que CAPE y precipitación están inversamente correlacionados en el mar tropical, ya sea por efecto del enfriamiento radiativo en el tope de la nube o por el enfriamiento por evaporación en la precipitación.

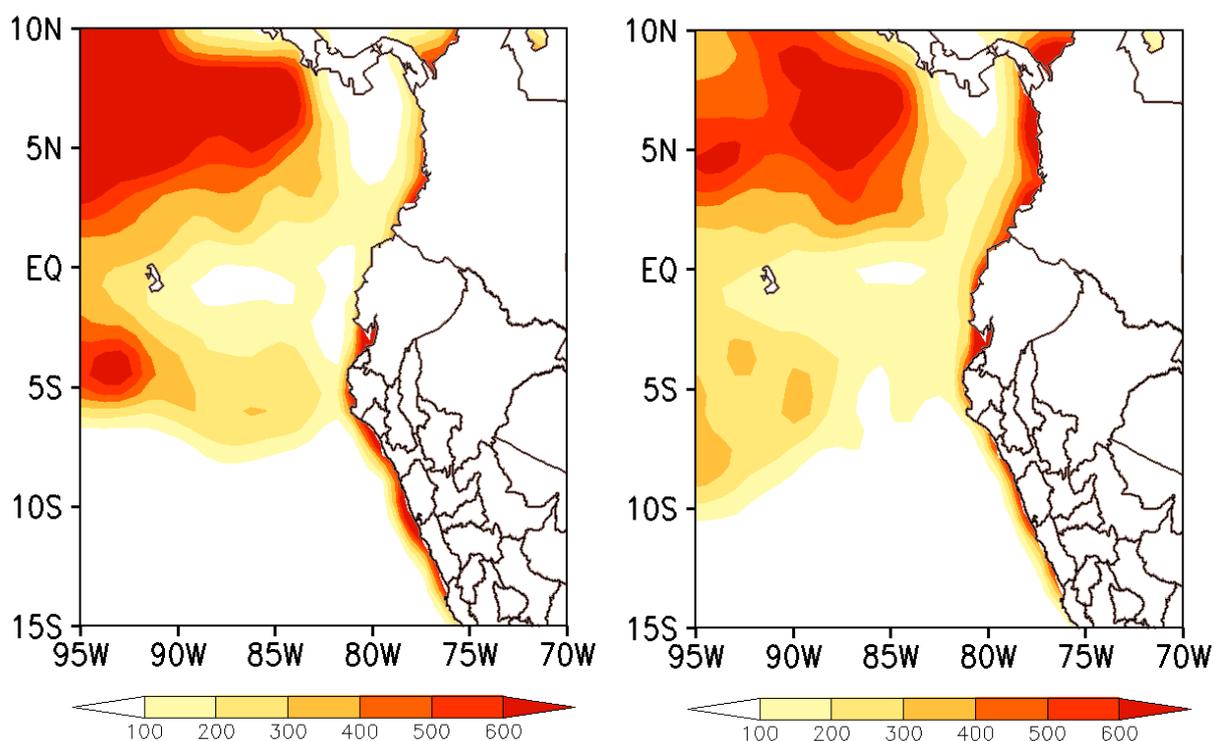


Figura 11: Compuestos: CAPE (J/Kg), día D a) días húmedos (izquierda) b) días secos (derecha)

FUENTE: Elaboración propia

Al analizar los compuestos de agua precipitable (figura 12), se observan valores mayores a 60 mm frente a la costa norte peruana y ecuatoriana durante los días húmedos, con máximos de 65 mm en la costa de Piura, mientras que, valores entre 55 y 60 mm durante los días secos, es decir, en promedio una diferencia de 5 mm con máximos de hasta 10 mm

de agua precipitable, resultado similar a lo encontrado por Johnson et al. (2005) para el mar de China y lo suficiente para sustentar convección profunda.

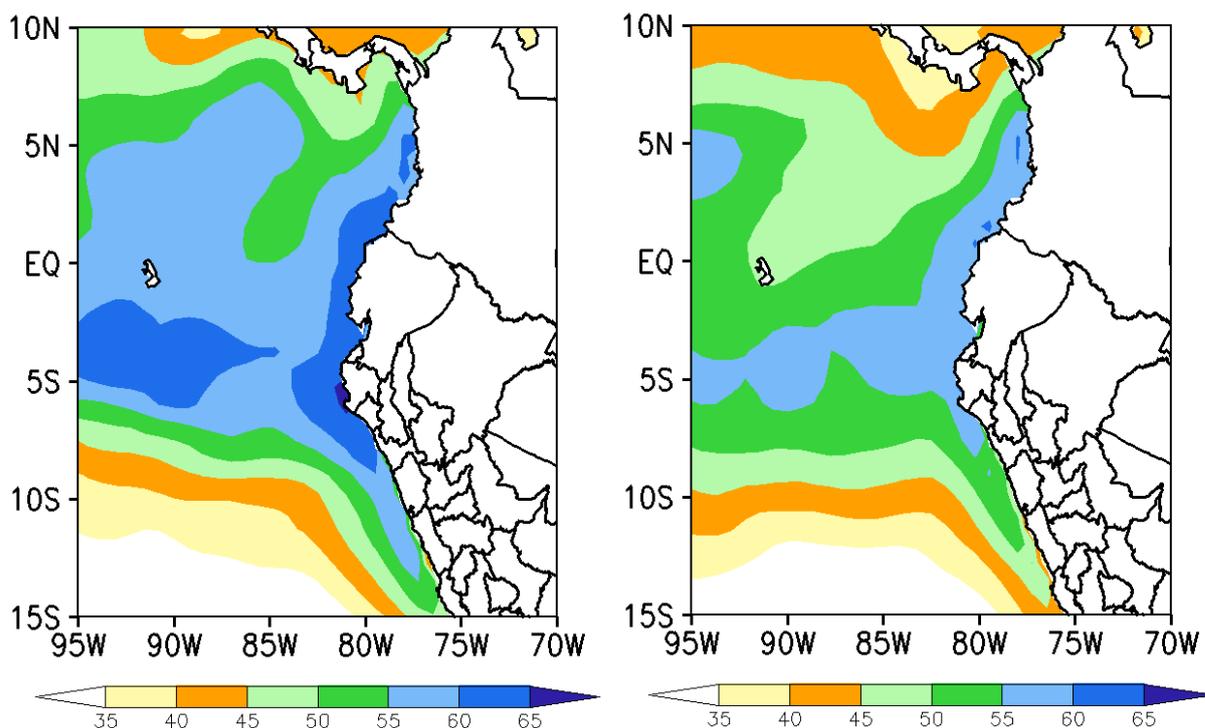


Figura 12: Compuestos: Agua precipitable (mm), día D a) días húmedos (izquierda) b) días secos (derecha)

FUENTE: Elaboración propia

En la figura 13, se observa la TSM diaria para el 02 de marzo de 2016, la isoterma de 27°C se resalta en contorno morado, la cual se extiende inclusive hasta latitudes cercanas a la costa central, siendo un umbral indicativo que favorece la convección profunda. Cerca al litoral costero de Tumbes se muestra una isoterma de 26°C, en la región norte de Piura de 25°C, dichas condiciones se muestran también para los demás días húmedos seleccionados (figuras no mostradas), las cuales representan anomalías positivas de TSM entre 1 a 2°C y por lo tanto un componente adicional de humedad por la evaporación que genera.

El Comité Multisectorial Encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), en su comunicado N°6 de 2016, confirma lo mostrado: “Continúa la fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur. En la región del Pacífico Ecuatorial Central (Niño 3.4), la anomalía de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) disminuyó a +1,9°C aproximadamente, la que fue similar a las observadas en 1998 y 1983...”

“En el Pacífico ecuatorial oriental (Niño 1+2), la TSM alcanzó 27,5°C en promedio, mientras que su anomalía se incrementó de +0,8° a +1,1°C. Los valores estimados actualizados del Índice Costero El Niño (ICENTmp) para febrero y marzo son de +1,40°C y +1,05°C (Condición Cálida Moderada).”

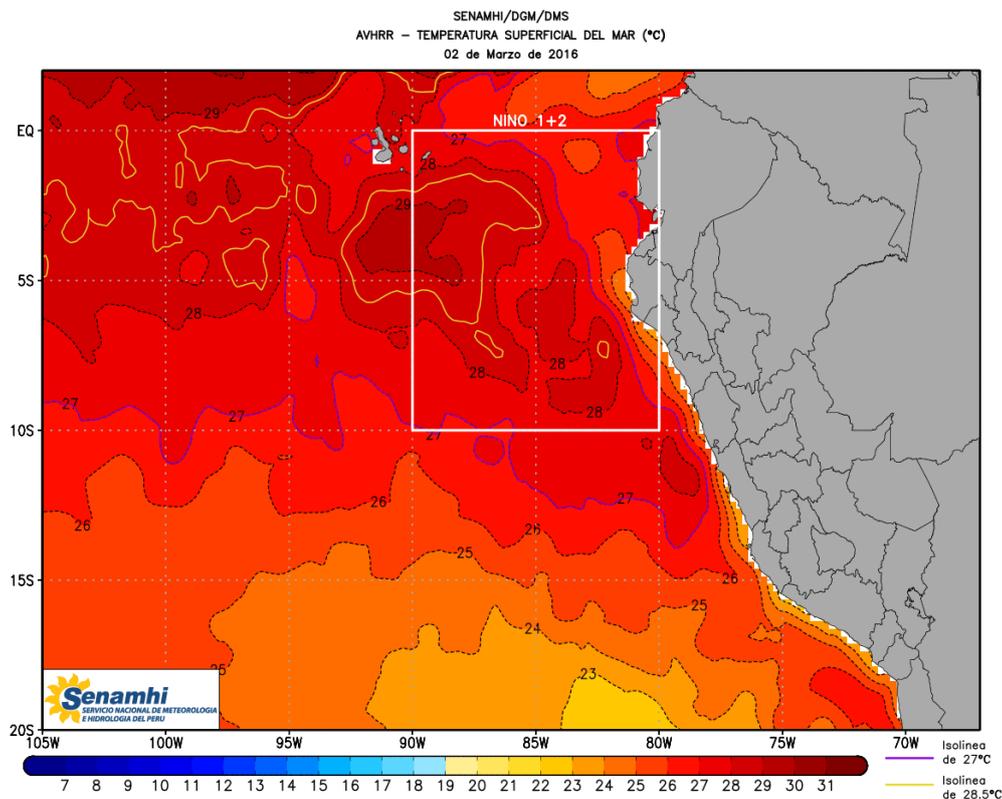


Figura 13: TSM (02-03-16)

FUENTE: SENAMHI

- **Análisis sinóptico**

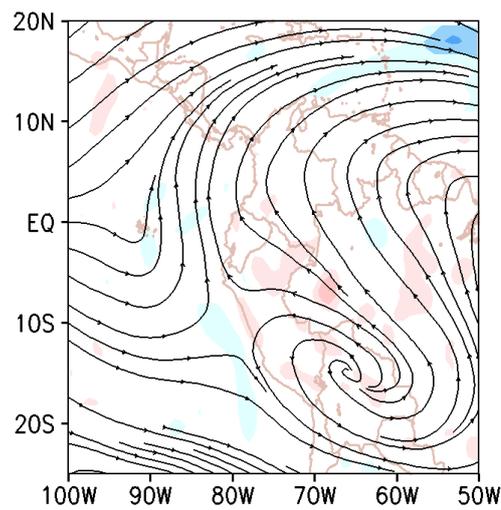
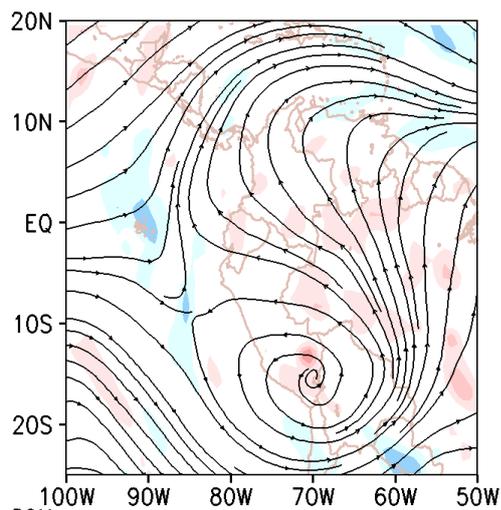
En el nivel de 200 hPa (figura 14), se muestra el flujo promedio y los valores de divergencia (positivos en rojo y negativos en azul) para los días seleccionados en la tabla 4 (día D), así mismo, se observa compuestos de dichas variables para uno (D-1) y dos días antes (D-2), cabe mencionar, que éstos han sido elegidos para las 00UTC del día consecutivo.

Destacar la posición de la zona de collado frente a la costa peruana, la cual se encuentra más próxima a continente durante los días secos (día D), lo que permite áreas de subsidencia en niveles altos debido a la convergencia observada, inhibiendo así la convección profunda en la costa norte peruana.

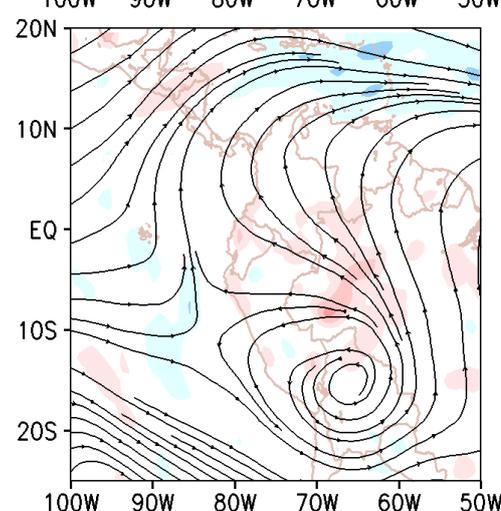
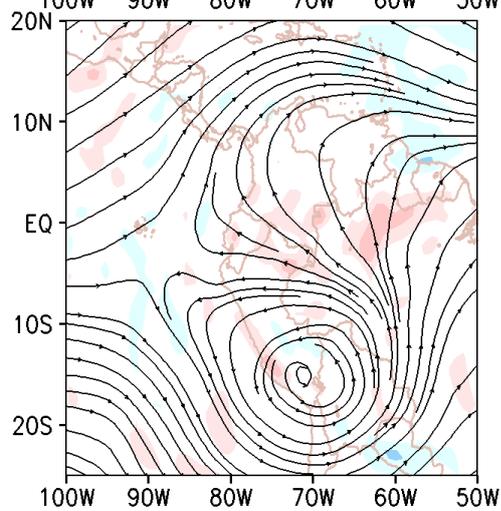
Durante el periodo del evento, el núcleo de la Alta de Bolivia (AB) en los días secos en promedio se encuentra posicionado sobre el Altiplano Boliviano, hacia el sur-este de la posición encontrada durante los días húmedos, dicha ubicación contribuye al acercamiento de la zona de collado en altura. Así mismo, esto permitiría los mayores valores de divergencia encontrados hacia la Amazonia Brasileña, entre la AB y la Vaguada del Noreste de Brasil (VNEB), durante los días secos.

La figura 15 demuestra lo discutido, áreas de color marrón implica vientos del oeste más fuertes durante los días secos que en días húmedos (cuando el flujo se dirige hacia el este), lo que permite los sectores de convergencia observados.

D-2



D-1



D

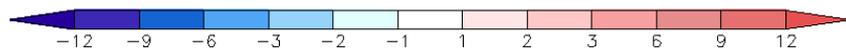
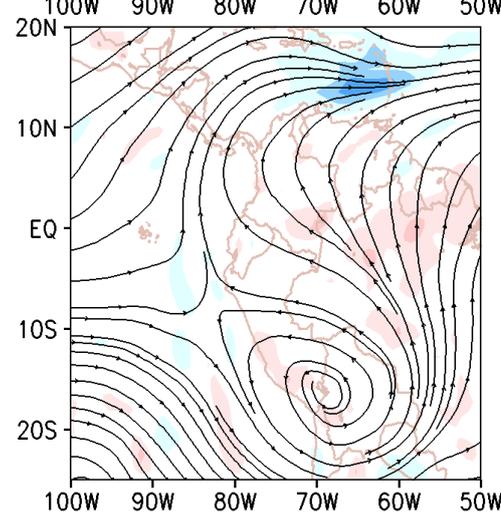
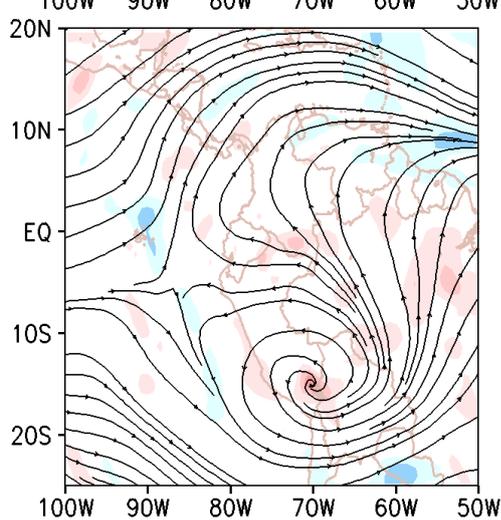


Figura. 14: Compuestos en 200 hPa: Divergencia ($1/s * 10^5$) y flujo para días D-2, D-1 y D a) días húmedos (izquierda) b) días secos (derecha)

FUENTE: Elaboración propia

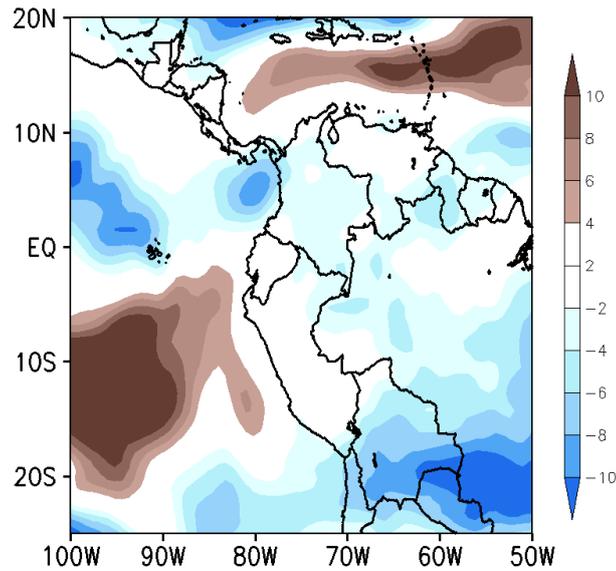


Figura 15: Diferencia de viento zonal (m/s) entre días secos y húmedos, 200 hPa, día D

FUENTE: Elaboración propia

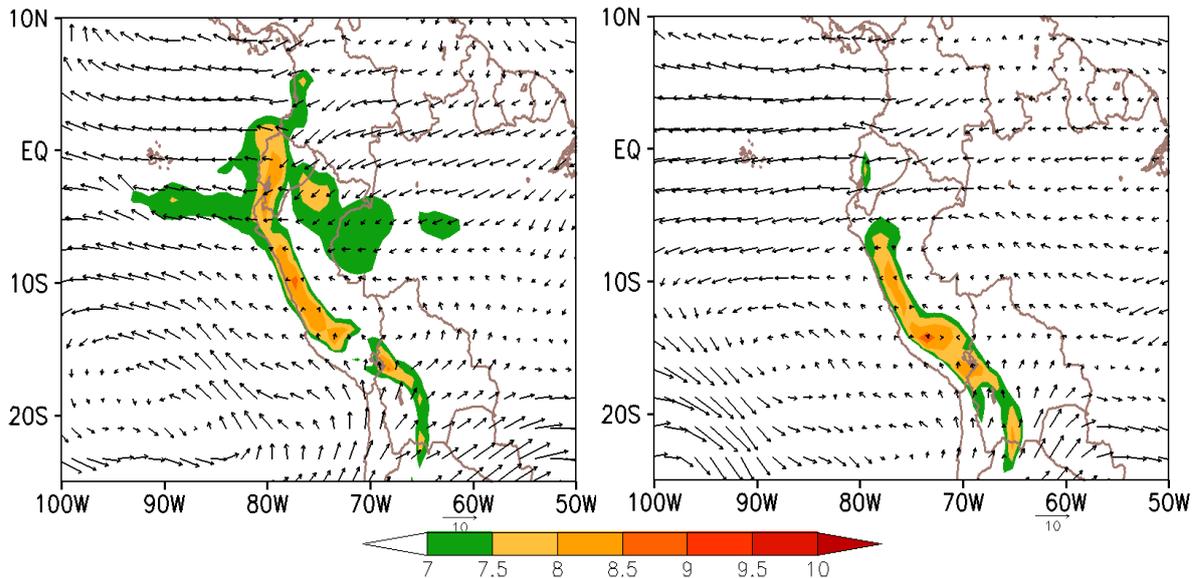


Figura 16: Compuestos entre 700 y 500 hPa: Humedad específica (g/Kg) y flujo en vectores, día D a) días húmedos (izquierda) b) días secos (derecha)

FUENTE: Elaboración propia

En la figura 16, se muestra el flujo y humedad específica promedio de niveles medios (700-500 hPa) para los días D. En ambos casos, se observan vientos del este sobre la región norte peruana, influenciados a su vez por la circulación anticiclónica en el Pacífico Oriental, pero con distintos valores de humedad específica promedio, siendo superiores a los 7.5 g/Kg en los días húmedos con máximos de hasta 8.5 g/Kg, mientras que los días secos muestran valores inferiores a los 7 g/Kg (predominantes entre los 6 y 6.5 g/Kg, figura no mostrada).

Por otro lado, el núcleo de la circulación anticiclónica se posiciona en ambos casos en una longitud aproximada similar (87°W) pero con latitudes diferentes (aproximadamente 15°S en los días secos y 20°S en los días húmedos), configuración que permitiría la presencia de ondas cortas (vaguada invertida del este) durante los días húmedos que actúa como gatillador de la convección profunda. Por lo tanto, un núcleo anticiclónico más próximo a la costa norte peruana actuaría como bloqueo de patrones del este hacia la región.

Al analizar temporalmente los días húmedos (figuras no mostradas), se observa el movimiento del núcleo anticiclónico hacia el suroeste desde el día D-2 hasta el día D, situación que conlleva a aumentos de la humedad específica de 1 a 2 g/Kg.

La figura 17 muestra el flujo promedio de niveles bajos (1000-800 hPa), vorticidad y áreas de convergencia en la capa. En los días húmedos, resaltar el ingreso de vientos del norte hacia la costa de Tumbes y Piura durante el día D, en diferencia a la predominancia de vientos de componente sur-oeste sobre la región durante los días previos. Esta circulación de vientos aunado con la migración al sur de la ZCIT, apoyan la convección en la región. En cambio, en los días secos, los flujos del norte en el día D-2 son desplazados hacia el norte de Ecuador, lo que favorece condiciones de mayor estabilidad durante el día D en la costa norte peruana.

Otra característica importante es la formación de circulaciones ciclónicas a mesoescala durante los días húmedos frente a la costa centro y norte del Perú, reflejada en regiones de vorticidad negativa (área comprendida entre 10°S y 0°E latitud, 100°W y 80°W longitud), configuración que apoyaría el traslado hacia el sur de la ZCIT y por consiguiente los flujos del norte desde El Caribe. Por otro lado, en los días secos, a pesar de la presencia de vorticidad negativa próxima a la costa peruana, no permite la incursión de la ZCIT, debido a vientos del sur más intensos durante el periodo (figura no mostrada). Estos vientos del sur, estarían explicando la vorticidad negativa próxima a la costa peruana debido a la cizalladura horizontal del viento que genera.

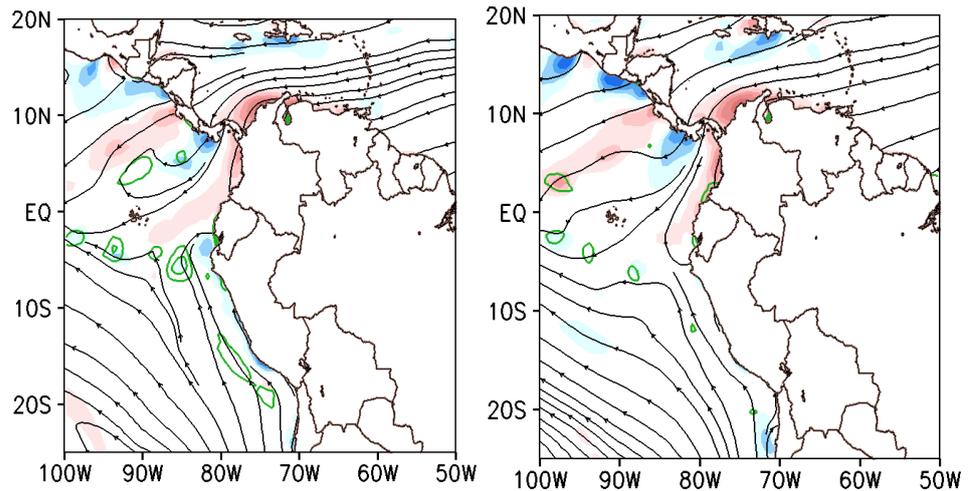
Al analizar las áreas de convergencia (en contornos verdes cada $0.5 \text{ s}^{-1} \cdot 10^5$) se observa mayores regiones durante los días húmedos, la gran mayoría en asociación a la ZCIT, con valores de divergencia en la capa próximos a los $-1 \text{ s}^{-1} \cdot 10^5$ frente a la costa de Tumbes y norte de Piura durante los días lluviosos (día D) que estarían sustentando la convección. A pesar de la presencia de convergencia mar adentro (entre los 90°W y 100°W), la convección profunda estaría inhibida por la convergencia de los oestes en niveles altos de la atmósfera.

La figura 18 muestra imágenes infrarrojas (IR4) asociadas a los días húmedos seleccionados. Una imagen infrarroja es esencialmente una fotografía de la superficie y de la temperatura del tope de la nube representado en escala de grises (Conway, 1997). Cabe destacar que todos los objetos emiten radiación térmica, y es tanto mayor cuanto más caliente es el objeto. Las imágenes han sido realizadas por SENAMHI en sus umbrales de temperatura para una identificación más rápida y oportuna de la convección en el país.

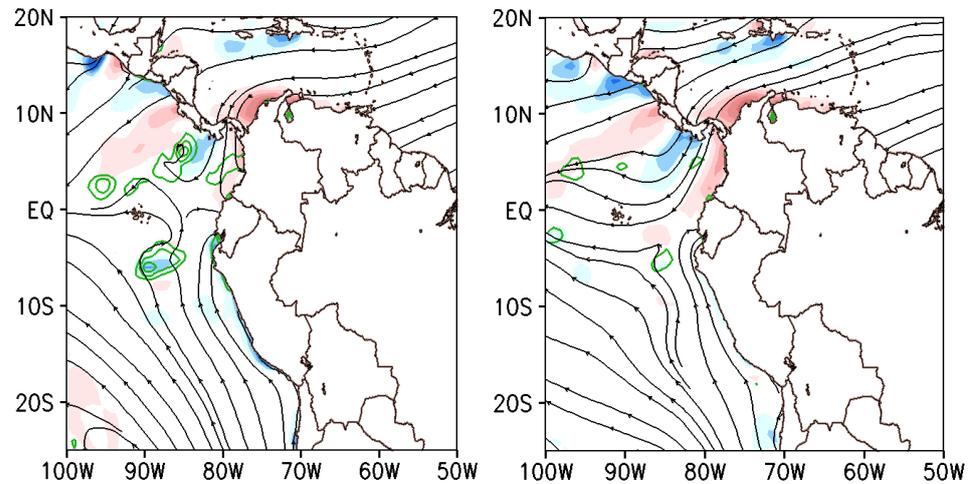
Durante los tres casos lluviosos, la mayoría de sistemas convectivos (SCs) profundos tienen como lugar de formación en Tumbes y norte de Piura (provincias de Talara, Sullana, Paita y Ayabaca), ello estaría explicado por los sectores de convergencia encontrados en niveles bajos. Estos SCs ocurren principalmente durante el atardecer y madrugada del día posterior, mientras que su movimiento es hacia el oeste. Se observan toques de temperatura de nube de hasta -80°C (colores en violeta) lo que implica áreas de evento severo en la región, en donde el ascenso de las masas de aire ha llegado inclusive hasta niveles de tropopausa. Además, notar que la mayor concentración de actividad convectiva se da en continente y no en el océano, situación que está sustentando por la convergencia de oestes en niveles altos.

La figura 19 muestra una diferencia del flujo de vientos entre días húmedos y secos, en la capa de 1000-800 hPa, resalta claramente dos circulaciones ciclónicas en el Pacífico, una con núcleo aproximado en los 9°S y 88°W y la segunda, en el Hemisferio Norte, frente a las costas de Costa Rica, ambas sustentan la migración al sur de la ZCIT y por consecuente los flujos del norte hacia el país.

D-2



D-1



D

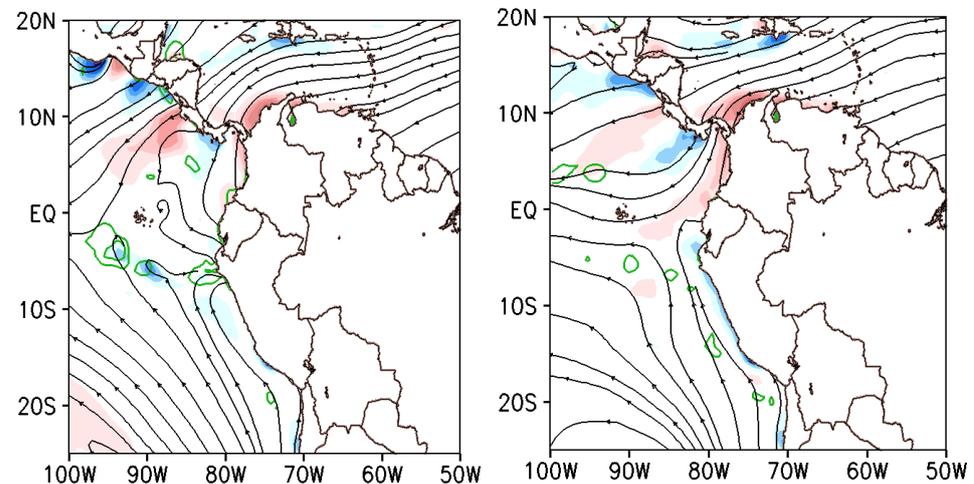


Figura 17: Compuestos entre 1000 y 800 hPa: Vorticidad ($1/s * 10^5$, sombreado), convergencia ($1/s * 10^5$, contornos verdes) y flujo para días D-2, D-1 y D a) días húmedos (izquierda) b) días secos (derecha)

FUENTE: Elaboración propia

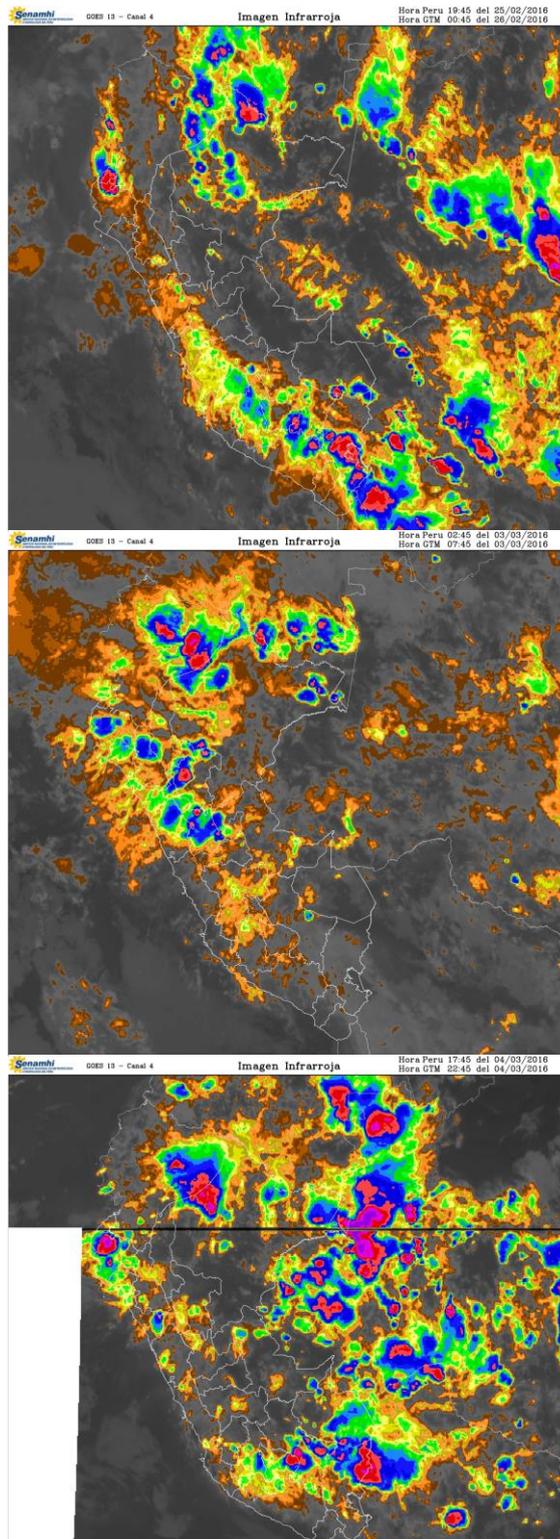


Figura 18: Imágenes infrarrojas (IR4) para los días húmedos identificados a) 25-02-16 (superior) b) 02-03-16 (centro) c) 04-03-16 (inferior)

Fuente: SENAMHI

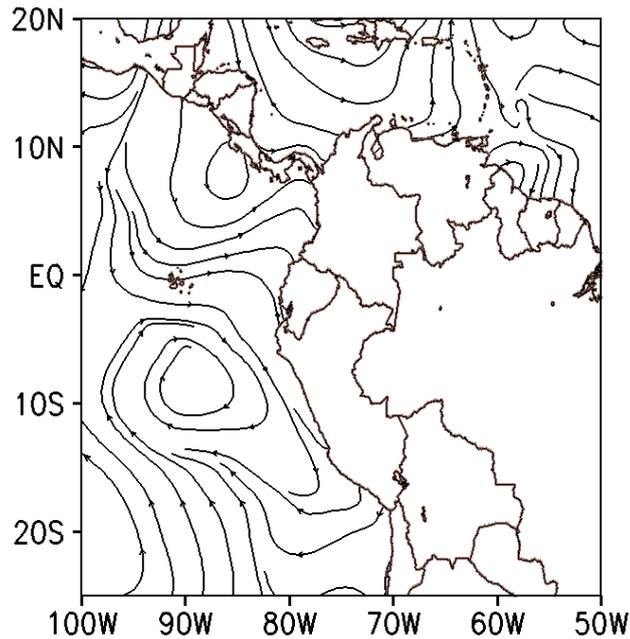


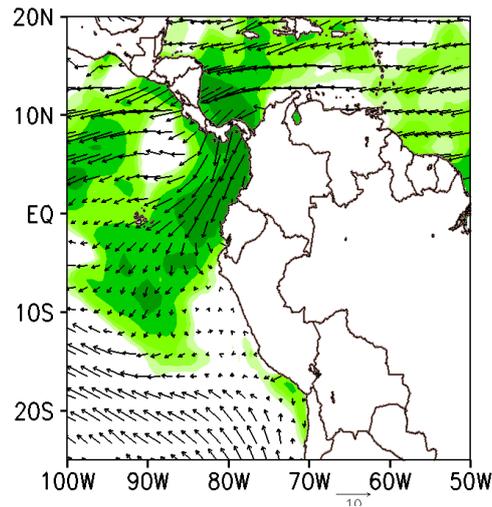
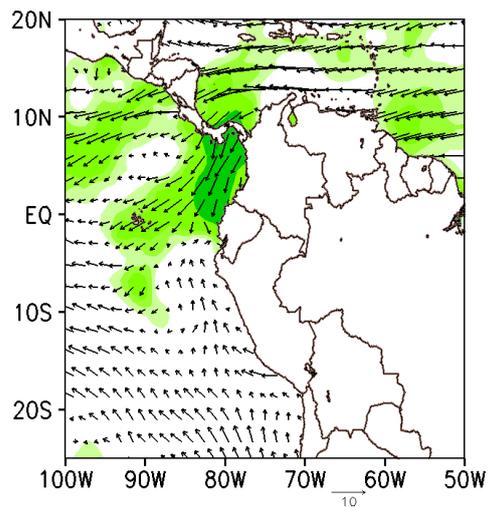
Figura 19: Diferencia de flujo de vientos (m/s) entre días húmedos y secos, 800-1000 hPa, día D

FUENTE: Elaboración propia

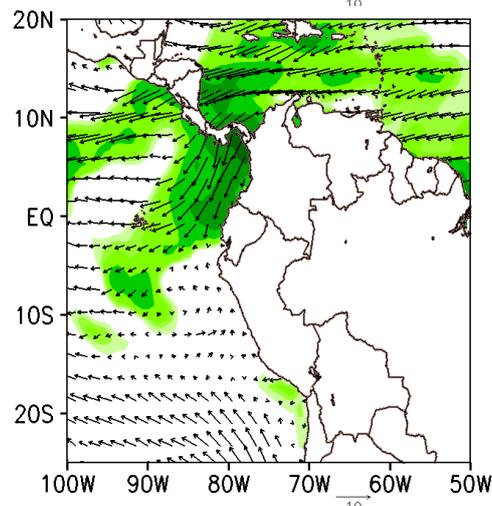
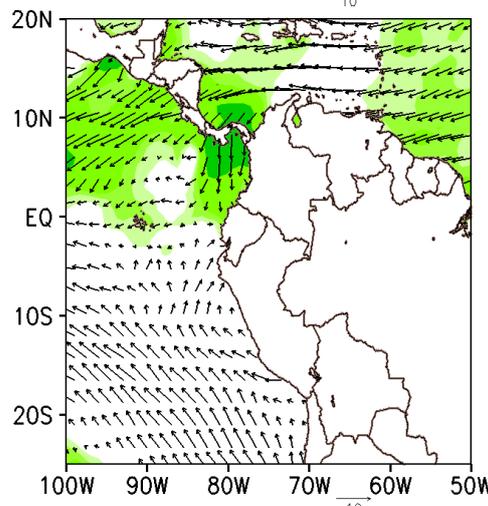
En la figura 20, se observa el flujo de humedad meridional en el nivel de 850 hPa. Durante los días lluviosos, resaltar la variación de humedad entre los días D-1 y D, de valores menores a los $5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{Kg}$ durante el día previo, aumenta hasta valores entre los 25 y $50 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{Kg}$ durante el día D, lo que implica una mayor advección de humedad en niveles bajos, la cual aunado con el flujo de humedad específica de niveles medios, sustenta mayores montos de precipitación durante la convección. Este comportamiento es muy similar en la capa 900-800 hPa (figuras no mostradas), con diferencias en la extensión meridional del flujo, en niveles más altos (800 hPa) alcanza valores entre los 25 y $50 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{Kg}$ hasta la costa de Lima y norte de Ica.

Mientras tanto, en los días secos, a pesar de los altos valores del flujo de humedad (entre los 15 y $50 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{Kg}$) en días previos (D-2), una intensificación de los vientos del sur apoyado por la formación de un eje de dorsal frente a la costa norte apoya el bloqueo del flujo de humedad hacia el país y el traslado de la ZCIT hacia Ecuador, para resultar en cantidades menores a los $5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{Kg}$ durante el día D.

D-2



D-1



D

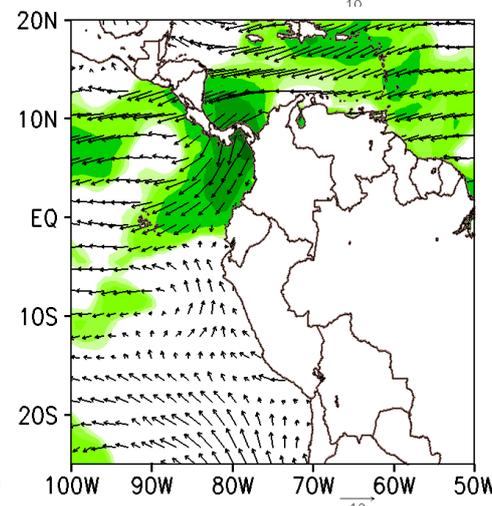
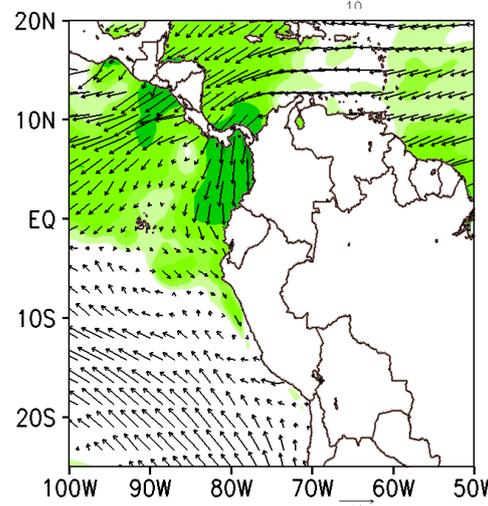


Figura 20: Compuestos en 850 hPa: Flujo de humedad meridional ($m^3/g/s \cdot Kg$) para días D-2, D-1 y D a) días húmedos (izquierda) b) días secos (derecha)

FUENTE: Elaboración propia

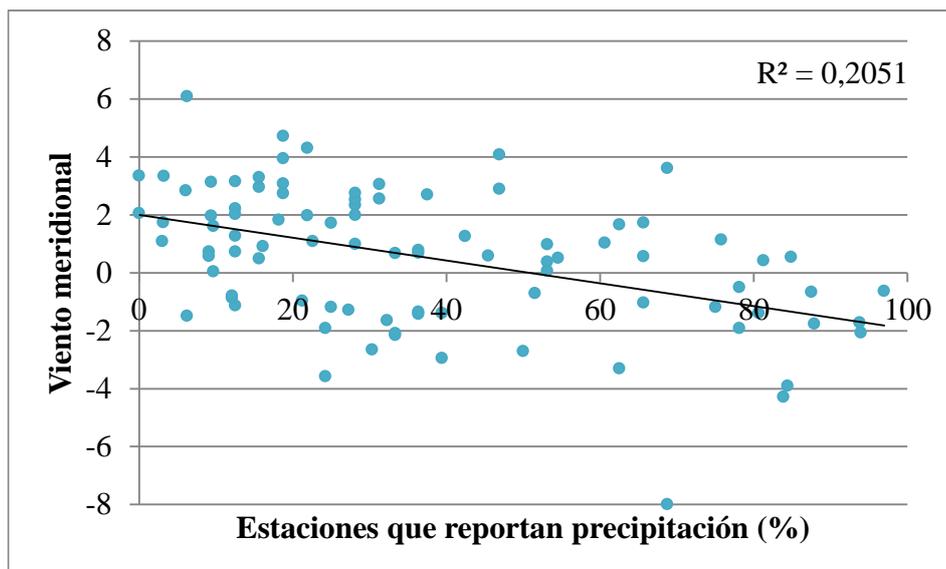


Figura 21: Correlación entre el viento meridional y estaciones que reportan precipitación en la costa norte

FUENTE: Elaboración propia

Finalmente, en la figura 21, se muestra una gráfica de correlación entre el viento meridional promedio areal (latitud entre 3°S y 1°S, longitud entre 82°W y 80°W) y el porcentaje de estaciones que reportan precipitación en la costa norte del país. Se nota, de modo general, que existe una mayor cantidad de estaciones con precipitación cuando el viento meridional es negativo, es decir, cuando el flujo de vientos proviene del norte. Así mismo, se detalla un coeficiente de determinación de 0.2051 y uno de correlación de 0.4529, la cual según la tabla 5, se interpreta como una correlación moderada.

Tabla 5: Significado de los coeficientes de correlación

Valor	Significado
1	Correlación grande y perfecta
0.9 a 0.99	Correlación muy alta
0.7 a 0.99	Correlación alta
0.4 a 0.69	Correlación moderada
0.2 a 0.39	Correlación baja
0.01 a 0.19	Correlación muy baja
0	Correlación nula

*En estos casos, la correlación es positiva, si los valores van de 0 a -1, la correlación es negativa

FUENTE: <https://es.slideshare.net/cleofezavaleta/coeficiente-de-correlacion>

IV. CONCLUSIONES

- CAPE no representa un buen indicador del potencial de convección en la costa norte peruana, debido a su variabilidad bajo condiciones de cobertura nubosa y precipitación. Inclusive mostrando una relación inversa con la precipitación, menores valores de CAPE durante los días húmedos.
- Se muestran mayores montos de agua precipitable durante los días húmedos, con valores entre los 60 y 65 mm; en promedio, una diferencia de 5 mm con máximos de hasta 10 mm de agua precipitable con los eventos secos.
- En niveles altos, los días húmedos son favorecidos por sectores de divergencia entre la AB y la VNEB, por otro lado, en los días secos, la posición de la zona de collado ejerce un papel inhibitor de la convección profunda debido a la convergencia de los oestes.
- En niveles medios, se observan diferentes valores de humedad específica promedio, siendo superiores a los 7.5 g/Kg en los días húmedos con máximos de hasta 8.5 g/Kg, mientras que los días secos muestran valores entre 6 y 6.5 g/Kg.
- Así mismo, durante los días secos, un núcleo anticiclónico en niveles medios más próximo a la costa norte peruana actúa como patrón de bloqueo de flujos del este hacia dicha región, caso contrario, durante los días húmedos, el núcleo anticiclónico se posiciona más al sur, lo que permite el ingreso de ondas cortas (vaguadas invertidas del este) que actúan como gatillador de la convección en Tumbes y Piura.
- En niveles bajos, resaltar la migración de la ZCIT hacia el sur durante los días húmedos, lo que permite sectores de divergencia próximos a los $-1 \text{ s}^{-1} \cdot 10^5$ frente a

- la costa de Tumbes y norte de Piura. En cambio, durante los días secos, la convección es favorecida en el Ecuador como consecuencia del desplazamiento de la ZCIT sobre dicha región debido a los vientos del sur más intensos.
- De igual forma, los flujos del norte presentados aportan una mayor advección de humedad en niveles bajos con valores entre los 25 y 50 $\text{m}^3/\text{s}^2\text{Kg}$ durante los días húmedos. En cambio, en los días secos, resultan en cantidades menores a los 5 $\text{m}^3/\text{s}^2\text{Kg}$ durante el día D.
- La migración de la ZCIT y por consecuente, los flujos del norte desde El Caribe, son apoyadas por la formación de circulaciones ciclónicas en el Pacífico durante los días húmedos, frente a la costa centro y norte de Perú, así como en el Hemisferio Norte, frente a la costa occidental de Costa Rica.
- Se muestra una correlación moderada entre los flujos del norte y la cantidad de estaciones que reportan precipitación en la costa norte peruana.
- La cantidad de evaporación adicional de niveles bajos, el flujo de humedad del norte, los mayores valores de humedad específica de niveles medios sustentan los grandes acumulados de precipitación durante los días lluviosos.
- Se presentan los ingredientes necesarios para la ocurrencia de convección profunda durante los días húmedos: cantidad de agua elevada, convergencia en niveles bajos, divergencia en niveles altos, inestabilidad moderada y el gatillador de niveles medios (vaguadas invertidas del este).

V. RECOMENDACIONES

El presente estudio fue realizado mediante el uso del reanálisis ERA-Interim, lo cual podría representar alguna desventaja comparado con actuales modelos de mayor resolución, por tanto, se propone las siguientes recomendaciones:

- Realizar análisis y comparaciones de eventos lluviosos y secos en un periodo mayor de años Niño para obtener conclusiones más consistentes.
- Realizar nuevas técnicas de análisis de las forzantes dinámicas de la atmósfera.
- Calcular el CAPE para periodos vespertinos, dado la mayor disponibilidad de energía durante dicho momento.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aceituno, P. 1988. On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate. *Monthly Weather Review* 116 (3): 505-524.
2. Adams, DK; Souza, EP. 2009. CAPE and Convective Events in the Southwest during the North American Monsoon. *Monthly Weather Review* 137(1):83-98.
3. Conway, ED. c1997. An introduction to satellite image interpretation. Baltimore, Maryland, US, Johns Hopkins University Press. 264 p.
4. Dee, DP; Uppala, SM; Simmons, AJ; Berrisford, P; Poli, P; Kobayashi, S; Andrae, U; Balmaseda, MA; Balsamo, G; Bauer, P; Bechtold, P; Beljaars, ACM; Berg, L van de; Bidlot, J; Bormann, N; Delsol, C; Dragani, R; Fuentes, M; Geer, AJ; Haimberger, L; Healy, SB; Hersbach, H; Hólm, EV; Isaken, L; Kallberg, P; Kohler, M; Matricardi, M; McNally, AP; Monge-Sanz, BM; Morcrette, JJ; Park, BK; Peubey, C; Rosnay, P de; Tavolato, C; Théupat, JN; Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137:553-597.
5. Douglas, MW; Mejia, J; Ordinola, N; Boustead, J. 2009. Synoptic Variability of Rainfall and Cloudiness along the Coasts of Northern Peru and Ecuador during the 1997/98 El Niño Event. *Monthly Weather Review* 137: 116-136.
6. ENFEN. 2012. Definición operacional de los eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la costa del Perú (en línea). Consultado 01 set. 2017. Disponible en http://www.met.igp.gob.pe/elnino/enfen/ICEN-Nota_Tecnica.pdf.
7. Garner, S. 2015. The Relationship between Hurricane Potential Intensity and CAPE. *Journal of the Atmospheric Sciences* 72(1):141-163.

8. Hanley, DE; Bourassa, MA; O'Brien, JJ; Smith, SR; Spade, ER 2003. A Quantitative Evaluation of ENSO Indices. *Journal of Climate* 16(8): 1249-1258.
9. Johnson, RH.; Alves, SL.; Ciesielski, PD; Keenan, TD. 2005. Organization of Oceanic Convection during the Onset of the 1998 East Asian Summer Monsoon. *Monthly Weather Review* 133: 131-148.
10. Kidder, SQ; Jones, AS. 2007. A Blended Satellite Total Precipitable Water Product for Operational Forecasting. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 24(1):74-81.
11. Linders, T; Saetra, O. 2010. Can CAPE Maintain Polar Lows? *Journal of the Atmospheric Sciences* 67(8):2559-2571.
12. McPhaden, MJ. 2002. El Niño and La Niña: Causes and Global Consequences. *Encyclopedia of Global Environmental Change* 1: 353-370.
13. The COMET Program. 2002. Principles of Convection I: Buoyancy and CAPE (en línea). Consultado 02 set. 2017. Disponible en: <https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/cape/navmenu.php?tab=1&page=10-0-0&type=flash>.
14. The COMET Program. 2006. Clouds, Precipitation and Water Vapor (en línea). Consultado 04 set. 2017. Disponible en: https://www.meted.ucar.edu/npoess/microwave_topics/clouds_precip_water_vapor/.
15. The COMET Program. 2008. Dominio del diagrama oblicuo T - logp (en línea). Consultado 02 set. 2017. Disponible en: http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/skewt_es/index.htm.
16. The COMET Program. 2012. Suomi NPP: Una nueva generación de satélites de observación ambiental (en línea). Consultado 04 set. 2017. Disponible en: https://www.meted.ucar.edu/satmet/npp_es/index.htm.
17. The COMET Program. 2016. Introduction to Tropical Meteorology 2nd Edition (en línea). Consultado 29 ago. 2017. Disponible en:

http://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition/index.htm.

18. Ye, B; Del Genio, AD; Lo, KK-W. 1998. CAPE Variations in the Current Climate and in a Climate Change. *Journal of Climate* 11(8):1997-2015.

VII. ANEXOS

Anexo 1: Estaciones meteorológicas costeras de Tumbes y Piura

ESTACIÓN	DEPARTAMENTO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
La Cruz	Tumbes	3°37'41.8"	80°34'9.4"	3
Huasimo	Tumbes	4°0'1"	80°32'1"	750
Matapalo	Tumbes	3°40'57"	80°12'54.9"	65
El Tigre	Tumbes	3°46'0"	80°27'0"	43
Campamento Sede	Tumbes	3°33'1"	80°26'1"	6
Rica Playa	Tumbes	3°48'23.2"	80°30'9.3"	63
Puerto Pizarro	Tumbes	3°30'20"	80°27'55"	1
Papayal	Tumbes	3°34'1"	80°13'59"	50
El Salto	Tumbes	3°26'1"	80°19'1"	6
Cañaveral	Tumbes	3°56'1"	80°39'1"	140
Cabo Inga	Tumbes	3°58'1"	80°26'1"	405

FUENTE: SENAMHI

Anexo 1: Estaciones meteorológicas costeras de Tumbes y Piura (Continuación)

ESTACIÓN	DEPARTAMENTO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
Pananga	Piura	4°33'33"	80°53'53"	440
Lancones	Piura	4°34'1"	80°29'1"	135
Alamor	Piura	4°28'25.13"	80°23'52.2"	150
Mallares	Piura	4°51'1"	80°43'59.7"	48
El Alto	Piura	4°15'30"	81°12'57"	298
Partidor	Piura	4°43'42.7"	80°16'38.9"	236
La Esperanza	Piura	4°55'1"	81°3'26.5"	11
Bernal	Piura	5°27'3.7"	80°44'15.1"	8
Virrey	Piura	5°34'51"	79°58'11.6"	264
Hacienda Bigote	Piura	5°19'15"	79°47'8.5"	213
Malacasi	Piura	5°19'1"	79°53'1"	240
San Miguel	Piura	5°18'14"	80°40'50.3"	20
Chulucanas	Piura	5°16'1"	80°10'0"	90
Miraflores	Piura	5°10'10"	80°35'34"	40
Chusis	Piura	5°31'27"	80°48'22.6"	14
Morropón	Piura	5°11'40"	79°58'16"	141
Chipillico	Piura	4°44'1"	80°10'1"	300
El Ciruelo	Piura	4°18'1"	80°9'1"	300
San Pedro	Piura	5°4'46"	80°0'58.3"	229
La Ardilla	Piura	4°31'1"	80°26'1"	120
Paimas	Piura	4°37'1"	79°57'1"	504
Tambogrande	Piura	4°57'1"	80°19'1"	66

FUENTE: SENAMHI