

## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO WRF A LAS CONDICIONES INICIALES PARA EL MODELADO DE PRECIPITACIONES EN LA REGIÓN DE LOS ANDES CENTRALES

Pascual Flores, Romina M.<sup>1,2</sup>; Allende, David G.<sup>1</sup>; Gärtner, Nadine<sup>1,3</sup>; Bolaño-Ortiz, Tomás R.<sup>1,4</sup>; Ruggeri, María F.<sup>1,4</sup>; Puliafito, Salvador E.<sup>1,4</sup> y Lakkis, Susan G.<sup>5,6</sup>.

1: Grupo de Estudios de la Atmósfera y el Ambiente  
Facultad Regional Mendoza  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rodríguez 273, Mendoza-Argentina (M5502AJE)  
e-mail: rominapascual@gmail.com, <http://www.frm.utn.edu.ar/geaa>

2: Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica

3: TU Dresden, Facultad de Ciencias Ambientales, Instituto de Ciencias Hídricas

4: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

5: Facultad de Ciencias Agrarias, Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA), Cap. Gral. Ramón Freire 183, (C1426AVC), Buenos Aires, Argentina.

6: Unidad de Investigación y Desarrollo de las Ingenierías (UIDI), Facultad Regional Buenos Aires (FRBA), Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Argentina

**Resumen.** *La Región de los Andes Centrales, se vería considerablemente afectada por el cambio climático, el cual provocaría una alteración de las relaciones entre precipitaciones líquidas, modificaciones en la distribución estacional de los derrames de los ríos andinos y adelantamientos en los picos de escorrentía. A causa de los posibles impactos socioeconómicos en la región existe una necesidad de diseñar e implementar estrategias de adaptación para estos cambios previstos. El principal objetivo de este estudio es evaluar la estrategia de modelado a fin de optimizar una configuración que permita predecir adecuadamente la precipitación líquida en los Andes Centrales. Con este propósito este trabajo se concentró en realizar un análisis de sensibilidad respecto a la inclusión de campos constantes y variables de Temperatura de la Superficie del Mar (SST, por sus siglas en inglés).*

*El estudio por medio de un análisis categórico revela que los resultados mejoran levemente actualizando diariamente la SST en las simulaciones de WRF. Asimismo, se trata de una aproximación más realista que la obtenida con la configuración por defecto de WRF, aunque el impacto de su uso como forzante del modelo es variable en el dominio analizado.*

**Palabras clave:** precipitaciones, WRF, análisis de sensibilidad, SST, Andes Centrales.

## 1. INTRODUCCIÓN

La cordillera de Los Andes es una cadena montañosa de América del Sur comprendida entre los 11° de latitud N y los 55° de latitud S. Tiene una longitud de 7.500 km y un ancho en el orden de los 250 km, siendo su altura media entre Argentina y Chile (región de estudio) los 4.000 m, con su punto más alto en el Aconcagua a 6.961 m.

El clima de la región central se define por los sistemas meteorológicos pasajeros que se encuentran dentro del flujo de aire provenientes del oeste y por el terreno complejo. Se ha demostrado que los Andes afectan el clima a escala regional mediante bloqueo de flujo e influye en el patrón de viento regional y la precipitación [1], [2]. La temporada de verano en los Andes Centrales, especialmente hacia el sector argentino, experimenta eventos de precipitaciones de mayor abundancia con respecto al resto del año. Debido al impacto regional de los mismos, es fundamental una caracterización apropiada de la influencia de la precipitación en la región [3]–[5].

La física y la dinámica de este tipo de eventos pueden entenderse por medio de la ayuda de modelos de mesoescala. Una correcta predicción requiere una adecuada representación de las condiciones atmosféricas, su desarrollo y evolución. Debido a que la resolución gruesa de los modelos globales ( $\approx 100$  km) no es apropiada para determinar impactos a nivel regional, una de las técnicas necesarias para obtener información relevante en estudios de alta resolución es a través del *downscaling dinámico* [6]. En tal sentido, el modelo de predicción numérica WRF utiliza datos derivados de modelos globales para conducir estudios en áreas de alta resolución [7]. En dichas simulaciones, la parametrización de fenómenos de subgrilla y configuración inicial del modelo es uno de los problemas más relevantes en WRF, ya que el usuario posee gran flexibilidad en la elección de las diferentes opciones disponibles. Particularmente, esta elección depende del tipo de aplicación, el área de estudio y la resolución temporal y espacial [8].

Observaciones de la naturaleza de la interacción atmósfera-océano sobre frentes oceánicos han revelado que la Temperatura de la Superficie del Mar (SST, por sus siglas en inglés) es un parámetro importante para la estimación de flujos de calor y sistemas de vientos locales en zonas costeras con influencia en la humedad y precipitaciones [7–10]. El trabajo intenta significar un avance respecto de la influencia de la SST en un modelo de mesoescala, lo cual resulta complicado e interesante de implementar porque es el nudo de los modelos acoplados atmósfera-océano. Si bien la validación de precipitaciones requiere gran cantidad de información disponible y consideraciones sobre la evolución meteorológica del evento analizado se pretende alcanzar una aproximación sobre la configuración ideal de un sistema de modelado a través de un análisis cualitativo.

En tal sentido, la motivación del presente estudio es evaluar la sensibilidad del modelo WRF para simular precipitaciones en los Andes Centrales, a dos opciones de inclusión de SST: a) en una configuración por defecto del modelo, donde SST es un campo constante en el

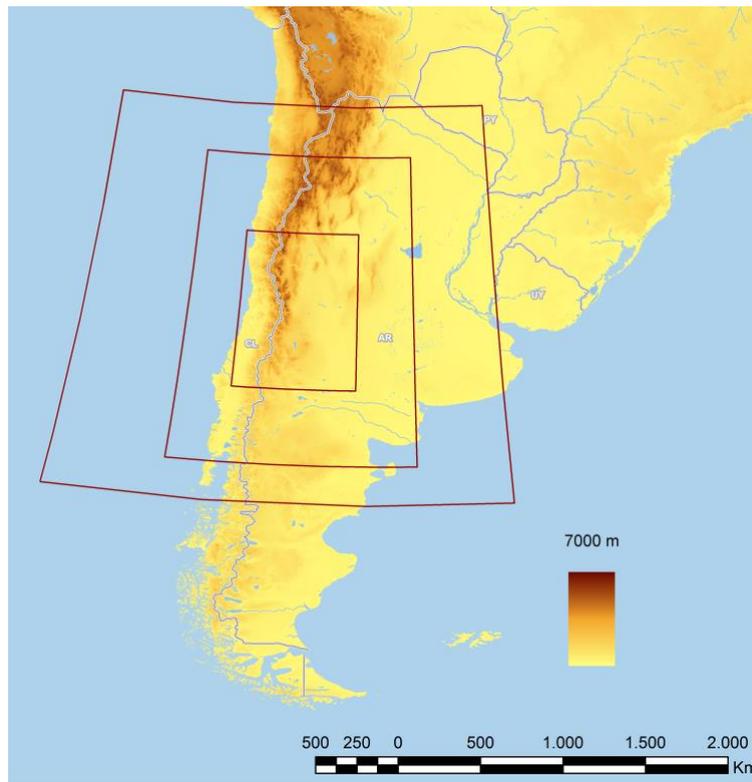
momento inicial de la simulación, en resolución espacial de 1 grado de latitud y longitud que se corresponde con el valor medio anual [7] y b) la utilización de valores de SST actualizados diariamente, obtenidas con satélite, con resolución espacial 1/12 grados procedentes del análisis global NCEP SST.

Asimismo, se contrastaron ambas configuraciones con mediciones de diferentes estaciones meteorológicas ubicadas dentro del dominio, con el objeto de verificar el desempeño del modelo al simular los eventos seleccionados.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Configuración local de WRF: dominio de modelado**

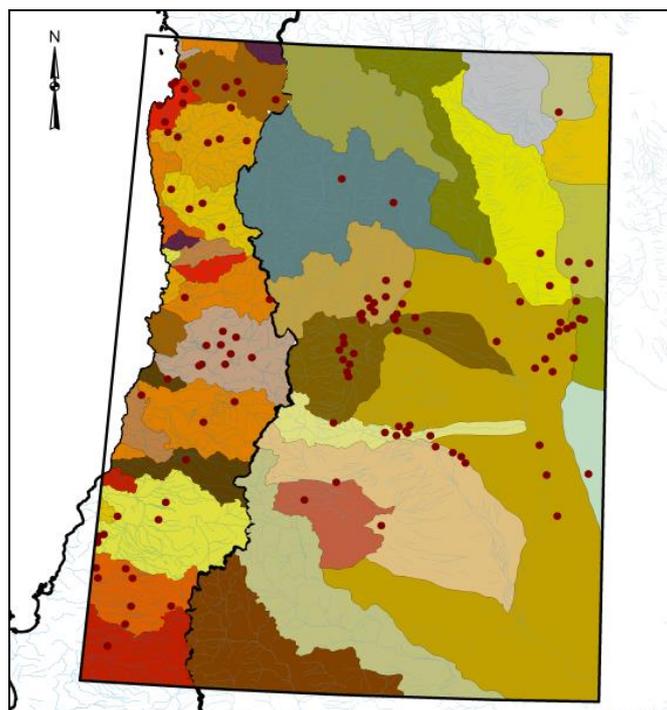
Para la simulación de las precipitaciones se utilizó la versión 3.5 del modelo regional acoplado Weather Research and Forecasting (WRF, [7]). WRF fue configurado con tres dominios anidados tal como se ve en la Figura 1. Los dominios de modelado comprenden la parte central de Argentina y Chile, con una resolución espacial de 36, 12, 4 km respectivamente; cuya coordenada vertical es de 50 niveles, hasta una altura de 50 hPa, centrados en Latitud  $34^{\circ} 4'33.60''S$  y Longitud  $68^{\circ}32'38.40''O$ . El tamaño y ubicación de los dominios fue seleccionado de tal manera de incluir la región de los Andes Centrales con las principales cuencas hidrográficas que forman parte de ésta y, además, parte del Océano Pacífico hacia el oeste para estimar la influencia del mismo sobre la humedad y precipitaciones regionales.



**Figura 1.** Dominios de modelado definidos para la simulación de precipitaciones con WRF. La escala de colores indica las elevaciones de terreno sobre el nivel del mar.

El dominio más pequeño y de mayor resolución, en el cual se ajusta el modelo (Ver Figura 1), abarca el Sur de las provincias de San Juan y La Rioja, el Oeste de San Luis, Noroeste de La Pampa, Norte de Neuquén y la provincia de Mendoza en su totalidad respecto a la Argentina. En cuanto Chile, el mismo incluye IV Región de Coquimbo, V Región de Valparaíso, Región Metropolitana, VI Región de O'Higgins y VII Región de Maule.

Entre las cuencas Argentinas de mayor importancia podemos mencionar la Cuenca del Río Atuel, Cuenca del Río Desaguadero y Cuenca del Río Diamante. En Chile las que se destacan son la Cuenca Río Bio-bio, Cuenca Río Itata, Cuenca Río Maule, Cuenca Río Maipo y Cuenca Río Aconcagua (Ver Figura 2).



**Figura 2.** Cuencas y estaciones meteorológicas de precipitación (puntos rojos) ubicadas en el dominio de estudio.

## 2.2. Simulaciones con WRF

Las diferentes configuraciones del modelo fueron probadas durante 8 distintas quincenas de los meses de enero y febrero en los años 2013 y 2014 cuyas fechas se detallan en la Tabla 1.

La inicialización meteorológica y condiciones de contorno del modelo se realizó con datos globales de NCEP Global Final Analysis of GFS [13] con una resolución de 0,5 grados, y actualizaciones cada 6 horas. La descripción del terreno complejo del oeste de Argentina se incluyó con el uso de datos de elevación digitales Shuttle Radar Topography Mission (SRTM3) [14] con una resolución aproximada de 90 m y que contiene una mejor descripción del área de estudio que la configuración por defecto. Asimismo, la clasificación de uso y cobertura del suelo por defecto en WRF fue actualizada por una adaptación de los datos del mapa de la European Space Agency (ESA) GLOBCOVER 2009 [15] con resolución de 300 m, combinados con datos de luces permanentes del Operational Linescan System del programa DMSP - OLS [16], para una mejor identificación de los centros urbanos, áreas cultivadas y zonas montañosas.

QUINCENA	COMIENZO	FIN
QA	01/01/2014	14/01/2014
QB	15/01/2014	31/01/2014
QC	01/02/2014	14/02/2014
QD	15/02/2014	27/02/2014
QE	01/01/2013	14/01/2013
QF	15/01/2013	30/01/2013
QG	01/02/2013	14/02/2013
QH	15/02/2013	21/02/2013

**Tabla 1.** Quincenas simuladas con WRF para analizar precipitaciones acumuladas.

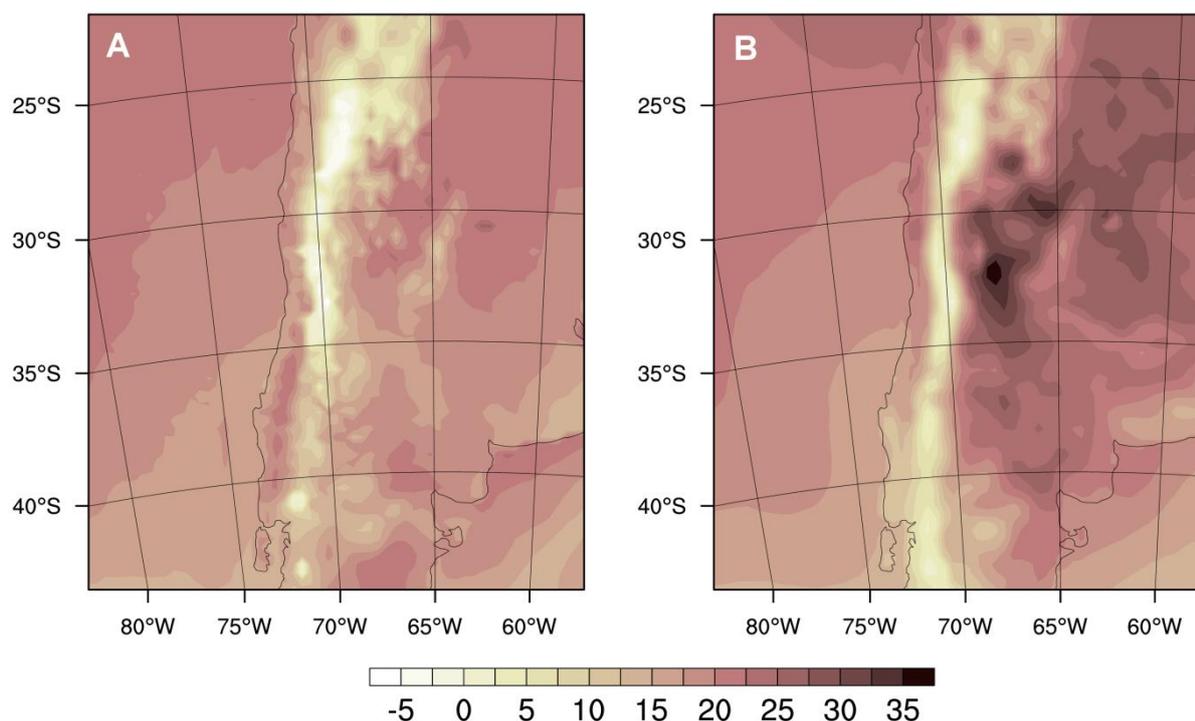
Varias opciones de configuración fueron incluidas en el modelo (ver Tabla 2), de acuerdo a casos de estudios previos, que probaron su idoneidad para producir las mejores estimaciones de variables meteorológicas de superficie y altura [17].

PARAMETRIZACIÓN	ESQUEMA
<b>Datos de entrada</b>	
Elevación del terreno	SRTM3
LULC	GLOBCOBER+DMPS-OLS
Reanálisis	NCEP-GFS
SST	Defecto/NCEP_diaria*
<b>Resolución</b>	
Temporal	$\Delta t$ (seg)= 90
Espacial	$\Delta x, \Delta y$ (km)= 36, 12, 4
Vertical	$\Delta z$ (ETA levels)= 60
<b>Física</b>	
Microfísica	Eta microphysics
Radiación onda larga	RRTM
Radiación onda corta	Goddard Dudhia
Superficie	Noah Land Surface Model
Niveles de superficie	4
Física de superficie	Monin-Obukhov similarity Theory
PBL	YSU

**Tabla 2.** Configuración del modelo WRF para las simulaciones de precipitaciones.

(\*Estas son las configuraciones variables.)

La figura 3 muestra la diferencia del uso de SST actualizada diariamente (SST\_ON, de ahora en adelante) para el dominio principal y el uso de un campo constante durante todo el período de simulación (SST\_OFF). En el primer caso, se incluyen en el modelo datos diarios de alta resolución casi en tiempo real (aquí se muestra sólo el primer día), mientras que los campos en el segundo caso se mantienen para toda la simulación.



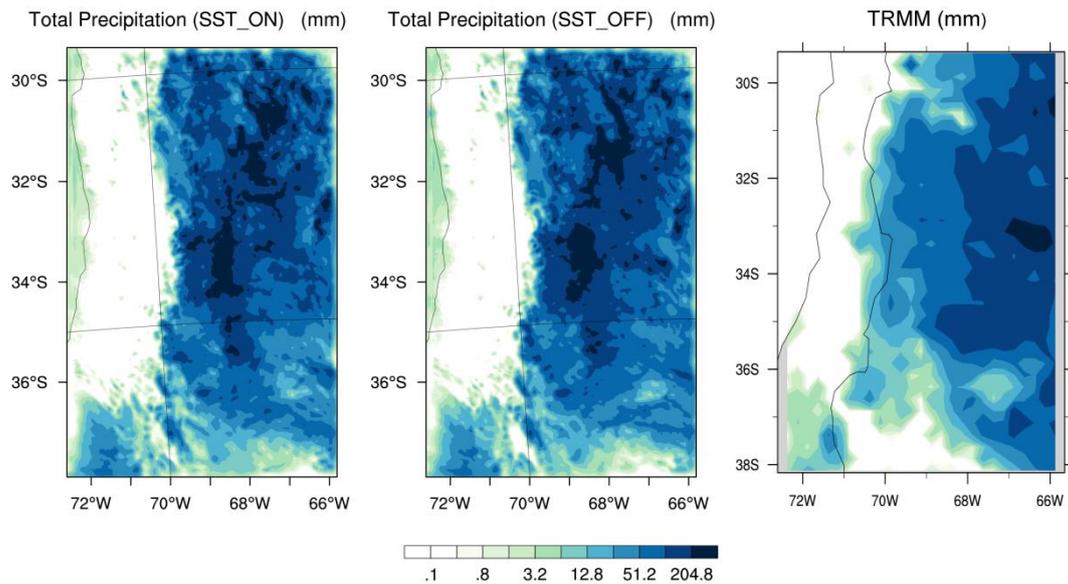
**Figura 3.** Temperatura de superficie y datos de SST ( $^{\circ}\text{C}$ ): A) actualizados diariamente (SST\_ON) a partir de datos diarios del análisis global NCEP SST con resolución espacial 1/12 grados (sólo primer día, quincena QC) y B) SST invariantes en el tiempo (SST\_OFF).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Precipitación acumulada

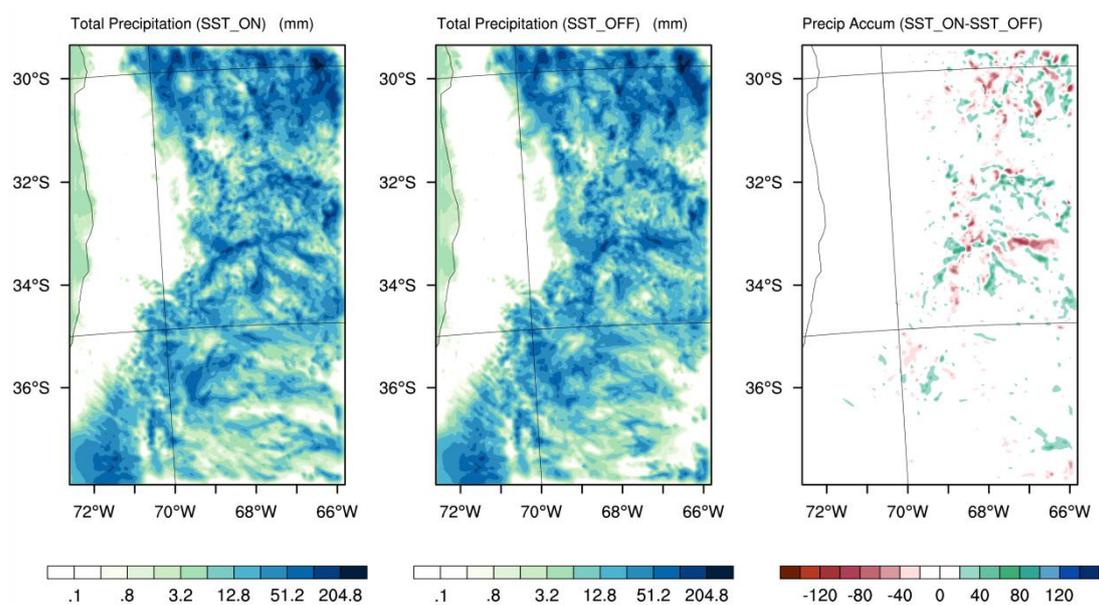
Al realizar una comparación visual de las simulaciones efectuadas con WRF con la medición satelital proporcionada por TRMM 3B42 (Figura 4) puede apreciarse que en el oeste del dominio la precipitación acumulada es muy escasa. Por el contrario, hacia el este del dominio se puede observar una mayor acumulación de precipitaciones cuya distribución espacial es bastante similar en los tres casos. Teniendo en cuenta que la resolución de TRMM 3B42 es casi 6 veces menor que la resolución del dominio de WRF, puede decirse que el modelo es capaz de reproducir eventos de precipitaciones dados en las regiones dentro del dominio de estudio más pequeño.

El algoritmo 3B42 de TRMM produce estimaciones de precipitación ajustadas por un método combinado TRMM-IR. En las mismas, se presentan datos grillados de precipitación (mm/h) y estimaciones de error con una resolución temporal diaria y  $0,25 \times 0,25$  grados de resolución espacial. La cobertura espacial total se extiende desde los  $50^{\circ}$  de latitud N hasta los  $50^{\circ}$  de latitud S [18].

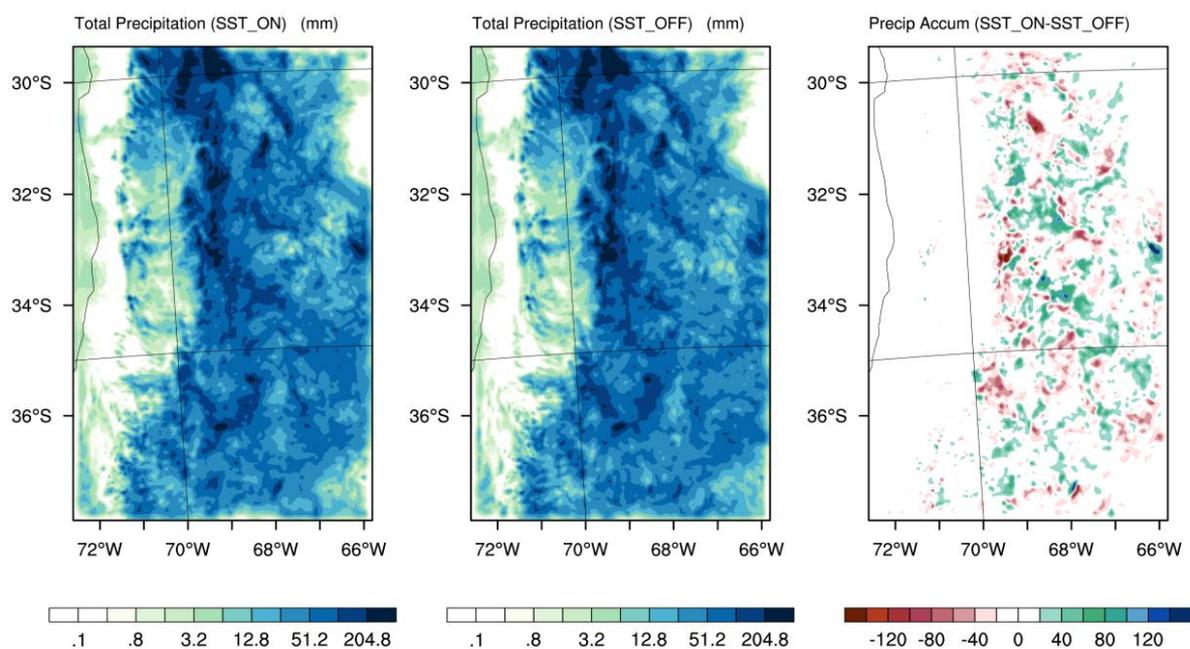


**Figura 4.** Precipitación total acumulada para las configuraciones con SST\_ON y SST\_OFF respectivamente en WRF y los datos TRMM 3B42, para la quincena QC (de izquierda a derecha).

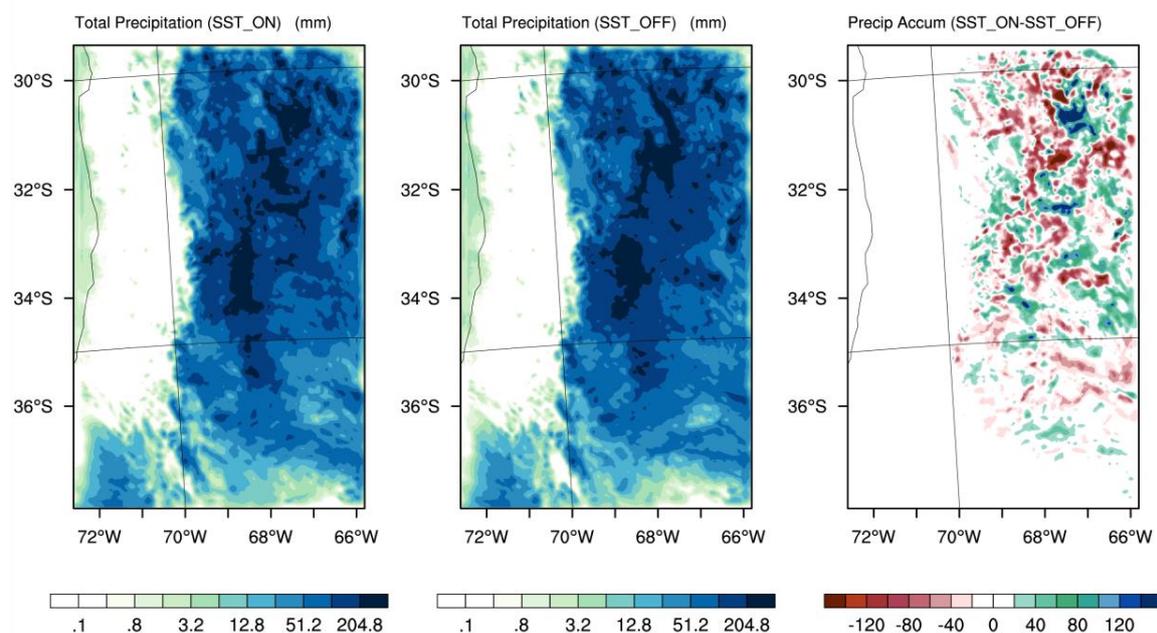
Asimismo, las figuras siguientes (Figuras 5-8) destacan la diferencia obtenida entre las simulaciones con ambas configuraciones. Para ello, se seleccionaron las quincenas con mayor relevancia en la información proporcionada a través de imágenes para efectuar una comparación visual significativa. La mayor diferencia entre ambas configuraciones puede distinguirse en las zonas donde la precipitación acumulada alcanza valores mayores. Tal como puede observarse, para algunos casos el uso de SST dependiente del tiempo genera sobreestimación de eventos de precipitación, mientras que en otros los subestima, es por ello que a continuación se realizó un análisis categórico para evaluar la configuración alternativa en forma más detallada.



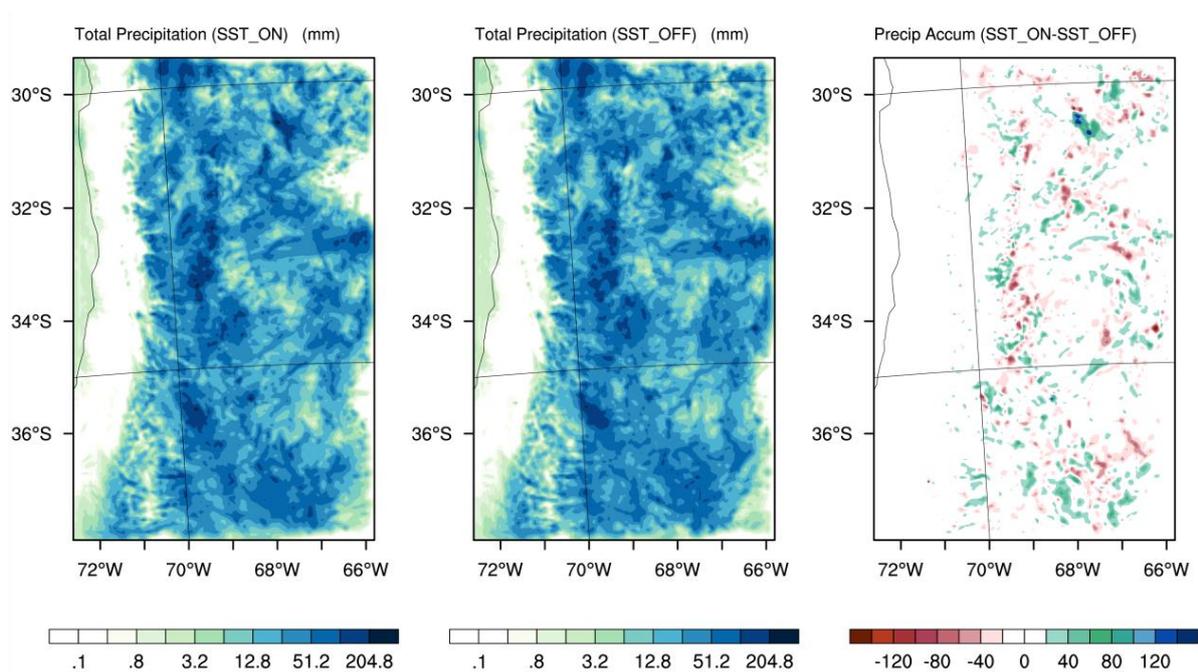
**Figura 5.** Simulación en WRF de precipitación total acumulada para la segunda quincena del mes de enero de 2014 (QB) y diferencia entre ambas configuraciones.



**Figura 6.** Simulación en WRF de precipitación total acumulada para la segunda quincena del mes de enero de 2013 (QF) y diferencia entre ambas configuraciones.



**Figura 7.** Simulación en WRF de precipitación total acumulada para la primera quincena del mes de febrero de 2014 (QC) y diferencia entre ambas configuraciones.



**Figura 8.** Simulación en WRF de precipitación total acumulada para la primera quincena del mes de febrero de 2013 (QH) y diferencia entre ambas configuraciones.

**3.2. Análisis categórico**

Se consideró a la precipitación como un evento binario simple, es decir “llueve” o “no llueve” y se trabajó en su análisis categórico con los elementos señalados en la Tabla 3. Los pronósticos de precipitación de WRF se compararon con las mediciones que se reunieron de las estaciones meteorológicas. Con el propósito de validar la modelación, se sustrajo la información de un total de 121 estaciones meteorológicas situadas dentro del dominio, pertenecientes a seis diferentes instituciones, incluyendo el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). No en todas ellas se hallaron datos válidos para realizar una comparación en todo el período, en todas las cuencas.

Los elementos de la tabla de contingencias son: aciertos (pronóstico correcto y observación del evento), errores (se observa el evento pero no es pronosticado), falsas alarmas (se da un pronóstico positivo pero no se observa el evento) y correctamente rechazados (previsión correcta de no-evento).

		OBSERVACION		
		SI	NO	
PREDICCIÓN	SI	a <b>ACIERTOS</b>	b <b>FALSAS ALARMAS</b>	a + b <b>SI PREDICHO</b>
	NO	c <b>ERRORES</b>	d <b>CORRECTAMENTE RECHAZADOS</b>	c + d <b>NO PREDICHO</b>
		a + c <b>SI OBSERVADOS</b>	b + d <b>NO OBSERVADOS</b>	N <b>TOTAL DE PREDICIONES</b>

**Tabla 3.** Tabla de contingencias. Los recuentos de a, b, c, y d son el número total de aciertos, falsas alarmas, errores y rechazos correctos.

Sobre la base de la tabla se realizó una serie de análisis estadísticos donde se analizó el rendimiento de previsión y se hizo una comparación de resultados entre las simulaciones con las diferentes configuraciones propuestas. En base a estos elementos se calcularon los siguientes indicadores:

- **Sesgo (BIAS):**

$$BIAS = \frac{a + b}{a + c} = \frac{\text{Eventos predichos}}{\text{Eventos observados}} \tag{1}$$

Siendo, B = 1 imparcial, B < 1 subestima el resultado, B > 1 sobreestima el resultado.

- **Probabilidad de detección – Tasa de éxito (POD):**

$$POD = \frac{a}{a+c} = \frac{\text{Aciertos}}{\text{Eventos observados}} \quad (2)$$

Indica la fracción de todos los eventos observados, correctamente predichos. Está centrado en el acontecimiento y no pena falsas alarmas.

Debe adquirir un valor dentro del rango  $0 \leq POD \leq 1$ , donde la mejor puntuación es  $POD = 1$ . Que se obtenga la mejor puntuación no significa que la predicción haya sido perfecta.

- **Tasa de falsa alarma (FAR):**

$$FAR = \frac{b}{a+b} = \frac{\text{Falsas alarmas}}{\text{Eventos observados}} \quad (3)$$

Representa la fracción de los eventos previstos que resultaron ser falsas alarmas.

Toma valores del rango  $0 \leq FAR \leq 1$ . La mejor puntuación obtenida es  $FAR = 0$ , considerando que alcanzar la mejor puntuación no significa estar realizando una predicción perfecta.

- **Probabilidad de detección falsa – Tasa de falsas alarmas (POFD):**

$$POFD = \frac{b}{b+d} = \frac{\text{Falsas alarmas}}{\text{No-eventos}} \quad (4)$$

Con el indicador POFD se evalúa la fracción de todos los no-eventos cuando el pronóstico predijo un evento. Los valores que puede tomar son  $0 \leq POFD \leq 1$ , siendo su mejor puntuación  $POFD = 0$ . La mejor puntuación no implica una predicción perfecta.

- **Precisión – Fracción correcta (ACC - Accuracy):**

$$ACC = \frac{a+d}{N} = \frac{\text{Predicciones correctas}}{\text{Total de predicciones}} \quad (5)$$

A través de este cálculo se obtiene la fracción de todas las predicciones que resultaron correctas ( $0 \leq ACC \leq 1$ ), donde la mejor puntuación es  $ACC = 1$ . La mejor puntuación no supone una predicción perfecta. Un evento anormal en el marcador es considerado como un no-evento.

• **Índice de éxito (TS – Threat Score):**

$$TS = \frac{a}{a+b+c} = \frac{\text{Aciertos}}{\text{Todos los eventos predichos y observados}} \quad (6)$$

El índice de éxito indica la fracción de todos los eventos pronosticados u observados que son correctos.  $0 \leq TS \leq 1$ , el mejor puntaje es obtenido cuando  $TS = 1$ . En este caso, obtener el mejor puntaje muestra una predicción perfecta.

Una inspección visual de los resultados expuestos en la Tabla 4 indica que la mayoría de los eventos predichos y no observados (valores altos de FAR) está en las cuencas más elevadas, que contienen la cordillera, tanto en Argentina como en Chile.

De manera opuesta, en ambas configuraciones la fracción de eventos predichos (POD) es mayor en cuencas ubicadas hacia el este del dominio de modelado, en Argentina o en la Zona Central de Chile.

Considerando los eventos y no-eventos de forma simétrica, las predicciones en Chile son mejores que en Argentina.

La corrección del BIAS es solamente posible siempre y cuando haya datos observacionales suficientes, lo cual no es el caso de las cuencas elevadas que contienen la cordillera.

La obtención de valores cercanos a 1 partir del cálculo de ACC indica una cantidad de predicciones correctas apropiada sobre el número total de predicciones señaladas por el modelo.

		ARGENTINA		CHILE	
	Valor ideal	SST_OFF	SST_ON	SST_OFF	SST_ON
<b>BIAS</b>	0	1.91	1.87	4.28	4.1
<b>POD</b>	1	0.76	0.75	0.52	0.53
<b>FAR</b>	0	0.61	0.6	0.88	0.87
<b>POFD</b>	0	0.41	0.4	0.2	0.19
<b>ACC</b>	1	0.63	0.64	0.79	0.8
<b>TS</b>	1	0.35	0.36	0.11	0.12

**Tabla 4.** Resultados de los cálculos estadísticos para ambas configuraciones de WRF, para los dos países que forman parte del dominio de estudio.

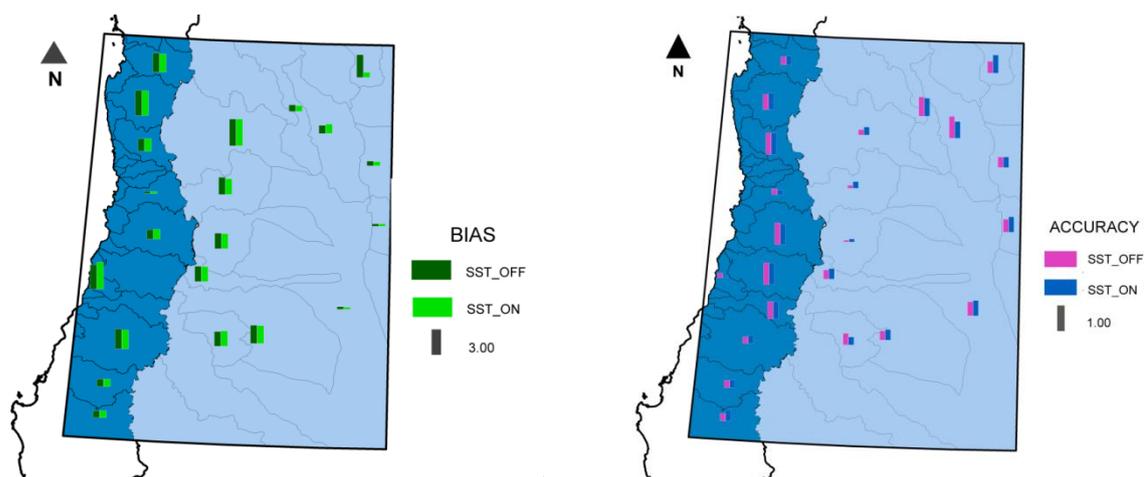
La desagregación espacial de los resultados más significativos obtenidos, por cuenca, mediante los cálculos estadísticos se muestran en las Figuras 9-11; donde se destaca el desempeño del modelo, capaz de predecir adecuadamente los eventos de precipitaciones para los períodos de tiempo simulado.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de los estadísticos más relevantes en cada cuenca dentro del dominio más pequeño, con datos válidos de mediciones extraídas de estaciones meteorológicas.

Cuencas Argentinas		Bias_OFF	Bias_ON	Acc_OFF	Acc_ON	Ts_OFF	Ts_ON
Cuenca_Pampas_Salinas		1.48	1.40	0.70	0.69	0.42	0.40
Cuenca_Laguna_Llancanelo		2.00	1.95	0.70	0.69	0.38	0.35
Cuenca_Rio_Abaucan		2.67	2.67	0.69	0.69	0.28	0.28
Cuenca_Rio_Atuel		2.69	2.66	0.66	0.67	0.30	0.30
Cuenca_Rio_Conlara_y_Arroyos		1.28	1.30	0.66	0.65	0.40	0.40
Cuenca_Rio_Desaguadero		1.26	1.23	0.69	0.70	0.42	0.42
Cuenca_Rio_Diamante		2.58	2.48	0.62	0.64	0.30	0.30
Cuenca_Rio_Mendoza		2.32	2.34	0.63	0.63	0.34	0.34
Cuenca_Rio_Quinto_SL		1.31	1.36	0.72	0.72	0.52	0.53
Cuenca_Rio_San_Juan		2.86	2.89	0.65	0.65	0.20	0.21
Cuenca_Rio_Tunuyan		2.31	2.33	0.62	0.62	0.31	0.31
Cuenca_Rio_Vinchina_Bermejo		2.78	2.44	0.70	0.74	0.21	0.24
Region_Sin_Drenaje_Superficial_SL		0.62	0.65	0.67	0.68	0.28	0.30
Cuencas Chilenas		Bias_OFF	Bias_ON	Acc_OFF	Acc_ON	Ts_OFF	Ts_ON
Cuenca_Rios_Elqui_Limari		7.38	6.88	0.85	0.86	0.03	0.03
Costeras_Rio_Rapel_Estero_Nilahue		9.67	7.67	0.70	0.76	0.03	0.04
Cuenca_Rio_Aconcagua		0.28	0.29	0.62	0.63	0.11	0.13
Cuenca_Rio_BioBio		2.09	2.18	0.84	0.85	0.36	0.40
Cuenca_Rio_Elqui		5.94	6.44	0.79	0.78	0.03	0.03
Cuenca_Rio_Itata		2.30	2.25	0.80	0.82	0.27	0.29
Cuenca_Rio_Limari		5.86	5.57	0.92	0.92	0.07	0.05
Cuenca_Rio_Maipo		2.77	2.85	0.93	0.93	0.07	0.04
Cuenca_Rio_Mataquito		No Data*	No Data*	0.87	0.89	0.00	0.00
Cuenca_Rio_Maule		4.79	4.50	0.83	0.84	0.08	0.08
Cuenca_Rio_Rapel		No Data*	No Data*	0.91	0.93	0.00	0.00

**Tabla 5.** Resultados de los estadísticos más relevantes calculados para cada configuración en cada cuenca ubicada dentro del dominio con datos válidos.

\*En el caso de que eventos observados = 0 no se calcula Bias (división por cero)



**Figura 9.** Distribución de los parámetros estadísticos “BIAS” (izquierda) y “ACC” (derecha) por cuenca y para ambas configuraciones de WRF.

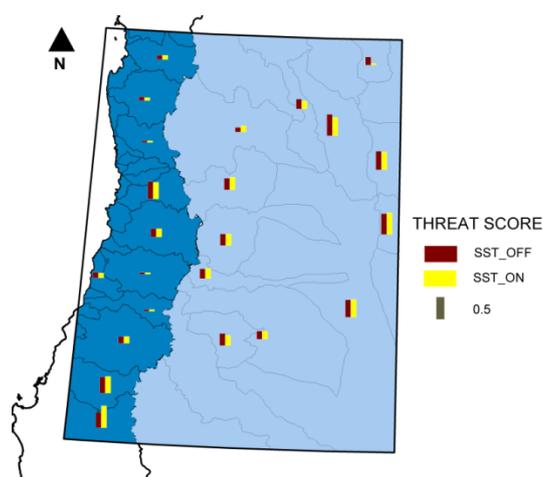


Figura 11. Distribución del parámetro estadístico “TS” por cuenca y para ambas configuraciones de WRF.

#### 4. CONCLUSIONES

Si bien valores dependientes del tiempo de SST representan mejoras pequeñas en la descripción de las precipitaciones totales acumuladas durante los periodos simulados, se prefiere siempre esta configuración debido a que se trata de una aproximación más realista del evento en estudio y se espera que el impacto sea positivo en simulaciones más largas.

A pesar de la variabilidad en el desempeño de ambas configuraciones en la simulación de la precipitación acumulada, la influencia orográfica en la precipitación es muy importante en la región de los Andes Centrales.

Nuestro estudio revela que la configuración SST\_ON presenta leves mejoras en los resultados que la opción por defecto en WRF. La sensibilidad a estas condiciones iniciales y de contorno no es demasiado grande, por lo que se requiere mayor estudio en la respuesta del modelo a otros tipos de forzamientos.

#### REFERENCIAS

- [1] N. Insel, C. J. Poulsen, and T. a. Ehlers, “Influence of the Andes Mountains on South American moisture transport, convection, and precipitation,” *Clim. Dyn.*, vol. 35, no. 7, pp. 1477–1492, 2010.
- [2] J. L. Minetti and E. M. Sierra, “The influence of general circulation patterns on humid and dry years in the cuyo andean region of argentina,” *Int. J. Climatol.*, vol. 9, no. 1, pp. 55–68, 1989.
- [3] P. L. M. Gonzalez and C. S. Vera, “Summer precipitation variability over South America on long and short intraseasonal timescales,” *Clim. Dyn.*, pp. 1–15, 2013.
- [4] D. C. Araneo and R. H. Compagnucci, “Atmospheric circulation features associated to Argentinean Andean rivers discharge variability,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, no. 1, pp. 1–6, 2008.

- [5] C. Vera and G. Silvestri, "Precipitation interannual variability in South America from the WCRP-CMIP3 multi-model dataset," *Clim. Dyn.*, vol. 32, no. 7–8, pp. 1003–1014, 2009.
- [6] F. Giorgi, "Regional climate modeling: Status and perspectives," *J. Phys. IV Fr.*, vol. 139, pp. 101–118, 2006.
- [7] W. C. Skamarock, J. B. Klemp, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, "A Description of the Advanced Research WRF Version 3," *Mesoscale Microscale Meteorol. Div. Natl. Cent. Atmos. Res.*, 2008.
- [8] B. Fersch and H. Kunstmann, "Atmospheric and terrestrial water budgets: sensitivity and performance of configurations and global driving data for long term continental scale WRF simulations," *Clim. Dyn.*, vol. 42, no. 9–10, pp. 2367–2396, 2013.
- [9] M. Tombrou, E. Bossioli, J. Kalogiros, J. D. Allan, a. Bacak, G. Biskos, H. Coe, a. Dandou, G. Kouvarakis, N. Mihalopoulos, C. J. Percival, a. P. Protonotariou, and B. Szabó-Takács, "Physical and chemical processes of air masses in the Aegean Sea during Etesians: Aegean-GAME airborne campaign," *Sci. Total Environ.*, vol. 506–507, pp. 201–216, 2015.
- [10] R. Shi, X. Guo, D. Wang, L. Zeng, and J. Chen, "Seasonal variability in coastal fronts and its influence on sea surface wind in the Northern South China Sea," *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, no. 1987, pp. 1–10, 2013.
- [11] R. J. Small, S. P. deSzoeke, S. P. Xie, L. O'Neil, H. Seo, Q. Song, P. Cornillon, M. Spall, and S. Minobe, "Air-sea interaction over ocean fronts and eddies," *Dyn. Atmos. Ocean.*, vol. 45, pp. 274–319, 2008.
- [12] Q. Song, D. B. Chelton, S. K. Esbensen, N. Thum, and L. W. O'Neil, "Coupling between sea surface temperature and low-level winds in mesoscale numerical models," *J. Clim.*, vol. 22, no. 1, pp. 146–164, 2009.
- [13] University Corporation for Atmospheric Research, U.S. National Centers for Environmental Prediction, and and E. C. for M.-R. W. F. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts University Corporation for Atmospheric Research [Unidata], U.S. National Centers for Environmental Prediction, "Dataset ds335.0 published by the CISL Data Support Section at the National Center for Atmospheric Research," 2002. [Online]. Available: <http://dss.ucar.edu/datasets/ds335.0/>.
- [14] E. Rodriguez, C. S. Morris, J. E. Belz, E. C. Chapin, J. M. Martin, W. Daffer, and S. Hensley, "An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639," Pasadena, California, 2005.
- [15] O. Arino, J. Ramos, V. Kalogirou, P. Defoumy, and F. Achard, "GlobCover 2009," in *ESA Living Planet Symposium*, 2010, p. 686.
- [16] NOAA-NGDC, "Version 4 DMSP-OLS Nighttime Lights Time Series," 2010. [Online]. Available: <http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/downloadV4composites.html>.
- [17] S. E. Puliafito, D. G. Allende, P. Cremades, and R. P. Fernandez, "Intercomparación de datos atmosféricos usando diversas plataformas y calibración del modelo numérico WRF," in *Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería 2011 - EnIDI 2011*, 2011, pp. 1–13.
- [18] G. J. Huffman, D. T. Bolvin, E. J. Nelkin, D. B. Wolff, R. F. Adler, G. Gu, Y. Hong, K. P. Bowman, and E. F. Stocker, "The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales," *J. Hydrometeorol.*, vol. 8, no. 1, pp. 38–55, Feb. 2007.