

Artigo

# Un Estudio de Caso de un Evento de Nevada de Alto Impacto en la Sierra Sur del Perú: Dinámica y Evaluación del Modelo Eta

Marco Bojorquez<sup>1</sup> , Adrian Huerta<sup>2</sup> , Victoria Calle Montes<sup>3</sup> <sup>1</sup>*Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial, Lima, Perú.*<sup>2</sup>*Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Lima, Perú.*<sup>3</sup>*Departamento de Física y Meteorología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.*

Recibido em: 16 de Febrero de 2021 - Aceptado em: 1 de Diciembre de 2021

## Resumen

Se evaluó el desempeño de las predicciones del modelo Eta durante el acaecimiento del evento de nevada generalizada que causó el mayor impacto social en la Sierra Sur del Perú (SSP) durante agosto del 2013. La evaluación se desarrolló a escala sinóptica de Sudamérica (A1), y en las regiones próximas a SSP (A2), con una antelación de 96, 48 y 24 h frente al Reanálisis ERA-Interim, centrándose en las variables meteorológicas que propician su acaecimiento. El evento estuvo asociado a la invasión de la corriente en chorro subtropical (JST) y una vaguada profunda próxima a SSP en tropósfera alta, una baja segregada (BS) en tropósfera media y altos valores de humedad relativa sobre la SSP. Se encontró que una buena predicción de la localización del JST sobre A2 conlleva una mejor predicción del movimiento vertical y divergencia, variables que intensifican la ocurrencia de nevadas, resultando la previsión de 24 h la más precisa. Se obtuvieron mayores errores en niveles de tropósfera alta debido a la intensificación de parámetros dinámicos producto de la invasión del JST.

**Palabras-clave:** modelo Eta, predicción, evaluación, nevadas, Andes, Perú.

## A Case Study of a High Impact Snowfall Event in the Southern Andes of Peru: Dynamics and Evaluation of the Eta Model

### Abstract

The performance of the Eta model predictions was evaluated during the occurrence of the generalized snowfall event that caused the greatest social impact in the southern highlands of Peru (SSP) during August 2013. The evaluation focused on the synoptic scale of South America (A1), and in the regions close to SSP (A2), 96, 48 and 24 hours in advance compared to the ERA-Interim Reanalysis, focusing on the meteorological variables that trigger its occurrence. The event was associated with the invasion of the subtropical jet stream (JST) and a deep trough close to SSP in the upper troposphere, a Cut Off Low (COL) in the middle troposphere and high values of relative humidity on SSP. It was found that a good prediction of the location of the JST on A2 leads to a better prediction of vertical movement and divergence, variables that intensifies the occurrence of snowfall, resulting in 24-hour forecast being the most accurate. Higher errors were obtained at high troposphere levels because of the intensification of dynamic parameters due to the invasion of the JST.

**Keywords:** Eta model, prediction, evaluation, snowfall, Andes, Peru.

### 1. Introducción

En el Perú, el rol de la precipitación en la Sierra Sur del Perú (SSP) es fundamental para los recursos hidrológicos, ecosistema y agricultura, siendo también esta región vulnerable a eventos hidrometeorológicos extremos como

heladas, inundaciones y sequías (Junquas, 2017; Perry *et al.*, 2017; Imfeld *et al.*, 2019; Huerta y Lavado, 2020; Poveda *et al.*, 2020). En el año 2013, el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) registró que durante el periodo 2003-2013 la cantidad de personas afectadas por la ocur-

**Tabla 1** - Características operativas del modelo Eta/SENAMHI.

	Perú	Sudamérica
Área (Latitud; Longitud)	85° W-56° W; 28° S-4° N	116° W-34° W; 54° S-13° N
Resolución horizontal	22*22 km	32*32 km
Niveles verticales	38 niveles	50 niveles
Resolución temporal	6 h	
Parametrizaciones	Convección: Kain-Fritsch (Desde 2007) Capa límite: Mellor - Yamada 2.5 Radiación: GFDL Modelo hidrostático	
Tiempo de previsión	72 h	120 h
Condiciones iniciales y de frontera	Atmósfera y Océano: Global Forecast System (GFS)	
Período disponible	Enero 2007 - actualidad	Enero 2009 - actualidad

rencia de nevadas superaron los 450 mil individuos, siendo en el mismo año, el segundo fenómeno meteorológico más adverso que originó la mayor cantidad de personas afectadas en SSP (INDECI, 2013).

Entre las medidas efectivas para enfrentar los eventos extremos y alertar oportunamente o mitigar los efectos de estos eventos adversos se encuentran los modelos de Predicción Numérica del Tiempo (PNT), desarrollados como una herramienta para intentar predecir con antelación los eventos extremos (Jimenez, 2014; Tanessong, 2015). En el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) del Perú se utilizan operativamente los modelos Weather Research and Forecasting (WRF) y Eta (Muller *et al.*, 2016). Además, para que el modelo sea de utilidad es imprescindible evaluar la confiabilidad de las predicciones, debido a la importancia para la sociedad, economía y el entorno en regiones afectadas por estos eventos extremos (Matsueda y Nakazawa, 2015).

Una de las primeras investigaciones en el Perú para determinar las configuraciones sinópticas asociadas a la ocurrencia de nevadas de gran trascendencia en la SSP fue realizada por Mestanza (1994). El autor analizó dos eventos de nevadas en el año 1992 asociados a la presencia de un sistema de vaguada profundo en 500 hPa. Asimismo, Vuille y Ammann (1997) encontraron 2 patrones sinópticos asociados a la ocurrencia de nevadas sobre la Cordillera de los Andes del norte de Chile, siendo una configuración de frente frío asociado a un sistema de vaguada en el nivel de 500 hPa y un sistema de baja segregada en el mismo nivel isobárico. Recientemente, otros estudios tales como Quispe (2014) y Quispe (2017) han aumentado notablemente el conocimiento relacionado a los patrones de circulación atmosférica asociado a la ocurrencia de nevadas intensas en la SSP. Éste último encontró que la presencia de bajas segregadas (BS) o depresiones aisladas de niveles altos (DANA) asociados a la ocurrencia de

nevadas generalizadas son más frecuentes durante meses invernales (Quispe, 2017). Asimismo, se conoce también las fases involucradas al desarrollo y debilitamiento de una BS en el hemisferio sur (Godoy *et al.*, 2011a).

Adicionalmente, los servicios meteorológicos centran la evaluación de los modelos en variables básicas como temperatura y precipitación (Chou, 2005; Ávalos, 2009; Ríos *et al.*, 2016). Sin embargo, aún no existe evidencia de evaluaciones referidas a los campos sinópticos asociados a eventos meteorológicos extremos en el Perú, especialmente en aquellos casos asociados a nevadas regionales. Motivado por las anteriores consideraciones, la presente investigación se centra en evaluar las predicciones de las variables meteorológicas que propician la ocurrencia del evento mediante la cuantificación y el análisis del error del pronóstico del modelo Eta. De esta forma, se pretende comprender el actual comportamiento del modelo e identificar fortalezas y debilidades de la predictibilidad del modelo bajo este evento, con el fin de realizar mejoras como en la resolución del modelo, parametrizaciones físicas o la asimilación de datos (Wyszogrodzki, 2013).

Los objetivos de esta investigación fueron: a) investigar la evolución de la circulación sinóptica y sus efectos sobre la SSP durante el evento de nevada de mayor impacto social, basado en la información grillada del Reanálisis Era-Interim. b) evaluar las predicciones del modelo Eta del SENAMHI durante la ocurrencia del evento de nevada con una antelación de 96, 48 y 24 h.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Datos grillados

#### 2.1.1. Modelo Eta/SENAMHI

Mesinger (1984) define al modelo Eta como un modelo hidrostático que dentro de sus características más destacadas es el empleo de la coordenada vertical "Eta". Este tipo de coordenada presenta superficies cuasi-horizontales con el fin de reducir los problemas de cálculo de la fuerza horizontal de presión, la advección y la difusión horizontal sobre pendientes topográficas muy abruptas y de gran pendiente como la Cordillera de los Andes (Seluchi y Chou, 1999; Popovic, 2006; Ávalos, 2009). El modelo Eta/SENAMHI se ejecuta para los dominios de Perú y Sudamérica con una resolución horizontal de 22 y 32 km respectivamente, y una resolución temporal de 6 h. El modelo se ejecuta 2 veces al día con las condiciones iniciales y de frontera de las 00Z y 12Z, obtenidas a partir del modelo Global Forecast System (GFS), presentando un tiempo de predicción de 72 h para el dominio Perú y 120 h para Sudamérica (Tabla 1). El modelo presenta parametrizaciones para convección, Kain-Fritsch; capa límite, esquema Mellor - Yamada nivel 2.5; y modelo de radiación, GFDL. En el presente estudio, las predicciones de las

variables, expresadas en campos grillados, fueron obtenidas del modelo Eta/SENAMHI 32 km para la región de Sudamérica con un tiempo de integración de 96, 48 y 24 h antes de la ocurrencia del evento.

### 2.1.2. Reanálisis ERA-Interim

Para la descripción sinóptica observada asociada al evento de nevada se utilizaron variables atmosféricas provistas por el Reanálisis del ERA-Interim, el cual es desarrollado por el Centro Europeo para el pronóstico del tiempo de mediano plazo (ECMWF), caracterizado por presentar una resolución espacial de  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ , 60 niveles del modelo en la vertical (coordenadas híbridas sigma/presión) y 37 niveles de presión (desde 1000 a 1 hPa), y una resolución temporal de 4 análisis por día, 00, 06, 12 y 18 UTC (Dee *et al.*, 2011).

Reyers y Shao (2019) indican que la mejora en la resolución horizontal del Reanálisis ERA-Interim ( $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ ) sobre Era40 ( $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ), presenta efectos mínimos para la identificación de las BS en el Hemisferio Sur, y ello debido principalmente a la escala horizontal entre 600-1200 km que alcanzan las BS (Fuenzalida *et al.*, 2005). Además, existe evidencia reciente que los Reanálisis más actuales como el ERA-Interim muestran un pro-

greso en la representación de la dinámica de las BS (Pinheiro *et al.*, 2019). En este sentido, estudios previos han utilizado al ERA-Interim como el Reanálisis para la detección de BS (Reyers y Shao, 2019; Quispe *et al.*, 2021). Asimismo, uno de los estudios más recientes utiliza al ERA-Interim para la obtención de la climatología (36 años) para el estudio de BS en el Hemisferio Sur, a partir de variables como vorticidad, temperatura del aire, vorticidad potencial y viento zonal (Pinheiro *et al.*, 2017). Esto justifica la decisión de utilizar ERA-Interim como la base de datos de referencia.

### 2.2. Área de estudio

La evaluación de las predicciones se llevó a cabo sobre la región de Sudamérica (A1), delimitado entre los  $50^\circ \text{ S}$  a  $10^\circ \text{ S}$  y  $115^\circ \text{ W}$  a  $35^\circ \text{ W}$  (Fig. 1). Asimismo, se definió una segunda área de estudio que abarcó la región de los departamentos de la SSP y sus vecindades (A2), debido a la importancia de la proximidad e interacción entre los sistemas atmosféricos en tropósfera alta y media que condicionan la ocurrencia de nevadas generalizadas en la SSP. Este A2 se encuentra delimitado entre los  $25^\circ \text{ S}$  a  $13^\circ \text{ S}$  y los  $85^\circ \text{ W}$  a  $68^\circ \text{ W}$  (Fig. 1).

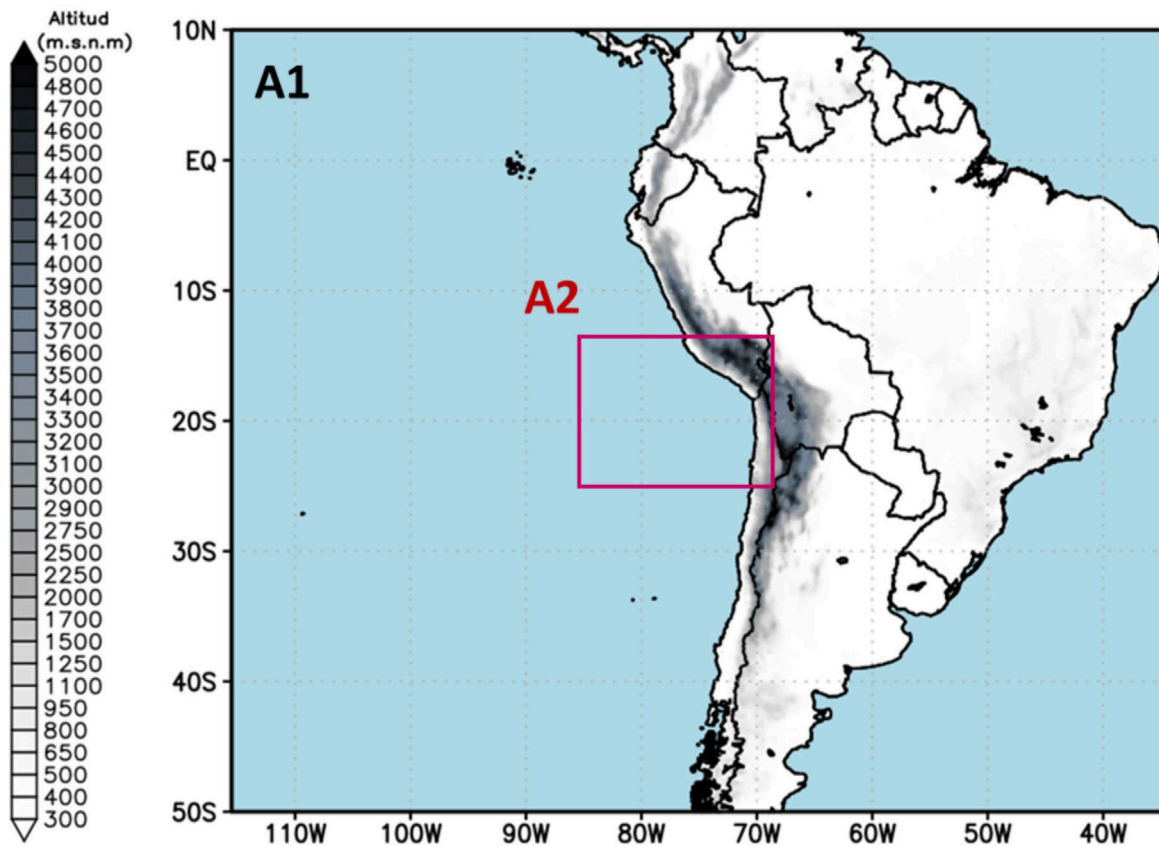


Figura 1 - Área de estudio A1 y A2.

### 2.3. Descripción de la circulación sinóptica asociada al evento de nevada

El análisis a escala sinóptica espacial y temporal en A1 se realizó en niveles de tropósfera alta, media y baja, en la cuales se evaluaron los parámetros dinámicos de mayor influencia, entre ellas: altura geopotencial (HGT), divergencia e isotacas en niveles altos; líneas de corriente, humedad relativa (HR) y movimiento vertical (VVEL) en niveles medios, y finalmente la HR, HGT y presión reducida a nivel del mar (MSLP) en niveles bajos.

En niveles altos, las isotacas permiten identificar la posición y movimiento de la corriente en chorro (JS), que a su vez fomentan regiones de convergencia y divergencia. Existe evidencia del rol de los sistemas a escala sinóptica que intensifican el acaecimiento de nevadas, a través de la eficiencia de los procesos microfísicos para la formación de nieve (Auer y White, 1982; Perry, 2006). Además, los campos espaciales de HGT permiten inferir el ingreso de sistemas fríos. En niveles medios, el análisis de líneas de corriente junto a los campos de HR permiten identificar la fuente y las regiones con mayor saturación, mientras que a través de los campos de VVEL es posible identificar regiones con núcleos máximos de movimientos ascendentes y descendentes. Ambos mecanismos están asociados a la presencia de una BS. Por otro lado, así como en niveles altos y medios, es importante identificar el ingreso de los sistemas extratropicales en niveles bajos a través de los campos de MSLP. Finalmente, los campos horizontales en los distintos niveles isobáricos fueron analizados también mediante un corte vertical latitudinal sobre la SSP.

De acuerdo a Quispe (2006), la dinámica del evento puede ser explicada mediante 2 fases: fase precursora (FP) y fase de formación (FF), determinadas a partir de las anomalías de altura geopotencial en 500 hPa. La FP se caracteriza por presentar la amplificación de una cuña sobre el Pacífico sur-este que permite la profundización de una vaguada asociada a la presencia e invasión del JST a latitudes tropicales, mientras que la FF es identificada a través de la formación de una circulación cerrada fría en niveles de tropósfera media, representada por anomalías de HGT.

### 2.4. Desempeño de las predicciones del modelo Eta/SENAMHI durante el evento de nevada

#### 2.4.1. Evaluación cualitativa de las predicciones del modelo

Con la finalidad de conocer si las predicciones del modelo Eta/SENAMHI estuvieron en la capacidad de simular los patrones sinópticos observados y la dinámica asociada para la ocurrencia del evento de nevada sobre la SSP, se compararon las predicciones basadas en las inicializaciones del modelo ETA/SENAMHI con 96, 48 y 24 h antes de la ocurrencia de la nevada en SSP frente a la condición observada por el Reanálisis ERA-Interim. En esta evaluación se compararon campos horizontales, cortes

verticales y diagrama de Hovmoller de las variables descritas en la Sección 2.3.

#### 2.4.2. Evaluación cuantitativa de las predicciones del modelo

Con el fin de cuantificar el error asociado a las predicciones, se realizó una evaluación cuantitativa de las predicciones del modelo Eta/SENAMHI frente al ERA-Interim utilizando parámetros de verificación estadística para los tres casos de predicción y sobre las regiones A1 y A2. La información obtenida del modelo Eta fue interpolada de forma bilineal hacia la retícula del Reanálisis ERA/Interim (Katragkou, 2015). Los parámetros de verificación estadística utilizados fueron:

Error medio (*sesgo*):

$$Sesgo = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (1)$$

Raíz del error cuadrático medio (*RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (2)$$

Correlación espacial (*SC*):

$$SC = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{(\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2)^{1/2}} \quad (3)$$

dónde:  $N$ , indica el número total de comparaciones.  $O_i$ , los valores de Reanálisis, y  $P_i$  los valores de predicción del modelo Eta/SENAMHI.

La evaluación cuantitativa se centró en las variables descritas en la sección 2.3, iniciándose con el análisis espacio-temporal del *sesgo* sobre A1 en tropósfera alta, media y baja. Debido a la amplia información, la evaluación se centró únicamente durante el día de ocurrencia del evento. Posteriormente, se calculó la *SC* sobre las regiones A1 y A2, así como su evolución temporal para cada caso de previsión desde su inicialización hasta el día del evento. Finalmente, se calculó el *RMSE* promedio sobre las regiones A1 y A2, y se analizaron sus evoluciones temporales.

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1. Descripción del evento

De acuerdo a los compendios estadísticos de INDECI se registró un evento de nevada generalizada durante los días 24-25 de agosto del 2013, registrado en los departamentos de Apurímac, Ayacucho, Cusco, Huancavelica, Puno, Junín, Moquegua, Tacna, Pasco y Arequipa (INDECI, 2013). El impacto socioeconómico de este evento dejó cerca de 100 mil personas afectadas, más de 900 mil animales afectados y 58 mil animales muertos en el sector agricultura (INDECI, 2013). Los registros de la ocurrencia

del evento por INDECI fueron también reportados en las planillas meteorológicas del SENAMHI en estaciones convencionales por encima de 3400 m.s.n.m. Aunque no se obtuvieron mediciones de la altura de la caída de nieve, fueron registrados mediante notas adicionales en las planillas, logrando verificar la ocurrencia del evento (SENAMHI, 2021).

Durante el 25 de agosto se evidenció que las áreas cubiertas de nieve alcanzaron las regiones altoandinas de Perú, Chile y Bolivia (Fig. 2a). En el Perú, de acuerdo al producto de cobertura de nieve MODIS Aqua (Hall y Riggs, 2016), la Cordillera occidental de la SSP tuvo mayor presencia de nieve durante este evento (Fig. 2b), lo que coincide con lo encontrado por Quispe (2017), donde precisa que esta región es la más afectada durante eventos de BS's o DANA's en la estación invernal austral.

### 3.1.1. Invasión de la corriente en chorro

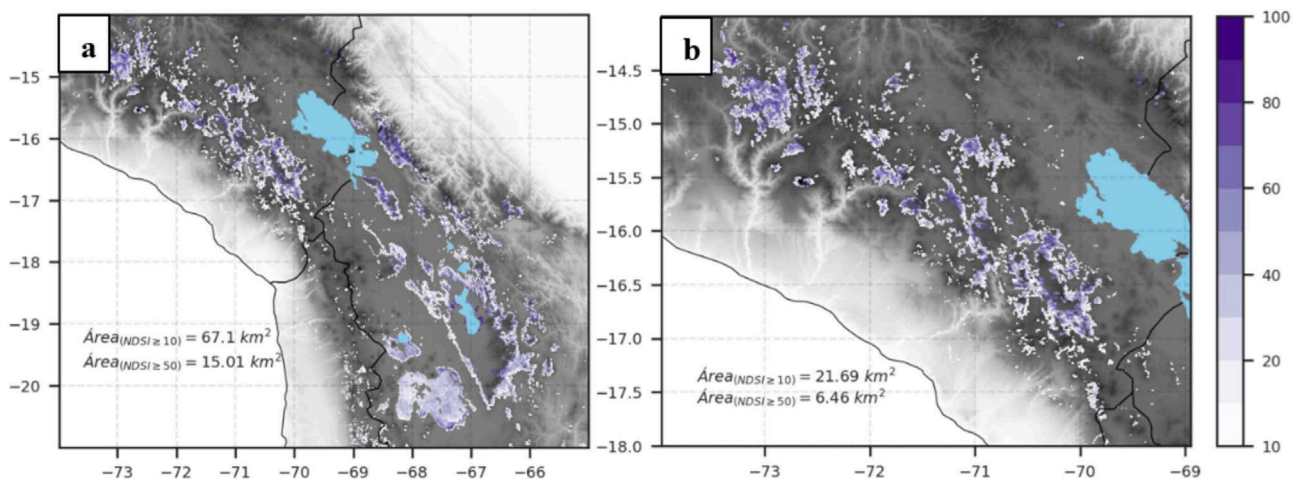
Se identificaron dos regiones inmersas con la presencia del JS, una sobre el Pacífico de núcleo en  $40^{\circ}$  S -  $110^{\circ}$  W y con una porción de esta penetrando latitudes tropicales, y el otro JS sobre el Atlántico con núcleo aproximado en los  $40^{\circ}$  S -  $40^{\circ}$  W, ambos distribuidos principalmente sobre latitudes medias. Se identificó que durante el día 23 de agosto a las 00Z ambos JS se encontraban compuestos por el Jet Subtropical (JST) y la rama norte del Jet Polar (JPN). En la Fig. 3 (a,b) se observó que durante el día 24, el avance del JS ubicado en el Pacífico estuvo asociado a la profundización de una cuña que alcanza extenderse sobre el Pacífico sureste con eje desde los  $20^{\circ}$  S hasta  $50^{\circ}$  S. Delante de la cuña se bifurca parte del JS alcanzando la latitud de  $20^{\circ}$  S, características similares son descritas por Reyers y Shao (2019), permitiendo así la interacción entre estas dos regiones del JS, que ya alcanzan invadir latitudes tropicales cercanas al sur del

Perú. Durante el día 25, se logra apreciar en niveles altos el empuje hacia el este por parte de la cuña en el Pacífico. En ambos días, fue evidente la extensión de la cuña y su posterior movimiento (Fig. 3 (a,b)), ambos promovidos por la predominancia de la advección horizontal de vorticidad anticiclónica (no mostrado) y vinculado a una advección de aire cálido (Bojorquez, 2021), logrando fortalecer y profundizar una vaguada en niveles altos con eje NW-SE desde los  $15^{\circ}$  S hasta los  $35^{\circ}$  S, patrones característicos de la fase previa para la formación de una BS (Godoy *et al.*, 2011b). Por otro lado, hacia el lado oeste de la vaguada y por encima de los  $20^{\circ}$  S, se desencadenó la mayor invasión del JS, con respecto a los días anteriores, compuesta principalmente por el JST y que alcanzó magnitudes sobre los 100 kt. Fue sobresaliente el alcance meridional del JST sobre el Perú, posicionándose hasta los  $12^{\circ}$  S. Uno de los efectos de la invasión del JS fue el incremento de la divergencia (capa 200-300 hPa) en la parte delantera de la vaguada, asociada principalmente a la difluencia por magnitud durante el 25 de agosto del 2013 (Fig. 3 (c,d)). Esta zona de divergencia logra predominar en todo el flanco este del eje de orientación del JST, invadiendo también sobre SSP.

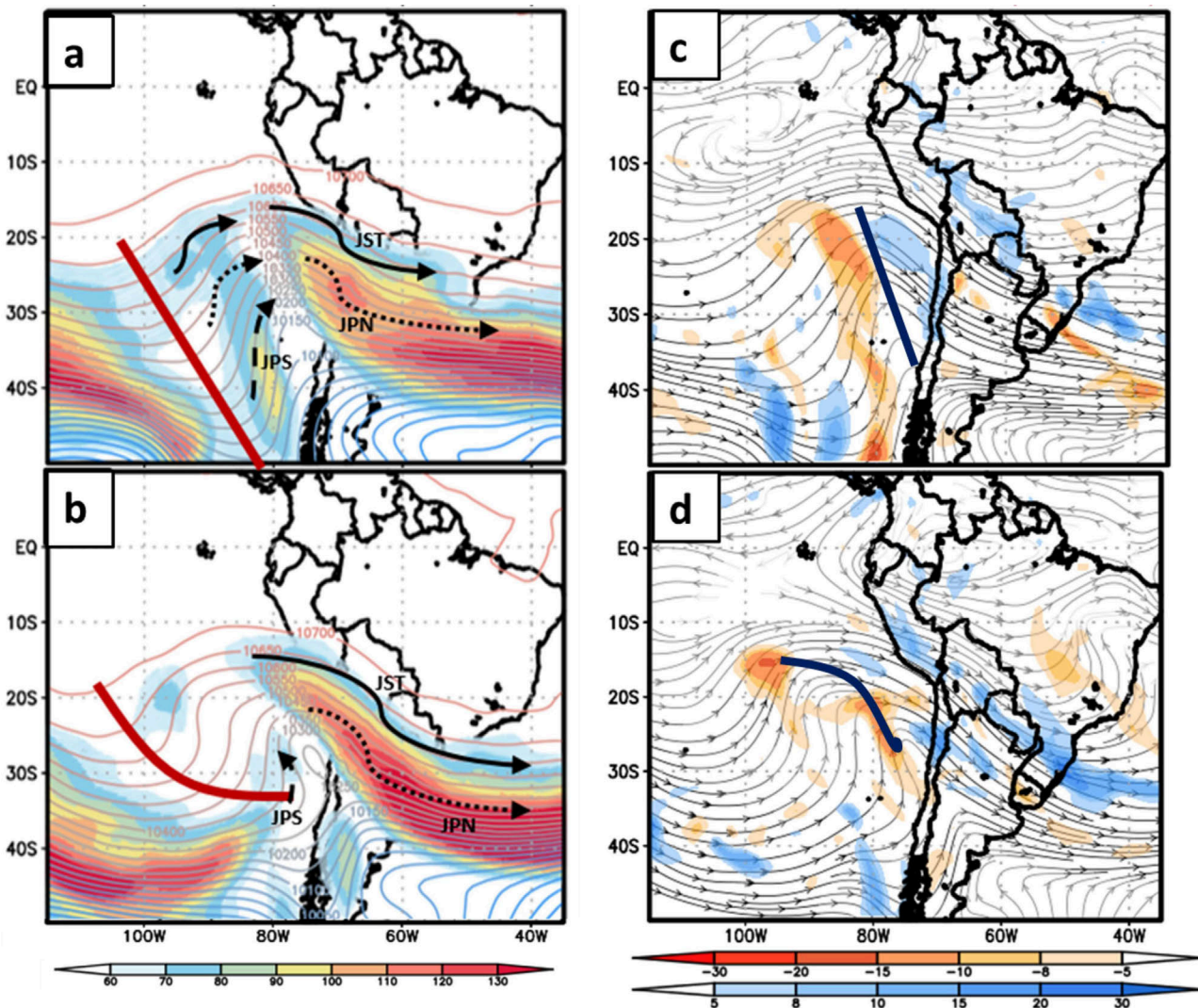
Se identificó que la FF de este evento ocurrió durante el día 24 de agosto del 2013 a las 00Z (no mostrado). En términos de posición por parte del sistema frío y el acacamiento de la nevada generalizada, se determinó que el día 25 a las 00Z representa las características sinópticas durante la fase de ocurrencia (FO) del acacamiento de la nevada en la SSP.

### 3.1.2. Sistema frío en niveles medios

La invasión del JST asociada a una vaguada profunda en niveles altos permitió que en la tropósfera media (500 hPa) se presente una BS con valores mínimos de



**Figura 2** - Cobertura de nieve (%) del MODIS Aqua durante el 25 de agosto del 2013 en los Andes de Perú, Chile y Bolivia (a), y sobre la SSP (b). Regiones sombreadas en tonalidad morada oscura representan valores de NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve) del 100% indicando el porcentaje de observaciones de nieve en un pixel de 500 m.



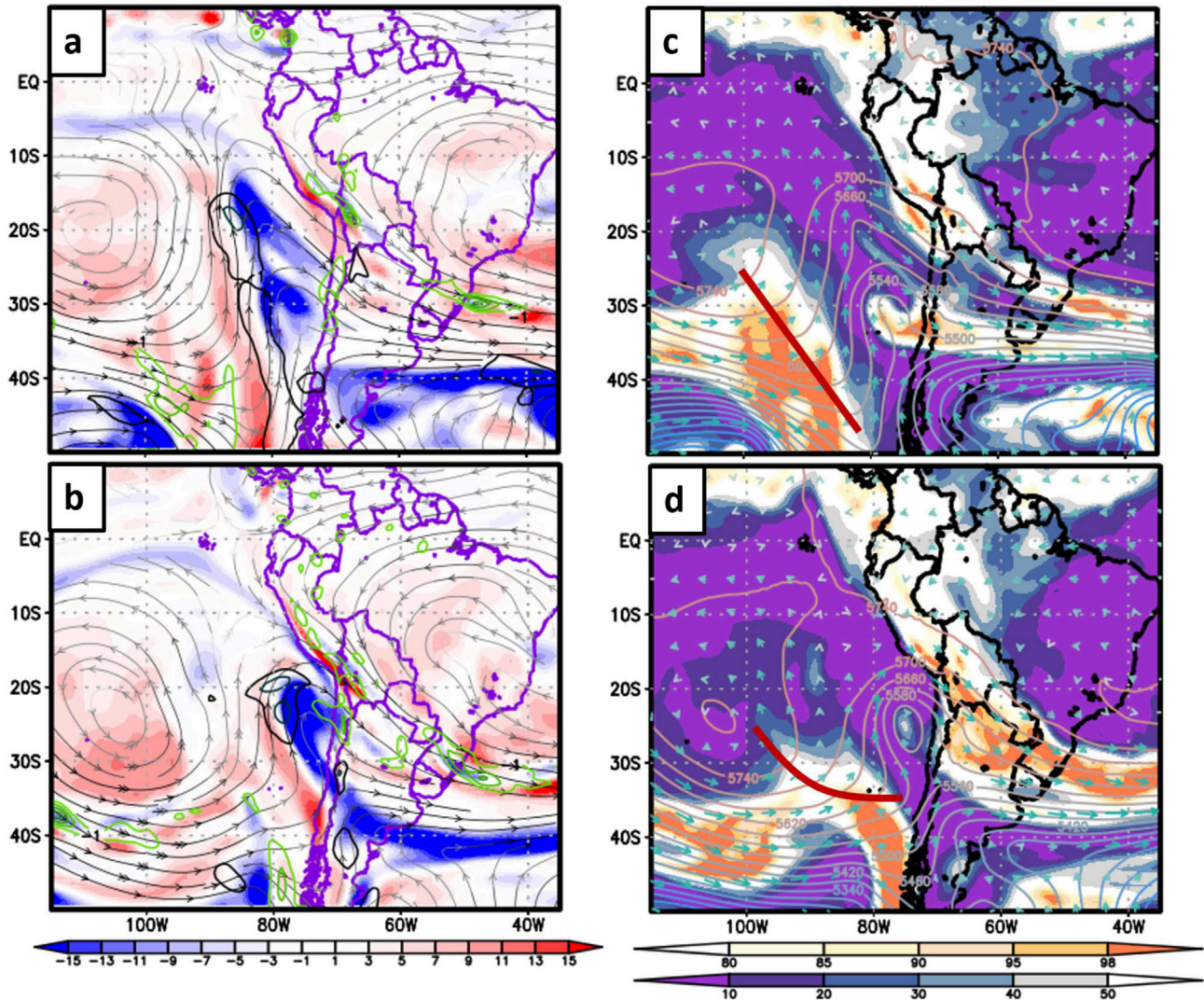
**Figura 3** - Análisis de campos horizontales de altura geopotencial (mvp, contornos) e isotacas (kt, sombreado) en 250 hPa (lado izquierdo). Líneas de corriente en 250 hPa y divergencia/convergencia ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , sombreado azul/naranja) en la capa 200-300 hPa (lado derecho). Secuencia de mapas en cada lado desde el día 24 de agosto a las 00Z hasta el día 25 a las 00Z.

5540 mvp, de núcleo  $24^{\circ} \text{ S}-75^{\circ} \text{ W}$  (Fig. 4). Al igual que en Godoy *et al.* (2011b), se encontró que la formación e intensificación de esta BS estuvo asociada a la advección horizontal de vorticidad anticiclónica cálida hacia el lado sur del eje de vaguada (no mostrado). Por otro lado, hacia el oeste de la vaguada en el nivel de 500 hPa, se identificaron núcleos máximos de movimiento vertical descendente mientras que delante de la vaguada fue evidente la predominancia de núcleos máximos de movimiento ascendente generando condiciones de mal tiempo en la SSP. Esta circulación cerrada fría en niveles medios, sugieren una invasión de aire frío sobre SSP que se complementa con valores de HR por encima del 90% en esta región (Fig. 4 (b,c,d)). Uno de los mecanismos que apoyaron la saturación del entorno sobre la SSP (Fig. 4 (c,d)) fue una circulación anticiclónica sobre el centro de Brasil que permitió el ingreso de humedad desde la Amazonía (Fig. 4 (a,

b)), condiciones similares a las halladas por Quispe (2017).

### 3.1.3. Efectos de la dinámica en SSP

Mediante un corte próximo al núcleo de la BS, se encontró, así como Quispe (2006), un núcleo máximo de vorticidad ciclónica en el nivel de 400 hPa durante la FO, reflejo de la presencia de un sistema frío que se intensificó hasta la FO. Esta BS a través de su giro ciclónico en la vertical junto a la predominancia de viento descendentes (este de su posición) logró alcanzar niveles por debajo de los 700 hPa durante la FO, niveles más bajos en comparación al evento de nevada del 2004 analizado por Quispe (2006). Los efectos de la dinámica se explican en el corte transversal de  $16^{\circ} \text{ S}$ . Aquí se observa la extensión vertical del JST hasta los 400 hPa, y la aproximación de un núcleo máximo de vorticidad ciclónica hacia la SSP durante la

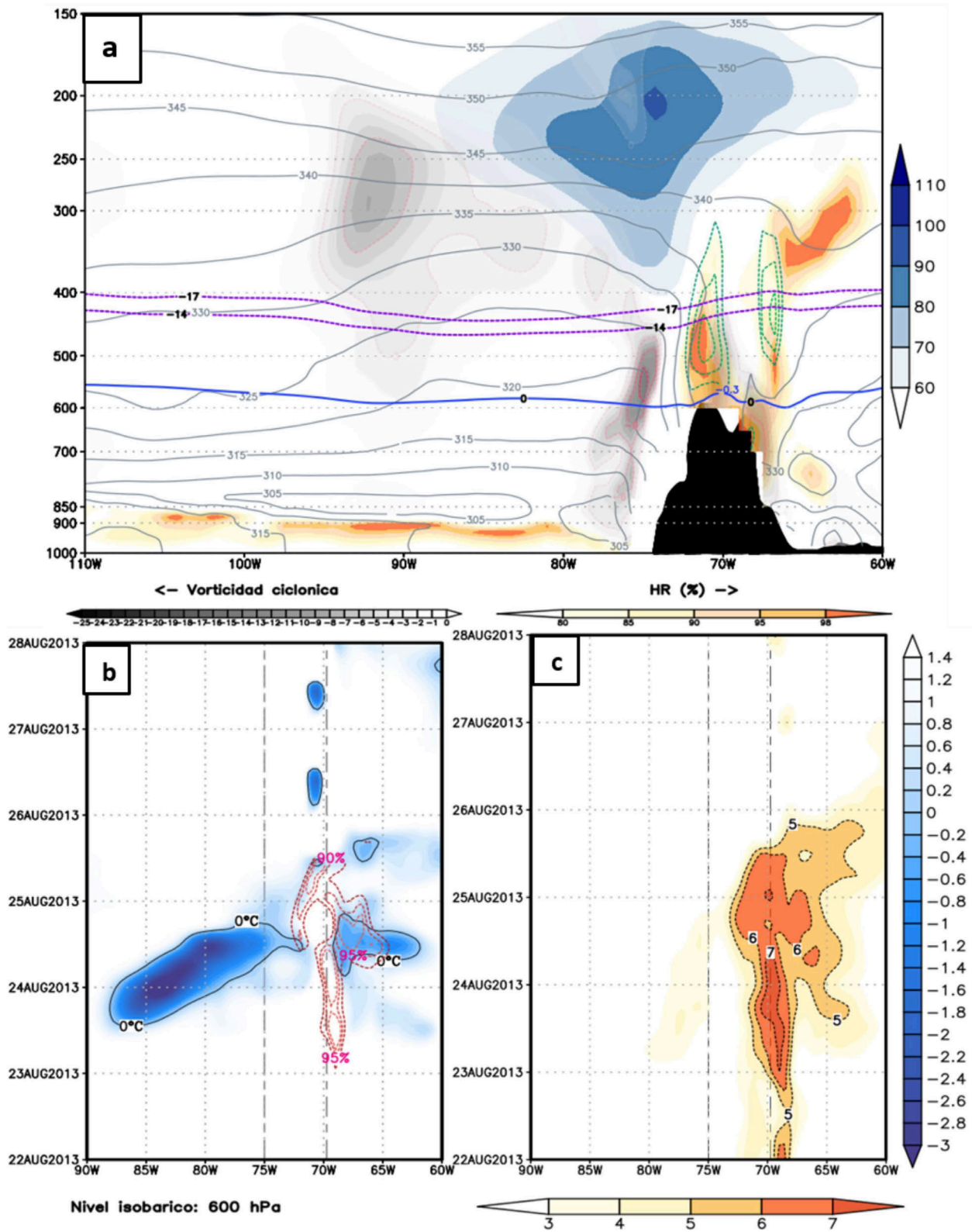


**Figura 4** - Análisis de líneas de corriente en 500 hPa (kt, escala de grises), vorticidad relativa en 500 hPa ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , sombreado) y velocidad vertical en 500/400 hPa (Pa/s, contornos negros y verdes desde 1 y  $-1$  Pa/s respectivamente, cada 1 Pa/s), lado izquierdo. Altura geopotencial (mnp, contornos) y humedad relativa (%), sombreado) en 500 hPa (lado derecho).

FO, aportando así advección de vorticidad negativa (AVN). Posiblemente, este aporte junto al aumento de divergencia en tropósfera alta promovió la presencia de núcleos máximos de movimiento vertical ascendente sobre la SSP durante la FO (Fig. 5a). Estos núcleos estuvieron traslapados con la región entre las isotermas de  $-14$  °C y  $-17$  °C, temperaturas ideales que favorecen el máximo crecimiento de los cristales de hielo. Estos resultados se ajustan a lo hallado por Perry (2006), donde estos mecanismos, promovidos por los efectos de la dinámica atmosférica, permiten una mayor eficiencia para generar nevadas intensas sobre las Montañas Apalaches en los Estados Unidos. Cabe mencionar la importancia de la proximidad de la isoterma de  $0$  °C sobre la SSP, permitiendo la conservación de la precipitación en su estado sólido hasta llegar a superficie (Fig. 5a).

Mediante el diagrama de Hovmöller latitudinal a  $16^{\circ}$  S, asociado la presencia de relación de mezcla, saturación y temperatura del entorno en el nivel de 600 hPa (Fig. 5b), fue posible identificar el impacto y resultado de la circulación sinóptica sobre la SSP. El acoplamiento de la saturación del entorno ( $>90\%$ ), así como los valores requeridos para la ocurrencia de precipitación ( $>5\text{g/kg}$ ) y las temperaturas próximas y por debajo de los  $0$  °C para dar origen a la caída de nieve en superficie se dieron principalmente desde el día 24 de agosto a las 12Z hasta el día 25 de agosto a las 06 Z aproximadamente (Fig. 5 (b,c)).

En niveles bajos, a través de los campos de MSLP se pudo destacar la presencia de una alta migratoria (AM) que tuvo un alcance hasta el flanco este del territorio boliviano, este sistema habría promovido la presencia de vientos convergentes sobre la selva central del Perú durante la



**Figura 5** - a) Corte de sección vertical en latitud 16° S durante la FO para temperatura potencial equivalente (Kelvin, contorno gris), vorticidad relativa ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , sombreado en grises), humedad relativa (%), isotacas (kt, sombreado azul), movimiento vertical (Pa/s, contornos punteados verdes), isoterma de 0 °C (contorno azul) e isotermas de -14 y -17 °C (contorno morado). b) Diagrama de Hovmöller de temperatura del aire (°C, sombreado) y humedad relativa superior a 90% (%), y c) Diagrama de Hovmöller para relación de mezcla en 600 hPa (g/kg, sombreado anaranjado). Líneas paralelas en gris indican sobre 70° W y 75° W indican el área de influencia de la SSP.



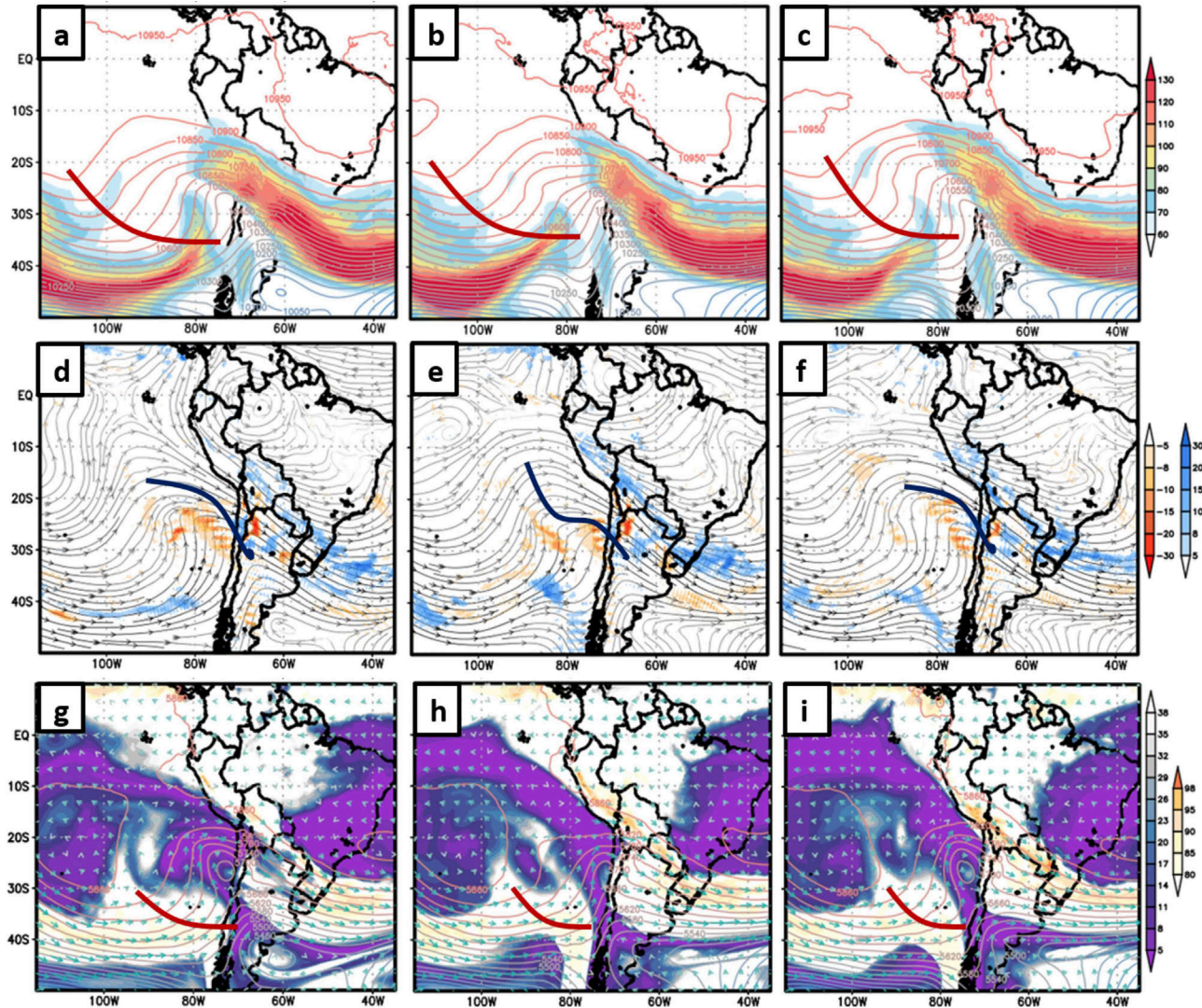
FO, complementándose con regiones divergentes en tropósfera alta y una alta saturación en niveles bajos, componentes ideales para la formación de sistemas convectivos (Bojorquez, 2021). La liberación de calor y humedad atmosférica de estos sistemas asociado con los flujos de líneas de corriente desde la amazonía hacia la SSP en tropósfera media posiblemente hayan promovido un ambiente con altas concentraciones de humedad sobre la SSP durante la FO (Bojorquez, 2021).

### 3.2. Desempeño de las predicciones del modelo Eta/SENAMHI

#### 3.2.1. Evaluación cualitativa de las predicciones de 96, 48 y 24 h antes de la FO

Se realizaron comparaciones de las 3 predicciones para las variables más influyentes que desencadenaron el acaecimiento de la nevada sobre SSP. La invasión obser-

vada del JST fue reflejada de forma más certera con la predicción de 24 h, mostrando su alcance hasta aproximadamente los 12° S durante la FO (Fig. 6 (a,b,c)). Las predicciones de 96 y 48 h no mostraron este grado de certeza, siendo esta última la que incluso prevé una vaguada, asociada a la incursión del JST, con una posición más hacia el este durante su movimiento hasta la FO, no reflejando así los efectos observados sobre la SSP. La región de divergencia observada sobre la SSP asociada a la incursión del JST durante la FO fue claramente subestimada con la predicción de 96 h, mientras que la predicción de 48 h mostró una clara subestimación de su magnitud (Fig. 6 (d,e,f)). A pesar que la predicción de 24 h muestra un JST en posición y magnitud semejante a lo observado, la región de divergencia simulada sobre esta región muestra una subestimación en magnitud y un posicionamiento más disperso que lo observado (Fig. 6f).



**Figura 6** - a-c) Similar a la Fig. 3 (a,b), pero válido para la FO. d-f) Similar a la Fig. 3 (c,d), pero válido para la FO. g-i) Similar a la Fig. 4 (c,d), pero válido para la FO. Cada columna corresponde a la predicción con 96, 48 y 24 h antes de la FO (de izquierda a derecha).

En niveles medios, la predicción de 96 y 24 h muestran la formación de la BS, mientras que con la predicción de 48 h no fue apreciable. Esto posiblemente al posicionamiento desviado de la vaguada que ha influenciado en su predicción en troposfera alta (Fig. 6 (g,h,i)). A pesar de la precisión en la formación de una circulación cerrada con la inicialización de 96 h, ésta no estuvo complementada con un ambiente saturado sobre la SSP. Una mejor predicción de los valores de HR sobre SSP fue evidenciado con la previsión de 24 h. La predicción de los campos espaciales de movimiento vertical no simuló de forma precisa los campos observados, siendo el núcleo subsidente asociado a la BS subestimado por las tres predicciones (no mostrado). Asimismo, la predicción de los núcleos de máximo movimiento vertical a través de los cortes en  $16^{\circ}$  S fue claramente mejor simulados con la predicción de 24 h. En estos cortes también se apreció una mejor predicción de la HR en términos de distribución sobre la SSP, debido a que la previsión de 48 h sólo se limitó a predecir un ambiente saturado sobre la vertiente oriental de la SSP. La predicción a través del diagrama de Hovmöller para los  $16^{\circ}$  S mostró un comportamiento similar. De esta forma, la predicción de 96 h dio indicios de ocurrencia de precipitación líquida; la predicción de 48 h, de precipitación sólida pero limitada en la vertiente oriental de la SSP; y la predicción de 24 h fue más precisa en prever lo observado (Fig. 7). Las predicciones de los campos de MSLP mostraron las características principales a escala sinóptica, simulando de forma muy próxima a lo observado la localización e intensidad del Anticiclón del Pacífico Sur y el AM. La previsión de las condiciones sinópticas que propiciaron el desarrollo del evento se resume a continuación (Tabla 2).

### 3.2.2. Evaluación cuantitativa de las predicciones de 96, 48 y 24 h antes de la FO

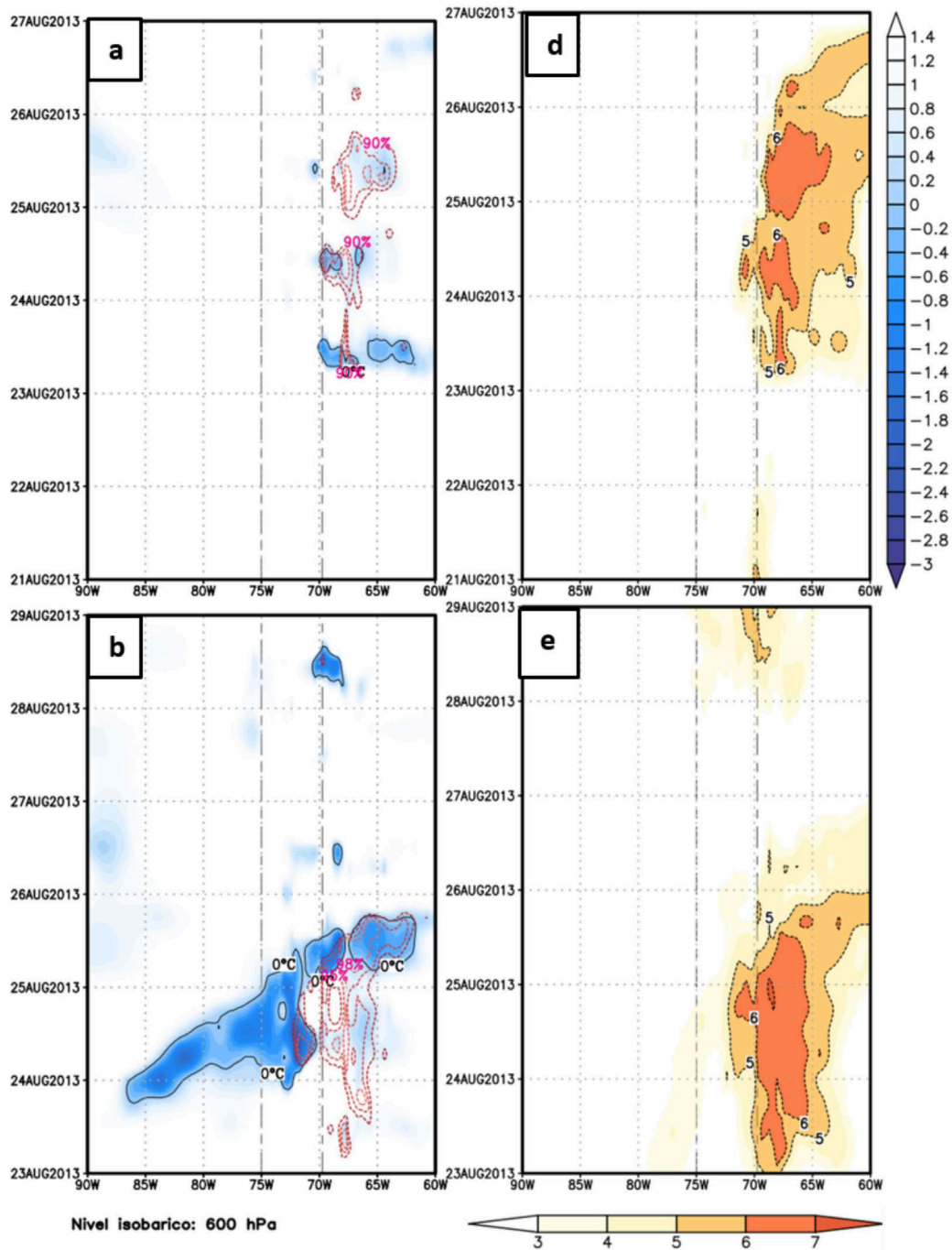
#### 3.2.2.1. Variación espacio-temporal del sesgo

Con la finalidad de delimitar el análisis de las predicciones generadas por el modelo y a la importancia del impacto de la dinámica durante la FO, la cuantificación de los errores para los dominios A1 y A2 se realizaron para la FO del evento. De esta forma, en tropósfera alta, se encontró que, desde el punto de vista sinóptico, la distribución del error medio para la magnitud del viento con la predicción de 96 h presentó máximos de sobrestimación y subestimación sobre los ejes de ambos JS observados, e incluso logrando subestimar con magnitudes cercanas a los 40 kt en la región de invasión tropical sobre latitudes de  $20^{\circ}$  S (Fig. 8a). Una menor precisión en la localización del JST en altura habría contribuido al aumento en los errores medios con la predicción de 48 h (Fig. 8b). La disminución de la sobrestimación y subestimación de la velocidad de viento en el dominio A1 fueron evidentes hasta alcanzar la previsión de 24 h (Fig. 8c). Sin embargo, a escala sinóptica, los campos previstos de divergencia en altura no compartieron esta evolución (no mostrado).

En tropósfera media, la disminución del sesgo de la HR sobre la región A1 con una menor previsión fue notoria (Fig. 8 (d,e,f)), y sobre la SSP la mejor predicción también fue obtenida con la inicialización de 24 h. En las Fig. 8 (g,h,i) se observó que el error de los vientos meridionales con la predicción de 96 h presentó la mayor sobrestimación que los otros casos, evidenciando su efecto en los campos de errores de HR sobre SSP. De esta forma, se podría mencionar que la mejor simulación de los vientos meridionales en 500 hPa sobre selva central durante la FO influyó directamente en la buena predicción de la saturación del entorno en la SSP. Por otro lado, así como

**Tabla 2** - Procesos meteorológicos previstos por el modelo Eta durante la FO del evento.

Dinámica o proceso meteorológico asociado durante la Fase de Ocurrencia (FO) del evento		Inicialización del modelo		
		96 h	48 h	24 h
		¿Previsto? Si/No		
Tropósfera alta	Ondulación y aproximación del eje de vaguada hacia la sierra sur	Si	No	Si
	Invasión tropical del JS sobre la sierra sur	Si	Si	Si
	Contundencia de la invasión tropical del JS sobre latitudes de $-15^{\circ}$ S	No	No	Si
Tropósfera media	Circulación ciclónica cerrada en $24^{\circ}$ S- $75^{\circ}$ W	Si	No	Si
	Posición e intensidad del núcleo subsidente circundante a la DANA	No	No	No
	Línea divergente sobre sierra sur	No	No	Si
	Saturación del entorno mayor a 95% en sierra sur	No	Si	Si
	Mov. vertical ascendente sobre sierra sur	Si	Si	Si
	Vientos del norte hacia sierra sur	No	Si	Si



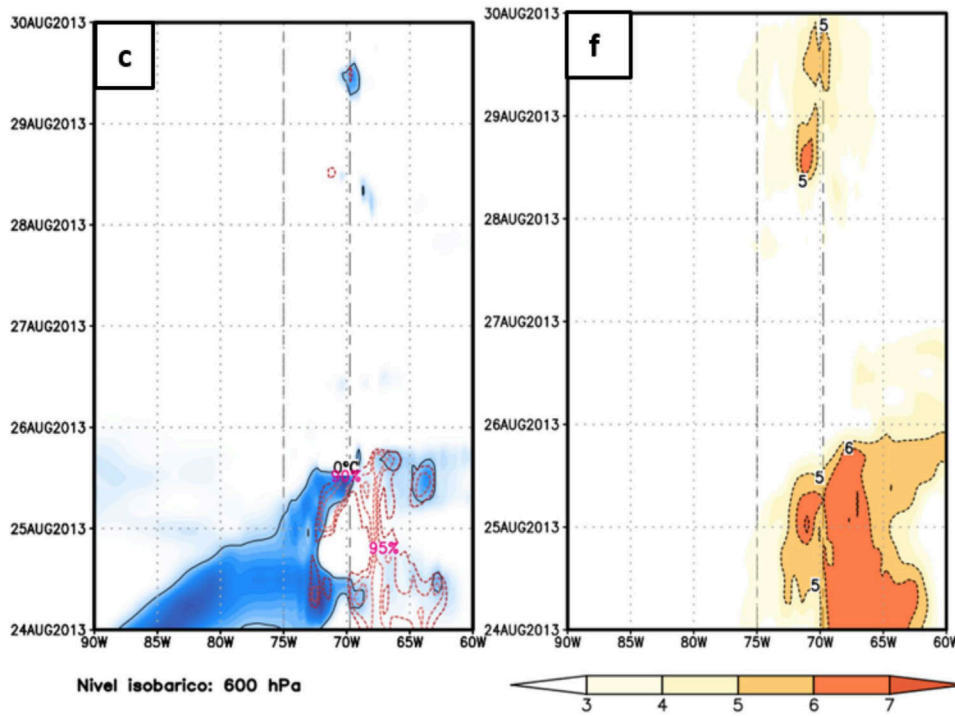
**Figura 7** - Diagrama de Hovmöller de temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ , sombreado azul), isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$  (contorno negro) y humedad relativa superior a 90% (% , contornos) en las predicciones de 96 h (a), 48 h (b) y 24 h (c) antes de la FO del evento. Diagrama de Hovmöller para relación de mezcla en 600 hPa (g/kg, sombreado anaranjado) en las predicciones de 96 h (d), 48 h (e) y 24 h (f) antes de la FO del evento. Líneas paralelas en gris indican sobre  $70^{\circ}\text{W}$  y  $75^{\circ}\text{W}$  indican el área de influencia de la SSP.

en 250 hPa, los mayores sesgos en HGT ocurrieron con la predicción de 48 h y distribuidos principalmente sobre la región A2.

### 3.2.2.2. Evolución de la SC en las regiones A1 y A2

Se calcularon los valores de SC en las regiones A1 y A2, donde una buena similitud entre los patrones espa-

ciales de los campos pronosticados y observados deben encontrarse con valores por encima de 0.8 (Töyrä et al., 2005). De esta forma, en tropósfera alta, así como en tropósfera media se encontró que al llegar a la FO los valores de SC en A2 disminuyen notoriamente con las predicciones de 96 y 48 h, alcanzando valores por debajo de 0.6 (Fig. 9 (a,b,c,d,e,f)). En estos mismos niveles, las vari-



**Figure 7 (cont.)** - Diagrama de Hovmöller de temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ , sombreado azul), isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$  (contorno negro) y humedad relativa superior a 90% (%), contornos) en las predicciones de 96 h (a), 48 h (b) y 24 h (c) antes de la FO del evento. Diagrama de Hovmöller para relación de mezcla en 600 hPa (g/kg, sombreado anaranjado) en las predicciones de 96 h (d), 48 h (e) y 24 h (f) antes de la FO del evento. Líneas paralelas en gris indican sobre  $70^{\circ}\text{W}$  y  $75^{\circ}\text{W}$  indican el área de influencia de la SSP.

ables dinámicas como divergencia, vorticidad y movimiento vertical presentaron los valores más bajos de SC ( $<0.4$ ), incluso con la predicción de 24 h en la región A2 logró ser menor a 0.8. Por otro lado, en niveles de tropósfera baja se encontraron que las variables como HR y divergencia en las regiones A1 y A2 alcanzaron valores muy bajos, con magnitudes de SC para la divergencia inferiores a 0.5 (Fig. 9 (g,h)). Estos resultados podrían tener una relación con lo encontrado por Seluchi y Chou (2001), donde indican que el bajo desempeño de las predicciones de temperatura y humedad en niveles bajos podrían deberse a la representación de los procesos superficiales en el modelo Eta/CPTEC. De esta forma, una reevaluación y un ajuste en la parametrización de los procesos superficiales del modelo Eta/SENAMHI podría generar una mayor precisión en la predicción de estas variables.

### 3.2.2.3. Evolución del RMSE en las regiones A1 y A2

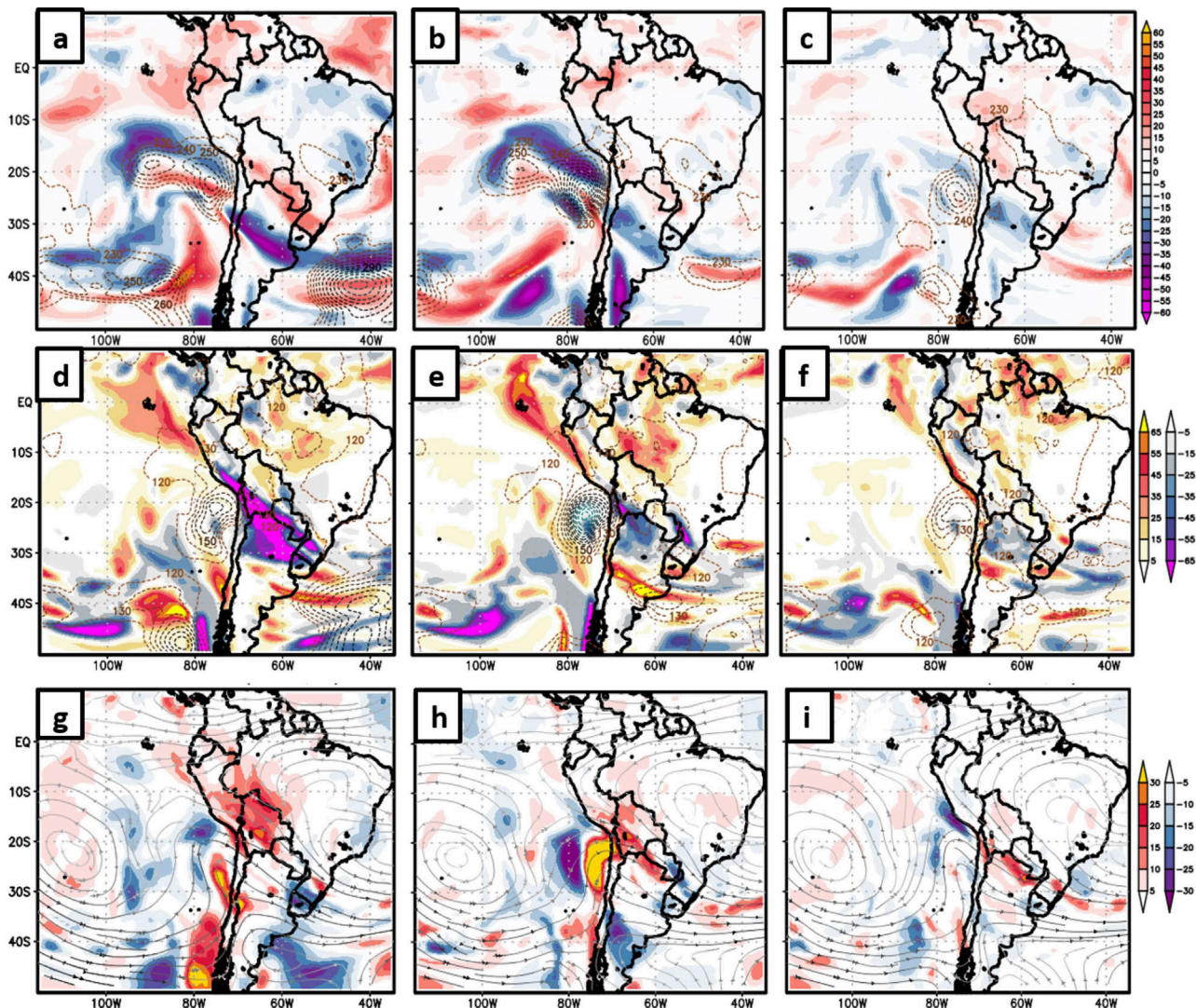
Regularmente, un menor error puede estar asociado con una predicción de menor antelación. Durante la predicción de este evento, se encontró que de acuerdo a la evolución del RMSE hasta llegar a la FO, los menores errores promedio sobre la región A1 y A2 fueron encontrados con la predicción de 24 h; y los mayores, con la predicción de 96 h (Fig. 10 (a,b,c,d,e,f)). Asimismo, mientras los errores en la tropósfera alta y media sobre la

región A2 fueron superiores a los de la región A1, en niveles bajos no se observó tal comportamiento. Esto debido principalmente a que la región A2 estuvo sujeta a un aumento en la magnitud de los parámetros meteorológicos producto de la invasión del JST.

Los resultados encontrados podrían explicarse por la interacción entre los distintos procesos atmosféricos, debido a que la evolución de la atmósfera es sensitiva a las condiciones iniciales, tratándose de un sistema altamente disipativo. Por otro lado, la extensión temporal de los fenómenos meteorológicos se considera que mantienen una proporcionalidad con las distintas escalas espaciales (Stull, 2000).

En general, la predicción a escala sinóptica mostró los patrones predominantes observados con las 3 inicializaciones evaluadas. Sin embargo, las variables dinámicas mostraron el menor grado de acierto (Tabla 3). Por otro lado, la predicción sobre la región A2 fue más exigente debido a la intensificación de los parámetros meteorológicos. En este sentido, se evidenció que la inicialización de 24 h mostró ser más precisa que las predicciones de 96 y 48 h (Tabla 4).

A pesar que la dinámica observada mostró la relación de la invasión del JST con el incremento de divergencia y la presencia de núcleos máximos de movimiento vertical ascendente durante la FO del evento en la SSP, esta investigación evidencia la limitación en la predicción



**Figura 8** - a-c) Sesgo  $\pm$  para isotacas (kt, sombr. rojo/morado) y altura geopotencial (mgs, cont.) en 250 hPa durante la FO. d-f) Sesgo  $\pm$  para humedad relativa (% sombr. rojo/morado) y altura geopotencial (mgs, cont.) en 500 hPa durante la FO. g-i) Sesgo  $\pm$  para viento meridional en 500 hPa (kt, sombr. rojo/morado) durante la FO. Cada columna corresponde a la predicción con 96, 48 y 24 h antes de la FO (de izquierda a derecha).

de las variables dinámicas como divergencia, vorticidad y movimiento vertical, sobre la región A1 y A2, a pesar que en niveles altos y medios la predicción con 24 h de antelación previo a la FO fue comparativamente mejor. Por lo tanto, las predicciones de estas variables a partir del modelo Eta/SENAMHI 32 km deben ser usadas con discreción para los pronósticos que se realizan de forma operativa. Este estudio provee un punto inicial de partida para revisar y analizar las parametrizaciones del modelo, principalmente las relacionadas a la estimación de la dirección y magnitud del viento, debido a que a partir de estas son estimados los cálculos de divergencia y vorticidad.

#### 4. Conclusiones

Este estudio tuvo como objetivo describir la evolución sinóptica y evaluar las predicciones del modelo

Eta/SENAMHI en la ocurrencia de un evento de nevada intensa acaecido sobre la SSP el 25 de agosto del 2013. En la descripción sinóptica observada del evento se analizó la dinámica más influyente para propiciar el evento: invasión del JST, sistema frío o BS en niveles medios y los efectos de la dinámica en la SSP. Mientras que las predicciones del modelo, con una antelación de 96, 48 y 24 h, fueron evaluadas cualitativamente frente al ERA-Interim, y cuantitativamente a partir de la cuantificación de los errores mediante parámetros estadísticos como sesgo, RMSE y SC.

De la dinámica observada del evento:

- La ocurrencia del evento estuvo asociado a la invasión tropical de JST acoplado a una vaguada profunda próxima a la SSP en tropósfera alta, así como a la formación de una BS en niveles medios y las condiciones de alta

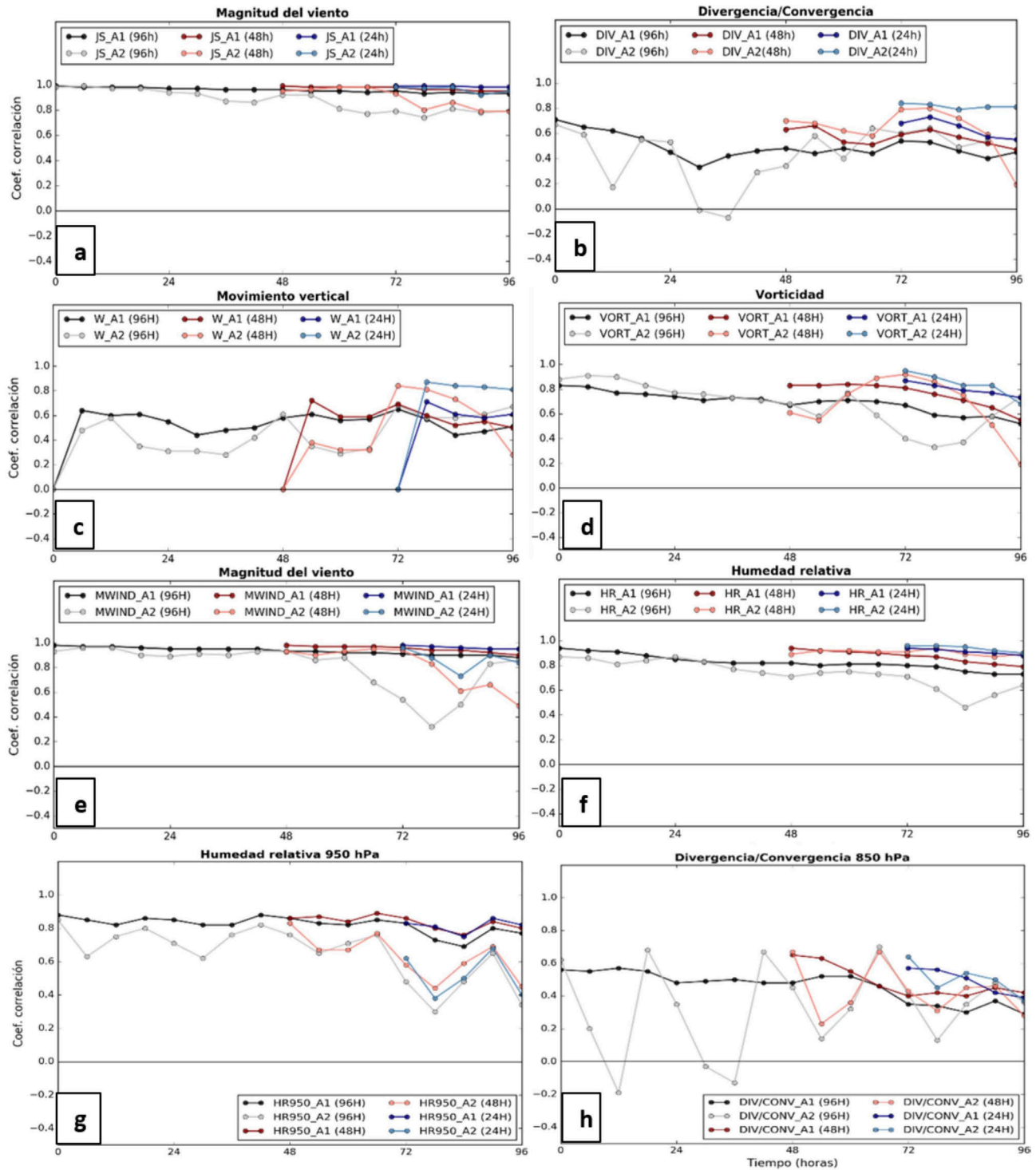
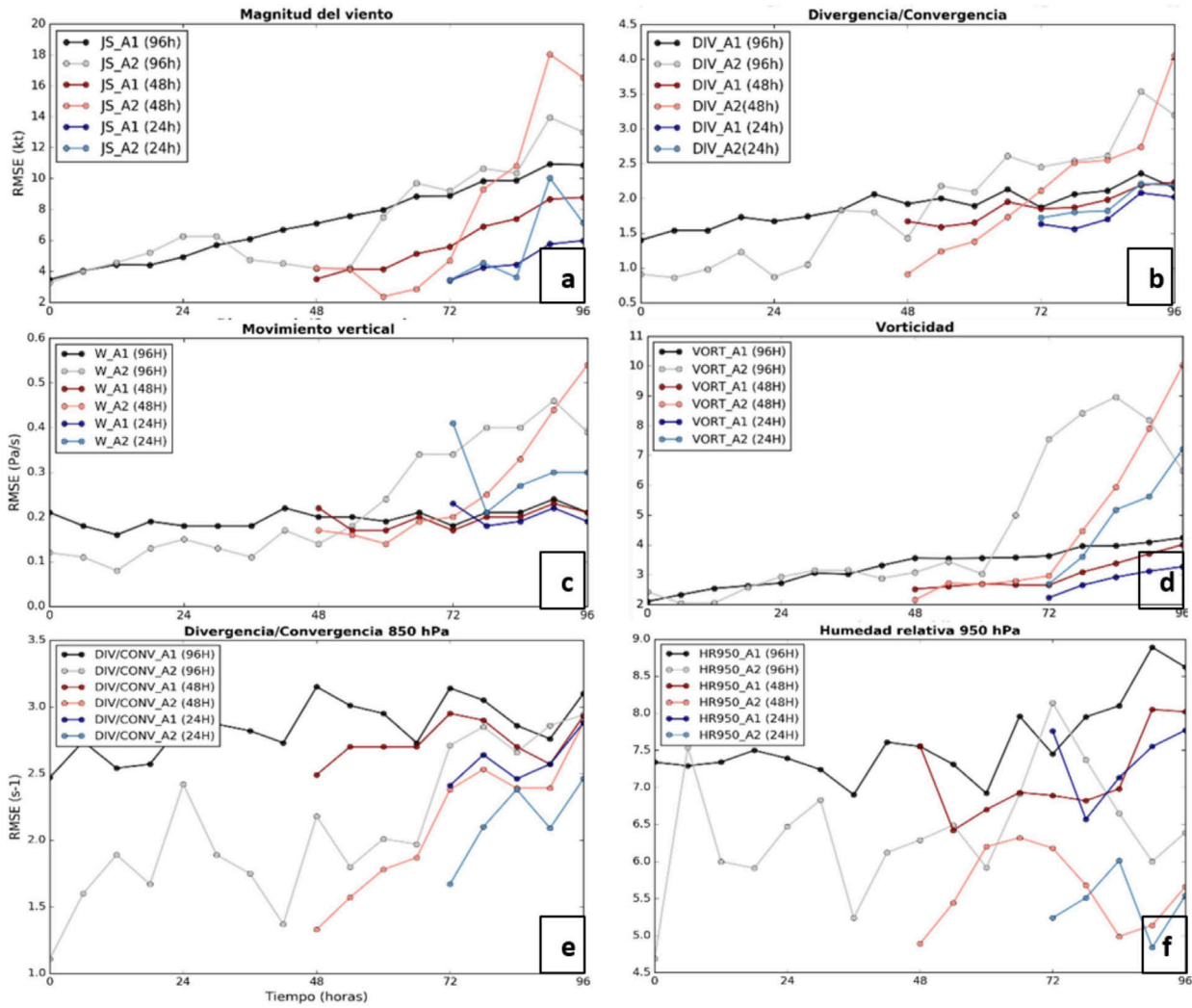


Figura 9 - Variación temporal de SC para magnitud del viento (a) y divergencia/convergencia (b) en tropósfera alta; movimiento vertical (c), vorticidad (d), magnitud del viento (e) y humedad relativa (f) en tropósfera media; humedad relativa (g) y divergencia/convergencia (h) en tropósfera baja.

saturación del entorno sobre la SSP debido al ingreso de flujos del norte.

De la evaluación de las predicciones del modelo Eta/SENAMHI durante este evento:

- Uno de los efectos sinópticos en el evento de nevada fue la presencia de una región de divergencia sobre la SSP en niveles altos que permitió sostener núcleos máximos de movimiento vertical durante la FO del evento, acoplándose con temperaturas de  $-14$  a



**Figura 10** - Variación temporal de RMSE para magnitud del viento (a) y divergencia/convergencia (b) en tropósfera alta; movimiento vertical (c) y vorticidad (d) en tropósfera media; divergencia/convergencia (g) y humedad relativa (h) en tropósfera baja.

**Tabla 3** - Grado de simulación de las variables troposféricas para cada caso de previsión en la region A1.

Variables		96 h	48 h	24 h
Tropósfera alta	Mag. Viento	Buena	Buena	Buena
	Div./Conv.	Muy limitada	Muy limitada	Muy limitada
	HGT	Buena	Buena	Buena
Tropósfera media	Vort.	Limitada	Limitada	Limitada
	Mag. Viento	Buena	Buena	Buena
	Mov. Vertical	Limitada	Limitada	Limitada
	HR	Limitada	Buena	Buena
	HGT	Buena	Buena	Buena
Tropósfera baja	MSLP	Buena	Buena	Buena
	HGT 850 hPa	Buena	Buena	Buena
	Div./Conv. 850 hPa	Muy limitada	Muy limitada	Muy limitada
	Viento meridional 925 hPa	Buena	Buena	Buena
	HR 950 hPa	Buena	Buena	Buena

**Tabla 4** - Grado de simulación de las variables troposféricas para cada caso de previsión en la región A2.

Variables		96 h	48 h	24 h
Tropósfera alta	Mag. Viento	Limitada	Limitada	Buena
	Div./Conv.	Muy limitada	Muy limitada	Buena
	HGT	Limitada	Limitada	Buena
Tropósfera media	Vort.	Muy limitada	Limitada	Limitada
	Mag. Viento	Buena	Muy limitada	Buena
	Mov. Vertical	Muy limitada	Muy limitada	Buena
	HR	Muy limitada	Buena	Buena
	HGT	Limitada	Limitada	Buena
Tropósfera baja	MSLP	Buena	Buena	Buena
	HGT 850 hPa	Buena	Buena	Buena
	Div./Conv. 850 hPa	Muy limitada	Muy limitada	Muy limitada
	Viento. Meridional 925 hPa	Buena	Buena	Buena
	HR 950 hPa	Muy limitada	Muy limitad	Muy limitada

-17 °C, favoreciendo una mayor eficiencia para desencadenar el acaecimiento de la nevada intensa sobre la SSP.

- De las tres predicciones del modelo, la previsión de 24 h logra reproducir con acierto la invasión del JS sobre latitudes tropicales en la SSP, permitiendo así una mejor aproximación de los campos horizontales de divergencia y movimiento vertical, mientras que la previsión de 48 h mostró ser menos precisa en la localización de la vaguada en altura y también en la circulación cerrada durante la FO del evento.
- A pesar de la limitación en la previsión de 48 h, esta mostró indicios para la ocurrencia de nevada en la SSP a través del diagrama de Hovmöller asociado a la presencia de aire frío, humedad relativa y relación de mezcla.

De la evaluación cuantitativa de las predicciones del modelo Eta/SENAMHI durante este evento:

- En niveles altos y medios, las predicciones del modelo Eta mostraron un mayor error en A2 que en la región A1, producto de la intensificación de los parámetros meteorológicos en esta región.
- De las tres predicciones del modelo evaluadas, la inicialización de 48 h antes de la FO registró los mayores valores de RMSE y distribuidos principalmente en la región A2. Consistente con ser la predicción que mostró un menor acierto en la localización del sistema frío en tropósfera alta y media.
- A pesar del grado de acierto de los campos previstos de divergencia y movimiento vertical en niveles altos y medios, se obtuvo una mejor simulación de la invasión tropical del JS en A2 con la previsión de 24 h, así como una buena predicción de la HR en niveles medios, siendo ésta la previsión más confiable para prever la ocurrencia de la nevada.

- Si bien existen fuentes de información que estiman la caída de nieve, estos conjuntos de datos presentan algunas limitaciones o deficiencias; por lo tanto, se recomienda implementar un sistema de medición de nevadas bajo la red de estaciones del SENAMHI con el fin de contar con una densa red de observaciones para realizar las verificaciones de caída de nieve y evaluar también la incertidumbre de distintas fuentes de información que la estiman.

Los hallazgos de esta investigación son de gran relevancia para la meteorología en Sudamérica donde el uso creciente de los modelos de PNT sobre los Andes y su evaluación es fundamental debido a la baja densidad de información meteorológica observada en superficie.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a Nelson Quispe, Alan Llacza y colaboradores de la Subdirección de Predicción Meteorológica del SENAMHI por la orientación y motivación en los inicios del desarrollo de esta investigación, así como permitírnos acceder a la información grillada del modelo Eta/SENAMHI 32 km. Finalmente, agradecemos la valiosa orientación por parte de los revisores durante el proceso de sumisión de esta investigación.

### Referencias

- AUER, A.H.; WHITE, J.M. The combined role of kinematics, thermodynamics and cloud physics associated with heavy snowfall episodes. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 60, n. 1, p. 500-507, 1982.
- AVALOS, G.J. Evaluación del Modelo Eta/SENAMHI en la previsión de la precipitación durante los periodos lluviosos 2002 y 2003. **Revista Peruana Geo-Amosférica RPGA**, v. 1, n. 1, p. 108-124, 2009.



- BOJORQUEZ, M. **Evaluación del Modelo Eta/SENAMHI en la Predicción de Nevadas Regionales en la Sierra Sur del Perú.** Tesis Ing. Meteorólogo, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 2021.
- CHOU, S.C.; BUSTAMANTE, J.F.; GOMES, J.L. Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, n. 4, p. 537-555, 2005.
- DEE, D.P.; UPPALA, S.M.; SIMMONS, A.J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; *et al.* The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.
- FUENZALIDA, H.A.; SÁNCHEZ, R.; GARREAUD, R.D. A climatology of cutoff lows in the Southern Hemisphere. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 110, n. 18, p. 1-10, 2005.
- GODOY, A.A.; CAMPETELLA, C.M.; POSSIA, N.E. Un caso de baja segregada en niveles altos en el sur de Sudamérica: descripción del ciclo de vida y su relación con la precipitación. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 3, p. 491-502, 2011a.
- GODOY, A.A.; POSSIA, N.E.; CAMPETELLA, C.M.; GARCIA-SKABAR, Y. A cut-off low in southern South America: dynamic and thermodynamic processes. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 503-514, 2011b.
- HALL, D.K.; RIGGS, G.A. **MODIS/Aqua Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid. Version 6, 2002-2015.** doi, 2016.
- HUERTA, A.; LAVADO-CASIMIRO, W. Trends and variability of precipitation extremes in the Peruvian Altiplano (1971-2013). **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 1, p. 1-16, 2020.
- INDECI - Instituto Nacional de Defensa Civil. **Compendio Estadístico del INDECI.** INDECI: Lima, 252 p., 2013.
- IMFELD, N.; SCHULLER, C.B.; MARROU, K.M.; JAUQUES-COOPER, M.; SEDLMEIER, K.; *et al.* Summertime precipitation deficits in the southern Peruvian highlands since 1964. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 11, p. 4497-4513, 2019.
- JIMÉNEZ, M. **Validación de la Capacidad del Modelo WRF "Weather Research and Forecasting" Para Pronosticar Lluvia Intensa, Usando el Método Orientado a Objetos y Tablas de Contingencia.** Disertación de Tesis M.Sc. en Ciencias Meteorológicas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2014.
- JUNQUAS, C.; TAKAHASHI, K.; CONDOM, T.; ESPINOZA, J.C.; CHAVEZ, S.; *et al.* Understanding the influence of orography over the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the central Andes. **Climate Dynamics**, v. 50, n. 11, p. 3995-4017, 2017.
- KATRAGKOU, E.; GARCÍA-DÍEZ, M.; VAUTARD, R.; SOBOLOWSKIM, S.; ZANIS, P.; *et al.* Regional climate hindcast simulations within EURO-CORDEX: evaluation of a WRF multi-physics ensemble. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 8, n. 3, p. 603-618, 2015.
- MATSUEDA, M.; NAKAZAWA, T. Early warning products for severe weather events derived from operational medium-range ensemble forecasts. **Meteorology Applied**, v. 22, n. 2, p. 213-222, 2015.
- MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, v. 44, n. 1-4, p. 195-202, 1984.
- MESTANZA, F. **Posibles Causas de Ocurrencia de Nevadas en la Sierra Sur Peruana Durante Julio y Agosto de 1992.** Tesis Ing. Meteorólogo, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 1994.
- MÜLLER, O.V.; LOVINO, M.A.; BERBERY, E.H. Evaluation of WRF Model forecasts and their use for hydroclimate monitoring over Southern South America. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 31, n. 3, p. 1001-1015, 2016.
- PERRY, L.B. **Synoptic Climatology of Northwest Flow Snowfall in the Southern Appalachians.** Ph.D. Thesis in Climatology, University of North Carolina at Chapel Hill, North Carolina, 2006.
- PERRY, L.B.; SEIMON, A.; ANDRADE-FLORES, M.; ENDRIES, J.; YUTER, S.; *et al.* Characteristics of precipitating storms in glacierized tropical Andean Cordilleras of Peru and Bolivia. **Annals of the American Association of Geographers**, v. 107, n. 2, p. 309-322, 2017.
- PINHEIRO, H.R.; HODGES, K.I.; GAN, M.A.; FERREIRA, N.J. A new perspective of the climatological features of upper level cutoff lows in the Southern Hemisphere. **Climate Dynamics**, v. 48, n. 1-2, p. 541-559, 2017.
- PINHEIRO, H.R.; HODGES, K.I.; GAN, M.A. Sensitivity of identifying cutoff lows in the Southern Hemisphere using multiple criteria: implications for numbers, seasonality and intensity. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 11, p. 6699-6713, 2019.
- POPOVIĆ J. **ETA Model in Weather Forecast.** Master Thesis, KTH Computer Science and Communication, p. 55, 2006.
- POVEDA, G.; ESPINOZA, J.C.; ZULUAGA, M.D.; SOLMAN, S.A.; GARREAUD, R.; *et al.* High impact weather events in the Andes. **Frontiers in Earth Science**, v. 8, n. 162, p. 165-196, 2020.
- QUISPE, N.; ÁVALOS, G. Intense snowstorm in the southern mountains of Peru associated to the incursion of cut-off low-pressure systems at upper level. **Proceedings of 8 ISDHMO**, Foz do Iguaçu. INPE: São José dos Campos, p. 1945-1948, 2006.
- QUISPE, N. **Evaluación Climática de la Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA's) Sobre Sudamérica y Océanos Adyacentes y Estudio de un Caso en el Pacífico Oriental.** Tesis MSc. en Meteorología Aplicada, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 2014.
- QUISPE, N.; ALIAGA-NESTARES, V.; RODRIGUEZ-ZIMMERMANN, D.; BONSHOMS, M.; LOAYZA, R.; *et al.* Cut off low over the southeastern Pacific Ocean: A case study. **Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science**, v. 71, n. 1, p. 17-29, 2021.
- QUISPE, K. **Patrones Sinópticos de una DANA Asociados a la Ocurrencia de Nevadas en la Sierra Central y Sur del Perú.** Tesis Ing. Meteorólogo, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 2017.

- REYERS, M.; SHAO, Y. Cut off lows off the coast of the Atacama Desert under present day conditions and in the last glacial maximum. **Global and Planetary Change**, v. 181, 102983, p. 102-983, 2019.
- RÍOS, R.A.; TADDIA, A.; GRUNWALDT, A.; JONES, R.; STREETER, R. **Climate Change Projections in Latin America and the Caribbean**. Banco Interamericano para el Desarrollo: Washington D.C., 2016.
- SELUCHI, M.E.; CHOU, S.C. Intercambio de masas de aire entre latitudes tropicales y extra tropicales de Sudamérica: Validación del modelo regional. **Climanálise**, v. 14, n. 1, p. 1-26, 1999.
- SELUCHI, M.E.; CHOU, S.C. Evaluation of two Eta Model versions for weather forecast over South America. **Geofísica Internacional**, v. 40, n. 3, p. 219-237, 2001.
- SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA - SENAMHI. **Actualización del Estudio de Frecuencia de Nevadas en el Perú**. Disponible en <https://www.gob.pe/institucion/senamhi/informes-publicaciones/1623260-actualizacion-estudio-de-frecuencia-de-nevadas-en-el-peru>, acceso en: 4 feb. 2021.
- STULL, R. **Meteorology for Scientists and Engineers**. Second Edition. Pacific Grove: Brooks/Cole Thomson Learning, 2000.
- TANESSONG, R.S.; VONDOU, D.A.; DJOMOU, Z.Y.; IGRI, P.M. WRF high resolution simulation of an extreme rainfall event over Douala (Cameroon): A case study. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 3, n. 3, p. 927-942, 2017.
- TÖYRÄ, J.; PIETRONIRO, A.; BONSAI, B. Evaluation of GCM simulated climate over the Canadian Prairie provinces. **Canadian Water Resources Journal**, v. 30, n. 3, p. 245-262, 2005.
- VUILLE, M.; AMMANN, C. Regional snowfall patterns in the high arid Andes. **Climatic Change**, v. 36, n. 3-4, p. 413-423, 1997.
- WYSZOGRODZKI, A.A.; LIU, Y.; NEIL, J.; CHILDS, P.; ZHANG, Y.; *et al.* Analysis of the surface temperature and wind forecast errors of the NCAR-AirDat operational CONUS 4-km WRF forecasting system. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 122, n. 3, p. 125-43, 2013.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.