



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Evaluación del modelo atmosférico WRF para las condiciones meteorológicas de la isla Navarino en un mes del año 2020 en un ambiente HPC

Por: Matías Alejandro Troncoso Villar

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la
Universidad de Concepción para optar al título profesional de Geofísico

Diciembre 2023

Concepción, Chile

Profesor guía: Dr. Andrés Sepúlveda Allende

**Comisión evaluadora: Dra. Tamara Contador Mejías
Dr. Martín Jacques Coper**

© 2023, Matías Troncoso Villar

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

A Javiera y Sophia

AGRADECIMIENTOS

No atravesé el pregrado solo. Gracias madre y padre, por haber establecido los principales cimientos de mi formación. A mi familia completa, pero en especial a mi tío Patricio, por tus simples consejos o en tu pragmatismo; y a mi *ita*, mi abuela. Ocupamos, mutuamente, un lugar muy especial en la vida del otro. Pocos tienen la suerte de tener a alguien así como lo he tenido yo contigo.

Mariangel, Fernanda y Francisca, desde el primer año hemos compartido todo tipo de experiencias y quiero que sepan que a partir de ser simples compañeros, lograron entrar a lo más profundo de mi corazón. Estuvimos y estaremos juntas, por más lejos que nos encontremos. Muchas gracias por su apoyo incondicional. Sigamos creciendo, como lo hemos hecho hasta ahora. Se vienen cositas.

Agradezco también a Camilo (y al equipo del CHIC), por haber confiado en mi desempeño profesional y darme la oportunidad de demostrarlo a lo largo de este año. Gracias a ello he podido desarrollar mis habilidades de una manera que la universidad no me enseñará nunca.

Y, cómo olvidar, a mis colegas del DGEO: Martín, por haber compartido tu pasión en este bello mundo de las ciencias atmosféricas en la diversidad de cursos que nos impartiste, sin dejar atrás una buena conversación de todo tipo de temas interesantes (nunca olvidaré la frecuencia de la nota *la*); gracias profesor Andrés, por acogerme y llenarme de consejo en esta última etapa del pregrado. Mi gusto por la programación sería solo un *hobbie* de no ser por usted; y, por último, Aldo. No te imaginas lo mucho que significaste en mi vida. Siempre acudí a ti cuando necesitaba y nunca, por más ocupado que estuvieses, me cerrabas la puerta. Recuerdo las muchas veces que, en pandemia, teníamos videollamadas mientras cenabas porque no tenías otro momento disponible del día. Gracias por tu apoyo humano, por sobre todo. Te llevaré conmigo en lo que me reste de vida.

Resumen

Se estudia el uso del modelo numérico de simulación de la atmósfera WRF en la zona sureste de la Región de Magallanes, Chile, específicamente alrededor de la isla Navarino, donde se encuentra la ciudad de Puerto Williams. Esta zona es un *hotspot* subantártico de estudios socio-ecológicos por ser una laguna de información respecto a Patagonia Norte y la Antártica, y estos estudios requieren datos meteorológicos y climáticos de alta resolución que permitan completar los análisis. Además del difícil acceso a la información de las estaciones meteorológicas que se encuentran dispersas, es indiscutible que la densidad de estas no es suficiente para poder realizar estudios de alta resolución especialmente con temas ecológicos en diferentes ambientes. Así, se realiza una evaluación del modelo WRF durante mayo del año 2020 sobre la isla Navarino, para las variables de temperatura y precipitación, mediante pruebas estadísticas como el RMSE o la razón de falsas alarmas. Los resultados permitieron diferenciar entre 5 estaciones de monitoreo *in-situ* para cada variable a través de diagramas de dispersión, histogramas, boxplots y series de tiempo. Se pudo evidenciar un ajuste lineal del modelo de $R = 0,27$ para las temperaturas y sesgos de entre 1 y 9 unidades para la precipitación, pero con diferencias de magnitud superiores a las decenas e incluso centenas de *mm*, dependiendo de la estación utilizada para validar. Se describen tipos de error que dan a entender la necesidad de aumentar la resolución espacial del modelo mediante un nuevo subdominio de la simulación. El modelo, finalmente, puede reproducir con fallos bien descritos el comportamiento de ambas variables analizadas. Una buena continuación de este trabajo incorporaría nuevas variables como el viento, la humedad, la presión en superficie o los flujos de calor a la evaluación, así como aumentar el tiempo de simulación de 1 mes a 1 año o más, y disminuir el tamaño de grilla para evitar el efecto de suavizado de topografía.

Powered@NLHPC: Esta investigación/tesis fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02)

Palabras Clave – WRF, Magallanes, evaluación climática, modelación numérica, HPC.

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	II
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. La Región de Magallanes y la Antártica Chilena	4
1.2.1. El clima de la Región de Magallanes	5
1.3. Los modelos numéricos	8
1.3.1. Estado del arte	9
1.4. Trabajo en un ambiente HPC	11
1.4.1. Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC)	12
1.5. Utilidades de simular el pasado	13
2. Objetivos	14
2.1. Objetivo General	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. Métodos	15
3.1. El Modelo WRF	15
3.2. Configuración de los modelos	17
3.2.1. Entorno físico de trabajo	18
3.2.2. Configuración de las parametrizaciones	21
3.3. Datos	21
3.4. Validación	23
3.4.1. Correlación	24
3.4.2. RMSE	24
3.4.3. MAE	25
3.4.4. Precisión	25
3.4.5. Sesgo (o <i>Bias</i>)	25
3.4.6. Probabilidad de detección	26
3.4.7. Razón de falsas alarmas	26
3.4.8. Probabilidad de falsa detección	26

4. Resultados	27
4.1. Condiciones observadas y simuladas de temperatura	28
4.2. Condiciones observadas y simuladas de precipitación	33
5. Discusión	39
6. Conclusión	43
Referencias	45
Apéndices	50
A.	50
A1. Climograma sin editar	50
A2. Diferencias de temperatura de todas las estaciones	51
A3. Mapa de precipitaciones observadas el 6 de mayo de 2020	52
A4. Archivos <code>namelist</code> de la última simulación	53
A4.1. Archivo <code>namelist.wps</code> :	53
A4.2. Archivo <code>namelist.input</code> :	54
A5. Participación en la Primera Conferencia CHIC	59

Índice de tablas

3.2.1. Configuración de los modelos y datos.	18
3.2.2. Configuración de los parámetros físicos en la simulación para los dominios según la numeración para WRF.	22
3.3.1. Estaciones <i>in-situ</i> cuyos datos fueron utilizados. La ubicación de cada una es representada en la Figura 3.3.1.	23
4.2.1. Resultado de los estadísticos dicotómicos y sesgo de frecuencias de precipitación en cada una de las estaciones. Siglas: Precisión (sección 3.4.4); Sesgo (3.4.5); POD (3.4.6); FAR (3.4.7); y POFD (3.4.8). En negrita (rojo), la estación que mejor (peor) se desempeña para cada evaluación estadística.	37

Índice de figuras

1.1.1. Mapa de la zonificación de la Reserva de la Biósfera Cabo de Hornos y Parque Omora. Se demarca la ruta de navegación entre Punta Arenas y Puerto Williams que conecta ambas localidades cada semana. <i>Fuente:</i> Malebrán and Rozzi (2018).	3
1.1.2. Fotografía del edificio del Centro Subantártico Cabo de Hornos. En su interior, más de 30 personas trabajan en investigación CHIC, labores administrativas o en la nueva carrera técnica de la Universidad de Magallanes en Puerto Williams.	4
1.2.1. Topografía y batimetría de la Región de Magallanes (bordada por la línea negra continua). La línea negra segmentada representa la fosa (proyección Lambert y datos topográficos de NOAA). El cuadro rojo resalta la isla Navarino. <i>Fuente:</i> propia.	5
1.2.2. Fotografía panorámica de la costa norte de la Isla Navarino. Se ve Puerto Williams (centro-derecha de la imagen); canal Beagle y la Isla Grande de Tierra del Fuego (al frente) en un día de verano austral. <i>Fuente:</i> propia.	6
1.2.3. Climograma para Puerto Williams en base a los datos de la estación DMC Guardiamarina Zañartu desde 1968 para las temperaturas y desde 1961 para la precipitación. Se le ha eliminado un dato extremo para mejor visualización (ver anexo A1). <i>Fuente:</i> propia.	7
1.3.1. División de la superficie terrestre en modelos globales (arriba) y su escalamiento a modelos regionales (abajo). <i>Fuente:</i> Instituto de meteorología de Finlandia	9
1.4.1. Supercomputador “Leftrarú” del NLHPC	11
3.0.1. Topografía y batimetría de la Patagonia para las simulaciones. Se ven representados el primer dominio de la simulación WRF (totalidad). El segundo dominio (rectángulo d02) permitió crear el tercer dominio (rectángulo d03). Este último es aquel con el que se tratan los datos.	16
3.1.1. Celdas de Arakawa-C horizontales (izquierda) y verticales (derecha). <i>Fuente:</i> extraído de Skamarock and Klemp (2008).	17
3.1.2. Funcionamiento de las celdas verticales en base a coordenadas σ al toparse con terreno. <i>Fuente:</i> extraído de Skamarock and Klemp (2008).	18

3.1.3. Diagrama de flujo del funcionamiento de WRF. <i>Fuente:</i> extraído de WRFHelp NCEP-NCAR.	19
3.2.1. Captura de pantalla del proceso de cómputo de WRF en Leftraru (NLHPC).	20
3.3.1. Mapa de la sección resaltada en rojo de la Figura 3.0.1. En círculos amarillos se resalta la ubicación de las estaciones de la Tabla 3.3.1 con su respectivo código asociado.	24
4.1.1. Temperaturas observadas de las 5 estaciones de monitoreo <i>in-situ</i> (naranja) y simuladas para los puntos de grilla más cercanos (azul).	28
4.1.2. Diferencias promedio de temperatura entre lo observado y lo simulado para las 5 estaciones de monitoreo. Diferencias positivas indican subestimación de la temperatura por parte de la simulación, y lo contrario indica sobrestimación de la temperatura. En negro, el promedio de los errores respecto al tiempo. Para cada estación en particular, ver Figura A2.1.	29
4.1.3. Boxplot de las diferencias de temperatura para cada estación de monitoreo por separado. Se visualiza que en las ubicaciones de las estaciones S4 y S5 hay un leve subpronóstico y en las estaciones S3, S2 y S1 hay un sobrepronóstico.	30
4.1.4. Histograma de las diferencias de temperatura entre lo observado y lo simulado para las 5 estaciones de monitoreo combinadas. Diferencias positivas indican subestimación de la temperatura por parte de la simulación, y lo contrario indica sobrestimación de la temperatura. El sombreado rojo, de límites $\pm 2,5^{\circ}C$, contiene el 44 % de los datos.	31
4.1.5. Ajuste normal de los errores considerando una media $\mu = -1,8^{\circ}C$; y una desviación estándar $\sigma = 3,6$	32
4.1.6. Diagrama de dispersión (<i>scatter</i>) para las temperaturas observadas y pronosticadas agrupando todas las estaciones. Un 7 % de la varianza de las temperaturas observadas se comparte con las temperaturas pronosticadas. La línea azul representa la dispersión nula (modelación perfecta), con una pendiente igual a 1.	33
4.2.1. Precipitación acumulada mensual para el mes de mayo de 2020 calculado por el modelo WRF. El color interior de los puntos de borde negro indica la precipitación acumulada <i>in-situ</i> para las estaciones de cada lugar: S1 = 30,2 mm; S2 = 20,7 mm; S3 = 44,3 mm; S6 = 61,3 mm; S4 = 51,6 mm.	34
4.2.2. Precipitación acumulada cada 6 horas (barras) y acumulado general (líneas) para las observaciones de la estación S1 (color azul) y el punto más cercano de la simulación (color rojo) para todo el mes.	35
4.2.3. Precipitación acumulada cada 1 hora (barras) y acumulado general (líneas) para las observaciones de la estación S2 (color azul) y el punto más cercano de la simulación (color rojo) para todo el mes.	36
4.2.4. Precipitación acumulada cada 1 hora (barras) y acumulado general (líneas) para las observaciones de la estación S3 (color azul) y el punto más cercano de la simulación (color rojo) para todo el mes.	37

4.2.5. Precipitación acumulada cada 1 hora (barras) y acumulado general (líneas) para las observaciones de la estación S6 (color azul) y el punto más cercano de la simulación (color rojo) para todo el mes.	38
4.2.6. Precipitación acumulada cada 1 hora (barras) y acumulado general (líneas) para las observaciones de la estación S4 (color azul) y el punto más cercano de la simulación (color rojo) para todo el mes.	38
A1.1. Climograma incluyendo dato extremo de febrero de 1975 para Puerto Williams en base a los datos de la estación DMC Guardiamarina Zañartu desde 1968 para las temperaturas y desde 1961 para la precipitación. Esta es la versión sin editar de la Figura 1.2.3. <i>Fuente: propia.</i>	50
A2.1. Diferencias de temperatura entre lo observado y lo simulado para las 5 estaciones de monitoreo. Diferencias positivas indican subestimación de la temperatura por parte de la simulación, y lo contrario indica sobrestimación de la temperatura. En negro, el promedio de los errores respecto al tiempo.	51
A3.1. Mapa de precipitación acumulada cada hora para las 14 h del 6 de mayo de 2020 en la Región de Magallanes. Es evidente un frente de precipitaciones	52

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Motivación personal

La motivación para realizar esta investigación surge de mi experiencia personal en la isla Navarino. Durante mi enseñanza media, tuve la oportunidad de vivir en esta isla y experimentar de primera mano la fascinante variabilidad climática que la caracteriza. Desde entonces, mi interés por la meteorología y las ciencias atmosféricas se despertó y se convirtió en una pasión que decidí perseguir en mi carrera profesional.

Durante mi tiempo viviendo en la isla Navarino, pude presenciar cómo las condiciones meteorológicas pueden cambiar drásticamente en cuestión de horas. Las temperaturas bajas y las fuertes nevadas en invierno transforman el paisaje en un entorno cubierto de una densa capa de nieve. Estas condiciones extremas generan desafíos para los residentes y para diversas actividades locales, como la planificación de infraestructuras, el turismo y la seguridad de la población.

Mi actual trabajo en el Centro Subantártico Cabo de Hornos, ubicado también en la isla Navarino, me ha brindado una perspectiva aún más profunda sobre la importancia de comprender y evaluar las condiciones meteorológicas de la región. Aquí, he sido testigo de los impactos directos que el clima puede tener en las operaciones diarias y en la toma de decisiones estratégicas.

Esta experiencia vivencial y profesional ha despertado en mí un fuerte deseo de

contribuir al conocimiento científico sobre las condiciones meteorológicas en la isla Navarino. Mediante el uso del modelo atmosférico WRF, esta investigación tiene como objetivo proporcionar una evaluación detallada y precisa de las condiciones climáticas (temperatura y precipitación) para un mes del año 2020. Busco llenar el vacío de información existente y contribuir a la comprensión de los patrones climáticos locales.

Creo firmemente que los resultados de esta investigación podrán ser de utilidad para diversos sectores, incluyendo la planificación urbana, la toma de decisiones en el ámbito turístico y la gestión de recursos naturales. Aspirando a una carrera profesional en el estudio climático, esta investigación no solo me permitirá aplicar y desarrollar mis habilidades técnicas, sino que también me brindará una base para estudios y contribuciones en el campo de la meteorología y el cambio climático, especialmente en Magallanes y en Puerto Williams.

La importancia del tema

En primer lugar, la falta de investigaciones previas en esta zona extrema, como la isla Navarino, hace que este estudio sea único y pionero en su enfoque. El hecho de que no existan investigaciones previas sobre las condiciones meteorológicas específicas de esta zona, especialmente con los modelos numéricos, resalta la necesidad de llenar ese vacío de conocimiento y comprender mejor el clima local. En segundo lugar, el contexto actual del cambio climático hace que esta investigación sea aún más relevante. La isla Navarino se encuentra en una ubicación geográfica sensible y se ve afectada directamente por los efectos del cambio climático. En este sentido, es esencial comprender cómo están cambiando las condiciones meteorológicas en la región y cómo estos cambios pueden tener consecuencias socioecológicas significativas en la Reserva de la Biósfera Cabo de Hornos (Figura 1.1.1).

Además, con la fundación del Centro Internacional Cabo de Hornos «CHIC» ([centro basal](#), Figura 1.1.2), se establece una base importante para el estudio de las consecuencias socioecológicas del cambio climático en la región. El conocer de manera precisa y detallada las condiciones meteorológicas y atmosféricas de la Reserva de la Biósfera Cabo de Hornos, a través del uso del modelo atmosférico WRF, es capaz de proporcionar una base sólida para evaluar los impactos del cambio climático en esta área y tomar decisiones informadas para su conservación

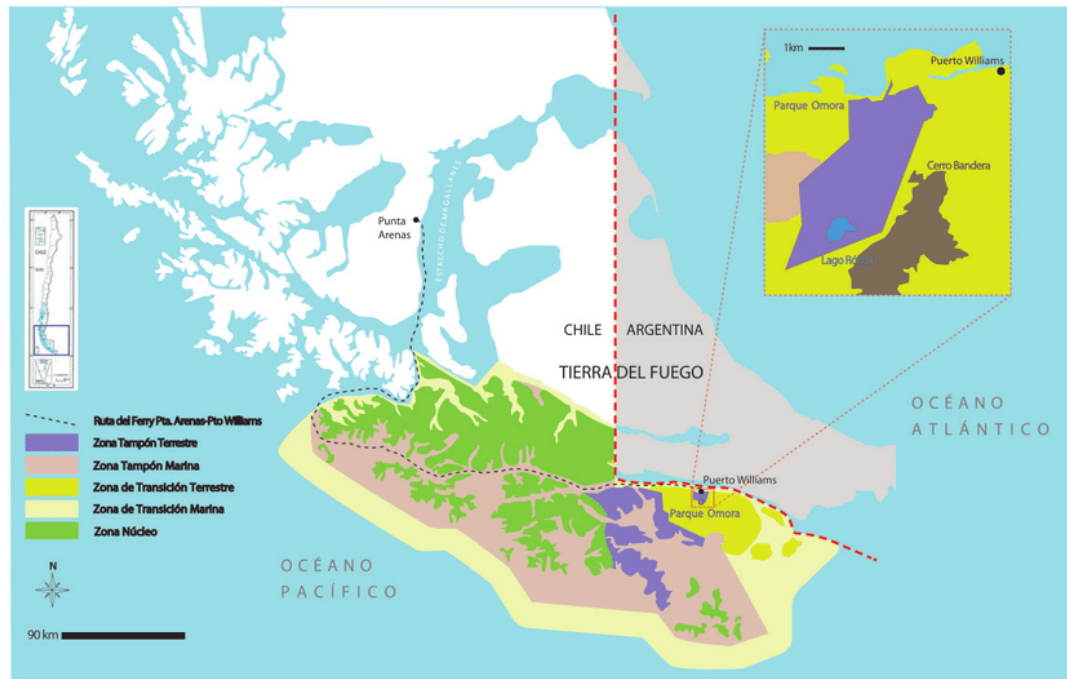


Figura 1.1.1: Mapa de la zonificación de la Reserva de la Biósfera Cabo de Hornos y Parque Omora. Se demarca la ruta de navegación entre Punta Arenas y Puerto Williams que conecta ambas localidades cada semana. *Fuente:* [Malebrán and Rozzi \(2018\)](#).

y gestión sostenible.

Contribución académica y científica

La contribución académica y científica de esta investigación se basa en el uso del modelo atmosférico WRF, en contraste con los enfoques previos que han utilizado técnicas de *downscaling* estadístico. La utilización de WRF permite superar las limitaciones de estos enfoques al considerar los aspectos físicos y dinámicos del fluido de la atmósfera de manera más precisa.

Al emplear el modelo WRF, esta investigación ofrece una contribución significativa al conocimiento científico al proporcionar una evaluación más detallada y precisa de las condiciones meteorológicas en la isla Navarino. Los resultados obtenidos a través de la simulación con WRF permitirán comprender mejor los patrones climáticos locales y su variabilidad, al menos a lo largo de un mes, como punto de partida para estudios más extensos (temporal y espacialmente). Además, la salida de datos grillados generada por el modelo WRF es especialmente relevante, ya

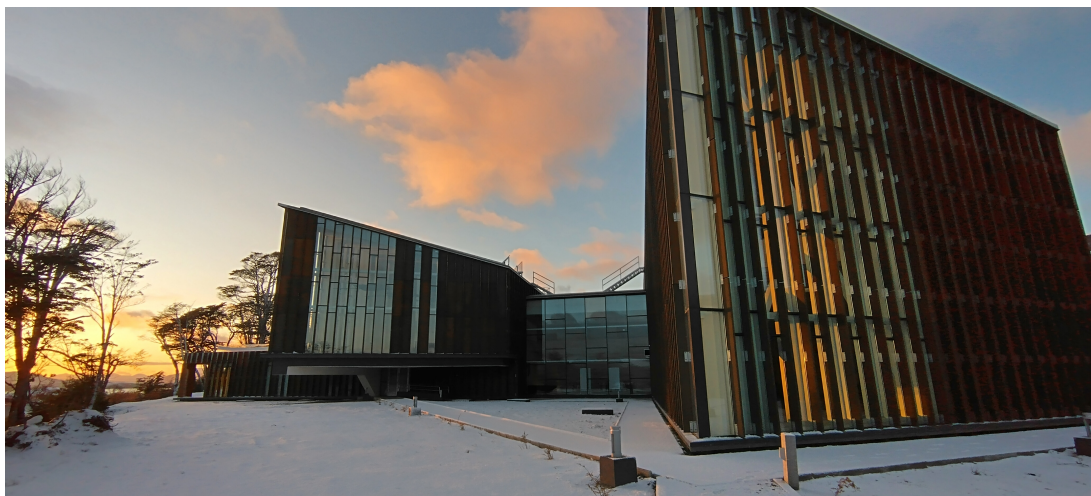


Figura 1.1.2: Fotografía del edificio del Centro Subantártico Cabo de Hornos. En su interior, más de 30 personas trabajan en investigación CHIC, labores administrativas o en la nueva carrera técnica de la Universidad de Magallanes en Puerto Williams.

que permite comprender las condiciones meteorológicas en lugares específicos de la isla Navarino que pueden estar alejados de la estación meteorológica *in-situ* del aeropuerto. Esto incluye áreas como lagos en altura o el circuito de *trekking* de los “Dientes de Navarino”, considerado el más austral del mundo. Estos lugares tienen particular importancia desde el punto de vista turístico y ecológico, y comprender las condiciones meteorológicas en estas áreas específicas contribuirá a la toma de decisiones informadas para su gestión y conservación.

1.2. La Región de Magallanes y la Antártica Chilena

La Región de Magallanes y la Antártica Chilena es la región más austral y la más extensa de Chile. Posee una superficie de 132.297 km^2 ([del Gobierno de Chile, 2018](#)) sin contar el territorio antártico. Su territorio americano se ubica entre el paralelo 49° S y el $56,32^\circ \text{ S}$, en el extremo sur de América. Su límite natural norte es el campo de hielo sur y el límite sur es el Paso Drake. Al oeste se encuentra el océano Pacífico y al este solo la frontera con Argentina la separa del océano Atlántico.

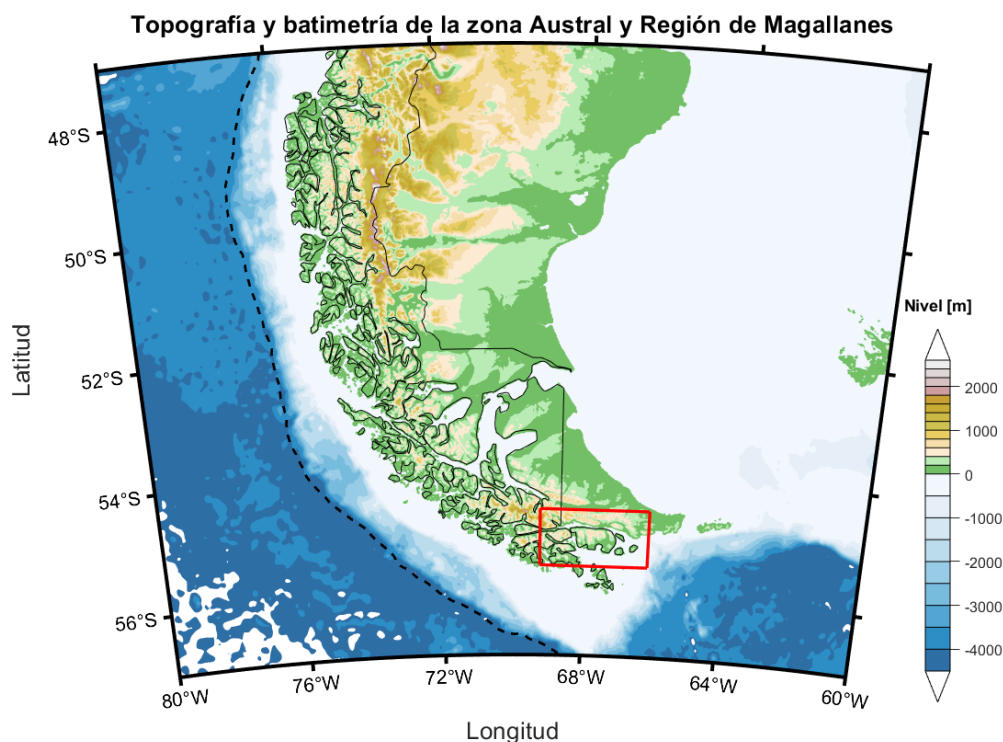


Figura 1.2.1: Topografía y batimetría de la Región de Magallanes (bordada por la línea negra continua). La línea negra segmentada representa la fosa (proyección Lambert y datos topográficos de NOAA). El cuadro rojo resalta la isla Navarino. *Fuente:* propia.

1.2.1. El clima de la Región de Magallanes

El clima, como una descripción a largo plazo del tiempo atmosférico, permite caracterizar una región a gran escala. La composición geológica de la región tiene sus orígenes en las antiguas cuencas de Rocas verdes y Magallanes, con su posterior gradual continentalización ([Ortuya and Leppe, 2016](#)), y el alzamiento de la parte final de la Cordillera de los Andes son fundamentales para esta definición climatológica. La pluviometría va decayendo desde el suroeste al noreste, debido a que los frentes suelen venir desde el oeste y el suroeste, presionados por los flujos circumpolares ([Aguirre et al., 2018](#)), dejando caer la precipitación en las primeras tierras mientras la masa de aire asciende la fragmentada cordillera, con una muy fuerte influencia orográfica (figura 1.2.1). Zonas como la Isla Guarello, en el lado occidental, registran más de 7.300 mm/año ([Ashworth and Markgraf, 1989](#)), uno de los lugares más lluviosos de Chile; y otras como Punta Delgada, en el extremo oriental, no superan los 250 mm/año ([Santibáñez, 2017](#)). De esto, se



Figura 1.2.2: Fotografía panorámica de la costa norte de la Isla Navarino. Se ve Puerto Williams (centro-derecha de la imagen); canal Beagle y la Isla Grande de Tierra del Fuego (al frente) en un día de verano austral. *Fuente:* propia.

puede separar la región en dos grandes subregiones: Magallanes occidental-austral y Magallanes oriental-boreal. En la primera predomina el clima húmedo, con clasificación de tundra o templado frío; en la segunda es donde vive la mayor parte de la población y presenta un clima de pampa o estepárico frío predominante. En la subregión occidental-austral, donde se encuentra la isla Navarino, los gradientes de precipitación se expresan en la Reserva de la Biosfera Cabo de Hornos aumentando hacia el suroeste (Rozzi et al., 2007) con las isoyetas de 500 mm tocando Tierra del Fuego y las de 2500 mm anuales en el extremo occidental del Canal Beagle. Las temperaturas son, por lo general, bajas y con poca amplitud anual.

Los suelos son en su mayoría paisajes naturales como turberas y praderas en un 77 % de la superficie, le siguen las vegas o llanuras aluviales con un 12 % y bosques de uso ganadero con un 8 % (Servicio Agrícola y Ganadero, 2018), aproximadamente.

La importancia social del conocimiento del clima en la región se puede ver en la prensa. La caída de nieve, que cada año puede ir desde nevadas débiles (IDEAL, 2020) a intensas ventiscas (Austral, 2019) (aunque con una tendencia a la baja), pueden significar la pérdida del sustento de toda una temporada para algunas familias magallánicas. La temporada de nieve va desde mayo hasta septiembre en la zona de Puerto Williams, y acortándose mientras se avanza hacia el norte de esta. Se han hecho estudios de la variabilidad de este evento como un indicador climático (Aguirre et al., 2018), los cuales suelen tener problemáticas debido a la poca densidad de estaciones meteorológicas *in-situ* y datos. En el mismo tópico, la distribución de recursos hídricos es de las más altas de todo Chile. Junto a la vecina región de Aysén poseen una escorrentía de 20.258 m^3/s , un 69,3 % del total del país, distribuido en una población conjunta de aproximadamente 273 mil habitantes, un 1,5 % de la población nacional (Fernández and Gironás).

Los vientos suelen ser muy fuertes. Estudios han considerado vientos cercanos a 100 km/h al menos una vez al año en la zona de pampa (Pérez et al., 2019), con promedios estivales cercanos a los 20 km/h . En su mayor parte, provenientes del suroeste tal y como los frentes subpolares. La Figura 1.2.2 muestra una fotografía panorámica capturada a una altitud de $\approx 600\text{ msnm}$, en ella, el norte se encuentra en el centro, en dirección al sol; el oeste en la izquierda y el este a la derecha de la imagen. Se puede observar la vegetación típica de la zona, *Nothofagus*, con un límite arbóreo (altitud máxima a la que crece vegetación arbórea) cercano a la altitud en que se tomó la fotografía, de los límites más bajos del hemisferio.

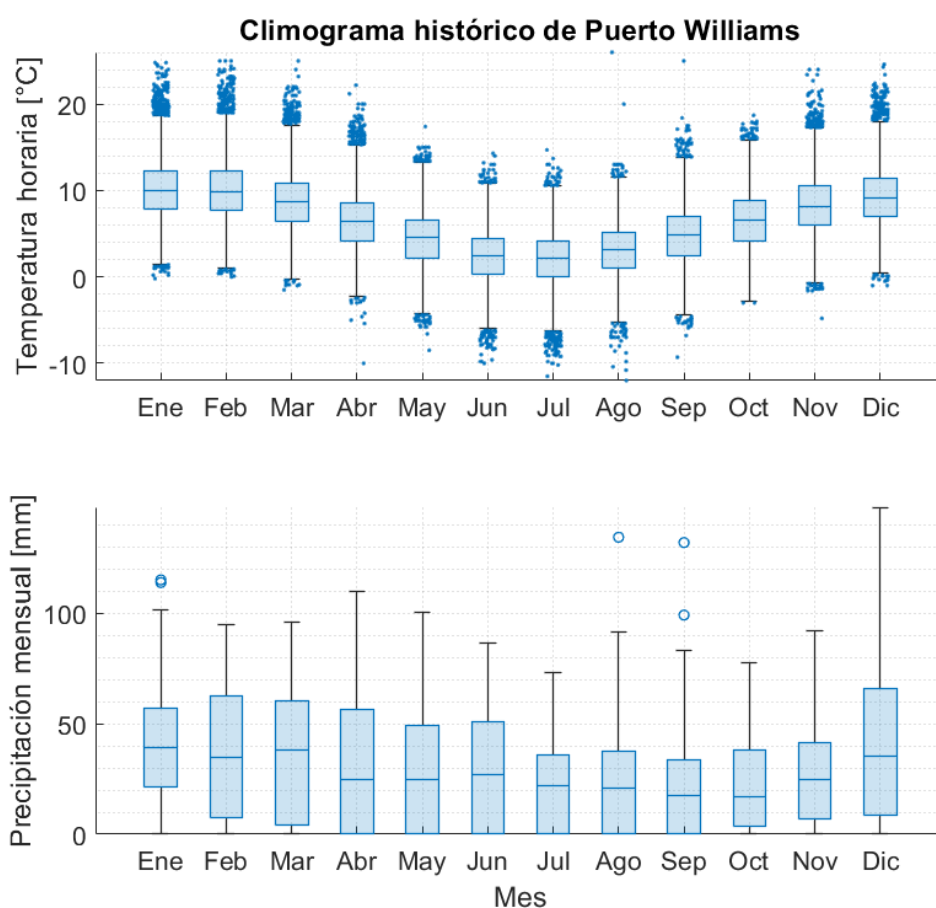


Figura 1.2.3: Climograma para Puerto Williams en base a los datos de la estación DMC Guardiamarina Zañartu desde 1968 para las temperaturas y desde 1961 para la precipitación. Se le ha eliminado un dato extremo para mejor visualización (ver anexo A1). *Fuente:* propia.

En Puerto Williams, específicamente, las temperaturas poseen una amplitud promedio de $7,8^{\circ}\text{C}$ entre el mes más cálido (enero) con 10°C y el más frío $2,2^{\circ}\text{C}$

(julio), lo que en comparación a otros lugares de Chile, es un valor bajo. La Figura 1.2.3 muestra un climograma con todos los datos históricos de la estación del aeródromo Guardiamarina Zañartu desde 1961. En el caso de las precipitaciones, la Figura omite los acumulados mensuales en los cuales haya algún dato faltante, con el propósito de no generar una subestimación de los datos. Las precipitaciones están bien repartidas a lo largo del año, con un leve incremento en los meses cálidos y principios de otoño.

1.3. Los modelos numéricos

El uso de modelos numéricos en el sur de la Patagonia no es nuevo. Estudios como Carrasco-Escaff et al. (2022) han usado el modelo RegCMv4 en campos de hielo, en que han descrito la influencia de sistemas de baja presión en el Paso de Drake con un balance positivo de masa en superficie (acumulación de nieve y hielo), mediante resoluciones de alta resolución (de hasta 450 m). Para lidiar con la validez de sus resultados, se realizaron compensaciones de los modelos en base a primeras simulaciones. El sesgo generalizado de temperaturas medias estuvo en el orden de 1°C.

La técnica de *downscaling* ya sea dinámica o estadística requiere la conciencia de que es un método que *puede* mejorar las simulaciones numéricas por cuanto se agregue también nueva información que cumpla los estándares definidos para cada proyecto. Los nuevos datos y supuestos agregan de por sí incertidumbre al sistema, que debe tratarse con la debida validación y verificación. Informes previos (Resiliencia Africana y Latinoamericana al Cambio Climático, 2014) han mencionado por lo menos la necesidad de consistencia de las relaciones físicas y dinámicas de la atmósfera con el tiempo y el espacio. Para su desenvolvimiento es necesario dividir la superficie terrestre en casillas (Figura 1.3.1).

Los métodos de *downscaling* estadístico tienen diferentes enfoques entre ellos. En algunos estudios (Araya-Osses et al., 2020), se pueden realizar análisis de comparación análogos entre patrones sinópticos en diferentes días con condiciones similares. Aunque estos métodos no permiten hacer un enfoque en pequeña escala (escala local) por la naturaleza de la escala sinóptica. La evaluación de estos métodos es igual de importante que la evaluación de métodos que involucren modelos numéricos dinámicos.

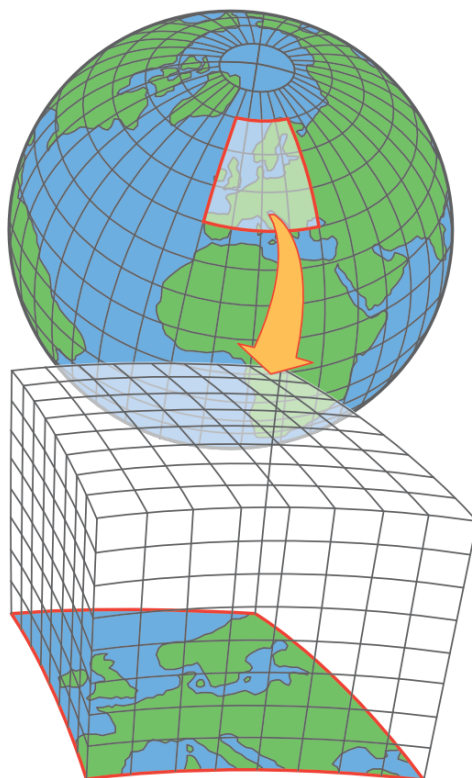


Figura 1.3.1: División de la superficie terrestre en modelos globales (arriba) y su escalamiento a modelos regionales (abajo). *Fuente:* [Instituto de meteorología de Finlandia](#)

1.3.1. Estado del arte

Algunos estudios han realizado verificación y validación en Patagonia a simulaciones numéricas climáticas a escala regional como [Bozkurt et al. \(2019\)](#) en que en su experimento con resolución espacial de $0,09^\circ$ ($\sim 10km$) hallaron en la zona correspondiente a la Región de Magallanes una sobrestimación de la precipitación orográfica, a diferencia de lo que se veía en su experimento de menor resolución espacial. En las temperaturas el cambio para las climatologías anuales fue mínimo respecto a su modelo de referencia (CR2MET) pero al momento de discriminar por estación del año se evidenciaron sobrestimaciones en invierno (JJA) y subestimaciones en el resto del año. Es decir, una disminución de la amplitud de temperatura superficial media (máxima y mínima) a escala anual.

Áreas del conocimiento como la ecología han constatado la necesidad de contar con modelos climáticos regionales (RCM) en esta zona de la Patagonia ya sea por la complejidad del terreno, la baja densidad poblacional y/o baja densidad de

estaciones *in-situ* (Aguirre et al., 2021). Visualizando interés en la representación de gradientes altitudinales y la adición de salidas climáticas como la humedad atmosférica, el punto de rocío y la cantidad de agua caída en estado sólido, entre otras. En biología, el efecto del cambio climático sobre ciertas especies de insectos ha también demostrado la relevancia del estudio del clima en mayor resolución para la zona del sur de la Región de Magallanes (Contador et al., 2014). La asimetría de información entre el hemisferio norte y el hemisferio sur orientan a proseguir con esta escuela de pensamiento, incorporando estudios de gradientes latitudinales, altitudinales, entre otros en las diferentes cuencas de la zona.

La importancia de traspasar la información desde Modelos climáticos globales a Modelos climáticos regionales (de GCM a RCM) con grillas de 15 km de largo se ha demostrado a partir de diferencias sustanciales en el calentamiento en zonas cercanas al extremo sur del continente americano como la Península Antártica. Las diferentes parametrizaciones disponibles en modelos como Polar-WRF (un derivado de WRF) y el mejor detalle en aspectos locales del terreno serían los principales motivos del cambio en las salidas de estos modelos (Bozkurt et al., 2021).

En Antártica, el proyecto del Sistema de Predicción de Mesoescala Antártica (AMPS, por sus siglas en inglés) ha trabajado diferentes simulaciones para modelos numéricos, como MM5, y se llegó a resoluciones de 3,3 km sobre el continente, 10 km sobre la Península Antártica y de 90 km sobre Patagonia (Powers et al., 2003). También este método ha permitido explorar el pronóstico en tiempo real, con resultados en el borde de dominio para el sur del continente americano (Bromwich et al., 2005).

Informes internacionales para el *United Kingdom Falkland Islands Trust* han destacado la poca densidad de estaciones meteorológicas *in-situ* en Patagonia y la atribuyen a la falta de desarrollo económico y la poca cantidad de población (P.D. Jones and Lister, 2013). Este mismo informe describe la necesidad específica de datos grillados en la zona con alta resolución (1x1 km) para un modelo enfocado en botánica, específico, en periodos específicos (entre 1961 y 1990), para lo cual se accede a una serie de controles estadísticos de datos observados para extrapolar. En paralelo, se desarrollan RCM que no logran satisfacer la resolución demandada pero de todas maneras son interpolados. Esta cronología plantea en todas sus etapas el gran aporte que pueden llegar a tener las validaciones de modelos



Figura 1.4.1: Supercomputador “Leftraru” del NLHPC

meteorológicos en la zona para investigaciones de diferentes Gobiernos.

1.4. Trabajo en un ambiente HPC

Los modelos numéricos tienen una gran limitante en el contexto de la experiencia de usuario: la capacidad computacional. Al modelar, se resuelven las grandes ecuaciones de forma numérica (no analítica), lo que ocupa muchos recursos. El *High Performance Computing* (HPC), aprovecha la tecnología y la capacidad de supercomputadoras o clústeres de computadoras para abordar problemas que requieren una capacidad de procesamiento masiva. En este caso, los modelos numéricos tienen la capacidad de correr en un cúmulo de núcleos en una fracción del tiempo que tardarían en una computadora tradicional. Es posible asimilar el *software* en estas supercomputadoras, comúnmente asociadas a una cuenta, para llamar comandos referentes a estos programas específicos sin la necesidad de reinstalarlos en cada uno de los usuarios que lo requiera. Así, se tiene una gestión eficaz y eficiente de los limitados recursos. Estos, convierten esta alternativa en una respuesta capaz, pero con limitado acceso, ya que los costos asociados son altos, ya que es necesario montar una gran infraestructura física con almacenamiento adecuado, capacidad justa y ventilación del calor del proceso perfecta en todo momento, las 24 horas del día ([Severance and Dowd, 2010](#)).

El trabajo en un supercomputador requiere preparación y capacitación ([Macdonell and Lu, 2007](#)). Por lo general, son sistemas con sistemas operativos Linux (en alguna de sus distribuciones) y se puede explicar fácilmente al revelar que

este sistema operativo (SO) fue diseñado para su uso en supercomputadores (Gerofi et al., 2019). Linux es de los más importantes sistemas operativos para computadores, después de Windows y MacOS. Si bien existen diferentes formas de definirlo, es un SO en el que la automatización de tareas, y la configuración profunda del uso del ordenador son su fuerte (Kofler, 2014). Para esto, se utilizan códigos y programas en una terminal, que pueden resultar con frecuencia costosos al comparar con SOs que priorizan el uso mediante interfaz gráfica (GUI). Su uso es heterogéneo: si bien en computadores de escritorio representa poco más del 1 %, en supercomputadores su uso fue del 97 % de los dispositivos en 2015 y del 100 % en 2023 (*TOP500* (enlace revisado al 8 de noviembre de 2023)). Por lo general, el uso de supercomputadores implica conocer estos comandos de Linux ya que se carece de interfaz gráfica en la que el ratón del computador hace la mayoría del trabajo.

La meteorología trata con sistemas sumamente complejos, caóticos y dinámicos. El procesamiento requerido para estos cómputos es acorde para desafiar a los supercomputadores más modernos. En ellos, es posible mejorar las resoluciones espaciales y temporales de las simulaciones, disminuyendo el tamaño del pixel o celda de la malla invisible y tridimensional de la Figura 1.3.1.

1.4.1. Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC)

El Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC) es un centro chileno de supercomputación. Es el que tiene mayor capacidad de cómputo del país y se codea con otros centros de supercomputación del continente. Su misión es “satisfacer la demanda científica nacional de computación de alto rendimiento, ofreciendo servicios de alta calidad y promoviendo su uso en las problemáticas de investigación tanto básica como también aplicada” (*página web*, revisada al 8 de noviembre de 2023).

Las principales áreas de impacto del NLHPC en Chile son la física de la materia, la química teórica y la nanotecnología, con importantes menciones a la bioinformática, la astronomía y la climatología/oceanografía. De esta última, se han comprobado su uso para aplicar el modelo atmosférico WRF y evaluar las condiciones meteorológicas de diversos lugares. Este centro de modelamiento ha sido una parte integral de esta investigación, proporcionando el acceso a recursos de HPC

necesarios para ejecutar el modelo a alta resolución espacial y temporal, lo que ha permitido obtener los resultados en tiempo acorde a la realización de este escrito.

Se compone de dos clústeres integrados entre sí: Guacolda y Leftraru (Figura 1.4.1). Entre ambos, conforman un supercomputador que cumple todas las características para serlo, como una capacidad de almacenamiento de 266 Tflops, una rápida red de interconexión y una alta velocidad de acceso a disco. En total, se cuenta con 5236 núcleos de cómputo, entre 192 nodos. Entre los dos, suman más de 22 TB de RAM (*página web*, revisada al 8 de noviembre de 2023).

1.5. Utilidades de simular el pasado

El último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ha enunciado que el calentamiento global reciente, producto principalmente de los gases de efecto invernadero, ha sido causado inequívocamente por las actividades humanas y ha provocado un aumento de 1,1°C en la última década respecto al periodo entre 1850 y 1900 (IPCC, 2023). Las simulaciones numéricas permiten entender mejor el clima del pasado y, así, utilizar métodos similares para proyecciones del futuro con mayor fidelidad. Actualmente, se realizan proyecciones como las del IPCC a mediano-largo plazo (año 2100, 77 años).

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo General

Simular y evaluar, mediante modelos numéricos, la atmósfera de la región subantártica americana, para el mes de mayo del año 2020, logrando así información de línea de base para investigaciones futuras.

2.2. Objetivos Específicos

1. Configurar el modelo WRF para la zona de estudio
2. Realizar simulaciones en un ambiente HPC
3. Validar las simulaciones en temperatura y precipitación con observaciones y otros estudios
4. Definir preguntas de investigación futura en base al análisis realizado

Capítulo 3

Métodos

Se modela a partir de datos del modelo numérico de predicción meteorológica FNL descargados para 2020, en el modelo de *Weather Research and Forecasting* (WRF). Los mapas fueron computados por las funciones del paquete `m_map` (Pawlowicz, 2020). Los datos de batimetría y topografía de alta precisión fueron extraídos de un archivo descargado de la página web del Servicio Geológico de Estados Unidos (*USGS* por sus siglas en inglés). La resolución de topografías utilizada por los diferentes dominios se ve representada gráficamente en la Figura 3.0.1 para cada uno. Se incluye también un dominio 3, el cual no pudo ser simulado exitosamente por límites computacionales y temporales.

3.1. El Modelo WRF

El modelo numérico de la atmósfera WRF (Modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo Atmosférico, por sus siglas en inglés), permite simular en alta resolución las condiciones de la atmósfera en momentos determinados a partir de condiciones iniciales de baja resolución (Skamarock and Klemp, 2008). Es un modelo no hidrostático, es decir, que no sigue el balance hidrostático al resolver las ecuaciones, permitiendo un flujo de material y energía libre entre diferentes celdas. Las celdas se corresponden con una grilla de Arakawa-C (Figura 3.1.1), y en sus bordes ocurren los flujos, en la imagen representados como velocidades. La Figura 3.1.2 muestra el funcionamiento de las coordenadas verticales sigma (σ) con respecto al terreno (Skamarock et al., 2005).

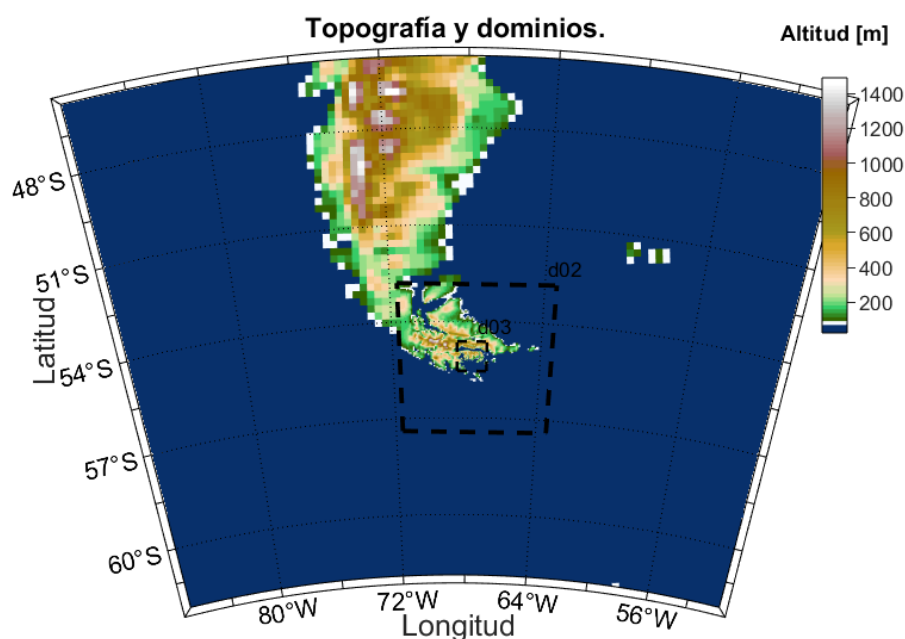


Figura 3.0.1: Topografía y batimetría de la Patagonia para las simulaciones. Se ven representados el primer dominio de la simulación WRF (totalidad). El segundo dominio (rectángulo d02) permitió crear el tercer dominio (rectángulo d03). Este último es aquel con el que se tratan los datos.

El funcionamiento de WRF en su variante ARW se ilustra en la Figura 3.1.3. Los modelos anidados poseen un subconjunto de los atributos de los dominios principales, con el objetivo de aumentar la resolución de otras variables, es decir, es una manera computacionalmente eficiente de aumentar la efectividad del modelo de manera indirecta. Se corren en simultáneo (a diferencia de **ndown**) con el dominio principal, lo que abre la posibilidad de que se retroalimenten entre ambos (o más que ambos). Es de esperar, por lo tanto, que los modelos con mayores resoluciones tengan un mejor desempeño en el modelado de las temperaturas (Rojas, 2006) para la mayoría de los estadísticos que se usen para evaluar, pero en el caso de las precipitaciones, el costo computacional suele ser muy elevado al aumentar la resolución, por lo que no es recomendable a escalas estacionales (varios meses). Se han hecho estudios comparando diferentes parametrizaciones en que también añaden al repertorio una simulación en que no se utiliza ninguna parametrización con el propósito de un análisis más completo, el que sí tiende a tener mejor desempeño a resoluciones menores a 15 km (Pennelly et al., 2014),

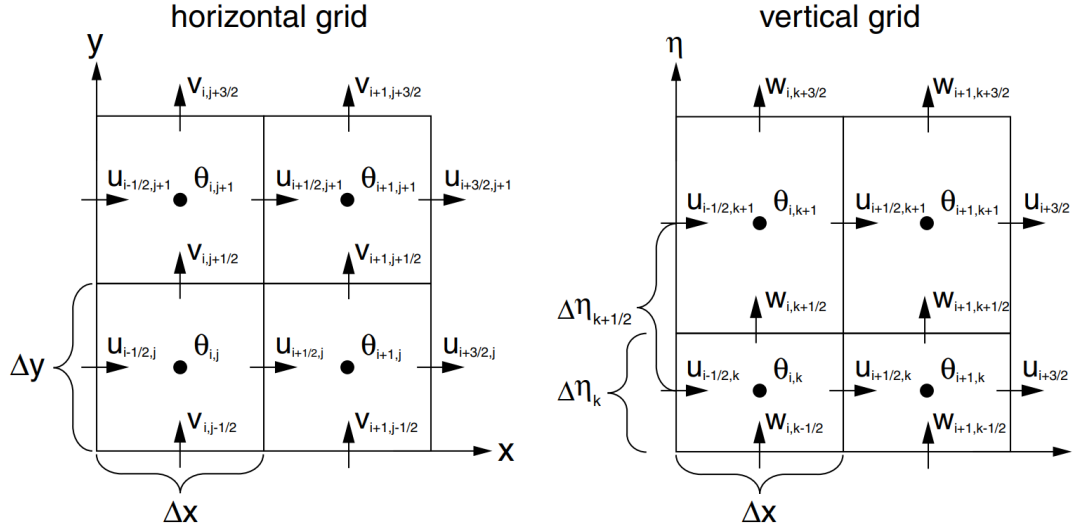


Figura 3.1.1: Celdas de Arakawa-C horizontales (izquierda) y verticales (derecha).
Fuente: extraído de Skamarock and Klemp (2008).

aunque se vuelve incapaz de representar las celdas convectivas para precipitación (Gilliland and Rowe, 2007). Se ha asegurado que las diferentes parametrizaciones físicas tienen efectos tanto en las distribuciones de los hidrometeoros como en los procesos sub-grilla como la colisión, agrupamiento o revolvimiento de estos (Bao et al., 2019). Es de esperar, además, que los estadísticos y valores de la precipitación se vean más afectados por los cambios en parametrizaciones de cúmulos que en las microfísicas (Zittis et al., 2014). La técnica de downscaling o escalamiento dinámico es un método que puede mejorar las simulaciones numéricas en la medida que se agregue también nueva y buena información al modelo.

3.2. Configuración de los modelos

Las configuraciones para los archivos `namelist.wps` y `namelist.input` estándar que se usó en la última simulación pueden encontrar en el anexo A4, cabe destacar que el dominio anidado no posee parametrización de cúmulos ya que a resoluciones menores a 10 km , estos se describen explícitamente. En resumen, la tabla 3.2.1 muestra las principales características del modelo y las condiciones iniciales (CI).

En este trabajo, el enfoque será en las variables de temperatura y precipitación. Esto ya que son las variables básicas que registran las estaciones *in-situ* ubicadas dentro de la isla Navarino, lo que permite un análisis comparativo.

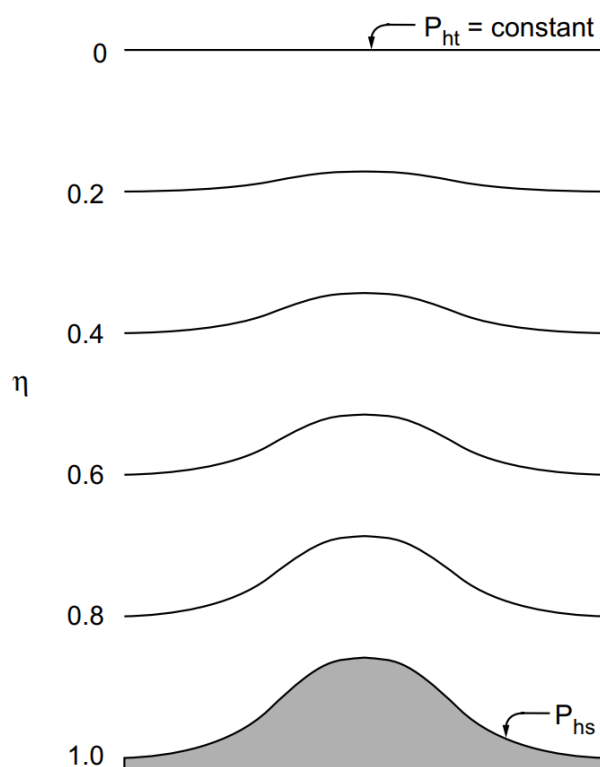


Figura 3.1.2: Funcionamiento de las celdas verticales en base a coordenadas σ al toparse con terreno. *Fuente:* extraído de Skamarock and Klemp (2008).

Dominio	1 Principal	2 Anidado
Modelo	WRF-ARW	WRF-ARW
Topografía	NOAA	NOAA
Resolución vertical	34 niveles	34 niveles
Resolución horizontal	9 km	3 km anidado
Condiciones de borde	FNL	FNL
Frecuencia	6 horas	6 horas
Período de simulación	33 días	32 días
Spin-up	48 horas	24 horas
Frecuencia de salida	6 horas	1 hora
	Diferencia de 3 horas al horario UTC	

Tabla 3.2.1: Configuración de los modelos y datos.

3.2.1. Entorno físico de trabajo

Este estudio fue realizado en dependencias del **Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC)**, el cual es el centro de cómputo más grande y de mayor capacidad de Chile y uno de los mayores de Sudamérica. Posee dos clústeres intercomunicados entre sí, Guacolda y Leftrarú,

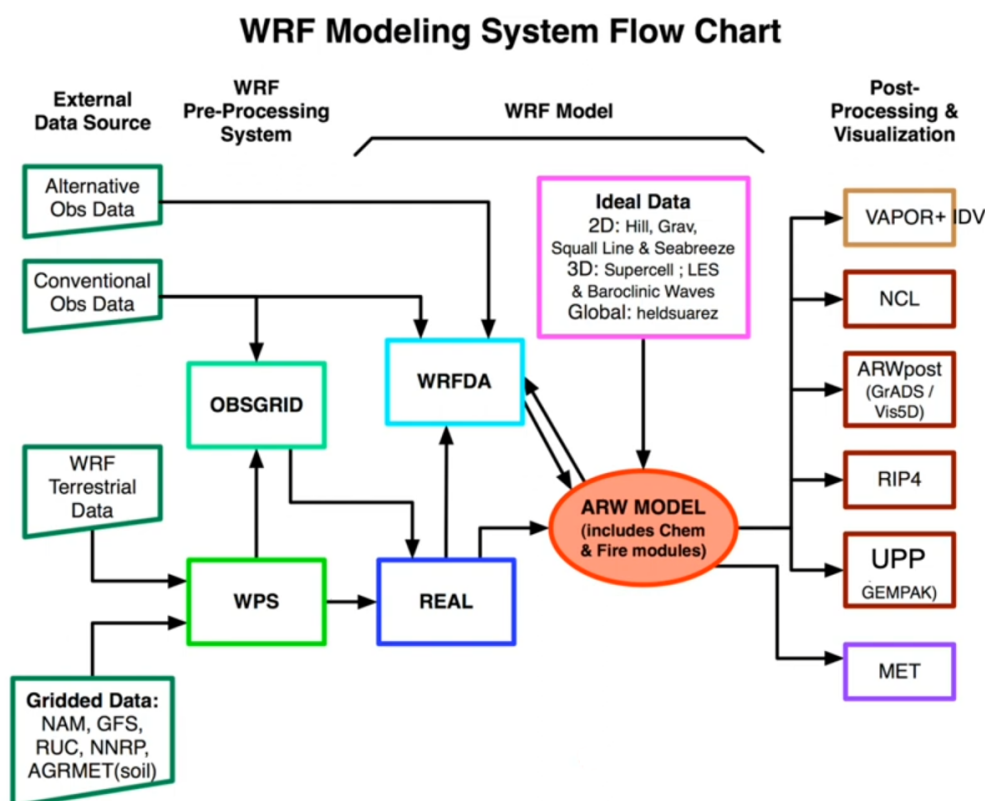


Figura 3.1.3: Diagrama de flujo del funcionamiento de WRF. *Fuente:* extraído de WRFHelp NCEP-NCAR.

que suman 5236 núcleos de cómputo distribuidos en 192 nodos, y con 16.235 GB y 6.308 GB RAM, respectivamente.

En específico, los cálculos del modelo WRF para este estudio fueron realizados en su totalidad en Leftraru a través de una cuenta concedida de forma gratuita por un año con 15 mil horas de cómputo a través de la Universidad de Concepción y la Universidad de Magallanes para el desarrollo de esta tesis. El total de horas de trabajo utilizadas para esta tesis fue valorizado con más de \$690.000 pesos chilenos (CLP), y subvencionado por el NLHPC en su totalidad. La conexión al trabajo en Leftraru se realizó a través de una máquina remota en un ambiente Linux Ubuntu, con el comando `ssh`, que permite conexión segura entre dos sistemas. La sesión utilizada fue la suministrada por NLHPC al momento de suscribir una cuenta, y se puso a disposición una carpeta `home` con 50GB de almacenamiento, que luego de una solicitud fueron aumentados a 100GB. Ya dentro, fueron subidos los archivos básicos necesarios, la topografía a utilizar en el formato adecuado

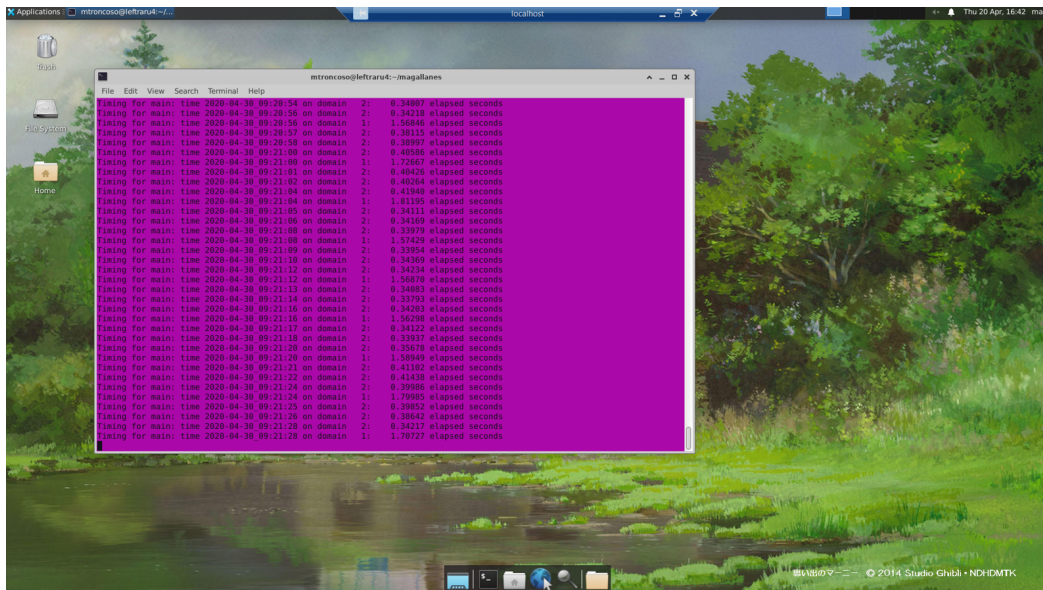


Figura 3.2.1: Captura de pantalla del proceso de cómputo de WRF en Leftraru (NLHPC).

(binario) y los archivos `namelist` que definen los parámetros básicos del modelo WRF. Finalmente, se hace un llamado al software (preinstalado en los discos de Leftraru), con los comandos:

```
ml purge
ml icc/2019.2.187-GCC-8.2.0-2.31.1 impi/2019.2.185
ml WPS/4.1-dmpar
```

y, de esta manera, ya es posible ejecutar las instrucciones de WRF.

Primero, el comando `geogrid.exe` lanza la aplicación que crea los archivos de geografía del lugar. Una vez termine el proceso con el enunciado. “Successful completion of geogrid.”, se deben obtener, descargar y subir los archivos de condiciones iniciales, en este caso, FNL, que funciona con los mismos comandos que los archivos de condiciones iniciales GFS, con la instrucción `sftp`. Luego, para transformar los archivos del formato GRIB2 al formato NetCDF, es necesario lanzar la instrucción

```
./link_grib.csh /home/usuario/fnls/fnl_20200
```

que crea enlaces a los archivos con los nombres consecutivos `GRIBFILE.AAA`, `GRIBFILE.AAB`, etc. Posteriormente, se lanza la instrucción `ungrib.exe` para transformar estos archivos a un formato admitido por WRF y se recorta el dominio definido previamente en el archivo `namelist.wps` con el comando `metgrid.exe`.

Finalmente, se lanza la pre-simulación WRF con `real.exe` y la simulación en sí con la línea siguiente, en un archivo `run_wrf.bash`:

```
srun wrf.exe
```

que debe ser acompañado dentro del comando:

```
sbatch run_wrf.bash
```

y que permite identificar la simulación que irá a lista de espera para posteriormente ser trabajada por los servidores. El comando `squeue` permite visualizar el estado del programa y puede ser controlado en tiempo real con el comando

```
tail -f rsl.error.0000
```

cuya salida se muestra en la Figura 3.2.1.

3.2.2. Configuración de las parametrizaciones

Para cada una de las diferentes simulaciones se utilizaron diferentes parametrizaciones físicas, estas están definidas, o diferenciadas, en la tabla 3.2.2. Las parametrizaciones físicas fueron escogidas en base a dos principios: la adaptatividad de la parametrización para la zona y la utilidad práctica de la simulación (menores problemas computacionales). En este sentido, para las parametrizaciones de microfísicas se optó por LIN (Lin et al., 1983); la radiación de onda larga y corta del *Esquema RRTMG* (Iacono et al., 2008); las parametrizaciones de capa superficial de Janjic Eta basada en Monin-Obukhov (Janjić, 1994); las parametrizaciones de terreno-superficie de Noah (Niu et al., 2011); las parametrizaciones de capa límite TKE Mellor-Yamada-Janjic (Eta) (Janjić, 1996; Janić, 2001) las parametrizaciones de cúmulos de Tiedke (Sherwood et al., 2013; Luo and Hoteit, 2011), además del valor sin parametrización de cúmulos EX.

3.3. Datos

Los datos de mediciones con los cuales se compararon los modelos fueron extraídos del *sitio web* del Explorador Climático del CR2. La recolección de los datos de temperatura (máxima, mínima y media) y precipitación, son obtenidos desde las

Parametrización física utilizada	Nombre técnico	Primer dominio		Segundo dominio	
		Núm.	Ref.	Núm.	Ref.
Microfísicas	mp_physics	2	Lin et al. (1983)	2	Lin et al. (1983)
Radiación de onda larga	ra_lw_physics	4	Iacono et al. (2008)	4	Iacono et al. (2008)
Radiación de onda corta	ra_sw_physics	4	Iacono et al. (2008)	4	Iacono et al. (2008)
Llamados de radiación	radt	30	-	30	-
Capa superficial	sf_sfclay_physics	2	Janjic (1994)	2	Janjic (1994)
Terreno-superficie	sf_surface_physics	2	Niu et al. (2011)	2	Niu et al. (2011)
Capa límite	bl_pbl_physics	2	Janic (2001)	2	Janic (2001)
Llamados de capa límite	bldt	0	-	0	-
Cúmulos	cu_physics	6	Luo and Hoteit (2011)	0	-
Llamados de cúmulos	cudt	5	-	5	-
Capas de suelo	num_soil_layers	4	-	4	-
Superficie urbana	sf_urban_physics	0	-	0	-

Tabla 3.2.2: Configuración de los parámetros físicos en la simulación para los dominios según la numeración para WRF.

plataformas de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y la Dirección General de Aguas (DGA).

Nombre	Código	Latitud	Longitud	Elevación	Variables medidas
Guardiamarina Zañartu	S1	54,932°S	67,616°O	12 m	Temp., preci.
Puerto Navarino	S2	54,926°S	68,324°O	10 m	Temp., preci.
Río Róbalo	S3	54,947°S	67,639°O	80 m	Temp., preci.
Puerto Toro	S4	55,082°S	67,076°O	10 m	Temp., preci.
Ushuaia	S5	54,843°S	68,296°O	22 m	Temp.
Río Róbalo Alto	S6	54,977°S	67,674°O	360 m	Preci.

Tabla 3.3.1: Estaciones *in-situ* cuyos datos fueron utilizados. La ubicación de cada una es representada en la Figura 3.3.1.

Las estaciones de monitoreo fueron seleccionadas por estar dentro del dominio 2, para facilitar la comparación entre el modelo y los datos *in-situ*, como resume la Tabla 3.3.1. Para temperatura, se utilizaron las estaciones de Aeródromo Guardiamarina Zañartu propiedad de DGAC/DMC, Puerto Navarino de DGA, Río Róbalo de DGA, Puerto Toro de DGA y Ushuaia del SMN argentino.

Para la precipitación, se utilizaron las estaciones de Aeródromo Guardiamarina Zañartu, Puerto Navarino, Río Róbalo, Puerto Toro y Río Róbalo Alto (de DGA). El mapa de la Figura 3.3.1 representa espacialmente la distribución de estas estaciones de medición en superficie.

3.4. Validación

Analizar el error de un modelo puede considerarse una de las partes más importantes en el desarrollo de uno. Se utilizaron estadísticos de comparación para tener una medida de cuan grande es el desfase o diferencia. Se consideraron los valores observados O y los pronosticados P . También, se utilizaron estadísticos dicotómicos en precipitación para validar los momentos de aciertos y errores del modelo.

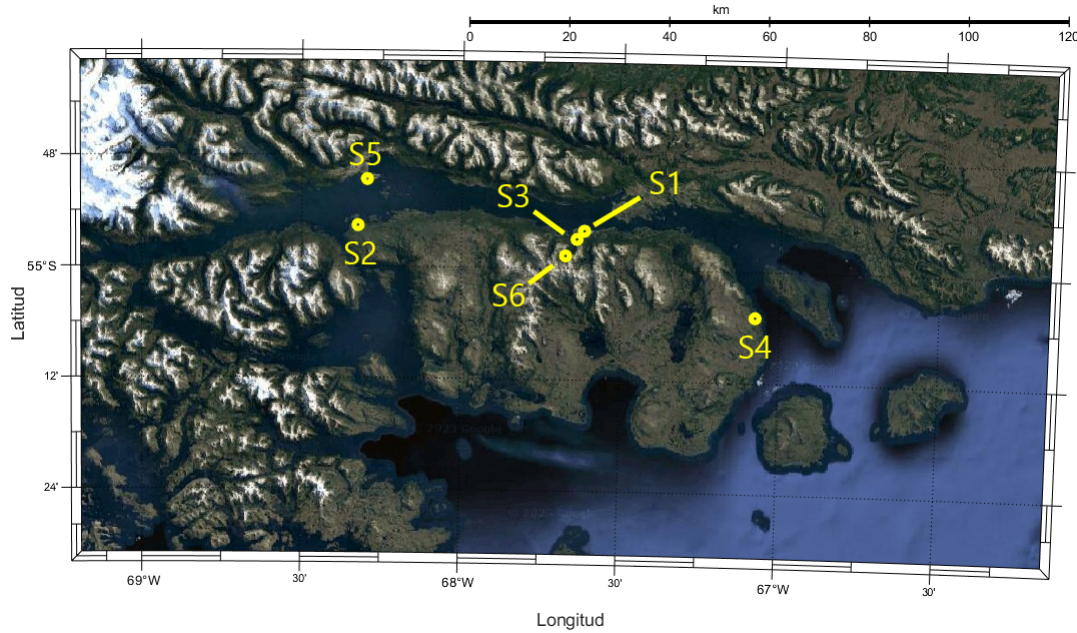


Figura 3.3.1: Mapa de la sección resaltada en rojo de la Figura 3.0.1. En círculos amarillos se resalta la ubicación de las estaciones de la Tabla 3.3.1 con su respectivo código asociado.

3.4.1. Correlación

La correlación permite evaluar relaciones lineales entre las observaciones y los pronósticos, queda descrito por,

$$r = \frac{\sum (P - \bar{P})(O - \bar{O})}{\sqrt{\sum (P - \bar{P})^2} \sqrt{\sum (O - \bar{O})^2}}, \quad (3.4.1)$$

sus valores se mueven entre -1 y 1, siendo ambos extremos calces perfectos entre las varianzas (inverso para -1) y el valor 0 un calce lineal nulo.

3.4.2. RMSE

El RMSE describe el error en unidades de la variable. Su efectividad ha sido estudiada en el contexto de modelación (Harmel et al., 2014). Se describe como la raíz cuadrada del MSE, en la ecuación 3.4.2,

$$RMSE = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}, \quad (3.4.2)$$

y sus valores oscilan entre 0 e infinito, siendo 0 un calce perfecto entre el modelo y las mediciones. Se mide en la unidad de medida de la variable. En este informe, variará entre $[mm]$ y $[mm/h]$.

3.4.3. MAE

El MAE es el error absoluto medio. Corresponde a una medida con las mismas unidades que la variable. Se describe como la ecuación 3.4.3,

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i|, \quad (3.4.3)$$

y sus valores oscilan entre 0 e infinito, siendo 0 un calce perfecto entre el modelo y las predicciones. Es común presentar solo uno de los estadísticos mostrados antes, pero es posible tener información extra al comparar los valores de $RMSE$ y MAE , como describen Legates and McCabe Jr (1999). Valores de $RMSE$ dispares a MAE indican y cuantifican la existencia de valores atípicos.

3.4.4. Precisión

La precisión es un estadístico dicotómico que permite estimar la fracción de los pronósticos que fueron evaluados correctamente. En este caso, será para la cantidad de horas de lluvia que fueron pronosticadas correctamente. Se describe por

$$\text{precisión} = \frac{\text{aciertos} + \text{negativos correctos}}{\text{total}}, \quad (3.4.4)$$

su rango varía entre 0 y 1, siendo el valor ideal 1, por ello, se puede expresar como porcentaje.

3.4.5. Sesgo (o *Bias*)

El *Bias* o sesgo de frecuencia, provee una tendencia del modelo a sub- o sobrepronosticar la ocurrencia de un evento. Su ecuación es tal que,

$$\text{sesgo} = \frac{\text{aciertos} + \text{falsas alarmas}}{\text{aciertos} + \text{perdidos}}, \quad (3.4.5)$$

considerando que los eventos perdidos son aquellos en que no se pronosticó un evento que sí ocurrió. Un sesgo mayor que 1 indica que hubo sobrepronóstico y uno

menor a 1 indica subpronóstico de los eventos. Un sesgo igual a 1 no corresponde a un pronóstico perfecto (Cassola et al., 2015).

3.4.6. Probabilidad de detección

La probabilidad de detección o POD responde a la pregunta ¿qué fracción de las ocurrencias observadas fueron pronosticadas? Y está definido por la ecuación,

$$POD = \frac{\text{aciertos}}{\text{aciertos} + \text{incorrectos}}, \quad (3.4.6)$$

y su valor ideal es 1, mientras que el peor es 0.

3.4.7. Razón de falsas alarmas

La razón de falsas alarmas o FAR es otro estadístico dicotómico que permite identificar la razón de eventos que fueron pronosticados pero no ocurrieron en las observaciones. Su valor se encuentra entre 0 y 1, siendo 0 el mejor calce entre pronóstico y observación. Su ecuación queda definida como,

$$FAR = \frac{\text{falsas alarmas}}{\text{aciertos} + \text{falsas alarmas}}. \quad (3.4.7)$$

3.4.8. Probabilidad de falsa detección

La POFD permite identificar los eventos que fueron pronosticados como ciertos pero que en las observaciones no se vieron. La ecuación,

$$POFD = \frac{\text{falsas alarmas}}{\text{negativos correctos} + \text{falsas alarmas}}, \quad (3.4.8)$$

permite identificar con el valor 0 un resultado ideal, aunque puede estar entre 0 y 1.

Capítulo 4

Resultados

En esta sección, se presentarán y analizarán los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo atmosférico WRF para evaluar las condiciones meteorológicas de la isla Navarino durante el mes de mayo del año 2020. Estos resultados representan el producto del proceso descrito en los métodos, que incluyen recopilación de datos, configuración del modelo y análisis, el adentramiento en un entorno de HPC (Computación de Alto Rendimiento, por su sigla en inglés), y ofrecen una visión detallada de las características atmosféricas en esta desafiante región de estudio.

Reconociendo la escasez de estudios previos en esta zona extrema y la relevancia creciente de comprender el clima local en el contexto del cambio climático, cabe a lugar el proporcionar una evaluación precisa y exhaustiva de las condiciones meteorológicas en la isla Navarino y la correspondencia de estos con el modelo atmosférico WRF. Los resultados aquí presentados representan una valiosa contribución al conocimiento científico en el campo de la meteorología y tienen aplicaciones prácticas en diversas áreas, desde la planificación urbana hasta la conservación de áreas naturales y otros estudios de ecología a pequeña y mediana escala.

A lo largo de esta sección, se presentarán los hallazgos clave relacionados con las variables meteorológicas más significativas, la temperatura y la precipitación. Además, se analizarán las tendencias y patrones, destacando eventos climáticos extremos y características específicas de esta región subantártica.

Es importante destacar que los resultados presentados aquí son, como está bien

descrito en la sección de métodos, el producto de un esfuerzo que involucró la recopilación de datos de diversas fuentes, la configuración del modelo WRF y el análisis minucioso de los resultados. Estos hallazgos contribuirán al entendimiento de las condiciones atmosféricas en la isla Navarino, ofreciendo información valiosa para la toma de decisiones informadas en un contexto de cambio climático y conservación de un ecosistema único en la Reserva de la Biósfera Cabo de Hornos. Teniendo la capacidad de dotar a las investigaciones del lugar con datos meteorológicos de lugares nunca antes vistos.

4.1. Condiciones observadas y simuladas de temperatura

Para validar la simulación de WRF mediante las estaciones bien descritas en la sección 3.3, en cuanto a temperaturas, se procedió a visualizar el comportamiento de esta para cada una de los cinco puntos de comparación a través de la Figura 4.1.1. Es posible atestiguar a primera vista el hecho de que al modelo le es difícil

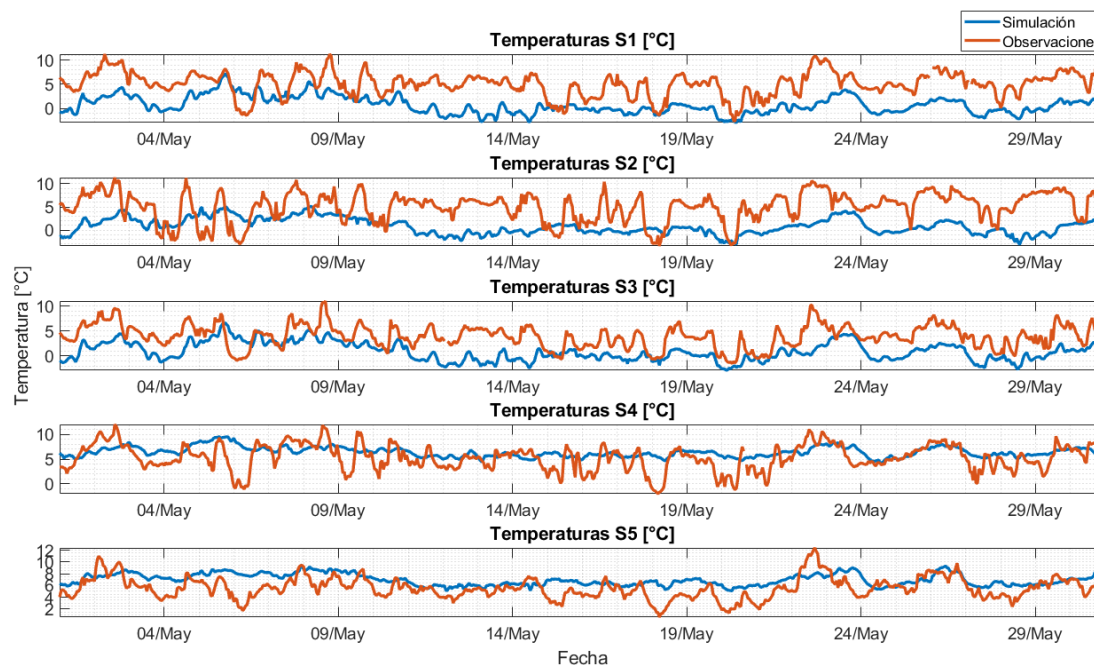


Figura 4.1.1: Temperaturas observadas de las 5 estaciones de monitoreo *in-situ* (naranja) y simuladas para los puntos de grilla más cercanos (azul).

simular el ciclo diario de temperaturas en la mayoría de las estaciones. En la estación S1, por ejemplo, con un coeficiente de correlación de 0,4, la tendencia

instantánea es, por lo general, mal pronosticada. Además, existe un sesgo bien marcado de aproximadamente -5°C . En específico, la estación S2 tiene un peor desempeño con un coeficiente de correlación de solamente 0,1, y la estación de S4 es la de mejor desempeño con 0,43, lo que equivale a un 18,5 % de varianza compartida entre las observaciones y la simulación.

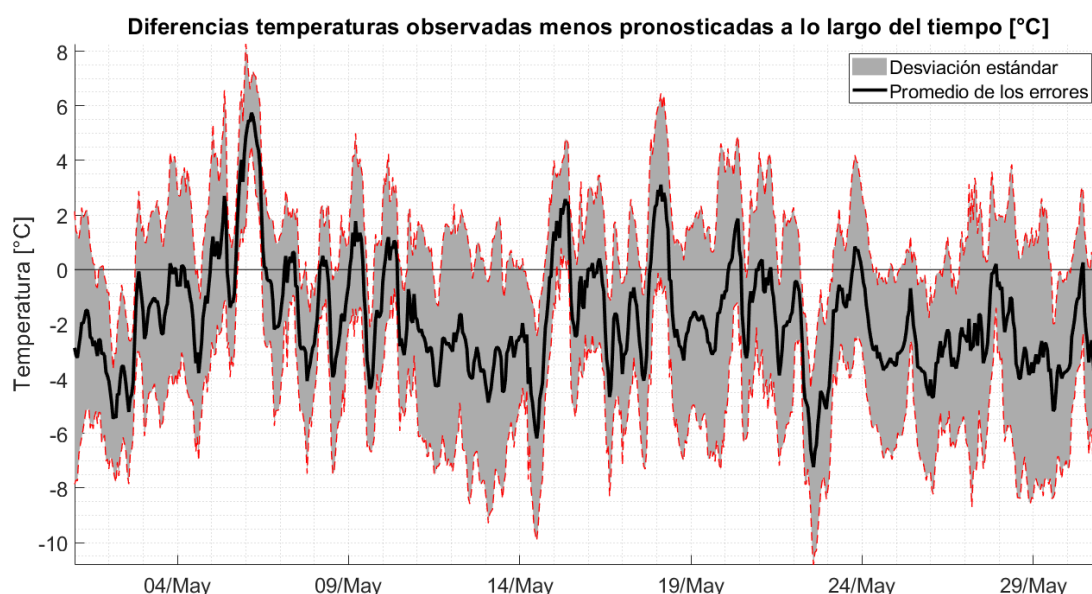


Figura 4.1.2: Diferencias promedio de temperatura entre lo observado y lo simulado para las 5 estaciones de monitoreo. Diferencias positivas indican subestimación de la temperatura por parte de la simulación, y lo contrario indica sobrestimación de la temperatura. En negro, el promedio de los errores respecto al tiempo. Para cada estación en particular, ver Figura A2.1.

Las Figuras 4.1.2 y 4.1.3 permiten entender de mejor manera los resultados a partir de las diferencias obtenidas entre las observaciones y la simulación. La primera, se enfoca en el comportamiento del error a través del tiempo o en alguna fecha dada. Retratando el promedio de los errores en cada instante es posible observar si existen momentos en que el modelo, en su conjunto (para todas las estaciones) tuvo alguna tendencia a sobre o subestimar las temperaturas y es posible a partir de aquí obtener una idea de qué fenómenos meteorológicos de escala sinóptica son mejor o peor resueltos por las parametrizaciones usadas, el modelo, y la zona de estudio. Por ejemplo, para la Figura 4.1.2 en el día 6 de mayo se ve una gran subestimación generalizada de los errores para todas las estaciones de casi 6°C , con una desviación estándar entre estas muy baja de solamente 1,5 unidades.

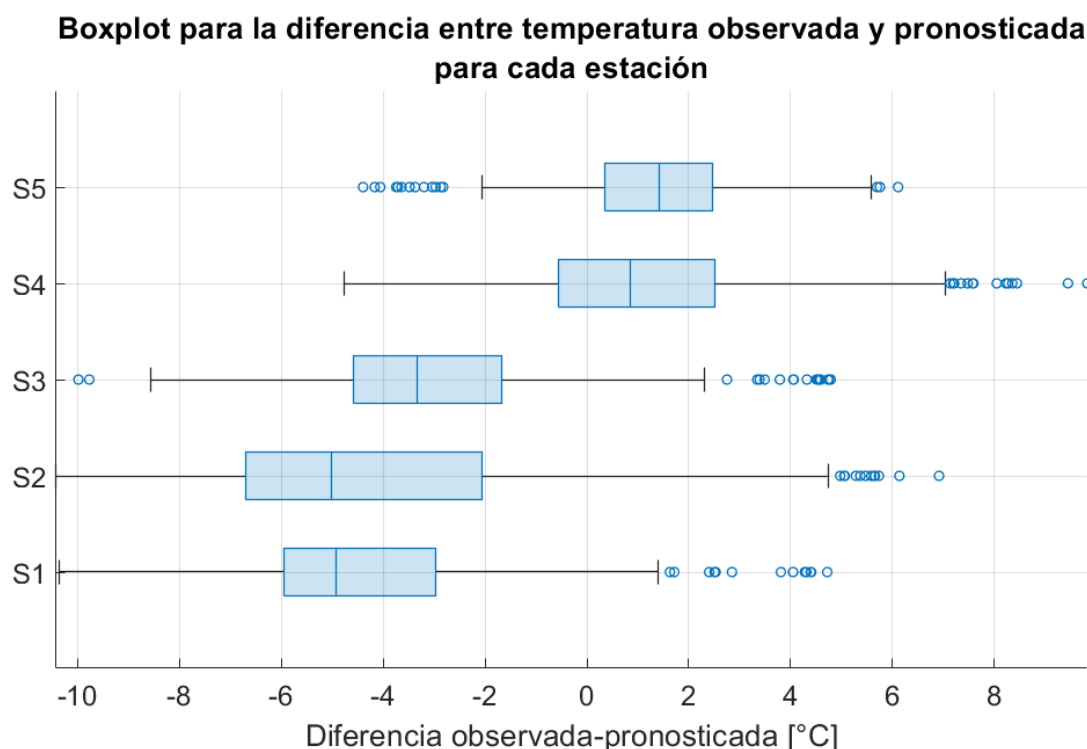


Figura 4.1.3: Boxplot de las diferencias de temperatura para cada estación de monitoreo por separado. Se visualiza que en las ubicaciones de las estaciones S4 y S5 hay un leve subpronóstico y en las estaciones S3, S2 y S1 hay un sobrepronóstico.

La figura 4.1.3, en cambio, se enfoca en el comportamiento del error discretizando a partir del lugar de medición. De esta manera es posible ver que en las ubicaciones de las estaciones de S4 y S5 hay un leve subpronóstico, y en las estaciones S3, S2 y S1 hay un sobrepronóstico de temperaturas. Las estaciones de S5 y S2, a pesar de encontrarse a tan solo 5 km de distancia, tienen un comportamiento del error generalizado para todos los tiempos contrario entre sí. Es frecuente que Ushuaia se vea afectado por vientos ladera abajo de la montaña desde el noreste, que suelen ser cálidos debido a la ubicación de pampa que favorece gran calentamiento en días soleados. En el caso de Puerto Navarino (estación S2), la resolución topográfica del modelo impide caracterizar la gran cantidad de pequeños islotes que conforman la costa cercana, uniéndolos en una gran masa que sobrepasa la línea de costa real en unas decenas de metros. De esta manera, el modelo subestima el efecto costero de regulación térmica positiva, calculando temperaturas más frías de lo que captó la observación *in-situ* con los dos cuartiles centrales entre -7 y -2°C .

El comportamiento de las temperaturas para todas las ubicaciones de las estaciones de monitoreo en su conjunto, independientemente del momento en que se dieron, se

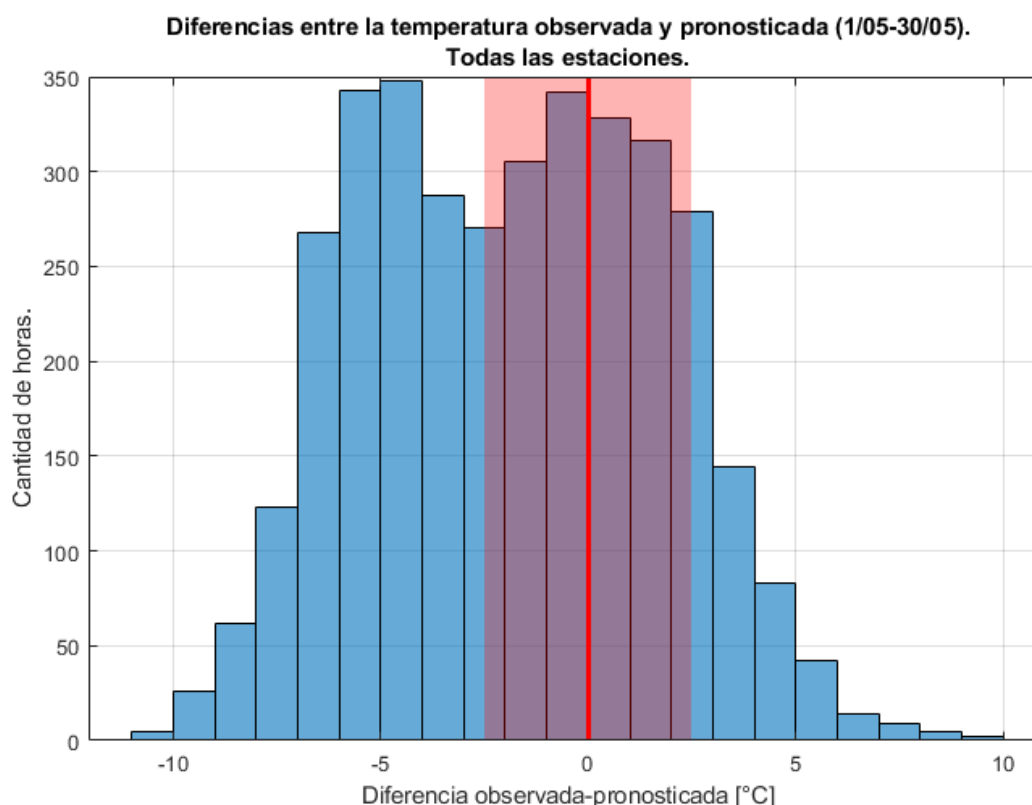


Figura 4.1.4: Histograma de las diferencias de temperatura entre lo observado y lo simulado para las 5 estaciones de monitoreo combinadas. Diferencias positivas indican subestimación de la temperatura por parte de la simulación, y lo contrario indica sobrestimación de la temperatura. El sombreado rojo, de límites $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$, contiene el 44 % de los datos.

muestra en la Figura 4.1.4. Este histograma retrata específicamente las diferencias entre lo observado y lo pronosticado si se consideran las 5 estaciones de comparación disponibles. El histograma tiene un ancho de barra de 1°C , para facilitar hallar un sesgo a simple vista. Con un coeficiente de asimetría de 0,08, se ayuda a entender que los valores escapados de la distribución normal se hallan en el lado derecho de la curva y la cima se encontraría corrida a la izquierda. Al centrar en 0, es posible hallar que el 44 % de los errores se encuentra en el intervalo $\pm 2,5$, y la asimetría de histograma se significa con el 0,08. La media centra la curva en el valor -1,8 y la desviación estándar de los 3605 datos de errores es de aproximadamente 3,6 (Figura 4.1.5).

Para completar el estudio de comportamiento del modelo en la variable de la temperatura, la Figura 4.1.6 retrata un diagrama de dispersión entre las temperaturas observadas y las simuladas. Esto es útil para ver a simple vista la

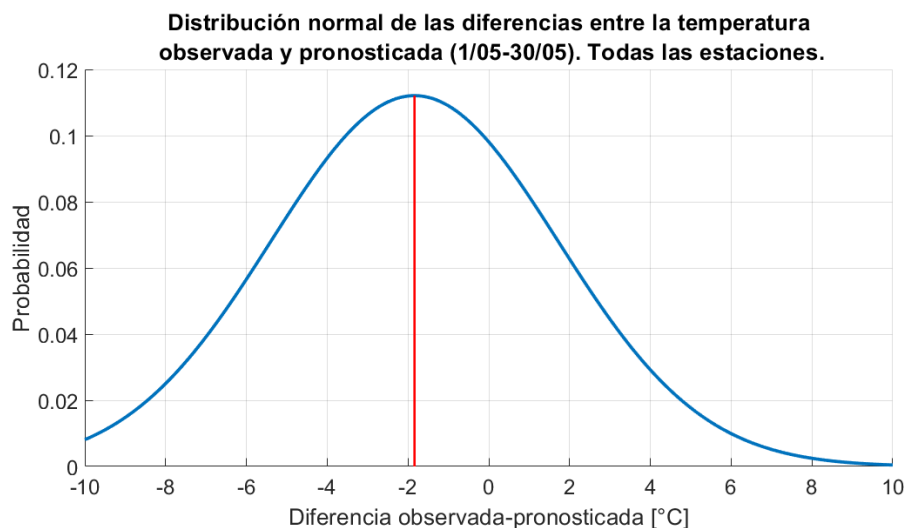


Figura 4.1.5: Ajuste normal de los errores considerando una media $\mu = -1,8^{\circ}\text{C}$; y una desviación estándar $\sigma = 3,6$.

existencia de algún tipo de relación entre las variables. En este caso, es evidente una relación lineal (correlación) débil y positiva, y al calcular el coeficiente de correlación R de aproximadamente 0,3, se presenta para todo el conjunto de estaciones como han ido confirmando todos los estadísticos. Al discretizar por estaciones, las correspondientes a Ushuaia (S5) y Puerto Toro (S4) son las que tienden a tener temperaturas pronosticadas más altas que las observadas, tal como se presenció en los diagramas de caja de la Figura 4.1.3. De los puntos más alejados de la línea perfecta, se encuentra S2 seguido de cerca por S1 y luego por S3. Solamente un 7 % de la varianza de las temperaturas observadas es explicada por la varianza de las temperaturas pronosticadas.

Al unificar los análisis desde las diferentes perspectivas, es posible entender que la simulación tuvo graves problemas al replicar el comportamiento de la temperatura en esta zona austral. La primera evidencia para todas las estaciones es la poca fidelidad con las tendencias del ciclo diario para la simulación, habiendo días en los que la amplitud térmica pronosticada era casi nula y en las observadas se superan los 5°C . En condiciones lluviosas, como el 6 de mayo (ver Anexo A3.1), es evidente menor dispersión de los datos pero mayor magnitud del error entre temperaturas observadas y modeladas. Las diferentes estaciones *in-situ* tuvieron comportamientos diferentes en cuanto al análisis del error de temperaturas, con S4 y S5 tendiendo a la subestimación y S3, S2 y S1 a la sobrestimación de

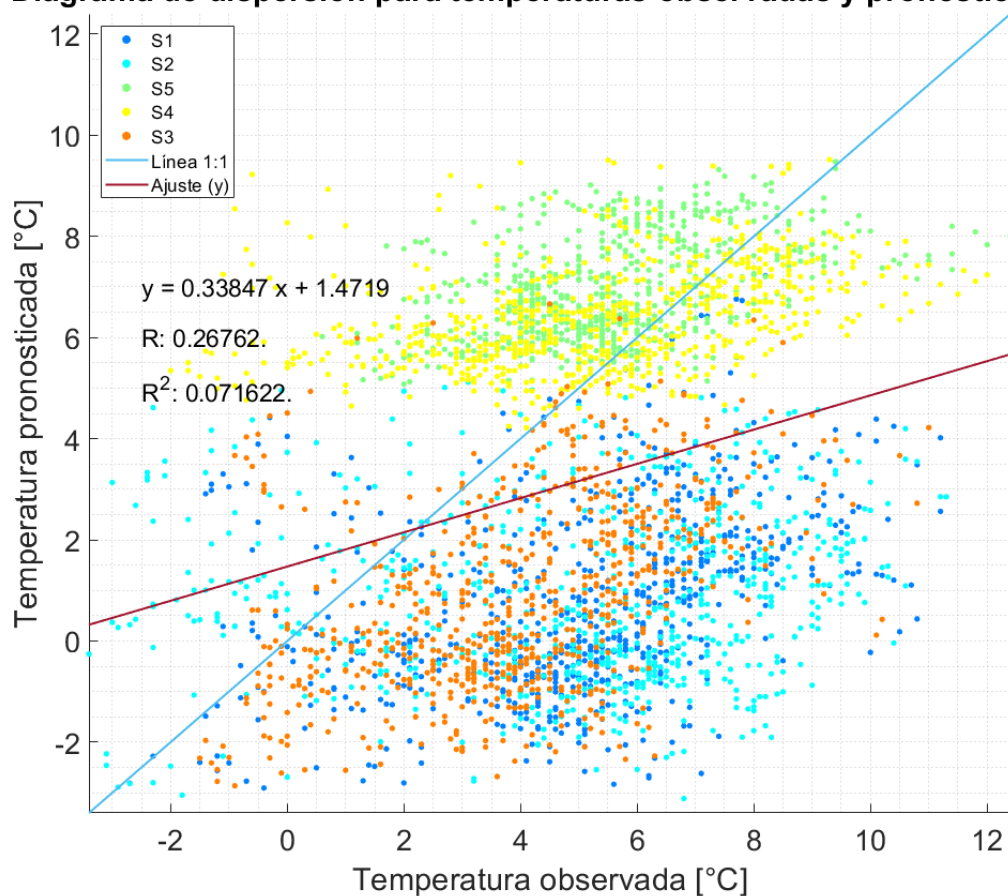
Diagrama de dispersión para temperaturas observadas y pronosticadas.

Figura 4.1.6: Diagrama de dispersión (*scatter*) para las temperaturas observadas y pronosticadas agrupando todas las estaciones. Un 7 % de la varianza de las temperaturas observadas se comparte con las temperaturas pronosticadas. La línea azul representa la dispersión nula (modelación perfecta), con una pendiente igual a 1.

las temperaturas observadas. Esto alteró sus diferentes índices de correlación, resultando en 0,3 con 7 % de la varianza compartida. Además, cuando se unifica el análisis para todas las estaciones, se ve que la media de los errores fue de casi -2°C y la primera desviación estándar en los límites de $-5,4$ y $+1,8^{\circ}\text{C}$.

4.2. Condiciones observadas y simuladas de precipitación

La Figura 4.2.1 es el acumulado total de precipitación para el modelo y las 5 estaciones que se usaron para comparar los resultados obtenidos. La escala

logarítmica permite prestar mayor atención a las diferencias de los sectores menos lluviosos del este sin verse opacados por las grandes cantidades que la zona occidental de la Cordillera de Darwin en el Parque Nacional Alberto de Agostini aportaron a la región, con un máximo de más de 750 mm en este mes. Así, es también posible dotar de significado geofísico y meteorológico a este mapa de precipitaciones. En primer lugar, es evidente el gran efecto orográfico en la precipitación, que está bien estudiado en otros lugares, al acumular estas lluvias en zonas altas del sur de la Isla Grande de Tierra del Fuego (al norte de la isla Navarino) o en el centro de Navarino, cercano al circuito de los Dientes de Navarino. También, como es esperado por las isoyetas anuales, la precipitación aumenta en dirección suroeste, en el extremo occidental del Canal Beagle y sus montañas, desde donde la humedad se abre camino en esta delgada franja continental.

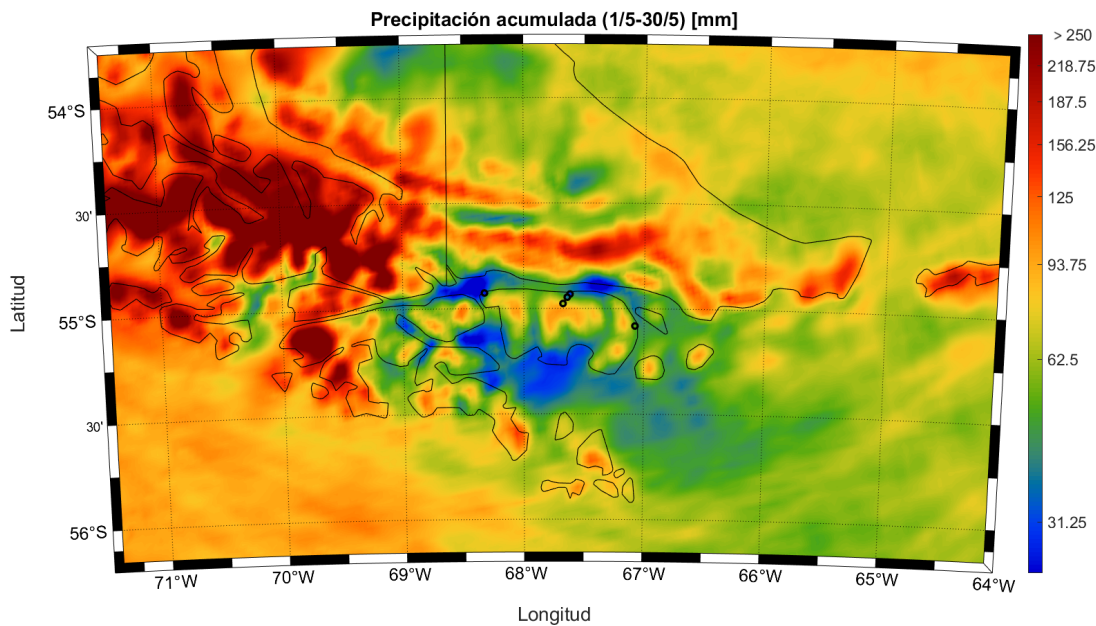


Figura 4.2.1: Precipitación acumulada mensual para el mes de mayo de 2020 calculado por el modelo WRF. El color interior de los puntos de borde negro indica la precipitación acumulada *in-situ* para las estaciones de cada lugar: S1 = $30,2\text{ mm}$; S2 = $20,7\text{ mm}$; S3 = $44,3\text{ mm}$; S6 = $61,3\text{ mm}$; S4 = $51,6\text{ mm}$.

Las precipitaciones por estación y su comparación con los modelos se pueden ver en las Figuras 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5 y 4.2.6. La primera de ellas, para las precipitaciones acumuladas cada 6 horas, y las siguientes 4 estaciones para precipitaciones acumuladas cada hora, para todo el periodo de mayo de 2020. La estación S1 (Figura 4.2.2), es la única que, en lugar de registrar cada 1 hora, se tiene registro *in-situ* cada 6 horas. En ella, se ve la coincidencia en los momentos

de lluvia entre las observaciones y el modelo, sin embargo, las cantidades de precipitación son sobrestimadas por la simulación en alrededor del 400 %. Al final del mes de mayo, se logró un acumulado de 30mm cuando el modelo computó cerca de 122 mm. La correlación de las series de precipitación acumulada para esta estación es del 92 %, lo que significa matemáticamente que al subir una serie, la otra sube en proporción adecuada.

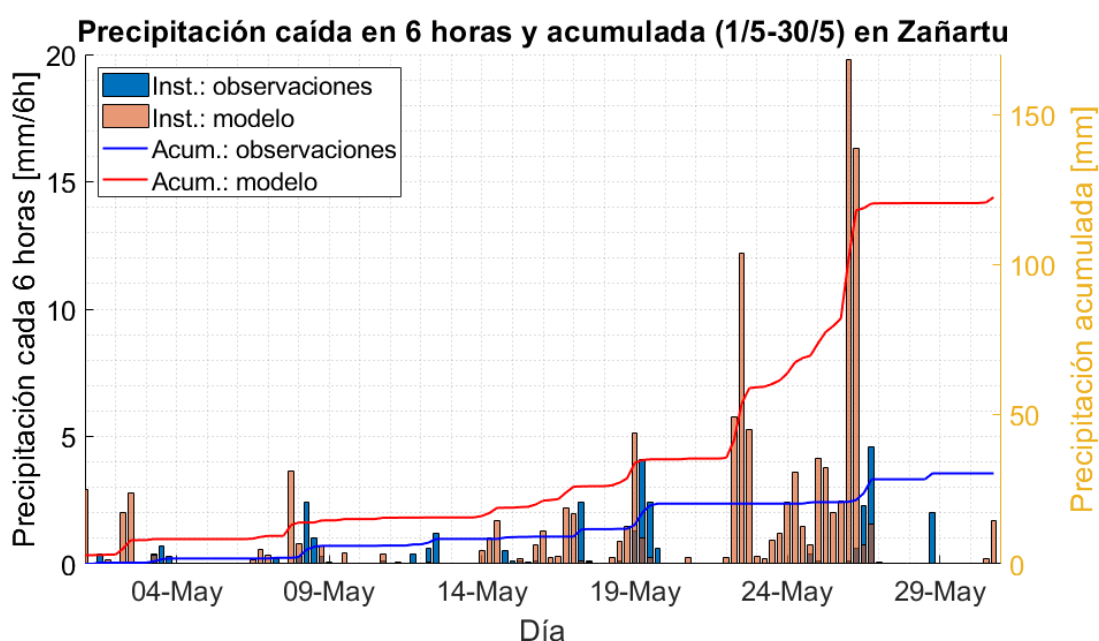


Figura 4.2.2: Precipitación acumulada cada 6 horas (barras) y acumulado general (líneas) para las observaciones de la estación S1 (color azul) y el punto más cercano de la simulación (color rojo) para todo el mes.

La estación de S2 (Figura 4.2.3) presenta una diferencia entre el acumulado total del mes del modelo contra las observaciones de 148 mm. Es posible ver la gran sobrestimación del modelo para la precipitación del día 22 de mayo y la del día 26 de mayo, sumando casi 100 mm cuando en la estación *in-situ* se registraron solamente 7 mm. De no existir esta diferencia de dos días, el error disminuiría de 740 % a 450 %, aproximadamente. Los momentos de precipitación se ven reflejados en el coeficiente de correlación de 0,95, es decir, están bien representados en su mayoría al considerar las tendencias en los momentos justos. Esto es al menos en escala media, es decir, al comparar cada hora de una serie con horas adyacentes de la otra serie. Para horas exactas, la precisión de 0,39 caracteriza la peor de las evaluaciones entre las diferentes estaciones de monitoreo (Tabla 4.2.1).

La estación de la Figura 4.2.4 para la estación del S3 presenta características

Precipitación caída en una hora y acumulada (1/5-30/5) en Puerto Navarino

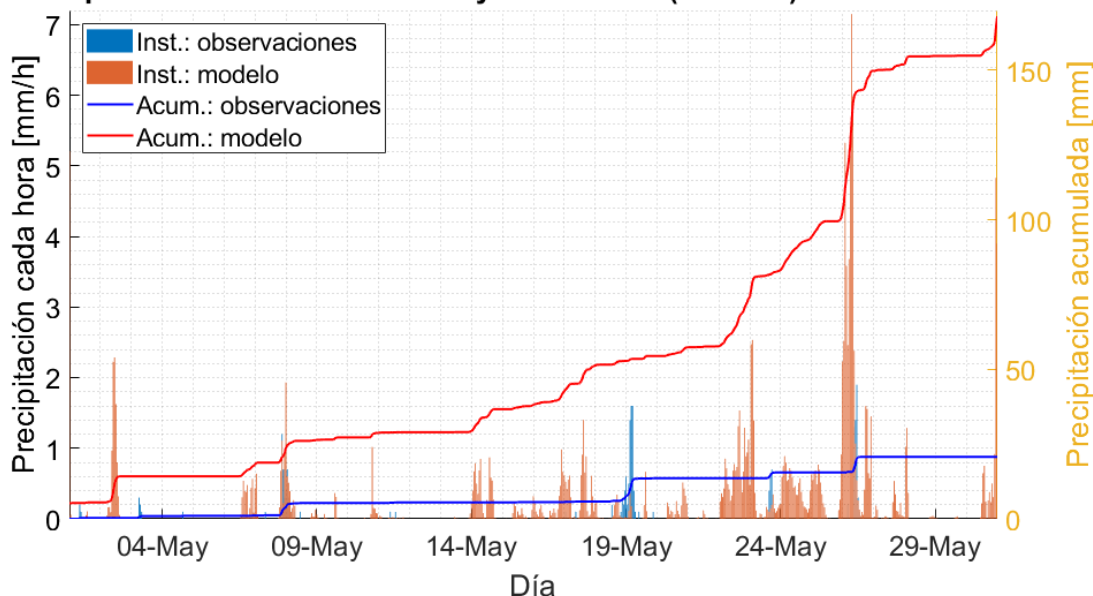


Figura 4.2.3: Precipitación acumulada cada 1 hora (barras) y acumulado general (líneas) para las observaciones de la estación S2 (color azul) y el punto más cercano de la simulación (color rojo) para todo el mes.

muy similares a las anteriores. Si bien los momentos en que sucede el evento tienen buena representación general en el rango mediano, con un coeficiente de correlación entre las series de precipitación acumulada de 0,89, para momentos exactos (estadísticos dicotómicos) la precisión es de un 57 % en esta estación. Las mediciones *in-situ* arrojan un acumulado de 43 mm y, con un acumulado del modelo de 96 mm, se tiene una diferencia de 53 mm o un 120 %.

La Figura 4.2.5 es homóloga a la anterior, pero para la estación en altura S6. En esta, las diferencias cuantitativas al final del mes son de menos de una décima de milímetro, pero a lo largo de la serie fueron compensaciones de errores las que arrojaron este buen resultado final. La precipitaciones del día 19 de mayo fueron subestimadas por el modelo en 7 mm (o un 314 %); y en cambio las precipitaciones de los días 24 y 26 de mayo fueron sobrestimadas en un 360 %, equivalente a 29 mm. La correlación entre ambas líneas es de 0,88.

La estación S4 de la Figura 4.2.6 tiene una diferencia del monto acumulado entre las observaciones y el modelo de 3 mm. Los momentos de precipitación, en general, de las observaciones son de débiles lluvias dispersas en un amplio rango temporal, mientras que para el modelo se presentan pequeños aguaceros que duran unas

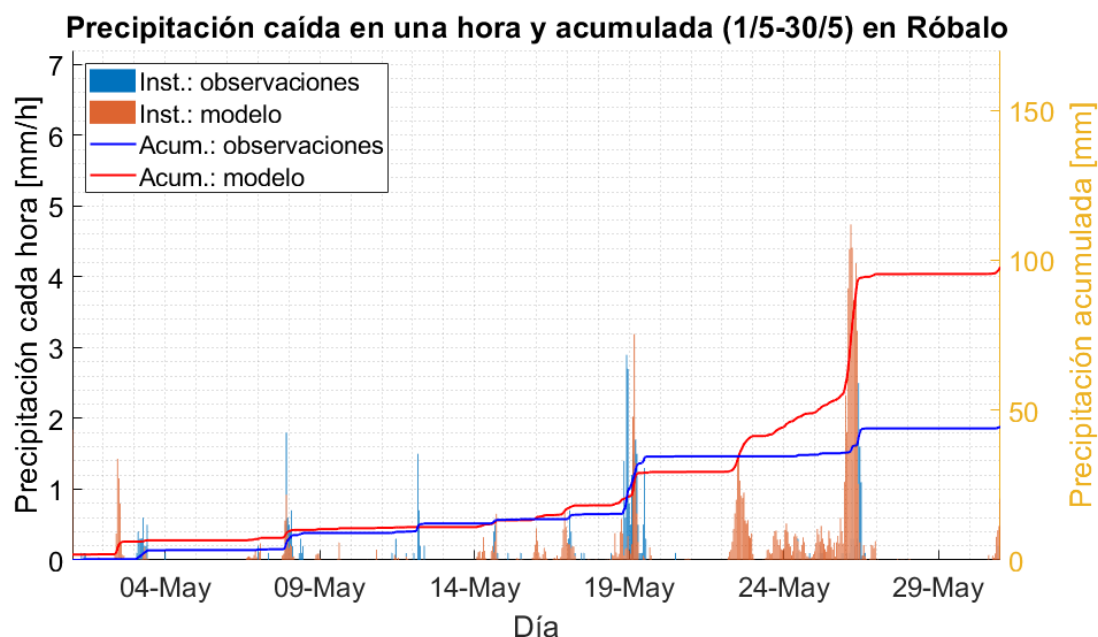


Figura 4.2.4: Precipitación acumulada cada 1 hora (barras) y acumulado general (líneas) para las observaciones de la estación S3 (color azul) y el punto más cercano de la simulación (color rojo) para todo el mes.

pocas horas salvo por la lluvia pronosticada del 24 y 25 de mayo, que es la de mayor intensidad y también la que sumó cerca del 70 % de todas las lluvias de la simulación con 36 mm. La correlación de las series es de 0,86.

Estadístico	S1	S2	S3	S6	S4
Precisión	0,5	0,3870	0,5728	0,6408	0,5298
Sesgo	2,6129	9,6531	4,1556	3,0673	1,0526
POD	0,8387	0,8163	0,8667	0,7885	0,3401
FAR	0,6790	0,9154	0,7914	0,7429	0,6769
POFD	0,6180	0,6443	0,4691	0,3841	0,3713

Tabla 4.2.1: Resultado de los estadísticos dicotómicos y sesgo de frecuencias de precipitación en cada una de las estaciones. Siglas: Precisión (sección 3.4.4); Sesgo (3.4.5); POD (3.4.6); FAR (3.4.7); y POFD (3.4.8). En negrita (rojo), la estación que mejor (peor) se desempeña para cada evaluación estadística.

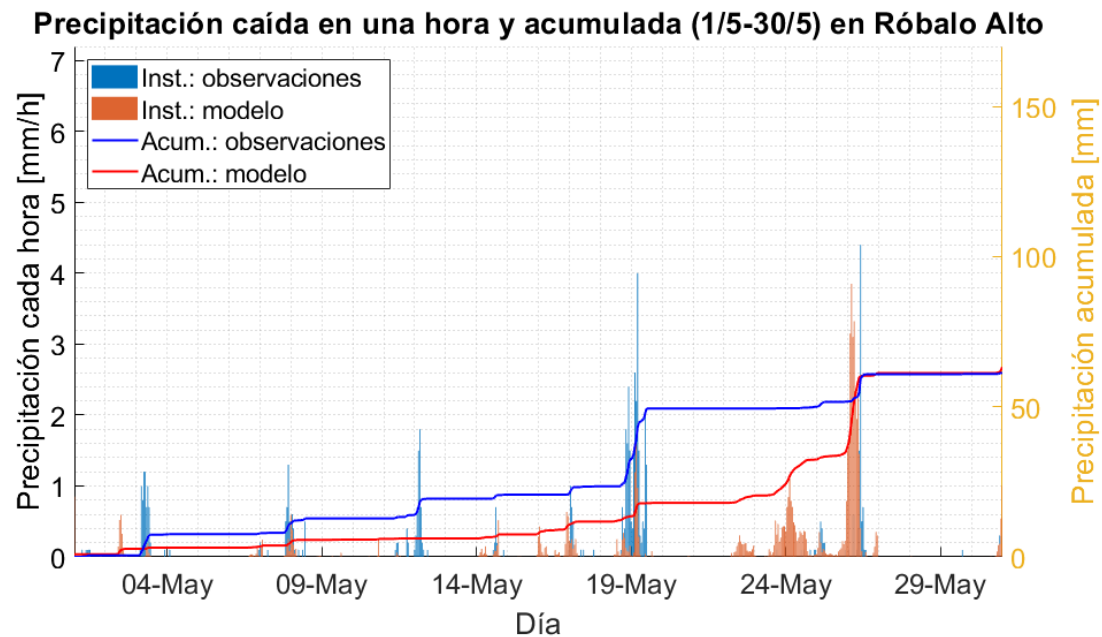


Figura 4.2.5: Precipitación acumulada cada 1 hora (barras) y acumulado general (líneas) para las observaciones de la estación S6 (color azul) y el punto más cercano de la simulación (color rojo) para todo el mes.

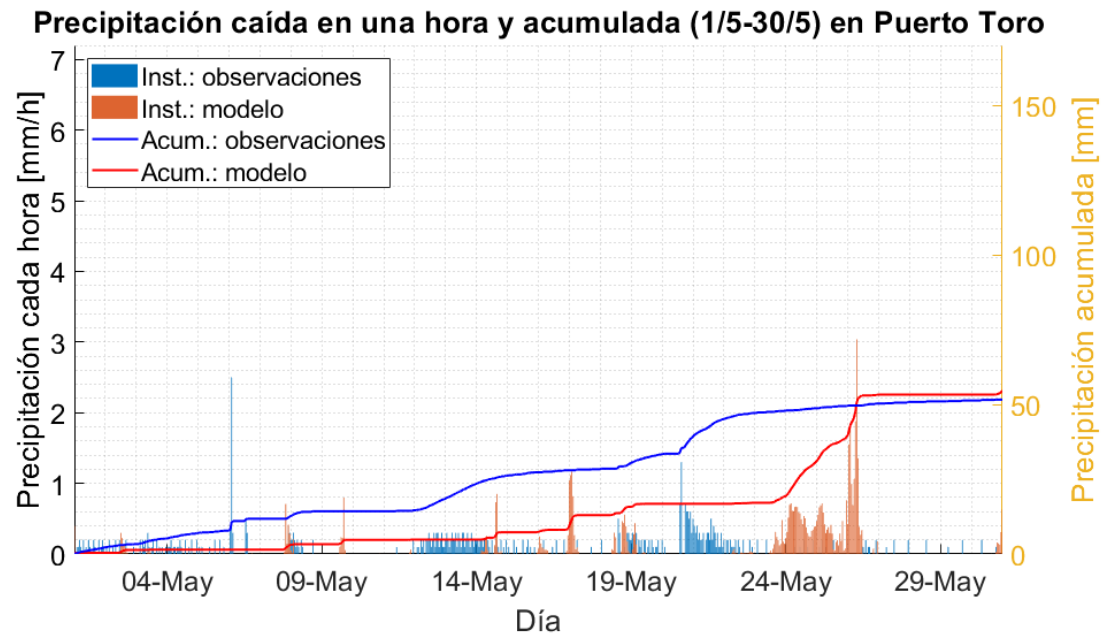


Figura 4.2.6: Precipitación acumulada cada 1 hora (barras) y acumulado general (líneas) para las observaciones de la estación S4 (color azul) y el punto más cercano de la simulación (color rojo) para todo el mes.

Capítulo 5

Discusión

En esta sección, se abordará una discusión detallada de los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo atmosférico WRF (Weather Research and Forecasting) para evaluar las condiciones meteorológicas en la isla Navarino durante el mes de mayo de 2020. Estos resultados son el producto de un proceso que involucra la recopilación de datos, la configuración del modelo y el análisis minucioso de los resultados, y ofrecen una visión profunda de las características atmosféricas en esta región de estudio.

Los resultados obtenidos a partir de la comparación de las temperaturas observadas y simuladas revelan desafíos significativos en la capacidad del modelo WRF para replicar con precisión el comportamiento de la temperatura en la región de estudio. A pesar de los esfuerzos realizados en la recopilación de datos y la configuración del modelo, el desempeño del WRF en la simulación de la temperatura presenta notables discrepancias con las observaciones.

La incapacidad del modelo para replicar el ciclo diario de temperaturas es evidente en la mayoría de las estaciones de monitoreo, con diferencias notables en las tendencias. Esto se manifiesta en coeficientes de correlación bajos, indicando una mala correspondencia entre las temperaturas observadas y simuladas. Además, se observa un sesgo marcado en las simulaciones, con el modelo tendiendo a subestimar o sobreestimar las temperaturas en diferentes estaciones.

El análisis de las diferencias de temperatura entre lo observado y lo simulado muestra una amplia variabilidad en las discrepancias. Algunas estaciones tienden a tener temperaturas pronosticadas más altas que las observadas, mientras que

otras presentan una subestimación. Estas diferencias varían entre estaciones y a lo largo del tiempo, lo que sugiere que el modelo tiene dificultades para capturar patrones coherentes en la región.

El histograma de las diferencias de temperatura muestra que la mayoría de los errores se encuentran en un rango específico, lo que sugiere la presencia de sesgos sistemáticos en la simulación, además de sub-sesgos en cada estación que se pueden discutir independientemente. La baja varianza compartida entre las temperaturas observadas y simuladas, con un coeficiente de correlación de aproximadamente 0.3, indica una correlación débil y limitada entre las dos series de datos.

La precipitación es un factor climático crucial en esta región, y su representación en el modelo WRF también enfrenta desafíos significativos. A pesar de las diferencias cuantitativas entre las precipitaciones observadas y simuladas, es posible observar ciertas tendencias. La Figura 4.2.1 muestra un efecto orográfico significativo en la distribución de la precipitación, con áreas de alta precipitación en zonas montañosas y en el extremo occidental del Canal Beagle.

Las diferencias cuantitativas entre las precipitaciones observadas y simuladas varían entre las estaciones. Algunas estaciones registran una sobrestimación significativa de la precipitación por parte del modelo, mientras que en otras estaciones se observa una leve subestimación. Esto se condice con los resultados de [Bozkurt et al. \(2019\)](#), al menos en el amplio rango de sobrestimaciones y los bajos de subestimaciones en cantidades totales de precipitación acumulada a lo largo del mes de estudio. A pesar de estas discrepancias, se pueden identificar momentos de precipitación que se reflejan en ambas series de datos, lo que sugiere una correspondencia parcial. Esto, y siguiendo los lineamientos de [Araya-Osses et al. \(2020\)](#), fue corroborado mediante la adición de la Figura A3.1, en que se confirmó un proceso sinóptico en curso.

Es importante destacar que la correlación entre las series de precipitación observada y simulada es variable entre las estaciones, oscilando entre valores altos y bajos. Esto indica que el modelo no siempre logra replicar con precisión los eventos de precipitación, y su capacidad para pronosticar la cantidad y la distribución de la precipitación es limitada.

Los estadísticos de desempeño presentados en la Tabla 4.2.1 proporcionan una visión más detallada de cómo el modelo se compara con las observaciones en

términos de la detección de eventos de precipitación y la precisión de las previsiones. Estos estadísticos revelan un rendimiento variable de las estaciones de monitoreo en la detección de eventos de precipitación y en la precisión de las previsiones del modelo.

Los resultados presentados en esta investigación pueden tener importantes implicaciones en la comprensión de las condiciones meteorológicas en la isla Navarino y en la toma de decisiones informadas en diversas áreas, incluyendo la planificación urbana y la conservación de áreas naturales. Sin embargo, es fundamental reconocer las limitaciones de este estudio. Una de las limitaciones clave es la dificultad que enfrenta el modelo WRF para replicar con precisión las condiciones meteorológicas en una región tan compleja y poco estudiada (meteorológicamente hablando) como la isla Navarino. La falta de estaciones de monitoreo en áreas remotas y la escasez de datos precisos para la validación representan desafíos significativos. Además, las condiciones extremas como la geografía accidentada, fiordos y el terreno montañoso de la región presentan desafíos adicionales para la simulación atmosférica. Como se revisó en la sección de Introducción ([Contador et al., 2014](#); [Aguirre et al., 2021](#); [P.D. Jones and Lister, 2013](#)), esta limitación tiene consecuencias en el estudio no solamente meteorológico o climático, sino que son diversas las áreas del conocimiento que se ven afectadas por la baja densidad de estaciones de monitoreo.

La elección de las parametrizaciones y configuraciones del modelo también puede influir en los resultados, y es importante considerar cómo estos aspectos pueden afectar la precisión de las simulaciones. Además, factores locales, como los efectos costeros y la orografía, en el sentido de la definición topográfica del modelo. Fue posible observar sobrestimaciones de precipitación por un falso efecto orográfico del modelo en las estaciones de Zañartu, Puerto Navarino y Róbalo bajo. El canal Beagle, importante cuerpo de agua que bordea la costa norte de la isla Navarino, no fue representado correctamente por el dominio 2, y el dominio 3 no logró ser computado por errores informáticos cuya solución hubiese tomado más tiempo de resolver que el tiempo programado de duración de esta tesis. Estos problemas computacionales fueron cruciales al descartar el desarrollo del tercer (y eventualmente un cuarto) dominio de mejor resolución. El tiempo de cómputo de un mes en Leftrarú (sección [3.2.1](#)), si bien es significativamente menor al tiempo de cómputo en un computador de escritorio, no bajaba de las 2 semanas. Esto

hacía que la verificación de cada simulación y prueba de parametrización fuese muy lenta y el trabajo por goteo de análisis restaba fluidez a su estudio, como se preveía gracias a los estudios de [Severance and Dowd \(2010\)](#); [Macdonell and Lu \(2007\)](#).

Capítulo 6

Conclusión

El empleo de modelos numéricos en la investigación climática del sur de la Patagonia, ha demostrado ser esencial para comprender fenómenos atmosféricos complejos. Estudios previos resaltan la utilidad de estos modelos al describir la influencia de sistemas de baja presión en el Paso de Drake, proporcionando información valiosa sobre el balance de masa en campos de hielo. La técnica de *downscaling*, ya sea dinámica o estadística, ha emergido como un recurso potencial para mejorar las simulaciones numéricas. Sin embargo, es crucial abordar la incertidumbre asociada con la incorporación de nuevos datos y supuestos, asegurando una rigurosa validación y verificación para garantizar la fiabilidad de los resultados.

En el presente estudio, se ha llevado a cabo una evaluación de las condiciones meteorológicas en la isla Navarino durante mayo de 2020, utilizando el modelo atmosférico WRF para las variables de la temperatura y la precipitación. A pesar de los esfuerzos dedicados a la recopilación de datos, configuración del modelo y análisis detallado, los resultados revelan desafíos sustanciales en la capacidad de WRF para reproducir con precisión las condiciones atmosféricas en esta región austral.

En cuanto a las temperaturas, la simulación del ciclo diario presenta discrepancias notables, con un sesgo marcado y una incapacidad para replicar las tendencias observadas. La variabilidad en las diferencias de temperatura entre lo observado y lo simulado sugiere dificultades en la captura de patrones coherentes, planteando interrogantes sobre la eficacia del modelo en esta área específica.

En relación con la precipitación, se observa una variabilidad cuantitativa entre las estaciones, con sobrestimaciones y subestimaciones significativas por parte del modelo. Aunque se identifican ciertos eventos de precipitación en ambas series de datos, la capacidad del modelo para prever la cantidad y distribución precisa de la precipitación presenta limitaciones.

Estos hallazgos hacen notar la complejidad de simular las condiciones atmosféricas en una región recientemente estudiada como la isla Navarino, donde la topografía accidentada y la falta de datos precisos presentan desafíos considerables. Además, la elección de parametrizaciones y configuraciones del modelo influye en la precisión de las simulaciones, y es esencial considerar estos factores en futuras investigaciones.

Es crucial destacar la importancia de la resolución espacial en los resultados obtenidos. La falsa topografía generada por la limitada resolución espacial del modelo WRF ha influido considerablemente en la precisión de las simulaciones. Una consideración clave para futuras investigaciones sería explorar la implementación de un hipotético tercer dominio con una mayor resolución espacial. Este enfoque podría mitigar los errores asociados con la representación inadecuada de la topografía local, mejorando así la capacidad del modelo para capturar de manera más fiel las condiciones atmosféricas en la isla Navarino. Además, la colaboración entre disciplinas científicas y el desarrollo de modelos integrados que aborden aspectos ecológicos, biológicos y climáticos serán esenciales para una comprensión holística de los cambios en este ecosistema único.

El trabajo en un entorno HPC se presenta como una solución para superar, en parte, las limitaciones computacionales en la simulación climática. El NLHPC ha desempeñado un papel fundamental al proporcionar acceso a recursos de HPC en Chile, permitiendo ejecutar modelos a alta resolución espacial y temporal.

Bibliografía

- F. Aguirre, J. Carrasco, T. Sauter, C. Schneider, K. Gaete, E. Garín, R. Adaros, N. Butorovic, R. Jaña, and G. Casassa. Snow Cover Change as a Climate Indicator in Brunswick Peninsula, Patagonia. *Frontiers in Earth Science*, 6:130, 2018. ISSN 2296-6463. doi: 10.3389/feart.2018.00130. URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2018.00130>. Enlace consultado el 8 de noviembre de 2023.
- F. Aguirre, F. A. Squeo, D. López, B. Buma, D. Carvajal, R. Jaña, G. Casassa, R. Rozzi, et al. Gradientes Climáticos y su alta influencia en los ecosistemas terrestres de la Reserva de la Biosfera Cabo de Hornos, Chile. In *Anales del Instituto de la Patagonia*, volume 49. SciELO Chile, 2021.
- D. Araya-Osses, A. Casanueva, C. Román-Figueroa, J. M. Uribe, and M. Paneque. Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 54(9):4309–4330, 2020.
- A. C. Ashworth and V. Markgraf. Climate of the Chilean Channels between 11,000 and 10,000 yr BP based on fossil beetle and pollen analyses. *Revista Chilena de Historia Natural*, 62:61–74, 1989.
- P. Austral. A 24 años del “terremoto blanco” que dejó una mortandad de 176 mil ovinos., Agosto 2019. URL <https://archivo.laprensaaustral.cl/cronica/a-24-anos-del-terremoto-blanco-que-dejo-una-mortandad-de-176-mil-ovinos/>. Enlace consultado el 19 de abril de 2021.
- J.-W. Bao, S. Michelson, and E. Grell. Microphysical process comparison of three microphysics parameterization schemes in the WRF model for an idealized squall-line case study. *Monthly Weather Review*, 147(9):3093–3120, 2019.
- D. Bozkurt, M. Rojas, J. P. Boisier, R. Rondanelli, R. Garreaud, and L. Gallardo. Dynamical downscaling over the complex terrain of southwest South America: present climate conditions and added value analysis. *Climate Dynamics*, 53(11):6745–6767, 2019.
- D. Bozkurt, D. H. Bromwich, J. Carrasco, and R. Rondanelli. Temperature and precipitation projections for the Antarctic Peninsula over the next two decades: contrasting global and regional climate model simulations. *Climate Dynamics*, 56(11):3853–3874, 2021.

- D. H. Bromwich, A. J. Monaghan, K. W. Manning, and J. G. Powers. Real-time forecasting for the Antarctic: An evaluation of the Antarctic Mesoscale Prediction System (AMPS). *Monthly Weather Review*, 133(3):579–603, 2005.
- T. Carrasco-Escaff, M. Rojas, R. Garreaud, D. Bozkurt, and M. Schaefer. Climatic control of the surface mass balance of the Patagonian Icefields. *EGU sphere*, pages 1–32, 2022.
- F. Cassola, F. Ferrari, and A. Mazzino. Numerical simulations of Mediterranean heavy precipitation events with the WRF model: A verification exercise using different approaches. *Atmospheric Research*, 164:210–225, 2015.
- T. Contador, J. Kennedy, J. Ojeda, P. Feinsinger, and R. Rozzi. Ciclos de vida de insectos dulceacuícolas y cambio climático global en la ecorregión subantártica de Magallanes: investigaciones ecológicas a largo plazo en el Parque Etnobotánico Omora, Reserva de Biosfera Cabo de Hornos (55 S). *Bosque (Valdivia)*, 35(3): 429–437, 2014.
- P. del Gobierno de Chile. Región de Magallanes, 2018. URL <https://www.gob.cl/regiones/region-de-magallanes/>. Enlace consultado el 23 de marzo de 2023.
- B. Fernández and J. Gironás. *Water Resources of Chile*. Springer.
- B. Gerofi, Y. Ishikawa, R. Riesen, and R. W. Wisniewski. *Operating systems for supercomputers and High Performance Computing*, volume 1. Springer, 2019.
- E. K. Gilliland and C. M. Rowe. A comparison of cumulus parameterization schemes in the WRF model. In *Proceedings of the 87th AMS Annual Meeting & 21th Conference on Hydrology*, volume 2, 2007.
- R. Harmel, P. Smith, K. Migliaccio, I. Chaubey, K. R. Douglas-Mankin, B. Benham, S. Shukla, R. Muñoz-Carpena, and B. J. Robson. Evaluating, interpreting, and communicating performance of hydrologic/water quality models considering intended use: A review and recommendations. *Environmental Modelling & Software*, 57:40–51, 2014.
- M. J. Iacono, J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D13), 2008.
- IDEAL. Mientras la nieve disminuye, los vientos y las lluvias aumentan en Punta Arenas., Septiembre 2020. URL <https://www.centroideal.cl/2020/mientras-la-nieve-disminuye-los-vientos-y-las-lluvias-aumentan-en-punta-arenas/>. Enlace consultado el 8 de noviembre de 2023.
- IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. *IPCC*, geneva, switzerland, 36 pages. (in press), 2023.

- Z. I. Janjić. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model. 2001.
- Z. Janjić. The surface layer in the NCEP Eta Model, paper presented at Eleventh Conference on Numerical Weather Prediction. *Am. Meteorol. Soc., Norfolk, Va.*, pages 19–23, 1996.
- Z. I. Janjić. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly weather review*, 122(5):927–945, 1994.
- M. Kofler. Linux. 2014.
- D. R. Legates and G. J. McCabe Jr. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35(1):233–241, 1999.
- Y.-L. Lin, R. D. Farley, and H. D. Orville. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology and climatology*, 22(6): 1065–1092, 1983.
- X. Luo and I. Hoteit. Robust ensemble filtering and its relation to covariance inflation in the ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 139(12): 3938–3953, 2011.
- C. Macdonell and P. Lu. Pragmatics of virtual machines for high-performance computing: A quantitative study of basic overheads. In *Proc. of the High Perf. Computing & Simulation Conf*, 2007.
- J. Malebrán and R. Rozzi. Análisis de los cursos de filosofía ambiental de campo en el Parque Etnobotánico Omora, Reserva de la Biosfera Cabo de Hornos, Chile. *Magallania (Punta Arenas)*, 46(1):207–225, 2018.
- G.-Y. Niu, Z.-L. Yang, K. E. Mitchell, F. Chen, M. B. Ek, M. Barlage, A. Kumar, K. Manning, D. Niyogi, E. Rosero, et al. The community noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12), 2011.
- M. J. Ortuya and M. Leppe. Nuevos antecedentes estratigráficos y paleontológicos de la cuenca cretácica de Magallanes, extremo austral de Chile. *Simposio Paleontología en Chile*, 2016.
- R. Pawlowicz. M_map: A mapping package for MATLAB, version 1.4 m (computer software). Available online at www.eoas.ubc.ca/~rich/map.html, consultado el 19 de abril de 2021, 2020.
- C. H. P.D. Jones and D. Lister. Construction of high spatial resolution climate scenarios for the Falkland Islands and southern Patagonia. Available online at <https://www.ukfit.org>, consultado el 4 de octubre de 2022, 2013.

- C. Pennelly, G. Reuter, and T. Flesch. Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta. *Atmospheric Research*, 135:172–192, 2014.
- C. Pérez et al. Condiciones agroclimáticas de Magallanes. *Boletín INIA-Instituto de Investigaciones Agropecuarias*, 2019.
- J. G. Powers, A. J. Monaghan, A. M. Cayette, D. H. Bromwich, Y.-H. Kuo, and K. W. Manning. Real-time mesoscale modeling over Antarctica: The Antarctic mesoscale prediction system* the Antarctic mesoscale prediction system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(11):1533–1546, 2003.
- A. R. C. C. Resiliencia Africana y Latinoamericana al Cambio Climático. Una revisión de los métodos de downscaling para las proyecciones de Cambio Climático. Septiembre 2014.
- M. Rojas. Multiply nested regional climate simulation for southern South America: Sensitivity to model resolution. *Monthly Weather Review*, 134(8):2208–2223, 2006.
- R. Rozzi, F. Massardo, A. Mansilla, C. B. Anderson, A. Berghöfer, M. Mansilla, M. R. Gallardo, J. Plana, U. Berghöfer, X. Arango, et al. La reserva de Biosfera Cabo de Hornos: Un Desafío para la Conservación de la Biodiversidad e Implementación del Desarrollo Sustentable en el Extremo Austral de América. In *Anales del Instituto de la Patagonia*, volume 35, pages 55–70, 2007.
- F. Santibáñez. Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo VI: Regiones de Aysén y Magallanes. 2017.
- S. A. G. Servicio Agrícola y Ganadero. Región de Magallanes y sus recursos naturales., 2018. URL <https://www.gob.cl/regiones/region-de-magallanes/>. Enlace consultado el 19 de abril de 2021.
- C. Severance and K. Dowd. *High performance computing*. OpenStax CNX, 2010.
- S. C. Sherwood, D. Hernández-Deckers, M. Colin, and F. Robinson. Slippery thermals and the cumulus entrainment paradox. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70(8):2426–2442, 2013.
- W. C. Skamarock and J. B. Klemp. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of computational physics*, 227(7):3465–3485, 2008.
- W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers. A description of the advanced research WRF version 2. Technical report, National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale ..., 2005.
- G. Zittis, P. Hadjinicolaou, J. Lelieveld, et al. Comparison of WRF model physics

parameterizations over the MENA-CORDEX domain. *American Journal of Climate Change*, 3(05):490, 2014.

Apéndice A

A1. Climograma sin editar

La Figura A1.1 es la versión sin editar de la Figura 1.2.3. Se le omitió el dato extremo de precipitación mensual acumulada de febrero de 1975 de 332,5 mm

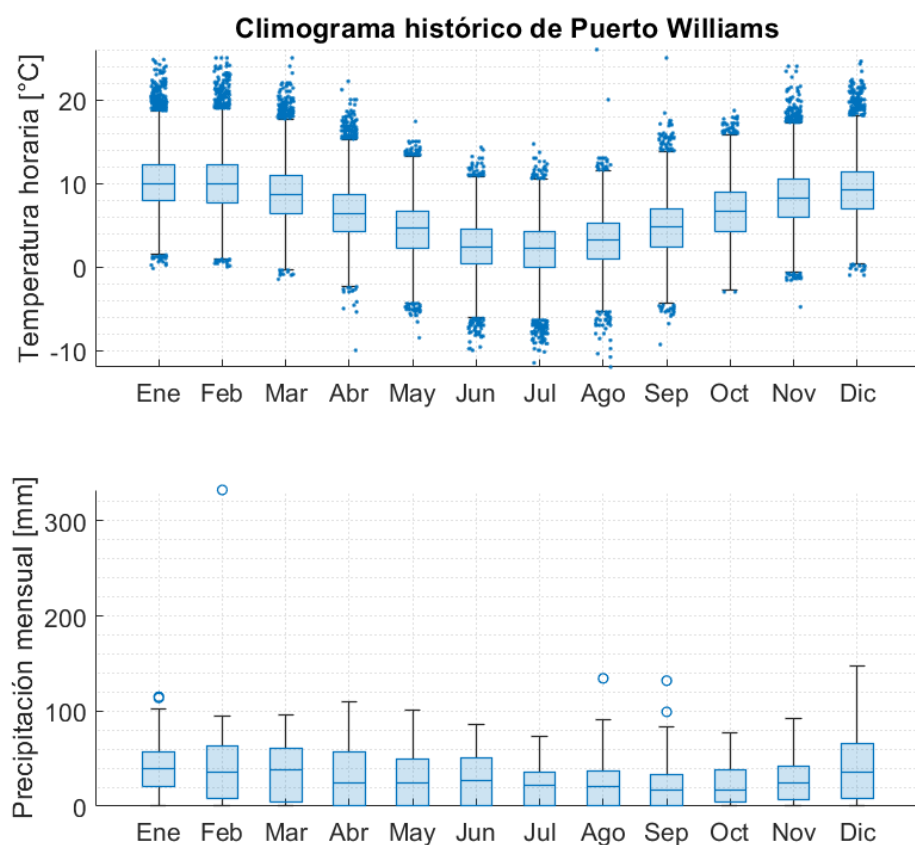


Figura A1.1: Climograma incluyendo dato extremo de febrero de 1975 para Puerto Williams en base a los datos de la estación DMC Guardiamarina Zañartu desde 1968 para las temperaturas y desde 1961 para la precipitación. Esta es la versión sin editar de la Figura 1.2.3. *Fuente:* propia.

A2. Diferencias de temperatura de todas las estaciones

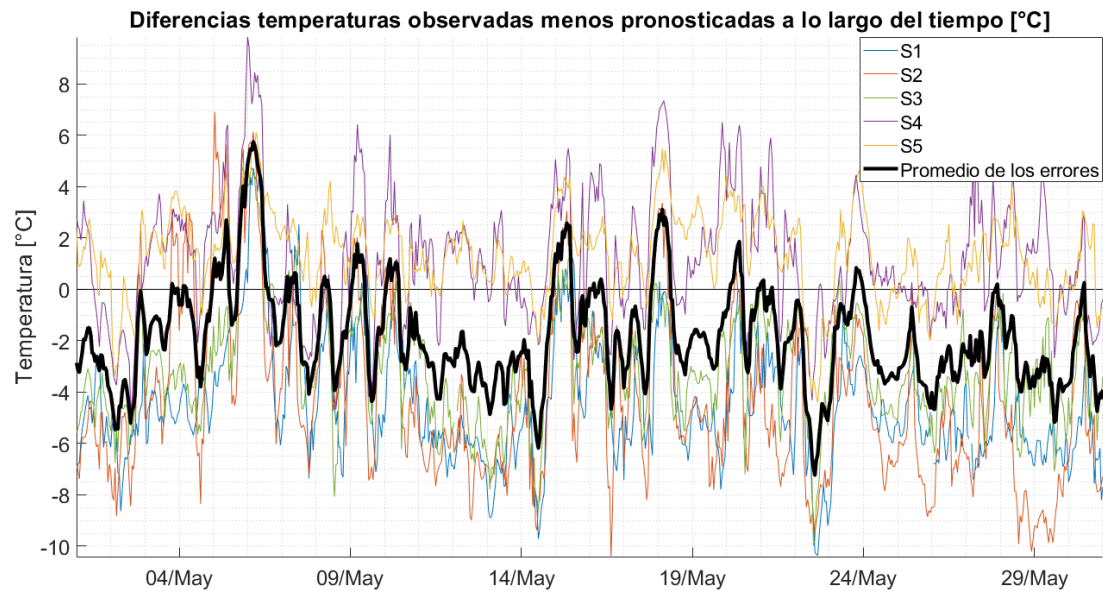


Figura A2.1: Diferencias de temperatura entre lo observado y lo simulado para las 5 estaciones de monitoreo. Diferencias positivas indican subestimación de la temperatura por parte de la simulación, y lo contrario indica sobrestimación de la temperatura. En negro, el promedio de los errores respecto al tiempo.

A3. Mapa de precipitaciones observadas el 6 de mayo de 2020

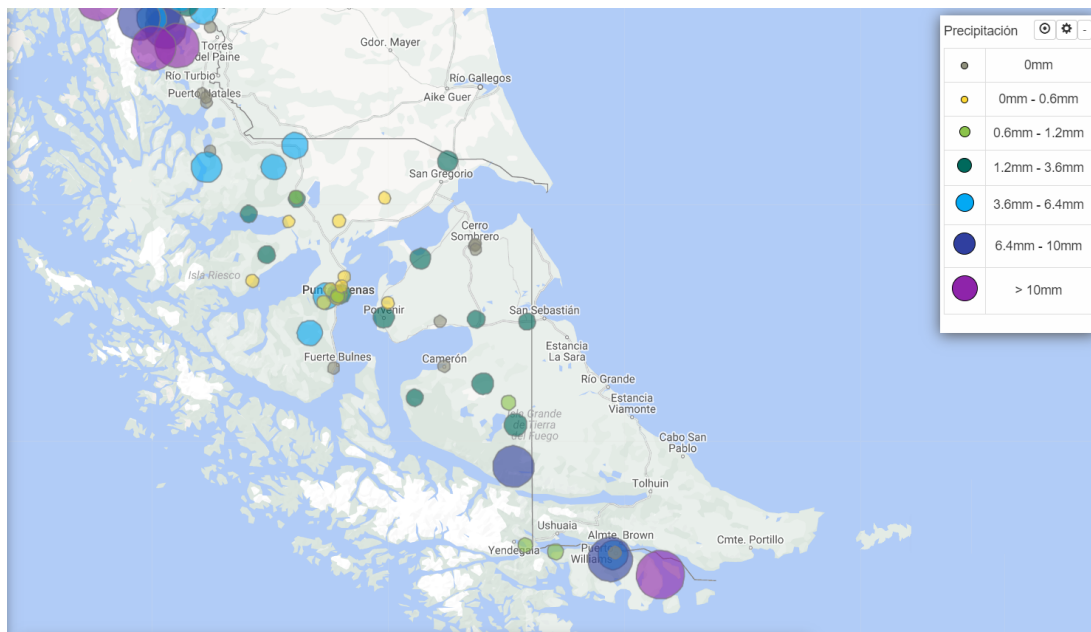


Figura A3.1: Mapa de precipitación acumulada cada hora para las 14 h del 6 de mayo de 2020 en la Región de Magallanes. Es evidente un frente de precipitaciones

A4. Archivos namelist de la última simulación

A4.1. Archivo namelist.wps:

```
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 2,
start_date = '2020-04-28_00:00:00','2020-04-29_00:00:00',
end_date   = '2020-06-01_00:00:00','2020-06-01_00:00:00',
interval_seconds = 21600,
io_form_geogrid = 2,
opt_output_from_geogrid_path = '/home/mtroncoso/magallanes/',
debug_level = 0,
/

&geogrid
parent_id          = 1, 1, 2, 3,
parent_grid_ratio = 1, 3, 3, 3,
i_parent_start     = 1, 62, 139, 75,
j_parent_start     = 1, 35, 52, 62,
e_we              = 181, 301, 253, 241,
e_sn              = 151, 211, 181, 181,
geog_data_res     = '10m','5m','2m','30s',
dx = 9000,
dy = 9000,
map_proj = 'lambert',
ref_lat  = -57.500,
ref_lon  = -79.500,
truelat1 = -57.500,
truelat2 = -57.500,
stand_lon = -79.500,
geog_data_path = '/home/mtroncoso/geog/',
opt_geogrid_tbl_path = '/home/mtroncoso/magallanes/',
ref_x = 37.5,
ref_y = 37.5,
```

```

/

&ungrib
  out_format = 'WPS',
  prefix = 'FILE',
/

&metgrid
  fg_name = 'FILE',
  io_form_metgrid = 2,
  opt_output_from_metgrid_path = '/home/mtroncoso/magallanes/',
  opt_metgrid_tbl_path = '/home/mtroncoso/magallanes/',
/

&mod_levs
  press_pa = 201300 , 200100 , 100000 ,
             95000 , 90000 ,
             85000 , 80000 ,
             75000 , 70000 ,
             65000 , 60000 ,
             55000 , 50000 ,
             45000 , 40000 ,
             35000 , 30000 ,
             25000 , 20000 ,
             15000 , 10000 ,
             5000 , 1000
/

```

A4.2. Archivo `namelist.input`:

```

&time_control
run_days           = 33,
run_hours          = 00,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,

```

```

start_year          = 2020,      2020,      2020,2020,
start_month         = 04,        04,          04, 01,
start_day           = 28,        29,          30, 01,
start_hour          = 00,        00,          00, 00,
start_minute        = 00,        00,          00, 00,
start_second        = 00,        00,          00,   00,
end_year            = 2020,      2020,      2020, 2020,
end_month           = 06,        06,          06, 01,
end_day             = 00,        00,          00, 02,
end_hour            = 00,        00,          00, 00,
end_minute          = 00,        00,          00, 00,
end_second          = 00,        00,          00, 00,
interval_seconds    = 21600,
input_from_file     = .true.,   .true.,   .true., .true.,
history_interval    = 360,      60,        60,60,
frames_per_outfile  = 1000,   168,        1000,1000,
restart             = .false.,
restart_interval     = 7200,
io_form_history      = 2,
io_form_restart      = 2,
io_form_input        = 2,
io_form_boundary     = 2,
debug_level         = 0,
/

&domains
time_step           = 36,
time_step_fract_num = 0,
time_step_fract_den = 1,
max_dom             = 2,
e_we                = 181,      301,253, 241,
e_sn                = 151,      211,      181, 181,
e_vert              = 44,       44,       44, 44,
p_top_requested     = 5000,
num_metgrid_levels  = 34,

```

num_metgrid_soil_levels	= 4,		
dx	= 9000,	3000,	1000,333.333344,
dy	= 9000,	3000,	1000, 333.333344,
grid_id	= 1,	2,	3, 4,
parent_id	= 1,	1,	2, 3,
i_parent_start	= 1,	62,	139,75,
j_parent_start	= 1,	35,	52,62,
parent_grid_ratio	= 1,	3,	3, 3,
parent_time_step_ratio	= 1,	3,	3, 3,
feedback	= 1,		
smooth_option	= 0,		
/			
&physics			
mp_physics	= 2,	2,	2,2,
ra_lw_physics	= 4,	4,	4,4,
ra_sw_physics	= 4,	4,	4,4,
radt	= 30,	30,	30,30,
sf_sfclay_physics	= 2,	2,	2,2,
sf_surface_physics	= 2,	2,	2,3,
bl_pbl_physics	= 2,	2,	2,2,
bldt	= 0,	0,	0,0,
cu_physics	= 6,	0,	0,0,
cudt	= 5,	5,	5,5,
isfflx	= 1,		
ifsnow	= 0,		
icloud	= 1,		
surface_input_source	= 1,		
num_soil_layers	= 4,		
sf_urban_physics	= 0,	0,	0,0,
maxiens	= 1,		
maxens	= 3,		
maxens2	= 3,		
maxens3	= 16,		
ensdim	= 144,		


```
/

&fdda
/

&dynamics
w_damping           = 0,
diff_opt            = 1,
km_opt              = 4,
diff_6th_opt        = 0,          0,          0,0,
diff_6th_factor      = 0.12,      0.12,      0.12,0.12,
base_temp            = 290.,
damp_opt             = 0,
zdamp                = 5000.,      5000.,      5000.,5000.,
dampcoef             = 0.2,        0.2,        0.2,0.2,
khdif                = 0,          0,          0,0,
kvdif                = 0,          0,          0,0,
non_hydrostatic      = .true.,     .true.,     .true., .true.,
moist_adv_opt         = 1,          1,          1,1,
scalar_adv_opt        = 1,          1,          1,1,
fft_filter_lat       = 66,
/

&bdy_control
spec_bdy_width       = 5,
spec_zone             = 1,
relax_zone            = 4,
specified             = .true.,     .false.,     .false., .false.,
polar = .false.,
/

&grib2
/

&namelist_quilt
```

```
nio_tasks_per_group    = 0,  
nio_groups              = 1,  
/
```

A5. Participación en la Primera Conferencia CHIC

Se participó en la primera conferencia del centro basal «Centro Internacional Cabo de Hornos CHIC» titulada «Cambio Global y Conservación Biocultural», en formato póster para presentar resultados preliminares de este trabajo en mayo de 2023 con el título «Condiciones meteorológicas de la isla Navarino mediante el uso del modelo atmosférico WRF para el año 2020».



CHIC
CENTRO INTERNACIONAL
CABO DE HORNO



Universidad
de Concepción

CONDICIONES METEOROLÓGICAS DE LA ISLA NAVARINO MEDIANTE EL USO DEL MODELO ATMOSFÉRICO WRF PARA EL AÑO 2020

Matías Troncoso-Villar y Héctor H. Sepúlveda

La isla Navarino ($54^{\circ}56'S$; $67^{\circ}36'O$) es una zona insular considerada una *hotspot* subantártico para la investigación socio-ecológica de largo plazo y presenta carencia de información a nivel global. Estos estudios requieren datos meteorológicos y climáticos de alta resolución que permitan complementar el trabajo analítico. Las estaciones meteorológicas locales son escasas y se caracterizan por su difícil acceso y tienen una gran dispersión geográfica entre ellas. Además, la densidad de estaciones por km^2 no es suficiente para planificar estudios de alta resolución, monitoreo de cambio local de las condiciones atmosféricas o aportes a estudios globales desde esta zona austral. La evaluación preliminar del modelo WRF durante el año 2020 en la isla Navarino se realizó mediante las pruebas estadísticas del RMSE, MAE, MSE y CE durante una semana del mes de enero para la estación *in-situ* Guardiamarina Zañartu, ubicada en el aeródromo de Puerto Williams. Los resultados preliminares muestran que la simulación o escalamiento mediante WRF reduce el error respecto a las condiciones iniciales en $1,8^{\circ}C$ según los estadísticos de RMSE, y resultados complementarios con MAE, MSE y CE (coeficiente de efectividad) en $1,7^{\circ}C$, 10 puntos y 1 punto, respectivamente. Hubo una mejora en el desempeño de los estadísticos en la simulación WRF. Las simulaciones son útiles para obtener datos meteorológicos con un error reducido en la zona, pero se necesita seguir simulando para mejorar la validez de las pruebas.

Introducción

El modelo numérico WRF (*Weather Research and Forecast*) permite simular en alta resolución las condiciones de la atmósfera en momentos determinados a partir de condiciones iniciales de baja resolución. La técnica de *downscaling* o escalamiento dinámico es un método que puede mejorar las simulaciones numéricas en la medida que se agregue también nueva y buena información al modelo. En esta simulación se desarrollaron 3 dominios principales (Figura 1).

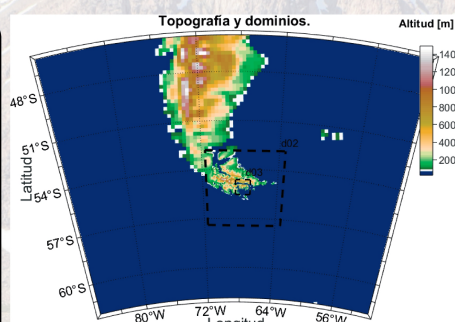


Figura 1: Primer dominio de la simulación WRF (totalidad). El segundo dominio (rectángulo d02) permitió crear el tercer dominio (rectángulo d03). Este último es aquel con el que se tratan los datos.

Métodos

Mediante el modelo WRF y desde condiciones iniciales de NCEP-FNL $c/6h$, se llegó a un escalamiento con un dominio final de 200 m de resolución de topografía (Figura 2) y salidas $c/1h$. El periodo es el 2020 porque las estaciones meteorológicas en tierra tienen buena calidad de datos en ese año. Se analizó la efectividad de la simulación mediante el RMSE, MAE, MSE y CE, que son ampliamente utilizados en este tipo de estudios. Las parametrizaciones físicas del modelo fueron elegidas en base a la literatura de la región.

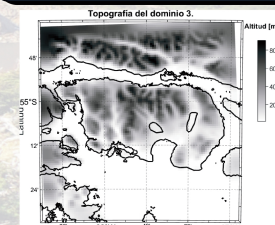


Figura 2: Topografía final del tercer dominio (d03) con una resolución de 200 m. Se demarca la línea de costa.

Resultados

Los resultados preliminares se analizan respecto a una estación meteorológica *in-situ* ubicada en el aeródromo de Puerto Williams y el punto más cercano a este sitio. Las horas están en UTC. Los resultados preliminares se basan en los errores para los diferentes momentos y los errores acumulados a todo el periodo.

A. Análisis

La Figura 3 muestra las diferencias entre las observaciones *in-situ* con el modelo y las condiciones iniciales. Se observan mayores errores en las horas de mayor cambio en las temperaturas: el amanecer y el atardecer. El acumulado de las diferencias para el modelo y el forzante, al tener diferente cantidad de muestras, han sido normalizadas para mejor comparación como se ve en la Figura 4.

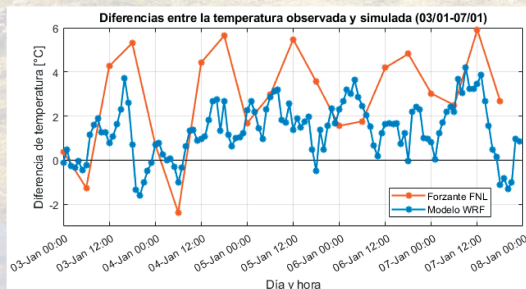


Figura 3: Serie de las diferencias entre las condiciones iniciales del forzante FNL y las observaciones (línea naranja); y las diferencias entre el resultado del escalamiento con las observaciones (línea azul) para todo el periodo.

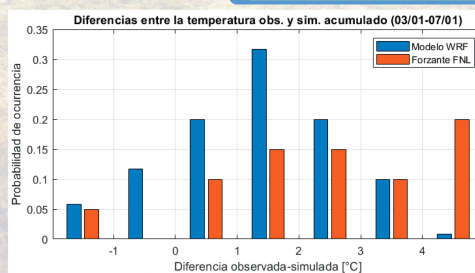


Figura 4: Probabilidad de ocurrencia de los errores para la simulación y el forzante en todos los momentos. Han sido calculadas por las diferencias acumuladas mediante normalización PDF.

B. Estadísticos

Al calcular los estadísticos de evaluación (Tabla 1), todos muestran una mejora respecto a las condiciones iniciales, para el escalamiento dinámico. En especial, hay una mejora de $1,8^{\circ}C$ en el RMSE, que se traduce como un acumulado de errores en casi dos grados de diferencia menos.

	MSE	RMSE	MAE	CE
WRF	3,4	1,8°C	1,5°C	0,53
FNL	13,2	3,6°C	3,2°C	-0,34

Tabla 1: Resultado de los estadísticos para el periodo.

Discusión y Conclusión

Se observa una mejora en el desempeño de los estadísticos en el periodo de simulación en WRF. Es notorio que el momento de errores con más amplitud es en los mayores gradientes de temperatura del ciclo diario. Estas simulaciones permiten tener datos de las condiciones meteorológicas con un error reducido y tiene especial utilidad en ambientes como la isla Navarino, en que no se cuenta con una red densa de estaciones *in-situ*. Es necesario continuar con la simulación a todo el año para sumar validez a las pruebas y comparar el comportamiento en diferentes estaciones del año, condiciones atmosféricas y localizaciones.

Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02). Referencias: Rozzi, R. (2018). *Magallania*, 46(1), 79-101. | Bozkurt, D., Bromwich, D. H., Carrasco, J., & Rondanelli, R. (2021). *Climate Dynamics*, 56(11), 3853-3874. | Aguirre, F., Squeo, F. A., López, D., Buma, B., Carvajal, D., Jaña, R., ... & Rozzi, R. (2021). *Anales del Instituto de la Patagonia* (Vol. 49). | Garreaud, R., Lopez, P., Minvielle, M., & Rojas, M. (2013). *Journal of Climate*, 26(1), 215-230. | Gaete K. (2018). Tesis de grado Universidad de Concepción. | Mendoza F. (2022). Tesis de grado Universidad de Concepción