

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

TESIS DE MAESTRÍA

**Integración de modelos numéricos de
predicción meteorológica en sistemas de
alerta temprana a emergencias**

Autor:

Lic. Rafael Andrés LIGHEZZOLO

Co-Directora:

Mg. Estefanía DE ELÍA

Asesora Científica:

Dra. Carolina TAURO

Director:

Dr. Germán Ariel TORRES

Instituto Mario Gulich
Comisión Nacional de Actividades Espaciales
CONAE

22 de abril de 2014

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Resumen

Facultad de Matemática, Astronomía y Física - FaMAF

MAESTRIA EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y RESPUESTA
TEMPRANA A EMERGENCIAS

**Integración de modelos numéricos de predicción meteorológica en sistemas
de alerta temprana a emergencias**

por Lic. Rafael Andrés LIGHEZZOLO

En esta tesis se aborda la puesta operativa del modelo numérico acoplado de predicción meteorológica *Global Forecast System – Weather Research and Forecasting (GFS-WRF)*, con el objetivo de satisfacer la necesidad de contar con datos de predicción meteorológica, para ser utilizados en sistemas de alerta temprana a emergencias desarrollados dentro de la CONAE, y para potenciales usuarios externos. La automatización completa de los procesos involucrados culmina en la publicación diaria de los datos generados en un servidor web. Se ofrece la opción de descarga en distintos formatos comúnmente utilizados en sistemas, modelos o algoritmos. Esta última modalidad no se brinda actualmente desde ninguna institución pública. Finalmente cabe destacar que las herramientas computacionales utilizadas en esta tesis son de acceso libre y gratuito.

Agradecimientos

Desde muy pequeño, mis padres me alentaron a recorrer el camino de la educación y el sacrificio. Hoy llega un título más y con él se abren las puertas para un futuro bienestar. Razones por las cuales este nuevo logro es va dedicado exclusivamente a ellos, Rafael y Norma. Queda en mi el inculcar este legado a mis hijos, Ibi y Salvatore.

Los agradecimientos también son extensivos a todos mis familiares, los cuales siempre están presentes con sus deseos de bienestar y que son la base de contención que me permitió transitar con seguridad en todos los altibajos que la vida propone. En particular quiero agradecer a Nazarena, futura gran mamá, que con su personalidad sensible y contenedora me acompaña hasta hoy.

Para mis compañeros de la Maestría, con los cuales hemos vivido dos años intensos, tiempo en el cual se forjó una fuerte amistad con cada uno de ellos. La Maestría permitió que de cada uno de ellos me lleve enseñanzas de todo tipo y así enriquecer mi persona desde lo estrictamente laboral hasta lo emocional. No quiero dejar de nombrarlos explícitamente y en el orden que todos conocemos: Juan, Elisa y Nazarena, Manuel, Gonzalo, Ana (TT), Fernanda, Elvira (Lilí), Laura, Stefanía, Erith, Carlos y Ariel.

También quiero agradecer especialmente a Germán Torres y Estefanía De Elía, Director y Co-directora de esta tesis, con los cuales me sentí trabajando en equipo y no en un entorno de tesista individual. Gracias realmente por la predisposición y compañerismo de ambos.

A toda la gente del Instituto Gulich, por la oportunidad brindada y el apoyo de cada uno de sus integrantes. En particular quiero agradecer a Marcelo Scavuzzo por alentar mi participación en la Maestría desde un principio, creer en mí, y hasta para leer la tesis cuando no era su obligación.

Al grupo de Física de la Atmósfera de Famaf. Grupo en el cual me formé desde mis primeros años de estudio y del cual siempre me considero parte. Allí conocí grandes personas y que me enseñaron muchas cosas de la vida.

Al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y el Clima del CNR de Bolonia Italia. Gracias al Dr. Vincenzo Levizzani quien nos abrió la puerta de su grupo, de una excelente calidad humana, y donde aprendí la base de los conocimientos en la cual se funda esta tesis.

A las personas e Instituciones como el SMN, INTA, a Juan Ruiz del CIMA, a Davis Allende de la UTN Regional Mendoza, a Manuel Pulido de la UNNE y REM (Red de Estaciones Meteorológicas) de la Provincia de San Luis que con su política de datos abierta es un ejemplo a imitar.

A la política de educación publica y gratuita de nuestro querido país.

Por último quisiera manifestar que comparto la opinión de quien considere insuficientes y/o desprolijos los agradecimientos anteriores y pido disculpas por ello.

Índice general

Resumen	I
Agradecimientos	II
Contenidos	IV
Índice de figuras	VIII
Lista de tablas	XI
Abreviaturas	XII
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo general	2
1.2.1. Objetivos específicos	2
1.2.2. Estructura de la tesis	2
2. Marco teórico	4
2.1. Introducción	4
2.2. Historia de los modelos en meteorología	4
2.3. Conceptos básicos de los modelos numéricos de predicción del tiempo	6
2.3.1. Las ecuaciones exactas	7
2.3.2. Diferencias finitas	9
2.3.3. Método de integración numérica leapfrog	10
2.3.4. Criterio de estabilidad de Courant–Friedrichs–Lewy	13
2.3.5. Grillas escalonadas “staggered grids”	14
2.3.6. Coordenadas verticales	15
Coordenadas Sigma.	16
Coordenadas ETA.	16
Coordenadas híbridas.	17
2.3.7. Parametrizaciones	17
2.3.8. <i>Ensembles</i>	19
2.4. Actualidad de los modelos	20
2.4.1. Pronósticos operacionales	21

2.5. Modelos globales	22
Unified Model.	23
Integrated Forecast System (IFS)	23
The Global Environmental Multiscale Model (GEM).	23
Global Forecast System (GFS).	23
2.6. Modelos regionales	24
HIRLAM.	25
BOLAM-MOLOCH.	26
WRF.	26
3. Implementación de modelos	28
3.1. Introducción	28
3.2. Modelo WRF	28
3.2.1. Preprocesamiento (WPS)	28
3.2.2. ARW solver	29
3.2.3. Modelos físicos	30
3.2.4. Gráficos	31
3.3. Instalación del modelo	31
3.3.1. Requerimientos de software	32
Paquetes WRF y WPS.	32
NetCDF (Network Common Data Form).	32
ncview.	33
Zlib.	33
PNG.	33
Jasper.	33
ARWpost.	34
GrADS.	34
3.3.3. Configuración de WRF	34
3.3.4. Compilación de WRF para casos reales	35
3.3.5. Configuración de WPS	36
3.3.6. Compilación de WPS	36
3.3.7. Datos terrestres	36
3.4. Caso de prueba	37
Descarga de datos.	37
3.4.1. Preprocesamiento-WPS	38
Puesta a punto del domino del modelo.	38
3.4.2. Procesamiento-WRF	40
3.4.3. Postprocesamiento	42
Viento.	43
Precipitación acumulada.	43
Nieve acumulada.	43
3.5. Descarga de datos globales	44
3.6. Paralelización y anidado	45
3.7. Eficiencia de la paralelización	46
3.8. Automatización del modelo acoplado GFS-WRF	48
3.8.1. Descarga de datos globales	48

3.8.2. Edición de archivos <i>namelist</i>	49
3.8.3. Etapa de preprocesamiento	50
3.8.4. Etapa de procesamiento	51
3.8.5. Etapa de postprocesamiento	51
3.9. Parametrizaciones utilizadas	52
3.10. Modelo BOLAM	53
3.10.1. Datos del modelo global	53
3.10.2. Preprocesamiento	54
3.10.3. Procesamiento	54
3.10.4. Postprocesamiento	54
3.10.5. Salida gráfica	54
4. Validación	56
4.1. Introducción	56
4.2. Metodología de evaluación	57
4.2.1. Ejemplos de metodologías reportadas	58
4.3. Simulaciones sobre territorio argentino (Área 1)	60
4.4. Comparación de datos de temperatura (Área 1)	62
4.5. Temperaturas pronosticadas (Área 1)	64
4.5.1. Temperaturas pronosticadas (Área 1) – comparaciones individuales	64
4.5.2. Temperaturas pronosticadas (Área 1) – total de estaciones	66
4.6. Comparación de datos de precipitación	69
4.7. Precipitación pronosticada	70
Primer día de pronóstico: 15/02/2013	73
Segundo día de pronóstico: 16/02/2013	73
Tercer día de pronóstico: 17/02/2013	73
4.7.1. Cambios en la condición inicial	75
4.8. Precipitación acumulada	78
4.9. Evolución temporal	79
4.9.1. Evolución temporal pronosticada	80
4.9.2. Evolución temporal pronosticada, cambios de condición inicial	80
4.9.3. Evolución temporal pronosticada, estación Monte Caseros	81
4.10. Simulación anidada sobre la provincia de San Luis (Área 2)	82
4.10.1. Comparación de datos de temperatura (Área 2)	84
4.10.2. Temperaturas pronosticadas (Área 2) – comparaciones individuales	85
4.10.3. Temperaturas pronosticadas (Área 2) – total de estaciones	88
4.10.4. Ejemplo de otras variables	89
Humedad relativa	89
Intensidad y dirección del viento	90
4.10.5. Conclusión de la validación	91
4.11. Algunos trabajos sobre WRF en Argentina	91
4.12. Simulación vs. Kriging	92
4.12.1. Kriging de temperaturas sobre Argentina	93
4.12.2. Kriging de temperaturas sobre la provincia de San Luis	96
5. Análisis de eventos particulares	100
5.1. Introducción	100

5.2.	Caso de estudio: 4 y 5 de abril del 2012	100
5.2.1.	Análisis meteorológico	100
5.2.2.	Simulaciones	102
5.3.	Caso de estudio: 1 y 3 de abril del 2013	107
5.3.1.	Simulaciones con WRF	107
5.3.2.	Evolución temporal	110
6.	Aplicaciones de productos generados con WRF	114
6.1.	Introducción	114
6.2.	Construcción de mapas de combustibles para la prevención y el manejo de incendios en Argentina	114
6.3.	Obtención de mapas de calidad de aire, a través de la implementación y primera aplicación del modelo de transporte químico CHIMERE sobre Argentina	115
6.4.	Índice de Riesgo de Incendio: implementación para las sierras de Córdoba	116
6.5.	Provisión de mapas de intensidad y dirección de vientos	117
7.	Publicación de datos	119
7.1.	Introducción	119
7.1.1.	Arquitectura del sistema	119
7.1.2.	Interfaz	120
7.1.2.1.	Descripción de opciones del menú de variables	121
7.1.2.2.	Descripción del menú de desplazamiento	122
7.1.2.3.	Descripción de los botones de descarga	122
7.1.2.4.	Elección de las variables publicadas	122
8.	Conclusiones y discusión	123
8.1.	Visión general a futuro	125
8.1.1.	Líneas específicas a futuro	126
A.	Archivos	128
A.1.	<i>namelist.wps</i>	128
A.2.	<i>namelist.input</i>	130
A.3.	<i>namelist.ARWpost</i>	132
A.4.	Ejemplo de script en GrADS	133
A.5.	VARIABLES DE SALIDA DE WRF	134
	Bibliografía	152

Índice de figuras

2.1.	Representación simbólica de discretización de la atmósfera	10
2.2.	Clasificación de grillas de Arakawa. Las variables representadas son u , v y h	15
2.3.	Representación esquemática de las coordenadas sigma.	16
2.4.	Representación esquemática de las coordenadas sigma y ETA.	17
2.5.	Representación esquemática de las coordenadas híbridas utilizadas por el GFS.	17
2.6.	Procesos físicos en la atmósfera y sus interacciones.	19
2.7.	<i>Ensembles</i> del GFS de las posibles trayectorias del huracán SANDY.	20
2.8.	Evolución de la anomalía de la correlación de la altura en 500 hPa. La anomalía de la correlación se diferencia de la correlación usual debido a que considera la climatología promedio del lugar.	21
2.9.	Mapa global del ozono total generado por GDAS.	24
2.10.	Representación gráfica de un modelo regional anidado en un modelo global.	25
3.1.	Componentes del sistema WRF.	31
3.2.	Diagrama de flujo simplificado de la instalación realizada.	37
3.3.	Imagen de infrarrojo ($10.7 \mu\text{m}$) y de vapor de agua ($6.7 \mu\text{m}$) de GOES 8.	37
3.4.	Diagrama de flujo del preprocesamiento y procesamiento.	38
3.5.	Comprobación rápida del dominio elegido.	39
3.6.	Resultado de la simulación – Vientos a 10 m.	43
3.7.	Resultado de la simulación – Precipitación acumulada (mm) en 36 horas.	43
3.8.	Resultado de la simulación – Nieve acumulada (mm) en 36 horas.	44
3.9.	Tiempo de procesamiento en función del número de procesadores.	47
3.10.	Tiempo de cálculo en función de los días pronosticados.	47
3.11.	Diagrama de flujo de la automatización del pronóstico del tiempo.	52
3.12.	Diagrama de flujo del modelo BOLAM.	55
4.1.	Región analizada por Nicolas Moussiopoulos et al.	58
4.2.	Comparación de patrones de intensidad de vientos modelados y medidos.	59
4.3.	Comparación de patrones de temperaturas modeladas y medidas.	59
4.4.	Bias de (a) velocidad del viento y de (b) temperatura, en función del tiempo.	60
4.5.	Dominio analizado. Altura del terreno (m).	61
4.6.	Distribución de estaciones meteorológicas del SMN utilizadas.	62
4.7.	Evolución de la temperatura registrada en Buenos Aires (izquierda) y San Luis (derecha). Datos del SMN.	63
4.8.	Distribución de temperaturas máximas en el territorio argentino.	63
4.9.	Evolución de la temperatura en la estación de La Quiaca.	65
4.10.	BIAS en función del tiempo para la estación de La Quiaca.	65
4.11.	Evolución de la temperatura en la estación de Monte Caseros.	65
4.12.	BIAS en función del tiempo para la estación de Monte Caseros.	66

4.13.	Mapa de BIAS promedio de la temperatura para toda la Argentina.	67
4.14.	Mapa del BIAS de la temperatura para los tres días analizados.	68
4.15.	BIAS y SD del total de las estaciones para cada uno de los días.	68
4.16.	Boxplot del BIAS para cada uno de los días.	69
4.17.	Distribución de precipitación acumulada diaria registrada.	70
4.18.	Pronósticos de precipitación acumulada diaria.	71
4.19.	Distribución de situaciones en las primeras 24 horas de pronóstico.	73
4.20.	Distribución de situaciones en las primeras 48 horas de pronóstico.	74
4.21.	Distribución de situaciones en las primeras 72 horas de pronóstico.	74
4.22.	Cambio en la distribución de situaciones.	77
4.23.	Cambio en la distribución de situaciones.	77
4.24.	Histograma de registro de precipitación acumulada diaria.	78
4.25.	Histograma aciertos de registro de precipitación acumulada diaria.	78
4.26.	Histograma aciertos de falsos positivos generados por el modelo.	79
4.27.	Evolución de la precipitación registrada para la estación Paraná Aero (izquierda) y para la estación Observatorio Córdoba (derecha).	80
4.28.	Comparación de la evolución de la precipitación registrada y pronosticada.	80
4.29.	Comparación de la evolución de la precipitación registrada y pronosticada.	81
4.30.	Comparación de la evolución de la precipitación registrada y pronosticada.	81
4.31.	Comparación de la evolución de la precipitación registrada y pronosticada, estación Monte Caseros.	82
4.32.	Dominio del anidado.	83
4.33.	Ubicación de las estaciones meteorológicas consideradas.	84
4.34.	Evolución de la temperatura en dos diferentes estaciones.	84
4.35.	Comparación de la evolución de la temperatura registrada y pronosticada para tres diferentes estaciones.	85
4.36.	Bias de la temperatura – estación Concarán.	86
4.37.	Bias de la temperatura – estación El Amago.	86
4.38.	Grilla (color amarillo) superpuesta en un mapa de Google Earth, estación El Amago (color rojo). .	87
4.39.	Comparación del RMSE entre ambos modelos en la predicción de la temperatura.	88
4.40.	Comparación del valor medio del RMSE entre ambos modelos en la predicción de la temperatura. .	88
4.41.	Mapa interpolado del error absoluto en la predicción de la temperatura.	89
4.42.	Evolución temporal de la Humedad Relativa. Comparación entre la predicción y lo registrado. .	90
4.43.	Comparación de la evolución de la intensidad y dirección del viento registrados y pronosticados. .	90
4.44.	Dominios utilizados por Ruiz et al.	92
4.45.	Ubicaciones de las estaciones de control (rojo) y las utilizadas para el Kriging (azul).	94
4.46.	Semivariograma de temperaturas.	94
4.47.	Temperaturas pronosticadas y registradas (izquierda), y error absoluto de las temperaturas pronosticadas (derecha).	96
4.48.	Ubicaciones de las estaciones de control (rojo) y las utilizadas para el Kriging (azul).	98
4.49.	Temperaturas pronosticadas y registradas (izquierda), Error absoluto de las temperaturas pronosticadas (derecha).	99
5.1.	Probable trayectoria de los tornados (izquierda), área afectada (derecha).	101
5.2.	Temperatura de topes de nube GOES 13 – SMN, evolución del sistema.	101
5.3.	Imágenes de reflectividad de radar del Aeropuerto de Ezeiza.	102
5.4.	Precipitación registrada cada 10 minutos en el Observatorio central de Buenos Aires.	102

5.5.	Temperatura de tope de nube.	103
5.6.	Actividad eléctrica en las horas de tormenta.	103
5.7.	Simulaciones de BOLAM (izquierda) y WRF (derecha).	104
5.8.	Temperatura de tope de nube – GOES 13 – SNM.	104
5.9.	Funciones de peso (izquierda), imágenes de los cinco canales del AMSU-B.	105
5.10.	Temperatura de brillo para los cinco canales del AMSU-B del evento.	106
5.11.	Estimación de la tasa de precipitación del algoritmo 183–WSL para el evento.	106
5.12.	Simulaciones de BOLAM (izquierda) y WRF (derecha).	106
5.13.	Imagen ASTER de la zona afectada (en color azul) – CONAE.	108
5.14.	Mapas de precipitación acumulada diaria - SMN.	108
5.15.	Precipitación acumulada diaria. De izquierda a derecha: SMN, WRF–FNL, GFS–WRF, Diferencia abs(FNL–GFS).	109
5.16.	Precipitación acumulada diaria. De izquierda a derecha: SMN, WRF–FNL, GFS–WRF, Diferencia abs(FNL–GFS).	109
5.17.	Temperatura de tope de nube sobre Buenos Aires – GOES 12 – CONAE.	110
5.18.	Tempertura de tope de nube sobre La Plata – GOES 12 – CONAE.	111
5.19.	Comparación entre modelos e imágenes. Arriba: GOES 12–CONAE, abajo de izquierda a derecha: WRF–FNL, GFS–WRF, BOLAM.	111
5.20.	Estimación de precipitacion del 183–WSL.	112
5.21.	Comparación entre modelos e imágenes. Arriba GOES 12–CONAE, abajo de izquierda a derecha: WRF–FNL, GFS–WRF, BOLAM.	113
6.1.	Simulación realizada con el modelo FARSITE: propagación del frente de fuego a distintos tiempos.	115
6.2.	Mapas de concentraciones de contaminantes atmosféricos.	116
6.3.	Mapa de Indice de Riesgo de Incendio.	117
6.4.	Mapa de vientos.	118
7.1.	Diagrama de flujo completo de la automatización del pronóstico del tiempo.	120
7.2.	impresión de pantalla de la plataforma web desarrollada.	120
8.1.	Esquema de vinculaciones estratégicas para la proyección de un centro operativo de pronóstico del tiempo.	126

Índice de cuadros

2.1.	Estimación de pasos de tiempo y espacio según el criterio CFL	14
4.1.	Estaciones que registraron precipitación.	71
4.2.	Estaciones que no registraron precipitación.	72
4.3.	Estaciones que registraron precipitación.	75
4.4.	Estaciones que no registraron precipitación.	75
4.5.	Comparación de pronósticos con distintas condiciones iniciales.	75
4.6.	Comparación de pronósticos con distintas condiciones iniciales.	76
4.7.	Estaciones de control.	93
4.8.	Resultados del Kriging.	95
4.9.	Resultados del Kriging y los pronósticos.	95
4.10.	Estaciones de control.	96
4.11.	Resultados del Kriging.	97
4.12.	Resultados del Kriging y los pronósticos.	97

Abreviaturas

AEARTE	Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias
AFWA	Air Force Weather Agency
CMC	Canadian Meteorological Centre
CONAE	Comisión Nacional de Actividades Espaciales
COST	European Cooperation in Science and Technology
CSS	Cascading Style Sheets
DTC	Developmental Testbed Center
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENIAC	Electronic Numerical Integrator and Computer
FAA	Federal Aviation Administration
FSL	Forecast System Laboratory
GDAS	Global Data Assimilation System
GEM	Global Environment Multiscale Model
GFS	Global Forecast System
GrADS	Grid Analysis and Display System
GSI	Gridpoint Statistical Interpolation
GTS	Global Telecommunications System
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model
HTML	HyperText Markup Language
IDW	Inverse Distance Weighting
IFS	Integrated Forecast System
ISAC	Institute of Atmospheric Sciences and Climate
LAM	Limited Area Model
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MRB	Meteorological Research Branch
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOMADS	National Operational Model Archive & Distribution System
NRL	Naval Research Laboratory
NWP	Numerical Weather Prediction
PMW	Passive MicroWave
REM	Red de Estaciones Meteorológicas
RPN	Recherche en Prévision Numérique
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SRTM3	Shuttle Radar Topography Mission
UNC	Universidad Nacional de Córdoba
URL	Uniform Resource Locator
USGS	United States Geological Survey
UTC	Universal Time Coordinated
WMO	World Meteorological Organization
WRF	Weather Research and Forecasting
WWLLN	World Wide Lightning Location Network

Dedicado a . . .

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Es sabido que los sistemas de alerta temprana enfocados a emergencias ambientales, tales como incendios, inundaciones y epidemias, dependen fuertemente de diversas variables meteorológicas. A menudo, para algunos modelos, esta información se obtiene de estaciones meteorológicas, las cuales brindan datos espacialmente discretos. Sin embargo, existen sistemas que necesitan de datos de pronóstico de estas variables. Actualmente la obtención de esta información es muy limitada.

Si bien la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) no cuenta actualmente con una red meteorológica propia, sí posee las herramientas y la capacidad para crear una base de información meteorológica mediante la utilización conjunta de modelos numéricos de predicción del tiempo y productos meteorológicos satelitales.

De lo expuesto anteriormente, surge la necesidad de crear una base de productos meteorológicos que cubra estas carencias. La generación de una base de datos que combine tanto modelos numéricos predictivos como la información proveniente de satélites trae aparejadas varias ventajas. La principal de ellas es contar con un flujo de datos en tiempo real y realizar predicciones, lo cual es fundamental cuando se habla de sistemas de alerta temprana. Sumado a esto, se tiene la posibilidad de cubrir la totalidad del territorio nacional con una continuidad espacial de los datos.

En base a las necesidades citadas y la experiencia adquirida en el uso del modelo numérico de predicción del tiempo BOLAM-MOLOCH durante la estadía en el “Instituto di Scienze dell’Atmosfera e del Clima” perteneciente al “Consiglio Nazionale delle Ricerche” en Bologna Italia, se propone en el desarrollo de la presente tesis sentar las bases iniciales

de un sistema de generación de información meteorológica que nos permita a largo plazo un desarrollo avanzado en el tema.

1.2. Objetivo general

El principal objetivo de este trabajo de tesis consiste en implementar y poner operativo el modelo numérico acoplado de predicción meteorológica *Global Forecast System – Weather Research and Forecasting (GFS–WRF)* para ser utilizado como fuente de entrada a diversos sistemas de alerta temprana que requieran variables meteorológicas. El modelo global (GFS) es el único que tiene sus datos de salida disponibles libremente en un dominio público en internet, y el modelo regional (WRF) es de código abierto, desarrollado y respaldado de manera continua por varias instituciones de EEUU y el mundo, siendo actualmente utilizado en más de 150 países. Estas características fueron las principales razones para la elección de los mismos en la implementación.

1.2.1. Objetivos específicos

Los siguientes objetivos específicos serán abordados en el desarrollo del presente trabajo:

- Describir una base teórica sobre modelos numéricos de predicción del tiempo y en particular realizar una descripción detallada sobre el funcionamiento del modelo WRF.
- Instalar, configurar y poner en funcionamiento el modelo WRF en un servidor en el Instituto Gulich (CONAE-UNC).
- Aplicar el modelo sobre el territorio argentino y dar las bases para evaluar la performance del mismo.
- Generar archivos de salida con información meteorológica en diversos formatos para ser asimilados por distintos modelos o simuladores.
- Publicar los productos meteorológicos obtenidos en el ítem anterior como así también mapas, imágenes y datos producidos por el modelo WRF a través de un servidor web con acceso externo y libre.

1.2.2. Estructura de la tesis

La tesis expuesta a continuación tiene la siguiente estructura organizativa.

- Capítulo 2: Comienza con una descripción básica de la teoría sobre los modelos numéricos de predicción del tiempo, definiendo conceptos que son necesarios para entender el funcionamiento de los mismos y las cualidades que los caracterizan. También se hace un repaso sobre los centros operativos actuales y los modelos que éstos utilizan.
- Capítulo 3: Se describen en detalle los pasos necesarios para adquirir datos meteorológicos del modelo GFS, los requerimientos y la adquisición de los archivos para la instalación del modelo WRF, la configuración de las etapas de preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento. Se expone un caso de prueba típico para la comprobación de la correcta configuración. Se dan los pasos para configurar la etapa de procesamiento de WRF en modo paralelo con un anidado simple. Se detalla cómo, mediante la construcción de un script general, se automatiza la totalidad de las etapas necesarias para obtener resultados de las simulaciones en salidas con formatos comúnmente usados como .jpg, .txt, .GeoTIFF y .gif. Se describe también el funcionamiento del modelo BOLAM utilizado en el capítulo 4 de esta tesis.
- Capítulo 4: Se proponen metodologías para la validación de las simulaciones hechas para dos dominios diferentes: el primero incluye todo el territorio argentino, y el segundo incluye la provincia de San Luis. Para la comparación de los resultados de la simulación con datos reales se utilizan datos de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el dominio de Argentina, y datos de estaciones meteorológicas de la Red de Estaciones Meteorológicas (REM) de San Luis. Variables como temperatura y precipitación se consideran para la comparación, y se realizan mapas de errores en la predicción de la temperatura identificando diferentes resultados para diferentes regiones de la Argentina. Se comparan también las salidas de las simulaciones de temperatura frente a un Kriging realizado con las estaciones meteorológicas.
- Capítulo 5: Se detalla una comparación cualitativa entre los modelos WRF, BOLAM, algoritmos de precipitación y datos satelitales en la descripción de dos eventos particulares de precipitación intensa.
- Capítulo 6: Se exponen brevemente algunos trabajos que utilizaron las salidas producidas por la implementación del modelo, las variables y los formatos utilizados.
- Capítulo 7: Se explica el funcionamiento de la plataforma web utilizada para la publicación de los datos generados.
- Capítulo 8: Se describen las conclusiones, se realizan algunas discusiones sobre las mismas y finalmente se plantean posibles líneas organizativas y de trabajo futuro.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Introducción

En este capítulo se contará brevemente la historia de los modelos numéricos relacionados a la predicción meteorológica. Luego se describirán los conceptos teóricos fundamentales de los mismos para comprender el posterior desarrollo de esta tesis. Seguidamente se hará un repaso de los grandes centros operativos de predicción del tiempo en la actualidad. Se definirá a los modelos globales y a los modelos regionales dando ejemplos de cada uno de ellos considerando los más utilizados a la fecha.

2.2. Historia de los modelos en meteorología

Alrededor de 1890 [1], Cleveland Abbe, meteorólogo norteamericano, concluyó que la meteorología es esencialmente una aplicación de la termodinámica y de la hidrodinámica a la atmósfera. En su trabajo “The physical basis of long-range weather forecasting” propuso una aproximación matemática para el pronóstico y expresó su deseo de que los científicos de la atmósfera comenzaran a buscar herramientas, ya sean gráficas, analíticas o numéricas, para resolver estas ecuaciones.

Seguidamente el científico Noruego Vilhelm Bjerknes realizó un análisis explícito del problema de la predicción del clima desde un punto de vista científico estableciendo un plan de dos pasos para un pronóstico racional. Un primer paso “diagnóstico” en el cual el estado inicial de la atmósfera es determinado usando observaciones y un segundo paso “pronóstico” en el cual las leyes de movimiento son usadas para calcular cómo cambia el estado inicial en el tiempo. Bjerknes consideró siete variables básicas con siete ecuaciones independientes. Las variables fueron: presión, temperatura, densidad,

humedad y las tres componentes del viento, mientras que las ecuaciones fueron: las tres ecuaciones hidrodinámicas de movimiento, la ecuación de continuidad, la ecuación de estado y una ecuación que involucra las leyes de la termodinámica. Bjerknes desarrolló un método cuantitativo gráfico para resolver las ecuaciones ya que no pudo resolvérlas numéricamente ni analíticamente. Su idea fue representar el estado inicial de la atmósfera a través de gráficos dando la distribución de las variables a diferentes niveles de altura que luego fueron utilizados para construir un nuevo conjunto de gráficos que describían la atmósfera algunas horas después. El proceso era iterado hasta que se alcanzara la hora de pronóstico deseada. Sin embargo Bjerknes no vio grandes posibilidades de llevar sus ideas a la práctica.

Alrededor de 1913 el científico inglés Lewis Fry Richardson intentó una solución directa a las ecuaciones de movimiento. Su idea fue expresar los principios físicos que gobiernan el comportamiento de la atmósfera como un sistema de ecuaciones matemáticas y aplicarles el método de diferencias finitas para resolver el sistema. Las ecuaciones básicas ya habían sido identificadas por Abbe y Bjerknes, luego usando el más completo conjunto de observaciones disponibles aplicó sus métodos numéricos y calculó los cambios en la presión y los vientos en dos puntos de Europa central. Los resultados fueron calamitosos. Richardson calculó un cambio de presión superficial de 145 hP en seis horas, un valor completamente no real. Él especuló con qué resultados razonables podrían ser obtenidos si los datos iniciales fueran suavizados o filtrados y discutió varios métodos para hacerlo. De hecho la tendencia errónea se debió al desbalance entre la presión y los campos de viento dando como resultado una gran amplitud de oscilaciones de alta frecuencia de ondas de gravedad. La solución a esto fue modificar el análisis para restaurar el balance, este proceso se denominó “iniciación”. La verdadera significancia del trabajo de Richardson no fue inmediatamente evidente, la complejidad computacional de los procesos y los desastrosos resultados de un único ensayo de pronóstico incentivaron a muchos a desistir de estas ideas. A pesar de todo, las ideas de Richardson son ahora universalmente reconocidas por muchos meteorólogos y su trabajo es la base de la construcción del pronóstico moderno.

A mediados de los años 30 el matemático John von Neumann se interesó en las ecuaciones con derivadas parciales no lineales que describían los flujos turbulentos. El pensó que un progreso acelerado en la hidrodinámica podría darse si se disponía de algún medio que resolviera estas ecuaciones complejas. Luego diseñó y construyó una computadora electrónica en el Institute for Advanced Studies en Princeton. La máquina fue construida entre 1946 y 1952 bajo el proyecto “The Computer Project” y su diseño tuvo un profundo impacto en el desarrollo subsiguiente de la industria de las computadoras. Von Neumann hizo una estimación de la potencia computacional requerida para integrar las ecuaciones de movimiento y concluyó que era factible de realizarse mediante la computadora. Luego

hizo una propuesta formal al U.S. Navy para financiar un proyecto de meteorología. La propuesta fue aceptada y en Julio de 1946 comenzó el Proyecto de Investigación Meteorológica. El plan inicial fue integrar las ecuaciones primitivas, pero las soluciones para las ondas de gravedad de alta velocidad requerían el uso de pasos de tiempos cortos que excedían la capacidad de cálculo del momento. Jule Charney analizó las ecuaciones primitivas usando la técnica de análisis de escala simplificándolas de manera que las soluciones a las ondas gravitatorias fueran completamente eliminadas.

Para principios de los años 50 se contaba con el análisis matemático y los algoritmos numéricos para resolver las ecuaciones, así que se hicieron arreglos para ejecutar la integración en la única computadora disponible en ese momento denominada ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) en Aberdeen Maryland. Cuatro pronósticos de 24 hs. fueron hechos, y los resultados indicaban claramente que las características a gran escala del flujo en la tropósfera media podía ser pronosticado barotrópicamente con un razonable parecido a la realidad. Cada integración de 24 hs. le tomaba 24 hs. de computadora.

Para 1972 el U.K. Met. Office introdujo un modelo con ecuaciones primitivas y 10 niveles de altura incorporando una sofisticada parametrización de procesos físicos para producir el primer pronóstico de precipitación. Actualmente los centros de pronósticos operacionales utilizan un amplio espectro de modelos combinando modelos globales y locales.

2.3. Conceptos básicos de los modelos numéricos de predicción del tiempo

Los modelos de predicción numérica del tiempo (NWP) usan modelos matemáticos de la atmósfera para predecir el tiempo basados en las condiciones actuales del tiempo. Los NWP son omnipresentes en la actual predicción meteorológica. Las bases teóricas de la predicción numérica del tiempo provienen de la dinámica atmosférica, la cual provee las ecuaciones que describen la evolución de la atmósfera. El estado futuro de la atmósfera se predice usando aproximaciones numéricas de las ecuaciones de la dinámica. Como se mencionó con anterioridad, Vilhelm Bjerke ness fue el primero en reconocer que la predicción numérica del tiempo era posible, en principio, y propuso que esencialmente el pronóstico del tiempo se puede considerar como un problema matemático de condiciones iniciales. Es decir que dado un conjunto de ecuaciones que gobiernan el cambio de las variables meteorológicas con el tiempo, y conociendo la condición inicial de la atmósfera, se puede resolver las ecuaciones para obtener nuevos valores para esas variables en un

momento posterior, generando así un pronóstico. Una representación matemática simple de esta clase de problema es la siguiente:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = F(A), \quad A(0) = A_0, \quad (2.1)$$

donde A es alguna variable meteorológica que se modifica en el tiempo debido a la acción de F .

La variable F se conoce como el forzado, combinando todos los tipos de acciones de cambio sobre A .

La solución de la ecuación (2.1) tiene la forma siguiente:

$$A_{Pronosticado} = A_{Inicial} + \int F(A)dt. \quad (2.2)$$

Este proceso se sigue para configurar las ecuaciones para los NWP. Las ecuaciones básicas que gobiernan los procesos en la atmósfera se presentan a continuación.

2.3.1. Las ecuaciones exactas

Los principios básicos del movimiento son expresados por la segunda ley de Newton que dice que la variación de cantidad de movimiento es igual a la fuerza aplicada. Euler aplicó estas ecuaciones de movimiento a un fluido continuo. Laplace, en sus estudios sobre las mareas, tomó en cuenta los efectos dinámicos de la rotación, y derivó las ecuaciones de movimiento en un marco de referencia que rotaba con la tierra. Luego, Coriolis mostró de qué manera las ecuaciones deberían ser modificadas para tener en cuenta un marco de referencia rotante y sus efectos dinámicos. Navier and Stokes derivaron la forma de términos adicionales requeridos para permitir los efectos de las fuerzas de fricción. Finalmente la ecuación de movimiento completa es llamada la ecuación de Navier–Stokes [2, 3].

Las fuerzas que influencian el movimiento de la atmósfera son los gradientes de presión, la gravedad, la fricción y las fuerzas de cambios de dirección aparentes debido a la rotación. Si consideramos una unidad de masa de aire la ecuación de movimiento puede escribirse como:

$$\frac{D\mathbf{U}}{Dt} = -2\Omega \times \mathbf{U} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{F} + \mathbf{g}^* - \Omega \times (\Omega \times \mathbf{r}), \quad (2.3)$$

donde la derivada $\frac{D\mathbf{U}}{Dt}$ se conoce como la derivada material. La derivada material está definida por:

$$\frac{D\mathbf{U}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} \quad (2.4)$$

Las variables dependientes son en este caso las velocidades \mathbf{U} relativas a la rotación de la tierra, la presión p y la densidad ρ . Las variables independientes son, el vector posición \mathbf{r} (distancia desde el centro de la tierra) y el tiempo t). La variable \mathbf{F} es la fuerza de fricción y Ω es la velocidad angular del eje de referencia solidario a la tierra. Los efectos de la rotación están representados por la fuerza de Coriolis $-2\Omega \times \mathbf{U}$, y el término de aceleración centrífuga $-\Omega \times (\Omega \times \mathbf{r})$. Este último término depende sólo de la posición, luego es posible combinarlo con la verdadera gravedad \mathbf{g}^* para producir la aceleración de la gravedad aparente:

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}^* - \Omega \times (\Omega \times \mathbf{r}). \quad (2.5)$$

Ésta fuerza compuesta es una cantidad efectiva medida en la superficie de la tierra.

La ecuación de continuidad para la conservación de la masa puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \rho \mathbf{U} = 0. \quad (2.6)$$

El principio de conservación de la energía, en el cual se basa la termodinámica, fue formulado por Clausius, Helmholtz, Joule y Kelvin entre otros. En el contexto de la dinámica atmosférica este principio afirma que la energía calórica añadida a una parcela de aire puede incrementar su energía interna o inducirla a hacer un trabajo de expansión, siendo la suma de estas acciones la energía total aplicada. Matemáticamente la primera ley de la termodinámica para este sistema se expresa de la siguiente manera:

$$c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d(\frac{1}{\rho})}{dt} = Q', \quad (2.7)$$

donde T es la temperatura, c_v es el calor específico a volumen constante y Q' es la tasa de calor intercambiado.

Considerando a la atmósfera como un gas ideal, ésta debe cumplir con la ecuación de estado:

$$p = \mathcal{R}\rho T, \quad (2.8)$$

donde \mathcal{R} es la constante de los gases ideales para el aire seco.

Por último consideramos la ecuación de conservación para la razón de mezcla del vapor de agua, la cual indica que el total de vapor de agua en una parcela se conserva excepto cuando existen fuentes de evaporación (E) o de condensación (C):

$$\frac{dq}{dt} = E - C. \quad (2.9)$$

Esta ecuación de conservación tendrá la misma forma para cualquier otra sustancia como por ejemplo el agua líquida, ozono, etc., siempre y cuando se incluyan sus correspondientes fuentes y sumideros.

Finalmente se obtiene un conjunto de siete ecuaciones con siete incógnitas, a saber: $\mathbf{U} = (u, v, w), T, p, \rho, q$.

$$\begin{aligned}\frac{D\mathbf{U}}{Dt} &= -2\Omega \times \mathbf{U} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{F} + \mathbf{g}^* - \Omega \times (\Omega \times \mathbf{r}), \\ \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \rho \mathbf{U} &= 0, \\ c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d(\frac{1}{\rho})}{dt} &= Q', \\ p &= \mathcal{R} \rho T, \\ \frac{dq}{dt} &= E - C.\end{aligned}$$

Este sistema de ecuaciones tiene un carácter no lineal que lo hace extremadamente difícil de resolver analíticamente. En este sentido el modelado numérico es una herramienta fundamental para ayudar a comprender los complicados procesos involucrados y sus interacciones cuando las ecuaciones no pueden resolverse analíticamente por su complejidad o desconocimiento. A continuación se describen técnicas para obtener las soluciones de esta clase de problemas.

2.3.2. Diferencias finitas

Para obtener las soluciones de las ecuaciones de manera numérica se requiere que éstas sean transformadas en una forma algebraica. Esta transformación puede darse a través del método conocido como diferencias finitas. En esta técnica los valores de las variables continuas son representados por un conjunto de datos de valores finitos y sus derivadas son aproximadas por diferencias de los valores de los puntos adyacentes. La atmósfera es dividida en varias capas discretas horizontales y cada una de ellas a su vez es dividida en un número de celdas, donde las variables son evaluadas en el centro de cada celda (ver figura 2.1).

De manera similar el tiempo es llevado a un número finito de pasos discretos, siendo la evolución continua de las variables aproximada por pasos discretos. Este método fue ampliamente aplicado en la resolución de ecuaciones diferenciales por su utilidad y simpleza conceptual. En el contexto de las diferencias finitas, la expresión para la derivada ($\frac{df}{dx}$)

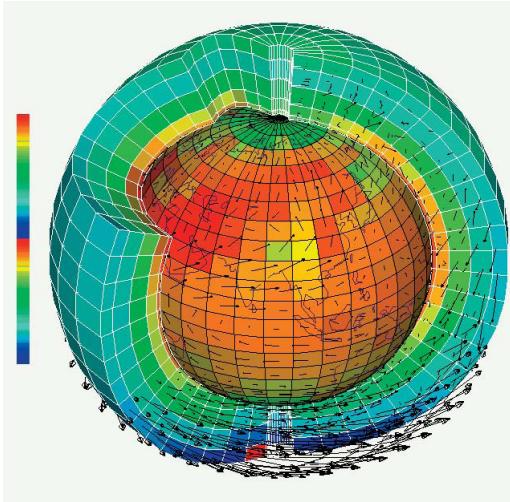


FIGURA 2.1: Representación simbólica de discretización de la atmósfera.

de una función $f(x)$ existe si el cociente:

$$\frac{\Delta f}{\Delta x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}, \quad (2.10)$$

tiende a un límite definido cuando el incremento Δx tiende a cero. Ya que este incremento no es centrado respecto al punto x , la expresión para la diferencia finita centrada puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta f}{\Delta x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x}. \quad (2.11)$$

En la aproximación de una ecuación diferencial por diferencias finitas, se revierte el procedimiento y se reemplazan las derivadas por los correspondientes incrementos de las variables.

2.3.3. Método de integración numérica leapfrog

A continuación se describe de manera básica el método leapfrog de integración.

Sea Q una variable dependiente gobernada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = F(Q). \quad (2.12)$$

El dominio continuo de t es reemplazado por una sucesión de momentos discretos $\{0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, n\Delta t, \dots\}$, y la solución para cada momento es denotada como $Q^n = Q(n\Delta t)$.

Si la solución es conocida al tiempo $t = n\Delta t$, el término de la derecha de la ecuación (2.12) puede ser calculado.

Si se aproxima la derivada temporal en la ecuación (2.12) mediante la diferencia centrada, su expresión se transforma en:

$$\frac{Q^{n+1} - Q^{n-1}}{2\Delta t} = F^n. \quad (2.13)$$

Luego el valor de Q^{n+1} puede ser calculado del valor del paso Q^{n-1} y del término F^n . Despejando de la ecuación (2.13) se obtiene:

$$Q^{n+1} = Q^{n-1} + 2\Delta t F^n. \quad (2.14)$$

Este proceso de dar pequeños pasos hacia adelante de un tiempo a otro se repite varias veces hasta que se alcance el rango del pronóstico deseado.

Para la ecuación (2.12) una simple condición inicial es suficiente para determinar la solución, mientras que para el método de integración descripto es necesario conocer dos valores de Q para comenzar con los cálculos. Además de la condición inicial física Q^0 se requiere una condición inicial computacional Q^1 . Ésta última condición no puede ser obtenida mediante el método leapfrog, pero sí puede ser obtenida aplicando un paso de la diferencia finita no centrada, es decir:

$$Q^1 = Q^0 + \Delta t F^0. \quad (2.15)$$

Además del método descripto anteriormente, existe una variedad de métodos que resuelven esta clase de problemas. En [3] puede encontrarse la siguiente lista de métodos expresados para una función de la forma: $dU/dt = F(U)$ para los esquemas desde (2.16)–(2.28) y $dU/dt = F_1(U) + F_2(U)$ para (2.29)–(2.30)

- Leapfrog suavizado:

$$\frac{U^{n+1} - \bar{U}^{n-1}}{2\Delta t} = F(U^n), \quad (2.16)$$

$$\bar{U}^n = U^n + \alpha(U^{n+1} - 2U^n + \bar{U}^{n-1}). \quad (2.17)$$

- Euler:

$$\frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} = F(U^n). \quad (2.18)$$

- Crank–Nicholson:

$$\frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} = F \left(\frac{U^n + U^{n+1}}{2} \right). \quad (2.19)$$

- Crank–Nicholson implícito:

$$\frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} = F \left(\frac{\beta U^n + (1 - \beta) U^{n+1}}{2} \right), \quad \beta < 0.5. \quad (2.20)$$

- Completamente implícito o retroceso:

$$\frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} = F(U^{n+1}). \quad (2.21)$$

- Matsuno:

$$\frac{U^* - U^n}{\Delta t} = F(U^n), \quad \frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} = F(U^*). \quad (2.22)$$

- Heun:

$$\frac{U^* - U^n}{\Delta t} = F(U^n), \quad \frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} = F \left(\frac{U^n + U^*}{2} \right). \quad (2.23)$$

- Adams–Bashforth:

$$\frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} = F(U^n), \quad \frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} = F \left(\frac{3U^n - U^{n-1}}{2} \right). \quad (2.24)$$

- Runge–Kuta de orden 4:

$$\frac{U^{n+1/2^*} - U^n}{\Delta t/2} = F(U^n), \quad (2.25)$$

$$\frac{U^{n+1/2^{**}} - U^n}{\Delta t/2} = F(U^{n+1/2^*}), \quad (2.26)$$

$$\frac{U^{n+1^*} - U^n}{\Delta t} = F(U^{n+1/2^{**}}) \frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t}, \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} &= \frac{1}{6} \left[F(U^n) + 2F(U^{n+1/2^*}) \right. \\ &\quad \left. + 2F(U^{n+1/2^{**}}) + F(U^{n+1^*}) \right]. \end{aligned} \quad (2.28)$$

- Semi-implícito:

$$\frac{U^{n+1} - U^{n-1}}{2\Delta t} = F_1(U^n) + F_2\left(\frac{U^{n+1} + U^{n-1}}{2}\right). \quad (2.29)$$

- Pasos fraccionados:

$$\frac{U^* - U^n}{\Delta t} = F_1(U^n), \quad \frac{U^{n+1} - U^*}{\Delta t} = F_2(U^*) \quad (2.30)$$

Cada uno de estos esquemas tiene características que los hacen útiles para solucionar distintos tipos de problemas.

2.3.4. Criterio de estabilidad de Courant–Friedrichs–Lewy

Anteriormente consideramos las aproximaciones de diferencias finitas de manera general. Para las ecuaciones diferenciales que gobiernan la dinámica de la atmósfera existen criterios de estabilidad que evitan tener inestabilidades numéricas que conduzcan a una solución irreal del problema. La precisión depende de los tamaños de los pasos de tiempo y de espacio, Δx y Δt . Es razonable esperar que los errores se vuelvan más pequeños cuanto más refinada es la grilla espacio–temporal. Sin embargo, un nuevo concepto se pone en juego y es que la estabilidad depende de los tamaños relativos de los pasos de tiempo y espacio. Una solución realista no es garantizada con la reducción de los tamaños de Δx y Δt de manera independiente. Consideremos la ecuación de onda:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (2.31)$$

donde Q depende de t y de x . El término de velocidad de advección c es constante y, sin perder la generalidad, se puede asumir como $c > 0$. La ecuación de ondas tiene una solución de la forma $Q = f(x - ct)$, donde f es una función arbitraria. En particular se puede considerar la solución sinusoidal $Q = Q^0 e^{ik(x-ct)}$ de longitud de onda $L = 2\pi/k$. Consideremos ahora las aproximaciones finitas en el espacio y en el tiempo:

$$\left(\frac{Q_m^{n+1} - Q_m^{n-1}}{2\Delta t} \right) + c \left(\frac{Q_{m+1}^n - Q_{m-1}^n}{2\Delta x} \right) = 0, \quad (2.32)$$

donde $Q_m^n = Q(m\Delta x, n\Delta t)$. Se busca una solución de la forma: $Q_m^n = Q^0 e^{ik(m\Delta x - Cn\Delta t)}$. Para c real, ésta es una solución posible. Sin embargo, si c es compleja, esta solución tendrá un comportamiento exponencial, muy diferente de la solución continua. Sustituyendo Q_m^n en la ecuación de diferencias finitas se obtiene:

$$c = \frac{1}{k\Delta x} \sin^{-1} \left[\frac{c\Delta t}{\Delta x} \sin(k\Delta x) \right]. \quad (2.33)$$

Si el argumento de la inversa del seno es menor que la unidad, c es real, de lo contrario c es complejo y la solución crecerá con el tiempo. Claramente, $c\Delta t/\Delta x$ es una condición suficiente para c real. Es necesario también para una onda de cuatro longitudes de grilla $k\Delta x = \pi/2$, luego $\sin k\Delta x = 1$. Finalmente la condición de estabilidad de la solución es:

$$Le \equiv c \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1. \quad (2.34)$$

Este parámetro adimensional es conocido como el número de Courant, aunque se denota como Le debido a Lewy quien fue el primero en considerar este criterio de estabilidad. Courant, Friedrichs y Lewy publicaron este criterio y lo llamaron criterio CFL, el cual impone una fuerte restricción sobre los tamaños relativos de las grillas de espacio y tiempo.

La condición impuesta por el criterio (2.34) es para las altas velocidades de onda que ocurren en el sistema. Para la atmósfera, la velocidad de ondas de gravedad externas pueden ser estimadas como:

$$c = \bar{u} + \sqrt{gH}, \quad (2.35)$$

donde \bar{u} es la velocidad de advección y H es la escala de altura. Si se asume $\bar{u} < 100 \text{ ms}^{-1}$ y $\sqrt{gH} < 300 \text{ ms}^{-1}$, un valor máximo para c es 400 ms^{-1} . Con lo cual, según el criterio, se puede estimar el máximo paso de tiempo permitido para distintos tamaños de grilla como se muestra a continuación:

CUADRO 2.1: Estimación de pasos de tiempo y espacio según el criterio CFL.

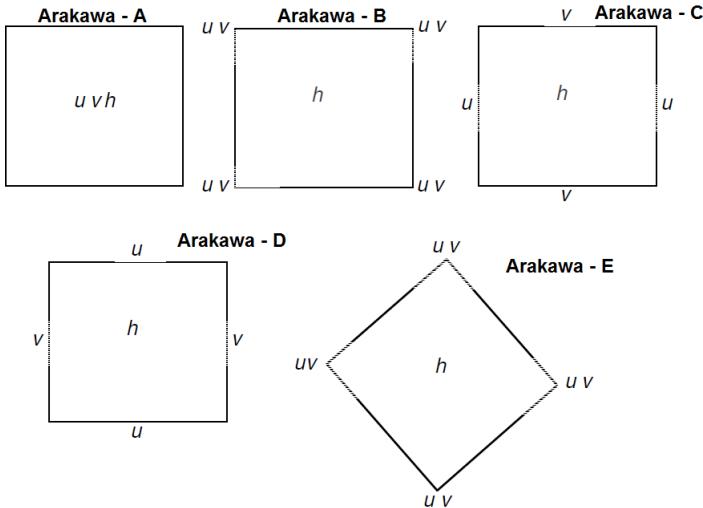
Δx	200 km	100 km	20 km	10 km
Δt	500 s	250 s	50 s	25 s

En el caso de dos dimensiones, el criterio de estabilidad es más riguroso, se necesita elegir un paso de tiempo que sea $\sqrt{2}$ veces más chico que el permitido para una dimensión.

2.3.5. Grillas escalonadas “staggered grids”

Actualmente para representar y calcular las cantidades físicas involucradas en los NWP sobre grillas rectangulares se utilizan sistemas como las grillas de Arakawa. Existen cinco tipos de grilla Arakawa, clasificadas como Arakawa–A, Arakawa–B, ..., Arakawa–E [4]. A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de ellas (ver figura 2.2):

- Arakawa–A: esta grilla, no escalonada, evalúa todas las cantidades en el mismo punto de la celda. Puede ser por ejemplo en el centro o en las esquinas de la celda.

FIGURA 2.2: Clasificación de grillas de Arakawa. Las variables representadas son u , v y h .

- Arakawa-B: esta clase de grilla escalonada separa la evaluación de dos conjuntos de cantidades. Por ejemplo se podrían evaluar las velocidades en el centro de la celda y las masas en las esquinas de la misma.
- Arakawa-C: esta clase además separa la evaluación de cantidades vectoriales en comparación con Arakawa-B. Por ejemplo, en vez de evaluar ambas componentes Este–Oeste de la velocidad \bar{u} y Norte–Sur de la velocidad de la velocidad \bar{v} , se podrían evaluar las componentes en el centro de los lados izquierdo y derecho de la celda, mientras que para las componentes de \bar{v} la evaluación podría ser en el centro del lado superior e inferior de la celda.
- Arakawa-D: es una rotación de 90° de la grilla Arakawa-C.
- Arakawa-E: es una grilla escalonada rotada a 45° relativa a la orientación de las primeras grillas. Esta orientación permite que todas las variables sean definidas a lo largo de una sola cara del domino rectangular.

Cada una de estas configuraciones tienen sus ventajas y desventajas, para una mayor descripción de las mismas se puede consultar en [3].

2.3.6. Coordenadas verticales

La estructura vertical de un modelo es tan importante en el desempeño del mismo como lo son las configuraciones de las estructuras horizontales que se describieron anteriormente. Es decir, una apropiada descripción de la estructura vertical de la atmósfera conduce a un mejor pronóstico. Esto requiere una adecuada selección de las coordenadas verticales

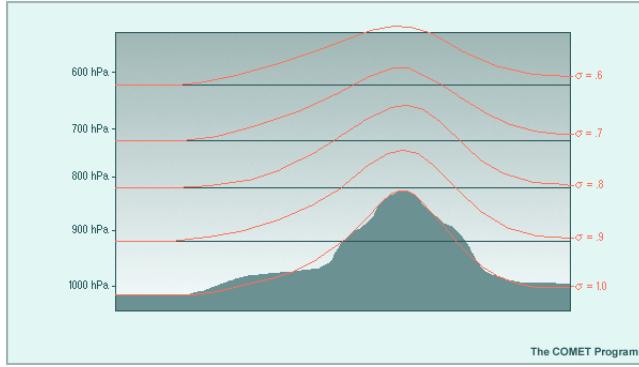


FIGURA 2.3: Representación esquemática de las coordenadas sigma.

y de la resolución vertical. Prácticamente todos los modelos usan estructuras verticales discretas. Algunas de las coordenadas más populares en la actualidad se describen conceptualmente a continuación.

Coordenadas Sigma. El sistema de coordenadas sigma define su base a nivel suelo del modelo. Las superficies en este sistema de coordenadas sigue el modelo de terreno. De manera simplificada la coordenada sigma se define como: $\sigma = p/p_s$, donde p es la presión de un nivel pronosticado dentro del modelo y p_s es la presión en la superficie de la tierra (no la presión a nivel del mar). El valor de σ sobre la superficie es uno, siguiendo una versión suavizada del terreno. La capa superior del modelo está típicamente situada por encima de la tropopausa, usualmente entre 25 y 1 hPa, donde el valor de σ es constante e igual a cero. Una representación gráfica es mostrada en la figura 2.3.

Coordenadas ETA. La coordenada ETA es una variante de la coordenada sigma, que usa la presión media a nivel del mar en vez de la presión en la superficie como nivel de referencia. Esta coordenada se define como:

$$\eta_s = \frac{p_r(z_s) - p_t}{p_r(z=0) - p_t}, \quad (2.36)$$

donde: p_t es la presión en el tope del modelo, $p_r(z=0)$ es la presión atmósferica media (MSL = 1013 hPa), $p_r(z_s)$ es la presión atmosférica al nivel Z_s del terreno.

La coordenada ETA tiene un dominio que va desde el valor 0 en el tope de la atmósfera hasta 1 a nivel del mar. A diferencia de las coordenadas sigma, donde todos los cubos son considerados por encima de la superficie de la tierra, en estas coordenadas, algunas celdas están por debajo de la superficie en áreas donde la elevación del terreno está por encima del nivel del mar. Esto requiere una formulación numérica especial para el modelo de flujo cercano a la superficie de la tierra.

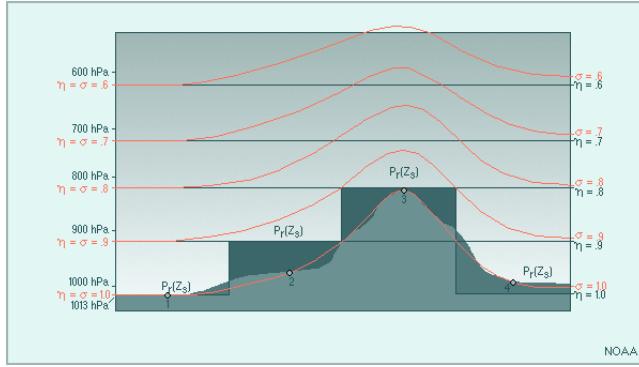


FIGURA 2.4: Representación esquemática de las coordenadas sigma y ETA.

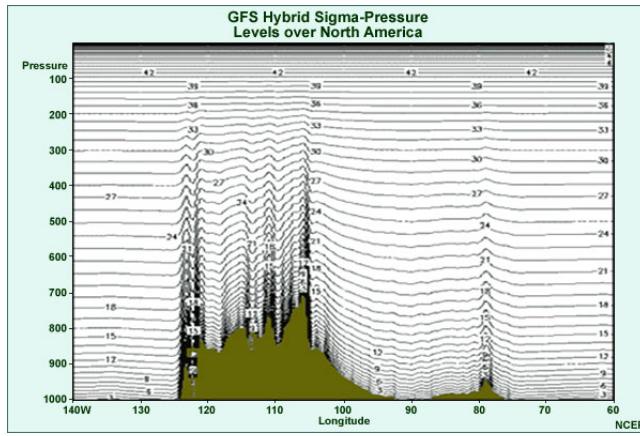


FIGURA 2.5: Representación esquemática de las coordenadas híbridas utilizadas por el GFS.

La figura 2.4 muestra una comparación de la representación de ambas coordenadas descritas anteriormente.

Coordenadas híbridas. El modelo de coordenadas híbridas combina coordenadas sigma en las capas inferiores con capas isobáricas a medida que se aleja de la superficie. Este sistema toma la ventaja de las coordenadas sigma en la capa límite mientras que utiliza en lo alto coordenadas planas las cuales tienen mejores propiedades numéricas y aumenta la eficiencia y precisión de los cálculos de transferencia radiativa usados en la asimilación de observaciones satelitales de radiancia. El modelo de pronóstico global GFS utiliza esta clase de coordenadas en su modelo. La figura 2.5 es un ejemplo del uso de estas coordenadas por el GFS.

2.3.7. Parametrizaciones

Los modelos de clima tienen típicamente una resolución horizontal del orden de varios cientos de kilómetros, los modelos de pronósticos globales tienen resoluciones de 50–100

km, y los modelos regionales de mesoscala tienen resoluciones de 10–50 km. En la dirección vertical, la resolución y la extensión vertical ha sido incrementada sustancialmente en los modelos actuales teniendo entre 10 y 50 niveles verticales, extendiendo desde la superficie hasta la estratosfera e inclusive la mesosfera. Así mientras el poder de las computadoras siga aumentando, la resolución de los modelos también lo hará.

A pesar del continuo incremento de la resolución, hay muchos procesos importantes y escalas de movimientos en la atmósfera que no pueden ser explícitamente resueltos con los modelos actuales. Esto incluye desde movimientos turbulentos con escalas de centímetros hasta la escala de la grilla del modelo, así como también procesos que ocurren a nivel de escala molecular, como condensación, evaporación, fricción y radiación. Se suele referir a todos los procesos que no pueden resolverse explícitamente como “procesos a escala de sub-grilla”.

Un ejemplo de un proceso importante que se da a escala de sub-grilla es el mezclado turbulento en la capa límite planetaria. Durante el día, el calor del sol que llega a la tierra no sólo calienta el suelo, sino que también hace que las plantas transpiren y la humedad del suelo se evapore. Estos procesos transportan humedad hacia la atmósfera. El calentamiento de la superficie conduce a movimientos turbulentos que se producen en escalas de unos pocos metros a unos pocos cientos de kilómetros. Con un tamaño de grilla horizontal de entre 10–100 km, los modelos no pueden resolver estos movimientos. Sin embargo, el transporte de humedad y de calor hacia la capa límite es crucial para el desarrollo de las tormentas en las tardes y muchos otros fenómenos que son importantes.

Otro importante ejemplo es la convección de los cúmulos tropicales. Los cúmulos en los trópicos son conocidos por su gran importancia en el balance energético global. Cada una de estas nubes tienen tamaños típicos de unos pocos kilómetros tanto horizontalmente como verticalmente.

Aunque estos procesos ocurren a pequeña escala, ellos dependen y a su vez afectan los campos a gran escala y a los procesos que son explícitamente resueltos por los modelos numéricos. Por ejemplo, la condensación de vapor de agua a escala de sub-grilla ocurre si el campo de humedad es suficientemente alto, y a la vez, la condensación libera calor latente que calienta el campo de temperatura de sub-grilla. Por esta razón, no se pueden ignorar los efectos de los procesos de sub-grilla sobre los campos de escala resoluble sin degradar la calidad del pronóstico.

Para reproducir la interacción de los procesos de la sub-grilla y la grilla, los fenómenos a escala de sub-grilla son “parametrizados”, es decir su efecto es formulado en términos de los campos resolubles. La figura 2.6 indica esquemáticamente los procesos (usualmente

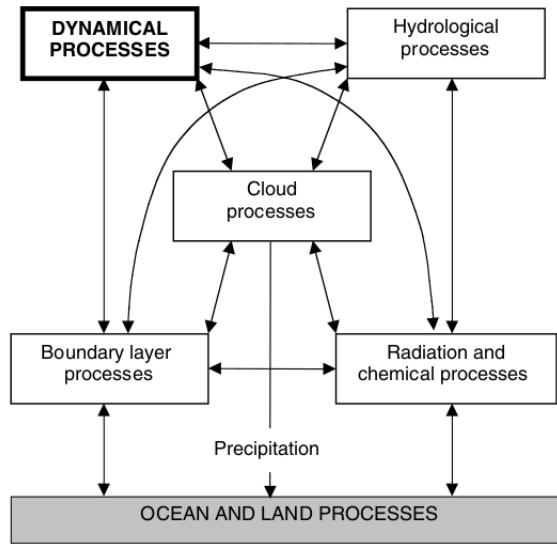


FIGURA 2.6: Procesos físicos en la atmósfera y sus interacciones.

conocidos como dinámicas del modelo) que deberían ser parametrizados (la física del modelo), y sus interacciones.

Los detalles de las parametrizaciones tienen profundos efectos en los modelos de pronóstico, principalmente a escalas de tiempos grandes, y son el motivo de muchas y continuas investigaciones.

2.3.8. *Ensembles*

Charney, en los años 50 indicaba que aunque los modelos continuaran mejorando, las habilidades de éstos para predecir estaría limitada debido a errores en la condición inicial. Más tarde (a principios de los años 60) determinó que la atmósfera, así como cualquier otro sistema con inestabilidades, tiene un límite de predictibilidad (que estimó de aproximadamente 2 semanas) aún si el modelo es óptimo y las condiciones iniciales son conocidas casi a la perfección. El llevó a cabo un experimento donde comparó dos resultados de simulaciones hechas con el mismo modelo pero con distintas condiciones iniciales que diferían muy levemente. Debido sólo a un error de redondeo de diferencia entre estas dos simulaciones, él encontró que después de un par de semanas ambas soluciones diferían una de otra como si fueran dos trayectorias aleatorias del modelo.

Esta alta sensibilidad al cambio en la condición inicial generó un dilema para los pronosticadores, ya que no existe un único pronóstico correcto [5]. En este sentido se desarrolló el concepto de pronóstico de *ensembles* que se utiliza para generar una solución representativa de posibles estados futuros de la atmósfera. El *ensemble* considera predicciones

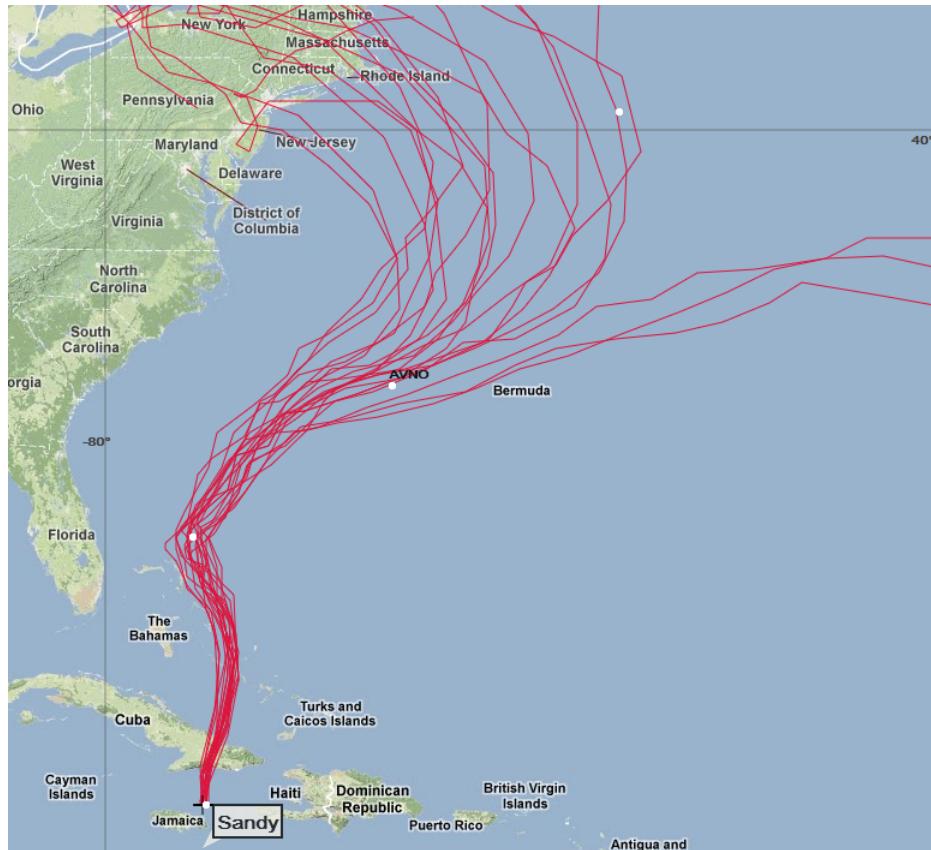


FIGURA 2.7: *Ensembles* del GFS de las posibles trayectorias del huracán SANDY.

numéricas múltiples que se dan a partir de leves diferencias en las condiciones iniciales plausibles dadas por un conjunto de mediciones u observaciones. A veces el *ensemble* puede provenir de diferentes modelos o por diferentes formulaciones de un mismo modelo. Esta forma de pronóstico es utilizada en la actualidad por la mayoría de los centros operacionales de pronóstico. La figura 2.7 es un ejemplo de *ensembles* realizado por el GFS para las posibles trayectorias del huracán SANDY.

2.4. Actualidad de los modelos

Los modelos numéricos producen en la actualidad pronósticos tridimensionales de un estado futuro de la atmósfera mediante una estimación del presente de ésta. La precisión del pronóstico producido radica fundamentalmente en una buena descripción del estado inicial de la atmósfera. Este estado inicial se conoce como análisis y es creado por una óptima combinación de datos observados con un pronóstico de corto plazo de un análisis previo a través de un proceso conocido como asimilación de datos. Luego, para producir un análisis y consecuentemente un buen pronóstico es necesario disponer de

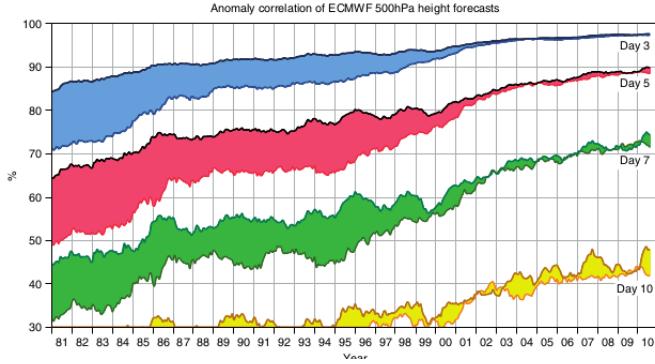


FIGURA 2.8: Evolución de la anomalía de la correlación de la altura en 500 hPa. La anomalía de la correlación se diferencia de la correlación usual debido a que considera la climatología promedio del lugar.

gran cantidad de observaciones de gran calidad [6]. El desempeño de los modelos numéricos de predicción del tiempo (NWP) en los últimos 40 años se ha incrementado debido principalmente a cuatro factores [3]:

- El incremento de la potencia de cálculo de las supercomputadoras, permitiendo una resolución numérica mas fina y menos aproximaciones en los modelos atmosféricos operacionales.
- La mejora de la representación de los procesos físicos a pequeña escala dentro de los modelos (nubes, precipitación, transferencia de calor turbulenta, humedad, momento y radiación).
- El uso de métodos de asimilación de datos más precisos, el cual resulta en una mejora de las condiciones iniciales para el modelo.
- El incremento en la disponibilidad de datos, especialmente los datos satelitales y de aeronaves sobre los océanos y el hemisferio sur.

La figura 2.8 muestra la evolución de la anomalía de la correlación de la altura a 500 hPa del pronóstico del ECMWF (European centre for Medium–Range Weather Forecasts) desde 1981 hasta el presente. Para cada día, el tope de cada banda representa la precisión del pronóstico (forecast skill) en el hemisferio norte mientras que la base de la banda representa la precisión del pronóstico para el hemisferio sur.

2.4.1. Pronósticos operacionales

Actualmente los pronósticos operacionales usan un amplio rango de modelos [3]. En la mayoría de los centros se utiliza una combinación de modelos globales y locales. Los

modelos globales son generalmente usados en pronósticos de rango medio (2 días o más) y debido a que ellos tienen un dominio horizontal global, que incluye toda la tierra, estos modelos no pueden correr con una alta resolución. Para un pronóstico más detallado es necesario aumentar la resolución, es aquí donde se utilizan los Modelos de Área Limitada (LAMs) en la región de interés. Gracias a su alta resolución los LAMs tienen la ventaja de ser más precisos en la reproducción de fenómenos a pequeña escala tales como frentes, squall lines, y un mejor forzado orográfico que los modelos globales.

Por otro lado, los LAMs tienen la desventaja de que, a diferencia de los modelos globales, éstos no son autocontenidos ya que requieren de condiciones de contorno tan precisas como sea posible, de no ser así la solución interior de los LAMs se deteriora rápidamente. Por lo tanto es habitual anidar los LAMs dentro de otro modelo de menor resolución, cuyo pronóstico le provee las condiciones de contorno. Esta es la razón por la cual los LAMs son usados sólo para pronósticos de corto plazo. La mayoría de los centros de NWP utilizan modelos globales y regionales, como por ejemplo:

- USA (<http://www.ncep.noaa.gov/>)
- Reino Unido (<http://www.metoffice.gov.uk/>)
- Francia (<http://france.meteofrance.com/france/accueil?xtor=AL-1>)
- Alemania (<http://www.dwd.de/>)
- Japón (<http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>)
- Australia (<http://www.bom.gov.au/index.php?ref=logo>)
- Canadá (<http://www.ec.gc.ca/>)
- Brasil (<http://www.cptec.inpe.br/>)

Recientemente la resolución de los modelos regionales ha sido incrementada a unos cuantos kilómetros con el objetivo de resolver mejor los fenómenos a escala de las tormentas. Estos modelos no pueden usar la aproximación hidrostática la cual carece de precisión en la escala horizontal del orden de los 10 km o menos. Debido a esto se desarrollaron los modelos no hidrostáticos que son comúnmente utilizados en los pronósticos.

2.5. Modelos globales

Como se dijo anteriormente existen muchos modelos globales. A continuación se resumen las características principales de algunos de estos modelos.

Unified Model. Unified Model es un NWP desarrollado originalmente por U. K. Met. Office. El modelo tiene aproximadamente 25 km de resolución horizontal con 70 niveles verticales. Cubre la totalidad de la tierra generando pronósticos de hasta 144 horas (6 días) dos veces al día. La técnica de asimilación de datos utilizada por este modelo es 4D–Var híbrido. El modelo fue escrito en lenguaje Fortran y usa la altura como variable vertical.

Integrated Forecast System (IFS). El IFS es desarrollado y mantenido por el ECMWF. La resolución horizontal es de 25 km con 91 niveles verticales y genera pronósticos de hasta 240 horas (10 días) dos veces al día. Utiliza 4D–Var como técnica de asimilación de datos. La información generada por el IFS es copyright.

The Global Environmental Multiscale Model (GEM). El GEM es un sistema integrado de pronóstico y asimilación de datos de Canadá, desarrollado por Recherche en Prévision Numérique (RPN), Meteorological Research Branch (MRB) y el Canadian Meteorological Centre (CMC). Genera pronósticos hasta 10 días con resolución variable. Actualmente se está migrando a 4D–Var como técnica de asimilación de datos.

Global Forecast System (GFS). El Global Forecast System desarrollado por National Centers for Environmental Prediction (NCEP) USA, es un sistema global de predicción numérica del tiempo que corre cuatro veces al día y produce pronósticos de hasta 16 días.

Básicamente el modelo corre en dos partes. La primera de ellas tiene alta resolución y pronostica 192 horas (8 días), mientras que la segunda parte corre desde la hora 192 hasta la 384 (16 días) en baja resolución. La resolución del modelo varía en cada parte del modelo: horizontalmente la resolución varía desde 35 a 70 km, verticalmente divide la atmósfera en 64 capas y temporalmente produce pronósticos cada 3 horas en las primeras 192 horas y cada 12 horas hasta las 384 horas. El GFS es un modelo acoplado compuesto por cuatro modelos separados, un modelo de atmósfera, un modelo de océano, un modelo de tierra/suelo y un modelo de hielo marino. Estos cuatro modelos trabajan juntos para proveer mayor precisión en la representación de las condiciones climáticas.

Para inicializar los pronósticos (Análisis) el GFS utiliza información que proviene del Global Data Assimilation System (GDAS). El GDAS es el componente operativo del Gridpoint Statistical Interpolation (GSI) el cual es un sistema de asimilación de datos variacional tridimensional (3D–VAR).

El GSI puede asimilar los siguientes tipos de observaciones:

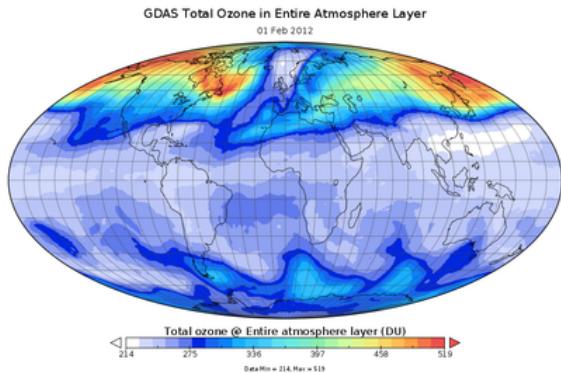


FIGURA 2.9: Mapa global del ozono total generado por GDAS.

- Observaciones en superficies.
- Radiosondeos.
- Reportes de aeronaves.
- Observaciones de boyas.
- Observaciones de radar.
- Observaciones de satélites.

Un ejemplo del producto final puede verse en la figura 2.9 donde se muestra un mapa global del ozono total para toda la atmósfera.

El modelo global GFS es el único que tiene sus datos de salida disponibles libremente en un dominio público en internet (a través de servidores NOMADS), de esta manera es la base de las compañías privadas relativas al pronóstico del tiempo como por ejemplo, AccuWeather, The Weather Channel, Wright–Weather, MeteoGroup, Weather Underground, SoaringMeteo, entre otras. Debido a las ventajas que se describieron anteriormente, para la presente tesis se utilizará este modelo global como entrada para los LAMs utilizados.

2.6. Modelos regionales

EL dominio horizontal de un modelo global cubre la totalidad de la tierra, mientras que los modelos regionales cubren sólo una parte de ésta. Estos últimos, conocidos también como modelos de área limitada (LAMs), permiten el uso de una grilla con mayor resolución horizontal que la de los modelos globales, concentrando los recursos computacionales

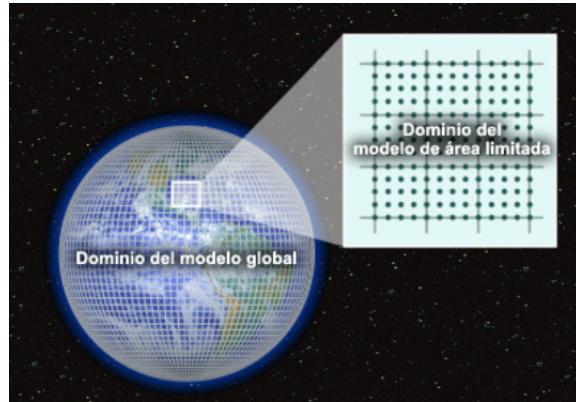


FIGURA 2.10: Representación gráfica de un modelo regional anidado en un modelo global.

en la zona de interés. Esto permite resolver explícitamente los fenómenos meteorológicos a pequeña escala que no pueden ser resueltos con una grilla menos fina como la de los modelos globales. Como se dijo antes, los LAMs requieren de condiciones de contorno, por lo que generalmente son anidados dentro de los modelos globales (ver figura 2.10). Por otro lado, el uso de las condiciones iniciales tanto como de las condiciones de contorno del modelo global implica la transferencia de los errores e incertezas producidos en este último hacia el modelo regional, sumado a los errores propios de los LAMs.

Las principales ventajas de los LAMs radican en lograr representaciones detalladas de procesos físicos, resolver topografías complejas, un buen contraste entre tierra y océanos, entre otras. Además, éstos pueden generar información realista del clima regional consistente con la circulación a gran escala proveniente de los modelos globales. Así es como los LAMs se volvieron un componente crítico en los sistemas de predicción que requieran de la información climática regional, como por ejemplo, los modelos hidrológicos [7–12]. En la actualidad existen muchos modelos de área limitada, algunos de ellos se describen brevemente a continuación.

HIRLAM. El programa de investigación internacional HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) es una cooperación de varios institutos meteorológicos europeos cuyo objetivo es desarrollar y mantener un sistema operacional de pronóstico del tiempo. El modelo en el cual HIRLAM actualmente hace foco es el HARMONIE (non-hydrostatic convection permitting model). Desarrollado además en cooperación con ALADIN consortium y Meteo-France. Los modelos que se están desarrollando bajo en este contexto son los siguientes:

- HARMONIE: Es un modelo de mesoscala no hidrostático operacional con una resolución horizontal de 2.5 km. Las condiciones iniciales y de contorno pueden ser

tomadas del ECMWF, de ALARO (ALADIN con modificaciones en las parametrizaciones físicas) o de ALADIN.

- HIRLAM: Es un modelo de escala sinóptica (5–15 km de resolución horizontal) hidrostático que utiliza coordenadas híbridas en la vertical y una discretización semi-implícita y semi-Lagrangiana para las ecuaciones primitivas con opción de utilizar un esquema dinámico de Euler. El tipo de grilla utilizado es el Arakawa-C.
- GLAMEPS: Es un sistema operacional de corto plazo y multi–modelo *ensembles* de área limitada específicamente adecuado para clima severo.

Más información acerca de los modelos y el proyecto puede encontrarse en el sitio [13].

BOLAM–MOLOCH. El modelo BOLAM es el primer modelo desarrollado en el ISAC (Institute of Atmospheric Sciences and Climate), alrededor de los años 90 [14–17]. BOLAM es un modelo no hidrostático de área limitada basado en las ecuaciones primitivas con una parametrización convectiva. Actualmente utiliza un tamaño de grilla horizontal de 0.10 grados (aproximadamente 11 km) en coordenadas geográficas rotadas y 50 niveles de resolución vertical. Las condiciones iniciales pueden ser tomadas del GFS o el IFS.

MOLOCH fue desarrollado para realizar pronósticos con alta resolución espacial y una representación explícita de los fenómenos convectivos. Este modelo integra ecuaciones no hidrostáticas de la atmósfera con una resolución de 0.0207 grados (aproximadamente 2.3 km) y 50 niveles de resolución vertical. Las condiciones iniciales y de contorno son tomadas del modelo BOLAM.

Información más detallada acerca de estos modelos puede encontrarse en el sitio [18].

WRF. El modelo WRF es un NWP diseñado para utilizarse en la investigación tanto como para la realización de pronósticos operacionales. WRF cuenta con dos núcleos principales, un sistema de asimilación de datos y una arquitectura de software que permite la paralelización de procesos. El modelo permite un amplio rango de aplicaciones meteorológicas en escalas con rangos que van desde unos pocos kilómetros hasta miles de kilómetros. El desarrollo del WRF comenzó a principio de los años 90 y las principales entidades que colaboraron en este proyecto se enumeran seguidamente. La cantidad de estas instituciones y la calidad de las mismas evidencia la importancia y el interés en la utilidad del proyecto.

- National Center for Atmospheric Research (NCAR)

- National Centers for Environmental Prediction (NCEP)
- Forecast Systems Laboratory (FSL)
- Air Force Weather Agency (AFWA)
- Naval Research Laboratory (NLR)
- University of Oklahoma
- Federal Aviation Administration (FAA)

El modelo WRF permite a los investigadores producir simulaciones considerando datos reales o en condiciones de atmósfera idealizada, mientras que a la vez provee un pronóstico operacional flexible en una plataforma robusta basada en la contribución de los últimos avances en física, modelado numérico y técnicas de asimilación de datos desarrollados por los invetigadores.

WRF se encuentra actualmente operacional en el NCEP y muchos otros centros de pronósticos operacionales. Cuenta con una creciente comunidad de usuarios (más de 23000 usuarios registrados de 150 países diferentes) y se realizan continuas actualizaciones, tutoriales y congresos. Este modelo ofrece dos diferentes módulos (*solvers*) para el cálculo de las ecuaciones que gobiernan la atmósfera. El primero de ellos, utilizado en esta tesis, es conocido como WRF-ARW (Advanced Reserch WRF) que es respaldado por la división de Meteorología de Mesoscala y Microescala del NCAR. El segundo se conoce como WRF-NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) que es una variante basada en el ETA Model, y luego del NMM desarrollado por NCEP. El WRF-NMM es respaldado por el DTC (Developmental Testbed Center).

El WRF es de dominio público y libremente disponible para el uso de la comunidad. Otros detalles de este modelo puede encontrarse en el sitio [19].

Los modelos WRF y BOLAM serán utilizados en esta tesis y más detalles serán descriptos en el capítulo 3.

Capítulo 3

Implementación de modelos

3.1. Introducción

En este capítulo se describirá detalladamente la puesta operativa del modelo WRF considerando todas sus etapas y la automatización de las mismas. Desde la descarga de los archivos de entrada del GFS hasta los diferentes formatos de salida. También se realizará una descripción esquemática del funcionamiento del modelo BOLAM-MOLOCH.

3.2. Modelo WRF

Como fue dicho en el capítulo 2, WRF es un software de predicción numérica del tiempo que puede ser utilizado tanto para investigación como para el trabajo operativo. El objetivo de esta tesis consiste en poner operativo este modelo. Las características principales de este modelo se resumen a continuación en los siguientes ítems.

3.2.1. Preprocesamiento (WPS)

Esta componente del modelo es utilizada para simulaciones con datos reales. Sus funciones incluyen:

- Definición de los dominios de simulación.
- Interpolación de datos terrestres al dominio de simulación. Los datos son del terreno, uso del suelo y tipos de suelo.
- Decodificación e interpolación de datos meteorológicos desde otro modelo al dominio de simulación.

- Anidados.
- Interfaz de usuario para la entrada de datos estáticos.

Entre las propiedades principales de esta etapa se enumeran las siguientes:

- Interpretación de datos meteorológicos GRIB1 y GRIB2.
- Datos terrestres de USGS con 24 categorías y MODIS con 20 categorías
- Cuatro proyecciones de mapas son soportados para simulaciones con datos reales: polares, Lambert, Mercator y Lat–Long.

3.2.2. ARW solver

Este es el componente clave del sistema de modelado, está compuesto de varios programas de iniciación para simulaciones de casos ideales y reales, y por programas de integración. Algunas de sus características principales se nombran a continuación:

- Ecuaciones: eulerianas, no hidrostáticas con opciones hidrostáticas en tiempo de ejecución.
- Variables pronosticadas: componentes de velocidad horizontal u y v en coordenadas cartesianas, velocidad vertical w , perturbación potencial de la temperatura, perturbación geopotencial y perturbación de la presión del aire seco en la superficie. Opcionalmente, energía cinética turbulenta y escalares como razón de mezcla de vapor de agua, razón de mezcla de lluvia/nieve, razón de mezcla de agua/hielo en la nube y distintas especies químicas.
- Coordenadas verticales: coordenadas que siguen el terreno, coordenadas de presión vertical hidrostática en la parte superior del modelo.
- Grilla horizontal: de clase Arakawa–C.
- Integración temporal: Runge-Kutta de orden 2 y 3 con pequeños pasos de tiempo para los modos de ondas de gravedad y acústicas. Capacidad de variar el paso del tiempo de integración.
- Discretización espacial: opciones de advección de orden 2 a 6 en la horizontal y en la vertical.
- Mezclado turbulento y modelos de filtros: formulación de la turbulencia a escala de sub-grilla en ambas coordenadas y espacio físico. Amortiguación de la divergencia, modo externo de filtrado. Opciones explícitas de filtrado.

- Condiciones iniciales: tridimensionales para datos reales y una, dos o tres dimensiones para datos idealizados. Capacidad de iniciación con filtrado digital (DFI) para casos reales.
- Condiciones de contorno laterales: periódicas, abiertas, simétricas y con opciones especificadas.
- Condiciones de contorno superior: absorción de ondas de gravedad (difusión, amortiguación Rayleigh, o amortiguación implícita de Rayleigh para las velocidades verticales). Niveles de presión constante en el tope.
- Condiciones de contorno inferior: físicas o libres.
- Rotación terrestre: términos de Coriolis completamente incluidos.
- Anidado: interactivo en una dirección, interactivo en dos direcciones y anidados móviles.
- Nudging (método de asimilación de datos): capacidad de asimilar con esta técnica análisis y observaciones.

3.2.3. Modelos físicos

Las opciones físicas del modelo WRF están divididas en 5 categorías, las cuales pueden ser elegidas y modificadas. Las categorías se describen brevemente a continuación.

- Microfísica: esquemas que van desde la física simplificada adecuadas para estudios de casos ideales hasta la física sofisticada de mezcla de fases adecuadas para el estudio y los NWP.
- Parametrizaciones de cúmulos: esquemas ajustados y de flujo–masa al modelado de mesoescala.
- Física de la superficie: modelos de superficie multicapa que van desde un simple modelo termal a un completo modelo de vegetación y humedad del suelo, incluyendo cobertura de nieve y hielo marino.
- Física de la capa límite planetaria: predicción de energía cinética turbulenta o esquemas K no locales.
- Física de la radiación atmosférica: esquemas de ondas cortas y largas con bandas multiespectrales, un esquema simple de onda corta adecuado para aplicaciones meteorológicas. Los efectos de nubes y flujos de la superficie son también incluidos.

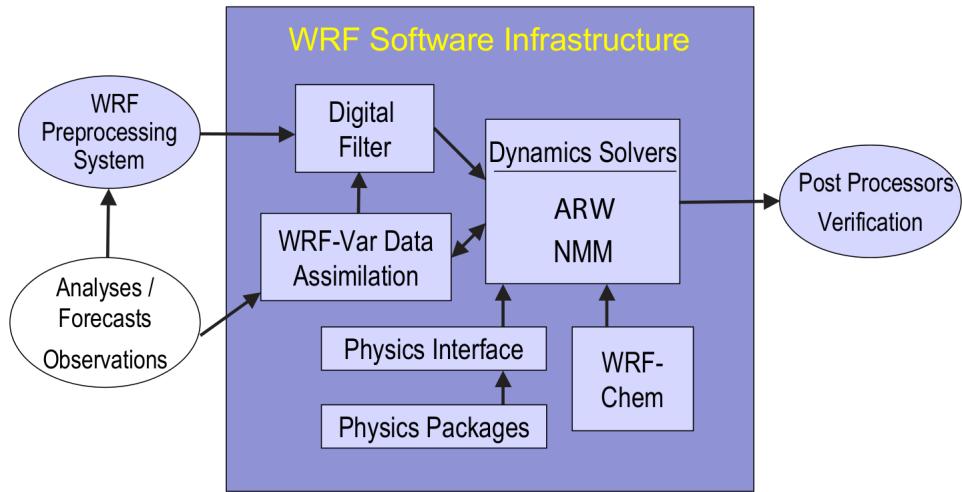


FIGURA 3.1: Componentes del sistema WRF.

3.2.4. Gráficos

Existen varias herramientas para graficar la salida del modelo, a saber RIP4 (basado en NCAR Graphics), NCL (NCAR Graphics Command Language) y programas de conversión como el ARWpost para paquetes gráficos como GrADS (Grid Analysis and Display System).

El modelo WRF contempla además la posibilidad de anexar el modelo WRF-Chem para el modelado de la química atmosférica, y WRF-Fire que permite al usuario modelar incendios. Ambos módulos pueden interactuar con la dinámica de la atmósfera. Un esquema simplificado de las descripciones anteriores es representado en la figura 3.1.

3.3. Instalación del modelo

A continuación se darán las bases para la instalación del WRF. En primera instancia se configurará el mismo de la manera más simple, esto es, que realice los cálculos con un único procesador sobre un único dominio para casos reales. Seguidamente se analizarán casos de estudios elegido por los autores de WRF. El modelo se instaló en una computadora con las siguientes características: Software Ubuntu 12.04 de 64 bits, memoria RAM de 4 GiB, procesador Intel i7 3.40 GHz con 8 procesadores.

3.3.1. Requerimientos de software

La versión de WRF a instalar es la WRF V3.4.1, la cual tiene los siguientes requerimientos de software según el manual de instalación [20].

- gfortran (última versión)
- Fortran 90 o 95 y compilador de C (gcc)
- Perl 5.04 o superior*
- Librerías MPI y OpenMP*
- Librería libcloog-ppl0-Utilidades: csh y Bourne shell, make, M4, sed, awk y uname command*
- Librerías de netCDF
- Librerías Zlib
- Librerías PNG
- Jasper
- ncview
- NCAR (Opcional)
- ARWpost y GrDAS (Opcional)

Los ítems marcados con un asterisco (*) fueron descargados e instalados desde el gestor de paquetes Synaptic.

Paquetes WRF y WPS. Se descargaron los siguientes paquetes: wrfv3.4.1.tar.gz y wpsv3.4.1.tar.gz. Ambos paquetes fueron descargados desde el sitio [21].

Se accede a ellos previa registración y una vez descargados se descomprimen en algún lugar deseado, creándose los siguientes directorios: WRFV3 y WPS.

3.3.2. Instalación de paquetes requeridos

NetCDF (Network Common Data Form). Es un conjunto de librerías de software autodescriptivas de formatos de datos independientes de la máquina que soportan la

creación, el acceso y el intercambio de arreglos orientados a datos científicos. El paquete descargado para la instalación es: netcdf-fortran-4.2.tar.gz

Para su instalación ejecutar en una consola, en el directorio dentro del paquete descargado y descomprimido, los siguientes comandos:

```
$ ./configure -prefix=/whatever/you/decided  
$ make install  
$ make check
```

Finalmente seteamos la variable de ambiente respectiva, agregando las siguientes líneas al archivo *.bashrc*:

```
export NETCDF=/whatever/you/decided
```

ncview. Esta es una herramienta para visualizar rápidamente los archivos con formato NetCDF. Para instalarlo ejecutamos en consola:

```
$ sudo apt-get install ncview
```

Zlib. Zlib son librerías de compresión de datos. La versión instalada es: zlib-1.2.6.tar. Para instalar, luego de descomprimir, se ejecutan desde consola, desde la carpeta creada, los siguientes comandos:

```
$ ./configure -prefix=/usr/local  
$ sudo make install
```

PNG. Las librerías libpng son para leer o crear archivos con formato PNG. La versión instalada es: libpng-1.2.34. Para instalar se ejecutan desde consola los siguientes comandos:

```
$ ./configure -prefix=/usr/local  
$ make check  
$ sudo make install
```

Jasper. Estas librerías permiten trabajar con formatos JPEG2000. La versión instalada es: jasper-1.900.1. Para instalar se ejecutan desde consola los siguientes comandos:

```
$ ./configure -prefix=/usr/local
$ make
$ make install
```

Luego se edita el archivo *.bashrc* de la siguiente manera:

```
export LDFLAGS='-L/usr/local -lpng -lz'
export JASPERINC=/usr/local/include/jasper
export JASPERLIB=/usr/local/lib
```

ARWpost. ARWpost es un programa desarrollado en Fortran que lee la salida del WRF-ARW y genera las salidas necesarias para ser interpretado por GrADS.

Una vez descargado el paquete (ARWpost_V3.tar.gz), disponible en la página de usuarios de WRF, se procede a su instalación con los siguientes pasos:

- Se edita el archivo Makefile ubicado en la carpeta src, agregando la librería netcdff de la siguiente manera:

```
-L$(NETCDF)/lib -I$(NETCDF)/include -lnetcdff -lnetcdf
```

- Una vez editado el archivo se tipean en consola los comandos:

```
$ ./configure
```

- Se elige la opción 3 y luego ejecutamos

```
$ ./compile
```

GrADS. GrADS puede ser fácilmente instalado tipeando en la consola el siguiente comando:

```
sudo apt-get install grads
```

Una vez finalizada la instalación y configuración de los requerimientos del software se puede proceder a la instalación, compilación y configuración del modelo WRF.

3.3.3. Configuración de WRF

Una vez instalados todos los programas requeridos se comienza con la configuración de WRF. En esta primera etapa no se considerará la paralelización y se utilizará un único dominio, es decir sin anidados (Nested=0).

Antes de comenzar la configuración se agregan variables de entorno para el soporte de archivos grandes y otra para las máquinas intel. Para ello se agregan las siguientes líneas al archivo *.bashrc*:

```
export WRFIO_NCD_LARGE_FILE_SUPPORT=1  
export WRF_EM_CORE=1
```

Para comenzar, posicionados dentro de la carpeta WRFV3, se ejecuta lo siguiente:

```
$ ./configure
```

Del menú desplegado se elige la siguiente opción:

```
23. x86_64 Linux, gfortran compiler with gcc (serial)
```

Luego la opción: `0=no nesting`

Se creará automáticamente el archivo *configure.wrf* en la carpeta WRFV3.

3.3.4. Compilación de WRF para casos reales

Para compilar se ejecuta:

```
$ ./compile
```

Luego aparecerán varios casos como opción. En este caso se elige *compile em_real*. De esta manera podemos hacer:

```
$ ./compile em_real >& compile.log
```

Con esto se genera además el archivo *compile.log* para buscar posibles errores.

En la carpeta *main* se generarán los siguientes archivos:

- *main/ndown.exe* (ejecutable utilizado en anidados con una única dirección)
- *main/nup.exe* (ejecutable utilizado en WRF-Var)
- *main/real.exe* (ejecutable para la inicialización de WRF con datos reales)
- *main/wrf.exe* (modelo de integración)

Con este último paso finaliza la configuración de WRF.

3.3.5. Configuración de WPS

Para comenzar la configuración se ejecuta en la consola dentro de la carpeta WPS:

```
$ ./configure
```

De las opciones dadas elegimos:

1. Linux x86_64, gfortran (serial)

que soporta las extensiones GRIB2.

3.3.6. Compilación de WPS

Para realizar la compilación se tipea:

```
$ ./compile >& compile.log
```

Se generan los siguientes archivos:

- *geogrid.exe* (ejecutable que genera datos estáticos)
- *metgrid.exe* (genera los datos de entrada para WRF)
- *ungrib.exe* (descomprime los archivos en formato GRIB)

3.3.7. Datos terrestres

Anteriormente se creó un ejecutable llamado *geogrid* cuyo propósito es definir los dominios de simulación e interpolar conjuntos de datos terrestres a las grillas del modelo. Por defecto, sumado al cálculo de la longitud y latitud para cada punto de la grilla, *geogrid* interpolará categorías de suelo, categorías de uso del suelo, altura del terreno, media anual de la temperatura del suelo profundo, fracción mensual de vegetación, albedo mensual, albedo de nieve máximo y categorías de pendientes. Los datos terrestres utilizados se descargan por única vez desde el link:

http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Basics/GEOGRID/ter_data.html

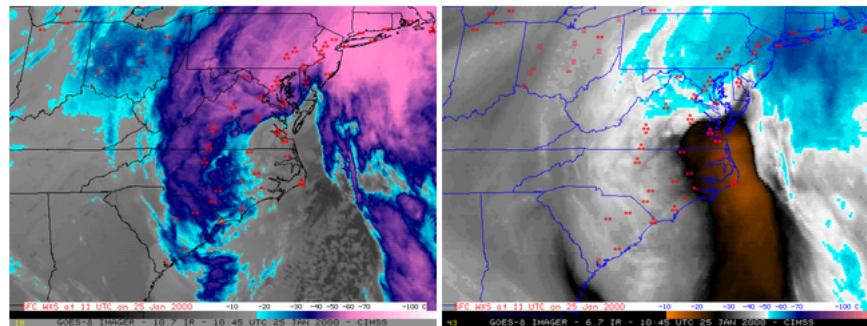
y luego siguiendo link:

geographical data in all available resolutions (30'', 2', 5', and 10') – includes MODIS, GWD, SSiB and VARSSO data (726 MB compressed download, 15.2 GB uncompressed)

Se descarga el archivo: *geog_v3.4.tar.gz*.



FIGURA 3.2: Diagrama de flujo simplificado de la instalación realizada.

FIGURA 3.3: Imagen de infrarrojo ($10.7 \mu\text{m}$) y de vapor de agua ($6.7 \mu\text{m}$) de GOES 8.

Se descomprime y se crea una carpeta con el nombre de *geog* y la colocamos en la carpeta WPS.

Con este último paso se finaliza la configuración y ya se está en condiciones de correr algún caso de prueba. La figura 3.2 muestra el diagrama de flujo básico para la simulación de casos reales.

3.4. Caso de prueba

Para testear el correcto funcionamiento de la configuración del modelo se considera un caso de prueba con datos de una tormenta de invierno en la costa este de Estados Unidos durante el 24–25 de enero de 2000.

Para tener idea de la ubicación de la zona afectada se muestra a continuación una imagen (ver figura 3.3) de infrarrojo ($10.7 \mu\text{m}$) y de vapor de agua ($6.7 \mu\text{m}$) de GOES 8 de la tormenta afectando la zona este de los Estados Unidos. Se registraron fuertes vientos, precipitación y caída de nieve.

Descarga de datos. La descarga de los datos se realizó desde la página de la guía online, el periodo de tiempo considerado va desde 2000-01-24_12 hasta 2000-01-25_12, es decir desde el día 24 de enero del 2000 a las 12:00 hs. UTC hasta el día 25 de enero de 2000 a las 12:00 hs. UTC.

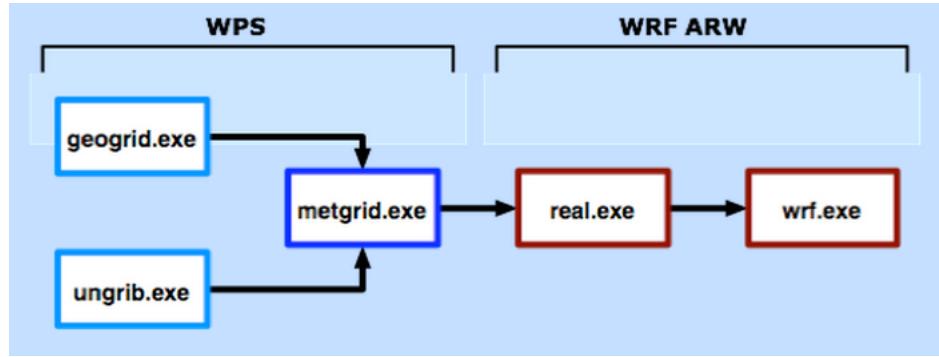


FIGURA 3.4: Diagrama de flujo del preprocesamiento y procesamiento.

3.4.1. Preprocesamiento–WPS

En esta etapa de preprocesamiento se ejecutarán los archivos *geogrid.exe*, *ungrib.exe* y *metgrid.exe*, la salida de los archivos del preprocesamiento serán utilizados luego en la etapa de procesamiento. Un diagrama de flujo un poco más detallado de los archivos del preprocesamiento y procesamiento se muestra en la figura 3.4.

Puesta a punto del domino del modelo. El dominio de este caso es de 74×61 de 30 km^2 por celda y está centrado sobre el este de los EEUU. Para definir el domino de trabajo debemos editar el archivo *namelist.wps* para lo cual ejecutamos dentro del directorio WPS el siguiente comando:

```
$ gedit namelist.wps
```

Nota: la edición de los archivos puede ser hecha con cualquier otro editor diferente al *gedit*.

Dentro del archivo se encuentra una gran cantidad de campos a configurar. La configuración de los mismos para este ejemplo se realizó siguiendo los pasos del tutorial online de WRF.

Este archivo contiene campos para editar y están divididos en los siguientes grupos:

- **&share** (opciones de control sobre la operaciones temporales, opción de control sobre el núcleo de cálculo, anidados y datos estáticos)
- **&geogrid** (definición del dominio, anidados, proyecciones y datos estáticos)
- **&ungrib** (información sobre el formato de la entrada de datos globales)
- **&metgrid** (información sobre el formato de la salida del preprocesamiento)

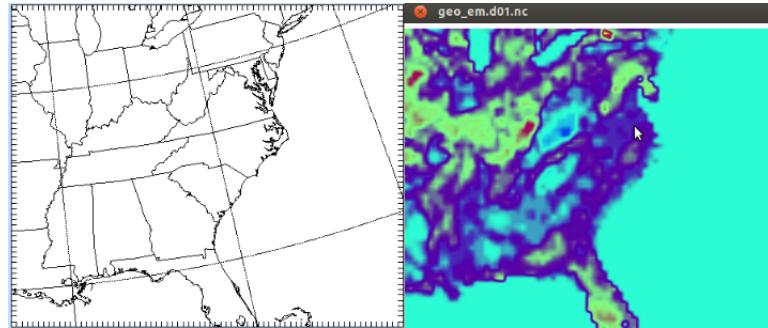


FIGURA 3.5: Comprobación rápida del dominio elegido.

Para mayores detalles sobre estos campos leer el manual del usuario de WRF [20].

Una vez editado el archivo *namelist.wps* se procede a ejecutar el archivo *geogrid.exe* para generar los datos estáticos sobre el dominio:

```
$ ./geogrid.exe
```

Una vez ejecutado el comando se creará un nuevo archivo con el nombre: *geo_em.d01.nc*.

Para una comprobación rápida de que la zona elegida coincide con la zona a analizar ejecutamos el siguiente comando:

```
$ ncview geo_em.d01.nc
```

La figura 3.5 muestra la salida gráfica (derecha) y la zona de interés (izquierda). La variable graficada corresponde al albedo de una hora en particular.

Si se quiere explorar el contenido de la información contenida en el archivo *geo_em.d01.nc* se puede ejecutar el siguiente comando:

```
$ ncdump -h geo_em.d01.nc
```

en el cual se describen detalladamente los datos utilizados y los datos de salida.

En este paso consideramos los archivos descargados del caso ejemplo los cuales tienen formato GRIB1. Si se desea observar la estructura y codificación de los mismos se puede utilizar el siguiente comando:

```
$ ./g1print.exe /PATH/Archivo_GRIB1
```

Si los datos fueran GRIB2, los cuales son utilizados actualmente, se cambia *./g1print.exe* por *./g2print.exe*.

En estos archivos está contenida toda la información de las variables meteorológicas incluidas en el mismo. Los formatos GRIB usan varios códigos para identificar las variables y niveles, *ungrib* usa tablas de códigos llamadas *Vtables* para definir qué campos extraer desde el archivo GRIB y escribir un nuevo archivo en un formato llamado formato intermedio.

Para los datos de este caso la *Vtable* correspondiente es *Vtable.AWIP*. Para especificar esta característica se genera un link a esta tabla de la siguiente manera:

```
$ ln -sf ungrib/Variable_Tables/Vtable.AWIP Vtables
```

Seguidamente creamos los links hacia los archivos a analizar con el siguiente comando:

```
$ ./link_grib.csh /PATH/Directorio_de_archivos_a_analizar
```

Esta acción crea links con los siguientes nombres: *GRIBFILE.AAA*, *GRIBFILE.AAB*, ..., *GRIBFILE.AAN*. La cantidad de links debe coincidir con la cantidad de archivos a analizar.

Seguidamente, para descomprimir los archivos GRIB y convertirlos en archivos intermedios se ejecuta el comando:

```
$ ./ungrib.exe >& ungrib_data.log
```

el cual creará los siguientes archivos: *FILE:2000-01-24_12*, *FILE:2000-01-24_18*, ..., *FILE:2000-01-26_00*, para cada uno de los archivos GRIB de entrada. También creará el archivo *ungrib_data.log* donde se guardarán los registros de las operaciones realizadas y posibles errores.

Finalmente, para interpolar los datos de entrada en el dominio seleccionado, se ejecuta el siguiente comando:

```
$ ./metgrid.exe
```

Los archivos generados son de la forma: *met_em.d01.2000-01-24_12:00:00.nc*, etc.

Estos archivos pueden ser visualizados con el comando *ncview*, como en los primeros pasos.

3.4.2. Procesamiento-WRF

En esta etapa se corre el modelo. Los dos archivos principales a ejecutar en esta etapa son el *real.exe* y *wrf.exe*. Previamente a la ejecución de los mismos se debe editar el archivo *namelist.input*. Para esto nos posicionamos en el directorio:

```
/PATH/WRF/ARW/WRFV3/test/em_real$
```

y se crean links hacia los archivos `met_em*`, creados en WPS, mediante el comando:

```
$ ln -sf /home/andres/Escritorio/WRF/ARW/WPS/met_em.* .
```

El archivo `namelist.input` contiene muchos campos para editar y están divididos en los siguientes grupos:

- `&time_control` (opciones de control sobre la operaciones temporales)
- `&domains` (opciones de control sobre lo relacionado al dominio o dominios analizados, tales como definición, dimensión, anidados)
- `&physics` (opciones de parametrizaciones y representaciones)
- `&fdda` (opciones para la asimilación de datos)
- `&dynamics` (opciones de difusión, advección y amortiguación)
- `&bday_control` (opciones de control sobre las condiciones de contorno)
- `&grib2` (control de salida de GRIB2)

Además de estos campos descriptos existe la posibilidad de agregar más. Para un mayor detalle de todos estos campos se puede consultar el manual del usuarios de WRF.

La edición de este archivo para este caso se muestra en el apéndice A.

Una vez editado el archivo `namelist.input` ejecutamos el archivo `real.exe`, el cual interpola verticalmente los archivos generadas por `metgrid.exe` y crea los datos de la condición inicial y condiciones de contorno. Además realiza algunos chequeos de consistencia entre los datos. Para su ejecución escribimos el siguiente comando en la consola:

```
$ ./real.exe
```

Luego, después de su correcta ejecución, se crearán dos nuevos archivos: `wrfinput_d01` y `wrfbdy_d01`.

Esta es la etapa final del procesamiento, aquí se realizará la simulación en base a todo el proceso anteriormente hecho. Para su ejecución escribimos en la consola el siguiente comando:

```
$ ./wrf.exe
```

Luego, se creará el archivo de salida de la simulación: `wrfout_d01_2000-01-24_12:00:00`.

De esta manera finalizó la simulación con éxito de los procesos que fueron representados esquemáticamente en la figura 3.4. Para ver los resultados de esta primer simulación es necesario realizar un postprocesamiento.

3.4.3. Postprocesamiento

Como se comentó antes, existen varias opciones de postprocesamiento de las salidas de los datos de las simulaciones con WRF. En esta tesis se eligió trabajar con GrADS, puesto que es una herramienta utilizada para el fácil acceso, manipulación, y visualización de datos de las ciencias de la tierra. Esta herramienta puede manejar datos en grillas como así también datos de estaciones. Soporta varios formatos binarios tales como GRIB1 y GRIB2, NetCDF, HDF4, HDF5, y BURF (para las estaciones). GrADS permite, a través del uso de comandos propios, la construcción de scripts para la automatización de los procesos gráficos. Su código está en Fortran y por lo tanto también se pueden crear rutinas en este lenguaje y anexarlas. Por último GrADS es de distribución gratuita y se puede descargar desde su sitio oficial [22].

Sin embargo GrADS no lee de manera directa la salida de WRF, por lo que se necesita un programa que interprete esta salida y la reescriba para poder ser leídas por GrADS. Esta es la función que cumple el ARWpost.

El ARWpost tiene un archivo de configuración inicial llamado *namelist.ARWpost*, en el cual se editan campos básicos y similares a los namelist del WRF.

Los campos obligatorios son aquéllos que involucran las fechas de comienzo y finalización del proceso, el intervalo de tiempo y el archivo de entrada. Un ejemplo de configuración de este archivo puede verse en el apéndice A.

Una vez editados los campos se ejecuta el siguiente comando en el directorio donde haya sido instalado el ARWpost:

```
$ ./ARWpost.exe
```

con el cual obtendremos dos archivos de salida necesarios para la lectura de los datos con GrADS. Estos son: *test.dat* y *test.ctl*.

Finalmente podemos iniciar el GrADS escribiendo *grads* en la consola. A partir de aquí, para llegar a graficar una salida, hay que ejecutar una serie de comandos. Un ejemplo de script para graficar una variable se puede encontrar en el apéndice A.

Como ejemplo de salidas gráficas se realizaron gráficos de diferentes variables referidas al caso de prueba.

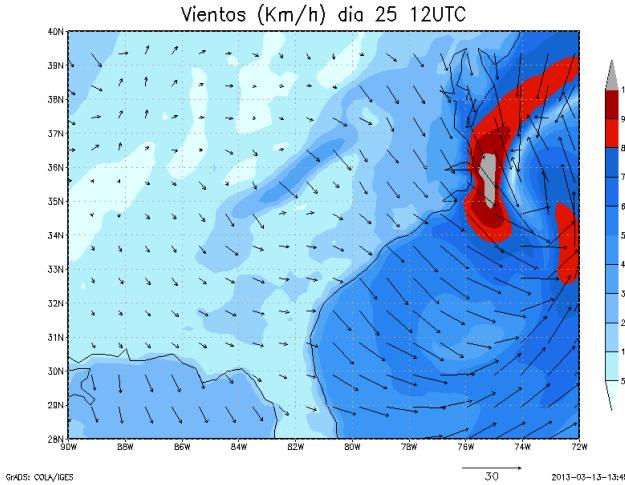


FIGURA 3.6: Resultado de la simulación – Vientos a 10 m.

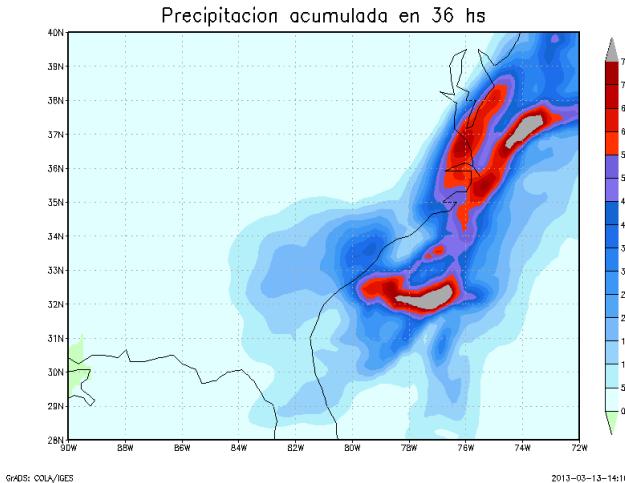


FIGURA 3.7: Resultado de la simulación – Precipitación acumulada (mm) en 36 horas.

Viento. En el caso de prueba reproducido, fuertes vientos fueron registrados en la costa. El modelo parece haber reproducido bien este hecho como lo muestra la figura 3.6.

Como podemos ver, los vientos tuvieron una intensidad importante superando los 100 km/h en algunos lugares sobre la costa.

Precipitación acumulada. La figura 3.7 representa la precipitación acumulada (mm) calculada por el modelo durante las 36 horas consideradas.

Nieve acumulada. La figura 3.8 representa en este caso la nieve acumulada (mm) calculada por el modelo durante las 36 horas consideradas.

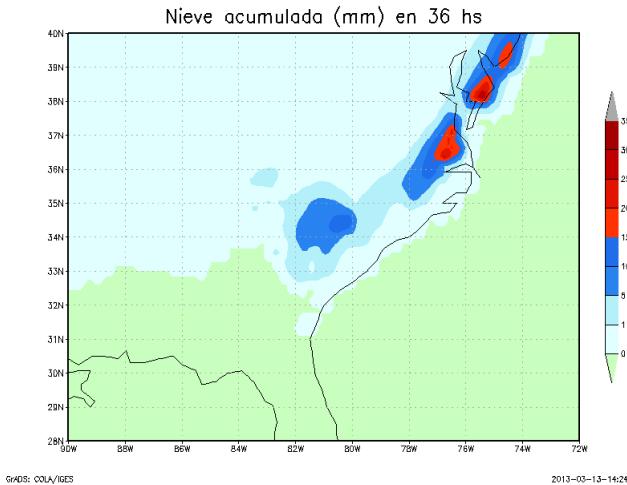


FIGURA 3.8: Resultado de la simulación – Nieve acumulada (mm) en 36 horas.

Con el preprocesamiento se completa el ciclo que contempla la entrada de datos, el preprocesamiento, el procesamiento y el postprocesamiento necesario para la realización de un pronóstico.

La configuración del modelo y la ejecución de los diferentes pasos culminó en una aceptable reproducción del caso de prueba. Luego los objetivos siguientes contemplan la descarga de datos de pronóstico de un modelo global, la parallelización del procesamiento, la creación de un anidado, la ubicación del dominio principal sobre el territorio argentino, y la graficación de los resultados de un pronóstico.

3.5. Descarga de datos globales

Como se expresó anteriormente, los NWP necesitan condiciones iniciales y condiciones de contorno durante el periodo de simulación. Una alternativa muy habitual es la de usar la información generada por los modelos globales para satisfacer estas condiciones. En esta tesis se utilizarán dos diferentes conjuntos de datos globales.

El primer conjunto de datos utilizados es el que brinda el GFS mediante sus servidores NOMADS descripto anteriormente. Las características principales de estos datos radican en que a partir de la generación del análisis (el cual se obtiene cada 6 horas) se produce un pronóstico con un intervalo de tiempo de 3 horas y una resolución de 0.5×0.5 grados para 8 días. En estos servidores existen además otras variantes de conjuntos de datos. El formato de los archivos es GRIB2.

El sitio donde pueden descargarse estos datos es [23].

El segundo conjunto de datos es el denominado NCEP FNL (Final Operational Global Analysis) de 1×1 grados de resolución y son operacionalmente preparados cada 6 horas. Este producto proviene del GDAS a través de una continua recolección de datos del GTS (Global Telecommunications System) y otras fuentes. Los FNLs están hechos con el mismo modelo que el NCEP utiliza para el GFS, pero los FNLs son preparados una hora (o más) después de la inicialización del GFS. Los FNLs tienen una mayor demora en producción debido a que muchos más datos observacionales son usados. El GFS se genera más tempranamente para soporte de tiempos críticos de predicción, y utiliza los FNLs de las anteriores 6 horas como base para la inicialización.

Los FNL tienen 26 niveles de resolución en altura y los parámetros incluidos son: presión superficial, altura geopotencial, temperatura, temperatura de la superficie del océano, valores de suelo, cobertura de hielo, humedad relativa, componentes horizontales del viento, movimiento vertical, vorticidad y ozono.

El sitio donde pueden descargarse los datos FNL, previo registro, es [\[24\]](#).

En esta tesis los datos GFS serán utilizados para poner operacional un modelo acoplado GFS + WRF. Los datos FNL se utilizarán en algunos casos de reproducción de eventos pasados o para una comparación en la validación del modelo.

3.6. Paralelización y anidado

En esta sección se describirá cómo configurar el modelo para que realice operaciones de procesamiento en paralelo y con la opción de contener un anidado básico.

Partiendo de la base de que se cuenta con todos los requerimientos exigidos en la instalación previa (sobre todo las librerías OpenMP), se procede a configurar el WRF en modo de memoria compartida (shared memory option).

Para comenzar, situados en la carpeta de WRF, ejecutamos el siguiente comando para limpiar la configuración anterior:

```
$ ./clean -a
```

Luego comenzamos con la configuración:

```
$ ./configure
```

Elegimos la opción 24, y luego con la opción de anidados básicos.

Con la opción de anidado: 1

Seguidamente compilamos el WRF ejecutando:

```
$ ./compile em_real >& compile.log
```

A continuación, nos posicionamos dentro del directorio WPS para comenzar con la compilación. Primeramente se limpia la configuración anterior ejecutando:

```
$ ./clean -a
```

Para relizar la nueva configuración ejecutamos:

```
$ ./configure
```

Se elige en esta instancia la opción 1, es decir sin paralelización, ya que el tiempo de preprocessamiento es despreciable frente al del procesamiento.

Se comienza con la nueva compilación ejecutando:

```
$ ./compile >& compile.log
```

Con este último paso se finaliza la compilación y ya podemos correr casos reales con procesamiento en paralelo y la posibilidad de tener un anidado.

3.7. Eficiencia de la paralelización

Para probar la reducción efectiva del tiempo de cálculo se procederá a correr un caso real y se medirá el tiempo que tarda en procesarlo. Para esto modificaremos la cantidad de procesadores a utilizar para la simulación del caso.

El caso a analizar es un pronóstico de 72 hs. cuya condición inicial y de contorno fueron descargadas del GFS en formato GRIB2 con resolución espacial de 0.5 grados. La simulación contempla dos dominios, el principal es Argentina y el anidado contiene a la provincia de San Luis.

Para seleccionar el número de procesadores a utilizar se configura una variable de ambiente antes de ejecutar el comando `./wrf.exe`, con la siguiente línea de comando:

```
export OMP_NUM_THREADS = número_de_procesadores
```

Se repitieron las corridas para cada número de procesadores en tres ocasiones, obteniendo no más de 10 segundos de diferencia entre las mismas. El resultado de esta prueba puede verse reflejado en la figura 3.9.

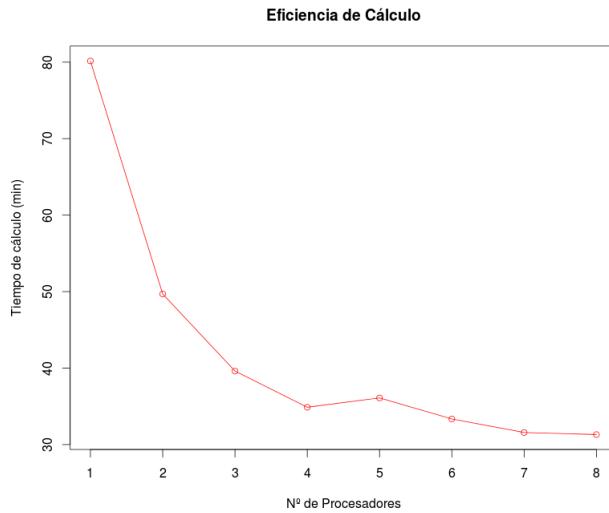


FIGURA 3.9: Tiempo de procesamiento en función del número de procesadores.

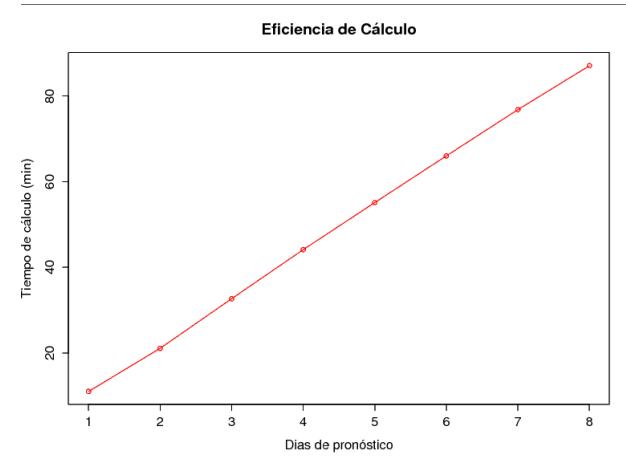


FIGURA 3.10: Tiempo de cálculo en función de los días pronosticados.

Es posible ver en la figura 3.9 cómo se reduce notablemente el tiempo de cálculo con el número de procesadores, pasando de 80 minutos con un solo procesador a aproximadamente 30 minutos con 8 procesadores. El tiempo que tarda en el procesamiento no solo tiene que ver con la cantidad de procesadores utilizados, sino también con la forma en que distribuye el dominio y la comunicación entre los procesadores.

Considerando ahora los ocho procesadores disponibles se medirá el tiempo que tarda en calcular un pronóstico de 72 hs. (3 días) hasta uno de 192 hs. (8 días). Nuevamente los datos utilizados son del GFS y al igual que antes se hicieron tres corridas por cada periodo de días considerado. Las diferencias entre estos fueron insignificantes. Los resultados son mostrados en la figura 3.10.

La figura 3.10 muestra una relación aproximadamente lineal entre el tiempo de cálculo y los días de pronóstico. El tiempo que tarda el procesamiento de ocho días con ocho procesadores es similar al tiempo que tarda el procesamiento de tres días de pronóstico con un solo procesador. Se puede concluir que el tiempo de cálculo de un pronóstico de ocho días no requiere gran esfuerzo computacional.

3.8. Automatización del modelo acoplado GFS–WRF

En este apartado se describirá cómo fue realizada la automatización de todos los pasos necesarios para producir un pronóstico de 72 hs. diario. Esto implica que se están dando los primeros pasos para la puesta a punto de un centro operativo del pronóstico del clima en CONAE para, entre otras cosas, incorporarlo de manera operativa a sistemas de alerta temprana.

La automatización se realizará mediante un script general que es producto de varios scripts de las diferentes etapas. Las etapas automatizadas pueden ser resumidas en los siguientes ítems:

- (i) Descarga de datos globales.
- (ii) Edición de archivos namelist.
- (iii) Etapa de preprocesamiento.
- (iv) Etapa de procesamiento.
- (v) Etapa de postprocesamiento.
- (vi) Generación de archivos de salida.

3.8.1. Descarga de datos globales

La descarga de los datos globales del GFS se realizará desde los servidores NOMADS con las características antes descriptas.

Para la realización de esta acción es necesario especificar los siguientes datos:

- Clase de datos a descargar: en el caso de esta tesis el conjunto de datos corresponde a GFS 0.5×0.5 grados.

- Fecha y hora del inicio de la simulación de los datos globales: es decir, especificar el análisis utilizado para la simulación. Recordar que éstos se producen cada seis horas. Las opciones aparecerán en la forma: 2013112500, 2013112506, ...
- Cantidad de horas de pronóstico: una vez elegido el análisis, los archivos de salida de la simulación generados por el GFS se dan cada tres horas. Luego las horas de pronóstico deben ser múltiplos de tres. En el caso de esta tesis, se realizará un pronóstico de 72 hs. Considerando el análisis suman una cantidad de 25 archivos a descargar. Esta clase de datos del GFS permite la descarga de hasta 192 hs. lo cual implicaría la descarga de 65 archivos. Los archivos descargados tiene la forma: *gfs.t00z.pgrbf00.grib2*, *gfs.t00z.pgrbf03.grib2*, ..., *gfs.t00z.pgrbf72.grib2*.
- Especificaciones de archivo: para cada archivo descargado es necesario especificar las variables que contendrá el archivo de descarga, en qué niveles de presión (altura) se desean estas variables y una región de descarga. Esta última opción puede ser ignorada y se descargaría la información para el total del domino terrestre.

Una vez cumplidos estos requisitos se puede iniciar la descarga de un archivo. Para los 24 archivos restantes se debe repetir la operación.

La descarga de cada archivo permite obtener una URL (Uniform Resource Locator) de descarga. Esto da la posibilidad de armar previamente las 25 URLs para la descarga directa de los datos y así automatizar la descarga de datos.

A partir de esta opción se construyó un script en lenguaje Phyton para la descarga directa de los datos a partir de la información de entrada. Las especificaciones de archivos fueron tomadas de forma idéntica para los 25 archivos, con lo cual esta acción permanece invariante durante la descarga. Lo mismo ocurre para la clase de datos. Luego, para construcción de las URLs de descarga, es necesario especificar la hora de inicio y la cantidad de horas de pronóstico.

El script especifica la ruta donde los archivos serán descargados, realiza un chequeo de archivos ya descargados en caso de un corte imprevisto en la descarga y cuenta que la cantidad de archivos sea correcta (25 archivos) antes de realizar la etapa de preprocesamiento.

3.8.2. Edición de archivos *namelist*

Los archivos *namelist.wps*, *namelist.imput* y *namelist.ARWpost* contienen la información básica necesaria para realizar los procesos de preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento, respectivamente.

El contenido de cada uno de estos archivos fue descripto anteriormente. La mayoría de los campos a especificar en estos archivos se mantiene invariante durante las diferentes simulaciones. Sin embargo, existen otros campos que deben ser actualizados para la generación diaria del pronóstico. Estos campos son:

- Fecha de iniciación del preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento. La fecha debe estar separada en año, mes, día, hora, minuto y segundo.
- Fecha de finalización del preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento. La fecha debe estar separada en año, mes, día, hora, minuto y segundo.
- Dirección al archivo de salida del procesamiento de WRF. Esta edición es exclusiva del *namelist.ARWpost*.

Para la automatización de la edición de estos archivos se toma la información de la fecha de inicio de descarga de los datos globales. La fecha se descompone para obtener los datos del año, mes, día, hora, minuto y segundo, y luego se reescribe en el formato utilizado en cada uno de los namelist.

Para el caso de *namelist.wps* y *namelist.ARWpost* el formato utilizado es: 2013-11-15_00:00:00, mientras que para el *namelist.input* la información se da por separado.

Una vez que esta información es creada se reemplaza en cada uno de los respectivos archivos quedando configurados para su uso.

3.8.3. Etapa de preprocesamiento

Para la realización de la automatización de la etapa de preprocesamiento es necesario considerar los siguientes pasos, considerando ya editado el *namelist.wps*:

- Ejecución del programa *geogrid.exe*.
- Especificar la *Vtable* a utilizar. Como en este caso los archivos de datos globales están en formato GRIB2 se utiliza *Vtable.GFS*.
- Crear los links hacia los archivos de los datos globales.
- Ejecutar el programa *ungrib.exe*.
- Ejecutar el programa *metgrid.exe*.

Estos seis pasos fueron automatizados mediante un script escrito en bash especificando correctamente las rutas a los directorios de datos y programas utilizados.

3.8.4. Etapa de procesamiento

Como en el preprocesamiento, la automatización de la etapa de procesamiento tiene como requerimiento la correcta edición del archivo *namelist.input*, luego los pasos a seguir son:

- Creación de los links hacia los archivos generados por el WPS.
- Ejecución del programa *real.exe*.
- Ejecución del programa *wrf.exe*.

Estos tres pasos también fueron automatizados mediante un script escrito en bash especificando correctamente las rutas a los directorios de datos y programas utilizados.

3.8.5. Etapa de postprocesamiento

Esta etapa puede ser considerada en dos partes. La primera consiste en adaptar la salida generada por el modelo WRF para ser interpretado por un programa que genere una salida de los datos de WRF en diversos formatos, tales como jpg, txt y GeoTIFF. La segunda es la generación de los diversos formatos de salida. La automatización de esta etapa se resume en los siguientes pasos, considerando la correcta edición previa del *namelist.ARWpost*:

- Ejecución del programa *ARWpost.exe*.
- Ejecución del comando *grads*.
- Ejecución de scripts de GrADS para la realización de salidas gráficas en formato de texto o en imágenes georreferenciadas.

Se realizaron varios scripts de GrADS para los distintos formatos de salida propuestos y para varias variables que son comúnmente usadas. La automatización de esta etapa se realizó mediante un script en bash que contiene a los scripts de GrADS. También se sumó en este último script la automatización de la creación de animaciones .gif de las variables con una evolución temporal, como por ejemplo la precipitación acumulada en 2 hs. obtenidas de los .jpg creados en GrADS.

Para finalizar, todos estos pasos fueron unidos en un único script general que se ejecuta automáticamente diariamente a partir de la hora 1:00 am. Esta iniciación se hace mediante la ejecución del programa cron (un administrador regular de procesos en segundo plano) a partir de la lectura de la hora de la PC. El diagrama de flujo de toda la automatización para el pronóstico del tiempo es mostrado en la figura 3.11.

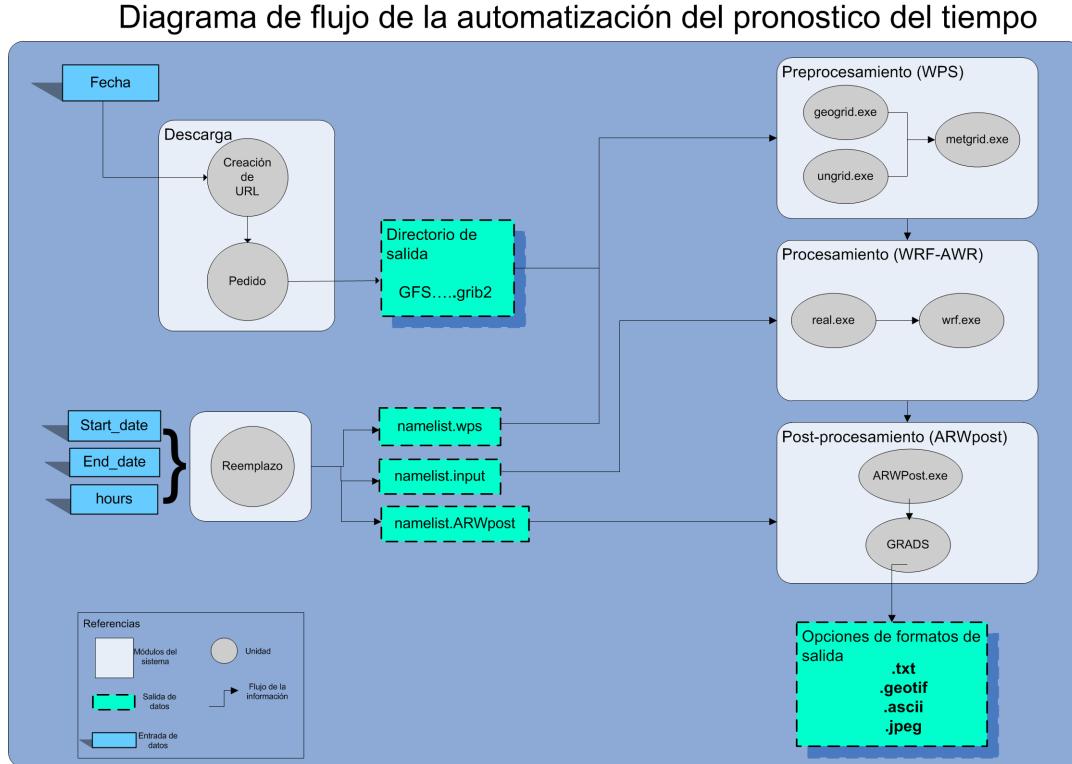


FIGURA 3.11: Diagrama de flujo de la automatización del pronóstico del tiempo.

Este gráfico representa la concreción del objetivo principal de esta tesis que contemplaba la puesta operativa de un modelo numérico de predicción del clima cuyos datos de salida puedan ser usados por otros modelos o usuarios que requieran de este tipo de datos. En el capítulo 7 se darán ejemplos de algunos usos concretos de los datos generados por el modelo acoplado (GFS-WRF).

3.9. Parametrizaciones utilizadas

Como se dijo anteriormente, el modelo WRF permite la modificación de muchos de sus campos relacionados a la forma de cálculo como lo son las opciones de parametrizaciones, categorías de uso del suelo, topografía, etc. En esta primera etapa de operatividad del modelo, no nos concentraremos en encontrar las mejores parametrizaciones para describir una variable o un fenómeno en particular.

A continuación se enumeran algunas parametrizaciones y configuraciones utilizados en esta tesis.

- Esquema de microfísica: *WSM3 (WRF Single-Moment 3-class)*.
- Opciones de radiación de onda larga: *rrtm scheme*.

- Opciones de radiación de onda larga: *Dudhia scheme*.
- Opciones de capas la superficie: *MM5 Monin–Obukhov scheme*.
- Opciones de superficie del terreno: *unified Noah land–surface model*.
- Opciones de la capa límite: *YSU scheme*.
- Opciones de cúmulos: *Kain–Fritsch (new Eta) scheme*.
- Opciones de número de capas de la superficie terrestre: *Noah land–surface model*.

Estas parametrizaciones serán mantenidas a lo largo de esta tesis y las denominaremos parametrizaciones “default”. Para más información sobre las posibilidades de elección de parametrizaciones y sus descripciones se puede consultar el manual de usuarios de WRF y el manual de investigación avanzada del WRF.

3.10. Modelo BOLAM

En el capítulo anterior se dio una breve descripción del modelo hidrostático BOLAM. Este modelo será utilizado en esta tesis para la simulación de dos eventos de precipitación en el capítulo 5.

El aprendizaje sobre el funcionamiento de la cadena BOLAM–MOLOCH fue realizado por el autor de esta tesis durante la estadía en el ISAC del CNR de Bologna como parte de las prácticas supervisadas de la Maestría AEARTE. Durante este periodo se realizaron simulaciones de fenómenos locales cuyos resultados fueron presentados en los congresos de *6th Hydrological Cycle in Mediterranean Experiment (HyMex) workshop Croatia* por el Dr. Silvio Davolio y en el *1^{er} Congreso Argentino de Teledetección* por el autor de esta tesis y el Lic. Erith Muñoz. El título del trabajo fue *Analysis of heavy precipitation events over ligurian region*.

A continuación se describirá brevemente cada uno de los pasos necesario para la producción de datos de salida del modelo BOLAM.

3.10.1. Datos del modelo global

Los datos globales para utilizar como condiciones iniciales y de contorno aceptados por el modelo BOLAM pueden ser del GFS o del IFS en formato GRIB2.

3.10.2. Preprocesamiento

En este paso los archivos GRIB2 son decodificados e interpolados sobre la grilla de BOLAM. Para esto es necesario definir la localización de la grilla, el centro de rotación de la grilla, resolución y número de niveles verticales, entre otras opciones. En este paso también se provee de los datos de la orografía, vegetación, uso del suelo, etc. Los archivos de salida del preprocesamiento se escriben en un formato .mhf (memory history file) adaptado para ser utilizada por el BOLAM.

3.10.3. Procesamiento

En este paso se define el periodo de pronóstico, el paso de integración y la frecuencia de las condiciones de contorno, entre otras. El modelo integra las ecuaciones y escribe un único archivo de salida en formato .mhf.

3.10.4. Postprocesamiento

A partir de aquí los archivos son modificados y adaptados para ser leídos por una herramienta gráfica. El formato pasa de .mhf a .ppf. En esta transformación es posible elegir los campos (variables) a ser analizadas.

3.10.5. Salida gráfica

La visualización de las variables seleccionadas en el paso anterior es llevada a cabo mediante la herramienta gráfica NCAR Graphics.

El diagrama de flujo del funcionamiento del modelo BOLAM puede verse en la figura 3.12.

Este modelo fue únicamente utilizado en los casos analizados del capítulo 5 con el consentimiento de sus autores. El modelo BOLAM así como MOLOCH no son libres. Motivo por el cual no se realizó la puesta operativa del mismo. Está en revisión un posible acuerdo “Memorandum of understanding” entre las partes involucradas para la utilización de los modelos en CONAE.

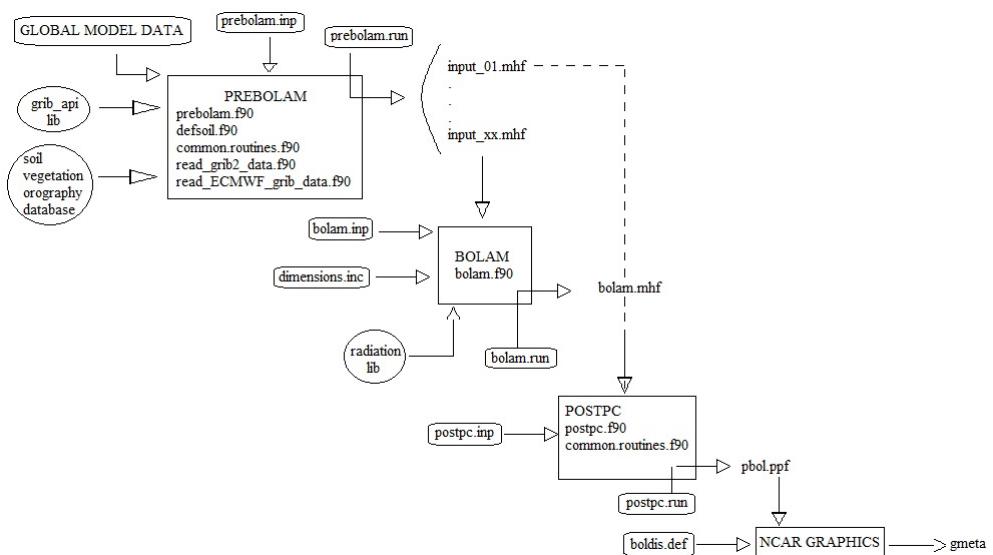


FIGURA 3.12: Diagrama de flujo del modelo BOLAM.

Capítulo 4

Validación

4.1. Introducción

Si bien esta tesis tiene como objetivo principal la implementación de un modelo numérico, es importante conocer si los resultados que arroja el mismo tienen concordancia con la realidad del escenario en estudio.

En este sentido, en el presente capítulo se evalúa el desempeño del modelo WRF en la predicción de diferentes variables meteorológicas, comparándolas con observaciones de estaciones meteorológicas sobre dos distintas áreas de estudio. La primer área contempla el total del territorio argentino (con excepción del territorio antártico) y la segunda contempla la provincia de San Luis.

La idea de esta evaluación es caracterizar el comportamiento en las predicciones del modelo WRF en diferentes regiones de nuestro país que, como sabemos, tiene su geografía y climatología muy variada.

Debido a que el modelo fue implementado y aplicado con la configuración default, es decir que no se eligieron parametrizaciones particulares, es esperable que la respuesta a las distintas topografías sea diferente. Luego, mediante la realización de ciertos análisis, se propone identificar zonas donde el modelo responda de mejor o de peor manera con las parametrizaciones utilizadas.

Como se comentó anteriormente, la forma de evaluar el modelo será a través de la comparación con datos de estaciones meteorológicas, donde para el área de estudio que involucra al total del territorio argentino se utilizarán datos de estaciones meteorológicas del SMN, mientras que para la provincia de San Luis se utilizarán datos meteorológicos de una red de estaciones propia de dicha provincia (REM).

En el capítulo 3 se mencionó que los modelos meteorológicos pueden ser utilizados para la predicción del tiempo o para reproducir el clima del pasado. Los datos utilizados por el modelo (condiciones iniciales y de contorno) difieren en ambas modalidades.

Luego se evaluarán ambas modalidades, comparando la predicción y la reproducción de un periodo de tiempo para distintas variables climáticas.

Por último se comparará el desempeño de los resultados del modelo (en distintas resoluciones horizontales) contra una técnica de predicción espacial (Kriging) usada habitualmente. Para esto se considerarán estaciones de control.

Cabe mencionar en este punto que el autor de esta tesis está dando sus primeros pasos en el uso de estas herramientas y reconoce no tener la altura académica para someter a prueba una herramienta de la envergadura del WRF, en la cual han participado los centros más importantes del mundo en su desarrollo y validación. Sin embargo, este capítulo significa un importante avance en el entendimiento de metodologías en general, el conocimiento de las virtudes y limitaciones de los resultados y la elaboración de estrategias para su uso operativo.

4.2. Metodología de evaluación

La Organización Mundial de Meteorología (WMO) en conjunto con la Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología (COST) [25] redactaron un documento denominado: *Overview of tools and methods for meteorological and air pollution mesoscale model evaluation and user training*, el cual considera que la completa evaluación de un modelo debería involucrar los siguientes ítems:

- Comparación de resultados del modelo con observaciones.
- Comparación de diversos modelos para un mismo caso.
- Cuantificación estadística de la performance del modelo.
- Análisis de sensibilidad de los datos de salida frente a cambios en los parámetros de entrada.

En general no se emplean todos los métodos para las validaciones. El documento también expone ejemplos de validaciones, algunos de ellos serán aquí mostrados. Es importante destacar que en muchos casos el conjunto de observaciones con el cual se va a comparar también pasa por un proceso de validación. Existen grupos de trabajo dedicados a generar

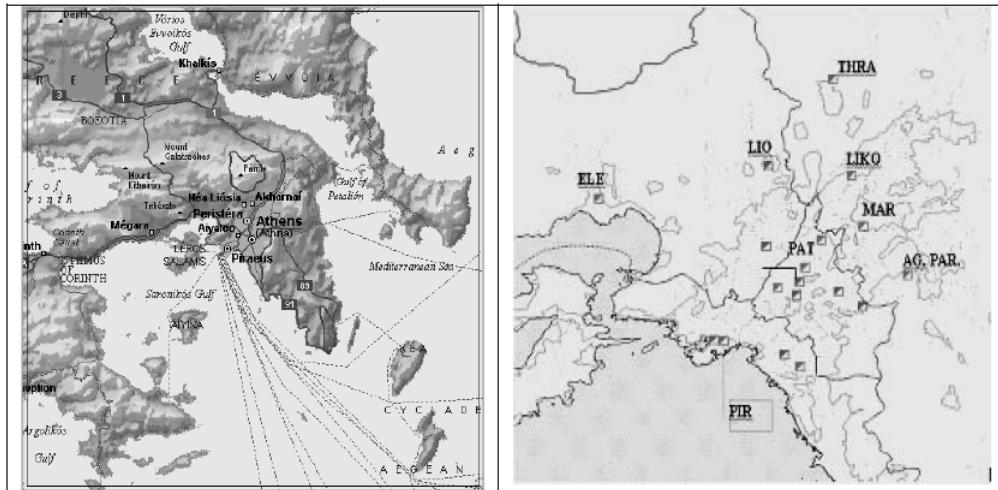


FIGURA 4.1: Región analizada por Nicolas Moussiopoulos et al.

conjuntos de observaciones estandarizadas para la validación de modelos de mesoscala, como por ejemplo COST728-Model evaluation meta-database [26].

En el caso de esta tesis, si bien los datos de estaciones meteorológicas son de entidades oficiales, no se puede asegurar que hayan pasado por un proceso de validación.

4.2.1. Ejemplos de metodologías reportadas

Como primer ejemplo, se presentan simulaciones meteorológicas sobre Atenas realizadas usando los modelos de mesoscala MM5 y MEMO [27]. La región analizada presenta muchas irregularidades de terreno y grandes cuerpo de agua, es decir, la región comprende una topología compleja que en general dificulta el buen desempeño de los modelos. En la figura 4.1 puede verse la región analizada.

El periodo analizado es de 72 hs. (16–19 de julio de 2002) para el cual se disponía de un conjunto completo de observaciones meteorológicas para 10 estaciones distintas que incluyeron zonas urbanas y suburbanas.

La figura 4.2 corresponde a los patrones de intensidad de vientos medidos y modelados en dos estaciones particulares.

Ambos modelos siguen las observaciones, pero revelan mediante un análisis del error (BIAS definido más adelante), una tendencia a sobreestimar la intensidad. Las sobreestimaciones de MEMO son más pronunciadas que las de MM5.

Con respecto a la temperatura, ambos modelos fueron capaces de capturar los patrones de variabilidad diurna y la tendencia de disminución gradual durante el periodo simulado.

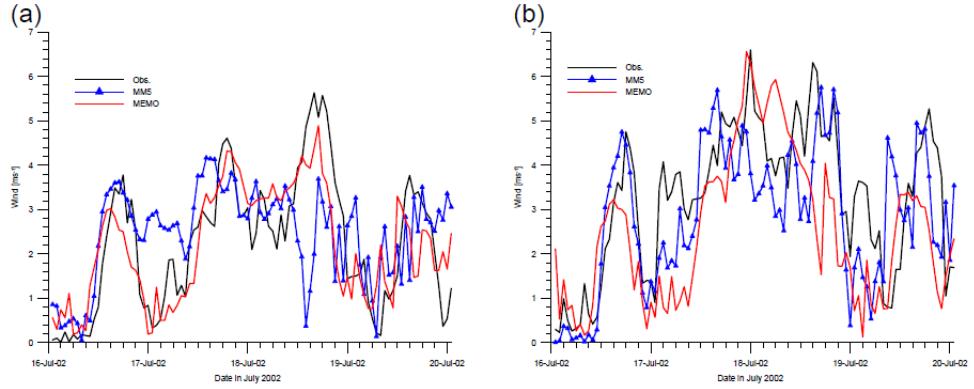


FIGURA 4.2: Comparación de patrones de intensidad de vientos modelados y medidas.

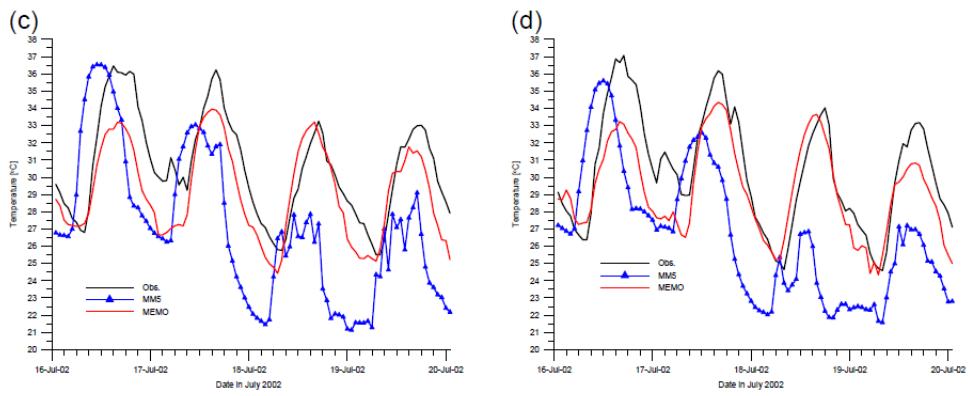


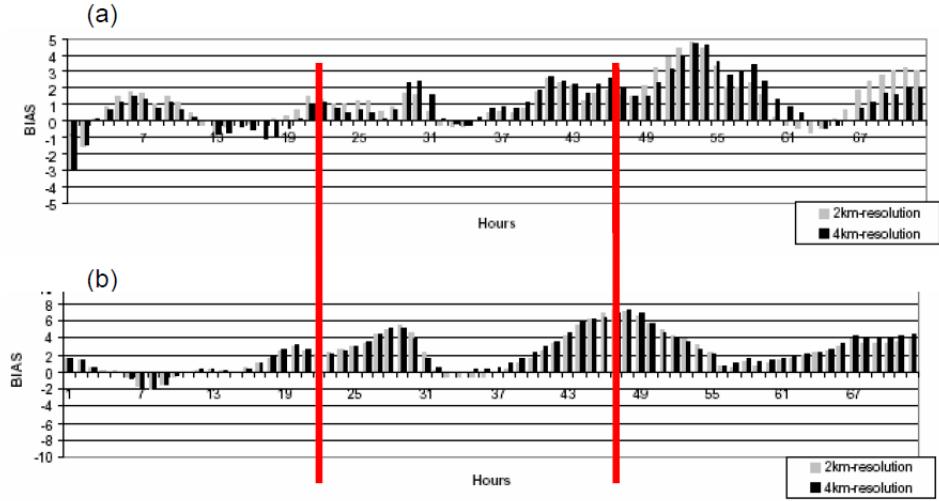
FIGURA 4.3: Comparación de patrones de temperaturas modeladas y medidas.

La tendencia decreciente fue observada y predicha en todas las estaciones en concordancia con las condiciones sinópticas prevalecientes (ver figura 4.3).

En la mayoría de las estaciones, MEMO se acercó más a las observaciones. El MM5 también tuvo una buena performance pero subestimó de manera significativa las temperaturas en los dos últimos días analizados.

Otro ejemplo de comparación es la evaluación del desempeño del modelo MEMO usando un conjunto de datos de la campaña ESCOMPTE sobre el área de Marsella [28]. La idea de este estudio es comparar el desempeño del modelo en dos distintas configuraciones de resolución de grilla, celdas de $4 \times 4 \text{ km}^2$ y $2 \times 2 \text{ km}^2$ durante 72 hs.

El análisis estadístico sugirió en general la existencia de una sobreestimación de la velocidad del viento en la madrugada del último día de simulación (ver figura 4.4a). Por otro lado la temperatura revela una tendencia a la sobreestimación en la noche (ver figura 4.4b).



En general el BIAS para la resolución de 4 km es comparable con la de 2 km, con lo que se concluye que la disminución del error no justifica el esfuerzo computacional de duplicar la resolución.

En base a estos ejemplos, para este trabajo se decidió utilizar estadísticos como el error promedio (BIAS) (4.1), el valor absoluto del error promedio (4.2) y el error cuadrático medio (RMSE) (4.3). Definidos a continuación:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (P_k - O_k), \quad (4.1)$$

$$|BIAS| = \left| \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (P_k - O_k) \right|, \quad (4.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (P_k - O_k)^2}, \quad (4.3)$$

donde P es la predicción del modelo y O es la observación.

Las variables temperatura y precipitación se analizarán en el dominio principal (Argentina) y la temperatura para el dominio secundario (San Luis). Para este último dominio se compararán datos de humedad e intensidad y dirección del viento para alguna estación.

4.3. Simulaciones sobre territorio argentino (Área 1)

El domino, denominado Área 1, que se utilizará en las secciones 4.4 hasta 4.9 puede verse en la figura 4.5, en la cual se graficó la topografía que el modelo trae por defecto y

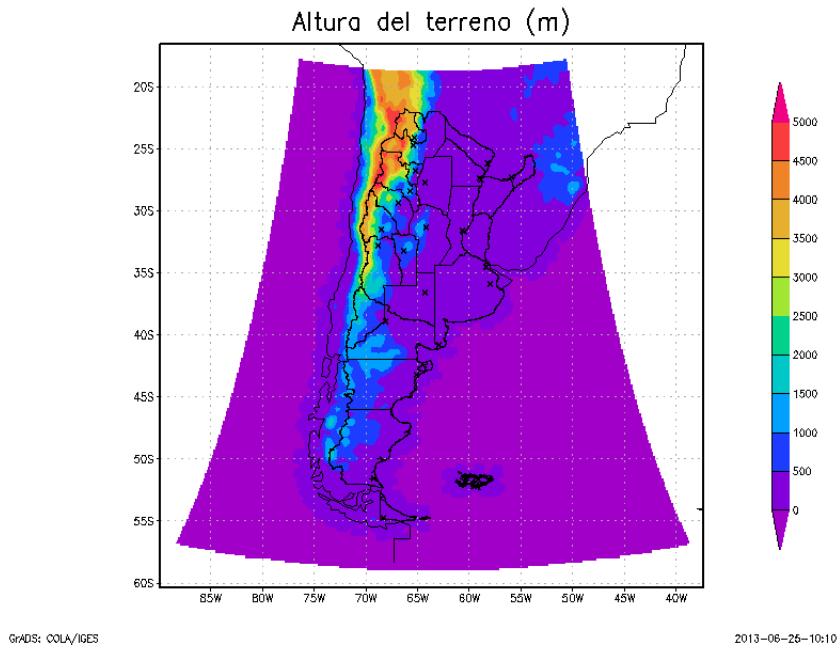


FIGURA 4.5: Dominio analizado. Altura del terreno (m).

con la cual se trabajó (mapa de altura del terreno). La resolución horizontal del domino es de aproximadamente $30 \times 30 \text{ km}^2$ y la resolución topográfica utilizada fue de 2 min. (aproximadamente 3 km).

El periodo simulado utilizado para las comparaciones, va desde 15/02/2013 a las 00:00 hs. UTC hasta el 19/02/2013 a las 00:00 hs. UTC, es decir 96 hs. Cabe destacar que este periodo de tiempo es insuficiente para realizar una verdadera validación del modelo, ya que para esto debería evaluarse al menos durante todo un año. Sin embargo, el periodo considerado nos dará una idea de cuán razonables son los valores de las variables predichas por el modelo.

Los datos de las estaciones meteorológicas en el periodo citado fueron pedidos al SMN que suministró datos de 116 estaciones distribuidas a lo largo del país. Desafortunadamente, de las 116 estaciones, sólo 61 estaciones contenían una cantidad de datos suficiente como para ser consideradas. Las estaciones consideradas y su distribución espacial puede verse en la figura 4.6.

Como se puede observar la distribución espacial no es homogénea, habiendo provincias con una mayor densidad de estaciones y algunas sin ninguna estación. Evidentemente este hecho dificulta la realización de una buena caracterización. Por otro lado, este faltante de datos pone en evidencia una necesidad. La implementación de un modelo meteorológico puede satisfacer esta necesidad brindando datos meteorológicos en lugares aislados o de complejo acceso.

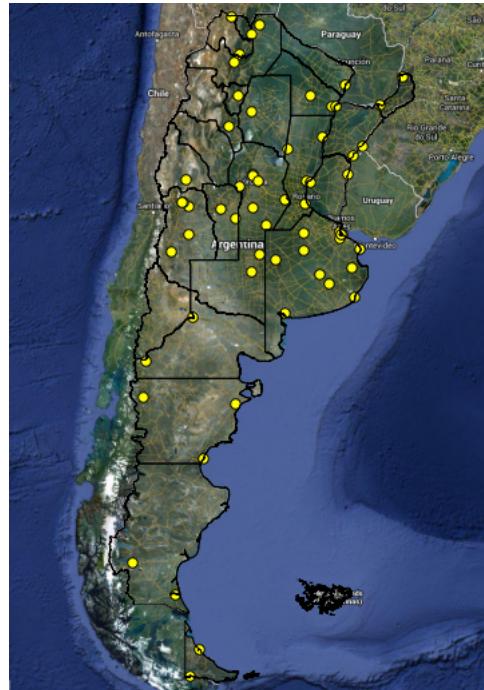


FIGURA 4.6: Distribución de estaciones meteorológicas del SMN utilizadas.

Considerando las 61 estaciones y que la Argentina tiene una superficie aproximada de 2700000 km², la densidad de estaciones es aproximadamente 1 cada 44300 km². Es decir, por ejemplo, aproximadamente 2 estaciones para la provincia de San Luis (76748 km²). Lo cual es significativamente bajo para una caracterización climática adecuada.

4.4. Comparación de datos de temperatura (Área 1)

Las fechas analizadas corresponden a la estación de verano, con lo cual las temperaturas son generalmente elevadas. La evolución de la temperatura, desde el 15/02/2013 00:00 hs. UTC a 19/02/2013 00:00 hs. UTC, se puede ver a continuación en la figura 4.7 donde se tomaron dos estaciones como ejemplo. La estación de Buenos Aires (izquierda) y la estación de San Luis (derecha).

Como podemos ver las máximas en ambas estaciones superaban los 30 grados en los primeros dos días, luego comenzó un descenso de la temperatura que fue más evidente en la estación de San Luis.

La distribución espacial de las temperaturas en el territorio argentino tiene un amplio rango. Esta afirmación queda evidenciada en la figura 4.8, donde se graficaron las temperaturas máximas para cada uno de los días considerados.

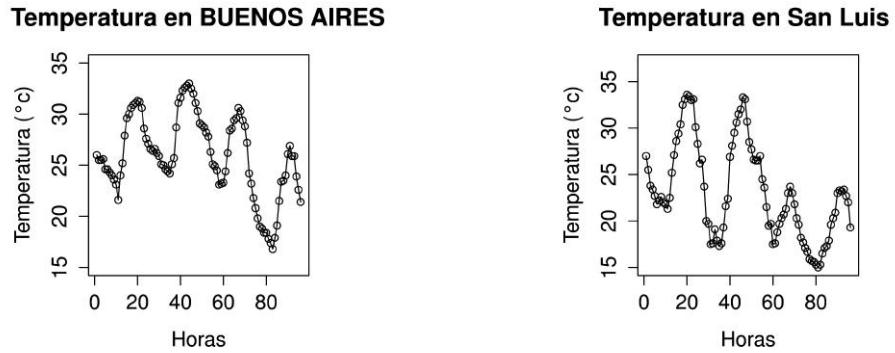


FIGURA 4.7: Evolución de la temperatura registrada en Buenos Aires (izquierda) y San Luis (derecha). Datos del SMN.

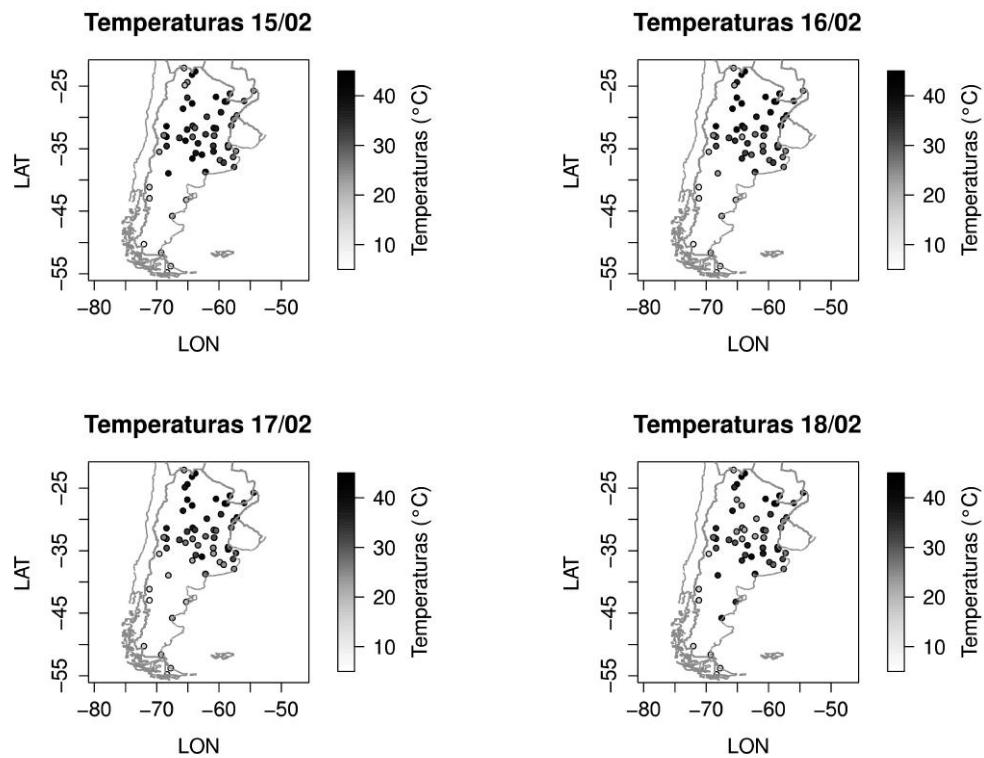


FIGURA 4.8: Distribución de temperaturas máximas en el territorio argentino.

Como se esperaba, las temperaturas máximas en el sur del país son menos cálidas que en el centro y norte del país. También se puede observar que las temperaturas entre los distintos días variaron de manera diferente en las distintas regiones como consecuencia de precipitaciones que se analizarán más adelante. Esta gran variación es un desafío importante para los modelos de predicción.

4.5. Temperaturas pronosticadas (Área 1)

Se analiza a continuación la temperatura sobre el territorio argentino predicha por las simulaciones. Los pronósticos llevados a cabo fueron siempre de 72 hs. y con un dato por hora, luego cada archivo generado para cada una de las estaciones contenía 72 datos.

Las condiciones iniciales y de contorno fueron tomadas del GFS. Teniendo para cada pronóstico una única condición inicial y condiciones de contorno que se actualizan cada 3 horas.

Se variaron cinco veces las condiciones iniciales, es decir se consideraron 5 pronósticos diferentes:

- 2013/02/15/00 + 72 hs.
- 2013/02/15/06 + 72 hs.
- 2013/02/15/12 + 72 hs.
- 2013/02/15/18 + 72 hs.
- 2013/02/16/00 + 72 hs.

donde el formato es año/mes/día/hora (UTC).

4.5.1. Temperaturas pronosticadas (Área 1) – comparaciones individuales

Como primer ejercicio de comparación se tomaron los valores de temperatura medidos de cada una de las estaciones y lo predicho por el modelo para las mismas. La resolución horizontal del modelo para estos casos fue de $30 \times 30 \text{ km}^2$, denominado de aquí en adelante como GFS_30KM.

Como ejemplo de los resultados obtenidos se consideró la estación La Quiaca y el pronóstico que comienza en 2013/02/15/00, donde puede verse la evolución en el tiempo de la temperatura (ver figura 4.9).

Como se puede ver en el gráfico 4.9 el modelo parece subestimar la temperatura en todo el periodo considerado. Si analizamos el BIAS (figura 4.10) en función del tiempo para esta estación, se hace evidente la subestimación, probablemente sistemática, y además se hace más pronunciada a medida que pasa el tiempo.

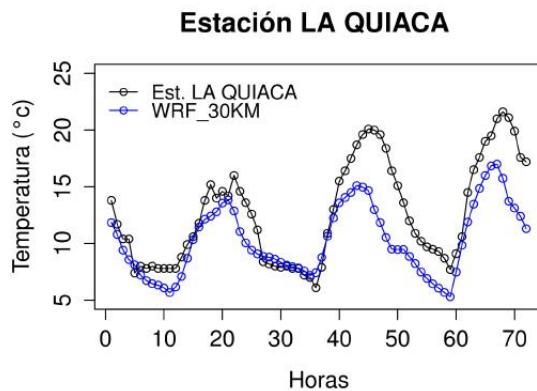


FIGURA 4.9: Evolución de la temperatura en la estación de La Quiaca.

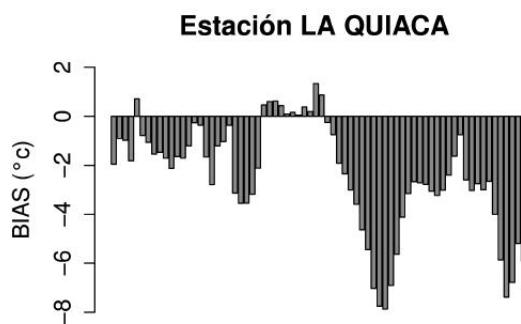


FIGURA 4.10: BIAS en función del tiempo para la estación de La Quiaca.

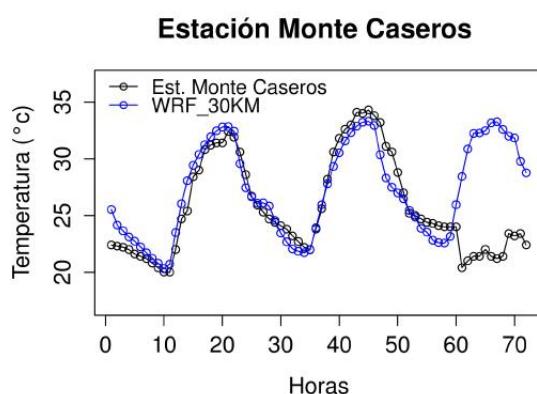


FIGURA 4.11: Evolución de la temperatura en la estación de Monte Caseros.



FIGURA 4.12: BIAS en función del tiempo para la estación de Monte Caseros.

Otra estación considerada como ejemplo es Monte Caseros, la cual se puede ver en la figura 4.11.

En este caso no parece haber una subestimación o sobreestimación de la temperatura. Por otro lado en las últimas horas de la evolución el modelo sobreestimó considerablemente la temperatura, aquí estamos suponiendo que no le pasó nada extraño a la estación y que el descenso repentino pudo ser provocado por la precipitación que se produjo en esas horas. El resultado del BIAS para esta estación se observa en la figura 4.12.

La figura 4.12 deja en claro que no hay un error sistemático de subestimación o sobreestimación del modelo, con excepción de las últimas horas.

4.5.2. Temperaturas pronosticadas (Área 1) – total de estaciones

Se realizó un análisis similar para cada una de las 61 estaciones y para los 5 pronósticos considerados. Luego se promedió el valor del BIAS de los 5 pronósticos para cada una de las estaciones. Esta información permitió tener una idea de en cuál estación el modelo subestimó o sobreestimó. Para una visualización de rápido entendimiento, primeramente se consideró cada estación con su error promedio y luego se realizó una interpolación de los valores sobre todo el territorio de Argentina. La técnica de interpolación utilizada fue la de ponderación por el inverso a la distancia (inverse distance weighting, IDW), en la cual la interpolación del punto se realiza asignando pesos a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa. La misma se realizó mediante el software QGis. El producto final, que se puede visualizar en la figura 4.13, pretende ser un mapa del BIAS promedio (o error promedio) del modelo donde se localizan regiones de mayor o menor error y su tendencia a subestimar o a sobreestimar la temperatura. Del mapa expuesto se puede deducir que predomina la subestimación de los datos pronosticados con

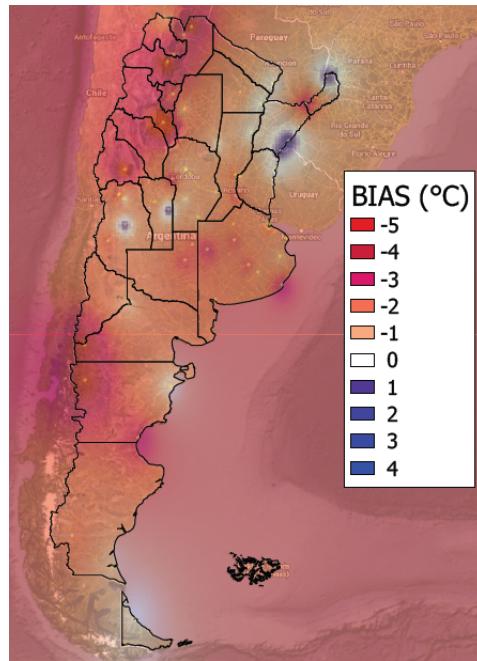


FIGURA 4.13: Mapa de BIAS promedio de la temperatura para toda la Argentina.

referencia a los datos de las estaciones. Existe regiones, como por ejemplo el Noroeste, donde la subestimación es más acentuada. En la zona oeste de Río Negro y Chubut (estaciones de Bariloche y Esquel) también existe una subestimación. Por otro lado el modelo parece responder mejor en las zonas del litoral y la costa atlántica.

Si bien el análisis hecho anteriormente nos muestra ciertas zonas donde el modelo subestima o sobreestima, las zonas que dan alrededor de cero pueden deberse a que el promedio en el tiempo (en las 72 hs.) sea cercano a cero, pero puede que las desviaciones sean grandes en ambos sentidos (subestimacion–sobreestimacion). Si al BIAS calculado para cada hora se le toma el valor absoluto, y se lo promedia cada 24 hs. se tendrá finalmente el valor absoluto del BIAS ($|\text{BIAS}|$) del modelo en la predicción de la temperatura por día. Considerando los 5 pronósticos y las 61 estaciones se obtendrán tres diferentes mapas de error absoluto de la temperatura pronosticada (uno para cada día). Para cada uno de los días pronosticados, cada una de las estaciones tiene su $|\text{BIAS}|$. Luego se tendrá una distribución espacial del $|\text{BIAS}|$ para cada día.

Se realizó una interpolación de los valores $|\text{BIAS}|$ sobre el territorio argentino logrando ver la evolución de éste a través de los días (ver figura 4.14 a, b, c).

La figura 4.14 muestra cómo el $|\text{BIAS}|$ cambia con la zona y el día analizado. Existen estaciones que mantienen el $|\text{BIAS}|$ en los tres días, otras que lo aumentan y otras que lo disminuyen, aunque de manera general con una tendencia al aumento. Sin embargo podríamos esperar entre 2 y 4 grados de $|\text{BIAS}|$ para el dominio.

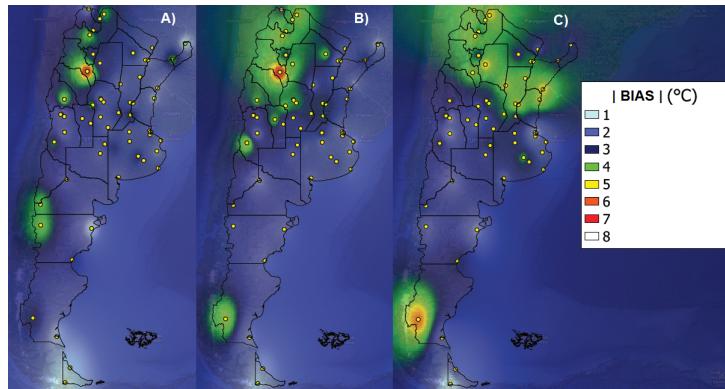


FIGURA 4.14: Mapa del $|BIAS|$ de la temperatura para los tres días analizados.

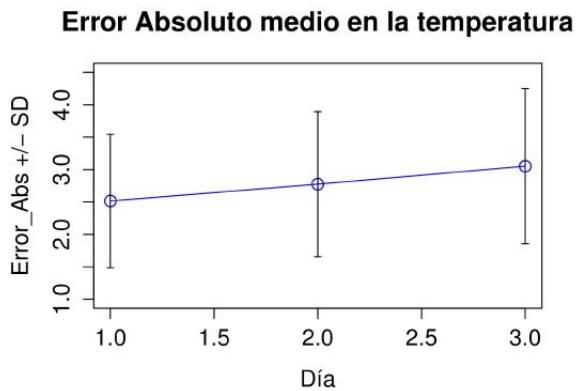


FIGURA 4.15: $|BIAS|$ y SD del total de las estaciones para cada uno de los días.

Es importante decir que en los días considerados en este análisis se produjeron precipitaciones, y que éstas pueden haber contribuido al error sobre todo en la zona centro-este del país.

Para caracterizar el comportamiento del $|BIAS|$ del total del dominio a través de los días, se realizó el promedio del $|BIAS|$ y la desviación estándar (SD) de cada una de las estaciones. De esta manera, se obtuvo el $|BIAS|$ y la SD para todas las estaciones, para cada uno de los días de pronóstico. El resultado puede verse en la figura 4.15.

Se observa que el $|BIAS|$ incrementa con el día pronosticado. Esta conclusión está en buen acuerdo con la figura 4.14, donde se muestra cómo el error aumenta con los días de pronóstico.

Muchas veces el valor medio no es representativo de la muestra de datos, ya que no es una medida robusta. Alternativamente se realizó un boxplot del error absoluto para ver si la tendencia se mantiene (ver figura 4.16).

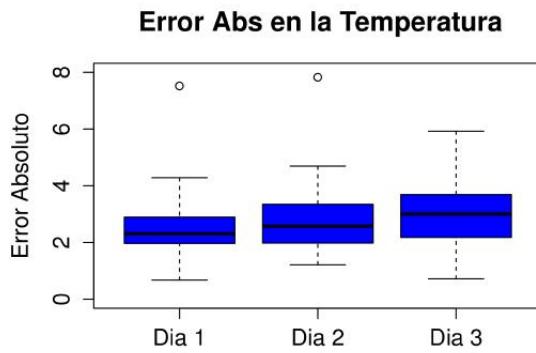


FIGURA 4.16: Boxplot del $|BIAS|$ para cada uno de los días.

La línea media dentro de la caja es la mediana del $|BIAS|$, los extremos de la caja son los cuartiles que representan el 75 % de las mediciones, los bigotes son el valor mínimo (cuantil 0.05) y el valor máximo (cuantil 0.95) de la muestra, por último tenemos los valores extremos.

Si bien las medianas de los $|BIAS|$ para cada día no son estadísticamente distinguibles entre ellas, existe una tendencia al aumento de la misma desde el día 1 al día 3. Además la dispersión de los datos es mayor en el tercer día en comparación con los dos primeros.

4.6. Comparación de datos de precipitación

De todas las variables atmosféricas pronosticadas por los modelos numéricos del tiempo, la precipitación es una de las más difíciles de predecir con precisión [29]. Los errores en la predicción cuantitativa de la precipitación puede deberse principalmente a errores en las observaciones y a errores propios del modelo. El conocimiento detallado de la humedad en la atmósfera y los campos con movimientos verticales son críticos para la predicción de la localización e intensidad de la precipitación, sin embargo estas cantidades son difíciles de obtener con precisión. En general es difícil para los modelos representar la dinámica de las nubes y los procesos microfísicos involucrados en la generación de la precipitación, por lo tanto se recurre a las parametrizaciones.

En este apartado se evaluará el desempeño del modelo WRF en un evento de precipitación (no extremo) que involucra a varias provincias de Argentina.

Se consideraron las 61 estaciones mencionadas anteriormente. Los datos de precipitación se dan en forma acumulada cada 6 horas (mm/6hs.) y el periodo analizado va desde del 15/02/2013 00:00 hs. UTC hasta 18/02/2013 00:00 hs. UTC.

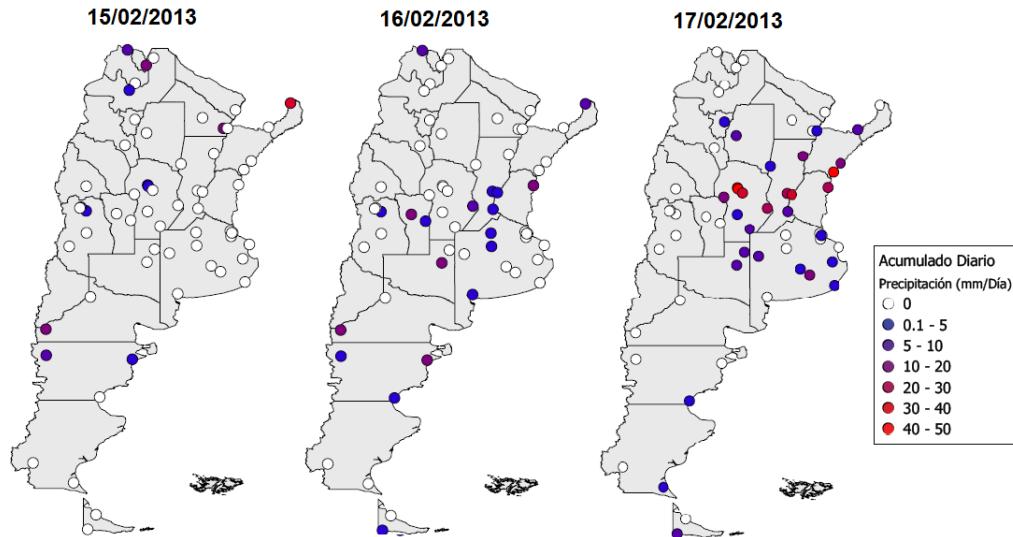


FIGURA 4.17: Distribución de precipitación acumulada diaria registrada.

En primera instancia se analizará el acumulado diario para estos tres días. La figura 4.17 muestra la distribución de precipitación acumulada por día registrada en cada estación.

En la figura 4.17 se puede ver que para el primer día (15/02/2013) existieron precipitaciones en el norte del país (Jujuy–Salta), al norte de la Patagonia y de manera más aislada en Mendoza, Córdoba, Chaco y Misiones. Para el segundo día (16/02/2013) las precipitaciones se distribuyeron mayormente en el centro del país, Mendoza, San Luis, Córdoba y Santa Fe, y la Patagonia. Persistiendo aún en Jujuy (La Quiaca) y Misiones (Iguazú). En el último día las precipitaciones se concentraron desde el centro, al este y a lo largo de la costa de la Patagonia, con valores acumulados mayores sobre Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos y Corrientes.

4.7. Precipitación pronosticada

Para el pronóstico de la precipitación con el WRF se utilizó como condición inicial el pronóstico GFS de las 00:00 hs. UTC del día 15/02/2013 y los resultados pueden verse en la figura 4.18.

Como se observa en los gráficos, la distribución espacial de la precipitación acumulada pronosticada en primera aproximación parece estar en buen acuerdo con los registros de las estaciones.

Para un primer análisis comparativo entre las precipitaciones pronosticadas y las registradas en cada estación, se considerarán las siguientes situaciones.

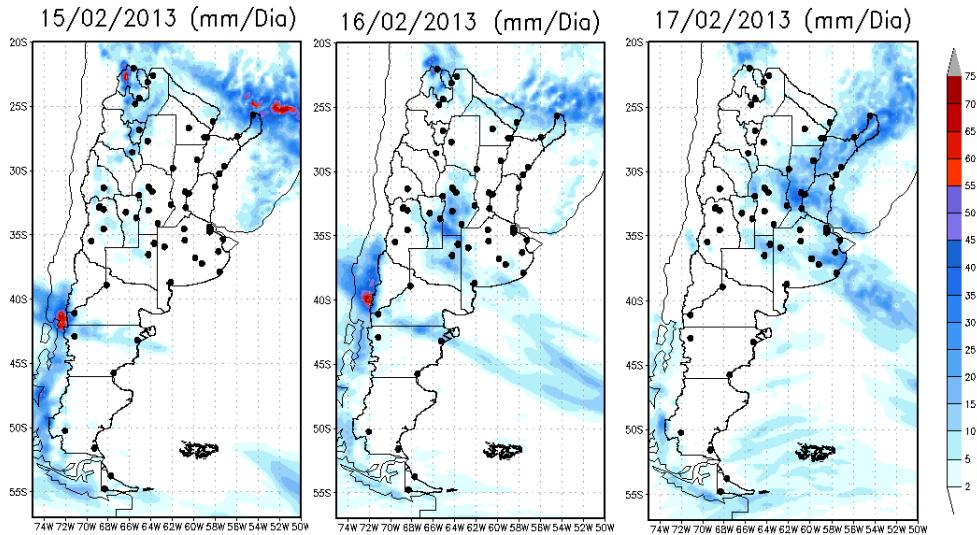


FIGURA 4.18: Pronósticos de precipitación acumulada diaria.

- Situación (1): La estación meteorológica registró precipitación y el modelo pronosticó precipitación (acierto).
- Situación (2): La estación meteorológica registró precipitación y el modelo no pronosticó precipitación. Denominamos a esta situación falso negativo.
- Situación (3): La estación meteorológica no registró precipitación y el modelo no pronosticó precipitación (acierto).
- Situación (4): La estación meteorológica no registró precipitación y el modelo pronosticó precipitación. Denominamos a esta situación falso positivo.

La idea de este análisis es identificar si alguna de las anteriores situaciones tiene mayor porcentaje de ocurrencia, y si esto es así, identificar regiones en el dominio donde éstas se produzcan.

El resultado de las situaciones planteadas para cada uno de los días de pronóstico se resume en los cuadros 4.1 y 4.2.

CUADRO 4.1: Estaciones que registraron precipitación.

Día	Nro. de Estaciones con precipitación	Porcentaje aciertos	Porcentaje falsos negativos
15/02/2013	12	83 % (10)	17 % (2)
16/02/2013	19	68 % (13)	32 % (6)
17/02/2013	30	93 % (28)	7 % (2)

CUADRO 4.2: Estaciones que no registraron precipitación.

Día	Nro. de Estaciones sin precipitación	Porcentaje aciertos	Porcentaje falsos positivos
15/02/2013	49	65 % (32)	35 % (17)
16/02/2013	42	41 % (17)	59 % (25)
17/02/2013	31	39 % (12)	61 % (19)

De las tablas se puede concluir que el porcentaje de acierto en la predicción de precipitación fue superior al porcentaje de falsos negativos. Por otro lado, el porcentaje de falsos positivos fue importante y creciente con el día de pronóstico.

Luego para este periodo analizado se concluye que WRF sobreestima la cantidad de eventos de precipitación generando gran cantidad de falsos positivos.

Con la idea de visualizar la distribución espacial e identificar regiones de preferencia de las situaciones, ver las figuras 4.19, 4.20, 4.21 para cada uno de los días de pronóstico. Donde:

- las estaciones en donde ocurrió la situación (1) (Prec–Prec) serán marcadas en color azul.
- las estaciones en donde ocurrió la situación (2) (Prec–NoPrec) serán marcadas en color rosado.
- las estaciones en donde ocurrió la situación (3) (NoPrec–NoPrec) serán marcadas en color verde.
- las estaciones en donde ocurrió la situación (4) (NoPrec–Prec) serán marcadas en color rojo.

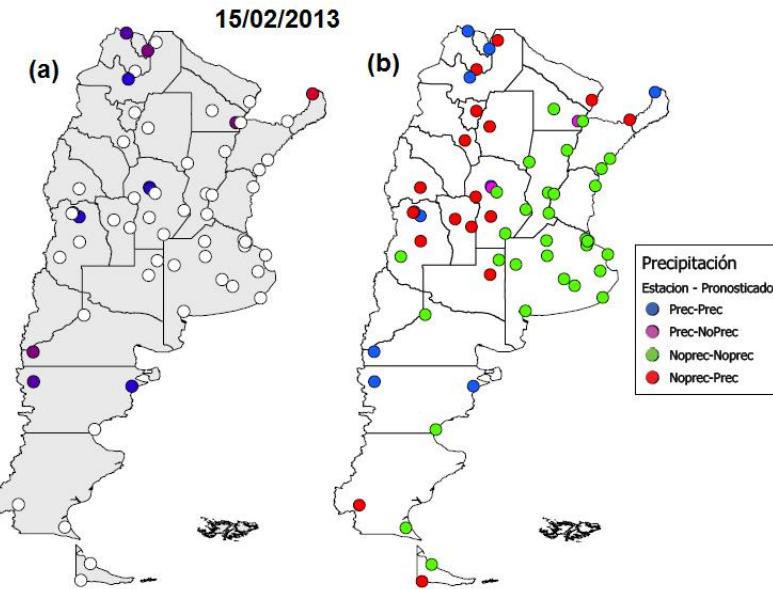


FIGURA 4.19: Distribución de situaciones en las primeras 24 horas de pronóstico.

Cabe destacar que para los valores provenientes de la simulación, se tomaron como valor 0 de precipitación todos aquéllos menores a 0.1 mm/día. Este umbral fue arbitrariamente elegido, pero basado en la mínima unidad que miden los pluviómetros en general.

Primer día de pronóstico: 15/02/2013. En la figura 4.19 a y b (primeras 24 horas de pronóstico) se observa que la mayoría de los falsos positivos (color rojo) se encuentran en la Región de Cuyo, Catamarca, Tucumán y Santiago del Estero.

Segundo día de pronóstico: 16/02/2013. Para este día (48 horas de pronóstico) nuevamente la cantidad de falsos positivos es importante, abarcando ahora también las zonas de Córdoba y sur de Buenos Aires. Los falsos negativos están acumulados sobre las fronteras de Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires (figura 4.20 c, d).

Tercer día de pronóstico: 17/02/2013. Por último (72 horas de pronóstico) este día fue el de mayor registro de precipitaciones. El número de falsos positivos disminuyó mientras que en zona costera de la Patagonia se observan algunos falsos negativos (figura 4.21 e y f).

De los resultados expuestos se puede concluir que para el periodo analizado no existe una distribución espacial preferencial para los aciertos del pronóstico ni para los falsos positivos.

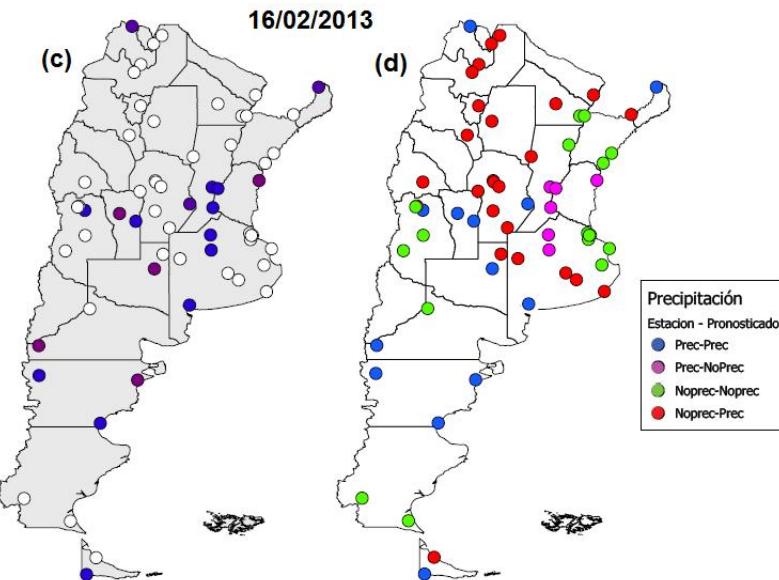


FIGURA 4.20: Distribución de situaciones en las primeras 48 horas de pronóstico.

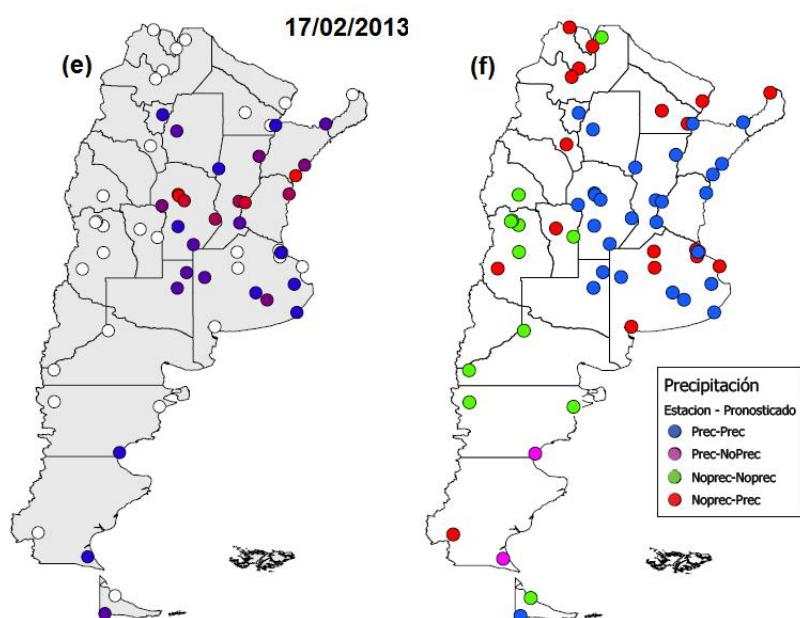


FIGURA 4.21: Distribución de situaciones en las primeras 72 horas de pronóstico.

4.7.1. Cambios en la condición inicial

Como se dijo anteriormente WRF sobreestimó los eventos de precipitación y el porcentaje de éstos aumentó con el día de pronóstico. Es razonable preguntarse si es posible que esta tendencia se deba a que la precisión en la predicción disminuya por la lejanía de la condición inicial (15/02/2013).

Por esto se realizaron pronósticos con condiciones iniciales 16/02/2013 y 17/02/2013, se consideró el primer día de pronóstico para cada uno de ellos y se realizó la misma identificación de situaciones como se hizo anteriormente. Los resultados de estos pronósticos se resumen en los cuadros 4.3 y 4.4.

CUADRO 4.3: Estaciones que registraron precipitación.

Día	Nro. de Estaciones con precipitación	Porcentaje aciertos	Porcentaje falsos negativos
16/02/2013	19	68 % (13)	32 % (6)
17/02/2013	30	100 % (30)	0 % (0)

CUADRO 4.4: Estaciones que no registraron precipitación.

Día	Nro. de Estaciones sin precipitación	Porcentaje aciertos	Porcentaje falsos positivos
16/02/2013	42	41 % (17)	59 % (25)
17/02/2013	31	29 % (9)	71 % (22)

Ahora además se compara:

- el día 2 de pronóstico del día 15/02/2013 (15/02/2013_48hs) con el día 1 de pronóstico del día 16/02/2013 (16/02/2013_24hs),
- el día 3 de pronóstico del día 15/02/2013 (15/02/2013_72hs) con el día 1 de pronóstico del día 17/02/2013 (17/02/2013_24hs),

y se resumen los resultados en los cuadros 4.5 y 4.6.

CUADRO 4.5: Comparación de pronósticos con distintas condiciones iniciales.

Día	Nro. de Estaciones con precipitación	Porcentaje aciertos	Porcentaje falsos negativos
15/02/2013 _ 48hs	19	68 % (13)	32 % (6)
16/02/2013 _ 24hs	19	68 % (13)	32 % (6)
Día	Nro. de Estaciones sin precipitación	Porcentaje aciertos	Porcentaje falsos positivos
15/02/2013 _ 48hs	42	41 % (17)	59 % (25)
16/02/2013 _ 24hs	42	41 % (17)	59 % (25)

CUADRO 4.6: Comparación de pronósticos con distintas condiciones iniciales.

Día	Nro. de Estaciones con precipitación	Porcentaje pronosticadas	Porcentaje falsos negativos
15/02/2013 _ 72hs	30	93 % (28)	7 % (2)
17/02/2013 _ 24hs	30	100 % (30)	0 % (0)
Día	Nro. de Estaciones sin precipitación	Porcentaje pronosticadas	Porcentaje falsos positivos
15/02/2013 _ 72hs	31	39 % (12)	61 % (19)
17/02/2013 _ 24hs	31	29 % (9)	71 % (22)

Los resultados del cuadro 4.5 muestran que no hubieron cambios en los porcentajes, sin embargo sí cambió la distribución de los falsos positivos entre ambas situaciones. Con respecto a los resultados del cuadro 4.6 se observa que se reducen a cero los falsos negativos, sin embargo los falsos positivos no disminuyeron, sino que por el contrario aumentaron. Los cambios en las distribuciones entre estas comparaciones pueden verse a continuación en las figuras 4.22 (g y h) y 4.23 (i y j).

Puede concluirse que el cambio de condiciones iniciales no mejora la predicción de la precipitación y produce cambios en la distribución geográfica de las situaciones planteadas.

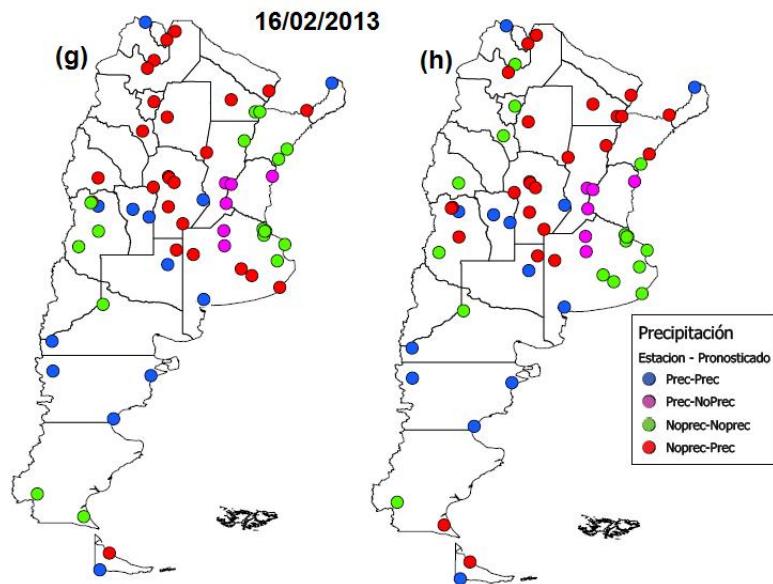


FIGURA 4.22: Cambio en la distribución de situaciones.

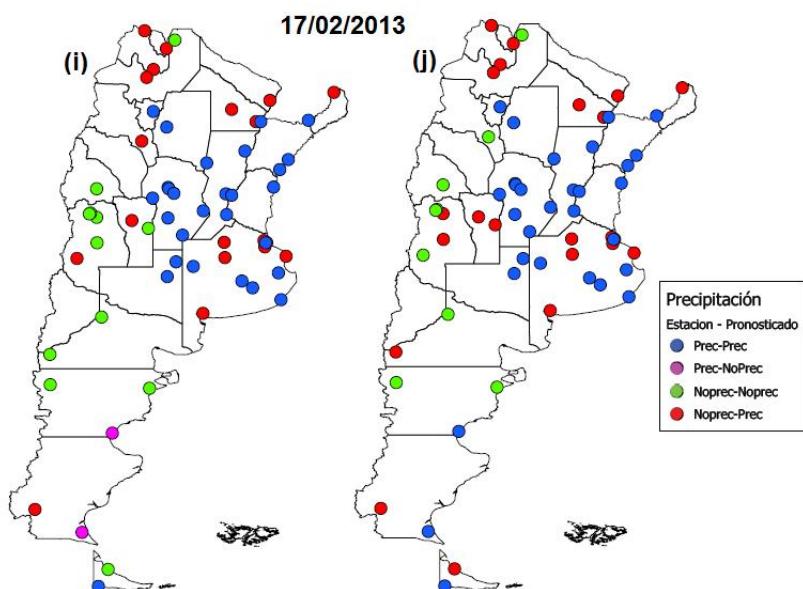


FIGURA 4.23: Cambio en la distribución de situaciones.

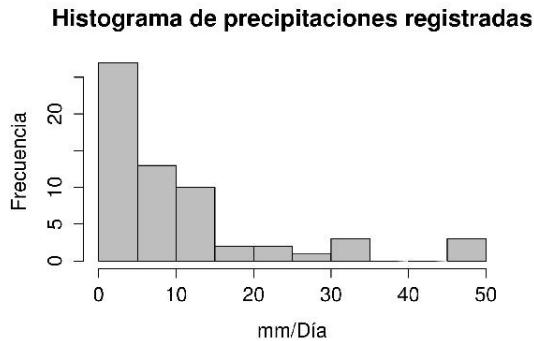


FIGURA 4.24: Histograma de registro de precipitación acumulada diaria.

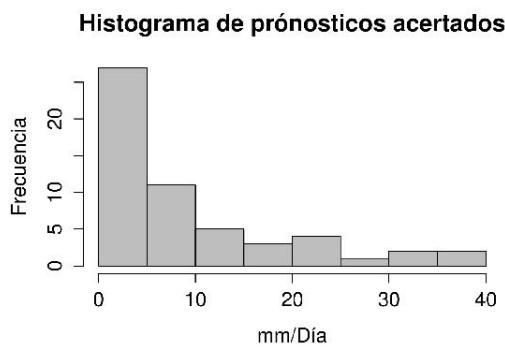


FIGURA 4.25: Histograma aciertos de registro de precipitación acumulada diaria.

4.8. Precipitación acumulada

Con la idea de explorar la posibilidad de asociar los aciertos o los falsos positivos a un rango de valores de precipitación acumulada en particular, se realizó un histograma (figura 4.24) de precipitación acumulada diaria registrada en las estaciones para el periodo considerado. El histograma muestra que la gran parte de los valores de precipitación acumulada (44 %) se registraron entre 0 y 5 mm/día mientras que la frecuencia disminuye a medida que la precipitación acumulada es mayor.

Se consideran ahora los casos en que el WRF predijo una precipitación de manera acertada. Si se los grafica en un histograma (figura 4.25), se puede observar que la mayor cantidad de aciertos (49 %) se encuentra en el mismo rango (0–5 mm/día) que en el caso de las precipitaciones registradas, y disminuye a medida que la precipitación acumulada es mayor. Esto coincide con la tendencia de la precipitación registrada.

Si se consideran los falsos positivos para el mismo análisis, se obtiene la figura 4.26.

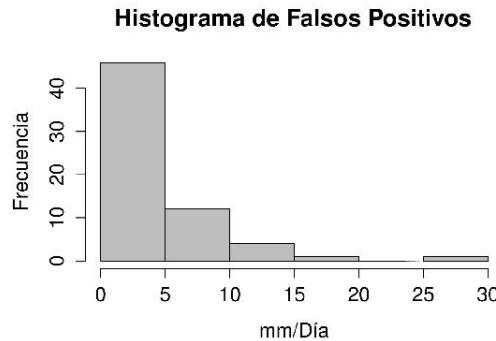


FIGURA 4.26: Histograma aciertos de falsos positivos generados por el modelo.

Se observa que el rango 0–5 mm/día tiene una frecuencia de aparición notablemente mayor (72 %) que el resto. Es decir la mayoría de los falsos positivos se producen en este rango.

De los tres histogramas realizados se puede concluir que para el periodo considerado los valores de precipitación acumulada registrados se encuentran mayormente entre 0 y 5 mm/día, disminuyendo su frecuencia a medida que esta aumenta. El modelo pronostica la misma tendencia, sin embargo al mismo tiempo produce una gran cantidad de falsos positivos en este rango. En este sentido se considera importante estudiar mejoras al modelo en este rango de precipitación acumulada para mejorar su predicción e identificar un umbral para los falsos positivos.

4.9. Evolución temporal

El lo que sigue analizaremos la predicción de precipitación en el tiempo para dos sitios en particular. El primero de ellos es la estación Paraná Aero y el segundo sitio considerado es la estación Observatorio Córdoba.

Primeramente en la figura 4.27 se muestra cómo fue la evolución durante 72 horas de la precipitación acumulada, registrada cada 6 horas, para dos estaciones (Paraná y Córdoba) a partir del día 15/02/2013 00:00 hs. UTC. La figura 4.27 muestra que para el caso de la estación Paraná, la precipitación acumulada fue creciendo gradualmente a partir de la hora 42. Para la estación Observatorio Córdoba, la acumulación fue más repentina creciendo de unos pocos milímetros hasta 50 mm en 12 horas (hora 54).

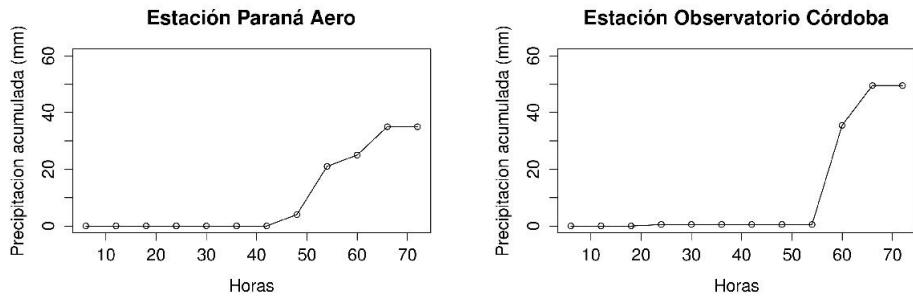


FIGURA 4.27: Evolución de la precipitación registrada para la estación Paraná Aero (izquierda) y para la estación Observatorio Córdoba (derecha).

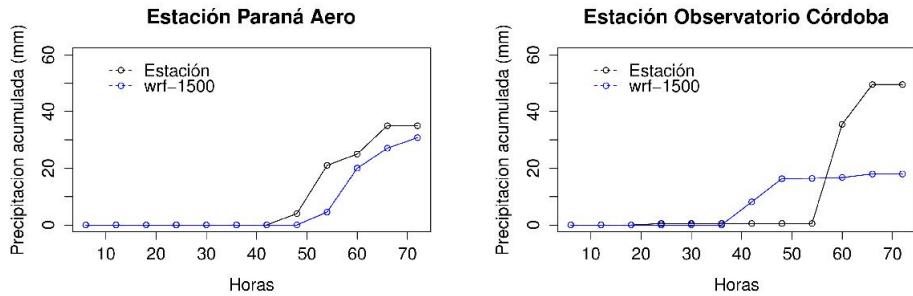


FIGURA 4.28: Comparación de la evolución de la precipitación registrada y pronosticada.

4.9.1. Evolución temporal pronosticada

Se realizó un pronóstico de 72 hs. a partir del día 15/02/2013 00:00 hs. UTC para ambos casos, con las mismas condiciones iniciales. Los resultados para ambas estaciones (pronosticado y medido) se representan en la figura 4.28.

Se observa que el pronóstico simula bien la situación en la estación de Paraná Aero, aunque con un desfase temporal ligeramente retrasado y una subestimación de la precipitación acumulada. Mientras que para el caso de la estación Observatorio Córdoba, el pronóstico se adelantó al evento de precipitación indicando además una subestimación importante luego de producido el evento.

4.9.2. Evolución temporal pronosticada, cambios de condición inicial

Se realizó un nuevo pronóstico (ver figura 4.29) pero con las condiciones iniciales el día 16/02/2013 00:00 hs. UTC con la intención de verificar cambios en los tiempos y cantidades de precipitación pronosticadas.

El nuevo pronóstico muestra para el caso de la estación Paraná Aero nuevamente una subestimación en la precipitación acumulada y además un retraso en el comienzo de la

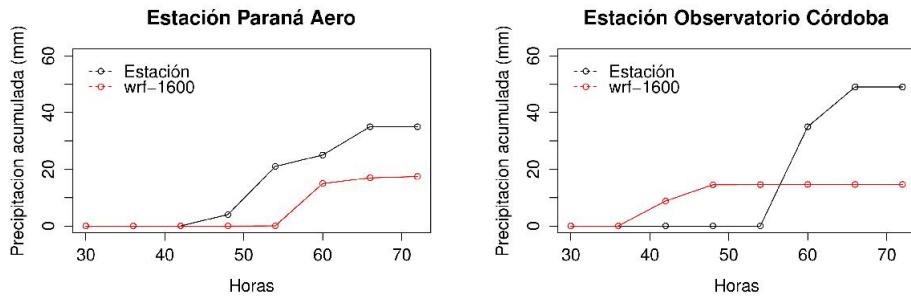


FIGURA 4.29: Comparación de la evolución de la precipitación registrada y pronosticada.

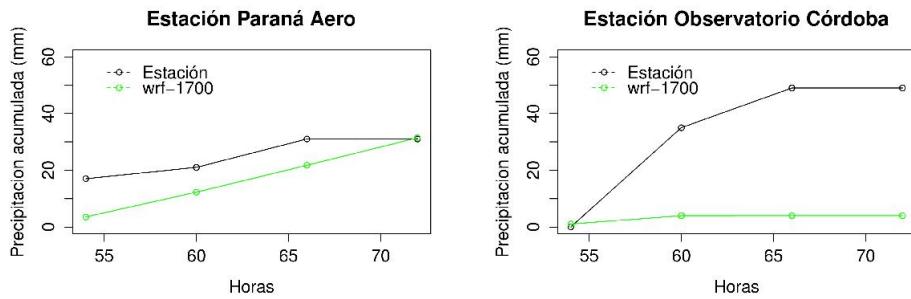


FIGURA 4.30: Comparación de la evolución de la precipitación registrada y pronosticada.

misma mayor al pronóstico anterior. Para el caso de la estación Observatorio Córdoba, el pronóstico no parece haber tenido modificaciones, sigue adelantando el evento y subestimando la precipitación acumulada.

Por último realizamos un nuevo pronóstico con las condiciones iniciales el día 17/02/2013 00:00 hs. UTC (ver figura 4.30). En el caso de la estación Paraná Aero, la diferencia en el valor acumulado para la condición inicial revela lo impreciso del análisis generado por el GFS, sin embargo la precipitación acumulada se fue acercando gradualmente al valor de precipitación acumulada final. Por otro lado, el pronóstico generado prácticamente desestima la posibilidad de precipitación para la estación Observatorio Córdoba mientras que la estación registró una precipitación intensa a partir del tiempo inicial.

4.9.3. Evolución temporal pronosticada, estación Monte Caseros

En el apartado 4.5.1 se consideró como ejemplo de pronóstico de temperaturas a la estación Monte Caseros (ver figura 4.11). El pronóstico para este caso produjo una importante subestimación en las últimas horas del tercer día. Si ahora se compara la precipitación registrada en dicha estación y lo que fue pronosticado para la misma (figura 4.31), es posible observar un desfasaje temporal y una subestimación. El retraso en el comienzo

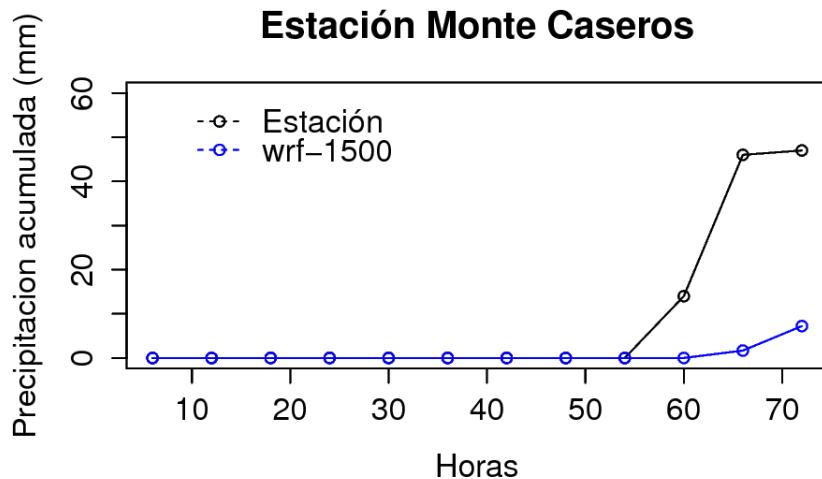


FIGURA 4.31: Comparación de la evolución de la precipitación registrada y pronosticada, estación Monte Caseros.

de la precipitación y la evolución suave de la misma, fueron entonces los causantes de la subestimación observada en esta estación.

Una vez más no se puede elaborar una conclusión general de lo analizado, que para este caso fue sobre el desempeño del modelo en la descripción de la evolución temporal de la precipitación. Para lograr una conclusión más general es necesario trabajar sobre regiones particulares y analizando una gran cantidad de casos. Sin embargo, al menos se puede decir que hay casos bien representados y otros que no tanto en lo que respecta al pronóstico de precipitación acumulada, y que no existe una clara dependencia en la representación de los eventos de precipitación con la cercanía de la condición inicial a los mismos.

4.10. Simulación anidada sobre la provincia de San Luis (Área 2)

Un análisis similar al realizado para el Área 1 se realizará para el Área 2, sin embargo para esta parte utilizaremos, además del dominio de Área 1, un anidado de mayor resolución horizontal que contiene a la provincia de San Luis. Por lo tanto en este apartado tendremos disponibles datos del modelo en dos resoluciones horizontales diferentes, es decir, provenientes de los distintos dominios. Como ya dijimos anteriormente la resolución horizontal de ambos dominios es diferente, el dominio principal (figura 4.5) de aproximadamente $30 \times 30 \text{ km}^2$ de resolución horizontal y el dominio anidado de aproximadamente $10 \times 10 \text{ km}^2$ donde la topografía utilizada por el modelo puede verse en la figura 4.32.

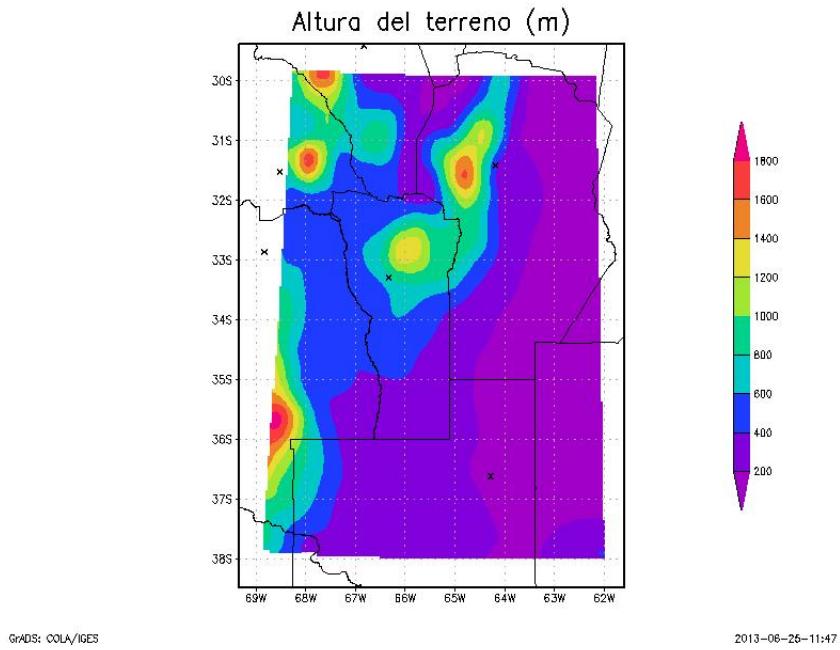


FIGURA 4.32: Dominio del anidado.

El periodo considerado para la validación va desde el 28/03/2013 06:00 hs. UTC (hora 0 para el análisis de datos) hasta el 06/04/2013 12:00 hs. UTC (hora 222 para el análisis de datos).

Los datos de las estaciones fueron tomados de la Red de Estaciones Meteorológicas (REM) de la provincia de San Luis compuesta por 56 estaciones, las cuales miden en su mayoría las variables temperatura y precipitación, y en algunos casos humedad, presión, dirección e intensidad del viento, y radiación.

Los datos son publicados hora a hora online en la siguiente dirección en [30].

El sitio permite la descarga libre y gratuita, y por esta razón se eligió trabajar con estos datos para caracterizar el desempeño del modelo. No todas las estaciones contenían datos válidos en el periodo seleccionado, con lo cual se descartaron estas estaciones y se consideraron en total 41 estaciones.

La figura 4.33 muestra un gráfico de las estaciones consideradas con su nombre y su posición geográfica.

De las variables a disposición consideraremos solamente la temperatura y se hará énfasis en la comparación de la predicción del modelo con sus dos configuraciones, de $10 \times 10 \text{ km}^2$ y $30 \times 30 \text{ km}^2$ de resolución horizontal, utilizando en ambos casos las mismas parametrizaciones y resolución topográfica.

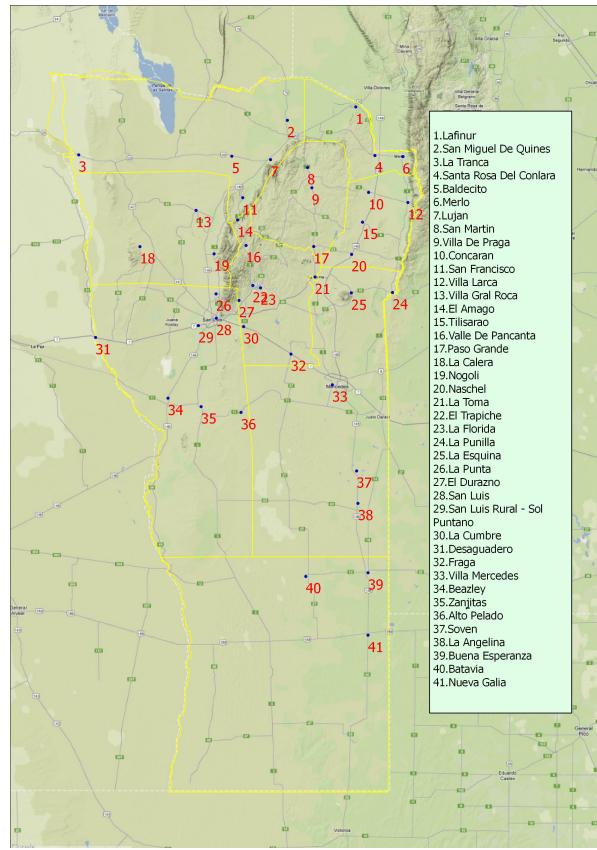


FIGURA 4.33: Ubicación de las estaciones meteorológicas consideradas.

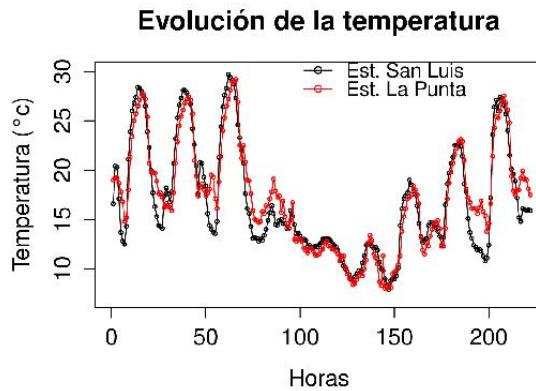


FIGURA 4.34: Evolución de la temperatura en dos diferentes estaciones.

4.10.1. Comparación de datos de temperatura (Área 2)

La temperatura para dos estaciones tomadas como ejemplo (San Luis y La Punta), en el periodo considerado, es mostrada en la figura 4.34.

Ambas estaciones evolucionan de manera similar en el tiempo. Sin embargo se puede observar que la estación de San Luis registra amplitudes térmicas diarias mayores que

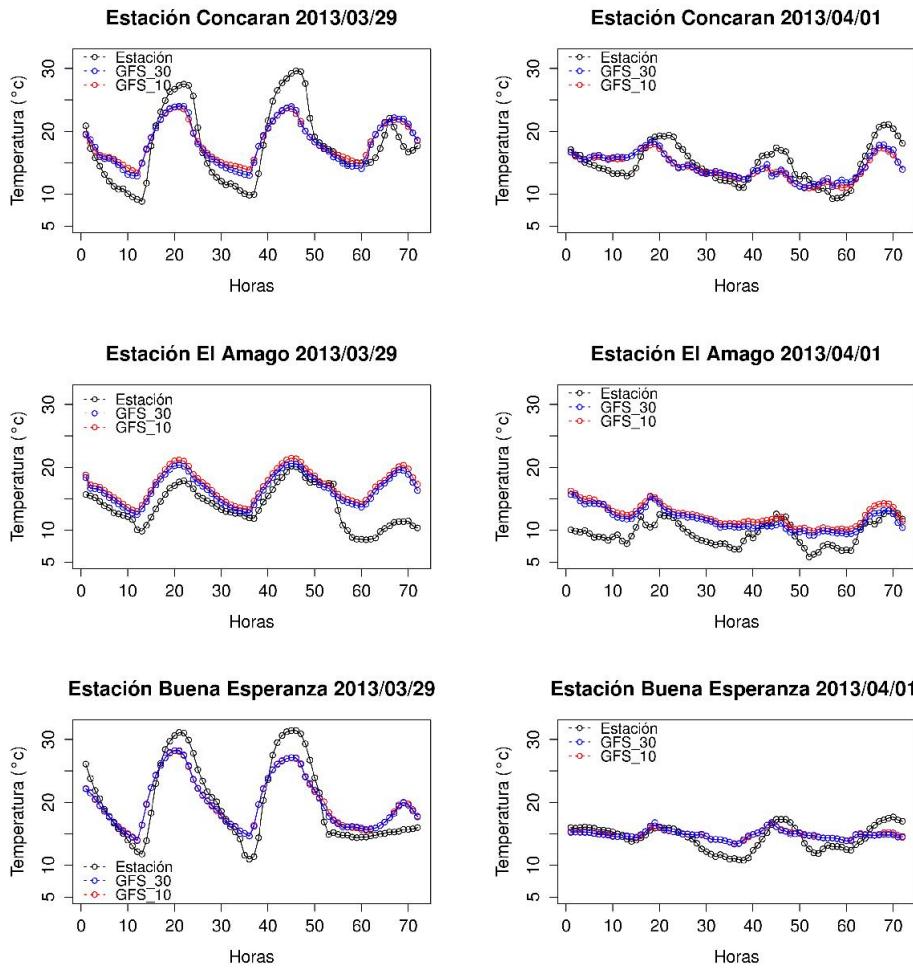


FIGURA 4.35: Comparación de la evolución de la temperatura registrada y pronosticada para tres diferentes estaciones.

para la estación de La Punta.

4.10.2. Temperaturas pronosticadas (Área 2) – comparaciones individuales

A continuación se compararán los pronósticos GFS de $30 \times 30 \text{ km}^2$ y $10 \times 10 \text{ km}^2$ (GFS_30 y GFS_10) de resolución horizontal para un periodo de 72 hs. Seleccionamos el caso de tres estaciones: Concarán, El Amago y Buena Esperanza, con dos diferentes condiciones iniciales, el día 29/03/2013 00:00 hs. UTC y el día 01/04/2013 00:00 hs. UTC (ver figura 4.35).

La figura 4.35 muestra para una misma estación dos situaciones distintas: (a) una situación de buen tiempo y (b) una situación de tiempo inestable con algunas precipitaciones. Para el caso de la estación Concarán el modelo claramente sobreestima la mínima y subestima la máxima diaria, es decir, no describe bien la amplitud térmica diaria. La misma

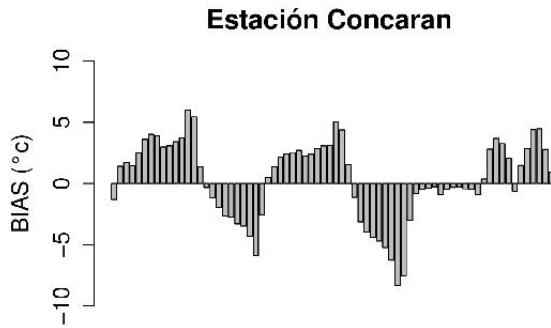


FIGURA 4.36: Bias de la temperatura – estación Concarán.

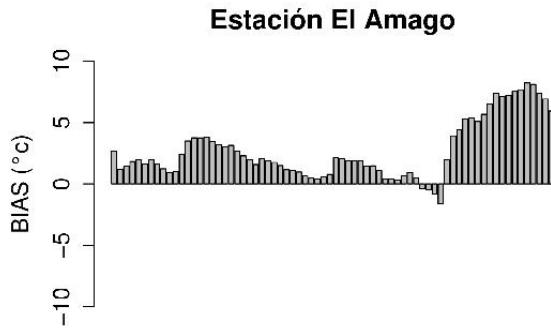


FIGURA 4.37: Bias de la temperatura – estación El Amago.

situación se da para la estación Buena Esperanza, aunque en menor medida. Para el día 2013/04/01 este comportamiento no es tan claro debido a la poca variación de la temperatura durante el día. La figura 4.36 demuestra esta situación para la estación Concarán mediante el cálculo del BIAS (Con GFS_10).

Por otro lado, en el caso de la estación El Amago, se registra una sobreestimación constante y en ambas situaciones (ver figura 4.37).

Las tres estaciones consideradas están emplazadas en zonas con diferentes topografías. La estación Concarán se sitúa entre las sierras de Córdoba y las sierras de San Luis a una altura de 800 m sobre el nivel del mar, pero sin estar en una región accidentada. La estación El Amago se encuentra a una altura de 1150 m sobre el nivel del mar sobre la zona serrana de San Luis. Por último, la estación Buena Esperanza está al sur de la provincia a una altura aproximada de 300 m sobre nivel del mar.



FIGURA 4.38: Grilla (color amarillo) superpuesta en un mapa de Google Earth, estación El Amago (color rojo).

Cabe aclarar aquí que la obtención de valores para una coordenada en particular se realiza mediante una interpolación al punto de grilla más cercano. Luego existe la posibilidad de que la diferencia entre las coordenadas (estación–grilla) sea muy diferente. En la figura 4.38 se graficaron, sobre una imagen de Google Earth, los puntos de la grilla correspondiente al modelo GFS_10 (color amarillo) y la ubicación de la estación El Amago (color rojo). La coordenada más cercana a la estación es la que se encuentra al principio de la ladera cercana al río, con lo cual existe una diferencia de altura importante entre ambos puntos y que genera la sobreestimación de la temperatura. Este es un error sistemático que puede resolverse de diferentes maneras. Sin embargo, este hecho ejemplifica que se deben estudiar individualmente las estaciones, y lo que el modelo representa para ella, sobre todo en las topografías complejas ya que, como en el caso analizado, genera un pronóstico desacertado.

La figura 4.35 también muestra que en la configuración usada, la diferencia entre los modelos GFS_10 y GFS_30 parece no ser significativa.

Para comparar el desempeño de ambos modelos se calculó, para cada uno de ellos, el RMSE. Se consideraron para todas las estaciones 25 pronósticos de 72 horas con condiciones iniciales contenidas en el periodo total analizado, es decir abarca las situaciones de tiempo estable e inestable. El resultado de este análisis se muestra en la figura 4.39. El boxplot muestra, en color azul el RMSE para el modelo GFS_30 y en color rojo el GFS_10, para los tres días de pronóstico. Se observa una tendencia general al crecimiento del RMSE en función del día pronosticado, más pronunciado para el modelo GFS_30 que el GFS_10.

Para el día 1 de pronóstico, no se advierten diferencias entre ambos boxplots mientras que para los días 2 y 3 la mediana del GFS_30 es más alta, aumentando la dispersión

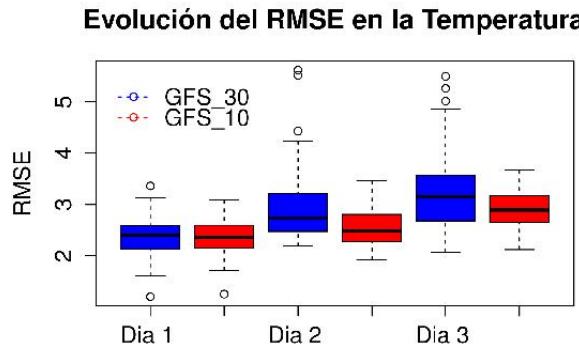


FIGURA 4.39: Comparación del RMSE entre ambos modelos en la predicción de la temperatura.

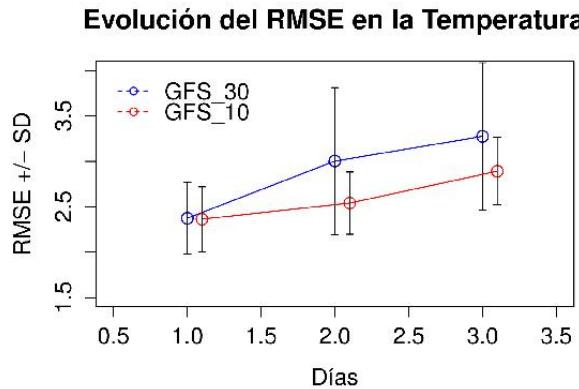


FIGURA 4.40: Comparación del valor medio del RMSE entre ambos modelos en la predicción de la temperatura.

en los datos y la cantidad de extremos (fuera del 95 % de todos los valores).

Si se grafica el valor medio y la desviación estándar para el RMSE en cada uno de los días (figura 4.40), la tendencia al crecimiento con los días de pronóstico se mantiene y la desviación estándar del modelo GFS_30 es notoriamente mayor, para los días 2 y 3, que la correspondiente al GFS_10.

4.10.3. Temperaturas pronosticadas (Área 2) – total de estaciones

Los pronósticos no tuvieron el mismo desempeño en todas las estaciones como se vio en los ejemplos de la figura 4.35. Luego, para caracterizar de manera más general el desempeño del modelo, se realizó un mapa del $|BIAS|$ para los 25 pronósticos de 72 horas y para una mejor visualización se realizó una interpolación de los mismos sobre

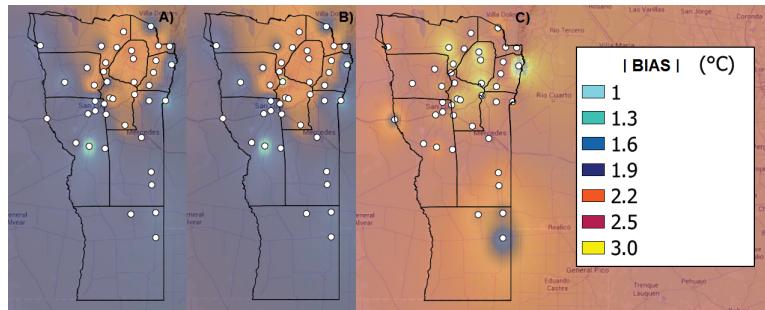


FIGURA 4.41: Mapa interpolado del error absoluto en la predicción de la temperatura.

toda la provincia. Debido al comportamiento similar de ambas configuraciones sólo se muestra el caso de GFS_10 (ver figura 4.41).

Este mapa permite identificar zonas donde los modelos predicen la temperatura con mayor o menor $|BIAS|$, pudiéndose identificar la zona serrana como la más dificultosa para el modelo al menos para el periodo analizado. Las letras A, B y C se corresponden a los días 1, 2 y 3 de pronóstico y muestran cómo crece (en general) el $|BIAS|$ en relación al día pronosticado.

Se puede concluir que para el periodo analizado el cambio de resolución no impacta directamente en el desempeño del pronóstico. Sin embargo, los errores en la predicción parecen propagarse a diferentes velocidades.

4.10.4. Ejemplo de otras variables

A continuación se expondrá el desempeño del modelo WRF en el pronóstico de variables no analizadas hasta ahora.

Algunas estaciones de la red de San Luis miden variables como humedad relativa e intensidad y dirección del viento.

Humedad relativa. A continuación se muestra un pronóstico (a 72 hs.) de humedad relativa a 2 m con la configuración GFS_10, comparada con la humedad relativa medida en la estación de San Luis. La condición inicial del pronóstico fue el 29/03/2013 00:00 hs. UTC (ver figura 4.42).

La evolución de la humedad relativa sigue la oscilación diaria típica, salvo al final de las 72 horas donde la humedad es más alta que lo normal debido a un periodo de tiempo inestable. El pronóstico reproduce bien de manera general la evolución diaria y el periodo de inestabilidad, sin tener una tendencia a la sobreestimación o subestimación para esta estación.

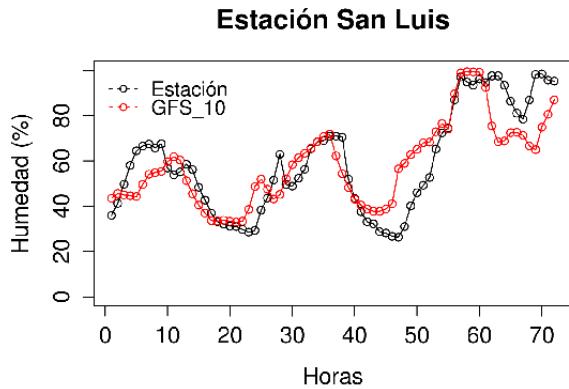


FIGURA 4.42: Evolución temporal de la Humedad Relativa. Comparación entre la predicción y lo registrado.

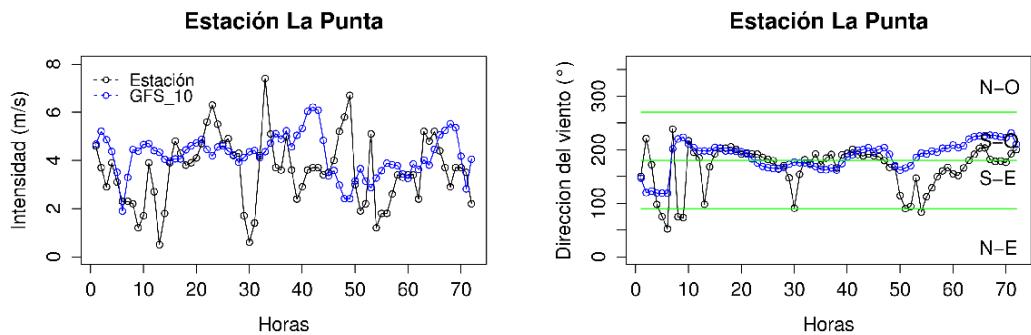


FIGURA 4.43: Comparación de la evolución de la intensidad y dirección del viento registrados y pronosticados.

Intensidad y dirección del viento. La estación de La Punta cuenta con la posibilidad de medir la intensidad y la dirección del viento, por lo que se utilizaron estos datos para compararlos con un pronóstico de 72 hs. de estas variables. Al igual que en el ejemplo de la humedad se utiliza la configuración GFS_10, pero en este caso las condiciones iniciales corresponden al día 01/04/2013 00:00 hs. UTC. Este periodo corresponde con tiempo inestable (ver figura 4.43).

Cabe recordar que el viento pronosticado es a 10 m mientras que el medido por la estación es más cercano a la superficie, también que cada dato de viento de la estación corresponde al promedio en la hora mientras que el dato del modelo es el calculado para cada hora en particular. Teniendo en cuenta esto se observa en la figura 4.43 que la intensidad del viento predicha en promedio es aceptable pero en la comparación hora a hora el desempeño no es bueno. Para el caso de la dirección del viento ocurre algo similar a lo anterior, sin embargo la predominancia del viento sur es bien descripta. Una validación más completa para el viento implicaría un seguimiento de la variación diurna durante un periodo más extenso.

4.10.5. Conclusión de la validación

Como conclusión particular sobre los análisis hechos se puede decir que los resultados del desempeño del modelo dependen de la variable en estudio y de la zona geográfica. Los resultados de las predicciones no dependen en gran medida de la resolución utilizada, aunque la calidad de la predicción disminuye con las horas de pronóstico de manera diferente. Es importante sumar a estas conclusiones las de los trabajos [31–33] y Gevard 2006, quienes concluyen de manera general que la óptima configuración y performance del modelo es altamente dependiente de la aplicación específica destinada al modelo, incluyendo el área geográfica y la época del año. Por otro lado, es importante destacar que esta clase de análisis permite ir conociendo los márgenes de errores típicos de los resultados y entrenarse en el manejo de los mismos.

4.11. Algunos trabajos sobre WRF en Argentina

En lo que respecta a trabajos con el WRF sobre el territorio argentino, se puede considerar el del modelado del evento de un viento Zonda que afectó la zona de Cuyo en Febrero de 2007 [34]. El desarrollo de este evento es netamente dependiente de la orografía, con lo cual una buena descripción de la misma fue necesaria para el experimento. Ellos encontraron una configuración de las parametrizaciones que mejor representó el evento, pero además utilizaron un modelo de elevación de terreno SRTM3 (Shuttle Radar Topography Mission) y un modelo de uso y tipo de suelo propio. Esto refuerza el hecho de que una buena descripción de la topografía y uso del suelo es importante para una buena reproducción de eventos en particular. Además demuestra que con WRF es posible modificar estos datos y mejorar la performance del modelo.

Otro trabajo importante es el del análisis de sensibilidad al cambio de parametrizaciones en el modelo WRF de variables de superficie sobre América del Sur [35]. Las variables que consideraron fueron: temperatura, temperatura de rocío, presión en la superficie y las componentes horizontales del viento. Utilizaron dos dominios, uno de ellos de 40 km de resolución horizontal y 30 niveles verticales (ver figura 4.44). El periodo analizado fue desde el 15 de diciembre de 2002 hasta el 15 de febrero de 2003, para pronósticos de 48 hs. Una serie de once combinaciones de parametrizaciones y condiciones de suelo fueron analizadas más un promedio de las mismas y datos de climatología.

Alguna de las conclusiones de sus resultados fueron que ninguna de las configuraciones probadas fue mejor que las otras cuando se consideraban simultáneamente varias variables. Esto particularmente se debe a que las distintas variables son influenciadas de diferente manera por los diversos procesos físicos, y tales procesos dependen del lugar.

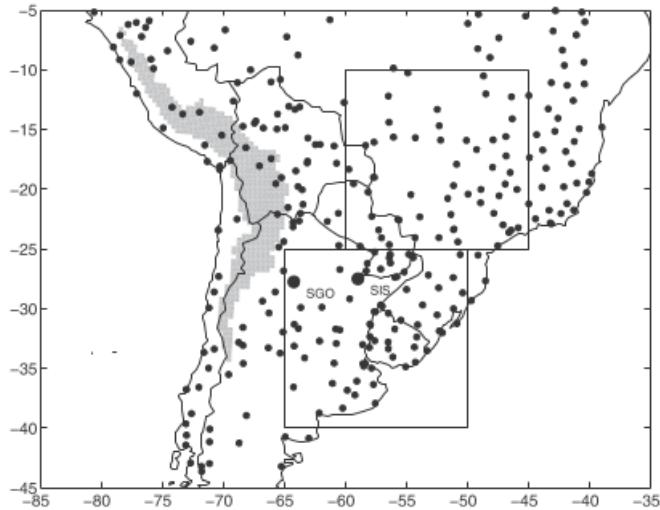


FIGURA 4.44: Dominios utilizados por Ruiz et al.

Las variables de superficie mostraron gran sensibilidad a los modelos de superficie terrestre, siendo más sensibles la temperatura y la temperatura de rocío que las componentes del viento. Otra conclusión fue que el modelo WRF representó mejor las variables en el dominio 1 que en el dominio 2. Finalmente, a la hora de considerar la estimación simultánea de todas las variables, los autores concluyeron que el promedio de ensambles fue el de mejor resultado. Este trabajo es importante ya que muestra que es posible modificar e identificar las mejores parametrizaciones para las variables que se encuentren relacionadas con las emergencias que se consideren. Además, para considerar a futuro la viabilidad de poner operativo al modelo WRF, podría considerarse un ensamblaje de varias parametrizaciones como resultado del pronóstico.

4.12. Simulación vs. Kriging

Muchos son los casos donde se tiene la necesidad de contar con datos meteorológicos de lugares donde no se cuenta con alguna estación meteorológica, o alternativamente, con otra herramienta para determinar una variable, como por ejemplo la temperatura de un determinado lugar.

Las imágenes satelitales son una buena opción, pero tienen un tiempo revisita extenso y puede que el horario en el cual queramos determinar la temperatura no esté cerca de los horarios de revisita del satélite.

Por otro lado las estaciones meteorológicas proporcionan datos puntuales, y en muchos casos, como las grandes extensiones del territorio argentino, la información es escasa.

Si es posible contar con algunos datos que rodeen al sitio de interés, usualmente se suele aplicar para determinar el valor de la variable de interés, una técnica geoestadística de predicción espacial conocida como Kriging. Como alternativa a las opciones descriptas anteriormente, el modelo WRF nos permite reproducir situaciones del pasado mediante la utilización de condiciones iniciales y de contorno conocidas como análisis (FNL).

En lo que sigue se analizará la posibilidad de utilizar esta modalidad del WRF para suplir la faltante de datos. Se compararán los resultados de las simulaciones contra un Kriging, realizado con los datos de temperatura del día 15/02/2013 15:00 hs. UTC sobre todo el territorio argentino. También se usarán los datos GFS pronosticados en el mismo día y hora. Ambas simulaciones se iniciarán con la condición inicial el día 15/02/2013 00:00 hs. UTC y una resolución horizontal de $30 \times 30 \text{ km}^2$.

4.12.1. Kriging de temperaturas sobre Argentina

Se consideraron los datos de las 61 estaciones meteorológicas del SMN utilizados anteriormente. De estas 61 estaciones se usaron 6 (aproximadamente 10 %) estaciones como control para los datos predichos por el Kriging, los pronosticados por el análisis y los pronosticados por el GFS.

Las estaciones de control se enumeran en el cuadro 4.7 con el valor de temperatura correspondiente.

CUADRO 4.7: Estaciones de control.

Estaciones	LON	LAT	Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)
1. Orán	-23.15	-64.32	27.4
2. Santiago del Estero Aero	-27.77	-64.30	29.0
3. Observatorio Córdoba	-31.40	-64.18	30.1
4. Concordia Aero	-31.30	-58.02	26.9
5. Bahía Blanca Aero	-38.73	-62.17	30.4
6. Río Gallegos	-51.62	-69.28	13.7

La ubicación de las estaciones, tanto las usadas para el Kriging (azul) como para control (rojo), están representadas en la figura 4.45.

Para la realización de un Kriging es necesario conocer la autocorrelación espacial de los datos considerados. La idea de la autocorrelación es cuantificada a través del semivariograma. Los parámetros tales como el rango (Range) y el meseta (Sill) definen

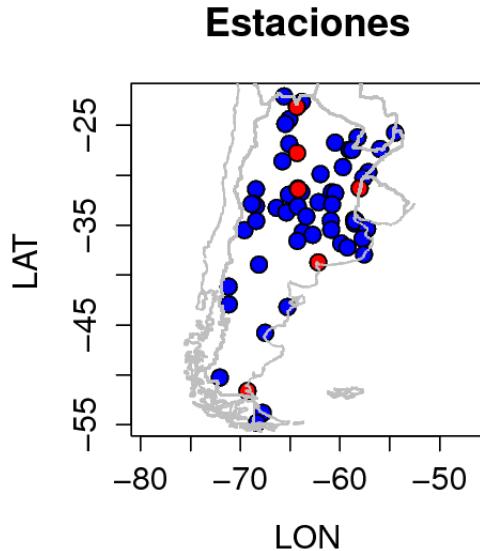


FIGURA 4.45: Ubicaciones de las estaciones de control (rojo) y las utilizadas para el Kriging (azul).

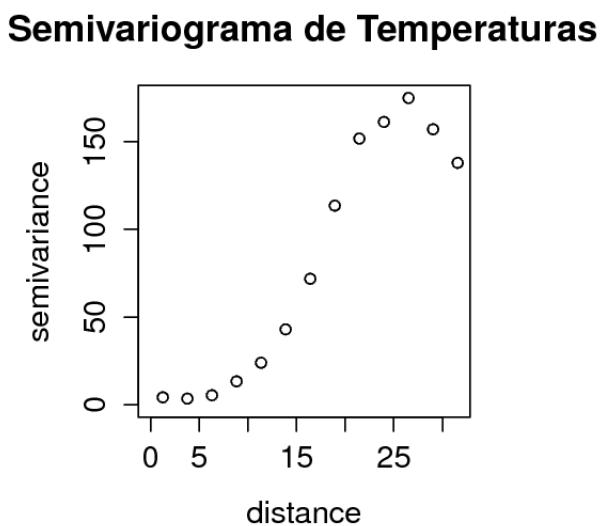


FIGURA 4.46: Semivariograma de temperaturas.

las características del semivariograma, y a su vez estos parámetros son utilizados para la construcción del Kriging [36]. El semivariograma para la temperatura se construyó mediante la función Variog del software estadístico R (ver figura 4.46).

A menudo, el semivariograma se estabiliza en un valor constante (Sill) a una dada distancia (Range). Más allá de esta distancia los valores se consideran no correlacionados. Existen algoritmos que realizan estimaciones de estos parámetros, como es el caso del método de máxima verosimilitud restringida (REML) el cual se usó en este caso, utilizando además una función exponencial como función de correlación. Una vez obtenidos los parámetros se realizó un Kriging convencional para los sitios elegidos como control

mediante la función *krige.conv* geoR del software R. Los resultados obtenidos se resumen en el cuadro 4.8:

CUADRO 4.8: Resultados del Kriging.

Estaciones	LAT	LON	Temp.	Temp.	Desv.
				Kriging (°C)	Estandar (°C)
1. Orán	-23.15	-64.32	27.4	26	2
2. Stgo. del Estero Aero	-27.77	-64.30	29.0	29	3
3. Observatorio Córdoba	-31.40	-64.18	30.1	29	1
4. Concordia Aero	-31.30	-58.02	26.9	28	3
5. Bahía Blanca Aero	-38.73	-62.17	30.4	28	4
6. Río Gallegos	-51.62	-69.28	13.7	11	4

Los resultados predichos están en buen acuerdo con los medidos en las estaciones, mientras que para las estaciones que están más aisladas de sus vecinas los valores de la desviación estándar son más altos.

Consideremos ahora los valores predichos por el modelo en sus dos formas, es decir el pronóstico de FNL y el de GFS, en el cuadro 4.9.

CUADRO 4.9: Resultados del Kriging y los pronósticos.

Estaciones	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.
	Kriging (°C)	FNL (°C)	GFS (°C)	
1. Orán	27.4	26	28	28
2. Santiago del Estero Aero	29.0	29	29	29
3. Observatorio Córdoba	30.1	29	29	28
4. Concordia Aero	26.9	28	28	29
5. Bahía Blanca Aero	30.4	28	29	30
6. Río Gallegos	13.7	11	12	12

Los valores pronosticados no contienen error debido a que para asignarle un error verdaderamente representativo es necesario realizar predicciones repetidamente y durante varias estaciones del año. Sin embargo los resultados muestran que los valores pronosticados están dentro de un rango aceptable y en ocasiones mejora a la predicción hecha por el Kriging. Gráficamente los resultados se muestren en las figuras 4.47 a y b.

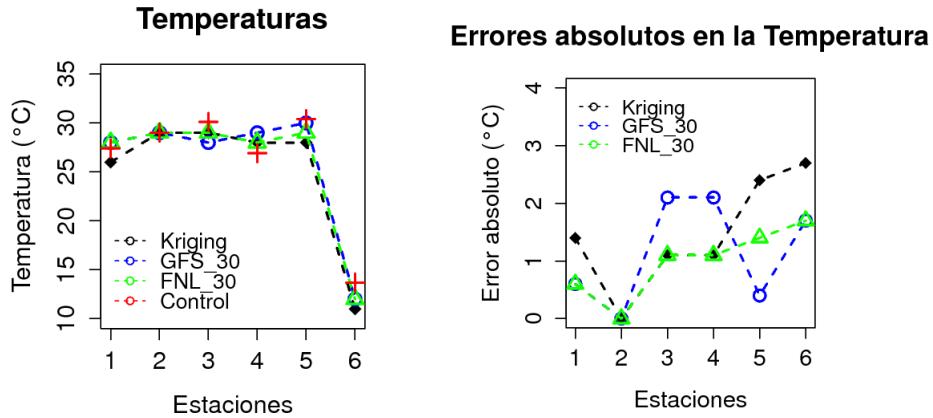


FIGURA 4.47: Temperaturas pronosticadas y registradas (izquierda), y error absoluto de las temperaturas pronosticadas (derecha).

La figura 4.47 (izquierda) muestra el rango de temperaturas con el que se trabajó, el valor medido en cada estación (rojo), la predicción espacial (negro) y los pronósticos GFS (azul) y FNL (verde). Se puede ver que no hay una tendencia a subestimar o a sobreestimar los valores de las estaciones. En la figura 4.47 (derecha) se representa el error absoluto con respecto al valor medido en cada estación. Se puede ver en ésta que los errores en los tres métodos son bajos, y que para los casos considerados el pronóstico FNL tiene un mejor desempeño que los otros.

Finalmente podemos concluir que, en base a los casos considerados, es posible utilizar el modelo WRF como alternativa para la obtención de datos de temperatura en sitios faltantes de información o incluso en el caso de no contar con ningún dato de estación, siendo los datos de FNL los más eficientes para este caso.

4.12.2. Kriging de temperaturas sobre la provincia de San Luis

Con la misma idea de utilizar al modelo WRF como generador de datos, en este caso la temperatura, realizamos el siguiente análisis que, a diferencia del anterior, se lo hace considerando el dominio creado sobre la provincia de San Luis y las estaciones existentes en esa provincia. También tenemos la posibilidad de tener los datos de los pronósticos FNL y GFS con $30 \times 30 \text{ km}^2$ y $10 \times 10 \text{ km}^2$ de resolución. Los datos utilizados son del día 15/02/2013 00:00 hs. UTC. Para la generación del Kriging se utilizaron 5 de las 41 estaciones.

Las estaciones de control se presentan en el cuadro 4.10.

CUADRO 4.10: Estaciones de control.

Estaciones	LON	LAT	Temperaturas (°C)
1. Lafinur	-65.93	-32.36	18.2
2. Valle de Pancanta	-66.10	-32.86	9.7
3. San Luis	-66.31	-33.29	14.6
4. Fraga	-65.79	-33.50	14.6
5. Batavia	-65.68	-34.77	15.6

La ubicación de las estaciones, tanto las usadas para el Kriging (azul) como para control (rojo) enumeradas de norte a sur en la tabla, están representadas en la figura 4.48.

CUADRO 4.11: Resultados del Kriging.

Estaciones	Temp.	Temp.	Desv.
	Kriging (°C)	Estandar (°C)	
1. Lafinur	18.2	19.1	0.1
2. Valle de Pancanta	9.7	12	2
3. San Luis	14.6	14	1
4. Fraga	14.6	14	2
5. Batavia	15.6	16	2

La metodología de cálculo en la predicción espacial es la descripta anteriormente y los resultados son resumidos en el cuadro 4.11.

Del cuadro 4.11 podemos ver que la desviación estándar en la estación Lafinur es muy chica y no logra solapar el valor medido. La predicción de la temperatura en la estación Valle de Pancanta también está fuera de los valores contemplados teniendo en cuenta la desviación estándar. En el cuadro cuadro 4.12 se presentan los valores de los pronósticos FNL y GFS en las resoluciones $30 \times 30 \text{ km}^2$ y $10 \times 10 \text{ km}^2$.

CUADRO 4.12: Resultados del Kriging y los pronósticos.

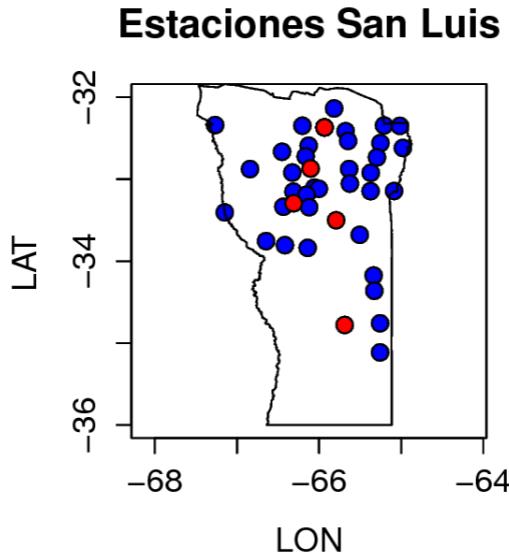


FIGURA 4.48: Ubicaciones de las estaciones de control (rojo) y las utilizadas para el Kriging (azul).

Estaciones	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.
	Kriging	GFS_30	GFS_10	FNL_30	FNL_10	
1. Lafinur	18.2	19.1	20	20	21	21
2. Valle de Pancanta	9.7	12	15	14	14	13
3. San Luis	14.6	14	15	15	15	14
4. Fraga	14.6	14	15	15	15	15
5. Batavia	15.6	16	15	15	15	15

La tabla anterior nos muestra que es difícil predecir para todos los métodos lo medido en las dos primeras estaciones siendo el Kriging más preciso en la predicción. Para el resto de las estaciones todos los métodos muestran un buen acuerdo. Con respecto a los diferentes pronósticos del WRF no se distingue una superioridad explícita de alguno de ellos. Esto queda más claro en la figura 4.49.

La figura 4.49 deja en claro que en las primeras dos estaciones consideradas el Kriging es el mejor en la predicción. Esto es esperable ya que en este caso tenemos una densidad de estaciones meteorológicas superior al utilizado en el dominio que contiene a toda la Argentina. Por otro lado, el aumento en la resolución horizontal del modelo no mejoró notablemente la predicción para los casos considerados.

Como conclusión para ambos casos analizados, tanto para el domino de Argentina como para el domino de la provincia de San Luis, el modelo WRF respondió bien en la comparación de los datos medidos en las estaciones y los pronosticados, igualando el desempeño

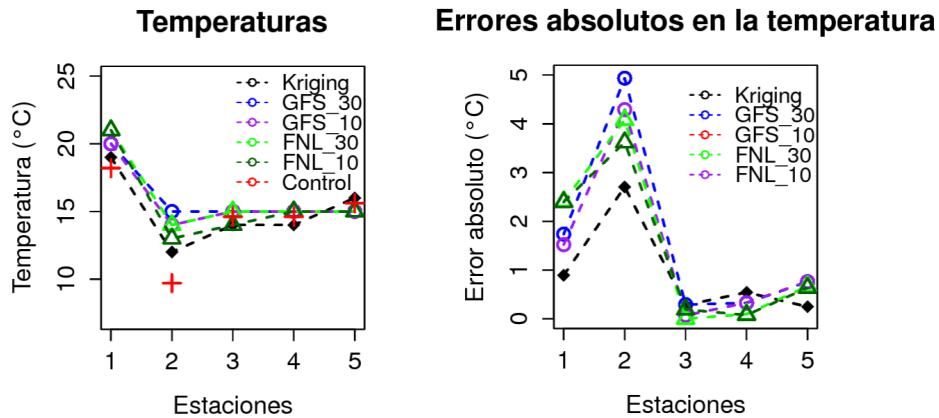


FIGURA 4.49: Temperaturas pronosticadas y registradas (izquierda), Error absoluto de las temperaturas pronosticadas (derecha).

del Kriging y mejorándolo como en el caso de las estaciones consideradas en el dominio de Argentina. Nuevamente se hace hincapié en que para aseverar una conclusión más general es necesario estudiar más casos a lo largo de al menos un año. Sin embargo lo expuesto da indicios de que el modelo responde bien a la hora de reproducir el comportamiento de la temperatura, tanto en la predicción (GFS) como en la reproducción (FNL), siendo este último ligeramente más confiable.

Capítulo 5

Análisis de eventos particulares

5.1. Introducción

En este capítulo se consideran dos casos de eventos extremos, el primero ocurrido entre los días 4 y 5 de abril del 2012 sobre las provincias de Buenos Aires y el Litoral, y el segundo ocurrido entre los días 1 y 3 de abril de 2013 en la ciudad de Buenos Aires y La Plata. Se tomarán estos casos con el fin de realizar una comparación cualitativa entre los eventos y lo reproducido por los modelos WRF y BOLAM. Para ambos eventos se realizará una breve descripción basada en informes generados por el SMN.

5.2. Caso de estudio: 4 y 5 de abril del 2012

En el día 4 de abril alrededor de las 23:00 hs. UTC se produjeron, sobre la ciudad de Buenos Aires, dos tornados de intensidad F1 y F2 en la escala de Fujita. En esta tormenta 17 personas perdieron la vida y se produjeron daños materiales significativos. La región afectada por los tornados se muestra en la figura ??.

5.2.1. Análisis meteorológico

Durante el día 4 de abril una masa de aire frío proveniente del suroeste en dirección al Río de la Plata formó un típico frente frío. Este frente forzó al aire caliente y húmedo de la zona a ascender formando las nubes de tormenta. A las 22:40 hs. UTC la temperatura del tope de las nubes alcanzaban los -70° C. A las 23:40 hs. UTC parte del sistema entró al Río de la Plata. La evolución del evento se registró mediante el producto de temperatura de tope de nubes generado por el SMN a través de la imágenes GOES 13

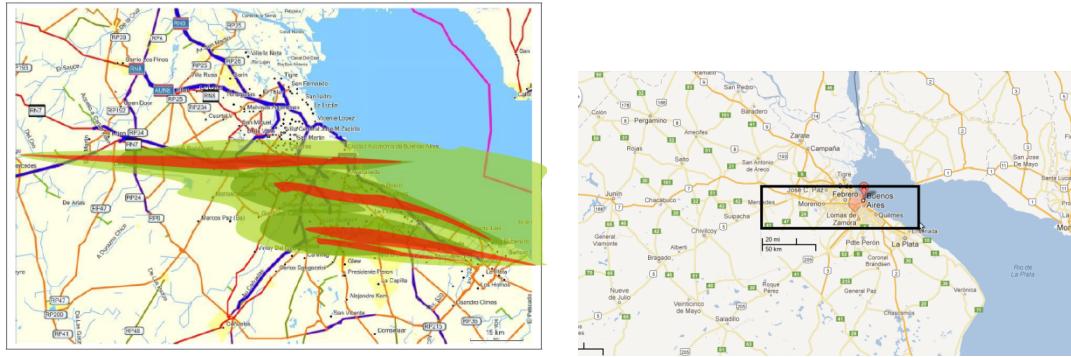


FIGURA 5.1: Probable trayectoria de los tornados (izquierda), área afectada (derecha).

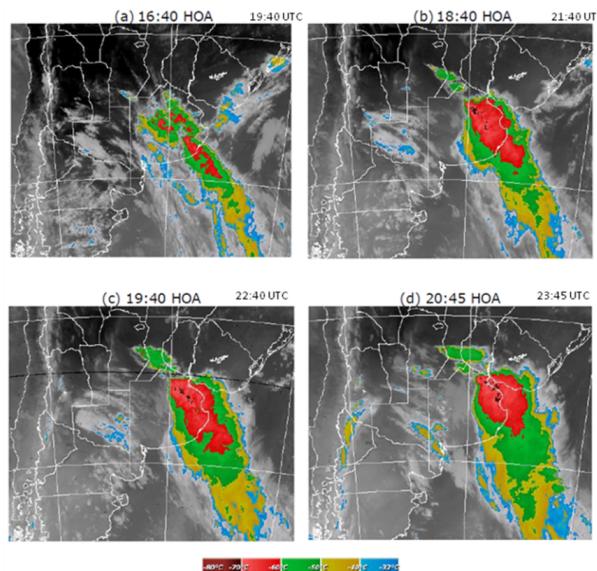


FIGURA 5.2: Temperatura de topes de nube GOES 13 – SMN, evolución del sistema.

(figura 5.2) y por imágenes de reflectividad del radar meteorológico del Aeropuerto de Ezeiza (figura 5.3). La temperatura del tope de la nube da idea del desarrollo vertical de la misma, cuanto más desarrollada verticalmente está la nube, más frío es su tope y mayor es la probabilidad de precipitación. Por otro lado en las imágenes de radar los valores altos de reflectividad indican la presencia de hidrometeoros con probabilidad de precipitar.

Desde el Observatorio central de Buenos Aires se reportó la precipitación acumulada cada 10 minutos con tasas de hasta 45 mm/h desde las 22:00 hs. UTC del día 4 hasta las 00:30 hs. UTC del día 5 (ver figura 5.4).

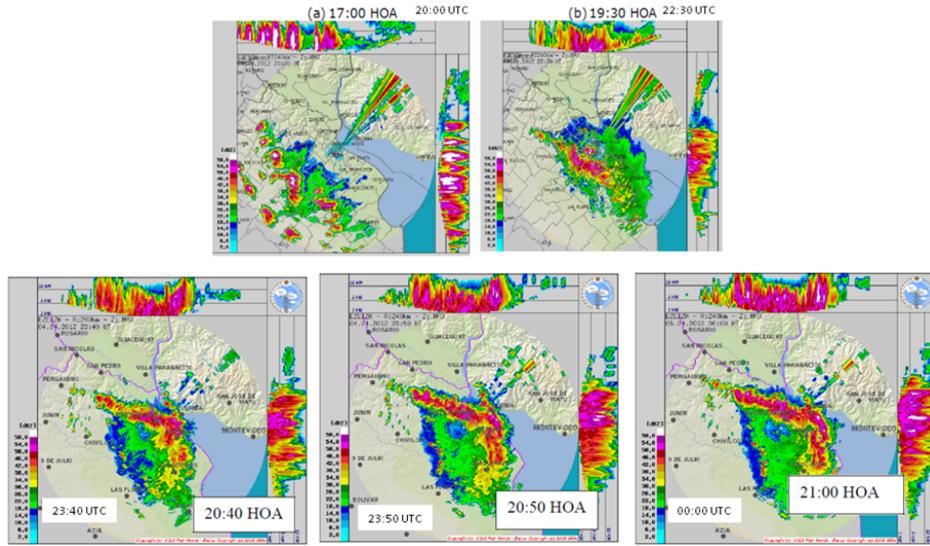


FIGURA 5.3: Imágenes de reflectividad de radar del Aeropuerto de Ezeiza.

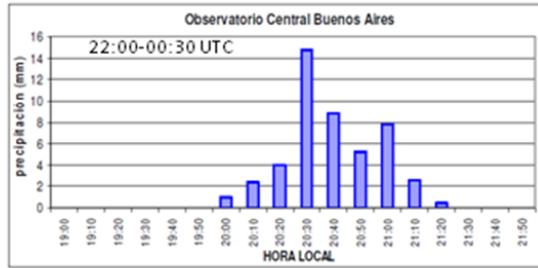


FIGURA 5.4: Precipitación registrada cada 10 minutos en el Observatorio central de Buenos Aires.

5.2.2. Simulaciones

Para simular este evento se utilizaron el modelo BOLAM y WRF, ambos con resolución espacial de $10 \times 10 \text{ km}^2$. La fecha y hora de la condición inicial para ambos fue el día 04/04/2012 a las 00:00 hs. UTC. Sin embargo, las condiciones iniciales y de contorno fueron diferentes para cada uno de los modelos. Para BOLAM las condiciones iniciales y de contorno fueron tomadas del GFS mientras que para WRF fueron tomadas del FNL.

En lo que sigue se realizará una comparación visual de lo que mostraron las imágenes de temperatura de tope de nube, distribución de descargas eléctricas y la precipitación pronosticada de BOLAM y WRF entre las 22:00 hs. UTC del día 4 hasta las 00:00 hs. UTC del día 5. Las imágenes de temperatura de tope de nube (figura 5.5) corresponden al SMN, mientras que las imágenes de distribución de descargas eléctricas (figura 5.6) están basadas en los datos de la World Wide Lightning Location Network (WWLLN) y elaboradas por el Grupo de Física de la Atmósfera de FaMAF. Esta última da información

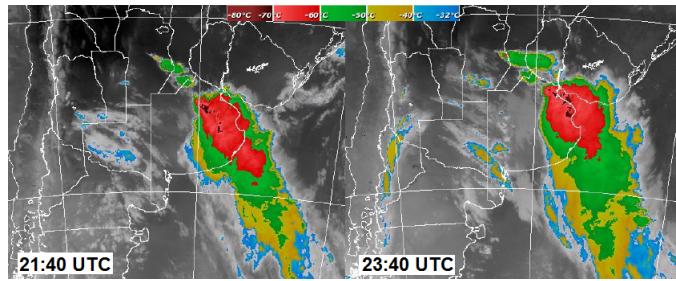


FIGURA 5.5: Temperatura de tope de nube.

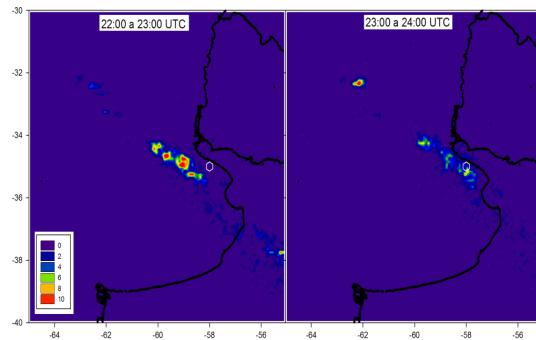


FIGURA 5.6: Actividad eléctrica en las horas de tormenta.

sobre la ubicación de las celdas convectivas activas que generalmente se encuentran sobre el frente de la tormenta. La figura 5.7 muestra la precipitación pronosticada en dos horas por los modelos BOLAM (izquierda) y WRF (a derecha).

Las imágenes de la figura 5.5 muestran que la tormenta se concentra sobre el territorio de Buenos Aires en dirección a Uruguay (noreste) y extendiéndose sobre el sur de Entre Ríos y centro de Santa Fe. Como se dijo antes, estas imágenes tanto como la figura 5.6, no dan información explícita de la precipitación caída que es lo que ambos modelos pronostican. Sin embargo, se puede concluir que ambos modelos predijeron precipitación en las regiones donde se desarrollaron las tormentas. Ambos modelos muestran precipitación hacia el noroeste alcanzando el norte de Santa Fe y todo Entre Ríos, pero las imágenes de temperatura de tope de nube no muestran topes fríos en la zona. Además, los modelos no muestran precipitación en el sureste de la provincia de Buenos Aires, sobre todo WRF. Por lo tanto, ambos modelos parecen haberse desfasado temporalmente en la predicción. Ambos modelos registran el máximo en la precipitación acumulada en las dos horas en las cercanías de Buenos Aires con valores de entre 40 y 50 mm, lo cual está en buen acuerdo con lo registrado por la estación meteorológica de Buenos Aires.

Comenzando ya el día 5 de abril la tormenta continuó evolucionando hacia Uruguay, la provincia de Entre Ríos y Santa Fe principalmente. La localización de la misma puede

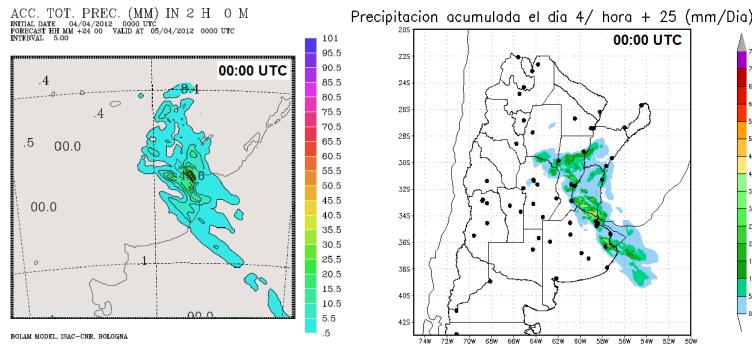


FIGURA 5.7: Simulaciones de BOLAM (izquierda) y WRF (derecha).

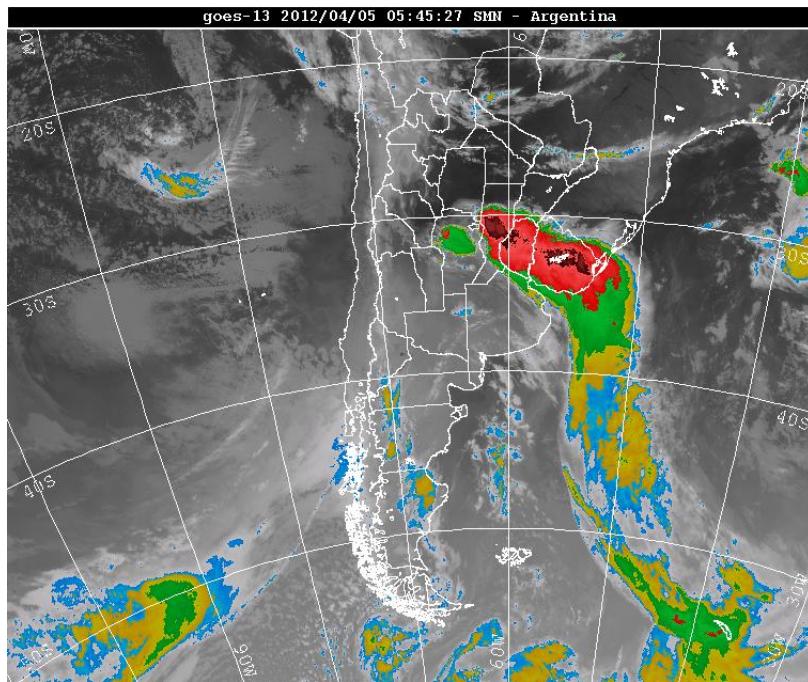


FIGURA 5.8: Temperatura de tope de nube – GOES 13 – SNM.

verse en la figura 5.8, la cual es una imagen de temperatura de tope de nube elaborada por el SMN de la hora 05:45 hs. UTC.

En esta ocasión se contó con la posibilidad de tener datos de microondas pasivas (PMW) del sensor AMSU-B a bordo de los satélites NOAA 15–18 y el Microwave Humidity Sounder sobre Metop-A. Estos sensores cuentan con cinco canales con frecuencias de 89, 150, 184, 186 y 190 GHz las cuales están asociadas, mediante las llamadas funciones de peso (figura 5.9), a diferentes alturas en la atmósfera. Estas frecuencias coinciden con la bandas de absorción de vapor de agua.

El método de estimación de precipitación denominado The 183–WSL (The Water vapor Strong Lines at 183 GHz) [37, 38] utiliza diferentes características de absorción y

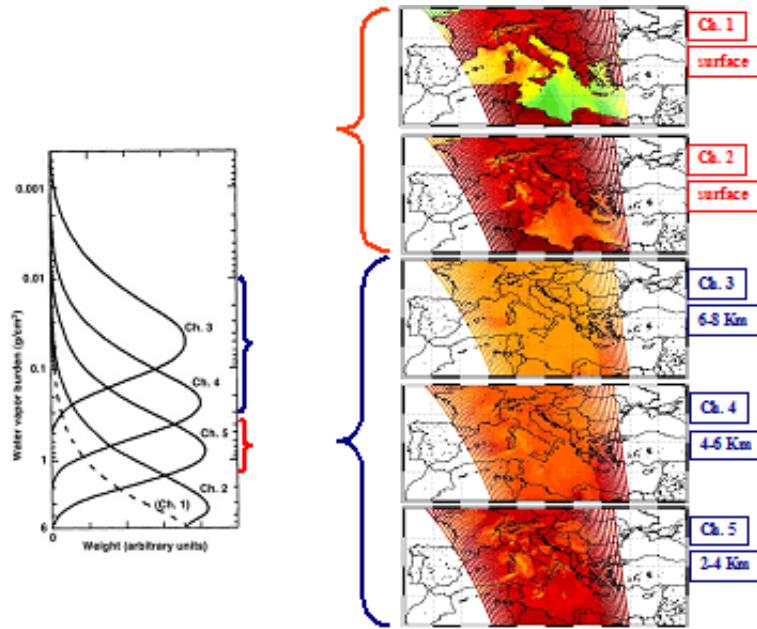


FIGURA 5.9: Funciones de peso (izquierda), imágenes de los cinco canales del AMSU-B.

dispersión de la radiación emitida, debido a los diversos componentes de las nubes. El 183–WSL es un algoritmo de recuperación de la tasa de precipitación y clasificación de tipos de precipitación y lo hace basado en distintos umbrales de temperatura de brillo. Puede distinguir y clasificar precipitación convectiva y estratiforme, utilizando filtros de vapor de agua condensado y cobertura de nieve sobre las montañas.

Las imágenes de PMW generadas (figura 5.10) y la aplicación del 183–WSL (figura 5.11) para este caso de estudio fue generada por el autor de esta tesis en el National Research Council of Italy, Institute of Atmospheric Sciences and Climate (CNR–ISAC), Bologna, Italy, bajo el consentimiento de sus autores.

La figura 5.10 muestra la temperatura de brillo calculada para los cinco canales de AMSU–B a las 05:45 hs. UTC. La tormenta desarrolló una fuerte actividad convectiva, alcanzando los 8 km de altura como lo demuestra la disminución de la temperatura de brillo en el canal 184 GHz. La precipitación total (derecha) y convectiva (izquierda) recuperada por el algoritmo se visualiza en la figura 5.11.

De las imágenes producidas por el algoritmo se concluye que la precipitación es de origen convectivo principalmente. El algoritmo 183–WSL sólo computa hasta una tasa de precipitación de 20 mm/h, por lo que es posible entonces que en algunas partes de la región considerada la tasa fuera mayor a este límite.

Los resultados de los pronósticos de precipitación acumulada de BOLAM y WRF se muestran en la figura 5.12.

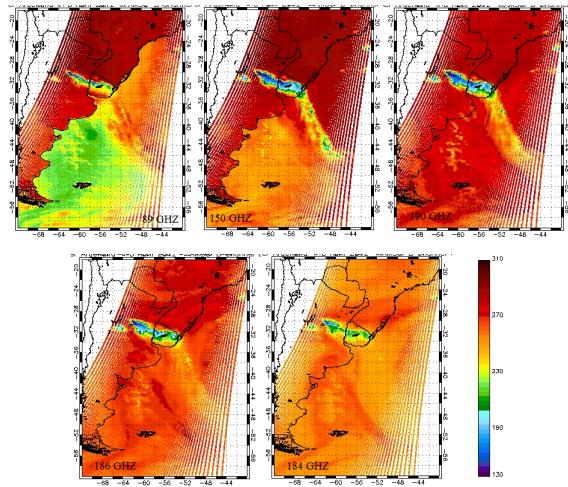


FIGURA 5.10: Temperatura de brillo para los cinco canales del AMSU–B del evento.

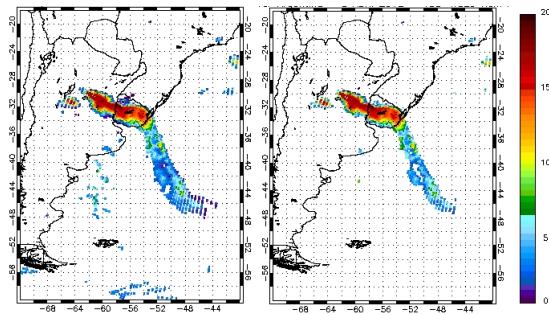


FIGURA 5.11: Estimación de la tasa de precipitación del algoritmo 183–WSL para el evento.

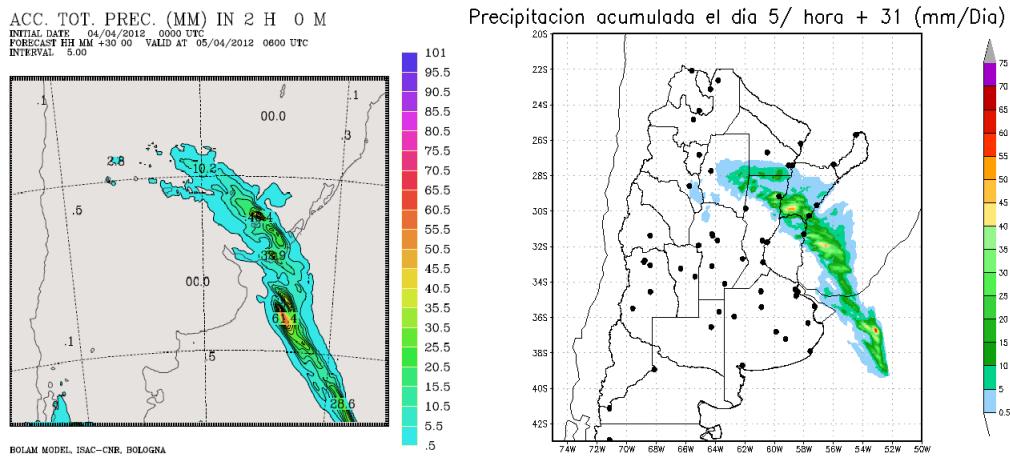


FIGURA 5.12: Simulaciones de BOLAM (izquierda) y WRF (derecha).

Nuevamente se observa un desplazamiento de la precipitación pronosticada con respecto a lo calculado por el algoritmo, sobre todo para WRF. Mas allá del desplazamiento temporal, el fenómeno parece estar bien representado por ambos modelos, describiendo el frente de tormenta y su trayectoria en forma correcta.

5.3. Caso de estudio: 1 y 3 de abril del 2013

Entre los días 1 y 3 de abril del 2013 se produjo un evento de precipitación que afectó tanto a la ciudad de Buenos Aires como a la ciudad de La Plata generando una importante inundación. La ciudad de La Plata y sus cercanías fueron afectadas por una lluvia continua. El SMN informó que se registraron 181 mm acumulados en 24 hs., desde las 09:00 hs. (12:00 hs. UTC) del día 2/4 hasta las 09:00 hs. del día 3/4. En este evento se registraron un total de 2200 evacuados y 78 víctimas fatales. Una imagen tomada por el sensor ASTER a bordo del satélite TERRA el día 5 de abril del 2013 muestra las áreas anegadas (en color azul) (ver figura 5.13).

En la figura 5.14 se muestran mapas de precipitación acumulada del 1 de abril a las 9 hs. hasta el 2 de abril a las 9 hs. (izquierda) y 2 de abril a las 9 hs. hasta el 3 de abril a las 9 hs. (derecha). Estos datos fueron publicados en un informe del SMN. Para el caso de la ciudad de La Plata, los valores de precipitación registrados durante el evento en cuestión (figura 5.14 derecha) superaron el record histórico diario y el valor mensual normal para el mes de abril (73.9 mm).

5.3.1. Simulaciones con WRF

Para la simulación de estos eventos se consideró primeramente el modelo WRF con dos diferentes condiciones iniciales y de contorno. La fuente de las condiciones fueron del FNL y del GFS considerando la misma fecha de inicio para ambas simulaciones. El dominio analizado es el anidado de 10 km considerado anteriormente. Los resultados de la precipitación acumulada del 1 de abril a las 9 hs. hasta el 2 de abril a las 9 hs. (figura 5.15) y 2 de abril a las 9 hs. hasta el 3 de abril a las 9 hs. (figura 5.16), para las distintas configuraciones y el valor absoluto de la diferencia entre ambas configuraciones.

El mapa de precipitaciones informado por el SMN muestra una realidad diferente a lo predicho por el modelo en sus dos diferentes variantes. En el mapa del SMN la precipitación acumulada se concentra sobre el norte del Litoral y la provincia de Buenos Aires, con un pico marcado sobre la ciudad de Buenos Aires. Para el modelo WRF, con condiciones FNL y GFS, la precipitación acumulada muestra mayor acumulación sobre



FIGURA 5.13: Imagen ASTER de la zona afectada (en color azul) – CONAE.

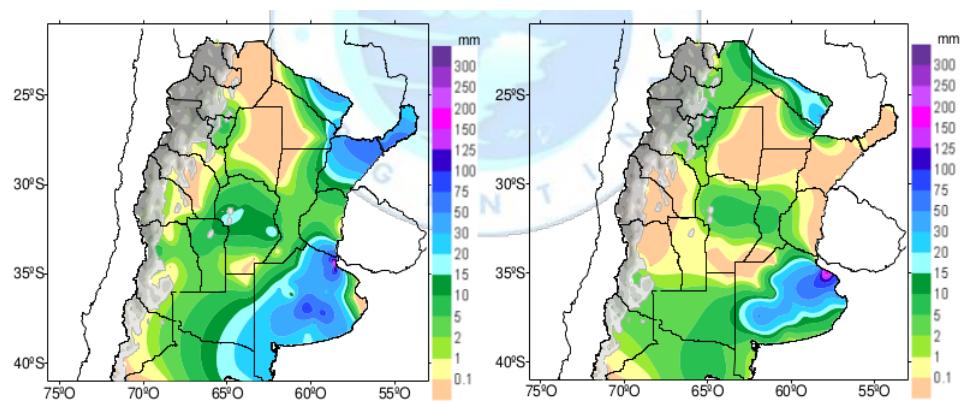


FIGURA 5.14: Mapas de precipitación acumulada diaria - SMN.

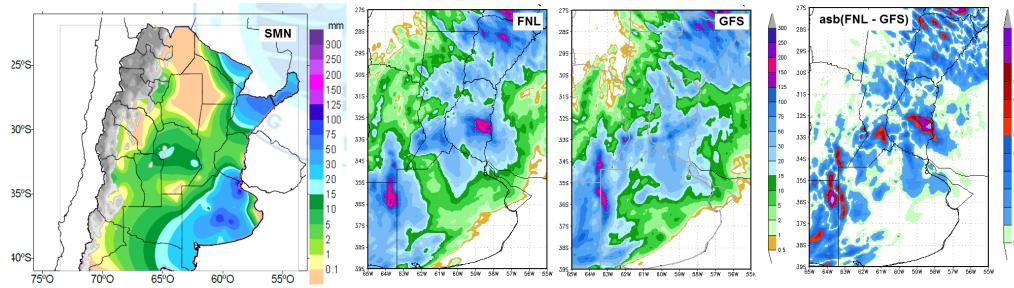


FIGURA 5.15: Precipitación acumulada diaria. De izquierda a derecha: SMN, WRF-FNL, GFS-WRF, Diferencia abs(FNL-GFS).

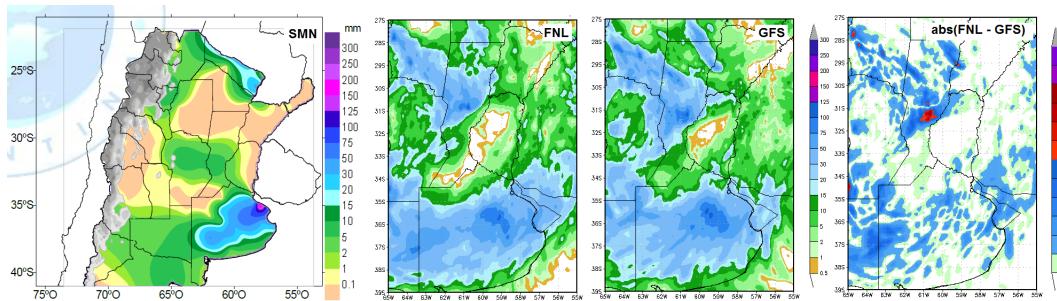


FIGURA 5.16: Precipitación acumulada diaria. De izquierda a derecha: SMN, WRF-FNL, GFS-WRF, Diferencia abs(FNL-GFS).

todo el Litoral, con mayor intensidad en Entre Ríos. Esto no coincide con lo reportado por el SMN. También el modelo muestra una alta acumulación sobre la frontera de la provincia de Buenos Aires y la provincia de La Pampa, hecho que tampoco coincide con lo reportado por el SMN. El hecho más significativo es que sobre la provincia de Buenos Aires el modelo pronosticó una acumulación menor a la esperada y sobre la ciudad de Buenos Aires es mucho menor al pico acumulado registrado por el SMN. Por último, el cuadro de la derecha de la figura 5.15 muestra el valor absoluto de la diferencia entre las salidas del modelo para las distintas condiciones iniciales usadas, que evidencia una importante diferencia entre ambas. Sin embargo, no es claro cuál de las dos condiciones iniciales representa mejor a la realidad, pero sí es evidente que no es buena la predicción del fenómeno en ambos casos.

Para la situación que afectó a la ciudad de La Plata (figura 5.16), la precipitación acumulada se concentra en la provincia de Buenos Aires con un pico bien marcado sobre dicha ciudad. Para este periodo el modelo parece haber representado mejor la situación que en el caso anterior aunque nuevamente no observa el pico de precipitación acumulada sobre la ciudad de La Plata. El gráfico de la diferencia entre lo predicho por el modelo para ambas condiciones iniciales muestra un mayor similitud en los resultados de la precipitación acumulada que en el caso anterior.

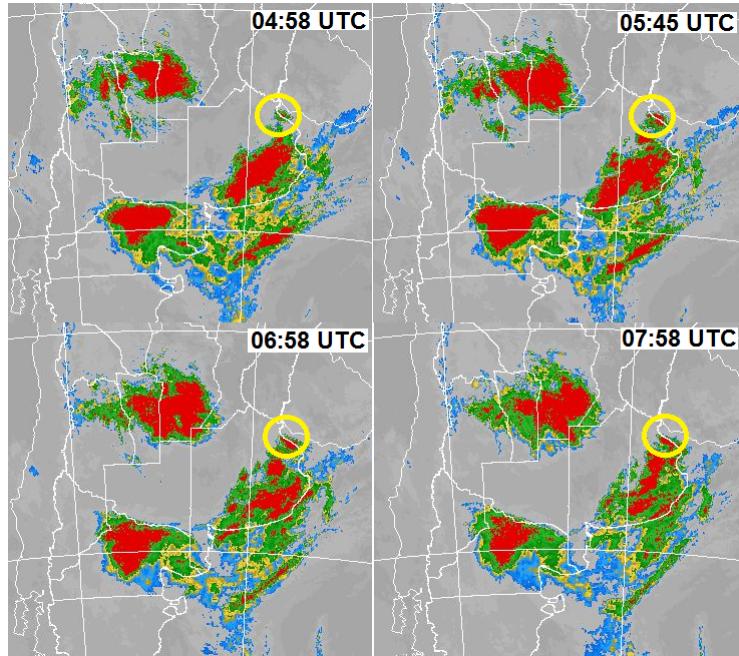


FIGURA 5.17: Temperatura de tope de nube sobre Buenos Aires – GOES 12 – CONAE.

En base a las comparaciones hechas para los dos días, se puede decir que el modelo no tuvo un buen desempeño en la predicción de los eventos.

5.3.2. Evolución temporal

En el apartado anterior se consideró la precipitación acumulada en 24 hs. para los dos días. En este apartado seguiremos la evolución de los eventos mediante los productos de temperatura de tope de nube producidos por CONAE de imágenes de GOES 12. La primera serie de imágenes (figura 5.17) corresponde al paso de la tormenta por la ciudad de Buenos Aires. La segunda serie corresponde al paso de la misma por la ciudad de La Plata (figura 5.18).

La figura 5.17 muestra cómo una pequeña celda se formó sobre la ciudad de Buenos Aires permaneciendo por más de tres horas y en crecimiento hacia la ciudad de La Plata.

En la figura 5.19 se comparan imágenes de temperatura de tope de nube (05:45 hs. UTC hasta 7:58 hs. UTC) con las simulaciones de WRF–FNL, GFS–WRF y BOLAM a la hora 08:00 hs. UTC. Recordemos que las simulaciones hechas son para la precipitación acumulada en dos horas.

Los modelos indican precipitación acumulada mínima sobre Buenos Aires, y la distribución espacial de la precipitación acumulada no está en buen acuerdo con lo que sugieren las imágenes de temperatura de nube.

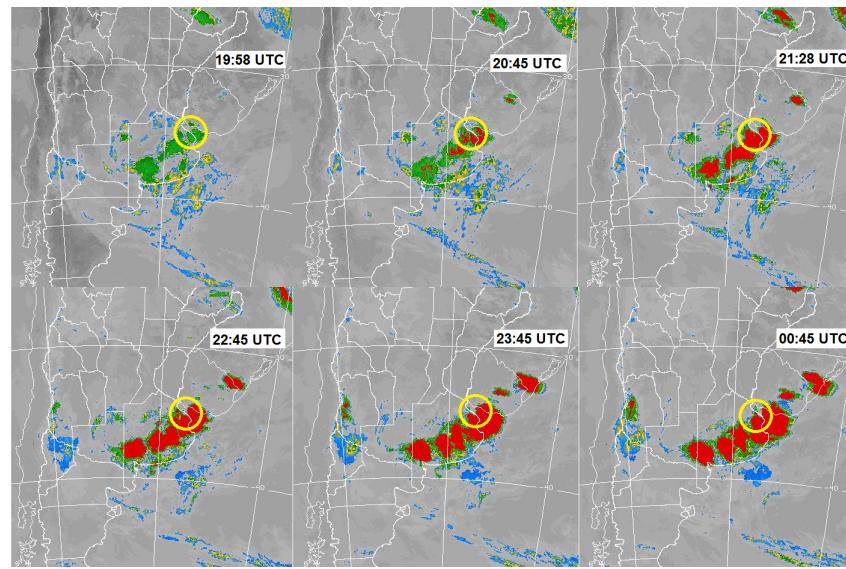


FIGURA 5.18: Temperatura de tope de nube sobre La Plata – GOES 12 – CONAE.

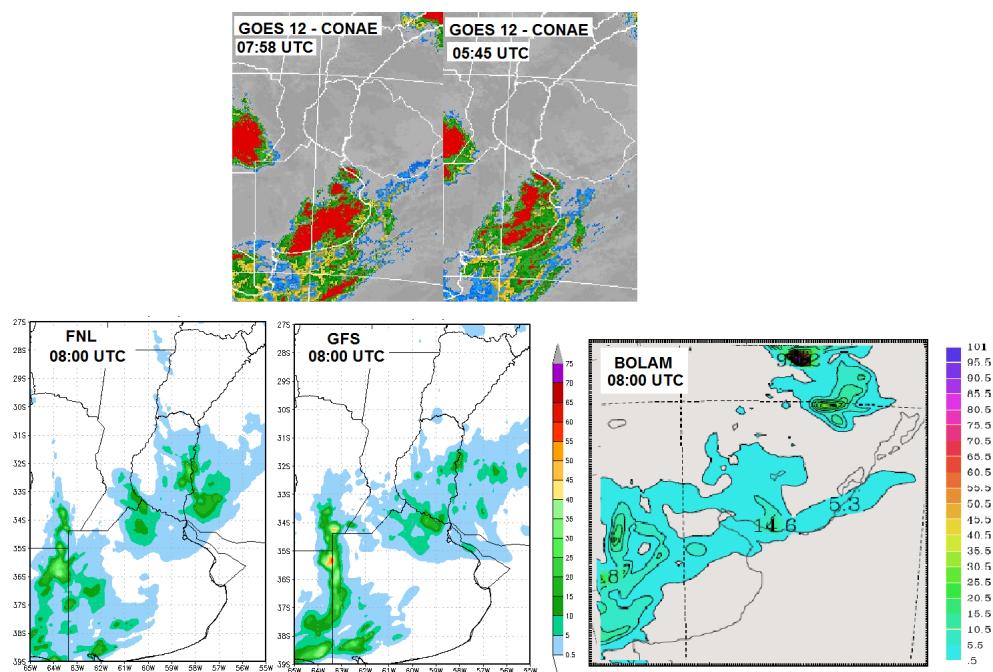


FIGURA 5.19: Comparación entre modelos e imágenes. Arriba: GOES 12-CONAE, abajo de izquierda a derecha: WRF-FNL, GFS-WRF, BOLAM.

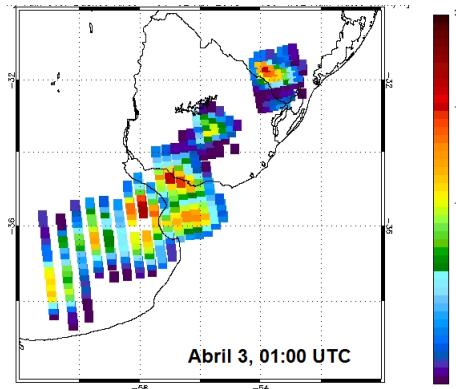


FIGURA 5.20: Estimación de precipitación del 183-WSL.

Se repite el mismo análisis para el evento ocurrido en la ciudad de La Plata. En este caso se cuenta con información de la precipitación calculada por el algoritmo 183-WSL a las 01:00 hs. UTC del día 3 de abril (figura 5.20). El algoritmo estimó precipitación con una tasa muy alta cerca de la ciudad de La Plata. La imagen muestra además que la precipitación se extiende desde el centro hacia la costa norte de la provincia de Buenos Aires.

Las simulaciones (ver figura 5.21) muestran el resultado de la precipitación acumulada desde las 22:00 hs. UTC hasta las 00:00 hs. UTC y como referencia se grafican las temperaturas de tope de nube de las horas 21:28 hs. y 23:45 hs. (fuente GOES 12–CONAE).

En este caso, los modelos parecen predecir mejor la distribución espacial de la precipitación, sin embargo WRF sigue prediciendo precipitación en la frontera de Entre Ríos y Uruguay.

En los casos de estudios tratados, el desempeño de los modelos fue diferente. Para los casos del año 2012 los modelos representaron en buen acuerdo la distribución espacial de la precipitación y su evolución temporal, mientras que para los eventos del año 2013, eventos que fueron más extremos, el desempeño de los modelos no fue suficiente en la descripción de los mismos. Más allá de estas comparaciones ambos modelos tienen la posibilidad de ajustar las parametrizaciones que involucren la producción de la precipitación y mejorar el desempeño en la predicción de esta clase de eventos. La búsqueda de estas parametrizaciones puede ser un tema de investigación a futuro.

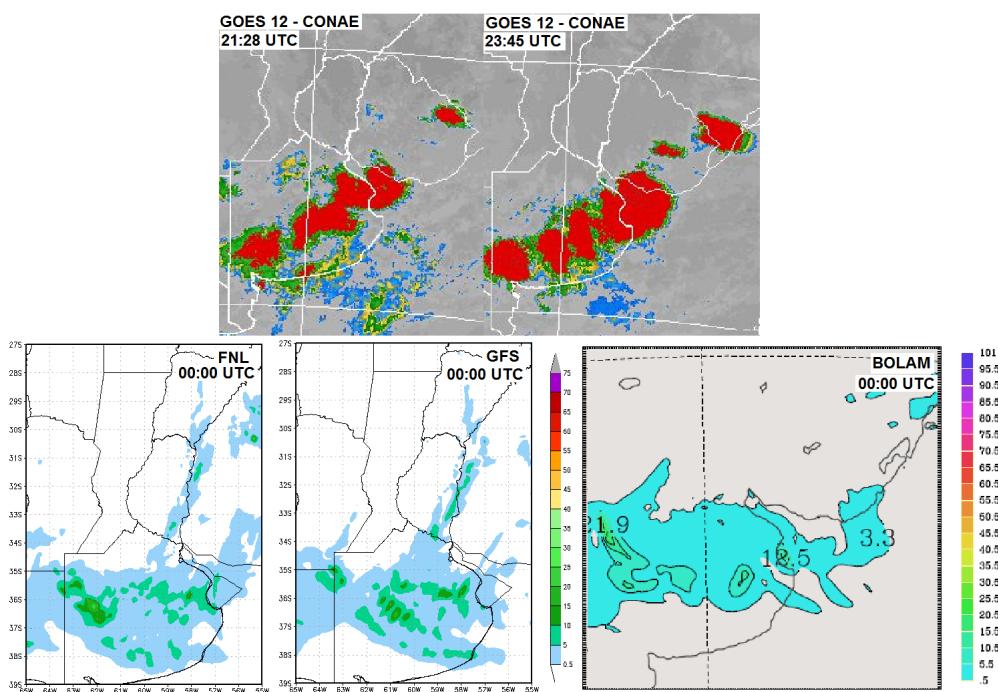


FIGURA 5.21: Comparación entre modelos e imágenes. Arriba GOES 12-CONAE, abajo de izquierda a derecha: WRF-FNL, GFS-WRF, BOLAM.

Capítulo 6

Aplicaciones de productos generados con WRF

6.1. Introducción

En este capítulo se describirán trabajos en los cuales se utilizan o se utilizaron variables meteorológicas generadas por el modelo GFS–WRF cuya operatividad se realizó en el transcurso de esta tesis. Los correspondientes trabajos se enumeran a continuación.

- Tesis de Maestría: *Construcción de mapas de combustibles para la prevención y el manejo de incendios en Argentina*. Realizada por la Bióloga Laura Zalazar.
- Tesis de Maestría: *Obtención de mapas de calidad de aire, a través de la implementación y primera aplicación del modelo de transporte químico CHIMERE sobre Argentina*. Realizada por la Lic. María Fernanda García Ferreyra.
- Tesis de Maestría: *Índice de Riesgo de Incendio: Implementación para las sierras de Córdoba*. Realizada por el Biólogo Gonzalo Quiroga
- Informe para CONAE: *Provisión de mapas de intensidad y dirección de vientos para informe ambiental con motivo del lanzamiento del vector VEX2 de CONAE*.

6.2. Construcción de mapas de combustibles para la prevención y el manejo de incendios en Argentina

Uno de los objetivos de esta tesis es construir mapas de combustibles de ciertas áreas de importancia en la problemática de incendios para la Argentina como lo es la Reserva

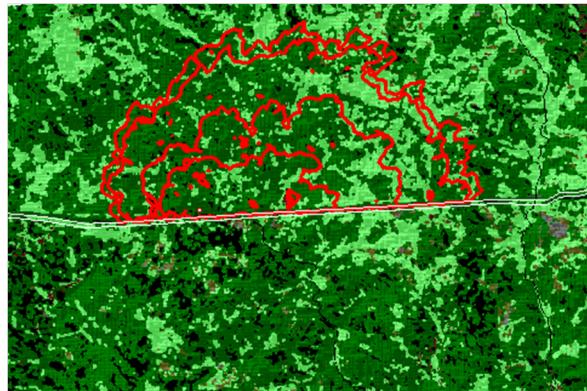


FIGURA 6.1: Simulación realizada con el modelo FARSITE: propagación del frente de fuego a distintos tiempos.

Nacional y Parque Nacional Quebrada del Condorito. La evaluación de la construcción de estos mapas se realizó mediante la comparación de simulaciones de incendios e incendios reales. Las principales características a evaluar fueron: tamaño y forma del área quemada, duración del incendio y otros datos relevantes sobre el comportamiento del fuego.

Las simulaciones se llevaron a cabo con el software FARSITE [39], el cual permite la entrada de datos meteorológicos como dirección e intensidad del viento, humedad, temperatura, precipitación y cobertura nubosa. Luego, conociendo la localización y la fecha del evento, se simularon las condiciones climáticas con el WRF generando las variables citadas en archivos con formato .txt. Estos datos fueron reescritos en un arreglo mediante el cual pudieron ser ingresados al FARSITE para la posterior simulación del incendio. La figura 6.1 muestra una imagen producto de la simulación de la propagación del incendio a diferentes tiempos (líneas rojas) influida por el combustible y las variables meteorológicas.

6.3. Obtención de mapas de calidad de aire, a través de la implementación y primera aplicación del modelo de transporte químico CHIMERE sobre Argentina

El objetivo principal de esta tesis radica en la obtención de mapas de distribución espacial de ozono y especies químicas precursoras de ozono troposférico sobre el territorio argentino. Para la realización del mismo se utilizaron: (a) un modelo de transporte químico llamado CHIMERE, (b) un inventario global de emisiones antropogénicas llamado EDGAR y, (c) las salidas de datos meteorológicos del modelo WRF.

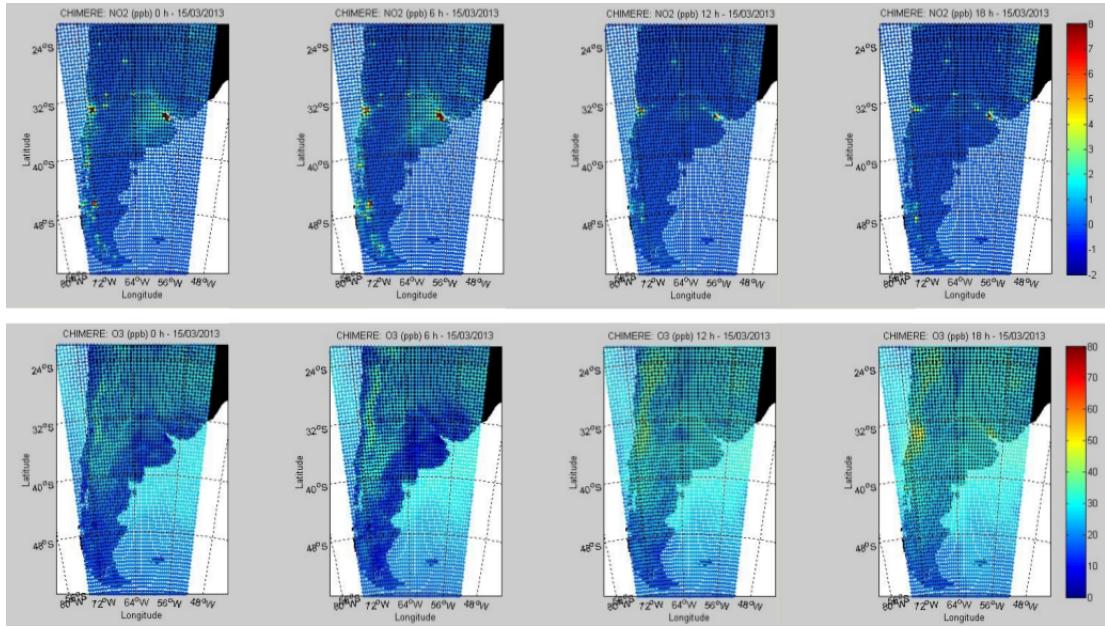


FIGURA 6.2: Mapas de concentraciones de contaminantes atmosféricos.

En este caso la salida de los datos meteorológicos provistos por el WRF, con formato NetCDF, son directamente acoplados al modelo CHIMERE. Luego se instaló y configuró el modelo WRF en un servidor exclusivo para su uso en conjunto con el modelo CHIMERE. Todo este sistema estará próximamente operativo y la estructura básica de la operatividad puede tomarse de esta tesis.

Un ejemplo de los mapas producidos por todo el sistema puede verse en la figura 6.2. Los mapas describen, en la parte superior, la evolución temporal de la concentración de NO₂ (dióxido de nitrógeno), vinculada con las emisiones de combustibles fósiles. En la parte inferior se muestra la aparición, a distintas horas, de ozono troposférico debido a la oxidación de los óxidos de nitrógeno.

6.4. Índice de Riesgo de Incendio: implementación para las sierras de Córdoba

El objetivo general de esta tesis es el de generar una aplicación para la emisión diaria de mapas de Índice de Riesgo de Incendio (IRI) para la zona de las sierras de Córdoba, integrando tanto características físicas como elementos antrópicos. De las múltiples entradas requeridas para la elaboración del IRI, las relacionadas con las salidas del modelo WRF fueron: humedad relativa mínima y máxima diaria, temperatura a 2 metros mínima y máxima diaria, e intensidad media diaria del viento a 2 metros. El formato requerido de salida de cada una de estas variables climáticas fue el GeoTIFF.

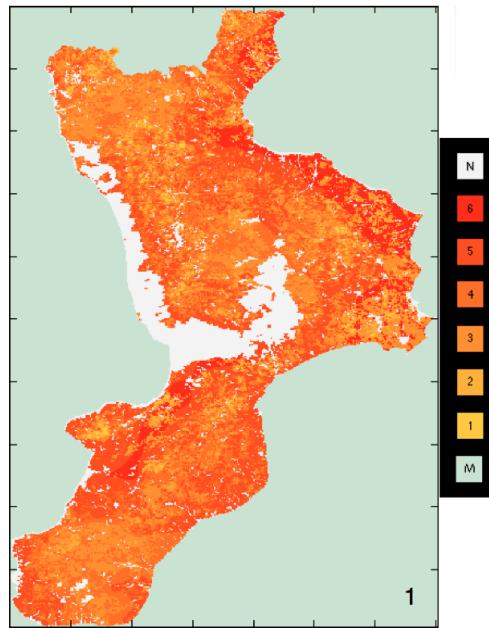


FIGURA 6.3: Mapa de Indice de Riesgo de Incendio.

Debido a que el mapa de IRI para las sierras de Córdoba se encuentra en construcción, se muestra como ejemplo un mapa de IRI realizado sobre Europa por el mismo autor de la tesis citada (ver figura 6.3). En este mapa se muestra una clasificación de los distintos niveles de riesgo de 1 a 6, M indica Mar y N indica Nube.

6.5. Provisión de mapas de intensidad y dirección de vientos

A pedido de la Gerencia de Relaciones Institucionales de CONAE se generó un requerimiento de mapas de predicción de intensidad y dirección del viento para un informe ambiental con motivo del lanzamiento del vector VEX2. Se colaboró mediante imágenes, archivos .GeoTIFF y archivos .txt. Una imagen de ejemplo puede verse a continuación en la figura 6.4.

Los trabajos anteriormente descriptos ponen en evidencia, la necesidad de contar con datos meteorológicos y la utilidad de la presente tesis como solución a esa necesidad.

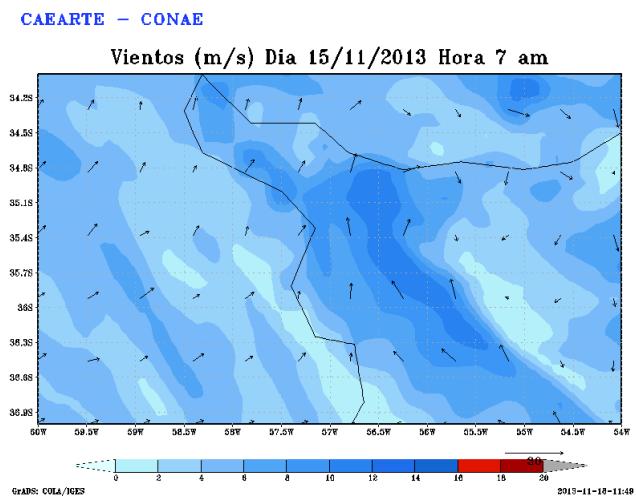


FIGURA 6.4: Mapa de vientos.

Capítulo 7

Publicación de datos

7.1. Introducción

Las variables, obtenibles y con potencial utilización por parte de los usuarios, generadas por la automatización del modelo GFS–WRF podrían ser de amplio alcance si la información se publicará en un servidor web. Además una plataforma con estas características daría la posibilidad de una interacción bidireccional entre el usuario y el generador de la información, haciendo sustentable y escalable el modelo como proyecto. Por esta razón y gracias a la invaluable colaboración de la co-directora de la presente tesis, Mg. Estefanía De Elía, se encaró esta etapa final del trabajo.

7.1.1. Arquitectura del sistema

Para lograr el objetivo de la publicación de los productos, se anexó un nuevo módulo al diagrama de flujo del pronóstico del tiempo. La implementación de este nuevo módulo fue realizada con la librería JavaScript–jQuery, HTLM y CSS.

JavaScript es un lenguaje de programación interpretado orientado a objetos, HTML (HyperText Markup Language) hace referencia al lenguaje de marcado para la elaboración de páginas web. Para simplificar la manera de interactuar con los documentos HTML se utiliza jQuery. CSS (Cascading Style Sheets) es un lenguaje de hojas de estilos usado para describir la presentación semántica (el aspecto y formato) de un documento escrito en lenguaje de marcas.

La figura 7.1 muestra el diagrama de flujo final de todo el proceso de automatización.

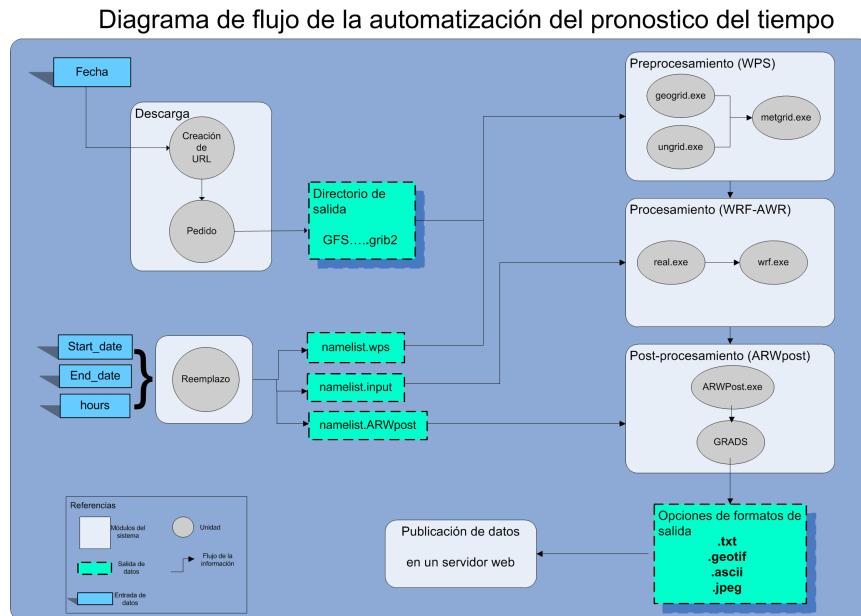


FIGURA 7.1: Diagrama de flujo completo de la automatización del pronóstico del tiempo.

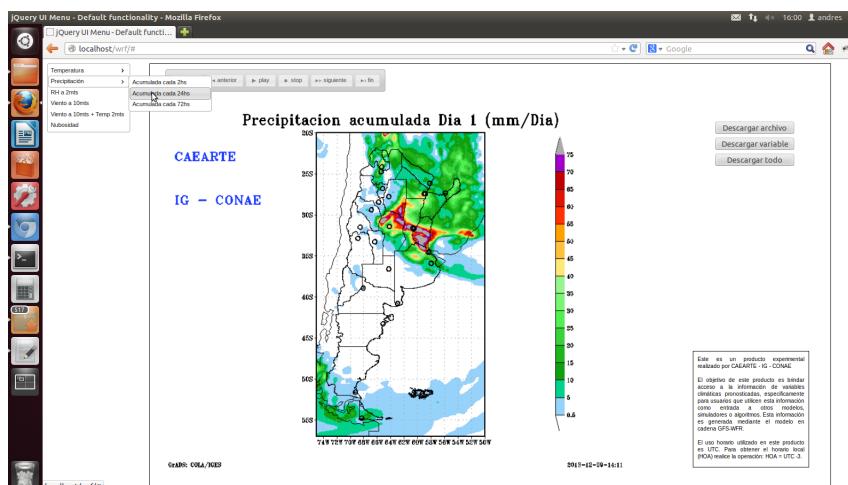


FIGURA 7.2: impresión de pantalla de la plataforma web desarrollada.

7.1.2. Interfaz

La plataforma web para la visualización y descarga de datos se encuentra actualmente montada en un servidor interno de CONAE-IG y sólo los usuarios de dicha institución pueden acceder a la misma.

Una impresión de pantalla, de la primera versión de la web, se muestra en la figura 7.2.

7.1.2.1. Descripción de opciones del menú de variables

En la esquina superior izquierda, se encuentra el menú de opciones de variables a observar. En este menú el usuario puede optar por las variables siguientes:

- Temperatura a 2 m. Esta variable corresponde a la temperatura ambiente a 2 m del nivel del suelo.
 - Temperatura a 2 m cada 2 hs. Esta opción grafica la temperatura a 2 m cada 2 hs. durante las 72 hs. de pronóstico.
 - Temperaturas máximas. En esta opción se obtienen las temperaturas a 2 m máximas para cada uno de los 3 días de pronóstico.
 - Temperaturas mínimas: En esta opción se obtienen las temperaturas a 2 m mínimas para cada uno de los 3 días de pronóstico.
- Precipitación. Esta variable corresponde a la precipitación acumulada.
 - Precipitación acumulada cada 2 hs. Esta opción grafica la precipitación acumulada cada 2 hs. durante las 72 hs. de pronóstico.
 - Precipitación acumulada diaria. En esta opción se obtiene la precipitación acumulada para cada uno de los días de pronóstico.
 - Precipitación acumulada en 3 días: En esta opción se obtiene la precipitación acumulada para todo el periodo pronosticado.
- RH a 2 m. Esta variable corresponde a la humedad relativa a 2 m del nivel del suelo. Aquí se grafica la RH a 2 m cada 2 hs. durante las 72 hs. de pronóstico.
- Viento a 10 m. Esta variable corresponde al viento a 10 m del nivel del suelo. Aquí se grafican la intensidad y dirección del viento a 10 m cada 2 hs. durante las 72 hs. de pronóstico.
- Viento a 10 m + temperatura a 2 m. Esta opción del menú corresponde a gráficos de superposición entre la temperatura a 2 m y la dirección del viento a 10 m. Los gráficos se dan cada 2 hs. para las 72 hs. de pronóstico.
- Nubosidad. Esta opción corresponde a un porcentaje de nubosidad desarrollado en altura. Este producto está pensado sólo con la idea de identificar nubosidad con desarrollo vertical importante, típicos de tomentas. Los gráficos se dan cada 2 hs. para las 72 hs. de pronóstico.

7.1.2.2. Descripción del menú de desplazamiento

El menú de desplazamiento consta de varios botones que permiten, una vez seleccionada una variable del menú de variables, desplazarse de un tiempo a otro. Es decir, para aquellas variables que se calculen cada 2 hs. por ejemplo, el menú de desplazamiento permite visualizar uno por uno cada gráfico generado. Además, el botón *play* permite hacer el avance tipo animación.

7.1.2.3. Descripción de los botones de descarga

En el margen superior derecho se encuentran tres botones de descarga, los cuales se describen a continuación.

- Descargar archivo. Este botón permite la descarga de un archivo comprimido (.zip) conteniendo una imagen .png, un archivo .GeoTIFF, un archivo .txt de la variable seleccionada al tiempo seleccionado, más dos archivos .txt correspondientes a la longitud y latitud del dominio completo.
- Descargar variable. Este botón permite la descarga de un archivo comprimido (.zip) conteniendo una imagen .png, un archivo .GeoTIFF, un archivo .txt de la variable seleccionada para todos los tiempos disponibles, más dos archivos .txt correspondientes a la longitud y latitud del dominio completo.
- Descargar todo. Este botón permite la descarga de un archivo comprimido (.zip) conteniendo una imagen .png, un archivo .GeoTIFF, un archivo .txt de todas las variables y para todos los tiempos disponibles, más dos archivos .txt correspondientes a la longitud y latitud del dominio completo.

7.1.2.4. Elección de las variables publicadas

La elección de las variables publicadas está basada en la utilidad de éstas para los trabajos publicados en el capítulo 6 y algunas otras de interés potencial. Sin embargo, cabe aclarar que este esquema no es definitivo. Más bien, es de esperar que a medida que existan nuevos requerimientos, nuevas productos se sumen a esta plataforma. Por otro lado la lista de variables disponibles de la salida directa del modelo GFS–WRF puede verse en el apéndice A.

Capítulo 8

Conclusiones y discusión

Los LAMs se han vuelto un componente crítico en cualquier sistema de alerta temprana, siendo los LAMs la unión entre los modelos de predicción global y cualquier otro modelo cuyas componentes requieran de información climática regional [40, 41].

Con la concreción de esta tesis se lograron los primeros pasos para la realización de un centro operativo capaz de brindar información de predicción meteorológica para ser acoplada a diversos sistema de alerta temprana.

Esta tesis demandó un proceso de largo aprendizaje sobre los conceptos que engloban al modelado numérico en general, y en particular los modelos numéricos de predicción del clima. También fue necesario el aprendizaje de múltiples herramientas computacionales de programación, de software específico de índole meteorológico, de análisis estadístico y de sistemas de información geográfica.

Todos los resultados producidos en esta tesis fueron íntegramente realizados con software libre, dando apoyo a la iniciativa de desarrollo de los mismos.

Se recopiló la información necesaria para la obtención de datos meteorológicos globales. El conjunto de datos meteorológicos elegido fue el GFS de 0.5×0.5 ya que es el producto con mayor resolución espacial y periodicidad en el análisis. Sin embargo hay otros productos disponibles de menor resolución o menor periodicidad, pero con otras características como ensembles, ensembles con corrección de error de precipitación, etc. Es importante destacar que toda esta información es libre, gratuita y de rápido acceso.

Se logró una correcta instalación y configuración del modelo WRF, creando un domino que contiene al territorio argentino, y un anidado con mayor resolución espacial horizontal contenido a la provincia de San Luis. De esta manera se pudo generar un pronóstico regional a dos diferentes escalas.

Para la interpretación de las salidas de los datos del WRF fue necesario instalar un software intérprete entre WRF y el graficador GrADS. Para lograr salidas en distintos formatos fue necesario aprender el lenguaje propio de GrADS para luego generar los scripts que realizan las acciones de manera automática. Los formatos de salida logrados a partir de la programación en GrADS fueron gráficos en .jpg, en formato de texto .txt y en imágenes georreferenciadas GeoTIFF. Estos formatos fueron producidos con el objetivo de ser útiles para aplicarlos en otros modelos, algoritmos o trabajos en general.

El objetivo principal de esta tesis (poner operativo un modelo meteorológico) fue exitosamente logrado. Actualmente se cuenta con la completa automatización de todos los procesos involucrados proporcionando a diario un pronóstico de 72 hs. de las variables más requeridas en diferentes formatos, para los potenciales usuarios sobre todo el territorio argentino.

Se recopiló información para establecer estadísticos representativos para la validación de las variables de salida del modelo y se realizó la misma mediante la comparación de los datos de las simulaciones con datos registrados en las estaciones meteorológicas. Si bien el periodo de comparación es muy acotado para una completa validación (las variables validadas son sólo temperatura y precipitación) se logró identificar regiones de diferentes comportamientos para los errores absolutos de la predicción de la temperatura, es decir, se identificaron regiones donde el desempeño del modelo es mejor o peor.

En el caso de la precipitación se observó que el modelo tiende a la generación de muchos falsos positivos en comparación a los aciertos. Por otro lado la generación de falsos negativos es mínima. En la precipitación no se identificaron zonas de mejor o peor desempeño del modelo, con lo cual la performance del modelo depende principalmente de la variable en estudio y la zona geográfica.

Para la variable temperatura se determinó que el error absoluto medio en la predicción para ambos dominios considerado aumenta con el día de pronóstico. Se demostró que la utilización de los modelos como sustituto de la técnica de Kriging para la predicción espacial es posible. Cambiando las condiciones iniciales del GFS por el FNL el resultado de las predicciones espaciales es ligeramente mejor.

Se comparó cualitativamente el desempeño de los modelos acoplados GFS–BOLAM y GFS–WRF en casos de estudio significativos para nuestro país como lo fueron las inundaciones de Buenos Aires en el 2012, Buenos Aires y La Plata 2013. Para los casos del año 2012 los modelos representaron en buen acuerdo la distribución espacial de la precipitación y su evolución temporal, mientras que para los eventos del año 2013, eventos que fueron más extremos, el desempeño de los modelos no fue suficiente en la descripción de los mismos. Este último evento es un caso muy interesante para analizar por su

desarrollo atípico y desafiante para la predicción de los NWP. Con todo este análisis se logró el conocimiento de las virtudes y limitaciones de los resultados del WRF.

La necesidad planteada sobre la dificultad para obtener datos meteorológicos del presente o del pasado y la no existencia de datos de predicción que alimenten diversos modelos y algoritmos cuyos resultados dependan de esta información, queda explícita en los trabajos de tesis de la AEARTE explicados en el capítulo 6, donde la solución encontrada fue: para la generación de datos del pasado, el uso del modelo acoplado FNL–WRF y para dato de predicciones el modelo acoplado GFS–WRF. Esto fundamenta sólidamente el objetivo final de esta tesis.

Como cierre para todo el trabajo desarrollado en esta tesis y como una visión de proyecto, se logró la disponibilidad de los datos mediante su publicación en un servidor web. La descarga de datos desde esta página es simple y directa. Se proyecta además la apertura de la misma para usuarios externos a CONAE–IG.

Si bien esta acción queda a voluntad de las autoridades de esta institución, es el deseo del autor de esta tesis que los productos generados a partir de los conocimientos adquiridos gracias a la educación pública y gratuita, financiada por todo el pueblo argentino, sean de libre acceso y para beneficio de todos.

8.1. Visión general a futuro

Esta tesis tiene el potencial de ser el disparador de un proyecto integrador que vincule, a través de diferentes canales, tres grandes sectores.

El modelo WRF (Weather Research and Forecasting) como su nombre lo indica, combina la posibilidad de utilizarlo para la investigación tanto como para generar pronósticos operativos. Esta flexibilidad permite la interacción entre un centro operativo y una institución académica, siendo el rol de esta última la de investigar y asesorar sobre los últimos avances y mejoras del modelo. El rol del centro operativo es poner al servicio los últimos avances y generar nuevas problemáticas a solucionar.

Estas nuevas problemáticas nacen de los requerimientos de los usuarios finales, tanto internos o externos al centro operativo, de la información básica o de los productos elaborados por este último.

Finalmente la posibilidad de tener un centro operativo de pronóstico del tiempo en una institución como CONAE, permite elaborar nuevas estrategias para la mejora de la predicción. Como se dijo en la sección 2.4 la información satelital es fundamental para

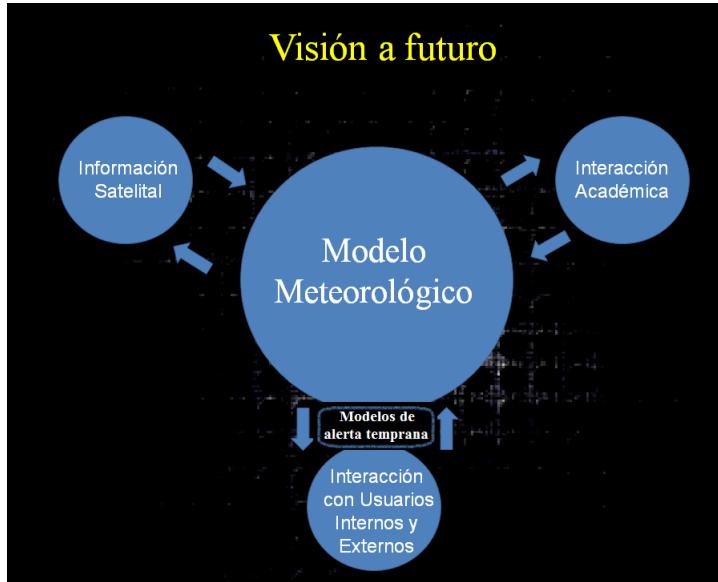


FIGURA 8.1: Esquema de vinculaciones estratégicas para la proyección de un centro operativo de pronóstico del tiempo.

el buen desempeño de los pronósticos, con lo cual futuras misiones satelitales podrían contemplar instrumentos adecuados para incrementar la efectividad de los mismos.

La figura 8.1 intenta simplificar esquemáticamente las interacciones entre las distintas partes vinculadas.

8.1.1. Líneas específicas a futuro

Las condiciones iniciales de los pronósticos son de vital importancia para el desempeño del mismo. Existen diferentes productos, generados por el NCEP, que podrían ser evaluados y comparados con el usado actualmente, sobre todo los productos globales con correcciones en la precipitación y los ensambles.

Se podría explorar la utilización de dominios de mayor resolución y verificar si el uso de éstos hace más eficiente el pronóstico teniendo en cuenta el costo computacional, y además considerar la creación de varios dominios para describir las distintas regiones de nuestro país.

Las opciones de parametrizaciones y la sensibilidad de la respuesta del modelo (a través de la predicción de distintas variables) al cambio de éstas podría ser analizado. Esto conduciría a conocer las parametrizaciones que mejor representan una variable, que es fundamental para la utilización en otros modelos. Por ejemplo la precipitación para un modelo hidrológico, el viento para un modelo de transporte químico, etc.

La puesta operativa de un ensamblaje de parametrizaciones que represente de la mejor manera un conjunto de variables elegidas sobre todo el territorio argentino debería ser considerado. Para esto primeramente es necesario encontrar la combinación de parametrizaciones más significativa, tomando luego un valor representativo de éstas.

Validaciones con períodos mayores y en distintas épocas del año debería impulsar un estudio más profundo, como así también la validación comparando con variables derivadas de datos satelitales. Un análisis de eventos extremos serviría para identificar los mecanismos responsables de los mismos y así poder detectarlos con anticipación.

La adaptación de la plataforma web, desarrollada a medida que se produzca el intercambio de información con actuales y potenciales usuarios, mantendría siempre el ideal de responder a nuevos requerimientos de los mismos.

Apéndice A

Archivos

A.1. *namelist.wps*

```
&share
  wrf_core = 'ARW',
  max_dom = 2,
  start_date = 'START_DATE', 'START_DATE',
  end_date = 'END_DATE', 'END_DATE',
  interval_seconds = 10800
  io_form_geogrid = 2,
/

&geogrid
  parent_id      = 1,    1,
  parent_grid_ratio = 1,    3,
  i_parent_start = 1,    37,
  j_parent_start = 1,    83,
  e_we           = 100,   61,
  e_sn           = 150,   91,
  geog_data_res = '2m', '30s',
  dx = 30000,
  dy = 30000,
  map_proj = 'lambert',
  ref_lat     = -38.5,
  ref_lon     = -63.5,
  truelat1   = -60.0,
  truelat2   = -30.0,
  stand_lon  = -63.5,
  geog_data_path = 'GEOG_DATA',
/

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

&metgrid
```

```
fg_name = 'FILE'  
io_form_metgrid = 2,  
/

---


```

A.2. *namelist.input*

```

&time_control
run_days = 0,
run_hours = RUN_HOURS,
run_minutes = 0,
run_seconds = 0,
start_year = START_YEAR, START_YEAR
start_month = START_MONTH, START_MONTH
start_day = START_DAY, START_DAY
start_hour = START_HOUR, START_HOUR
start_minute = START_MINUTE, START_MINUTE
start_second = START_SECOND, START_SECOND
end_year = END_YEAR, END_YEAR
end_month = END_MONTH, END_MONTH
end_day = END_DAY, END_DAY
end_hour = END_HOUR, END_HOUR
end_minute = END_MINUTE, END_MINUTE
end_second = END_SECOND, END_SECOND
interval_seconds = 10800
input_from_file = .true.,.False.,.true.,
history_interval = 60, 60, 60,
frames_per_outfile = 1000, 1000, 1000,
restart = .false.,
restart_interval = 5000,
io_form_history = 2
io_form_restart = 2
io_form_input = 2
io_form_boundary = 2
debug_level = 0
/

&domains
time_step = 180,
time_step_fract_num = 0,
time_step_fract_den = 1,
max_dom = 2,
e_we = 100, 61,
e_sn = 150, 91,
e_vert = 28, 28, 28,
p_top_requested = 5000,
num_metgrid_levels = 48,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx = 30000, 10000, 3333.33,
dy = 30000, 10000, 3333.33,
grid_id = 1, 2, 3,
parent_id = 1, 1, 2,
i_parent_start = 1, 37, 30,
j_parent_start = 1, 83, 30,
parent_grid_ratio = 1, 3, 3,
parent_time_step_ratio = 1, 3, 3,
feedback = 1,
smooth_option = 0
/

```

```

&physics
mp_physics = 4,      2,      2,
ra_lw_physics = 1,      1,      1,
ra_sw_physics = 1,      1,      1,
radt = 30,      30,      30,
sf_sfclay_physics = 1,      1,      1,
sf_surface_physics = 2,      2,      2,
bl_pbl_physics = 1,      1,      1,
bldt = 0,      0,      0,
cu_physics = 5,      5,      0,
cudt = 5,      5,      5,
isfflx = 1,
ifsnow = 1,
icloud = 1,
surface_input_source = 1,
num_soil_layers = 4,
sf_urban_physics = 0,      0,      0,
/

&fdda
/


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


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


&grib2
/


&namelist_quilt
nio_tasks_per_group = 0,
nio_groups = 1,
/

```

A.3. *namelist.ARWpost*

```

&datetime
start_date = 'start_date',
end_date   = 'end_date',
interval_seconds = 3600,
tacc = 0,
debug_level = 0,
/
&io
input_root_name = '/home/andres/WRF/AWR/WRFV3/test/em_real/wrfout',
output_root_name = './test'
plot = 'all_list'
fields = 'height,pressure,tk,tc,clfr,rh,rh2,wdir,wspd,ws10,wd10'
mercator_defs = .true.
/
split_output = .true.
frames_per_outfile = 2

plot = 'all'
plot = 'list'
plot = 'all_list'
! Below is a list of all available diagnostics
fields = 'height,geopt,theta,tc,tk,td,td2,rh,rh2,umet,vmet,pressure,
          u10m,v10m,wdir,wspd,wd10,ws10,slp,mcape,mcin,lcl,lfc,cape,
          cin,dbz,max_dbz,clfr'

&interp
interp_method = 0,
interp_levels = 1000.,950.,900.,850.,800.,750.,700.,650.,600.,550.,
               500.,450.,400.,350.,300.,250.,200.,150.,100.,
/
extrapolate = .true.

interp_method = 0,      ! 0 is model levels,
                  ! -1 is nice height levels,
                  ! 1 is user specified pressure/height

interp_levels = 1000.,950.,900.,850.,800.,750.,700.,650.,600.,550.,
               500.,450.,400.,350.,300.,250.,200.,150.,100.,
interp_levels = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00, 6.00,
               7.00, 8.00, 9.00, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 14.0, 15.0,
               16.0, 17.0, 18.0, 19.0, 20.0,

```

A.4. Ejemplo de script en GrADS

```
'clear'
'open test.ctl'
'set lat -57 -20'
'set lon -75 -50'

'set z 1'

*****temperatura y viento
'set t 1'
'clear'
'set gxout Shaded'
'rgbset'
'set clevs -10 -5 0 5 10 15 20 25 30 35'
'set ccols 47 44 42 21 22 23 24 25 26 27'
'd tc'
'draw shp 008b_limites_provinciales_linea'
'cbar'
'set gxout vector'
"set ccolor 1"
"set arrscl 1 20"
'd skip(u,12);v'
'draw title Temperatura (C) y Vientos (Km/h) 00UTC dia 1'
"set display color white"
'printim V_T1.png'
```

A.5. Variables de salida de WRF

```

char Times(Time, DateStrLen) ;
float LU_INDEX(Time, south_north, west_east) ;
    LU_INDEX:FieldType = 104 ;
    LU_INDEX:MemoryOrder = "XY" ;
    LU_INDEX:description = "LAND USE CATEGORY" ;
    LU_INDEX:units = "" ;
    LU_INDEX:stagger = "" ;
    LU_INDEX:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float ZNU(Time, bottom_top) ;
    ZNU:FieldType = 104 ;
    ZNU:MemoryOrder = "Z" ;
    ZNU:description = "eta values on half (mass) levels" ;
    ZNU:units = "" ;
    ZNU:stagger = "" ;
float ZNW(Time, bottom_top_stag) ;
    ZNW:FieldType = 104 ;
    ZNW:MemoryOrder = "Z" ;
    ZNW:description = "eta values on full (w) levels" ;
    ZNW:units = "" ;
    ZNW:stagger = "Z" ;
float ZS(Time, soil_layers_stag) ;
    ZS:FieldType = 104 ;
    ZS:MemoryOrder = "Z" ;
    ZS:description = "DEPTHS OF CENTERS OF SOIL LAYERS" ;
    ZS:units = "m" ;
    ZS:stagger = "Z" ;
float DZS(Time, soil_layers_stag) ;
    DZS:FieldType = 104 ;
    DZS:MemoryOrder = "Z" ;
    DZS:description = "THICKNESSES OF SOIL LAYERS" ;
    DZS:units = "m" ;
    DZS:stagger = "Z" ;
float U(Time, bottom_top, south_north, west_east_stag) ;
    U:FieldType = 104 ;
    U:MemoryOrder = "XYZ" ;
    U:description = "x-wind component" ;
    U:units = "m s-1" ;
    U:stagger = "X" ;
    U:coordinates = "XLONG_U XLAT_U" ;
float V(Time, bottom_top, south_north_stag, west_east) ;
    V:FieldType = 104 ;
    V:MemoryOrder = "XYZ" ;
    V:description = "y-wind component" ;
    V:units = "m s-1" ;
    V:stagger = "Y" ;
    V:coordinates = "XLONG_V XLAT_V" ;
float W(Time, bottom_top_stag, south_north, west_east) ;
    W:FieldType = 104 ;
    W:MemoryOrder = "XYZ" ;
    W:description = "z-wind component" ;
    W:units = "m s-1" ;
    W:stagger = "Z" ;
    W:coordinates = "XLONG XLAT" ;

```

```
float PH(Time, bottom_top_stag, south_north, west_east) ;
    PH:FieldType = 104 ;
    PH:MemoryOrder = "XYZ" ;
    PH:description = "perturbation geopotential" ;
    PH:units = "m2 s-2" ;
    PH:stagger = "Z" ;
    PH:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float PHB(Time, bottom_top_stag, south_north, west_east) ;
    PHB:FieldType = 104 ;
    PHB:MemoryOrder = "XYZ" ;
    PHB:description = "base-state geopotential" ;
    PHB:units = "m2 s-2" ;
    PHB:stagger = "Z" ;
    PHB:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float T(Time, bottom_top, south_north, west_east) ;
    T:FieldType = 104 ;
    T:MemoryOrder = "XYZ" ;
    T:description = "perturbation potential temperature (theta-t0)" ;
    T:units = "K" ;
    T:stagger = "" ;
    T:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float HFX_FORCE(Time) ;
    HFX_FORCE:FieldType = 104 ;
    HFX_FORCE:MemoryOrder = "0" ;
    HFX_FORCE:description = "SCM ideal surface sensible heat flux" ;
    HFX_FORCE:units = "W m-2" ;
    HFX_FORCE:stagger = "" ;
float LH_FORCE(Time) ;
    LH_FORCE:FieldType = 104 ;
    LH_FORCE:MemoryOrder = "0" ;
    LH_FORCE:description = "SCM ideal surface latent heat flux" ;
    LH_FORCE:units = "W m-2" ;
    LH_FORCE:stagger = "" ;
float TSK_FORCE(Time) ;
    TSK_FORCE:FieldType = 104 ;
    TSK_FORCE:MemoryOrder = "0" ;
    TSK_FORCE:description = "SCM ideal surface skin temperature" ;
    TSK_FORCE:units = "W m-2" ;
    TSK_FORCE:stagger = "" ;
float HFX_FORCE_TEND(Time) ;
    HFX_FORCE_TEND:FieldType = 104 ;
    HFX_FORCE_TEND:MemoryOrder = "0" ;
    HFX_FORCE_TEND:description = "SCM ideal surface sensible
                                    heat flux tendency" ;
    HFX_FORCE_TEND:units = "W m-2 s-1" ;
    HFX_FORCE_TEND:stagger = "" ;
float LH_FORCE_TEND(Time) ;
    LH_FORCE_TEND:FieldType = 104 ;
    LH_FORCE_TEND:MemoryOrder = "0" ;
    LH_FORCE_TEND:description = "SCM ideal surface latent heat
                                    flux tendency" ;
    LH_FORCE_TEND:units = "W m-2 s-1" ;
    LH_FORCE_TEND:stagger = "" ;
float TSK_FORCE(Time) ;
    TSK_FORCE:FieldType = 104 ;
```

```

TSK_FORCE:MemoryOrder = "0" ;
TSK_FORCE:description = "SCM ideal surface skin temperature" ;
TSK_FORCE:units = "W m-2" ;
TSK_FORCE:stagger = "" ;
float HFX_FORCE_TEND(Time) ;
    HFX_FORCE_TEND:FieldType = 104 ;
    HFX_FORCE_TEND:MemoryOrder = "0" ;
    HFX_FORCE_TEND:description = "SCM ideal surface sensible
                                    heat flux tendency" ;
    HFX_FORCE_TEND:units = "W m-2 s-1" ;
    HFX_FORCE_TEND:stagger = "" ;
float LH_FORCE_TEND(Time) ;
    LH_FORCE_TEND:FieldType = 104 ;
    LH_FORCE_TEND:MemoryOrder = "0" ;
    LH_FORCE_TEND:description = "SCM ideal surface latent heat
                                    flux tendency" ;
    LH_FORCE_TEND:units = "W m-2 s-1" ;
    LH_FORCE_TEND:stagger = "" ;
float TSK_FORCE_TEND(Time) ;
    TSK_FORCE_TEND:FieldType = 104 ;
    TSK_FORCE_TEND:MemoryOrder = "0" ;
    TSK_FORCE_TEND:description = "SCM ideal surface skin
                                    temperature tendency" ;
    TSK_FORCE_TEND:units = "W m-2 s-1" ;
    TSK_FORCE_TEND:stagger = "" ;
float MU(Time, south_north, west_east) ;
    MU:FieldType = 104 ;
    MU:MemoryOrder = "XY" ;
    MU:description = "perturbation dry air mass in column" ;
    MU:units = "Pa" ;
    MU:stagger = "" ;
    MU:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float MUB(Time, south_north, west_east) ;
    MUB:FieldType = 104 ;
    MUB:MemoryOrder = "XY" ;
    MUB:description = "base state dry air mass in column" ;
    MUB:units = "Pa" ;
    MUB:stagger = "" ;
    MUB:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float NEST_POS(Time, south_north, west_east) ;
    NEST_POS:FieldType = 104 ;
    NEST_POS:MemoryOrder = "XY" ;
    NEST_POS:description = "-" ;
    NEST_POS:units = "-" ;
    NEST_POS:stagger = "" ;
    NEST_POS:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float P(Time, bottom_top, south_north, west_east) ;
    P:FieldType = 104 ;
    P:MemoryOrder = "XYZ" ;
    P:description = "perturbation pressure" ;
    P:units = "Pa" ;
    P:stagger = "" ;
    P:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float PB(Time, bottom_top, south_north, west_east) ;
    PB:FieldType = 104 ;

```

```
PB:MemoryOrder = "XYZ" ;
PB:description = "BASE STATE PRESSURE" ;
PB:units = "Pa" ;
PB:stagger = "" ;
PB:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float FNM(Time, bottom_top) ;
FNM:FieldType = 104 ;
FNM:MemoryOrder = "Z" ;
FNM:description = "upper weight for vertical stretching" ;
FNM:units = "" ;
FNM:stagger = "" ;
float FNP(Time, bottom_top) ;
FNP:FieldType = 104 ;
FNP:MemoryOrder = "Z" ;
FNP:description = "lower weight for vertical stretching" ;
FNP:units = "" ;
FNP:stagger = "" ;
float RDNW(Time, bottom_top) ;
RDNW:FieldType = 104 ;
RDNW:MemoryOrder = "Z" ;
RDNW:description = "inverse d(eta) values between
full (w) levels" ;
RDNW:units = "" ;
RDNW:stagger = "" ;
float RDN(Time, bottom_top) ;
RDN:FieldType = 104 ;
RDN:MemoryOrder = "Z" ;
RDN:description = "inverse d(eta) values between half
(mass) levels" ;
RDN:units = "" ;
RDN:stagger = "" ;
float DNW(Time, bottom_top) ;
DNW:FieldType = 104 ;
DNW:MemoryOrder = "Z" ;
DNW:description = "d(eta) values between full (w) levels" ;
DNW:units = "" ;
DNW:stagger = "" ;
float DN(Time, bottom_top) ;
DN:FieldType = 104 ;
DN:MemoryOrder = "Z" ;
DN:description = "d(eta) values between half (mass) levels" ;
DN:units = "" ;
DN:stagger = "" ;
float CFN(Time) ;
CFN:FieldType = 104 ;
CFN:MemoryOrder = "0" ;
CFN:description = "extrapolation constant" ;
CFN:units = "" ;
CFN:stagger = "" ;
float CFN1(Time) ;
CFN1:FieldType = 104 ;
CFN1:MemoryOrder = "0" ;
CFN1:description = "extrapolation constant" ;
CFN1:units = "" ;
CFN1:stagger = "" ;
```

```
float P_HYD(Time, bottom_top, south_north, west_east) ;
    P_HYD:FieldType = 104 ;
    P_HYD:MemoryOrder = "XYZ" ;
    P_HYD:description = "hydrostatic pressure" ;
    P_HYD:units = "Pa" ;
    P_HYD:stagger = "" ;
    P_HYD:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float Q2(Time, south_north, west_east) ;
    Q2:FieldType = 104 ;
    Q2:MemoryOrder = "XY" ;
    Q2:description = "QV at 2 M" ;
    Q2:units = "kg kg-1" ;
    Q2:stagger = "" ;
    Q2:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float T2(Time, south_north, west_east) ;
    T2:FieldType = 104 ;
    T2:MemoryOrder = "XY" ;
    T2:description = "TEMP at 2 M" ;
    T2:units = "K" ;
    T2:stagger = "" ;
    T2:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float TH2(Time, south_north, west_east) ;
    TH2:FieldType = 104 ;
    TH2:MemoryOrder = "XY" ;
    TH2:description = "POT TEMP at 2 M" ;
    TH2:units = "K" ;
    TH2:stagger = "" ;
    TH2:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float PSFC(Time, south_north, west_east) ;
    PSFC:FieldType = 104 ;
    PSFC:MemoryOrder = "XY" ;
    PSFC:description = "SFC PRESSURE" ;
    PSFC:units = "Pa" ;
    PSFC:stagger = "" ;
    PSFC:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float U10(Time, south_north, west_east) ;
    U10:FieldType = 104 ;
    U10:MemoryOrder = "XY" ;
    U10:description = "U at 10 M" ;
    U10:units = "m s-1" ;
    U10:stagger = "" ;
    U10:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float V10(Time, south_north, west_east) ;
    V10:FieldType = 104 ;
    V10:MemoryOrder = "XY" ;
    V10:description = "V at 10 M" ;
    V10:units = "m s-1" ;
    V10:stagger = "" ;
    V10:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float RDX(Time) ;
    RDX:FieldType = 104 ;
    RDX:MemoryOrder = "O" ;
    RDX:description = "INVERSE X GRID LENGTH" ;
    RDX:units = "" ;
    RDX:stagger = "" ;
```

```
float RDY(Time) ;
    RDY:FieldType = 104 ;
    RDY:MemoryOrder = "0" ;
    RDY:description = "INVERSE Y GRID LENGTH" ;
    RDY:units = "" ;
    RDY:stagger = "" ;
float RESM(Time) ;
    RESM:FieldType = 104 ;
    RESM:MemoryOrder = "0" ;
    RESM:description = "TIME WEIGHT CONSTANT FOR SMALL STEPS" ;
    RESM:units = "" ;
    RESM:stagger = "" ;
float ZETATOP(Time) ;
    ZETATOP:FieldType = 104 ;
    ZETATOP:MemoryOrder = "0" ;
    ZETATOP:description = "ZETA AT MODEL TOP" ;
    ZETATOP:units = "" ;
    ZETATOP:stagger = "" ;
float CF1(Time) ;
    CF1:FieldType = 104 ;
    CF1:MemoryOrder = "0" ;
    CF1:description = "2nd order extrapolation constant" ;
    CF1:units = "" ;
    CF1:stagger = "" ;
float CF2(Time) ;
    CF2:FieldType = 104 ;
    CF2:MemoryOrder = "0" ;
    CF2:description = "2nd order extrapolation constant" ;
    CF2:units = "" ;
    CF2:stagger = "" ;
float CF3(Time) ;
    CF3:FieldType = 104 ;
    CF3:MemoryOrder = "0" ;
    CF3:description = "2nd order extrapolation constant" ;
    CF3:units = "" ;
    CF3:stagger = "" ;
int ITIMESTEP(Time) ;
    ITIMESTEP:FieldType = 106 ;
    ITIMESTEP:MemoryOrder = "0" ;
    ITIMESTEP:description = "" ;
    ITIMESTEP:units = "" ;
    ITIMESTEP:stagger = "" ;
float XTIME(Time) ;
    XTIME:FieldType = 104 ;
    XTIME:MemoryOrder = "0" ;
    XTIME:description = "minutes since simulation start" ;
    XTIME:units = "" ;
    XTIME:stagger = "" ;
float QVAPOR(Time, bottom_top, south_north, west_east) ;
    QVAPOR:FieldType = 104 ;
    QVAPOR:MemoryOrder = "XYZ" ;
    QVAPOR:description = "Water vapor mixing ratio" ;
    QVAPOR:units = "kg kg-1" ;
    QVAPOR:stagger = "" ;
    QVAPOR:coordinates = "XLONG XLAT" ;
```

```
float QCLOUD(Time, bottom_top, south_north, west_east) ;
  QCLOUD:FieldType = 104 ;
  QCLOUD:MemoryOrder = "XYZ" ;
  QCLOUD:description = "Cloud water mixing ratio" ;
  QCLOUD:units = "kg kg-1" ;
  QCLOUD:stagger = "" ;
  QCLOUD:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float QRAIN(Time, bottom_top, south_north, west_east) ;
  QRAIN:FieldType = 104 ;
  QRAIN:MemoryOrder = "XYZ" ;
  QRAIN:description = "Rain water mixing ratio" ;
  QRAIN:units = "kg kg-1" ;
  QRAIN:stagger = "" ;
  QRAIN:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float LANDMASK(Time, south_north, west_east) ;
  LANDMASK:FieldType = 104 ;
  LANDMASK:MemoryOrder = "XY" ;
  LANDMASK:description = "LAND MASK (1 FOR LAND, 0 FOR WATER)" ;
  LANDMASK:units = "" ;
  LANDMASK:stagger = "" ;
  LANDMASK:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float TSLB(Time, soil_layers_stag, south_north, west_east) ;
  TSLB:FieldType = 104 ;
  TSLB:MemoryOrder = "XYZ" ;
  TSLB:description = "SOIL TEMPERATURE" ;
  TSLB:units = "K" ;
  TSLB:stagger = "Z" ;
  TSLB:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SMOIS(Time, soil_layers_stag, south_north, west_east) ;
  SMOIS:FieldType = 104 ;
  SMOIS:MemoryOrder = "XYZ" ;
  SMOIS:description = "SOIL MOISTURE" ;
  SMOIS:units = "m3 m-3" ;
  SMOIS:stagger = "Z" ;
  SMOIS:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SH2O(Time, soil_layers_stag, south_north, west_east) ;
  SH2O:FieldType = 104 ;
  SH2O:MemoryOrder = "XYZ" ;
  SH2O:description = "SOIL LIQUID WATER" ;
  SH2O:units = "m3 m-3" ;
  SH2O:stagger = "Z" ;
  SH2O:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SMCREL(Time, soil_layers_stag, south_north, west_east) ;
  SMCREL:FieldType = 104 ;
  SMCREL:MemoryOrder = "XYZ" ;
  SMCREL:description = "RELATIVE SOIL MOISTURE" ;
  SMCREL:units = "" ;
  SMCREL:stagger = "Z" ;
  SMCREL:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SEAICE(Time, south_north, west_east) ;
  SEAICE:FieldType = 104 ;
  SEAICE:MemoryOrder = "XY" ;
  SEAICE:description = "SEA ICE FLAG" ;
  SEAICE:units = "" ;
  SEAICE:stagger = "" ;
```

```
    SEAICE:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float XICEM(Time, south_north, west_east) ;
    XICEM:FieldType = 104 ;
    XICEM:MemoryOrder = "XY" ;
    XICEM:description = "SEA ICE FLAG (PREVIOUS STEP)" ;
    XICEM:units = "" ;
    XICEM:stagger = "" ;
    XICEM:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SFROFF(Time, south_north, west_east) ;
    SFROFF:FieldType = 104 ;
    SFROFF:MemoryOrder = "XY" ;
    SFROFF:description = "SURFACE RUNOFF" ;
    SFROFF:units = "mm" ;
    SFROFF:stagger = "" ;
    SFROFF:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float UDROFF(Time, south_north, west_east) ;
    UDROFF:FieldType = 104 ;
    UDROFF:MemoryOrder = "XY" ;
    UDROFF:description = "UNDERGROUND RUNOFF" ;
    UDROFF:units = "mm" ;
    UDROFF:stagger = "" ;
    UDROFF:coordinates = "XLONG XLAT" ;
int IVGTYP(Time, south_north, west_east) ;
    IVGTYP:FieldType = 106 ;
    IVGTYP:MemoryOrder = "XY" ;
    IVGTYP:description = "DOMINANT VEGETATION CATEGORY" ;
    IVGTYP:units = "" ;
    IVGTYP:stagger = "" ;
    IVGTYP:coordinates = "XLONG XLAT" ;
int ISLTYP(Time, south_north, west_east) ;
    ISLTYP:FieldType = 106 ;
    ISLTYP:MemoryOrder = "XY" ;
    ISLTYP:description = "DOMINANT SOIL CATEGORY" ;
    ISLTYP:units = "" ;
    ISLTYP:stagger = "" ;
    ISLTYP:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float VEGFRA(Time, south_north, west_east) ;
    VEGFRA:FieldType = 104 ;
    VEGFRA:MemoryOrder = "XY" ;
    VEGFRA:description = "VEGETATION FRACTION" ;
    VEGFRA:units = "" ;
    VEGFRA:stagger = "" ;
    VEGFRA:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float GRDFLX(Time, south_north, west_east) ;
    GRDFLX:FieldType = 104 ;
    GRDFLX:MemoryOrder = "XY" ;
    GRDFLX:description = "GROUND HEAT FLUX" ;
    GRDFLX:units = "W m-2" ;
    GRDFLX:stagger = "" ;
    GRDFLX:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float ACGRDFLX(Time, south_north, west_east) ;
    ACGRDFLX:FieldType = 104 ;
    ACGRDFLX:MemoryOrder = "XY" ;
    ACGRDFLX:description = "ACCUMULATED GROUND HEAT FLUX" ;
    ACGRDFLX:units = "J m-2" ;
```

```
ACGRDFLX:stagger = "" ;
ACGRDFLX:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SNOW(Time, south_north, west_east) ;
SNOW:FieldType = 104 ;
SNOW:MemoryOrder = "XY" ;
SNOW:description = "SNOW WATER EQUIVALENT" ;
SNOW:units = "kg m-2" ;
SNOW:stagger = "" ;
SNOW:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SNOWH(Time, south_north, west_east) ;
SNOWH:FieldType = 104 ;
SNOWH:MemoryOrder = "XY" ;
SNOWH:description = "PHYSICAL SNOW DEPTH" ;
SNOWH:units = "m" ;
SNOWH:stagger = "" ;
SNOWH:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float CANWAT(Time, south_north, west_east) ;
CANWAT:FieldType = 104 ;
CANWAT:MemoryOrder = "XY" ;
CANWAT:description = "CANOPY WATER" ;
CANWAT:units = "kg m-2" ;
CANWAT:stagger = "" ;
CANWAT:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SST(Time, south_north, west_east) ;
SST:FieldType = 104 ;
SST:MemoryOrder = "XY" ;
SST:description = "SEA SURFACE TEMPERATURE" ;
SST:units = "K" ;
SST:stagger = "" ;
SST:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SSTS_K(Time, south_north, west_east) ;
SSTS_K:FieldType = 104 ;
SSTS_K:MemoryOrder = "XY" ;
SSTS_K:description = "SKIN SEA SURFACE TEMPERATURE" ;
SSTS_K:units = "K" ;
SSTS_K:stagger = "" ;
SSTS_K:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float LAI(Time, south_north, west_east) ;
LAI:FieldType = 104 ;
LAI:MemoryOrder = "XY" ;
LAI:description = "Leaf area index" ;
LAI:units = "area/area" ;
LAI:stagger = "" ;
LAI:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float H_DIABATIC(Time, bottom_top, south_north, west_east) ;
H_DIABATIC:FieldType = 104 ;
H_DIABATIC:MemoryOrder = "XYZ" ;
H_DIABATIC:description = "MICROPHYSICS LATENT HEATING" ;
H_DIABATIC:units = "K s-1" ;
H_DIABATIC:stagger = "" ;
H_DIABATIC:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float MAPFAC_M(Time, south_north, west_east) ;
MAPFAC_M:FieldType = 104 ;
MAPFAC_M:MemoryOrder = "XY" ;
MAPFAC_M:description = "Map scale factor on mass grid" ;
```

```
MAPFAC_M:units = "" ;
MAPFAC_M:stagger = "" ;
MAPFAC_M:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float MAPFAC_U(Time, south_north, west_east_stag) ;
    MAPFAC_U:FieldType = 104 ;
    MAPFAC_U:MemoryOrder = "XY" ;
    MAPFAC_U:description = "Map scale factor on u-grid" ;
    MAPFAC_U:units = "" ;
    MAPFAC_U:stagger = "X" ;
    MAPFAC_U:coordinates = "XLONG_U XLAT_U" ;
float MAPFAC_V(Time, south_north_stag, west_east) ;
    MAPFAC_V:FieldType = 104 ;
    MAPFAC_V:MemoryOrder = "XY" ;
    MAPFAC_V:description = "Map scale factor on v-grid" ;
    MAPFAC_V:units = "" ;
    MAPFAC_V:stagger = "Y" ;
    MAPFAC_V:coordinates = "XLONG_V XLAT_V" ;
float MAPFAC_MX(Time, south_north, west_east) ;
    MAPFAC_MX:FieldType = 104 ;
    MAPFAC_MX:MemoryOrder = "XY" ;
    MAPFAC_MX:description = "Map scale factor on mass grid,
                                x direction" ;
    MAPFAC_MX:units = "" ;
    MAPFAC_MX:stagger = "" ;
    MAPFAC_MX:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float MAPFAC_MY(Time, south_north, west_east) ;
    MAPFAC_MY:FieldType = 104 ;
    MAPFAC_MY:MemoryOrder = "XY" ;
    MAPFAC_MY:description = "Map scale factor on mass grid,
                                y direction" ;
    MAPFAC_MY:units = "" ;
    MAPFAC_MY:stagger = "" ;
    MAPFAC_MY:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float MAPFAC_UX(Time, south_north, west_east_stag) ;
    MAPFAC_UX:FieldType = 104 ;
    MAPFAC_UX:MemoryOrder = "XY" ;
    MAPFAC_UX:description = "Map scale factor on u-grid,
                                x direction" ;
    MAPFAC_UX:units = "" ;
    MAPFAC_UX:stagger = "X" ;
    MAPFAC_UX:coordinates = "XLONG_U XLAT_U" ;
float MAPFAC_UY(Time, south_north, west_east_stag) ;
    MAPFAC_UY:FieldType = 104 ;
    MAPFAC_UY:MemoryOrder = "XY" ;
    MAPFAC_UY:description = "Map scale factor on u-grid,
                                y direction" ;
    MAPFAC_UY:units = "" ;
    MAPFAC_UY:stagger = "X" ;
    MAPFAC_UY:coordinates = "XLONG_U XLAT_U" ;
float MAPFAC_VX(Time, south_north_stag, west_east) ;
    MAPFAC_VX:FieldType = 104 ;
    MAPFAC_VX:MemoryOrder = "XY" ;
    MAPFAC_VX:description = "Map scale factor on v-grid,
                                x direction" ;
    MAPFAC_VX:units = "" ;
```

```

MAPFAC_VX:stagger = "Y" ;
MAPFAC_VX:coordinates = "XLONG_V XLAT_V" ;
float MF_VX_INV(Time, south_north_stag, west_east) ;
    MF_VX_INV:FieldType = 104 ;
    MF_VX_INV:MemoryOrder = "XY" ;
    MF_VX_INV:description = "Inverse map scale factor on v-grid,
                                x direction" ;
    MF_VX_INV:units = "" ;
    MF_VX_INV:stagger = "Y" ;
    MF_VX_INV:coordinates = "XLONG_V XLAT_V" ;
float MAPFAC_VY(Time, south_north_stag, west_east) ;
    MAPFAC_VY:FieldType = 104 ;
    MAPFAC_VY:MemoryOrder = "XY" ;
    MAPFAC_VY:description = "Map scale factor on v-grid,
                                y direction" ;
    MAPFAC_VY:units = "" ;
    MAPFAC_VY:stagger = "Y" ;
    MAPFAC_VY:coordinates = "XLONG_V XLAT_V" ;
float F(Time, south_north, west_east) ;
    F:FieldType = 104 ;
    F:MemoryOrder = "XY" ;
    F:description = "Coriolis sine latitude term" ;
    F:units = "s-1" ;
    F:stagger = "" ;
    F:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float E(Time, south_north, west_east) ;
    E:FieldType = 104 ;
    E:MemoryOrder = "XY" ;
    E:description = "Coriolis cosine latitude term" ;
    E:units = "s-1" ;
    E:stagger = "" ;
    E:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SINALPHA(Time, south_north, west_east) ;
    SINALPHA:FieldType = 104 ;
    SINALPHA:MemoryOrder = "XY" ;
    SINALPHA:description = "Local sine of map rotation" ;
    SINALPHA:units = "" ;
    SINALPHA:stagger = "" ;
    SINALPHA:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float COSALPHA(Time, south_north, west_east) ;
    COSALPHA:FieldType = 104 ;
    COSALPHA:MemoryOrder = "XY" ;
    COSALPHA:description = "Local cosine of map rotation" ;
    COSALPHA:units = "" ;
    COSALPHA:stagger = "" ;
    COSALPHA:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float HGT(Time, south_north, west_east) ;
    HGT:FieldType = 104 ;
    HGT:MemoryOrder = "XY" ;
    HGT:description = "Terrain Height" ;
    HGT:units = "m" ;
    HGT:stagger = "" ;
    HGT:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float TSK(Time, south_north, west_east) ;
    TSK:FieldType = 104 ;

```

```
    TSK:MemoryOrder = "XY" ;
    TSK:description = "SURFACE SKIN TEMPERATURE" ;
    TSK:units = "K" ;
    TSK:stagger = "" ;
    TSK:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float P_TOP(Time) ;
    P_TOP:FieldType = 104 ;
    P_TOP:MemoryOrder = "0" ;
    P_TOP:description = "PRESSURE TOP OF THE MODEL" ;
    P_TOP:units = "Pa" ;
    P_TOP:stagger = "" ;
float T00(Time) ;
    T00:FieldType = 104 ;
    T00:MemoryOrder = "0" ;
    T00:description = "BASE STATE TEMPERATURE" ;
    T00:units = "K" ;
    T00:stagger = "" ;
float P00(Time) ;
    P00:FieldType = 104 ;
    P00:MemoryOrder = "0" ;
    P00:description = "BASE STATE PRESURE" ;
    P00:units = "Pa" ;
    P00:stagger = "" ;
float TLP(Time) ;
    TLP:FieldType = 104 ;
    TLP:MemoryOrder = "0" ;
    TLP:description = "BASE STATE LAPSE RATE" ;
    TLP:units = "" ;
    TLP:stagger = "" ;
float TISO(Time) ;
    TISO:FieldType = 104 ;
    TISO:MemoryOrder = "0" ;
    TISO:description = "TEMP AT WHICH THE BASE T TURNS CONST" ;
    TISO:units = "K" ;
    TISO:stagger = "" ;
float MAX_MSTFX(Time) ;
    MAX_MSTFX:FieldType = 104 ;
    MAX_MSTFX:MemoryOrder = "0" ;
    MAX_MSTFX:description = "Max map factor in domain" ;
    MAX_MSTFX:units = "" ;
    MAX_MSTFX:stagger = "" ;
float MAX_MSTFY(Time) ;
    MAX_MSTFY:FieldType = 104 ;
    MAX_MSTFY:MemoryOrder = "0" ;
    MAX_MSTFY:description = "Max map factor in domain" ;
    MAX_MSTFY:units = "" ;
    MAX_MSTFY:stagger = "" ;
float RAINC(Time, south_north, west_east) ;
    RAINC:FieldType = 104 ;
    RAINC:MemoryOrder = "XY" ;
    RAINC:description = "ACCUMULATED TOTAL CUMULUS PRECIPITATION" ;
    RAINC:units = "mm" ;
    RAINC:stagger = "" ;
    RAINC:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float RAINSH(Time, south_north, west_east) ;
```

```
RAINSH:FieldType = 104 ;
RAINSH:MemoryOrder = "XY" ;
RAINSH:description = "ACCUMULATED SHALLOW CUMULUS
PRECIPITATION" ;
RAINSH:units = "mm" ;
RAINSH:stagger = "" ;
RAINSH:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float RAINNC(Time, south_north, west_east) ;
RAINNC:FieldType = 104 ;
RAINNC:MemoryOrder = "XY" ;
RAINNC:description = "ACCUMULATED TOTAL GRID SCALE
PRECIPITATION" ;
RAINNC:units = "mm" ;
RAINNC:stagger = "" ;
RAINNC:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SNOWNC(Time, south_north, west_east) ;
SNOWNC:FieldType = 104 ;
SNOWNC:MemoryOrder = "XY" ;
SNOWNC:description = "ACCUMULATED TOTAL GRID SCALE
SNOW AND ICE" ;
SNOWNC:units = "mm" ;
SNOWNC:stagger = "" ;
SNOWNC:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float GRAUPELNC(Time, south_north, west_east) ;
GRAUPELNC:FieldType = 104 ;
GRAUPELNC:MemoryOrder = "XY" ;
GRAUPELNC:description = "ACCUMULATED TOTAL GRID SCALE GRAUPEL" ;
GRAUPELNC:units = "mm" ;
GRAUPELNC:stagger = "" ;
GRAUPELNC:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float HAILNC(Time, south_north, west_east) ;
HAILNC:FieldType = 104 ;
HAILNC:MemoryOrder = "XY" ;
HAILNC:description = "ACCUMULATED TOTAL GRID SCALE HAIL" ;
HAILNC:units = "mm" ;
HAILNC:stagger = "" ;
HAILNC:coordinates = "XLONG XLAT" ;
int STEPAVE_COUNT(Time) ;
STEPAVE_COUNT:FieldType = 106 ;
STEPAVE_COUNT:MemoryOrder = "O" ;
STEPAVE_COUNT:description = "time steps contained in averages for
convective transport" ;
STEPAVE_COUNT:units = "" ;
STEPAVE_COUNT:stagger = "" ;
float CLDFRA(Time, bottom_top, south_north, west_east) ;
CLDFRA:FieldType = 104 ;
CLDFRA:MemoryOrder = "XYZ" ;
CLDFRA:description = "CLOUD FRACTION" ;
CLDFRA:units = "" ;
CLDFRA:stagger = "" ;
CLDFRA:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SWDOWN(Time, south_north, west_east) ;
SWDOWN:FieldType = 104 ;
SWDOWN:MemoryOrder = "XY" ;
SWDOWN:description = "DOWNWARD SHORT WAVE FLUX AT GROUND
```

```
        SURFACE" ;
SWDOWN:units = "W m-2" ;
SWDOWN:stagger = "" ;
SWDOWN:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float GLW(Time, south_north, west_east) ;
    GLW:FieldType = 104 ;
    GLW:MemoryOrder = "XY" ;
    GLW:description = "DOWNWARD LONG WAVE FLUX AT GROUND SURFACE" ;
    GLW:units = "W m-2" ;
    GLW:stagger = "" ;
    GLW:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SWNORM(Time, south_north, west_east) ;
    SWNORM:FieldType = 104 ;
    SWNORM:MemoryOrder = "XY" ;
    SWNORM:description = "NORMAL SHORT WAVE FLUX AT GROUND SURFACE
(SLOPE-DEPENDENT)" ;
    SWNORM:units = "W m-2" ;
    SWNORM:stagger = "" ;
    SWNORM:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float OLR(Time, south_north, west_east) ;
    OLR:FieldType = 104 ;
    OLR:MemoryOrder = "XY" ;
    OLR:description = "TOA OUTGOING LONG WAVE" ;
    OLR:units = "W m-2" ;
    OLR:stagger = "" ;
    OLR:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float XLAT(Time, south_north, west_east) ;
    XLAT:FieldType = 104 ;
    XLAT:MemoryOrder = "XY" ;
    XLAT:description = "LATITUDE, SOUTH IS NEGATIVE" ;
    XLAT:units = "degree_north" ;
    XLAT:stagger = "" ;
float XLONG(Time, south_north, west_east) ;
    XLONG:FieldType = 104 ;
    XLONG:MemoryOrder = "XY" ;
    XLONG:description = "LONGITUDE, WEST IS NEGATIVE" ;
    XLONG:units = "degree_east" ;
    XLONG:stagger = "" ;
float XLAT_U(Time, south_north, west_east_stag) ;
    XLAT_U:FieldType = 104 ;
    XLAT_U:MemoryOrder = "XY" ;
    XLAT_U:description = "LATITUDE, SOUTH IS NEGATIVE" ;
    XLAT_U:units = "degree_north" ;
    XLAT_U:stagger = "X" ;
    XLAT_U:coordinates = "XLONG_U XLAT_U" ;
float XLONG_U(Time, south_north, west_east_stag) ;
    XLONG_U:FieldType = 104 ;
    XLONG_U:MemoryOrder = "XY" ;
    XLONG_U:description = "LONGITUDE, WEST IS NEGATIVE" ;
    XLONG_U:units = "degree_east" ;
    XLONG_U:stagger = "X" ;
    XLONG_U:coordinates = "XLONG_U XLAT_U" ;
float XLAT_V(Time, south_north_stag, west_east) ;
    XLAT_V:FieldType = 104 ;
    XLAT_V:MemoryOrder = "XY" ;
```

```
XLAT_V:description = "LATITUDE, SOUTH IS NEGATIVE" ;
XLAT_V:units = "degree_north" ;
XLAT_V:stagger = "Y" ;
XLAT_V:coordinates = "XLONG_V XLAT_V" ;
float XLONG_V(Time, south_north_stag, west_east) ;
    XLONG_V:FieldType = 104 ;
    XLONG_V:MemoryOrder = "XY" ;
    XLONG_V:description = "LONGITUDE, WEST IS NEGATIVE" ;
    XLONG_V:units = "degree_east" ;
    XLONG_V:stagger = "Y" ;
    XLONG_V:coordinates = "XLONG_V XLAT_V" ;
float ALBEDO(Time, south_north, west_east) ;
    ALBEDO:FieldType = 104 ;
    ALBEDO:MemoryOrder = "XY" ;
    ALBEDO:description = "ALBEDO" ;
    ALBEDO:units = "-" ;
    ALBEDO:stagger = "" ;
    ALBEDO:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float ALBBCK(Time, south_north, west_east) ;
    ALBBCK:FieldType = 104 ;
    ALBBCK:MemoryOrder = "XY" ;
    ALBBCK:description = "BACKGROUND ALBEDO" ;
    ALBBCK:units = "" ;
    ALBBCK:stagger = "" ;
    ALBBCK:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float EMISS(Time, south_north, west_east) ;
    EMISS:FieldType = 104 ;
    EMISS:MemoryOrder = "XY" ;
    EMISS:description = "SURFACE EMISSIVITY" ;
    EMISS:units = "" ;
    EMISS:stagger = "" ;
    EMISS:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float NOAHRES(Time, south_north, west_east) ;
    NOAHRES:FieldType = 104 ;
    NOAHRES:MemoryOrder = "XY" ;
    NOAHRES:description = "RESIDUAL OF THE NOAH SURFACE ENERGY
                                BUDGET" ;
    NOAHRES:units = "W m{-2}" ;
    NOAHRES:stagger = "" ;
    NOAHRES:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float TMN(Time, south_north, west_east) ;
    TMN:FieldType = 104 ;
    TMN:MemoryOrder = "XY" ;
    TMN:description = "SOIL TEMPERATURE AT LOWER BOUNDARY" ;
    TMN:units = "K" ;
    TMN:stagger = "" ;
    TMN:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float XLAND(Time, south_north, west_east) ;
    XLAND:FieldType = 104 ;
    XLAND:MemoryOrder = "XY" ;
    XLAND:description = "LAND MASK (1 FOR LAND, 2 FOR WATER)" ;
    XLAND:units = "" ;
    XLAND:stagger = "" ;
    XLAND:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float UST(Time, south_north, west_east) ;
```

```
UST:FieldType = 104 ;
UST:MemoryOrder = "XY" ;
UST:description = "U* IN SIMILARITY THEORY" ;
UST:units = "m s-1" ;
UST:stagger = "" ;
UST:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float PBLH(Time, south_north, west_east) ;
PBLH:FieldType = 104 ;
PBLH:MemoryOrder = "XY" ;
PBLH:description = "PBL HEIGHT" ;
PBLH:units = "m" ;
PBLH:stagger = "" ;
PBLH:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float HFX(Time, south_north, west_east) ;
HFX:FieldType = 104 ;
HFX:MemoryOrder = "XY" ;
HFX:description = "UPWARD HEAT FLUX AT THE SURFACE" ;
HFX:units = "W m-2" ;
HFX:stagger = "" ;
HFX:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float QFX(Time, south_north, west_east) ;
QFX:FieldType = 104 ;
QFX:MemoryOrder = "XY" ;
QFX:description = "UPWARD MOISTURE FLUX AT THE SURFACE" ;
QFX:units = "kg m-2 s-1" ;
QFX:stagger = "" ;
QFX:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float LH(Time, south_north, west_east) ;
LH:FieldType = 104 ;
LH:MemoryOrder = "XY" ;
LH:description = "LATENT HEAT FLUX AT THE SURFACE" ;
LH:units = "W m-2" ;
LH:stagger = "" ;
LH:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float ACHFX(Time, south_north, west_east) ;
ACHFX:FieldType = 104 ;
ACHFX:MemoryOrder = "XY" ;
ACHFX:description = "ACCUMULATED UPWARD HEAT FLUX AT THE
SURFACE" ;
ACHFX:units = "J m-2" ;
ACHFX:stagger = "" ;
ACHFX:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float ACLHF(Time, south_north, west_east) ;
ACLHF:FieldType = 104 ;
ACLHF:MemoryOrder = "XY" ;
ACLHF:description = "ACCUMULATED UPWARD LATENT HEAT FLUX AT
THE SURFACE" ;
ACLHF:units = "J m-2" ;
ACLHF:stagger = "" ;
ACLHF:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SNOWC(Time, south_north, west_east) ;
SNOWC:FieldType = 104 ;
SNOWC:MemoryOrder = "XY" ;
SNOWC:description = "FLAG INDICATING SNOW COVERAGE (1 FOR
SNOW COVER)" ;
```

```

SNOWC:units = "" ;
SNOWC:stagger = "" ;
SNOWC:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SR(Time, south_north, west_east) ;
    SR:FieldType = 104 ;
    SR:MemoryOrder = "XY" ;
    SR:description = "fraction of frozen precipitation" ;
    SR:units = "--" ;
    SR:stagger = "" ;
    SR:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float POTEVP(Time, south_north, west_east) ;
    POTEVP:FieldType = 104 ;
    POTEVP:MemoryOrder = "XY" ;
    POTEVP:description = "accumulated potential evaporation" ;
    POTEVP:units = "W m-2" ;
    POTEVP:stagger = "" ;
    POTEVP:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SNOPCX(Time, south_north, west_east) ;
    SNOPCX:FieldType = 104 ;
    SNOPCX:MemoryOrder = "XY" ;
    SNOPCX:description = "snow phase change heat flux" ;
    SNOPCX:units = "W m-2" ;
    SNOPCX:stagger = "" ;
    SNOPCX:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float SOILTB(Time, south_north, west_east) ;
    SOILTB:FieldType = 104 ;
    SOILTB:MemoryOrder = "XY" ;
    SOILTB:description = "bottom soil temperature" ;
    SOILTB:units = "K" ;
    SOILTB:stagger = "" ;
    SOILTB:coordinates = "XLONG XLAT" ;
int SAVE_TOPO_FROM_REAL(Time) ;
    SAVE_TOPO_FROM_REAL:FieldType = 106 ;
    SAVE_TOPO_FROM_REAL:MemoryOrder = "0" ;
    SAVE_TOPO_FROM_REAL:description = "1=original topo from real/
                                         0=topo modified by WRF" ;
    SAVE_TOPO_FROM_REAL:units = "flag" ;
    SAVE_TOPO_FROM_REAL:stagger = "" ;
float AVG_FUEL_FRAC(Time, south_north, west_east) ;
    AVG_FUEL_FRAC:FieldType = 104 ;
    AVG_FUEL_FRAC:MemoryOrder = "XY" ;
    AVG_FUEL_FRAC:description = "fuel remaining averaged to
                                 atmospheric grid" ;
    AVG_FUEL_FRAC:units = "1" ;
    AVG_FUEL_FRAC:stagger = "Z" ;
    AVG_FUEL_FRAC:coordinates = "XLONG XLAT" ;
float UAH(Time, south_north, west_east_stag) ;
    UAH:FieldType = 104 ;
    UAH:MemoryOrder = "XY" ;
    UAH:description = "wind at fire_wind_height" ;
    UAH:units = "m/s" ;
    UAH:stagger = "X" ;
    UAH:coordinates = "XLONG_U XLAT_U" ;
float VAH(Time, south_north_stag, west_east) ;
    VAH:FieldType = 104 ;

```

```
VAH:MemoryOrder = "XY" ;
VAH:description = "wind at fire_wind_height" ;
VAH:units = "m/s" ;
VAH:stagger = "Y" ;
VAH:coordinates = "XLONG_V XLAT_V" ;
int SEED1(Time) ;
    SEED1:FieldType = 106 ;
    SEED1:MemoryOrder = "0" ;
    SEED1:description = "RANDOM SEED NUMBER 1" ;
    SEED1:units = "" ;
    SEED1:stagger = "" ;
int SEED2(Time) ;
    SEED2:FieldType = 106 ;
    SEED2:MemoryOrder = "0" ;
    SEED2:description = "RANDOM SEED NUMBER 2" ;
    SEED2:units = "" ;
    SEED2:stagger = "" ;
```

Bibliografía

- [1] P. Lynch. The origins of computer weather prediction and climate modeling. *Journal of Computational Physics*, 227(7):3431–3444, 2008.
- [2] P. Lynch. *The emergence of numerical weather prediction: Richardson’s dream*. Cambridge University Press, 2006.
- [3] E. Kalnay. *Atmospheric modeling, data assimilation, and predictability*. Cambridge University Press, 2003.
- [4] T.E. Dowling, A.S. Fischer, P.J. Gierasch, J. Harrington, R.P. LeBeau, and C.M. Santori. The explicit planetary isentropic-coordinate (EPIC) atmospheric model. *Icarus*, 132(2):221–238, 1998.
- [5] D. Richardson. From observations to forecasts—Part 11: Ensemble products for weather forecasters. *Weather*, 66(9):235–241, 2011.
- [6] A. Collard, F. Hilton, M. Forsythe, and B. Candy. From observations to forecasts—Part 8: The use of satellite observations in numerical weather prediction. *Weather*, 66(2):31–36, 2011.
- [7] Y. Wang, L.R. Leung, J.L. McGregor, D. Lee, W. Wang, Y. Ding, and F. Kimura. Regional climate modeling: progress, challenges, and prospects. 82(6):1599–1628, 2004.
- [8] F. Giorgi. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Climate*, 3(9):941–963, 1990.
- [9] R.G. Jones, J.M. Murphy, and M. Noguer. Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121(526):1413–1449, 1995.
- [10] K. Walsh and J.L. McGregor. January and July climate simulations over the Australian region using a limited-area model. *Journal of Climate*, 8:2387–2403, 1995.

- [11] W. Wang, W. Gong, and H. Wei. A regional model simulation of the 1991 severe precipitation event over the Yangtze–Huai river valley. Part I: Precipitation and circulation statistics. *Journal of Climate*, 13(1):74–92, 2000.
- [12] H. Wang, A.J. Pitman, M. Zhao, and R. Leemans. The impact of land-cover modification on the June meteorology of China since 1700, simulated using a regional climate model. *International Journal of Climatology*, 23(5):511–527, 2003.
- [13] <http://hirlam.org/index.php/hirlam-programme-53/general-model-description>.
- [14] A. Buzzi, M. Fantini, P. Malguzzi, and F. Nerozzi. Validation of a limited area model in cases of Mediterranean cyclogenesis: Surface fields and precipitation scores. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 53(3–4):137–153, 1994.
- [15] P. Malguzzi and N. Tartaglione. An economical second-order advection scheme for numerical weather prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125(558):2291–2303, 1999.
- [16] A. Buzzi and L. Foschini. Mesoscale meteorological features associated with heavy precipitation in the southern Alpine region. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 72(2–4):131–146, 2000.
- [17] P. Malguzzi, G. Grossi, A. Buzzi, R. Ranzi, and R. Buizza. The 1966 century flood in Italy: A meteorological and hydrological revisit. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 111(D24), 2006.
- [18] <http://www.isac.cnr.it/dinamica/projects/forecasts/>.
- [19] <http://wrf-model.org/index.php>.
- [20] http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf.
- [21] http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html.
- [22] <http://www.iges.org/grads/>.
- [23] <http://nomads.ncep.noaa.gov/>.
- [24] <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>.
- [25] K.H. Schlüzen and R.S. Sokhi. Overview of tools and methods for meteorological and air pollution mesoscale model evaluation and user training. *Joint report by WMO and COST*, 728, 2008.

- [26] <http://pandora.meng.auth.gr/mqat/query.php?section=1>.
- [27] N. Moussiopoulos, J. Douros, G. Tsegas, E. Fragkou, A. Carvalho, and C. Borrego. Application of the MEMO and MM5 mesoscale models in the context of urban energy budget studies for the Greater Athens Area. *PROTECTION2006*, 2006.
- [28] N. Moussiopoulos, I. Douros, P. Louka, C. Simonidis, and A. Arvanitis. Evaluation of MEMO using the ESCOMPTE pre-campaign dataset. In *8th International Conference on Harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes Proceedings*, pages 87–91, 2002.
- [29] E.E. Ebert. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. *Monthly Weather Review*, 129(10):2461–2480, 2001.
- [30] <http://www.clima.edu.ar/>.
- [31] W. Cheng and W. Steenburgh. Evaluation of surface sensible weather forecasts by the WRF and the Eta models over the western United States. *Weather and Forecasting*, 20(5):812–821, 2005.
- [32] E.A. Aligo, W.A. Gallus Jr., and M. Segal. Summer rainfall forecast spread in an ensemble initialized with different soil moisture analyses. *Weather and forecasting*, 22(2):299–314, 2007.
- [33] J.L. Case, W.L. Crosson, S.V. Kumar, W.M. Lapenta, and C.D. Peters-Lidard. Impacts of high-resolution land surface initialization on regional sensible weather forecasts from the WRF model. *Journal of Hydrometeorology*, 9(6):1249–1266, 2008.
- [34] R.P. Fernández, S.G. Lakkis, D.G. Allende, R. Santos, P.G. Cremades, and S.E. Puliafito. Modelación de un evento meteorológico de mesoscala utilizando el modelo WRF. *Contaminación Atmosférica e Hídrica en Argentina*, pages 289–298, 2011.
- [35] J.J. Ruiz, C. Saulo, and J. Nogués-Paegle. WRF model sensitivity to choice of parameterization over South America: validation against surface variables. *Monthly Weather Review*, 138(8):3342–3355, 2010.
- [36] L.A. Waller and C.A. Gotway. *Applied spatial statistics for public health data*, volume 368. John Wiley & Sons, 2004.
- [37] S. Laviola and V. Levizzani. The 183–WSL fast rain rate retrieval algorithm. Part I: Retrieval design. *Atmospheric Research*, 99(3):443–461, 2011.
- [38] S. Laviola, V. Levizzani, E. Cattani, and C. Kidd. The 183–WSL fast rain rate retrieval algorithm. Part II: Validation using ground radar measurements. *Atmospheric Research*, 134(0):77–86, 2013.

- [39] <http://www.firemodels.org/index.php/national-systems/farsite>.
- [40] N.L. Miller and J. Kim. Numerical prediction of precipitation and river flow over the Russian River watershed during the January 1995 California storms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(1):101–105, 1996.
- [41] L.R. Leung, M.S. Wigmosta, S.J. Ghan, D.J. Epstein, and L.W. Vail. Application of a subgrid orographic precipitation/surface hydrology scheme to a mountain watershed. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 101(D8):12803–12817, 1996.