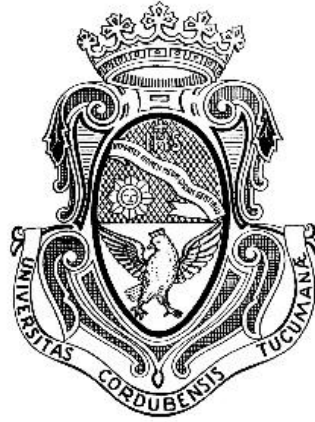


# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



## FACULTAD DE MATEMÁTICA, ASTRONOMÍA Y FÍSICA

Tesis de Licenciatura en Ciencias de la computación

---

### **Aceleración de un modelo numérico de predicción del tiempo para aplicaciones en alerta temprana a emergencias ambientales**

---

Autor:

Luis Miguel Vargas Calderon

Directores:

Mg. Rafael Andrés Lighezzolo

Dr. Nicolás Wolovick

*Algún día de 2017*

# **Resumen**

Esta tesis de licenciatura aborda el problema de implementar el modelo numérico de predicción del tiempo Weather Research and Forecasting (WRF) en el clúster de la UNC - Mendieta, con el propósito de poder escalar la performance para dicho modelo, usando tecnologías HPC de procesamiento en paralelo tales como OpenMP, MPI, etc., entre otras.

El trabajo tiene como doble propósito generar valor en el campo de la ciencia aplicada, ya que el modelo WRF implementado en Mendieta será utilizado luego por el equipo CAEARTE perteneciente a la CONAE dedicado al estudio de las emergencias ambientales y por otro lado también tiene como propósito comprender como es el funcionamiento de un clúster dedicado a cómputo intensivo.

Ambos enfoques se complementan, ya que el modelo numérico WRF puede ser aprovechable al máximo por el equipo de CAEARTE al ejecutar grandes volúmenes de cómputo en paralelo, y de esa manera poder implementar un sistema de alerta temprana que proporcione pronósticos en tiempos más inmediatos. Por otro lado, el afrontar problemas como la implementación de WRF en Mendieta posibilita iniciar el entendimiento de la arquitectura y del uso de un clúster dedicado a cómputo como Mendieta, lo cual constituye una herramienta útil para futuros trabajos.

## **Agradecimientos**

Deseo expresar un profundo agradecimiento a la Universidad Nacional de Córdoba y en especial a la facultad de Matemática por la formación de calidad que me brindó, deseo dar gracias también al sistema educativo público y gratuito que me apoyó para que pudiera continuar con mis estudios, al grupo de trabajo del Instituto Gulich: CONAE/CAEARTE, en especial a Andrés Lighezzolo y quien siempre me acompañó y brindó su apoyo en este trabajo como así también a Nicolás Wolovick que es un ejemplo y una guía a seguir en la profesión.

Y por último un especial agradecimiento a toda mi familia, en especial a mi hermana Gaby y a Clara, mi compañera de estos años por todo el aguante.

# Índice

Contenido	Página
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>x</b>
<b>Lista de abreviaturas .....</b>	<b>xi</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación .....	1
1.2. Objetivo general.....	3
1.3. Objetivos específicos .....	3
<b>2. El pronóstico y los modelos numéricos .....</b>	<b>4</b>
2.1. Marco Teórico.....	4
2.2. Las ecuaciones primitivas .....	6
2.3. Discretización .....	7
2.4. Resolución horizontal .....	9
2.5. Parametrizaciones .....	11
2.6. Alta resolución .....	13
2.7. Ensamblés .....	14
2.8. Modelo GFS.....	17
2.9. Modelo WRF .....	18
2.9.1. Pre procesamiento: WPS.....	19
2.9.2. Procesamiento: ARW solver.....	20
2.9.3. Post Procesamiento: ARWpost.....	24
2.10. GrADS .....	24
<b>3. Fundamentos de computación paralela &amp; HPC .....</b>	<b>26</b>
3.1. Fundamentos .....	26
3.2. Niveles de paralelismo.....	32
3.2.1. Paralelismo a nivel de instrucciones (ILP: Instruction level parallelism) .....	32
3.2.2 Paralelismo a nivel de datos (DLP: Data level Parallelism o SIMD) .....	34
3.2.3 Paralelismo a nivel de threads (TLP: Thread level Parallelism).....	35

3.3. Speedup y eficiencia .....	36
3.4. ccNUMA.....	37
<b>4. Herramientas de paralelismo aplicados.....</b>	<b>40</b>
4.1. Mendieta .....	40
4.2. Lista de herramientas y tecnologías utilizadas en Mendieta.....	42
4.2.1. SLURM.....	42
4.2.2. Environment Modules.....	44
4.2.3. MPI .....	44
4.2.4. OpenMP .....	45
4.2.5. WRF + Dependencias .....	46
4.2.6. Herramientas de análisis de performance: .....	49
<b>5. Implementación de WRF en Mendieta .....</b>	<b>50</b>
5.1. Definición del dominio de simulación.....	50
5.2. Estructura de WRF en Mendieta.....	53
5.3. Archivos configurables por el usuario .....	56
5.3.1. Creación de entorno para el ensamble .....	56
5.3.2. namelist.wps.....	58
5.3.3. namelist.input.....	59
5.3.4. miembroi/namelist.ARWpost .....	60
5.3.5. set_configuration.sh .....	61
5.3.6. Configuración para ejecutar OpenMP .....	62
5.3.7. Archivos de post-procesamiento.....	63
5.4. Ejecución del modelo.....	64
<b>6. Resultados.....</b>	<b>71</b>
6.1. Baseline.....	71
6.2. Pruebas para determinar software más performante .....	72
6.3. Resultados para ensambles con distintas parametrizaciones .....	75
6.3.1. Resultado para tiempo de ejecución para cada uno de los miembros del ensamble... 76	
6.3.2. Resultado para speedup de ejecución para cada uno de los miembros del ensamble. 77	
6.3.3. La eficiencia obtenida .....	78
6.3.4. Resultados de Ejecución en JupiterAce .....	79

6.3.6. Mapas de lluvias, y temperaturas.....	81
6.3.7. Inputs para meteogramas .....	86
6.3.8. Visualización web.....	87
6.3.9. Análisis durante la ejecución .....	88
<b>7. Conclusiones .....</b>	<b>94</b>
<b>Apéndice A: Variables de entorno necesarias para construir WRF + dependencias.....</b>	<b>97</b>
<b>Apéndice B: Instalación de WRF en Mendieta u otro sistema Linux.....</b>	<b>99</b>
1. Documentación en repositorio .....	99
2. Descarga de WRF/WPS/ARWpost y seteo inicial de variables .....	99
3. Instalación de WRF + dependencias.....	101
3.1. JasPer .....	101
3.2. Zlib.....	102
3.3. HDF5.....	102
3.4. NetCDF .....	103
3.5. NetCDF-Fortran.....	103
3.6 MVAPICH .....	104
3.7. Uso de tools instaladas en Mendieta.....	104
3.8. Instalación de WRF.....	105
3.9. Instalación de WPS .....	107
3.10. Instalación de ARWpost .....	108
3.11. Instalación de GrADS .....	109
4. Obtención de datos terrestres .....	109
<b>Apéndice C: Scripts para instalación y ejecución de WRF.....</b>	<b>111</b>
1. Script para seteo de entorno: set_configuration.sh .....	111
2. Script para ejecución del modelo: run_wrf_model.py .....	112
3. Script para descarga de inputs: get_GFSX025_grib2.py .....	118
4. Script para solicitud de recursos para N nodos: job_wrf_N_nodes.sh .....	122
5. Script para envío de Jobs a los nodos de Mendieta, ejecución y recopilación de resultados: run_wrf_model.sh .....	122
<b>Bibliografía y referencias .....</b>	<b>126</b>



# Lista de figuras

Figura	Página
Figura 2.1: Discretización del dominio a modelar.....	8
Figura 2.2: Asignación de valores en la grilla .....	9
Figura 2.3: Ejemplo de alta resolución horizontal .....	10
Figura 2.4: Incremento de resolución en la grilla .....	11
Figura 2.5: Fenómenos naturales a parametrizar .....	13
Figura 2.6: Ensamblajes.....	15
Figura 2.7: WPS.....	20
Figura 2.8: Grillas de tipo Arakawa.....	23
Figura 2.9: Arquitectura de WRF + ARWPost + GrADS .....	25
Figura 3.1: Evolución de la ley de Moore.....	27
Figura 3.2: Die del Procesador Xeon E5 2600 .....	28
Figura 3.3: Core de un Procesador Xeon E5 2600-V2 .....	29
Figura 3.4: SIMD .....	35
Figura 3.5: Arquitectura NUMA.....	35
Figura 3.6: Topología de un nodo de la partición multi de Mendieta.....	39
Figura 4.1: Estructura de un clúster similar a Mendieta .....	40
Figura 4.2: Modelo de particiones que utiliza SLURM.....	43
Figura 4.3: Modelo de MPI.....	45
Figura 4.4: Arquitectura de NetCDF .....	48
Figura 5.1: Dominio de simulación .....	51
Figura 5.2: Miembros de ensamble ejecutando en paralelo.....	54
Figura 5.3: Esquema de la implementación de WRF en Mendieta.....	55
Figura 6.1: Arquitectura de máquina de CAEARTE .....	71
Figura 6.2: Mediciones para múltiples nodos. Tiempo.....	73
Figura 6.3: Mediciones para múltiples nodos. Speedup .....	74
Figura 6.4: Mediciones para múltiples nodos. Eficiencia.....	75
Figura 6.5: Tiempo de cómputo para pronóstico de 36 hs. en Córdoba. ....	77



Figura 6.6: Speedup de cómputo para pronóstico de 36 hs. en Córdoba. ....	78
Figura 6.7: Eficiencia de cómputo para pronóstico de 36 hs. en Córdoba. ....	79
Figura 6.8: Tiempo de ejecución incluyendo JupiterAce. ....	79
Figura 6.9: Mapas para pronósticos de precipitación de 36 hs en Córdoba. ....	81
Figura 6.10: Mapas para pronósticos de temperatura máxima de 36 hs. en Córdoba. ....	83
Figura 6.11: Mapas para pronósticos de temperatura mínima de 36 hs. en Córdoba. ....	84
Figura 6.12: Reporte de meteogramas .....	86
Figura 6.13: 100 procesos MPI ejecutando WRF en 5 nodos. ....	87

## Lista de tablas

Tabla	Página
Tabla 3.1: Ranking con las 5 supercomputadoras más poderosas del mundo .....	30
Tabla 5.1: Mapeo de grados a kilómetros en resoluciones horizontales.....	50
Tabla 5.2: Parametrizaciones de miembros del ensamble para WRF.....	53
Tabla 6.1: Arquitectura de máquina en CAEARTE .....	71
Tabla 6.2: Herramientas utilizadas para la ejecución de WRF.....	75
Tabla 6.3: JupiterAce vs máquina de CAEARTE .....	80
Tabla A.1: Variables de entorno usadas .....	97

## Lista de abreviaturas

Abreviatura	Descripción
API	Application Programming Interface
ARW	Advanced Research WRF
CAEARTE	Consultoría de Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias
CCAD	Centro de Computación y Alto Desempeño de la UNC
CDF	Common Data Format
CONAE	Comisión Nacional de Actividades Espaciales
DLP	Data Level Parallelism
EPS	Ensamble Prediction System
FaMAF	Facultad de Matemática, Astronomía y Física
FLOPS	Floating-point operations per second
GDAS	Data Assimilation System
GFS	Global Forecast System
GPU	Graphics Processor Unit
GPGPU	General-Purpose Computing on Graphics Processing Units
GrADS	Grid Analysis and Display System
GRIB	General Regularly-distributed Information in Binary form
GSI	Gridpoint Statistical Interpolation
HDF5	Hierarchical Data Format (versión 5)
HPC	High-performance computing
ILP	Instruction Level Parallelism
LAM	Limited Area Model
MPI	Message Passing Interface
NAS	Network Attached Storage
NCAR	National Center for Atmospheric Research

NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NeTCDF	Network Common Data Form
NMM	Nonhydrostatic Mesoscale Model
NUMA	Non Uniform Memory Access
NWP	Numerical Weather Prediction
OMP	OpenMP
SIMD	Simple Instruction Multiple Data
SLURM	Simple Linux Utility for Resource Management
TLP	Thread Level Parallelism
UMA	Uniform Memory Access
UNC	Universidad Nacional de Córdoba
WPS	WRF Preprocessing System
WRF	Weather Research and Forecasting

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

El Panel Intergubernamental para el cambio climático (Mastrandrea et. Al. 2010)<sup>[1]</sup>, (Change I. C. 2014)<sup>[2]</sup> afirma que el calentamiento en el sistema climático es inequívoco y, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado. Las emisiones continuas de gases de efecto invernadero causarán un mayor calentamiento y nuevos cambios en todos los componentes del sistema climático. A medida que el cambio climático debido al forzamiento antropógeno continúe, es probable que, cambios en los climas regionales y la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos se vuelvan más comunes, aumentando aún más la necesidad de monitoreo continuo y de sistemas de alerta temprana. Sin sistemas de alerta temprana, la sociedad y los sectores productivos están en constante estado de vulnerabilidad.

Inundaciones, incendios, sequías, heladas, granizo, descargas eléctricas, olas de calor o salud pública, son ejemplos de amenazas que dependen de manera directa o indirecta de una o más variables meteorológicas y que no son ajenas a nuestra región.

Los recientes modelos numéricos de predicción del tiempo (NWP) permiten obtener un conjunto de variables meteorológicas pronosticadas con anticipación de varios días y actualizado diariamente. Por esta razón estos modelos numéricos son el primer eslabón de un sistema de alerta temprana. Los avances de los modelos numéricos de predicción del tiempo en las últimas décadas y el rango de sus aplicaciones son cada vez más amplios (Subbiah et al 2008)<sup>[3]</sup> En la mayoría de los centros operativos de predicción meteorológica 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. (Steppeler et al 2003 [4]; Kain et al 2006 [5]; Narita y Ohmori 2007 [6]; Lean et al 2008 [7]; Kain et al 2008 [8]; Weisman et al 2008 [9]). Sin embargo, no hay un consenso respecto al tamaño de retícula más conveniente, ya que algunos autores priorizan un bajo costo computacional, mientras que otros priorizan la información detallada que se obtiene con las resoluciones más elevadas.

Paralelamente, otra de las tendencias utilizadas en los centros operativos es la de pronósticos probabilísticos (llamados ensambles) (Xue et al 2010 [10]). En cuanto a esta técnica, (Grimit y Mass 2002 [11]) señalan que el pronóstico por ensambles proporciona una forma práctica de considerar la variabilidad en las condiciones iniciales, las incertidumbres de la física del modelo y las propias de la predicción de la situación atmosférica, logrando así una estimación más precisa de los estados futuros de la atmósfera a través de, por ejemplo, el valor medio de una variable del ensamble. A su vez, la variación entre los miembros del ensamble provee una medida de la incertidumbre en la predicción.

La alta resolución en los dominios de cálculo y la técnica por ensambles son factores que tienden a la mejora significativa de la predicción, sin embargo, ambos factores tienen como contraposición el alto costo computacional.

En este contexto se propone el desarrollo de la presente tesis de carácter netamente interdisciplinar, que toma como base la experiencia adquirida en la puesta operativa del modelo numérico de predicción del tiempo Weather Research and Forecasting (WRF) en la Unidad de Consultoría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias (CAEARTE) de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y toda la experiencia e infraestructura del grupo de HPC y GPGPU Computing de la FaMAF, que tiene el objetivo general descrito a continuación.

## **1.2. Objetivo general**

El principal objetivo de esta tesis se orienta a lograr las bases de operatividad de una predicción numérica meteorológica por ensambles en alta resolución horizontal de utilidad en sistemas de alerta temprana a emergencias. Para ello se focalizará en la aceleración de los procesos de cálculo, aprovechando los recursos de cómputo de CPUs y/o GPUs modernas, cálculo paralelo y procesamiento en entornos de clúster.

## **1.3. Objetivos específicos**

- Instalar, configurar y poner en funcionamiento el modelo WRF en el clúster Mendieta.
- 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 un formato útil para su uso en otros modelos o sistemas de información geográfica.

## **2. El pronóstico y los modelos numéricos**

### **2.1. Marco Teórico**

Los modelos numéricos de predicción del clima (NWP) utilizan modelos matemáticos de la atmósfera para hacer predicciones de estas basándose en las condiciones actuales de la misma.

Más específicamente, estos modelos resuelven un conjunto de ecuaciones matemáticas basadas en las leyes físicas que gobiernan el comportamiento de la atmósfera y generan una predicción de su evolución a partir de un estado inicial, proveyendo una sucesión de representaciones tridimensionales de los estados futuros de la atmósfera.

Un sistema moderno operativo de pronóstico del tiempo consiste básicamente en cinco componentes:

- Recopilación de datos
- Asimilación de datos
- Predicción numérica del tiempo
- Post procesamiento de modelos de salida
- Presentación del pronóstico al usuario final

Cotidianamente distintos tipos de observaciones meteorológicas se realizan y recopilan a lo largo del planeta. Las fuentes de datos más relevantes para la realización de un pronóstico son las siguientes:

- Observaciones en superficies
- Radiosondeos
- Reportes de aeronaves



- Observaciones de boyas
- Observaciones de radar
- Observaciones de satélites

Existen diferencias de resolución espacial, temporal, y de exactitud, entre las observaciones. La calidad de las observaciones varía según la plataforma de observación, la hora del día y las condiciones meteorológicas. La asimilación de los datos es el proceso mediante el cual las observaciones se introducen en los ciclos de pronóstico de un modelo numérico de predicción del tiempo, brindando además una medida de protección contra el crecimiento de los errores del modelo y contribuyendo a establecer las condiciones iniciales para el próximo ciclo de ejecución del modelo.

La asimilación de datos es un campo de la predicción meteorológica que se halla en fase de crecimiento, ya que siguen aumentando tanto el volumen como la variedad de los datos que se incorporan en los modelos de pronóstico.

El objetivo de la asimilación de datos consiste en optimizar la exactitud del pronóstico fusionando las observaciones con un pronóstico previo a corto plazo. Esta fusión es la condición inicial que utilizan los modelos numéricos para realizar la predicción.

Los modelos numéricos de predicción del tiempo resuelven un conjunto de ecuaciones matemáticas basadas en leyes físicas que gobiernan el comportamiento de la atmósfera, prediciendo su evolución a partir de un estado inicial.

Vilhelm Bjerknes, en 1904 (Lynch 2008) <sup>[12]</sup>, fue el primero en reconocer que la predicción numérica del tiempo era posible y propuso que esencialmente el pronóstico del tiempo se puede considerar como un problema matemático de condiciones iniciales.

Una representación matemática simple de esta clase de problema es la siguiente <sup>[13]</sup>:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = F(A), \quad A(0) = A_0, \quad (1)$$

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

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

La solución de ecuación (1) tiene la forma siguiente:

$$A_{Pronosticado} = A_{Inicial} + \int F(A)dt. \quad (2)$$

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.

## 2.2. Las ecuaciones primitivas

Vilhelm Bjerknes fue el primero en dar un conjunto completo de siete ecuaciones con siete incógnitas que gobiernan la evolución de la atmósfera. Estas son:

La conservación del momento o segunda Ley de Newton (Para las tres componentes de la velocidad)

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\alpha \nabla p - \nabla \phi + \mathbf{F} - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}$$

La ecuación de continuidad o conservación de la masa.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$$

La ecuación de estado para los gases ideales

$$p\alpha = RT$$

La ecuación de conservación de la energía o primera Ley de la termodinámica.

$$Q = C_p \frac{dT}{dt} - \alpha \frac{dp}{dt}$$

La ecuación de conservación para la masa de agua.

$$\frac{\partial \rho q}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} q) + \rho(E - C)$$

Las siete incógnitas son las tres componentes de la velocidad  $V=(u,v,w)$ , la temperatura  $T$ , la presión  $p$ ,  $\alpha = 1/\rho$  es el volumen específico y  $q$  es la razón de mezcla del vapor de agua. Estas ecuaciones son conocidas con el nombre de ecuaciones primitivas. Para mayores detalles sobre estas ecuaciones ver Kalnay (2003) [14].

Debido a su complejidad las ecuaciones primitivas deben ser resueltas numéricamente utilizando aproximaciones algebraicas.

### 2.3. Discretización

El proceso por medio del cual se obtiene la solución del sistema de ecuaciones algebraicas está constituido básicamente por dos etapas. La primera etapa, llamada discretización, consiste en transformar el dominio continuo en una malla de nodos.

Un modelo NWP divide la atmósfera 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.

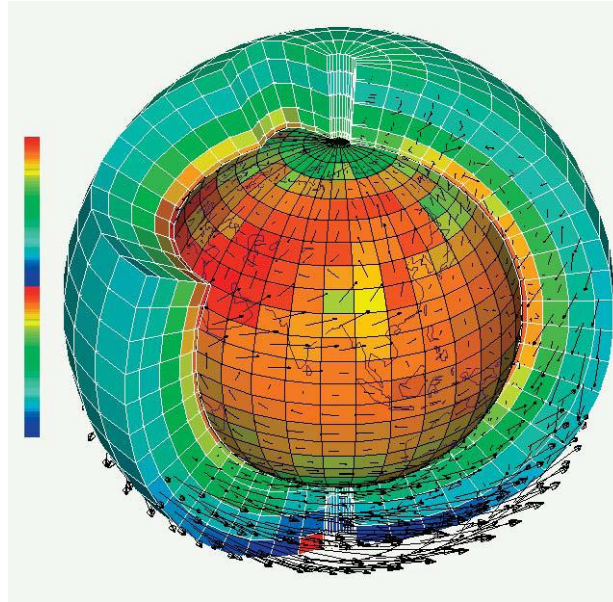


Figura 2.1: Discretización del dominio a modelar

En una atmósfera real la temperatura, la presión, el viento y la humedad varían de manera suave y continua de un lugar a otro, mientras que en una representación en grilla cada celda tiene asignado un valor que es el promedio de los valores contenidos en esta última.

Un ejemplo de esta representación puede verse en la siguiente figura:

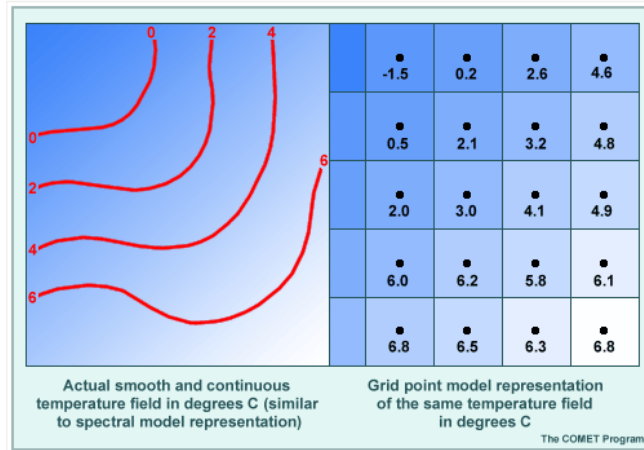


Figura 2.2: Asignación de valores en la grilla

La segunda etapa del proceso requiere un método numérico adecuado para obtener la solución del sistema de ecuaciones algebraicas planteado.

Existe una gran variedad de métodos numéricos para resolver estas ecuaciones, el método más común es el denominado de “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 los valores de los puntos adyacentes.

De manera similar el tiempo es llevado a un número finito de pasos discretos, siendo la evolución continua de las variables aproximada a pasos discretos. Este método fue ampliamente aplicado en la resolución de ecuaciones diferenciales por su utilidad y simpleza conceptual.

## 2.4. Resolución horizontal

La resolución horizontal está relacionada con el espaciamiento entre los puntos de grilla y meteorológicamente relacionada con el fenómeno particular que se quiera simular o predecir.

A mayor resolución el modelo puede describir fenómenos de menor escala.

Típicamente se requiere al menos cinco puntos de grilla para describir un fenómeno del tamaño de un punto de grilla. Para el caso de un modelo con una resolución horizontal de 20 km no puede predecir fenómenos con tamaños menores a 100 km.

Un ejemplo de la importancia de la resolución horizontal puede verse en la figura siguiente.

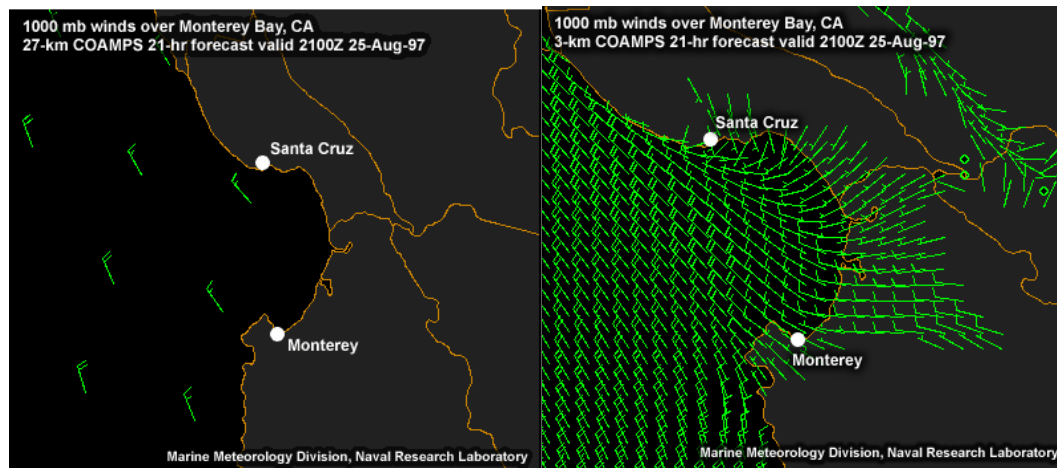


Figura 2.3: Ejemplo de alta resolución horizontal

Lo que muestra la figura es una predicción del viento para 1000 mb <sup>1</sup>de presión a la misma hora sobre la bahía de Monterrey Méjico. La imagen de la izquierda muestra el resultado de la simulación con una resolución espacial de 27 km, mientras que la imagen de la derecha tiene una resolución espacial de 3 km. En general se observa en un viento fluyendo hacia la costa, pero el modelo a 3 km puede representar además una briza marina fluyendo sobre la bahía e incluyendo una circulación hacia el sur cerca de Santa Cruz. Es decir, la simulación de 3 km es capaz de captar la briza marina mientras que la de 27 km la ignora.

El incremento en la resolución demanda el incremento de los recursos computacionales ya que el modelo necesita calcular una mayor cantidad de puntos de grilla. Por ejemplo, si se quiere reducir la resolución horizontal de 27 km en un tercio, el número de cálculos para la misma área aumenta nueve veces. La figura 2.4 ilustra lo dicho.

---

<sup>1</sup> milibar

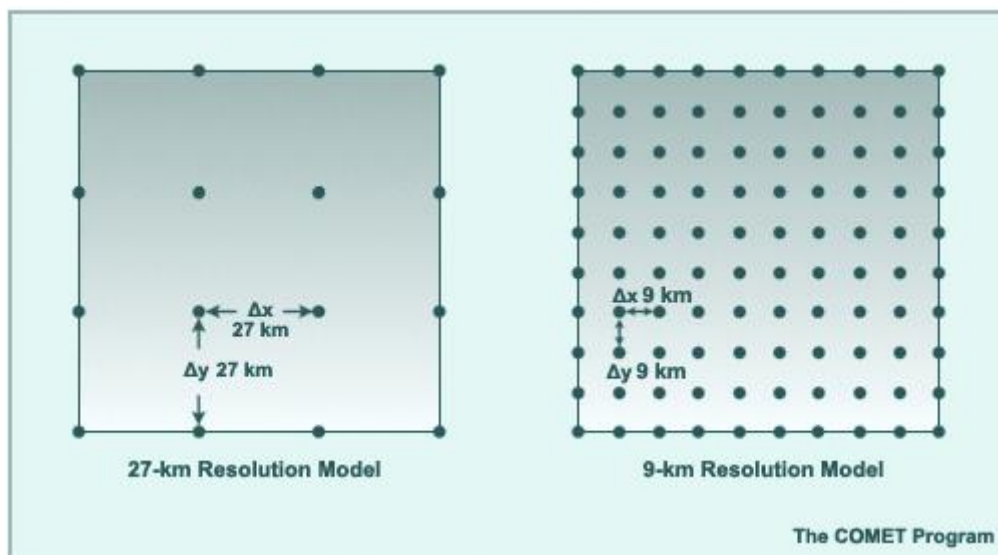


Figura 2.4: Incremento de resolución en la grilla

Además, cuando se aumenta la resolución espacial decrece el paso de tiempo de cálculo entre dos estados sucesivos. Es decir, aumenta la resolución temporal del cálculo.

Sin embargo, la alta resolución mejora notablemente las capacidades del modelo para representar el terreno, que, a la vez, influye de manera directa sobre la meteorología.

## 2.5. 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 13-100 km, y los modelos regionales de mesoescala <sup>2</sup> tienen resoluciones de 1–30 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 estratósfera e inclusive la mesósfera. Así mientras el poder de las computadoras siga aumentando, la resolución de los modelos también lo hará. Pero a pesar del continuo incremento de la

<sup>2</sup> La mesoescala en Meteorología es el estudio de sistemas del tiempo atmosférico más pequeños que la escala sinóptica meteorológica, pero más grandes que la microescala y la escala de tormenta de los sistemas de nubes cúmulos. Sus dimensiones horizontales generalmente oscilan de cerca de 9 km a varios centenares de km.

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”.

Claramente no es realista esperar que los modelos numéricos resuelvan los procesos a escalas tan pequeñas sin importar que tan alta sea la resolución. Por ejemplo, las fuerzas de fricción provocada por un edificio en particular. Sin embargo, se puede cuantificar el efecto total de todos los obstáculos sobre un flujo de aire con un valor que represente la fricción dentro de la celda considerada.

Este método de cuantificar tales efectos, sin calcularlos directamente, se denomina parametrización.

Stensrud (2009) [15] resume a los esquemas de parametrizaciones en distintas categorías: superficie terrestre, interacción atmosférica, interacción agua-atmósfera, capa límite planetaria y turbulencia, convección, microfísica y radiación. La figura siguiente muestra algunos de estos procesos.

Estos efectos son parametrizados básicamente por tres razones:

1. Los recursos computacionales no son lo suficientemente potentes para calcular directamente el fenómeno ya sea porque son de escalas muy pequeñas o muy complejas en la resolución numérica.
2. Los procesos no están bien entendidos como para ser representados en una ecuación.
3. Los efectos impactan profundamente en el modelo y son cruciales para generar un pronóstico realista.



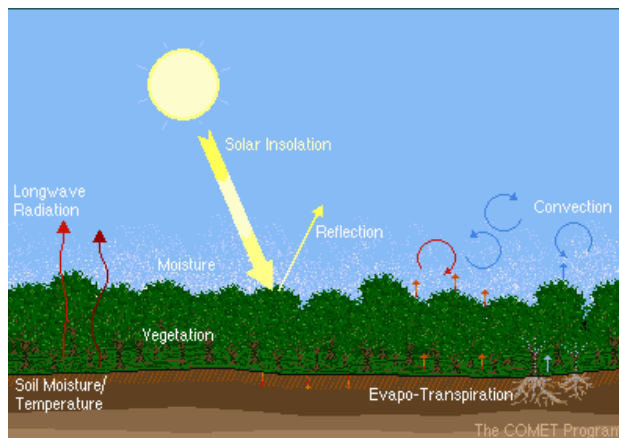


Figura 2.5: Fenómenos naturales a parametrizar

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 [32].

## 2.6. Alta resolución

Muchos de los centros operacionales de pronóstico meteorológico están direccionando sus esfuerzos hacia la implementación de modelos de alta resolución para pronósticos a corto plazo. Como ejemplo de centros se pueden nombrar el Met Office UK, Japan Meteorological Agency y Germany's National Meteorological Service.

Resoluciones horizontales en rangos de entre 2-4 km han sido implementados y probablemente resoluciones de 1 km serán comunes en los próximos años Lean et al 2008 [7].

Existen varias razones del porqué los modelos de alta resolución podrían mejorar un pronóstico. Es esperable que el incremento en la resolución permita al modelo representar características de mesoescala que de otra manera no puede ser resuelta, por ejemplo, representar una convección explícita más que por una parametrización de la convección. Estudios como los de (Weisman et al. 1997 [16]; Romero et al. 2001 [17]; Speer and Leslie 2002 [18]; Done et al. 2004 [19]) demuestran

que existen mejoras en la representación de tormentas severas y frentes convectivos cuanto menor es la longitud de la grilla.

Por otro lado, los modelos de alta resolución son capaces de utilizar datos de entrada de alta resolución. Esto puede hacerse mediante el uso de datos de alta resolución como por ejemplo la orografía y uso del suelo, o mediante la asimilación de datos de radar o satélites.

## **2.7. Ensamblajes**

Para la realización de un pronóstico del tiempo preciso es esencial una detallada y certera representación de la condición inicial de la atmósfera.

Como se dijo anteriormente las observaciones están siendo continuamente coleccionadas y combinadas con pronósticos a corto plazo, mediante las técnicas de asimilación de datos, para estimar la mejor descripción del estado actual de la atmósfera.

A pesar de la enorme cantidad de observaciones, nunca son suficientes para dar una exacta y completa descripción tridimensional de la atmósfera global. Por lo tanto, hay siempre alguna incerteza en las condiciones iniciales. Esto es un problema para los NWP porque la atmósfera es un sistema caótico donde los pequeños errores iniciales pueden crecer en el tiempo hasta distorsionar profundamente el resultado del pronóstico (este es el conocido “efecto mariposa”) (Richarson 2011 [20]).

Un ejemplo de la sensibilidad de un NWP a pequeñas incertezas en las condiciones iniciales se refleja en la siguiente figura.

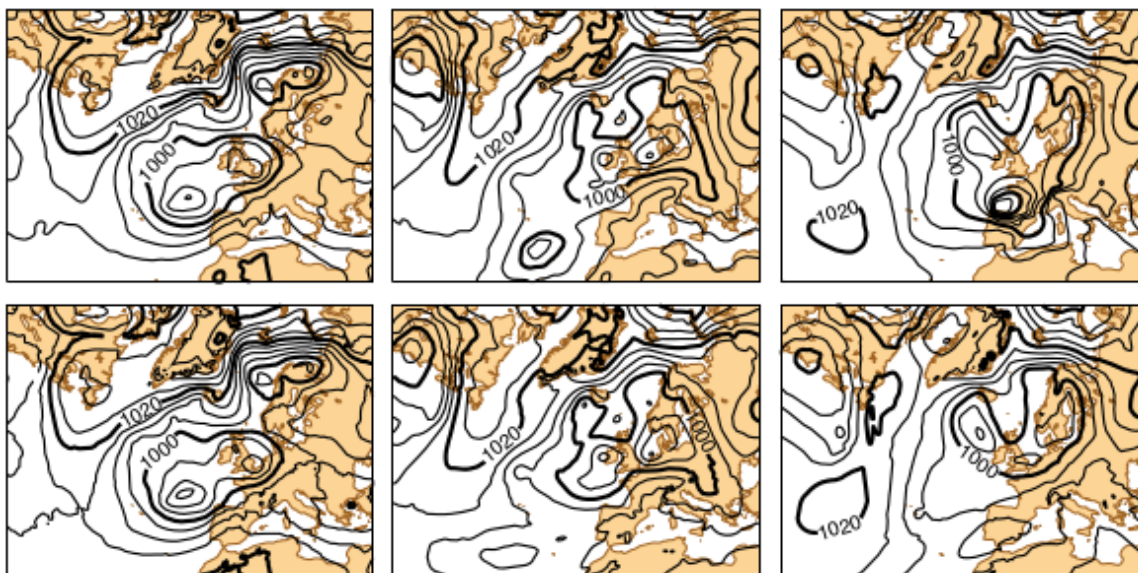


Figura 2.6: Ensembles

En la parte superior del gráfico se puede observar la presión a nivel de suelo para tres diferentes tiempos del pronóstico: la condición inicial (izquierda), el segundo día pronosticado (centro) y el tercer día de pronóstico (derecha). En el mismo se observa un sistema de baja presión se desarrolla al sur de Azores que rápidamente se profundiza produciendo tormentas severas afectan a una amplia zona del Oeste de Europa.

En la parte inferior del gráfico se observa la situación inicial con una leve perturbación. Las diferencias son casi imperceptibles al comienzo, pero el cambio es suficiente como para que el pronóstico no de indicios de tormentas como se observó en la parte superior.

Esta sensibilidad representa un claro dilema para los pronosticadores, ya que da lugar a preguntas como: ¿Cuál es el correcto?, ¿es potencialmente peligrosa esta tormenta si ocurre?

De la figura anterior los pronosticadores no tienen forma de saber qué pronóstico es el correcto ya que ambos son consistentes con las condiciones iniciales observadas.

Con la idea de resolver este problema fueron desarrollados los sistemas de pronósticos por ensambles (EPS Ensemble Prediction System).

Epstein (1969) [21] introdujo la idea de pronóstico estocástico-dinámico que consiste en intentar determinar la función de distribución de probabilidad de los posibles estados futuros de la atmósfera a partir de un estado inicial. La forma propuesta para determinar esta distribución de probabilidades fue la de realizar múltiples simulaciones de la atmósfera utilizando condiciones iniciales o modelos ligeramente diferentes y de esta manera determinar algunas propiedades (varianza, valor medio) de dicha distribución que no podía ser conocida en detalle dado el gran número de grados de libertad que presenta el problema. Una de las hipótesis fundamentales del pronóstico por ensambles es que, si la forma de obtener los diferentes pronósticos es adecuada, las propiedades estadísticas del conjunto se asemejan a las propiedades estadísticas de la verdadera función de los estados futuros de la atmósfera.

Recientemente, esta metodología que permite reducir la incertidumbre y que a la vez provee información sobre dicha incertidumbre a lo largo del plazo del pronóstico, ha sido aplicada en modelos globales a mediano plazo y en pronósticos regionales a corto plazo con resultados satisfactorios Ruiz (2008) [22].

Es importante destacar que existen diversas fuentes de errores vinculados con los modelos numéricos que, como se mencionó anteriormente, tienen que ver con los métodos de discretización espacial y temporal de las ecuaciones y errores al representar fenómenos de menor escala que la resolución horizontal utilizada. Una manera de considerar estos errores en la formulación de los modelos es construir ensambles donde cada miembro es un modelo distinto o dentro de un mismo modelo se utilizan diferentes parametrizaciones. Esta última técnica es ampliamente utilizada en actuales centros de pronósticos operativos.

Los EPS proveen una estimación más precisa de los estados futuros de la atmósfera a través de la media del ensamble y además provee también una medida de incertidumbre en la previsión considerando la desviación estándar entre los miembros del mismo.

Este valor agregado en la información, impacta directamente sobre los productos o guías que intervienen en el proceso de toma de decisión de los diferentes usuarios del pronóstico.

## 2.8. Modelo GFS

El modelo Global Forecast System (GFS) es desarrollado por el 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, cuyos datos de salida disponibles libremente en un dominio público en internet.

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, 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:

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

Este modelo global proporciona la entrada de datos para el sistema LAMs WRF.

## 2.9. Modelo WRF

El modelo regional (WRF) es de código abierto, desarrollado y respaldado de manera continua por varias instituciones de EEUU y el mundo. 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 evidencian 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 investigadores.

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 Research 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 modelo *Eta* [40], 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.

El modelo se compone de los siguientes módulos:

### 2.9.1. Pre procesamiento: WPS

La herramienta WRF Preprocessing System (WPS) es un conjunto de tres programas que trabajan colaborativamente con el objetivo de preparar los inputs para la etapa de procesamiento.

El programa que consume los outputs generados por WPS es *real.exe* (etapa de procesamiento) el cual a su vez produce inputs para *wrf.exe* para simulaciones con datos reales.

Estos programas son los siguientes:

- *geogrid.exe*: define el dominio de simulación del modelo e interpola datos geográficos estáticos (gribfiles).
- *ungrib.exe*: extrae campos meteorológicos desde los archivos gribfiles, provistos por GFS. La definición de los campos requeridos a extraer desde los gribfile se encuentra en una tabla denominada VTable (Variable Table).
- *metgrid.exe*: interpola horizontalmente los campos meteorológicos extraídos por ungrib para los dominios definidos por *geogrid.exe*. Genera archivos en formato NetCDF.

Por ejemplo, para un pronóstico de 24hs dado en la siguiente fecha:

- 2017 Enero 24 – 12:00 UTC hasta 2017 Enero 25 12:00 UTC

WPS genera los siguientes archivos:

- *met\_em.d01.2017-01-24\_12:00:00.nc*
- *met\_em.d01.2017-01-24\_18:00:00.nc*
- *met\_em.d01.2017-01-25\_00:00:00.nc*
- *met\_em.d01.2017-01-25\_06:00:00.nc*
- *met\_em.d01.2017-01-25\_12:00:00.nc*

La convención en el uso de "*met*" indica que los outputs generados por el componente metgrib.exe de WPS.

La parte "*d01*" en el nombre identifica el dominio de pertenencia. El modelo WRF permite trabajar con varios dominios anidados, sin embargo, en el presente trabajo no se usó esa característica.

El flujo de datos de WPS es el descrito en la figura 2.7.

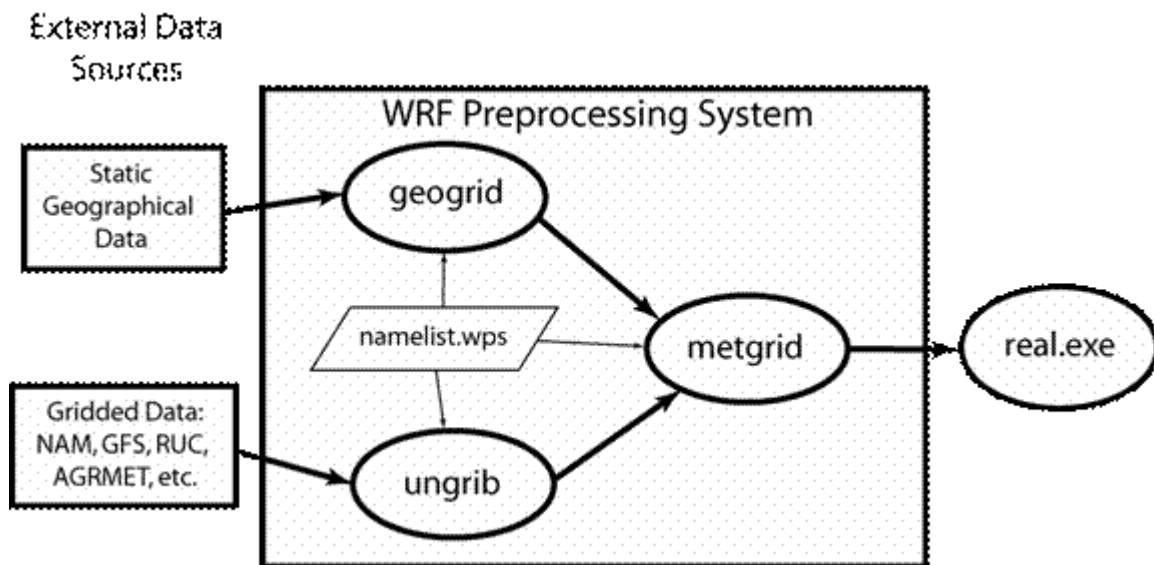


Figura 2.7: WPS

### 2.9.2. Procesamiento: 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.

Para la versión de WRF 3.6.1 se compone de cinco programas.



```
[lvargas@mendieta wrf_mendieta]ls -l WRF3.6.1/WRFV3/main/*.exe
-rwxrwxr-x 1 lvargas lvargas 30919176 Mar  6 00:21 WRF3.6.1/WRFV3/main/ndown.exe
-rwxrwxr-x 1 lvargas lvargas 30353952 Mar  6 00:22 WRF3.6.1/WRFV3/main/nup.exe
-rwxrwxr-x 1 lvargas lvargas 30800296 Mar  6 00:22 WRF3.6.1/WRFV3/main/real.exe
-rwxrwxr-x 1 lvargas lvargas 30469232 Mar  6 00:22 WRF3.6.1/WRFV3/main/tc.exe
-rwxrwxr-x 1 lvargas lvargas 35527904 Mar  6 00:21 WRF3.6.1/WRFV3/main/wrf.exe
```

Para las simulaciones realizadas en el presente trabajo solo se utilizan los siguientes:

*real.exe*: Este programa es el que toma como inputs datos de observaciones reales previamente pre-procesados y formateados a formato NetCDF por parte de WPS.

El programa *real.exe* genera 2 outputs, los archivos “*wrfinput\_d01*” y “*wrfbdy\_d01*” los cuales son inputs para *wrf.exe*.

*wrf.exe*: es el core de toda la simulación, es un programa altamente paralelizable. Un cómputo de este programa puede durar muchas horas si no se explota su capacidad de ejecutar en paralelo, para lo cual es crucial aprovechar al máximo las herramientas de paralelismo que dicho programa soporta. Para el ejemplo anteriormente visto generaría un único output:

El archivo *wrfout\_d01:2000-01-24\_12:00:00*, el cual contiene un pronóstico de 24hs. con un tiempo de intervalo de 3hs.

Algunas de las características principales de WRF 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 subgrilla 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.

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.

Para representar datos físicos como la velocidad o la masa se utilizan grillas o matrices del tipo Arakawa. Existen 5 tipos. WRF utiliza la clase C. Por ejemplo, para modelar cantidades vectoriales como la velocidad en dirección norte-sur (variable  $v$ ) y la velocidad en dirección este-oeste (variable  $u$ ) y la masa (variable  $h$ ) se evalúan las componentes en el centro de los lados izquierdo y derecho de la celda, mientras que para las componentes de  $v$  la evaluación podría ser en el centro del lado superior e inferior de la celda.

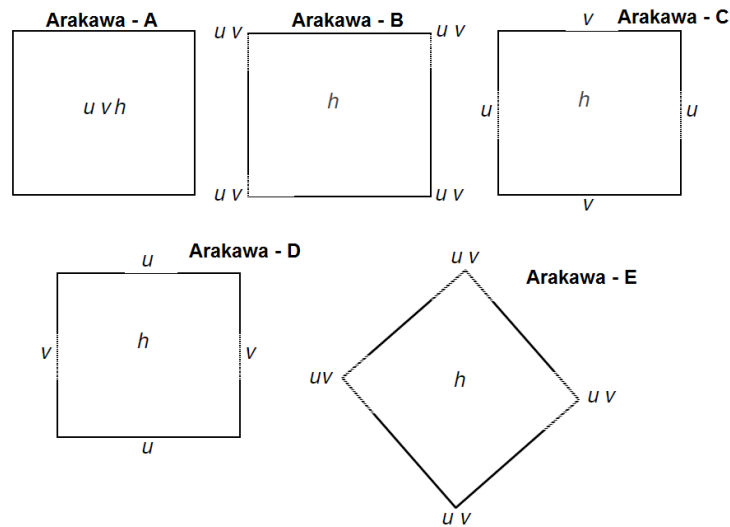


Figura 2.8: Grillas de tipo Arakawa

### **2.9.3. Post Procesamiento: ARWpost**

El pronóstico generado por WRF-ARW, para nuestro ejemplo el archivo: *wrfout\_d01:2000-01-24\_12:00:00* necesita ser post-procesado para poder obtener datos en texto plano o mapas que grafiquen el pronóstico. Para ello se utiliza ARWpost que es un programa desarrollado en Fortran que toma como input la salida generada por del WRF-ARW y genera las salidas necesarias para ser interpretado por GrADS.

## **2.10. GrADS**

El Grid Analysis and Display System (GrADS) es una herramienta que se utiliza para la manipulación y la visualización de datos de ciencias de la tierra. GrADS tiene dos modelos de datos para manejar los datos de la cuadrícula y de la estación. GrADS soporta muchos formatos de archivo de datos, incluyendo NetCDF, HDF (versión 4 y 5). GrADS se ha implementado en todo el mundo en una variedad de sistemas operativos de uso común y se distribuye libremente a través de Internet.

Las operaciones se ejecutan interactivamente introduciendo expresiones similares a FORTRAN en la línea de comandos. Un rico conjunto de funciones integradas se proporciona, pero los usuarios también pueden agregar sus propias funciones como rutinas externas escritas en cualquier lenguaje de programación.

Los datos pueden mostrarse utilizando una variedad de técnicas gráficas: gráficos de líneas y barras, diagramas de dispersión, contornos suavizados, contornos sombreados, líneas de corriente, vectores de viento, cuadros de rejilla, cuadros de rejilla sombreada y diagramas de modelo de estación. Los gráficos pueden imprimirse en PostScript o en formatos de imagen.

GrADS tiene una interfaz programable (lenguaje de scripting) que permite sofisticadas aplicaciones de análisis y visualización.

GrADS genera además meteogramas. Un meteograma es una gráfica donde se representan la evolución temporal de una o varias variables meteorológicas de un punto determinado. Las

variables a presentar pueden ser de superficie o de altura del punto considerado. Inicialmente, los meteogramas se utilizaron para representar la evolución de los datos de superficie suministrados por una estación donde se realizaban observaciones convencionales (temperatura, nubosidad, viento, etc.). Un meteograma también puede ser utilizado para representar datos en la vertical de estaciones que realizan tomas de información en altura mediante, por ejemplo, radiosondeos. La llegada de los modelos numéricos y la mejora de las técnicas de post-proceso. Mediante técnicas de interpolación y ajustes estadísticos y climatológicos es posible obtener salidas sobre puntos conocidos y asociados a ciudades, aeropuertos, etc.

A continuación, se puede ver en la figura 2.9 un diagrama general de la estructura de WRF y sus dependencias. Se remarcaron los componentes utilizados en el presente trabajo.

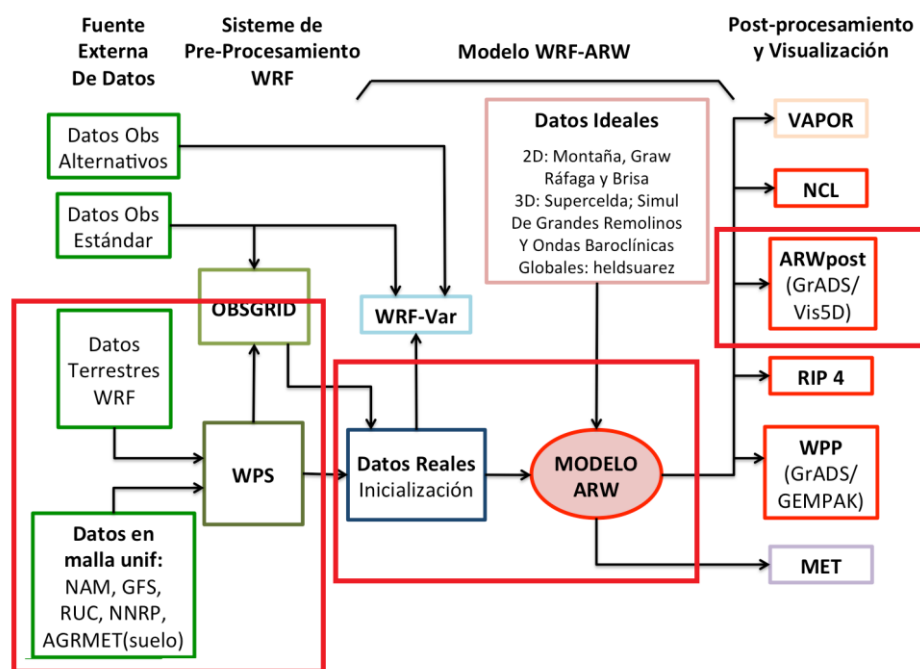


Figura 2.9: Arquitectura de WRF + ARWPost + GrADS

## 3. Fundamentos de computación paralela & HPC

### 3.1. Fundamentos

La idea de performance computacional puede ser entendida como la rapidez o la mejora en el desempeño que se puede obtener en la ejecución de un programa. Se basa en la mejoras y técnicas computacionales aplicadas de manera tal que los resultados que dicho programa genera sean accesibles en un tiempo considerablemente útil.

Dichas técnicas consistían inicialmente en el incremento en la cantidad de transistores contenidos en una unidad de procesamiento (chip-CPU). El escalamiento en la cantidad de transistores proporcionó un incremento en la performance y fue básicamente posible debido a que el costo del incremento en performance (aumentando la densidad de los transistores) era más bajo que el costo del desarrollo computacional (software), es decir, si la performance escala más rápido que el costo computacional, es posible computar grandes volúmenes de cálculos donde antes no era económicamente rentable o donde el tiempo de cómputo era extremadamente alto.

Esta idea de incremento en la performance computacional fue plasmada en 1965 por Gordon E. Moore en su famosa Ley de Moore [23], la cual establece que la cantidad de transistores por chip se duplicaría cada 12 o 24 meses. El reducir estas escalas (o aumentar la densidad) en los transistores deriva en una mayor rapidez en el flujo de datos que son transferidos en el transistor. La figura 3.1 Muestra que en la actualidad la cantidad de transistores en un procesador ronda los dos mil millones. Esto es posible reduciendo la superficie de dichos transistores al orden de los nanómetros. Intel declaró en 2014 haber alcanzado la escala de los 14nm (14 milmillonésima parte de un metro) Obteniendo una mejora de 0.7x respecto a la tecnología anterior (22nm) y esta compañía ha anunciado el desarrollo de transistores en la escala de los 10nm para el año 2022.

## Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law

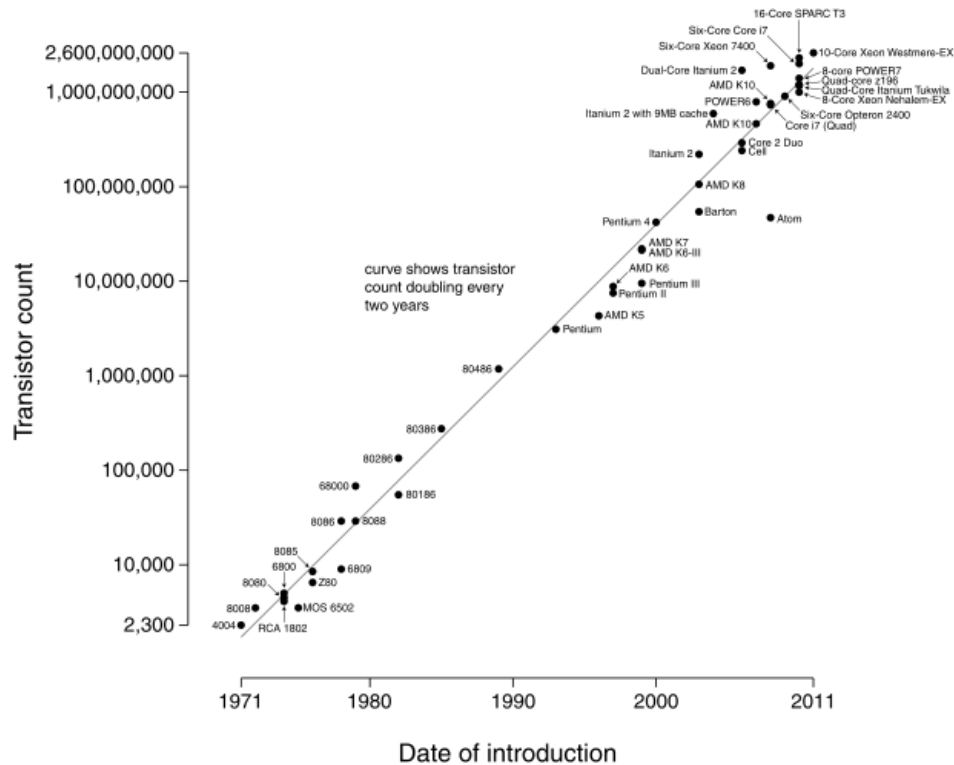


Figura 3.1: Evolución de la ley de Moore

Sin embargo, desde mediados de la primera década del siglo XXI se hizo visible claramente que la ley de Moore se encontraba frente un fin cercano, debido a dos causas obvias: 1) la imposibilidad de reducir el área de los transistores a escalas sumamente pequeñas, es decir se está alcanzando los límites físicos en cuanto a la reducción de los transistores y 2) Debido al problema del aumento de la temperatura en los transistores o la degradación de la eficiencia energética.

Esto indica que la performance que se requiere ya no puede obtenerse únicamente a través del incremento en la densidad de transistores.

Lo cual impulsó la implementación de nuevas técnicas, entre las cuales, predomina actualmente incrementar la cantidad de unidades de procesamiento de manera masiva. Es decir, incrementar el paralelismo del cómputo. Esto se logra en primera instancia agregando más cores a un

procesador (multicore) y en segunda instancia proveyendo múltiples procesadores multicore en la computadora.

En la figura 3.2 se puede ver la estructura de un procesador multicore moderno (XEON E5 2600 - utilizado en Mendieta) el cual cuenta con 8 unidades de procesamiento (cores).

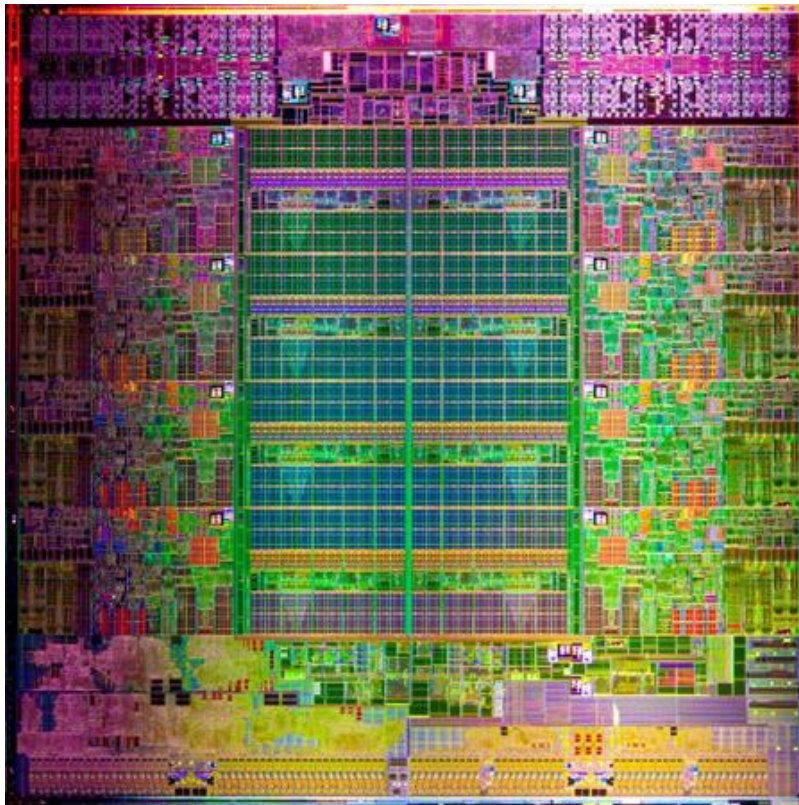


Figura 3.2: Die del Procesador Xeon E5 2600



Cada unidad de procesamiento tiene una estructura como la siguiente (figura 3.3) donde se puede apreciar que hay un importante uso de espacio dedicado a memorias caches. Esto es para reducir la latencia que generan los accesos a memoria principal.

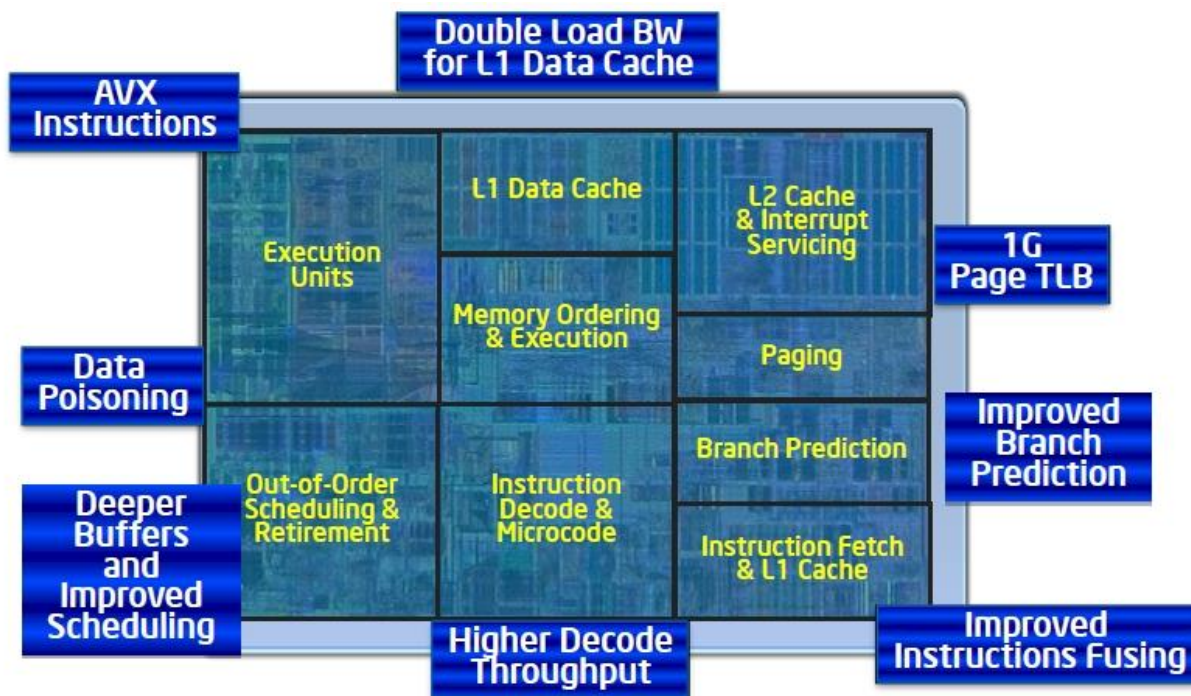


Figura 3.3: Core de un Procesador Xeon E5 2600-V2

Un paso siguiente en el nivel de paralelismo consistió en lograr desarrollar tecnologías de comunicación más eficientes para poder conectar múltiples computadoras a través de un bus de alta velocidad y de esa manera lograr ejecutar un software de manera distribuida y concurrente. Esto es conocido como computación distribuida o clúster de computadoras.

Un clúster dedicado a cómputo tiene en el orden de centenas a millones de procesadores como los señalados en el párrafo anterior.

En la actualidad un clúster dedicado a cómputo puede realizar operaciones en el orden de los TFLOPS ( $10^{12}$  FLOPS) alcanzando picos en el orden de los PFLOPS ( $10^{15}$  FLOPS).

La lista de supercomputadoras más potentes del mundo reportó a noviembre de 2016 que la supercomputadora más potente; la china *Sunway TaihuLight* soporta un rendimiento teórico pico de 125 PFLOPS y ha alcanzado al día de la fecha un rendimiento real de 93 PFLOPS. Para dicho

cálculo se utilizó como benchmarking el software para medir rendimiento computacional LINPACK [24].

Ranking	Ubicación/ País	Sistema	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Energía (kW)
1	National supercomputing Center in Wuxi/ China	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway	10649600	93014.6	125435.9	15371
2	National Super Computer Center in Guangzhou/ China	Tianhe-2 (MilkyWay- 2) - TH-IVB- FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692 12C 2.200GHz, TH Express- 2, Intel Xeon Phi 31S1P	3120000	33862.7	54902.4	17808
3	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory/ EEUU	Titan - Cray XK7, Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x	560640	17590	27112.5	8209
4	DOE/NNSA/LL NL/ EEUU	Sequoia - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom	1572864	17173.2	20132.7	7890
5	DOE/SC/LBNL/ NERSC/ EEUU	Cori - Cray XC40, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Aries interconnect	622336	14014.7	27880.7	3939

Tabla 3.1: Ranking con las 5 supercomputadoras más poderosas del mundo

La cantidad de FLOPS puede ser calculada con la siguiente fórmula:

$$\text{FLOPS} = \text{sockets} \times \frac{\text{cores}}{\text{socket}} \times \text{clock} \times \frac{\text{FLOPs}}{\text{cycle}}$$

Estos clústeres dedicados a cómputo también han ido incorporando nuevas arquitecturas computacionales tales como coprocesadores de cómputo masivo, placas aceleradoras, GPU, etc., y también desarrollando nuevos algoritmos, lenguajes y librerías de computación paralela para dichas arquitecturas.

Con el advenimiento de nuevas demandas en diversos sectores empresariales e industriales sumado al desarrollo tecnológico fue posible realizar computaciones que años atrás hubiesen sido física y económicamente imposible.

La disciplina que desarrolla la computación paralela en clústeres es conocida como *computación de alto desempeño* (high performance computing/HPC).

Algunas áreas de aplicación del HPC:

- Simulaciones de fenómenos físicos
- Simulaciones de fenómenos ambientales
- Industria militar
- Industria petrolífera
- Industria de 3D/gaming

Entre otras.

## 3.2. Niveles de paralelismo

Teniendo en cuenta que el paralelismo es la fuente que proporciona performance, es necesario entender las técnicas existentes para explotarlo al máximo. El mismo se puede extraer en varios niveles al momento de la ejecución de un programa.

### 3.2.1. Paralelismo a nivel de instrucciones (ILP: Instruction level parallelism)

El paralelismo a nivel de instrucción (ILP) consiste en el conjunto de técnicas que posibilitan que múltiples instrucciones independientes entre sí sean ejecutadas de forma concurrente en la unidad de procesamiento (core).

Existen dos enfoques para el paralelismo del nivel de instrucción:

- Hardware
- Software

El nivel de hardware funciona en paralelismo dinámico mientras que el nivel de software trabaja en paralelismo estático. Paralelismo dinámico significa que el procesador decide en tiempo de ejecución qué instrucciones ejecutar en paralelo, mientras que el paralelismo estático significa que el compilador decide qué instrucciones ejecutar en paralelo.

Considere el siguiente programa:

1:  $E = a + b$

2:  $F = c + d$

3:  $M = e * f$

La operación 3 depende de los resultados de las operaciones 1 y 2, por lo que no puede calcularse hasta que ambos se completen. Sin embargo, las operaciones 1 y 2 no dependen de ninguna otra operación, por lo que se pueden calcular simultáneamente. Si asumimos que cada operación puede ser completada en una unidad de tiempo, entonces estas tres instrucciones pueden ser completadas en un total de dos unidades de tiempo, dando un ILP de 3/2.

Un objetivo de los diseñadores de compiladores y procesadores es identificar y aprovechar tanto ILP como sea posible. Los programas ordinarios se escriben normalmente bajo un modelo de

ejecución secuencial en el que las instrucciones se ejecutan una tras otra y en el orden especificado por el programador. ILP permite al compilador y al procesador superponer la ejecución de varias instrucciones o incluso cambiar el orden en que se ejecutan las instrucciones.

Las técnicas que se utilizan para explotar el ILP incluyen:

- Instruction pipeling: La ejecución de múltiples instrucciones puede ser parcialmente solapada.
- Ejecución superscalar: Se utilizan múltiples unidades de ejecución para ejecutar múltiples instrucciones en paralelo.
- Ejecución Fuera de orden: Las instrucciones se ejecutan en cualquier orden que no viole dependencias de datos. Esta técnica es independiente tanto de pipeling y superscalar. Las implementaciones actuales de ejecución fuera de orden de forma dinámica (es decir, mientras el programa se ejecuta y sin ninguna ayuda del compilador) extraen ILP de programas ordinarios. Una alternativa es extraer este paralelismo en tiempo de compilación y de alguna manera transmitir esta información al hardware. Debido a la complejidad de escalar la técnica de ejecución fuera de orden, la industria ha reexaminado conjuntos de instrucciones que codifican explícitamente múltiples operaciones independientes por instrucción.
- Cambio de nombre de registros: Se refiere a una técnica utilizada para evitar la serialización innecesaria de las operaciones del programa impuestas por la reutilización de registros por esas operaciones, que se utiliza para permitir la ejecución fuera de orden.
- Ejecución especulativa: Permite la ejecución de instrucciones completas o partes de instrucciones antes de estar seguro de si esta ejecución debe tener lugar. Una forma comúnmente utilizada de ejecución especulativa es la especulación de flujo de control en la que se ejecutan instrucciones pasadas una instrucción de flujo de control (por ejemplo, una rama) antes de que se determine el objetivo de la instrucción de flujo de control. Varias formas de ejecución especulativa han sido propuestas y están en uso incluyendo la ejecución especulativa impulsada por predicción de valores, predicción de dependencia de memoria y predicción de latencia de caché.

- Branch prediction: Se utiliza para evitar el bloqueo para que las dependencias de control sean resueltas. Branch prediction se utiliza junto con la ejecución especulativa.

ILP es explotado tanto por el compilador como por el procesador. Algunas técnicas de optimización para extraer ILP disponible en tiempo de compilación incluyen programación, como loop-unrolling, o estrategias que favorecen la localidad espacial y temporal de los accesos a memoria.

Tal como se detalló en la sección 3.1. ILP encuentra límites tanto en las optimizaciones de compilación como en las optimizaciones provistas por el procesador, tales como la creciente disparidad entre las frecuencias operativas del procesador y los tiempos de acceso a la memoria (este problema es conocido como *memory wall*). Aunque en principio es posible utilizar ILP para tolerar incluso tales latencias de memoria, los costes asociados de disipación de energía son desproporcionados. Además, la complejidad y frecuentemente la latencia de las estructuras de hardware subyacentes reducen la frecuencia de operación y reducen aún más los beneficios. Por lo tanto, las técnicas mencionadas resultan inadecuadas para impedir que la CPU se bloquee mientras se accede a los datos en memoria. En su lugar la industria se dirige hacia la explotación de niveles más altos de paralelismo que pueden ser explotados a través de técnicas como el multiprocesamiento y el multithreading. Es decir, el máximo posible del performance es extraído a partir del paralelismo masivo que proporcionan los niveles de DTL y TLP.

### **3.2.2 Paralelismo a nivel de datos (DLP: Data level Parallelism o SIMD)**

En computación, DLP o SIMD (del inglés Single Instruction, Multiple Data, en español: "una instrucción, múltiples datos") es una técnica empleada para conseguir paralelismo a nivel de datos. La técnica SIMD consiste en ejecutar las mismas instrucciones sobre conjuntos grandes de datos. Es una organización en donde una única unidad de control común despacha las instrucciones a diferentes unidades de procesamiento. Todas éstas reciben la misma instrucción, pero operan sobre diferentes conjuntos de datos. Es decir, la misma instrucción es ejecutada de manera sincronizada por todas las unidades de procesamiento.

La figura 3.4 muestra como el mismo conjunto de datos puede ser procesado en paralelo por varias unidades de procesamiento aplicando las mismas instrucciones sobre distintos datos.

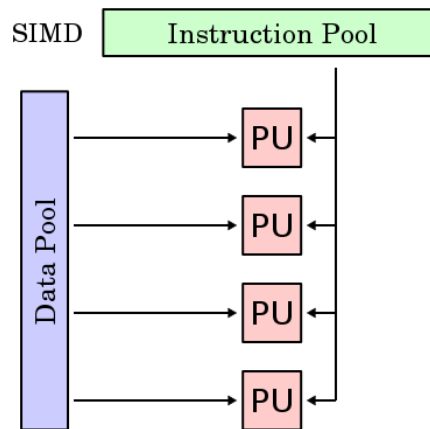


Figura 3.4: SIMD

Como se mencionó en la sección 2.3, WRF discretiza el dominio de simulación en grillas o matrices. Durante la etapa de procesamiento de datos WRF aplica a cada una de las celdas de las grillas ecuaciones de diferenciación que producen valores que representan el estado pronosticado para cada una de esas celdas. Estas operaciones (ecuaciones) son aplicadas en paralelo a toda la grilla. Mendieta cuenta además con unidades de procesamiento masivo como placas GPU y coprocesadores Xeon-Phi, los cuales están diseñados para explotar al máximo el paralelismo a nivel de datos, sin embargo, la implementación de WRF para ejecutar en dichas arquitecturas está fuera del alcance del presente trabajo.

### 3.2.3 Paralelismo a nivel de threads (TLP: Thread level Parallelism)

En un sistema multiprocesador, el paralelismo de tareas se logra cuando cada procesador ejecuta un proceso o thread diferente sobre los mismos o diferentes datos. Los threads pueden ejecutar el mismo código o código diferente. En el caso general, los hilos de ejecución diferentes se comunican entre sí a medida que se ejecutan. La comunicación se puede realizar a través de espacios de memoria compartida o a través envío de mensajes entre procesos.

Como ejemplo simple, si un sistema está ejecutando código en un sistema de 2 procesadores (CPUs "a" y "b") en un entorno paralelo y deseamos hacer las tareas "A" y "B", suponiendo que no existe dependencia de datos entre ellas, es posible decir CPU "a" para hacer la tarea "A" y la CPU "b" para hacer la tarea "B" simultáneamente, reduciendo así el tiempo de ejecución de la ejecución.

En Mendieta este tipo de paralelismo se manifiesta claramente cuando se ejecutan procesos MPI entre los nodos de la partición *multi* y también cuando se ejecutan threads de OpenMP en un solo nodo.

### 3.3. Speedup y eficiencia

Además de considerar la reducción del tiempo como valor principal en la obtención de mejora en la performance de la ejecución de un programa, también es interesante analizar con qué comportamiento se produce dicha mejora [25].

**Speedup:** Es una medida que indica de qué manera mejora la velocidad de ejecución de un programa cuando se ejecuta sobre una arquitectura paralela. Para el caso concreto de Mendieta calculamos el speedup tomando como unidad de procesamiento los nodos de la partición *multi*. Esto es el tiempo de procesamiento partiendo de un nodo sobre N nodos. La fórmula general tiene la siguiente forma: donde  $T_1$  es el tiempo de ejecución en unidad de procesamiento y  $T_p$  es el tiempo de ejecución en P unidades de procesamiento.

$$\text{speedup} = S_p = \frac{T_1}{T_p}$$

**Eficiencia:** Es un valor normalizado del speedup. Es una medida relativa que permite la comparación de desempeño en diferentes entornos de computación paralela. Valores de



eficiencia inferiores a 1 denotan un speedup sublineal. Valores superiores a 1 denotan speedup supralineal.

$$\text{efficiency} = \frac{S_p}{P} = \frac{T_1}{PT_p}$$

### 3.4. ccNUMA

Como se mencionó en la sección 3.1. la performance en cómputo es actualmente obtenida en base a paralelismo masivo, el cual es obtenido a través de arquitecturas con múltiples unidades de procesamiento.

Sin embargo, este tipo de arquitectura de procesamiento genera muchos más accesos a memoria, incrementando el fenómeno de *memory wall*. Para mitigar este problema actualmente existen dos tipos de arquitectura para memoria de acceso en paralelo.

- Arquitectura de memoria distribuida: es la arquitectura usada en clúster, en la cual múltiples nodos comparten datos a través de una conexión en una red de alta velocidad.
- Arquitectura de memoria compartida: es la memoria usada internamente en un único nodo. Dicho nodo puede estar compuesto por varias CPUs y cada CPU tiene su propia memoria.

Existen dos tipos de implementaciones: UMA y NUMA.

Con UMA (Uniform Memory Access) el acceso a memoria se realiza a través de un controlador denominado Memory Controller Hub (MCH). Este tipo de arquitectura limita la escalabilidad, el ancho de banda de memoria (bandwidth) y genera más latencia, debido a que el MCH está conectado a un controlador a través de un bus, el cual, para cada comunicación, los CPUs necesitan tomar el control generando que otros CPUs deban esperar para acceder a memoria. Esto es un cuello de botella para el cómputo.

Para resolver este problema surgió la arquitectura NUMA <sup>[26]</sup> (Non Uniform Access Memory). Este tipo de arquitectura no usa un sistema centralizado de acceso a memoria, sino que permite a cada CPU utilizar su propia memoria, además de acceder a secciones de memoria remota que pertenecen a otra CPU. La figura 3.5 muestra que tanto la CPU 1 como la CPU 2 pueden acceder a su propia memoria como así también a la memoria remota del otro CPU.

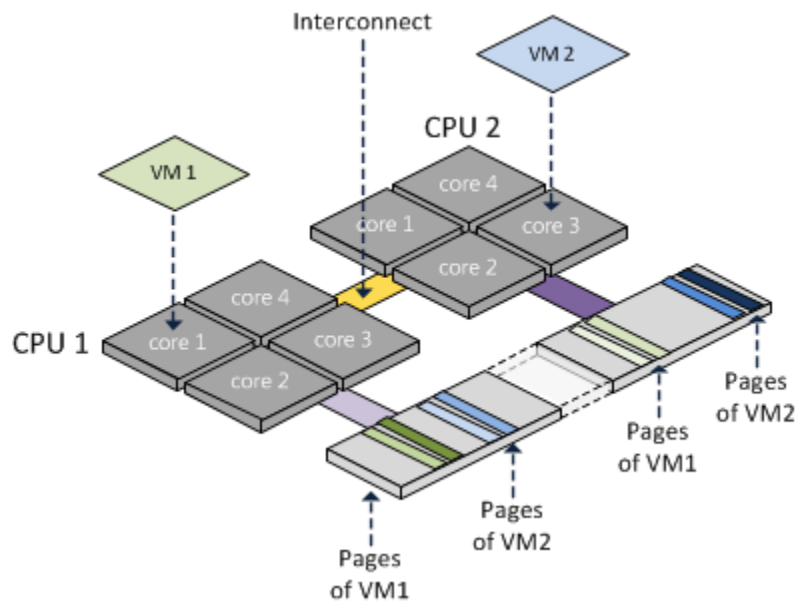


Figura 3.5: Arquitectura NUMA

De esta manera existen dos clasificaciones de memoria relativa a cada CPU: local y remota. Los accesos a memoria local proporcionan una mayor performance y se reduce considerablemente la latencia al reducir los accesos a memoria remota. Estos tiempos de acceso son considerablemente diferentes, lo cual explica la no uniformidad. Para evitar problemas de coherencia en las cache de cada memoria, se utilizan algoritmos sofisticados. De este modo NUMA es además en la actualidad conocido como ccNUMA (Cache-Coherent Non-Uniform Memory Access). WRF está implementado para aprovechar tanto la arquitectura de memoria distribuida como así también la arquitectura de memoria compartida. Mendieta por otro lado está configurado para usar ccNUMA.

La figura 3.6. muestra la arquitectura de memoria NUMA de un nodo de Mendieta.

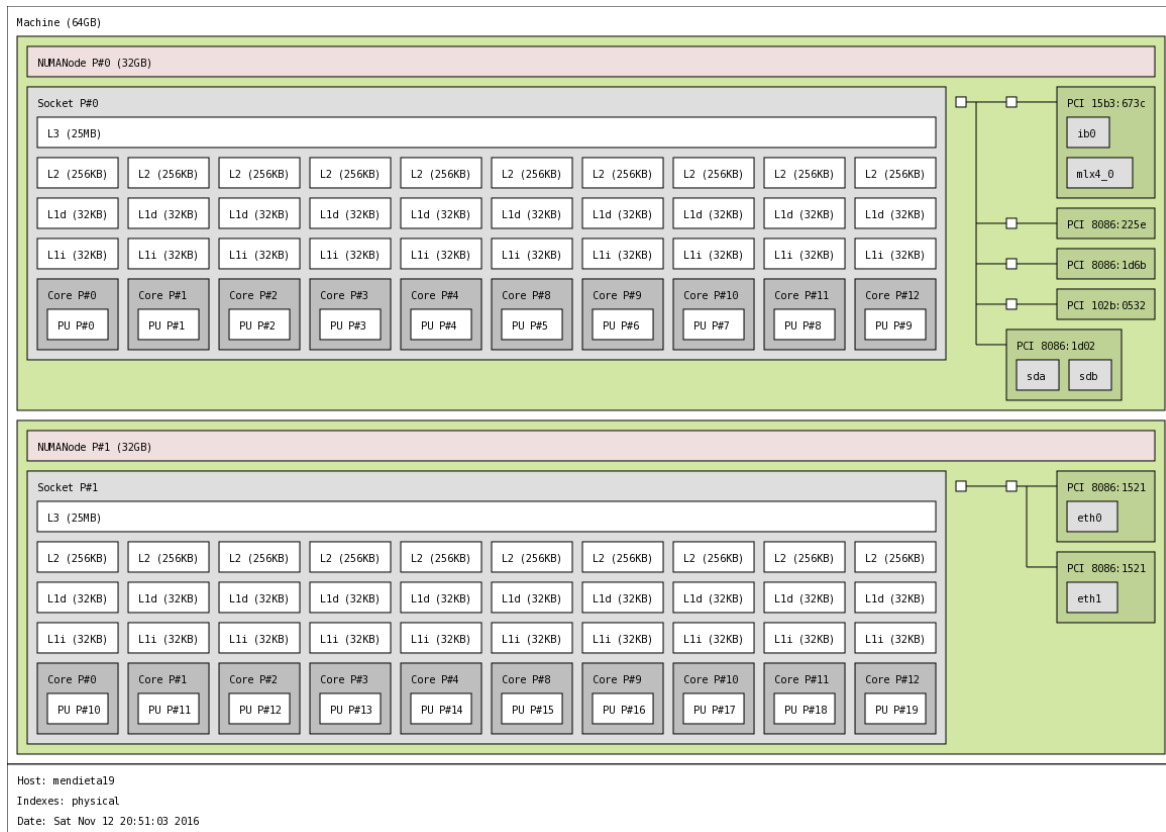


Figura 3.6: Topología de un nodo de la partición *muti* de Mendieta

## 4. Herramientas de paralelismo aplicados

### 4.1. Mendieta

A continuación, se detalla brevemente la estructura del clúster de cómputo de Mendieta.

La estructura actual de Mendieta es similar a la presentada en la figura 4.1.

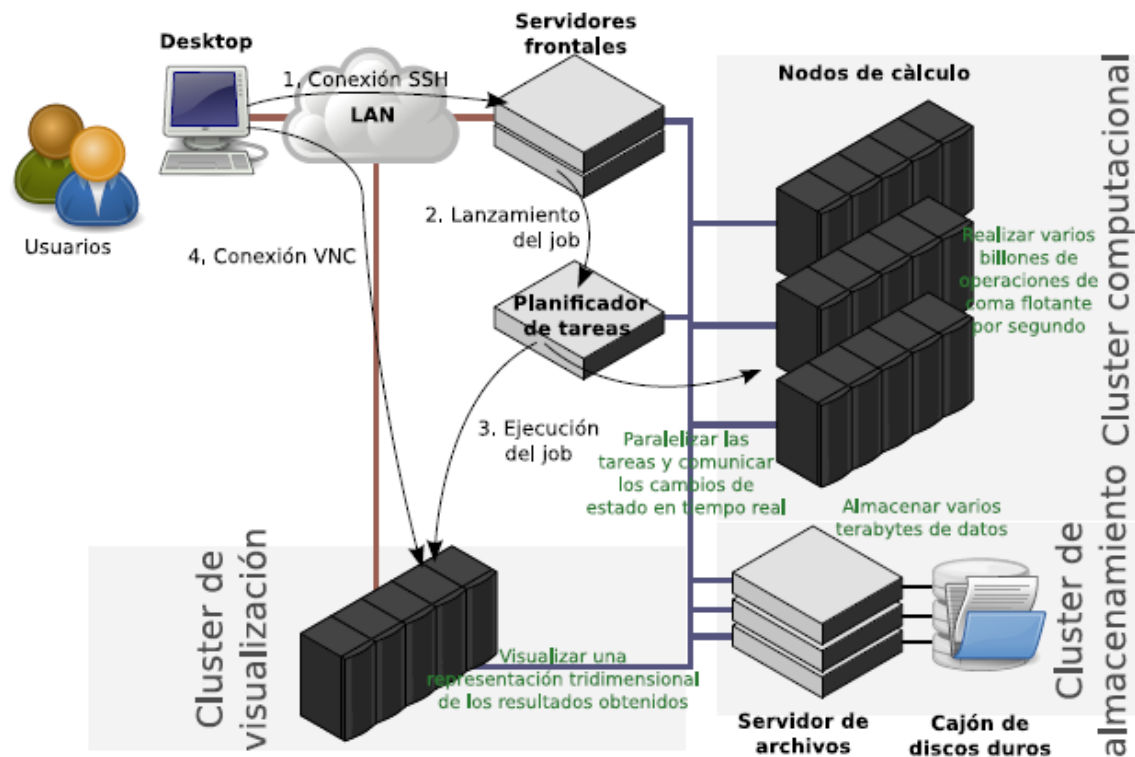


Figura 4.1: Estructura de un clúster similar a Mendieta

Mendieta está compuesto actualmente por 23 nodos dedicados a cómputo [27], denominados Mendieta01 hasta Mendieta23.

Se accede al clúster remotamente a través de SSH a el servidor header (Mendieta), en el cual se encuentran las cuentas de cada usuario.

Los nodos de Mendieta fueron incorporados en dos etapas [28]:

Primera etapa, 8 nodos:

- 2 procesadores Intel Xeon E5-2680 de 8 cores cada uno a 2.7 GHz.
- 64 GiB DDR3 a 1333 MHz.

Segunda etapa, 14 nodos:

- 2 procesadores Intel Xeon E5-2680 v2 de 10 cores cada uno a 2.8 GHz.
- 64 GiB DDR3 a 1600 MHz.

Aceleradoras:

- 12 aceleradoras NVIDIA Tesla M2090 con 6 GiB de memoria GDDR5.
- 8 aceleradoras NVIDIA Tesla K20x con 6 GiB de memoria GDDR5.
- 14 aceleradoras Intel Xeon Phi 31S1P, con 8 GiB de memoria GDDR5.

Cuenta además con servidores de archivos (NAS), los cuales alojan los datos producidos por las computaciones.

Para ejecutar programas que requieran más de un nodo, estos se comunican entre sí a través de una red de alta velocidad Infiniband.

La primer etapa del mismo entró en funcionamiento el 7 de Mayo de 2013 con fondos aportados por la Facultad de Matemática, Astronomía y Física (FaMAF) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), y los Instituto de Física Enrique Gaviola (IFEG) e Instituto de Astronomía Teórico y Experimental (IATE), dependientes del CONICET.

La segunda etapa licitada y adjudicada por el Centro de Computación de Alto Desempeño (CCAD) de la UNC, con fondos provenientes del Sistema Nacional de Computación de Alto Desempeño (SNCAD) del Ministerio de Ciencia y Tecnología, fue puesta en funcionamiento el 6 de junio de 2014.

## 4.2. Lista de herramientas y tecnologías utilizadas en Mendieta

A continuación, se detalla la lista de herramientas y tecnologías que se utilizaron en Mendieta para poder instalar, ejecutar y analizar performance de WRF.

- SLURM
- Environment Modules
- MPI
- OpenMP
- ZLIB
- HDF5
- NetCDF
- NetCDF-Fortran
- WPS
- WRF
- ARWPost
- GrADS
- Perf
- Numactl
- Numastat

### 4.2.1. SLURM

Este software está instalado en Mendieta y es la interface entre el usuario y el sistema de cómputo. Provee un conjunto de instrucciones que permiten alocar recursos en el clúster.

SLURM utiliza el concepto de *partición* para agrupar los nodos que el clúster provee. Dependiendo de la arquitectura de los nodos, SLURM define para Mendieta las siguientes particiones:<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Las particiones no son disjuntas

- Multi: 14 nodos con 20 cores por nodo (máximo hasta 8 nodos por job).
- Phi: 14 nodos con 57 cores por nodo, 7 GiB de RAM.
- Mono: 9 nodos con 8 cores por nodo (sólo se puede pedir un nodo por job).

Luego de definir qué partición usar, se deben setear algunas configuraciones que determinan la ejecución del programa. Esta ejecución se denomina *job*.

Ejemplo de asignación de recursos para WRF en 2 nodos (con un total de 40 cores) de la partición *Multi*:

```
#SBATCH --mail-user=lvc0107@famaf.unc.edu.ar
#SBATCH --job-name=WRF
#SBATCH --partition=multi
#SBATCH --exclusive

#SBATCH --nodes=2
#SBATCH --ntasks-per-node=20

### Execution Time. Format: days-hours:minutes. Max time: Four days.
#SBATCH --time 0-2:30
```

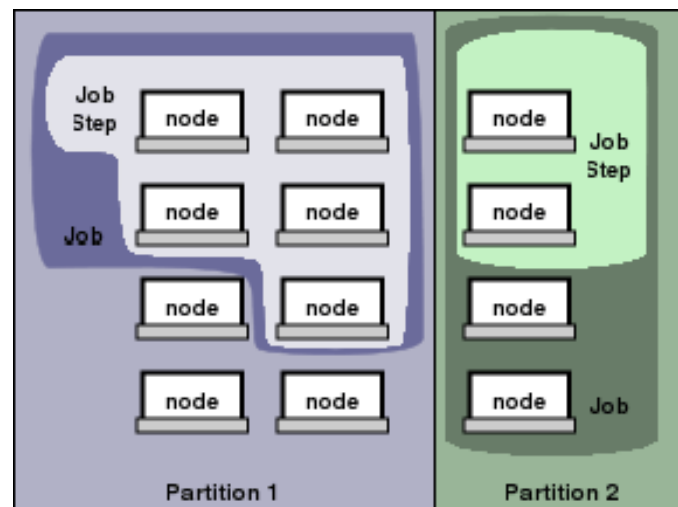


Figura 4.10: Modelo de particiones que utiliza SLURM

SLURM utiliza el concepto de cola de trabajos. Cuando un job solicita recursos del clúster, SLURM chequea si existen nodos libres para ser utilizados. En caso de que existan nodos disponibles se los asigna al job que los solicitó, en caso contrario deja el job en una cola de espera hasta que los recursos estén disponibles.

#### **4.2.2. Environment Modules**

Este software también se encuentra instalado en Mendieta. Es una herramienta que permite cargar variables de entorno de manera dinámica. Es necesaria utilizarla para cargar en el entorno de ejecución variables con los path que apunten a las herramientas instaladas en Mendieta como NetCDF, HDF5 y Open MPI. Si no se cargan dichas variables no se pueden usar las dependencias que necesita WRF.

#### **4.2.3. MPI**

MPI (Message Passing Interface) [29] es la tecnología que posibilita realizar la computación distribuida a través de todos los nodos del clúster. Es una especificación estándar basada en el modelo comunicación de procesos a través de pasaje de mensajes. Cuenta con varias implementaciones tales como Open MPI, Intel MPI, MVAPICH entre otras. En este momento Mendieta cuenta con la implementación Open MPI compilada con gcc.

La figura 4.3 muestra un esquema de cómo se comunican dos procesos ejecutados en máquinas A y B a través de la APIs *send()* y *recv()*.



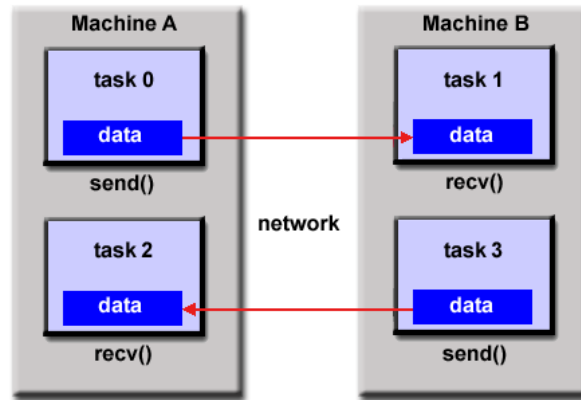


Figura 4.3: Modelo de MPI

#### 4.2.4. OpenMP

OpenMP provee una interfaz para dotar de paralelismo a nivel de datos usando threads de una manera altamente eficiente y rápida utilizando directivas de compilación: *pragmas* en secciones de código que ejecuten loops. Se basa en el modelo fork-join, paradigma que proviene de los sistemas Unix, donde una tarea muy pesada se divide en K threads (fork) con menor peso, para luego "recolectar" sus resultados al final y unirlos en un solo resultado (join).

El código que se ejecuta en paralelo es sincronizado a través de instrucciones de barreras.

Si WRF es ejecutado en una arquitectura single-node, en el cual no hay latencia de I/O durante el cómputo, los threads de OpenMP proveen ciertas ventajas por sobre la librería de procesos de MPI ya que se basa en el modelo de memoria compartida, es decir todos los threads comparten el mismo espacio de memoria, lo que implica una mayor eficiencia por sobre los procesos de MPI que deben compartir información a través del envío de mensaje entre ellos usando el modelo de memoria distribuida (cada nodo cuenta con su propia memoria).

Es importante destacar que, en un clúster compuesto de múltiples nodos, la única forma de distribuir las tareas, es a través del uso de procesos MPI, el modelo de OpenMP no escala a más de un nodo.

Es importante destacar que los compiladores instalados en Mendieta (gcc, icc, gfortran, ifort, etc) implementan su librería de OpenMP.

Un ejemplo de código OpenMP escrito en fortran es el siguiente:

```
program omp_par_do
  implicit none

  integer, parameter :: n = 100
  real, dimension(n) :: dat, result
  integer :: i

  !$OMP PARALLEL DO
  do i = 1, n
    result(i) = my_function(dat(i))
  end do
  !$OMP END PARALLEL DO

contains

  function my_function(d) result(y)
    real, intent(in) :: d
    real :: y

    ! do something complex with data to calculate y
  end function my_function

end program omp_par_do
```

El código descrito ejecuta de forma paralela la función *my\_function(d)* para cada elemento *d* de la estructura de datos *dat*.

#### 4.2.5. WRF + Dependencias

Para la implementación de WRF se usaron los siguientes programas:

- Procesamiento: WRF3.6.1
- Pre-procesamiento: WPS3.6.1
- Post-procesamiento: ARWpost\_V3

Cuyas dependencias son las siguientes:

Instaladas en Mendieta:

- Zlib
- NetCDF/NetCDF-Fortran
- HDF5
- Open MPI

No instaladas en Mendieta:

- JasPer: Herramienta adicional para pre-procesamiento
- GrADS: Herramienta adicional para post-procesamiento

WRF manipula sus datos utilizando formatos provistos por el conjunto de librerías NetCDF [30]. Estos formatos son provistos a través de librerías estáticas escritas en C (libnetcdf.a) y fortran (libnetcdff.a). Para la implementación de WRF necesitamos linkear contra las librerías escritas en fortran usando el flag de linkeo **-lnetcdff**.

NetCDF soporta tres tipos de formatos, entre los cuales se destaca el formato para archivos de datos HDF5 que es el que utiliza WRF. En la figura 4.2 se puede visualizar la estructura de NetCDF, en la cuál se destacan los módulos y dependencias que se utilizaron para WRF. Este conjunto de librerías se encuentra disponible en Mendieta y puede accederse a través del gestor de módulos ejecutando el siguiente comando:

```
module load netcdf-fortran/4.4.4
```

La arquitectura de NetCDF, junto a las dependencias utilizadas se remarcan en la siguiente figura:

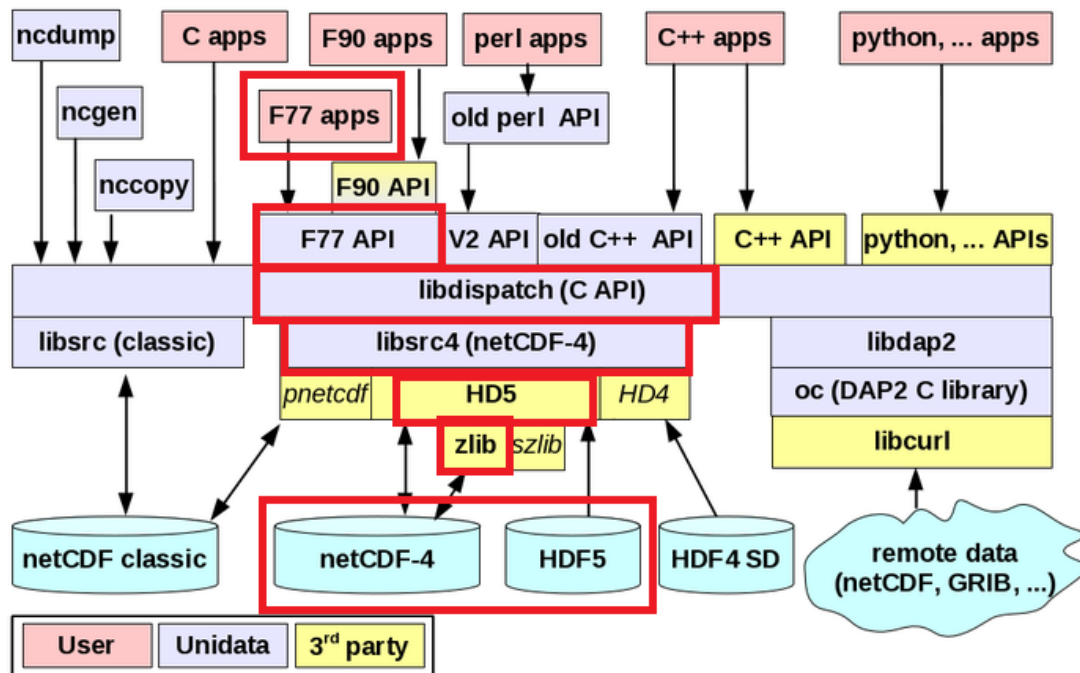


Figura 4.4: Arquitectura de NetCDF

De todas maneras, en el trabajo realizado en la presente tesis se instaló manualmente para obtener el conocimiento necesario para una instalación de WRF sin contar con herramientas provistas por Mendieta. De la misma manera se procedió con la instalación manual del resto de las dependencias.

Las dependencias de NetCDF instaladas son las siguientes:

- NetCDF-Fortran (F77/F90) [31]: Es el módulo de NetCDF que provee las librerías escritas en fortran las que son finalmente utilizadas desde WRF.
- HDF5: Dependencias necesaria para NetCDF. Provee el formato para manipulación de datos
- ZLIB: Dependencia necesaria para HDF5.

JasPer: Este software es una dependencia utilizada por HDF5 y es utilizada en etapa de pre-procesamiento de WRF (WPS). El proyecto JasPer es una iniciativa de código abierto para proporcionar una implementación basada en software del códec especificado en el estándar JPEG-2000 Parte-1 (es decir, ISO / IEC 15444-1). El software JasPer está escrito en lenguaje de programación C. Más detalles sobre este software se pueden encontrar en el Manual de Referencia de JasPer Software.

GrADS: Como se señaló en la sección 2.13. se necesita instalar esta herramienta para poder procesar y visualizar los pronósticos generados por WRF/ARWpost.

#### **4.2.6. Herramientas de análisis de performance:**

Las herramientas mencionadas son utilidades para analizar la performance de WRF durante y al final de la ejecución. Se utilizaron las siguientes herramientas:

- Perf: herramienta de profiling<sup>4</sup> para obtener métricas de la ejecución como cantidad de instrucciones ejecutadas, aciertos de cache, fallos de cache, etc.
- Numactl: métricas de Memoria utilizada por cada nodo NUMA.
- Numastat: Herramienta similar a numactl.

---

<sup>4</sup> Profiler: software que captura métricas de otro programa durante su ejecución

## 5. Implementación de WRF en Mendieta

### 5.1. Definición del dominio de simulación

Para las condiciones iniciales y de contorno se utilizaron datos obtenidos desde GFS con una resolución horizontal (longitud x latitud) de grilla de  $0.25^\circ$ . Actualmente la resolución  $0.25^\circ$  provista por GFS se corresponde a grillas de aproximadamente a  $25\text{km}^2$ . Según la tabla siguiente provista por el NCEP, esta es la máxima resolución disponible que provee el sistema GFS en la actualidad.

Época	Resolución (grados)	Resolución (km)
1970s - 1980s	2-3	200-500
1990s - 2010	1	100
2010s - actualidad	0.2-0.5	25-60

Tabla 5.1: Mapeo de grados a kilómetros en resoluciones horizontales

El dominio de simulación determinado para las pruebas de WRF en Mendieta abarca la región central de la República Argentina, haciendo enfoque en la provincia de Córdoba. El dominio se compone de  $300 * 250$  grillas de 4 km de resolución. Es decir que durante el proceso de pre-procesamiento de WRF la resolución se incrementa aún más al pasar de un modelo global (GFS) a uno local (WRF), pasando de grillas de aproximadamente  $25\text{Km}^2$  a grillas de  $4\text{km}^2$ .

La imagen 5.1 muestra el dominio de simulación seleccionado para los experimentos en la presente tesis.

La misma fue generada con la herramienta GrADS.

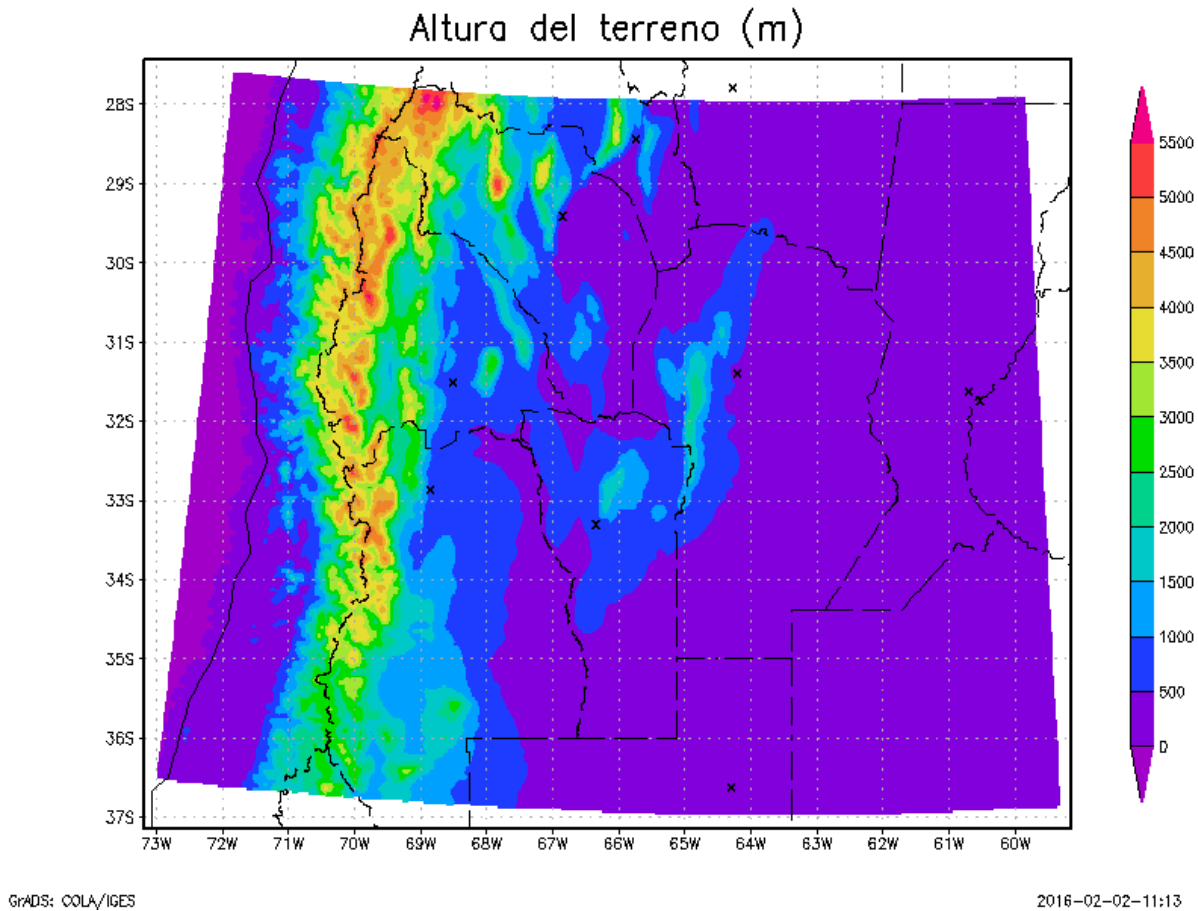


Figura 5.1: Dominio de simulación

Como se explicó en la sección 2.7. WRF genera pronósticos utilizando el método de ensambles. Cada miembro del ensamble se define a través de la asignación de valores a las variables descritas en la sección 2.5. de parametrizaciones.

Dichas variables modelan distintos aspectos físicos y son parametrizadas al inicio del proceso de simulación con valores que representan estudios previamente realizados.

WRF soporta un amplio conjunto de parametrizaciones [32] y básicamente son estas parametrizaciones la base para generar el ensamble.

Para la presente simulación se realizaron pruebas variando las siguientes variables, aunque no existió un motivo especial en la selección de dichos parámetros, sino que se seleccionaron con el propósito de analizar la performance de múltiples miembros del ensamble ejecutando en paralelo en el clúster:

- mp\_physics: Opción para modelar microfísica
- sf\_sfclay\_physics: Opción para modelar capa superficial
- bl\_pbl\_physics: Opción para modelar capa límite planetaria

Para la variable que modela Microfísica se seleccionaron los siguientes esquemas:

- Esquema de microfísica de Thompson [33] (G. Thompson, P. Field, R. Rasmussen, y W. Hall).
- Esquema de microfísica de Morrison de dos momentos. [34] (H. Morrison y G. Thompson).
- Esquema de microfísica de momento doble – clase 6. [35] (WRF Double Moment 6 class, WDM6, Hong y Lim).
- Esquema de microfísica de momento simple – clase 6. [36] (WRF Single moment 6 class, WSM6, Hong y Lim).

Para la variable que modela la capa límite planetaria se seleccionaron los siguientes esquemas:

- Esquema de Mellor-Yamada-Janjic (MYJ, 1994) [37].
- Esquema de Eliminación de escala cuasi-normal (QNSE Sukoriansky, Galperin y Perov, 2005) [38].
- Esquema de Mellor-Yamada- Nakanishi Niino, nivel 3 (MYNN3) [39].

Para la variable que modela la superficie terrestre se seleccionaron los siguientes los siguientes esquemas:

- Esquema de similaridad Eta (A. Monin y A. Obukhov) [40].
- Esquema de Eliminación de escala cuasi-normal (QNSE Sukoriansky, Galperin y Perov, 2005) [38].
- Esquema de Mellor-Yamada- Nakanishi Niino, nivel 3 (MYNN3) [39].



Finalmente, el ensamble definido quedo conformado por las configuraciones descritas en la tabla 5.1. Cada fila en la tabla es la configuración de un miembro del ensamble y esta identificado alfabéticamente: [A-E].

Miembro de ensamble	mp_physics/ Opción en WRF	bl_pbl_physics/ Opción en WRF	sf_sfclay_physics/ Opción en WRF
A	Thompson/8	MYJ/2	Eta/2
B	Marrison/10	MYJ/2	Eta/2
C	WDM6/16	QNSE/4	QNSE/4
D	WSM6/6	MYJ/2	Eta/2
E	WDM6/16	MYNN3/6	MYNN3/5

Tabla 5.2: Parametrizaciones de miembros del ensamble para WRF

## 5.2. Estructura de WRF en Mendieta

Una vez definido el ensamble a través de cada uno de sus miembros se procedió a definir la estructura de la instalación de WRF en Mendieta. Como se ha explicado anteriormente la posibilidad de contar con una arquitectura de computación paralela como el Clúster Mendieta posibilita poder ejecutar cada miembro de ensamble concurrentemente.

La ejecución de WRF aloca recursos para un job por cada miembro de ensamble, de esa manera, si existen los suficientes recursos disponibles cada miembro de ensamble puede ejecutarse paralelamente en los nodos alocados por su job.

La siguiente figura muestra un ejemplo de una posible ejecución de cuatro miembros de ensamble en dos nodos de la partición *multi* cada uno.

Notar que uno de los miembros de ensamble (C\_WDM6\_MYJ) no se ejecuta y queda encolado a la espera de recursos.

## Miembros de Ensemble ejecutando en paralelo

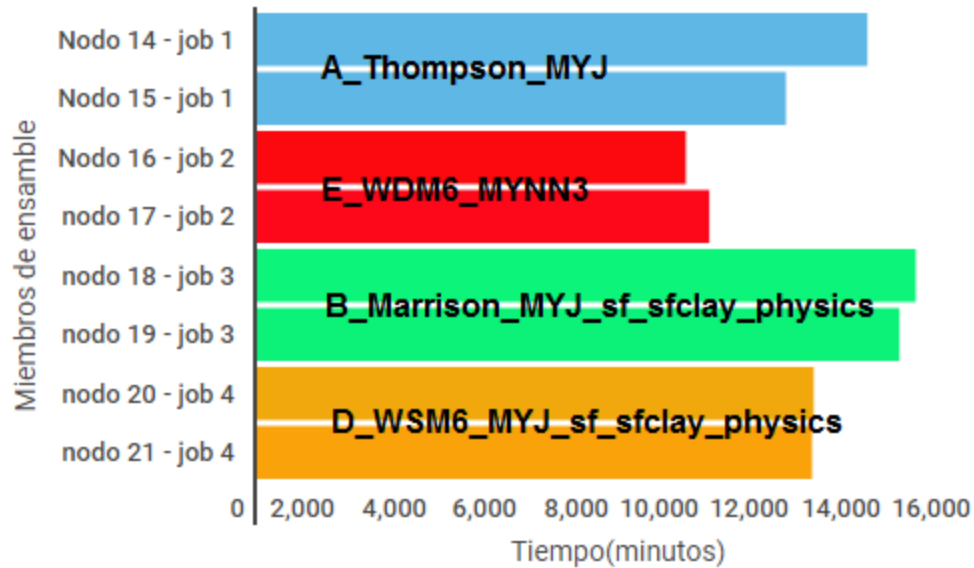


Figura 5.2: Miembros de ensemble ejecutando en paralelo

Así como hay un nivel de paralelismo entre los miembros del ensemble, es decir jobs ejecutando en paralelo, cada job a su vez extrae paralelismo en los niveles TLP, DLP e ILP.

El proceso completo de ejecución de los miembros de ensambles se detalla en la figura 5.3.

Inicia con la descarga de inputs desde GFS, donde se definen las condiciones iniciales y de contorno comunes a todos los miembros de ensambles.

Luego los jobs se van ejecutando a medida que Mendieta cuente con recursos disponibles.

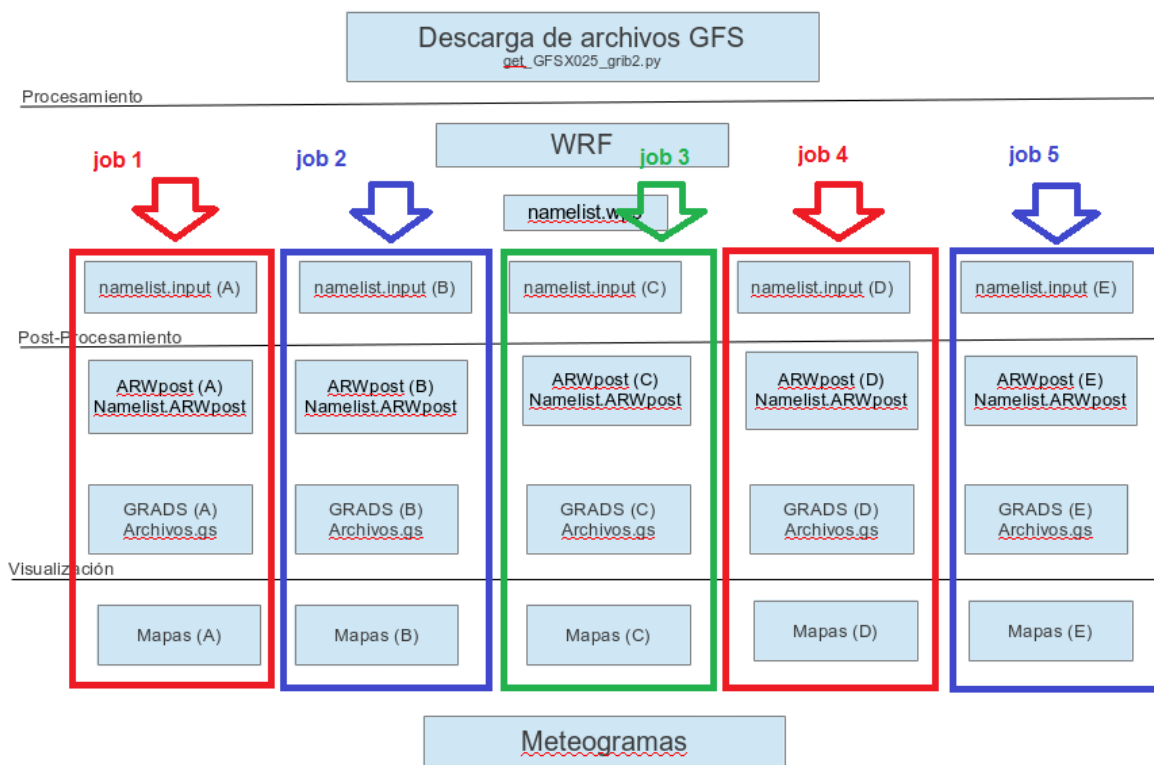


Figura 5.3: Esquema de la implementación de WRF en Mendieta

La ejecución de los miembros de ensamble está automatizada, aunque la configuración de parámetros iniciales de cada miembro del ensamble y alcance del pronóstico, debe ser definida manualmente por parte del usuario antes de ejecutar WRF. En la siguiente sección se detalla cómo modificar los archivos necesarios manualmente.

El código desarrollado para automatizar la ejecución del modelo WRF en Mendieta está versionado y documentado en el repositorio de acceso público:

[https://github.com/lvc0107/wrf\\_mendieta](https://github.com/lvc0107/wrf_mendieta)

Dicho Repositorio contiene las instrucciones detalladas para la instalación de WRF en Mendieta junto con todas sus dependencias.

Como parte de la investigación del presente trabajo también se instaló y testeó WRF en otros entornos a efectos de tener puntos de comparación con respecto a la performance en distintas arquitecturas computacionales, por lo que también se encuentra disponible en la documentación del repositorio instrucciones para la instalación de WRF en otras arquitecturas.

## 5.3. Archivos configurables por el usuario

### 5.3.1. Creación de entorno para el ensamble

El primer paso para iniciar la ejecución de WRF consta de ejecutar el script *set\_configurarion.sh*. El mismo está destinado a cargar los módulos y variables correspondientes tanto como para la etapa de compilación como para la etapa de ejecución de WRF.

El script crea el directorio *ensamble*, el cual se encuentra inicialmente vacío y tiene como propósito alojar templates de archivos de configuración para cada miembro del ensamble. Para cada miembro de ensamble se deben crear subdirectorios dentro del directorio *ensamble* con la siguiente estructura:

```
tree ensamble
ensamble
├── Miembro1
│   ├── namelist.ARWpost
│   └── namelist.input
├── Miembro2
│   ├── namelist.ARWpost
│   └── namelist.input
├── Miembro3
│   ├── namelist.ARWpost
│   └── namelist.input
├── .
├── .
├── .
├── MiembroN
│   ├── namelist.ARWpost
│   └── namelist.input
├── gradfile1.gs
├── gradfile2.gs
├── .
├── .
├── .
├── gradfileN.gs
└── namelist.wps
```

Los archivos *namelist.{wps, input, arwpost}* creados en la estructura de directorios anterior son inputs de configuración necesarios para cada una de las siguientes etapas respectivamente:

- Pre-procesamiento: utiliza el archivo de configuración *namelist.wps*
- Procesamiento: utiliza el archivo de configuración *namelist.wrf*

- Post-procesamiento: utiliza el archivo de configuración *namelist.arwpost*

Tal como han sido creados en la estructura de directorios anterior funcionan como templates. Se deben configurar cada vez que se considere necesario, pero dejándolos siempre dentro del subdirectorio correspondiente al miembro del ensamble. El script que lanza los jobs genera una copia de estos templates, actualiza las fechas de inicio y fin de la simulación y los despliega en los directorios necesarios para que WRF los procese. También crea los siguientes directorios:

- gribfiles: directorio para descarga de inputs desde GFS
- outputs: directorio para resultados de los pronósticos
- logs: directorio para archivos de logs

En el directorio *ensamble* también deben alojarse los scripts a ser utilizados por GrADS.

La estructura usada para miembros del ensamble para las simulaciones realizadas es la siguiente:

```
tree ensamble
ensamble
├── A_Thompson_MYJ
│   ├── namelist.ARWpost
│   └── namelist.input
├── B_Marrison_MYJ_sf_sfclay_physics
│   ├── namelist.ARWpost
│   └── namelist.input
├── cbar.gs
├── C_WDM6_QNSE_sf_sfclay_physics
│   ├── namelist.ARWpost
│   └── namelist.input
├── D_WSM6_MYJ_sf_sfclay_physics
│   ├── namelist.ARWpost
│   └── namelist.input
├── E_WDM6_MYNN3
│   ├── namelist.ARWpost
│   └── namelist.input
├── HPC_CBA_Rain.gs
├── HPC_CBA_Tmax_Min.gs
├── meteogramas_Precipitation.gs
├── meteogramas_rh.gs
├── meteogramas_Temp.gs
├── meteogramas_WindDir.gs
├── meteogramas_WindSpeed.gs
├── namelist.wps
└── rGiBset.gs
```

### 5.3.2. namelist.wps

Este es el archivo de configuración para la etapa de pre-procesamiento. Es compartido por todos los miembros de ensamble. Las fechas son actualizadas automáticamente por el script *run\_wrf\_model.py*. Se debe indicar el path donde son descargados los inputs (gribfiles) que toma WPS (ver Apéndice B.3).

```
cd $WRF_BASE/ensamble
cat namelist.wps

&share
  wrf_core = 'ARW',
  max_dom = 1,
  start_date = 2016-10-20 00:00:00
  end_date = 2016-10-21 12:00:00
  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          = 300, 61,
  e_sn          = 250, 91,
  geog_data_res  = '30s', '30s',
  dx = 4000,
  dy = 4000,
  map_proj = 'lambert',
  ref_lat  = -31.4,
  ref_lon  = -64.1,
  truelat1 = -60.0,
  truelat2 = -30.0,
  stand_lon = -63.6,
  geog_data_path = '/home/lvargas/wrf_mendieta/WRF.3.6.1/WPS/geog'
/

&ungrib
  out_format = 'WPS',
  prefix = 'GFS25',
/

&metgrid
  fg_name = 'GFS25'
  io_form_metgrid = 2,
/
```

Notar que es en este archivo donde se debe setear parámetros importantes donde se destacan:

- `e_we`: Dimensión en unidad de km este-oeste. Debe ser menor a la coordenada definida en el script de descarga de gribfiles. Para la simulación realizada se definió el valor de 300km. La segunda columna no es usada.
- `e_sn`: Dimensión en unidad de km sur-norte. Deben ser menor a la coordenada definida en el script de descarga de gribfiles. Para la simulación realizada se definió el valor de 250km. La segunda columna no es usada.
- `ref_lat`: coordenada latitud del centro de la simulación (Valor para ciudad de Córdoba).
- `ref_lon`: coordenada longitud del centro de la simulación (Valor para ciudad de Córdoba).
- `geog_data_path`: Directorio para instalación de datos estáticos para física de la tierra y utilizados por `geogrid.exe`

### 5.3.3. `namelist.input`

Los archivos *namelist.input* son la base para la definición de un miembro de ensamble. En él se definen las parametrizaciones discutidas previamente. Deben configurarse manualmente en la sección *physics* usando las configuraciones definidas en la tabla 5.2.

Las fechas son actualizadas automáticamente por el script *run\_wrf\_model.py*.

Ejemplo de la configuración para el miembro de ensamble *A\_Thompson\_MYJ*. La segunda y tercer columnas no son utilizadas en la presente ejecución.

Las fechas son actualizadas automáticamente por el script *run\_wrf\_model.py*.

```
&physics
mp_physics           = 8,      2,      2,
ra_lw_physics         = 1,      1,      1,
ra_sw_physics         = 2,      1,      1,
radt                  = 4,      30,     30,
sf_sfclay_physics   = 2,      1,      1,
sf_surface_physics    = 2,      2,      2,
bl_pbl_physics      = 2,      1,      1,
```

### 5.3.4. miembro/namelist.ARWpost

Son los archivos de configuración para la etapa de post-procesamiento. (Para cada miembro del ensamble). Las fechas son actualizadas automáticamente por el script *run\_wrf\_model.py*.

Este script también actualiza los path a los directorios inputs y output para ARWpost.

Los campos *field* e *interp\_levels* deben configurarse manualmente y contienen parámetros que producen outputs que son tomados por GrADS en la última etapa de post procesamiento.

```
cd $WRF_BASE/ensamble
cat ensamble/A_Thompson_MYJ/namelist.ARWpost

&datetime
  start_date = 2016-10-20_00:00:00
  end_date = 2016-10-21_12:00:00
  interval_seconds = 3600,
  tacc = 0,
  debug_level = 0,
/

&io
  input_root_name = '../wrf_run/wrfout_d01_2016-10-20_00:00:00',
  output_root_name = './output/output'
  plot = 'all_list'
  fields = 'height,pressure,tk,tc,rh2,wd10,ws10'
  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,ws
10,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,

```

### 5.3.5. set\_configuration.sh

Como se mencionó anteriormente, este archivo es un script que tiene como propósito cargar los módulos provistos por *environment modules* para poder compilar y ejecutar WRF. Dichos módulos cargan entre otras cosas: compilador, librerías de MPI, etc. Por default el compilador cargado es *gcc* y la librería de MPI utilizada es Open MPI, aunque eventualmente se podrían usar otras opciones como *mvapich* e *icc* respectivamente. Sin embargo, si se desea probar otro compilador, deben compilarse todas las dependencias de nuevo, cargando el modulo correspondiente en el script *set\_configuration.sh* y volver a realizar todos los pasos desde el paso 1 (Instalación de WRF y dependencias).

El script también crea directorios para outputs, meteogramas y gribfiles en caso de que no existan.

Para ver los módulos que cargados por el script *set\_configuration.sh* se ejecuta la siguiente línea de comando:

```

[lvargas@mendieta wrf_mendieta]module
Currently Loaded Modulefiles:
 1) /opt/modules/sistema/libgcc/5
 2) hwloc/1.11.4
 3) netcdf/4.4.1.1
 4) binutils/2.27
 5) openmpi/2
 6) netcdf-fortran/4.4.4
 7) gcc/5
 8) hdf5/1.10.0p1

```

También existe un script *set\_custom\_configuration.sh*, cuyo propósito es cargar dependencias instaladas manualmente, en lugar de usar las dependencias provistas por *environment modules*. Este script es útil en caso de que WRF se instale en un entorno sin dicho software de gestión de módulos.

### 5.3.6. Configuración para ejecutar OpenMP

Para ejecutar WRF en un único nodo o por ejemplo en una máquina como JupiterAce<sup>5</sup> existe la posibilidad de usar threads de OpenMP en lugar de procesos MPI.

Para ejecutar WRF utilizando OpenMP es necesario compilar previamente seleccionando la opción 33 de memoria compartida (smpar: shared memory parallelism), en etapa de configuración.

```
[lvargas@mendieta WRFV3]../configure  
  
33.  x86_64 Linux, gfortran compiler with gcc    (smpar)
```

También es necesario alocar recursos con SLURM usando una configuración especial para activar y declarar el uso de OpenMP.

El archivo a modificar para la ejecución de WRF usando OpenMP en un nodo o en una máquina como JupiterAce para correr por ejemplo 12 threads es *job\_run\_1\_nodes.sh*

```
mvgas@jupiterace:~/wrf_mendieta$ cat job_wrf_1_nodes.sh  
  
#SBATCH --nodes=1  
#SBATCH --ntasks=1  
  
### Hilos por proceso  
### Poner el mismo valor acá que en OMP_NUM_THREADS/MKL_NUM_THREADS  
#SBATCH --cpus-per-task=12  
  
export OMP_NUM_THREADS=12  
export MKL_NUM_THREADS=12
```

---

<sup>5</sup> La arquitectura de esta maquina se detalla en la siguiente sección.

### 5.3.7. Archivos de post-procesamiento

En el directorio \$WRF\_BASE/ensamble se deben crear además los archivos de scripts necesarios para visualizar los resultados producidos por *ARWpost.exe*. Para este trabajo se utilizó la herramienta GrADS la cual ejecuta scripts *.gs*.

El usuario de Mendieta debe determinar en estos scripts las variables a extraer, denominados meteogramas y los mapas o demás archivos de visualización del pronóstico.

Ejemplo: Archivo *HPC\_CBA\_rain.gs*

Este script genera un mapa del pronóstico de la lluvia para la provincia de Córdoba. Se ejecuta una vez por cada miembro del ensamble, es decir, genera cinco mapas con pronósticos de lluvias en Córdoba.

Es ejecutado automáticamente en etapa de post-procesamiento. El script *run\_wrf\_model.sh* ejecuta todos los archivos de GrADS y genera sus outputs en directorios temporales. En este script se destaca la definición del dominio de simulación (latitud y longitud) y la definición de arrays de valores que GrADS necesita para generar sus mapas. Está fuera del alcance de este trabajo el estudio de esta herramienta y es precondition por parte del usuario conocerla para poder interpretar los datos que genera WRF.

```
[lvargas@mendieta ensamble]cat HPC_CBA_Rain.gs
'reset'
'clear'
'open output.ct1'
'set lat -35.6 -29.4'
'set lon -66.2 -61.0'

*****precipitacion horas previas
'set t 10'
'lluvia1 = rainnc'

*****Precipitacion día
'set t 34'
'lluvia = rainnc -lluvia1'
'set gxout Shaded'
```

```

'./rGiBset'
'set clevs 0 0.5 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 100 150 200 300 500'
'set ccols 0 0 43 81 39 38 37 36 35 34 22 23 24 26 27 28 86 87 82 88 89 49'
'd lluvia'
'draw shp CBA_Linea'
'./cbar'
'draw title Precipitacion acumulada 36 hs'
"set display color white"
'printim ./meteogramas/rain36h.png'
'set geotiff ./meteogramas/rain36h'
'set gxout geotiff'
'd lluvia'
'quit'

```

Es importante destacar que como se mencionó en la primera sección de este capítulo, las instrucciones para el uso de estas herramientas se encuentran documentadas en un repositorio público. Para el caso de GrADS también se debe descargar un set de datos (inputs) necesarios para que los scripts de GrADS funcionen correctamente.

## 5.4. Ejecución del modelo

La ejecución de WRF se realiza con el siguiente comando:

```
./run_wrf_model.py --start_date=STARTDATE --offset=OFFSET --nodes=2
```

Ejemplo: Para ejecutar todos los miembros de ensamble en dos nodos de *multi* (20 cores p/nodo) para un pronóstico de 36hs.<sup>6</sup>

```
./run_wrf_model.py --start_date=2017030100 --offset=36 --nodes=2
```

---

<sup>6</sup> Ajustar el tiempo de ejecución del modelo en el script `job_wrf_N_nodes.sh` de la forma más precisa posible. # Con N en {2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}.

Este script realiza las siguientes tareas:

1. Descarga gribfiles dada una fecha en el directorio gribfiles creado en la sección anterior.

Descarga los datos del día 01/03/2017 a las 00:00 UTC-3 (00:00 hs Argentina).

```
[lvargas@mendieta wrf_mendieta]ls -lh gribfiles/2017-03-01_00\:00\:00/
total 336M
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26M Mar  7 21:45 GFS_2017030100+000.grib2
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26M Mar  7 21:45 GFS_2017030100+003.grib2
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26M Mar  7 21:46 GFS_2017030100+006.grib2
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26M Mar  7 21:46 GFS_2017030100+009.grib2
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26M Mar  7 21:46 GFS_2017030100+012.grib2
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26M Mar  7 21:46 GFS_2017030100+015.grib2
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26M Mar  7 21:47 GFS_2017030100+018.grib2
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26M Mar  7 21:47 GFS_2017030100+021.grib2
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26M Mar  7 21:48 GFS_2017030100+024.grib2
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26M Mar  7 21:48 GFS_2017030100+027.grib2
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26M Mar  7 21:49 GFS_2017030100+030.grib2
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26M Mar  7 21:49 GFS_2017030100+033.grib2
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26M Mar  7 21:49 GFS_2017030100+036.grib2
```

Cada archivo descargado pesa en promedio 26 MB. Dado que se descargan 13 archivos se tiene un aproximado 336 MB descargados en concepto de inputs para WRF.

2. Actualiza fecha en el archivo template *namelist.wps* en el directorio *ensamble*.
3. Actualiza fecha en los archivos template *namelist.input* dentro de cada directorio *ensamble/miembroi* con  $i:\{1..N\}$ .
4. Actualiza fecha en *namelist.ARWpost* dentro de cada directorio *ensamble/miembroi* con  $i:\{1..N\}$ .
5. Asigna un *job id* a cada miembro de ensamble y solicita recursos (dos nodos en este caso) para la ejecución en los nodos de la partición *multi*. Si no hay recursos, las peticiones de recursos quedan encoladas hasta que algunos nodos de la partición *multi* se liberen. Si

hay recursos disponibles, SLURM asigna dichos recursos (dos nodos) para cada miembro del ensamble y lanza la ejecución del job.

El output de la ejecución del script `run_wrf_model.py` es el siguiente:

```
[lvargas@mendieta wrf_mendieta] ./run_wrf_model.py --start_date=2017030100 --offset=36
--nodes=2
```

```
Start forecast date: 2017-03-01 00:00:00
```

End forecast date: 2017-03-02 12:00:00

```
sbatch job_wrf_2_nodes.sh A_Thompson_MYJ 2017-03-01_00:00:00 2017-03-02_12:00:00
Submitted batch job 55066
```

```
sbatch job_wrf_2_nodes.sh B_Marrison_MYJ_sf_sfclay_physics 2017-03-01_00:00:00 2017-03-02_12:00:00
Submitted batch job 55067
```

```
sbatch job_wrf_2_nodes.sh C_WDM6_QNSE_sf_sfclay_physics 2017-03-01_00:00:00 2017-03-02_12:00:00
Submitted batch job 55068
```

```
sbatch job_wrf_2_nodes.sh D_WSM6_MYJ_sf_sfclay_physics 2017-03-01_00:00:00 2017-03-02_12:00:00
Submitted batch job 55069
```

```
sbatch job_wrf_2_nodes.sh E_WDM6_MYNN3 2017-03-01_00:00:00 2017-03-02_12:00:00
Submitted batch job 55070
```

```
squeue -u $USER
```

PARTITION	JOBID	PRIO	NAME	USER	ST	TIME	NO	CPU	GRES	NODELIST	(REASON)
multi	55066	5002	WRF	lvargas	R	0:13	2	40	(null	mendieta[17-18])	
multi	55067	5002	WRF	lvargas	R	0:13	2	40	(null	mendieta[20-21])	
multi	55068	5002	WRF	lvargas	PD	0:00	2	40	(null	(Resources)	
multi	55069	5002	WRF	lvargas	PD	0:00	2	40	(null	(Resources)	
multi	55070	5002	WRF	lvargas	PD	0:00	2	40	(null	(Resources)	

Para este ejemplo se ve que al momento de la ejecución del script había cuatro nodos de la partición *multi* disponibles para ser usados y fueron asignados dos por cada job a los miembros de ensamble:

- A\_Thompson\_MYJ: Usa los nodos *mendieta17* y *mendieta18* en el job 55066.
- B\_Marrison\_MYJ\_sf\_sfclay\_physics: Usa los nodos *mendieta20* y *mendieta21* en el job 55067.

El resto de los miembros de ensamble queda encolados a la espera de que nodos de la partición *multi* se liberen.

El output de la ejecución del script *run\_wrf\_model.py* muestra también que se ejecuta el comando `squeue -u $USER` luego de hacer `submit` de los jobs (petición de recursos para los miembros de ensamble). Estos jobs están en estado PD (pending) de obtener recursos. Cuando haya nodos disponibles, los jobs que obtengan recursos van a pasar a estado R (running).

El log proporciona también información relevante:

- PARTITION: Partición a la que pertenecen los nodos.
- JOBID: Identificador único del job (ejecución del miembro del ensamble).
- USER: Usuario que lanzó la ejecución.
- NAME: Nombre e identificador del job.
- TIME: Cuando el job está en estado R este valor se actualiza mostrando el tiempo transcurrido de ejecución. Importante: si el tiempo de ejecución es mayor al estimado en `SBATCH --time` el job se cancela. Por lo tanto, es necesario actualizar ese valor en el script `job_wrf_N_nodes.sh` de manera que ese valor sea mayor y correr nuevamente.
- NO: números de nodos asignados.
- CPU: número de cores asignados.
- NODELIST: lista de nodos asignados al job.

En caso de que se haya realizado la descarga de los inputs (gribfiles) correctamente es posible ejecutar solo un miembro de ensamble (por ejemplo, A\_Thompson\_MYJ) en dos (o más) nodos de multi (20 cores p/nodo) para las mismas fechas de inicio y periodo de 36hs.

```
sbatch job_wrf_2_nodes.sh A_Thompson_MYJ 2017-03-01_00:00:00 2017-03-02_12:00:00
```

La ejecución genera logs en los directorios:<sup>7</sup>

```
$WRF_BASE/logs/$RUN_PARAMETERS/$SLURM_JOB_ID
```

La ejecución genera outputs en los siguientes directorios:

```
cd $WRF_BASE
ls -l output/2_nodes_A_Thompson_MYJ/meteorogramas/
total 3.1M
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 16K Nov  5 06:13 temp_max_A.png
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 15K Nov  5 06:13 temp_min_A.png
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 26K Nov  5 06:13 rain36h_A.png
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 367 Nov  5 06:13 rain_COLONIA_CAROYA_A.txt
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 312 Nov  5 06:13 rain_CAPILLA_DEL_MONTE_A.txt
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 314 Nov  5 06:13 rain_CANALS_A.txt
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 341 Nov  5 06:13 rain_BRINCKMANN_A.txt
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 326 Nov  5 06:13 rain_BIALET_MASSE_A.txt
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 314 Nov  5 06:13 rain_ARROYO_CABRAL_A.txt
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 341 Nov  5 06:13 rain_ARROYITO_A.txt
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 324 Nov  5 06:13 rain_ALTA_GRACIA_A.txt
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 368 Nov  5 06:13 rain_ALMAFUERTE_A.txt
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 338 Nov  5 06:13 rain_ALICIA_A.txt
-rw-rw-r-- 1 lvargas lvargas 314 Nov  5 06:13 rain_ALEJO_LEDESMA_A.txt
```

---

<sup>7</sup> Dónde RUN\_PARAMETERS está definido en el script job\_wrf\_N\_nodes.sh, con N en {2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}.



Para solicitar más nodos (entre dos y ocho), el script *run\_wrf\_model.py* se debe ejecutar de la siguiente manera.

Ejemplos que ejecutan los miembros de ensamble usando 3, 4 y 5 nodos de 20 cores c/u respectivamente:

```
./run_wrf_model.py --start_date=2016102000 --offset=36 --nodes=3  
./run_wrf_model.py --start_date=2016102000 --offset=36 --nodes=4  
./run_wrf_model.py --start_date=2016102000 --offset=36 --nodes=5
```

Importante: La cuota por usuario es de 500GiB. La instalación de WRF ocupa aproximadamente 100GiB (mayormente debido a los ~85 GiB al directorio *geog* en \$WPS\_DIR) Por lo tanto quedan disponibles ~400 GiB. Es necesario entonces limpiar (borrar) los resultados que se van generando periódicamente, luego de su procesamiento.

La etapa de post procesamiento finaliza ejecutando scripts de GrADS, los cuales generan mapas y meteogramas (datos en texto plano) para ser graficados finalmente en una interfaz web.

Mapas:

Se generan 5 grupos de mapas distintos correspondientes a cada miembro de ensamble, para las siguientes variables observadas:

- Lluvia (precipitación)
- Temperatura máxima
- Temperatura mínima

Meteogramas:

Se generan 5 archivos por cada miembro de ensamble con la siguiente información para cada ciudad de Córdoba.

- Lluvia (precipitación)
- Temperatura

- Humedad
- Dirección del viento
- Velocidad del viento

En total se generarán 475 .txt para los meteogramas (5 variables por ciudad - para 95 ciudades)

## 6. Resultados

### 6.1. Baseline

Para contrastar las mejoras obtenidas en performance en la ejecución del modelo WRF se tomó como baseline los resultados obtenidos en la implementación de WRF en la unidad CAEARTE. Dicha implementación fue realizada en una máquina con arquitectura convencional [41].

WRF en CAEARTE:

Sistema operativo	Linux-Ubuntu 14.4
CPU info	Procesador Intel core i7-2600K CPU @ 3.40GHz
Número de cores	4
Memoria	4GiB Tipo: DDR3 Velocidad:1333 MHz

Tabla 6.1: Arquitectura de máquina en CAEARTE

Arquitectura del procesador core i7 que utiliza el equipo de CAEARTE para ejecutar WRF:

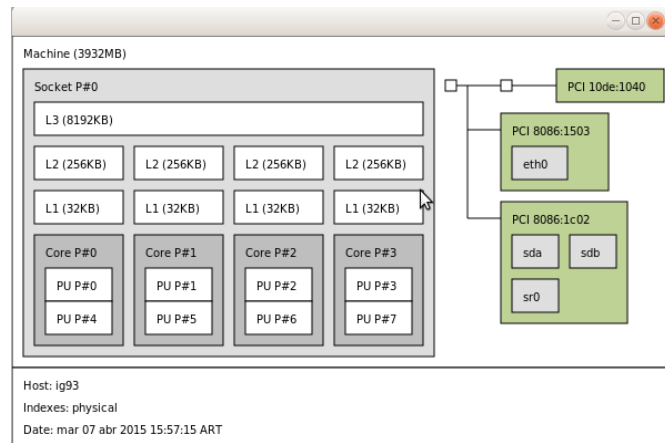


Figura 6.1: Arquitectura de máquina de CAERTAE

Para una ejecución del Modelo con un pronóstico de 36 hs. en la ciudad de Córdoba y usando las configuraciones descritas en la sección 5.2. se obtuvieron los siguientes resultados:

```
real 693m9.766s
user 5200m19.736s
sys 162m0.339s
```

Es decir, el modelo WRF ejecuta en aproximadamente 10.65 hs. un pronóstico de 36s de lluvia, temperaturas y humedad para la provincia de Córdoba en la máquina i7 de CAEARTE.

## 6.2. Pruebas para determinar software más performante

Mendieta es constantemente actualizada en términos de hardware y software. En este trabajo se denomina como Mendieta2 al clúster luego de una importante actualización realizada a comienzos de 2017 y la cual utiliza hardware más potente: nodos de la partición *multi* con 2 procesadores Intel Xeon E5-2680 v2 de 10 cores cada uno a 2.8 GHz. - 64 GiB DDR3 a 1600 MHz.

Se denomina al clúster como Mendieta1 cuando hagamos referencia a las pruebas realizadas antes dicha actualización. Y cuyo hardware se compone de nodos con 2 procesadores Intel Xeon E5-2680 de 8 cores cada uno a 2.7 GHz. - 64 GiB DDR3 a 1333 MHz.

La primera etapa de experimentación se basó en pruebas utilizando como dominio el territorio de Córdoba para un pronóstico de 48 hs.

Se realizó una serie de pruebas para determinar la mejor combinación de librerías instaladas en Mendieta para la ejecución de procesos en paralelo de WRF.

Se realizaron pruebas para las siguientes librerías compiladas con gcc.4-9:

- Omp: Ejecución en un único nodo de la partición *mono*.
- Mvapich: instalada en Mendieta. WRF corriendo procesos MPI en memoria distribuida todos los nodos. El resto de las dependencias usadas son las preinstaladas en Mendieta.
- Open MPI: Misma prueba que la realizada con mvapich.
- Open MPI + OpenMP: configuración híbrida entre memoria compartida (intra nodo) y memoria distribuida (inter nodos). WRF corriendo procesos MPI en memoria distribuida todos los nodos y luego internamente en cada nodo los procesos son mapeados a thread de OpenMP que usan memoria compartida. El resto de las dependencias usadas son las preinstaladas en Mendieta.
- Mvapich + OpenMP: misma prueba que con Open MPI + OpenMP.
- Mpich + OpenMP: misma prueba que con Open MPI + OpenMP, pero usando las dependencias NetCDF/HDF5/Zlib compiladas e instaladas manualmente.

Los resultados obtenidos son los que se muestran en las siguientes figuras:

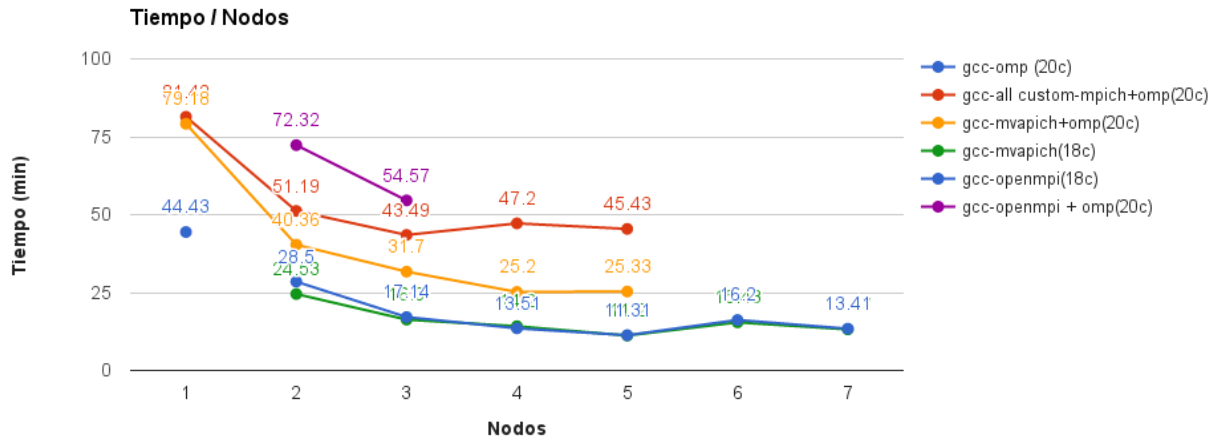


Figura 6.2: Mediciones para múltiples nodos. Tiempo

La figura 6.2 indica que la mayor eficiencia en el tiempo de cómputo es obtenida con las librerías pre instaladas en Mendieta. Se puede apreciar un desempeño muy similar usando las librerías de Open MPI como así también con las librerías de MVAPICH. También es notorio que la opción

de uso de procesos que usan memoria distribuida tiene mejor desempeño que la opción híbrida MPI + OpenMP la cual utiliza procesos de MPI para la comunicación inter-nodos y threads de OpenMP que comparten memoria para la comunicación intra-nodo. Aunque sería esperable que la performance sea mejor usando memoria compartida ya que el context switch entre thread es más eficiente que el de procesos, parece haber cierta penalidad en performance en el mapeo de proceso/hilo que debe realizar WRF.

Otra posible explicación es que faltó realizar alguna configuración adicional a la opción híbrida para alcanzar una mejor performance.

La figura 6.4 muestra el speedup obtenido para esta prueba, el cual es levemente sublineal para las librerías preinstaladas en Mendieta.

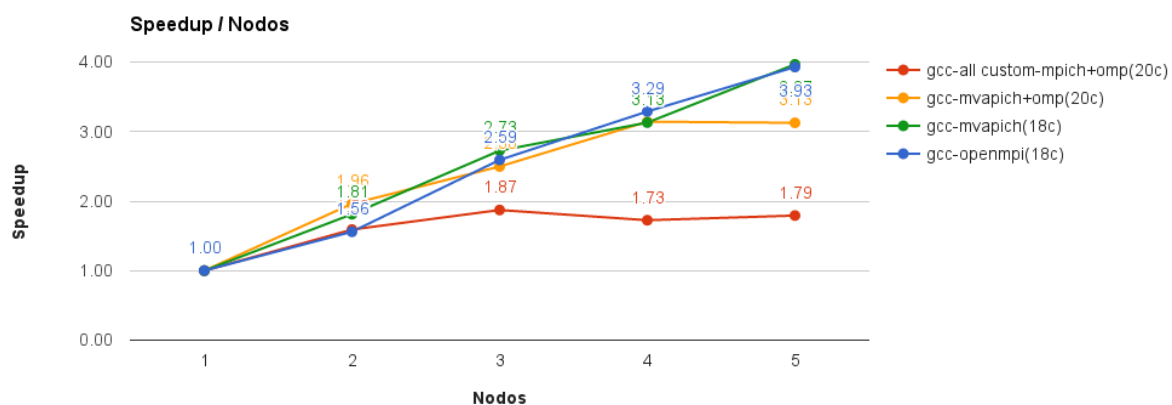


Figura 6.3: Mediciones para múltiples nodos. Speedup

Nuevamente se observa un speedup lineal para las gcc + Mvapich y gcc + Open MPI.

Finalmente, el análisis de eficiencia indica valores próximos a 1 (el ideal) para las librerías preinstaladas, las gcc + Mvapich y gcc + Open MPI, concluyendo que son la mejor opción a elegir para la ejecución de WRF.

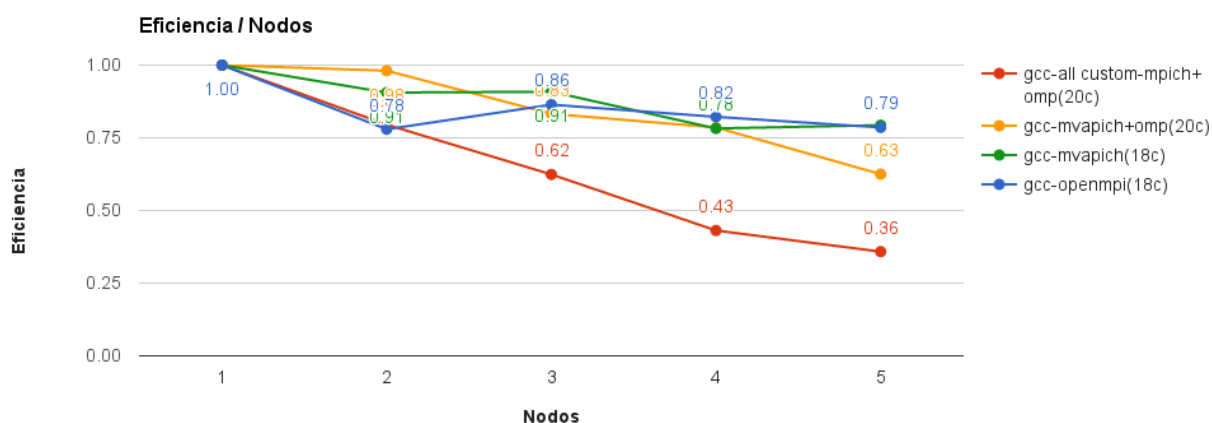


Figura 6.4: Mediciones para múltiples nodos. Eficiencia

### 6.3. Resultados para ensambles con distintas parametrizaciones

Los resultados previos permiten definir una configuración inicial para realizar las pruebas contra un pronóstico real, del tipo requerido por el grupo CAEARTE.

Para las pruebas realizadas ejecutando miembros de ensamble definidos en la tabla 5.2 y para un pronóstico de 36 hs. y usando el dominio de simulación definido en la sección 5.1. se seleccionó la siguiente configuración:

Herramienta	Información
Compilador	gcc-4.9.2
Librería de MPI	Open MPI
Librerías instaladas en Mendieta	NetCDF/HDF5
Librerías instaladas manualmente	JasPer/GrADS

Tabla 6.2: Herramientas utilizadas para la ejecución de WRF

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para la ejecución de cada uno de estos miembros de ensamble sobre distintas arquitecturas.

### **6.3.1. Resultado para tiempo de ejecución para cada uno de los miembros del ensamble**

La figura 6.5 muestra las métricas de tiempo para todas las arquitecturas donde se ejecutó WRF. Se puede observar que el tiempo se reduce de manera importante comparando la ejecución de WRF en la máquina de CAEARTE (core i7) con respecto a la ejecución en un nodo de Mendieta1.

La mejora es de aproximadamente de entre 2x-3x partiendo del baseline con respecto a la ejecución en 1 nodo de Mendieta1 (De ~640 minutos a 330-224 minutos). Luego es notable un segundo salto en la mejora de tiempos pasando a dos nodos de Mendieta2. En este punto la mejora es de aproximadamente 3x con respecto a la ejecución en único nodo de Mendieta1.

A medida que se escaló en la cantidad de nodos de Mendieta2 se puede notar que se continúa obteniendo mejoras en la performance inclusive hasta ejecutar los ensambles en 8 nodos de la partición *multi*. También es observable que el paralelismo escala sublinealmente a partir del uso de dos nodos, e incluso la performance comienza a “plancharse” a partir del uso de cuatro nodos, lo cual implica que la relación costo/beneficio entre recursos computacionales y tiempo ya no es justificable. Es decir, probablemente no se justifica usar un nodo más para ganar un par de minutos en la ejecución del modelo (ejemplo pasar de 7 a 8 nodos solo da unos 2-3 minutos más).



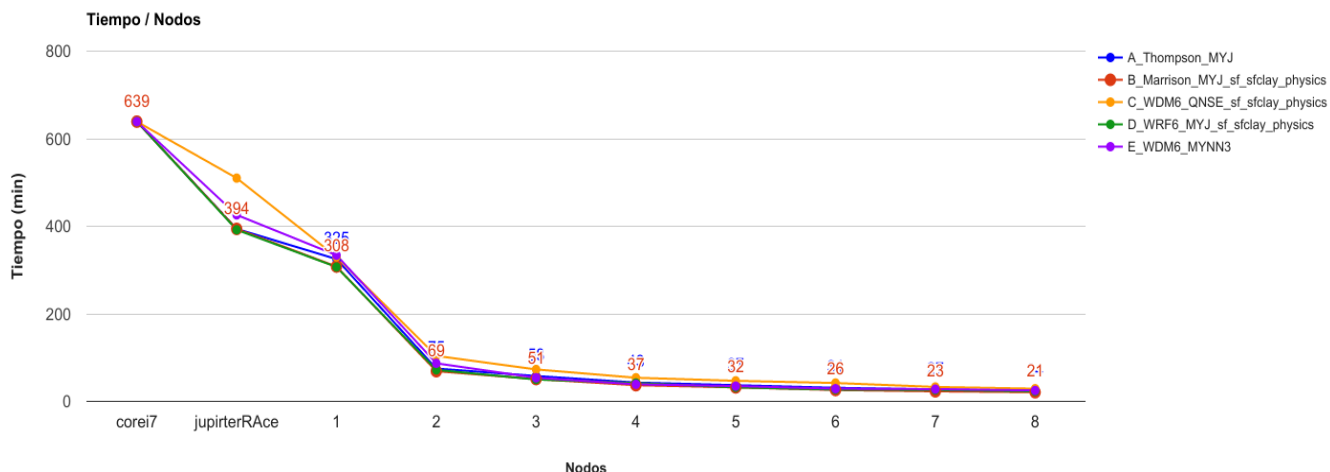


Figura 6.5: Tiempo de cómputo para pronóstico de 36 hs. en Córdoba.

### 6.3.2. Resultado para speedup de ejecución para cada uno de los miembros del ensemble

Para este análisis se tuvo en cuenta sólo las ejecuciones realizadas en Mendieta. Se considera como unidad de procesamiento a un nodo (20 cores) de la partición *multi*, exceptuando para la ejecución en único nodo, que se realizó sobre la partición *mono* (16 cores), es decir que se analizó como escala WRF cuando se incrementa el número de nodos en la computación. Esta prueba deja en evidencia el carácter paralelizable de WRF. Se puede extraer mucho paralelismo distribuyendo el cómputo en múltiples nodos de 20 cores cada uno. El paralelismo obtenido al ejecutar WRF de manera distribuida en múltiples nodos está soportado a nivel software en la herramienta Open MPI y a nivel hardware a través de la red de alta velocidad *infiniband*.

Se observa que todos los miembros de ensemble escalan de manera aproximadamente lineal obteniendo una mejora de entre 11x y 13x respecto la ejecución en un nodo. Se debe tener en cuenta que el speedup debe en realidad ser menor ya que la ejecución en un nodo se realizó sobre un nodo de la partición *mono* (2 Intel Xeon E5-2680 -16 cores).

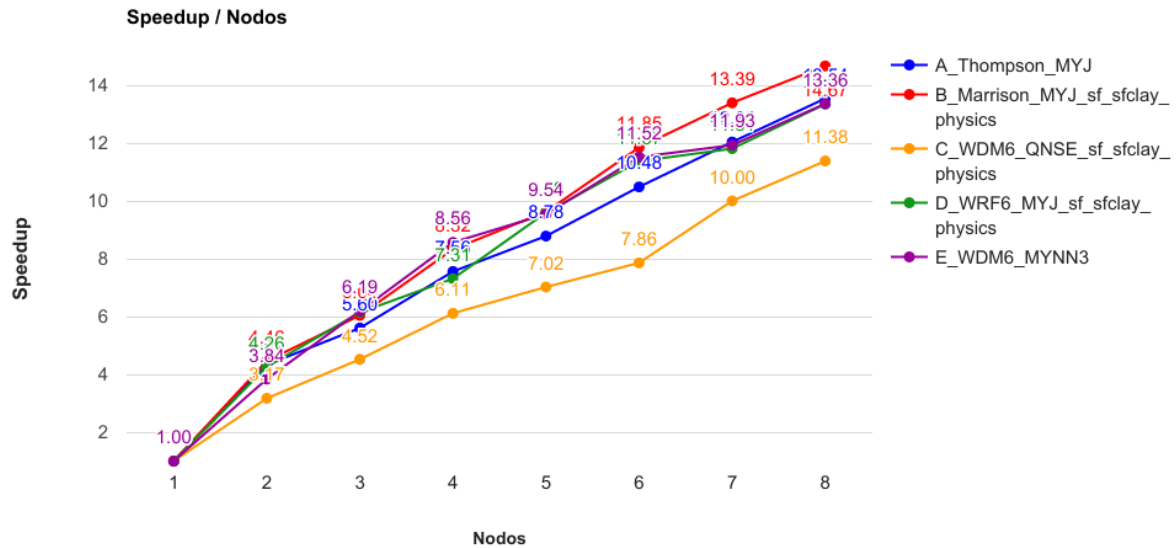


Figura 6.6: Speedup de cómputo para pronóstico de 36 hs. en Córdoba.

### 6.3.3. La eficiencia obtenida

La eficiencia medida está basada para las pruebas realizadas en Mendieta. La figura 6.7 muestra una tendencia de speedup supralineal debido a dos factores.

1. Efectivamente se puede extraer más paralelismo a medida que se distribuye el cómputo en más nodos.
2. En todas las ejecuciones, el primer nodo pertenece a la partición *mono*. Recordemos que la arquitectura de *mono* tiene menos cores y menos potentes que respecto de la arquitectura de los nodos de la partición *multi*.

La eficiencia comienza a degradarse a partir del uso de cuatro nodos.

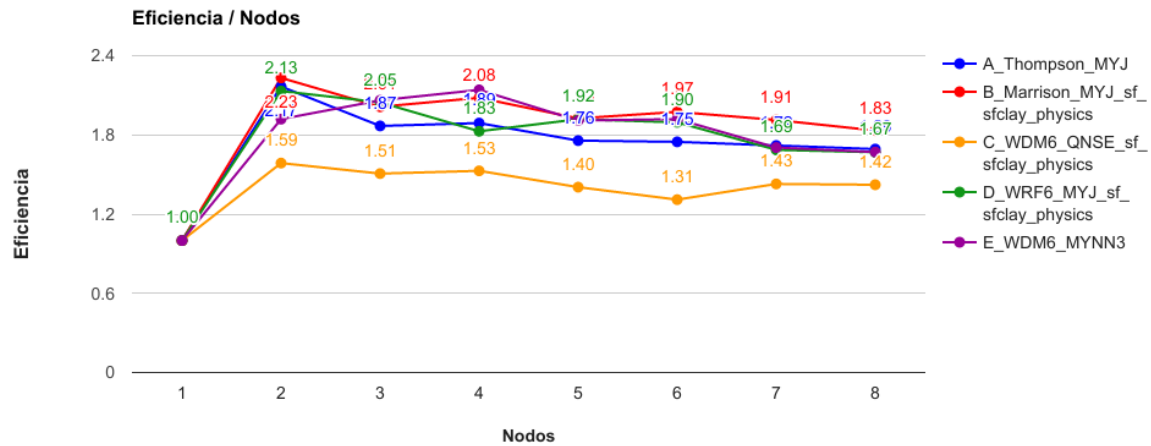


Figura 6.7: Eficiencia de cómputo para pronóstico de 36 hs. en Córdoba.

### 6.3.4. Resultados de Ejecución en JupiterAce

Con el propósito de investigar la performance que se puede obtener en una máquina similar a un nodo de Mendieta, se realizaron pruebas de performance en la máquina JupiterAce, perteneciente al CCAD.

En la figura 6.8 se muestra el tiempo de cómputo para el pronóstico en el core i7 de CAEARTE y los tiempos de ejecución en JupiterAce.

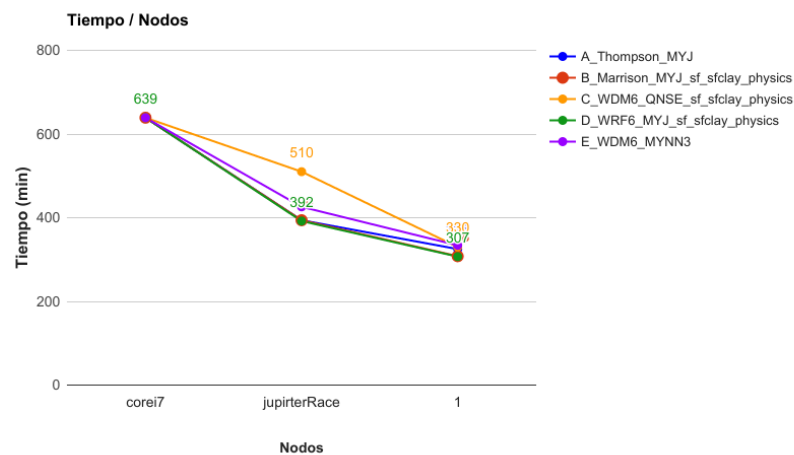


Figura 6.8: Tiempo de ejecución incluyendo JupiterAce

Como se detalló en la sección 4.4. y 4.5. WRF soporta tres modos de ejecución paralela: procesos MPI (memoria distribuida), threads OpenMP (memoria compartida) y omp+mp (modelo híbrido)

Para la ejecución en JupiterAce WRF fue compilado y testeado en los dos primeros modos: La mejor performance se alcanzó con OpenMP. No se obtuvieron mejoras usando el modo de MPI, de hecho, los resultados de tiempos de ejecución para este modo fueron similares a los mismos tiempos registrados para la máquina de CAEARTE, lo cual refleja que en un sistema no clúster conviene ejecutar WRF utilizando memoria compartida en lugar de memoria distribuida.

Se observa también que la mejora en tiempo de ejecución de aproximadamente 1.5X (de ~640 min. a ~400 min.) entre la máquina de CAEARTE vs JupiterAce radica principalmente en hardware, ya que ambas ejecuciones usaron OpenMP.

Recordamos el hardware de ambos sistemas.

	<b>Máquina de CAEARTE</b>	<b>JupiterAce</b>
Sistema operativo	Linux-Ubuntu 14.4	Debian 4.9.13-1
Compilador	gcc-4.8	gcc-6.3
Memoria	4GiB Tipo: DDR3 Velocidad:1333 MHz	126GiB tipo: DDR3
procesador	Procesador Intel I7-2600K CPU @ 3.40GHz	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v3 @ 2.40GHz [42]
Número de cores	4(8 lógicos)	6
Nodos NUMA	-	2(6 cores c/u)

Tabla 6.3: JupiterAce vs máquina de CAEARTE

### 6.3.6. Mapas de lluvias, y temperaturas

Un aspecto importante a considerar, además de los resultados que miden la performance de la ejecución de WRF en Mendieta, es la correctitud de los pronósticos. Al finalizar el procesamiento se debe validar que el método de ensamble proporcione pronósticos de valor. Es decir, cada miembro de ensamble debe generar un pronóstico sobre el dominio de simulación con características propias dada su parametrización inicial.

A continuación, se muestran los mapas obtenidos por cada miembro del ensamble para la variable de precipitación en Córdoba. Pronóstico de 36 hs.

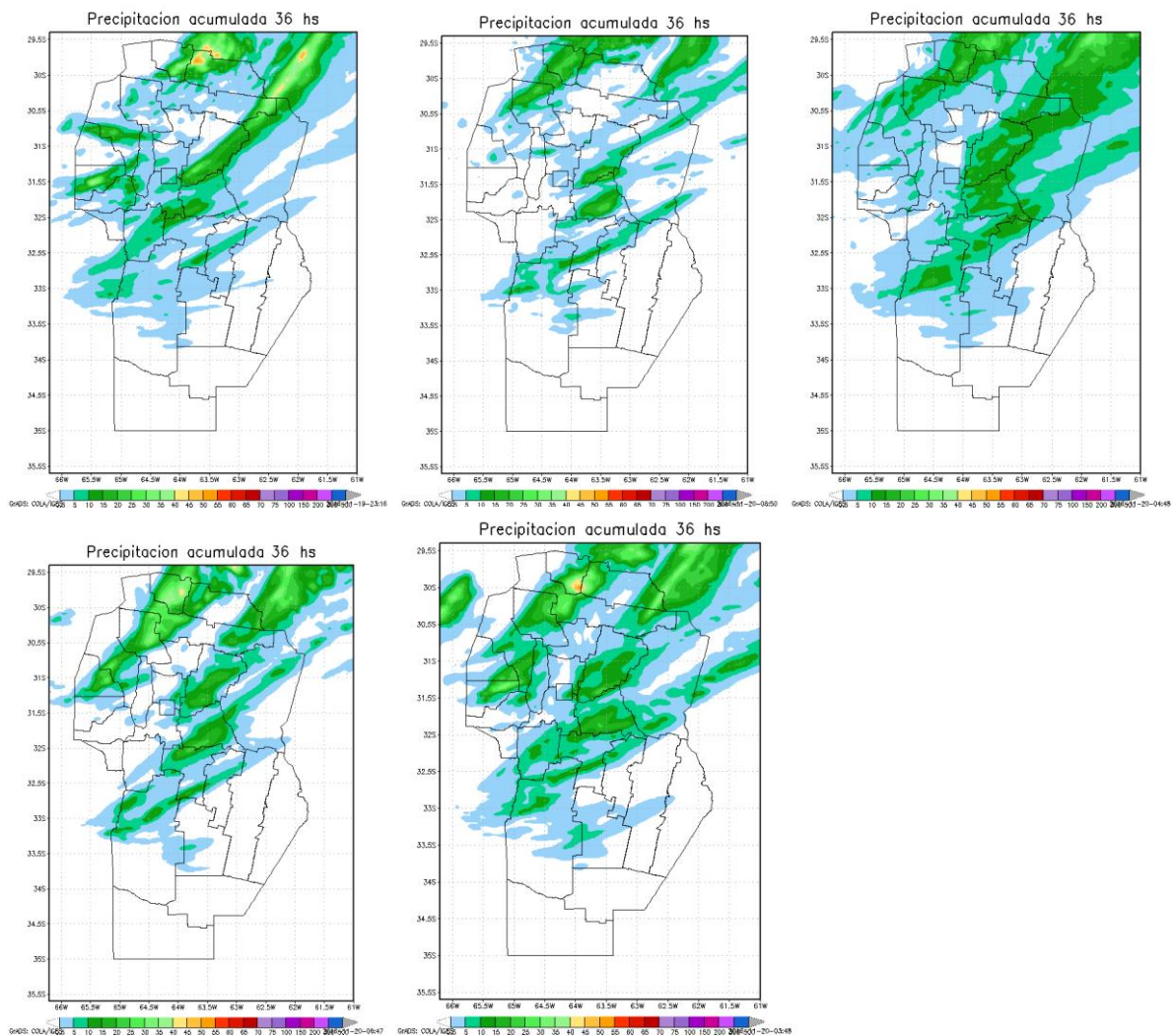


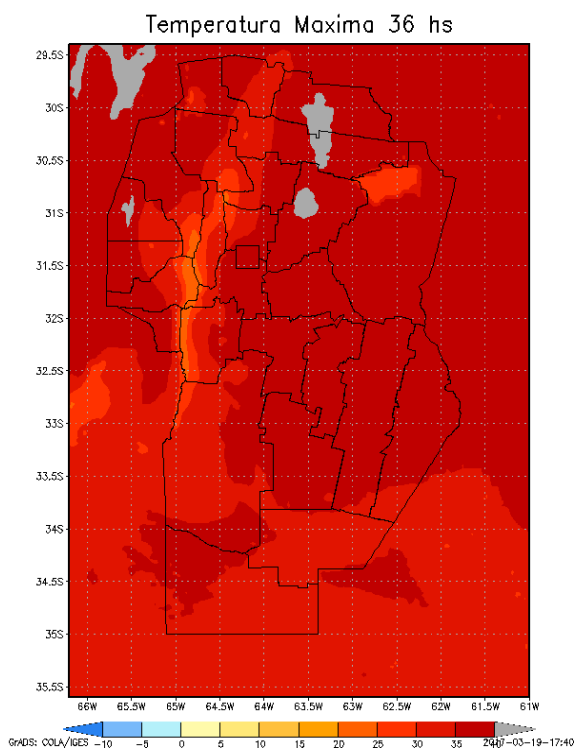
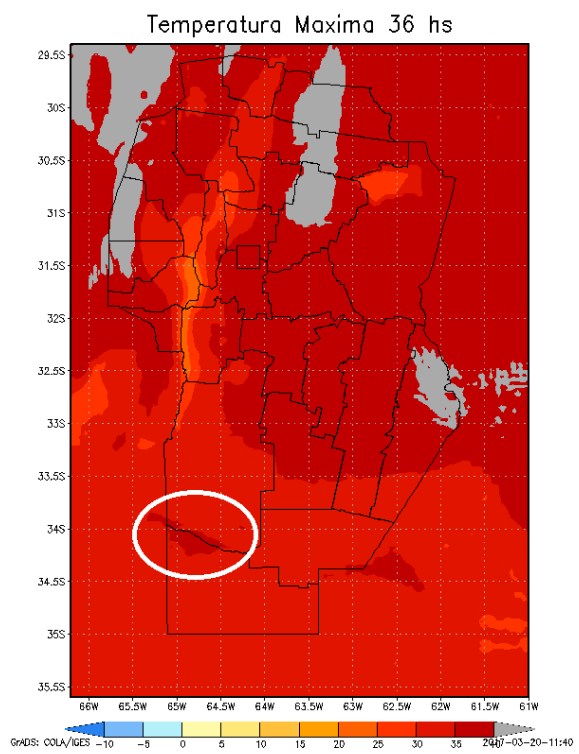
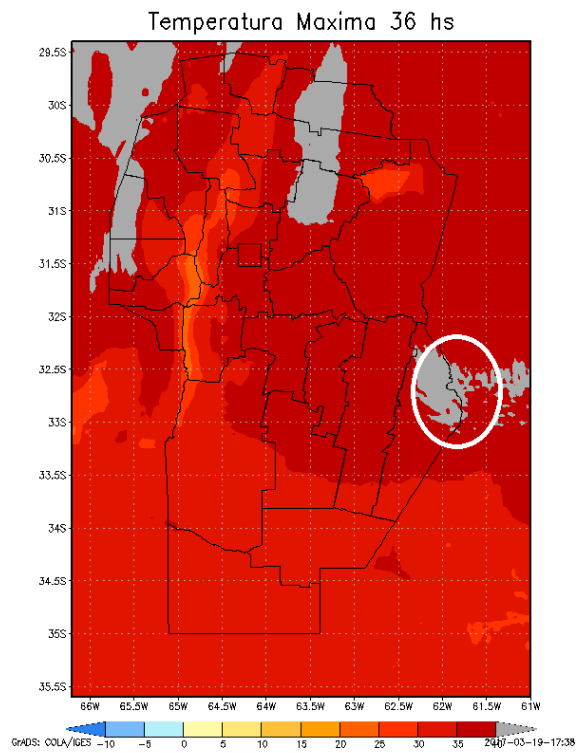
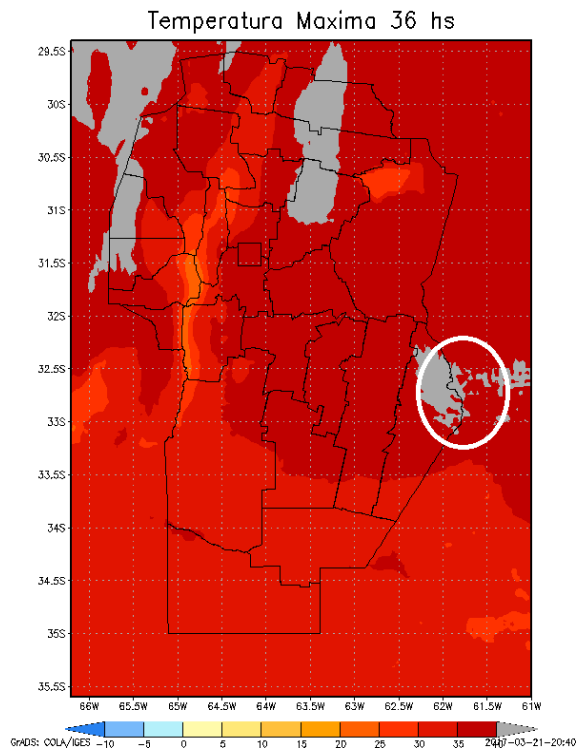
Figura 6.9: Mapas para pronósticos de precipitación de 36 hs en Córdoba.

Se puede observar que luego del procesamiento los mapas generados (a través de GrADS) muestran variaciones importantes. Esto proporciona las siguientes conclusiones:

- La instalación y ejecución del modelo WRF provee resultados con información que posee valor. Para los mapas obtenidos en la figura 6.9. se observa que todos los miembros de ensamble pronostican lluvia con 36 hs. de anticipación en la zona central de Córdoba.
- Cada miembro de ensamble produce un pronóstico con variaciones dadas sus configuraciones iniciales, pero se observa cierto patrón que indica fuertemente una alta probabilidad de correctitud en el pronóstico. Es decir, que cada miembro de ensamble produce un resultado de manera independiente, pero con cierta aproximación entre ellos, lo que indica que es difícilmente esperable que los cinco miembros de ensamble fallen en indicar por ejemplo que la zona central de Córdoba va tener una precipitación en las próximas 36 hs. Aunque por supuesto, los pronósticos pueden fallar, los resultados indican un buen funcionamiento de WRF en Mendieta.

A continuación, se pueden observar los mapas obtenidos por cada miembro del ensamble para temperaturas máximas de Córdoba. Pronóstico de 36 hs.

Nuevamente se observa que WRF produce resultados con sentido para cada uno de los miembros de ensambles. Se nota de manera más pronunciada que todos los miembros de ensamble reproducen los mismos patrones, aunque como es de esperarse con sus propias características dadas sus parametrizaciones iniciales.



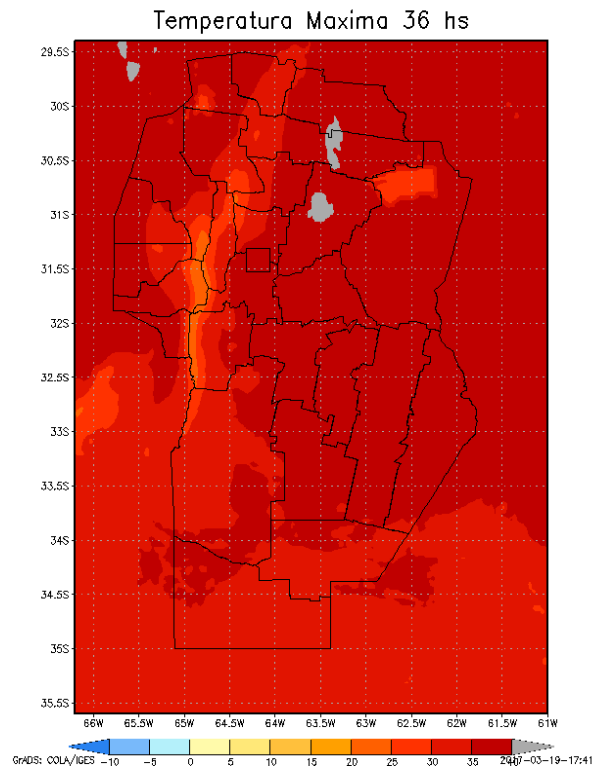


Figura 6.10: Mapas para pronósticos de temperatura máxima de 36 hs. en Córdoba.

Observar las mínimas diferencias en los tres primeros miembros del ensamble.



Por último, se observan los mapas obtenidos por cada miembro del ensamble para temperaturas mínimas de Córdoba. Pronóstico de 36 hs.

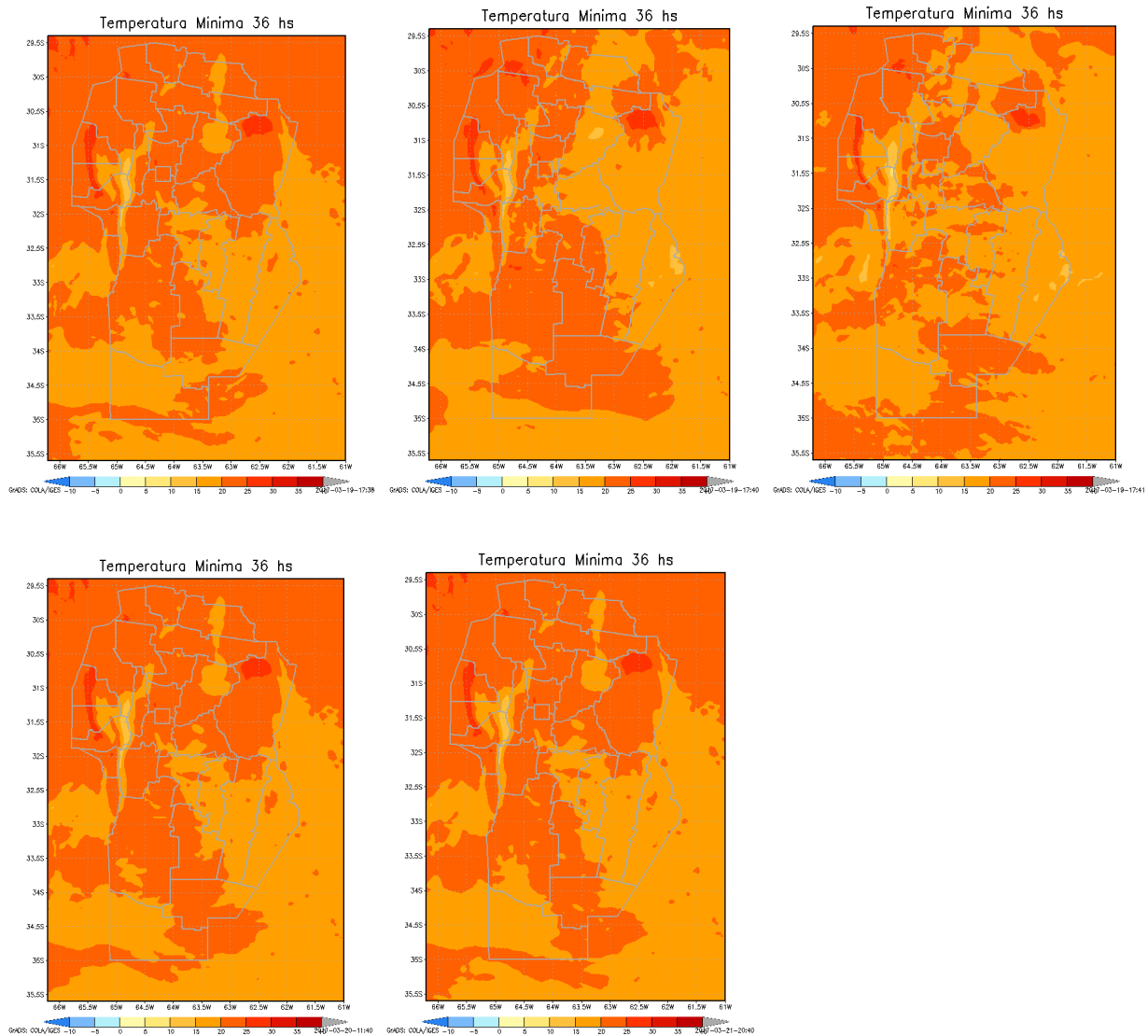


Figura 6.11: Mapas para pronósticos de temperatura mínima de 36 hs. en Córdoba.

Los pronósticos para los miembros de ensamble de temperaturas mínimas presentan una divergencia un poco más pronunciada con respecto a las temperaturas máximas pronosticadas.

### 6.3.7. Inputs para meteogramas

Como se mencionó en la sección 2.13. Además de los mapas, GrADS genera archivos .txt con datos en texto planos a partir de los inputs que provee ARWpost. Dichos archivos contienen datos en texto plano con información de las 5 variables observadas.

Estos datos pueden visualizarse a través de gráficas en alguna aplicación web.

Recordemos que se generan cinco pronósticos por cada una de las localidades de Córdoba.

Por ejemplo, se pueden visualizar los 36 valores por cada hora pronosticada de precipitación correspondiente al miembro de ensamble *A\_Thompson* para la localidad de Alejo Pareja.

```
[lvargas@mendieta meteogramas]cat rain_ALEJO_LEDESMA.txt
Notice: Automatic Grid Interpolation Taking Place
Printing Grid -- 36 Values -- Undef = -9.99e+08
0.00405779
0.00405779
0.00405779
0.00405779
0.00413394
0.00413394
0.004134
0.004134
0.004134
0.00415823
0.00415823
0.00415823
0.00415823
0.00415823
0.00415823
0.00415823
0.00415823
0.00415823
0.00415823
0.00415823
0.232016
1.49781
1.49781
1.49781
1.49781
2.99367e-08
2.99367e-08
2.99367e-08
2.99367e-08
2.99367e-08
2.99367e-08
2.99367e-08
2.99367e-08
2.99367e-08
2.99367e-08
2.99367e-08
2.99367e-08
2.99367e-08
2.99367e-08
2.99367e-08
```

### 6.3.8. Visualización web

Los inputs generados por GrADS son inputs para generar reportes graficos en el archivo `meteogramas.html` para visualizar estadísticas de todos los miembros de ensamble por región.

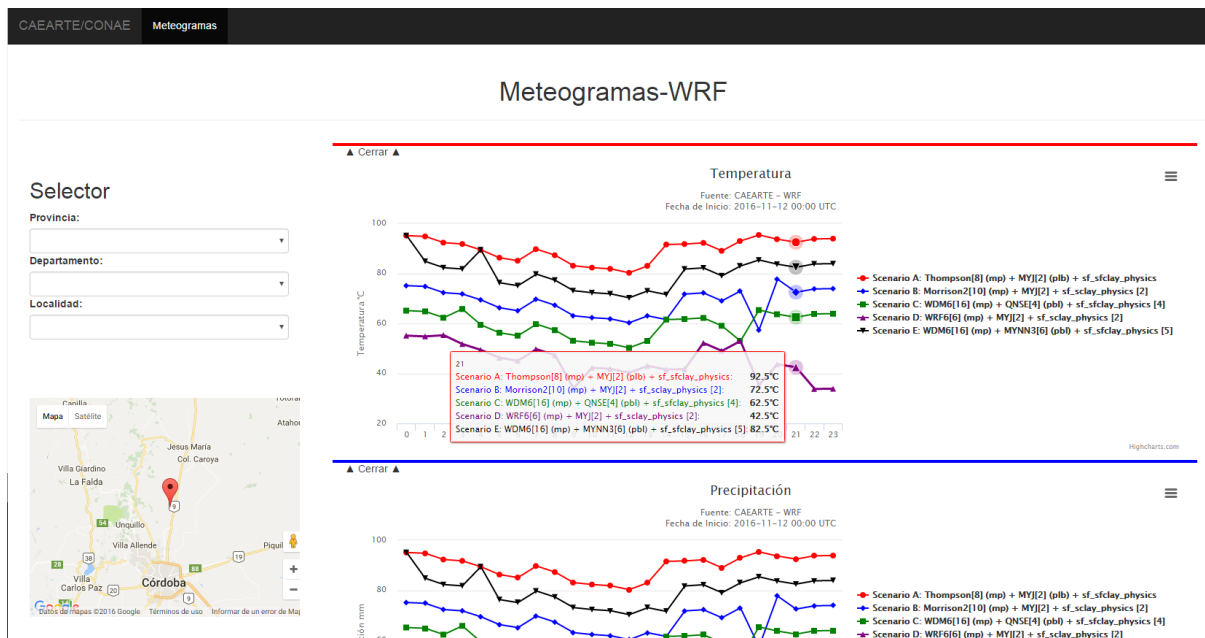


Figura 6.11: Reporte de meteogramas

### 6.3.9. Análisis durante la ejecución

Durante la ejecución de WRF en nodos de Mendieta se realizaron algunos análisis para chequear que el procesamiento se realizaba de manera performante.

- 1) Se pudo constatar que el total de los cores involucrados en procesamiento realizaron cómputo al máximo de su potencia durante la etapa paralelizable, esto es mientras se ejecutaba *wrf.exe*.

La figura 6.13 muestra el uso intensivo de cada uno de los 100 cores para una ejecución que utilizo 5 nodos de la partición *multi* utilizando las herramientas *tmux* + *htop*.

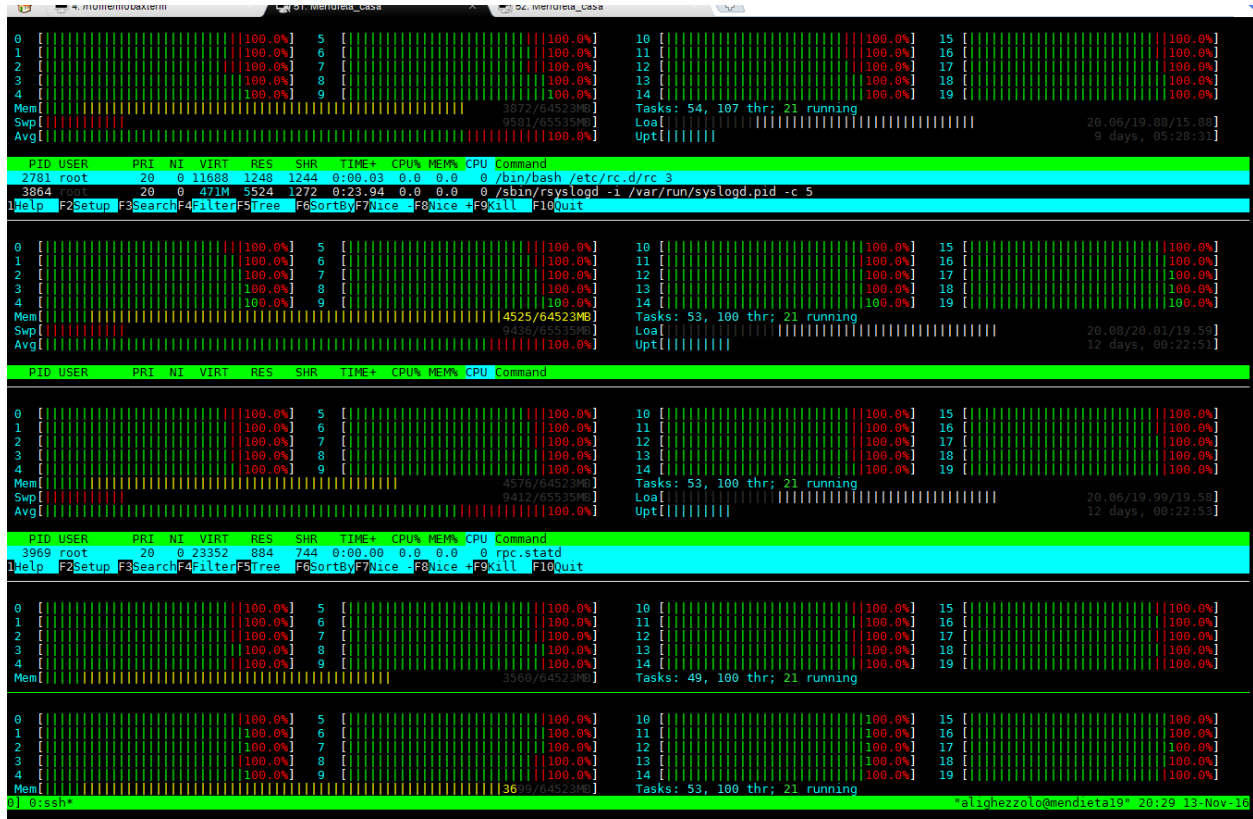


Figura 6.13: 100 procesos MPI ejecutando WRF en 5 nodos

Este resultado es muy positivo pues indica que se están aprovechando al máximo las unidades de procesamiento en el cómputo de WRF. No se detectó que durante la ejecución de *wrf.exe*, hubiera alguno de los cores ejecutando algún otro proceso que no fuera *wrf.exe*.

Esto deja claramente manifiesto lo que significa un sistema de cómputo *dedicado*.

- 2) Un análisis del uso de memoria con la herramienta *numactl* muestra que la memoria compartida por ambos procesadores en un nodo fue accedida de una manera eficiente. Una muestra tomada para una ejecución de WRF en los nodos mendieta09 y mendieta13 muestra los siguientes resultados:

La CPU 0 (nodo 0) de Mendieta09 tiene durante un momento de la ejecución ocupada casi la totalidad de su memoria: aproximadamente 31GiB, mientras que la CPU 1 tiene ocupado aproximadamente el 50% de su capacidad.

```
[lvargas@mendieta09 ~]numactl --hardware
available: 2 nodes (0-1)
node 0 cpus: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9
node 0 size: 32733 MB
node 0 free: 955 MB
node 1 cpus: 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19
node 1 size: 32768 MB
node 1 free: 15098 MB
node distances:
node  0  1
  0:  10  21
  1:  21  10
```

Análisis sobre Mendieta13: En este nodo la distribución fue más pareja aproximadamente 20 GiB para cada CPU.

```
[lvargas@mendieta13 ~]numactl --hardware
available: 2 nodes (0-1)
node 0 cpus: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9
node 0 size: 32733 MB
node 0 free: 11665 MB
node 1 cpus: 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19
node 1 size: 32768 MB
node 1 free: 10061 MB
node distances:
node  0  1
  0:  10  21
  1:  21  10
```

Un primer aspecto básico pero importante a destacar, que proporciona un clúster como Mendieta, a diferencia de un sistema computacional convencional, es que al contar con mucha memoria (64GiB) todo el dominio de simulación se encuentra alojado en memoria, lo que evita el uso de acceso a memoria virtual (disco). Los tiempos de acceso a disco son prohibitivos en HPC. Aunque el modelado realizado por WRF consume una considerable cantidad de memoria: aproximadamente 40 GiB.

Para interpretar mejor la información obtenida se complementa con las siguientes herramientas:

- i. Se solicita a través del comando *salloc* de SLURM un nodo de la partición *phi* y se ejecuta WRF bajo la herramienta *perf*, la cual como se explicó en la sección 4.2.6. es un profiler que recolecta métricas durante tiempo de ejecución. Las métricas pedidas son instructions, cycles, cache-misses y cache-references.

```
[lvargas@mendieta ~] salloc -p multi -n 20 srun --exclusive --pty --preserve-env
$SHELL
[lvargas@mendieta13 ~] time srun perf stat -e instructions, cycles, cache-references,
cache-misses ./wrf.exe
```

EL resultado es obtenido para cada uno de los 20 cores que ejecutaron WRF y brindan la siguiente información (para un core).

```
Performance counter stats for './wrf.exe':

32545983155507      instructions          #    1.24  insns per cycle
26346678055134      cycles
125676007246        cache-references
39025273377         cache-misses          #   31.052 % of all cache refs

8504.378669569 seconds time elapsed
```

La información relevante es que aproximadamente hubo un 30% de cache-misses. Lo que indica que en aproximadamente un 70%, los accesos a cache fueron exitosos. El 30% de cache-misses derivan en accesos a RAM.

- ii. Aplicando un análisis con la herramienta *numastat* durante un periodo de la ejecución de WRF se obtiene la siguiente información:

```
[lvargas@mendieta20 ~]for i in {1..100}; do numastat -c ; sleep 5; done
```

```
Per-node numastat info (in MBs):
```

	Node 0	Node 1	Total
-----	-----	-----	-----
Numa_Hit	3070988	3553197	6624185
Numa_Miss	0	0	0
Numa_Foreign	0	0	0
Interleave_Hit	111	112	224
Local_Node	3070909	3553118	6624026
Other_Node	79	80	159

```
Per-node numastat info (in MBs):
```

	Node 0	Node 1	Total
-----	-----	-----	-----
Numa_Hit	3071133	3553377	6624510
Numa_Miss	0	0	0
Numa_Foreign	0	0	0
Interleave_Hit	111	112	224
Local_Node	3071053	3553297	6624351
Other_Node	79	80	159

```
.
.
.
.
```

```
Per-node numastat info (in MBs):
```

	Node 0	Node 1	Total
-----	-----	-----	-----
Numa_Hit	3071346	3553646	6624992
Numa_Miss	0	0	0
Numa_Foreign	0	0	0

Interleave_Hit	111	112	224
Local_Node	3071267	3553566	6624833
Other_Node	79	80	159

Se observa que, del 30% de accesos a RAM (NUMA) debido a cache-misses, no se obtuvieron NUMA-miss, esto significa que *wrf.exe* ejecutado en el nodo 0, no tuvo necesidad de acceder a la memoria remota alocada por *wrf.exe* ejecutado en el nodo 1. Esto explica los valores 0 para las métricas Numa-hits y Numa-Foreign.

- iii. Se verificó que efectivamente los accesos a memoria por parte de WRF estaban efectuándose de manera eficiente utilizando el soporte de “afinidad” que proporciona *numactl*. Esto significa que se explicitó que cada uno de los 20 procesos *wrf.exe* estuvieran “bindeados” (atados) a un core en particular. Esta técnica evita la perdida de cache al migrar procesos entre cores, ya que este mecanismo implica cargar el estado del proceso nuevamente en la cache y RAM del nuevo core asignado, generando perdida de performance.

La instrucción para proporcionar afinidad es la siguiente:

```
time srun numactl --physcpubind=0-19 ./wrf.exe
```

Sin embargo, no se obtuvieron mejoras significativas en tiempo de ejecución lo que confirma el análisis realizado en ii. Que sin esta técnica WRF ya estaba accediendo de forma eficiente a su memoria.





## 7. Conclusiones

Existe una necesidad importante de que las áreas de estudio y pronóstico del clima en el país se desarrollen de manera de obtener pronósticos climáticos que ayuden en la implementación de sistemas de alertas tempranas ante siniestros ambientales. El presente trabajo intenta contribuir en ese sentido estudiando la implementación de WRF en el clúster Mendieta.

Los primeros resultados obtenidos demuestran que la implementación del modelo WRF en Mendieta entrega una performance muy superior a los resultados de correr WRF en una máquina convencional como un procesador Core i7 con cuatro núcleos o incluso una máquina como JupiterAce. Aunque la arquitectura de JupiterAce es mucho más potente que la máquina de CAEARTE no se obtuvo una mejora significativa en los tiempos de ejecución usando compilaciones de WRF presumiblemente similares. Las causas pueden darse en qué WRF no escala linealmente agregando mas cores y usando memoria compartida en un *single-system* o probablemente la implementación de WRF en JupiterAce careció de todos los parámetros necesarios para ejecutar de forma más performante.

El paralelismo que se puede extraer corriendo WRF en un solo nodo de la partición *mono* demuestra una mejora en el speedup de 3x con respecto a la implementación en hardware convencional. La performance mejora aún más ejecutando WRF en múltiples nodos de la partición de *multi*, alcanzando mejoras significativas ejecutando hasta en 7 nodos y obteniendo una mejora final de aproximadamente 10x en tiempo de cómputo con respecto al baseline inicial. (Partiendo de ~360 minutos en máquina convencional a ~21 minutos en 8 nodos de Mendieta).

También vemos que la performance comienza a escalar sublinealmente distribuyendo el cómputo en más de cuatro nodos. Por otro lado también se nota que la diferencia en performance entre Mendieta1 y Mendieta2 no es muy significativa, aunque se nota una leve mejora (en el orden del par de minutos) en los tiempos de ejecución.

Es un desafío futuro o parte de una línea de investigación a seguir el uso de WRF en aceleradores de cómputo tales como con las que cuenta Mendieta (placas NVIDIA Tesla y los coprocesadores

Xeon Phi). En la actualidad el equipo de desarrollo de WRF (NCAR entre otros) se encuentra trabajando en la migración de código a estas arquitecturas, aunque aún no ha publicado oficialmente el código.

La conclusión final a la que se puede arribar tras evaluar los resultados obtenidos, es que es posible obtener pronósticos sobre aspectos climáticos de grandes porciones de regiones y con un buen grado de precisión y de resolución en un tiempo que permite poder actuar en consecuencia, es decir en tiempos relativamente cortos que permitan anticiparse a fenómenos climáticos adversos.

De otra manera si no se contase con una herramienta de pronóstico climático como WRF en un centro de cómputo dedicado como el caso de Mendieta y en su lugar se ejecutase este modelo en arquitecturas convencionales el tiempo de cómputo sería demasiado alto e impracticable si se desean realizar múltiples pronósticos en paralelos (modelo de ensambles).

Se espera que este trabajo sea un aporte más en la implementación y puesta en operación de un modelo tan importante como lo es WRF ya que resulta de crucial importancia para los organismos competentes en cuestiones ambientales, tales como la unidad CAEARTE, como así también como para otros actores como la ciencia y la industria local agrícola, etc., entre otros, poder contar con una herramienta de este tipo.



## Apéndice A: Variables de entorno necesarias para construir WRF + dependencias

La siguiente tabla describe ciertas variables de entorno que son necesarias declarar o setear para la implementación de WRF en Mendieta.

Variable	Uso	Descripción
CC	Compilador C	La versión utilizada fue gcc-5
FC	Compilador Fortran	Carga mpif90
CFLAGS	Flags para compilador C (optimización)	Carga -w -O3 -c
CPPFLAGS	Opciones para preprocesador C	Este flag debe contener el path de \$NETCDF/lib al momento de compilar NetCDF-Fortran También debe contener los path de \$HDF5/lib y \$ZIIB/lib. Ver el archivo \$WRF_BASE/set_custom_configuration.h
FCFLAGS	Flags para compilador Fortran 90	La optimización para código fortran se alcanza con estos flags que se auto generan al compilar WRF: -O2 -ftree-vectorize -funroll-loops Proveen autoparalización y unrolling en loops También carga -ffree-form -ffree-line-length-none y -fconvert=big-endian -frecord-marker=4
LDFLAGS	Flags para librerías dinámicas	Cargamos path de librerías de las dependencias de WRF: -L\${NETCDF}/lib -L\${HDF5}/lib
		Es un requerimiento necesario para poder utilizar Open MPI.

DM_CC		Esta variable debe ser seteada con los siguientes valores: mpicc -DMPI2_SUPPORT
CFLAGS_LOCAL		La optimización para código C se alcanza con estos flags que se auto generan al compilar WRF: -w -O3 -c
LD_LIBRARY_PATH	Path de librerías dinámicas	Este path debe contener todas las librerías dinámicas (shared objects) cargadas en tiempo de ejecución. Por ejemplo, ARWpost ejecutado en Mendieta utiliza la librería de netcdf ubicada en /opt-old/netcdf/4.3.3.1-gcc_4.9.2/lib: libnetcdf.so.7
WRF_LIB	Variable para librerías de WRF	-lgomp: Flag necesario para ejecutar OMP. Debe setearse en tiempo de compilación de WRF para correr en nodos de la partición <i>mono</i> .

Tabla A.1: Variables de entorno usadas

# Apéndice B: Instalación de WRF en Mendieta u otro sistema Linux

1. Documentación en repositorio
2. Descarga de WRF/WPS/ARWpost
3. Instalación de WRF + dependencias
4. Obtención de datos terrestres
5. Pruebas durante la ejecución

## 1. Documentación en repositorio

Las siguientes instrucciones de ejecución de comandos, junto con el código fuente se encuentra versionado en el repositorio público [https://github.com/lvc0107/wrf\\_mendieta](https://github.com/lvc0107/wrf_mendieta).

Esta sección detalla los pasos necesarios para instalar WRF tanto en Mendieta como en otro entorno Linux por ejemplo JupiterAce.

## 2. Descarga de WRF/WPS/ARWpost y seteo inicial de variables

Clonar el siguiente repo:

```
ssh <USER>@mendieta.ccad.unc.edu.ar
cd $HOME
git clone https://github.com/lvc0107/wrf_mendieta.git
cd wrf_mendieta
mkdir WRF3.6.1
```

La ejecución del siguiente comando carga las variables de entorno necesarias.

```
. set_configuration.sh
```

Para un entorno como JupiterAce es necesario agregar las siguientes variables de entornos en el archivo *set\_custom\_configuration.sh* y luego cargarlas en el sistema.

```
export CPPFLAGS="-I${NETCDF}/include -I${HDF5}/include -I${ZLIB}/include"
export LDFLAGS="-L${NETCDF}/lib -L${HDF5}/lib -L${ZLIB}/lib"
export LD_LIBRARY_PATH=${ZLIB}/lib:${HDF5}/lib:${NETCDF}/lib:${LD_LIBRARY_PATH}

export WRFIO_NCD_LARGE_FILE_SUPPORT=1
export WRF_EM_CORE=1

### Folder for grads configuration.
export GADDIR=$WRF_BASE/library/grads-2.0.2/data
export PATH=$PATH:$WRF_BASE/library/grads-2.0.2/bin
. set_custom_configuration.sh
```

## Descarga de WRF

```
cd $WRF_BASE/WRF3.6.1
wget http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/src/WRFV3.6.1.TAR.gz
tar -xvzf WRFV3.6.1.TAR.gz
rm WRFV3.6.1.TAR.gz
```

## Descarga de WPS

```
cd $WRF_BASE/WRF3.6.1
wget http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/src/WPSV3.6.1.TAR.gz
tar -xvzf WPSV3.6.1.TAR.gz
rm WPSV3.6.1.TAR.gz
```



## Descarga de ARWpost

```
cd $WRF_BASE/WRF3.6.1
wget http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/src/ARWpost_V3.tar.gz
tar -xvzf ARWpost_V3.tar.gz
rm ARWpost_V3.tar.gz
```

## 3. Instalación de WRF + dependencias

### 3.1. JasPer

```
cd $WRF_BASE
module load compilers/gcc/4.9
mkdir -p library/jasper/build
cd library/jasper
wget http://www.ece.uvic.ca/~mdadams/jasper/software/jasper-1.900.1.zip
unzip jasper-1.900.1.zip
rm jasper-1.900.1.zip
cd jasper-1.900.1
./configure --prefix=$(pwd)/build
make
make check
make install
```

Chequeo de la correcta instalación de JasPer:

```
ls build/bin/
imgcmp imginfo jasper tmrdemo
```

### 3.2. Zlib

Esta herramienta ya se encuentra instalada en Mendieta. Paso valido para JupiterAce.

```
cd $WRF_BASE/library
mkdir -p zlib/build
cd zlib
wget http://fossies.org/linux/misc/zlib-1.2.8.tar.gz
tar -xvf zlib-1.2.8.tar.gz
rm zlib-1.2.8.tar.gz
cd zlib-1.2.8/
./configure --prefix=$(pwd)/build
make test
make install
```

### 3.3. HDF5

Esta herramienta ya se encuentra instalada en Mendieta. Paso valido para JupiterAce.

```
cd $WRF_BASE/library
mkdir hdf5
cd hdf5/
wget https://www.hdfgroup.org/ftp/HDF5/releases/hdf5-1.8.13/src/hdf5-1.8.13.tar.gz
tar -xvzf hdf5-1.8.13.tar.gz
hdf5-1.8.13.tar.gz
cd hdf5-1.8.13/
mkdir build
cd build
make clean
./configure --prefix=$(pwd)/build
make
make test
make install
make check-install
# update $WRF_BASE/set_custom_configuration.sh with the following variable
# export HDF5=$WRF_BASE/library/hdf5-1.8.13/build
. set_custom_configuration.sh
```

### 3.4. NetCDF

Esta herramienta ya se encuentra instalada en Mendieta. Paso valido para JupiterAce.

```
cd $WRF_BASE/library
mkdir netcdf
wget http://pkgs.fedoraproject.org/repo/pkgs/netcdf/netcdf-
4.3.3.1.tar.gz/5c9dad3705a3408d27f696e5b31fb88c/netcdf-4.3.3.1.tar.gz
md5sum netcdf-4.3.3.1.tar.gz | grep 5c9dad3705a3408d27f696e5b31fb88c
tar -xvf netcdf-4.3.3.1.tar.gz
rm netcdf-4.3.3.1.tar.gz
cd netcdf-4.3.3.1/
mkdir build
make clean
./configure --prefix=$(pwd)/build FC=gfortran F77=gfortran CC=gcc --enable-shared
LDFLAGS="-L$HDF5/lib" CPPFLAGS="-I$HDF5/include"
make
make check
make install
cd $WRF_BASE
# update $WRF_BASE/set_custom_configuration.sh with the following variable
# export HDF5=$WRF_BASE/library/netcdf/netcdf-4.3.3.1/build
. set_custom_configuration.sh
```

### 3.5. NetCDF-Fortran

Esta herramienta ya se encuentra instalada en Mendieta. Paso valido para JupiterAce.

```
cd $WRF_BASE/library/netcdf
wget ftp://ftp.unidata.ucar.edu/pub/netcdf/netcdf-fortran-4.2.tar.gz
tar -xvf netcdf-fortran-4.2.tar.gz
rm netcdf-fortran-4.2.tar.gz
# si no esta disponible el recurso intentar:
#git clone https://github.com/Unidata/netcdf-fortran.git #ultimo release (no 4.2)
cd netcdf-fortran-4.2
make clean
#install in the netcdf build directory
```

```
./configure --prefix=$(pwd)/../netcdf-4.3.3.1/build FC=gfortran F77=gfortran CC=gcc --  
enable-shared 2>&1 | tee configure.log  
make  
make check  
make install
```

### 3.6 MVAPICH

Paso valido para un entorno donde no esté instalada alguna implementación de MPI.

```
cd $WRF_BASE/library  
mkdir mvapich  
cd mvapich  
wget http://mvapich.cse.ohio-state.edu/download/mvapich/mv2/mvapich2-  
2.2.tar.gz  
tar -xvf mvapich2-2.2.tar.gz  
rm mvapich2-2.2.tar.gz  
cd mvapich2-2.2  
#configure: error: 'infiniband/mad.h not found. Please retry with --disable-mcast'  
./configure --prefix=$(pwd)/build --disable-mcast  
make  
make install  
  
# Agregar $(pwd)/build/bin a PATH
```

### 3.7. Uso de tools instaladas en Mendieta

```
. set_configuration.sh
```

### 3.8. Instalación de WRF

```
cd $WRF_DIR
./clean -a
./configure
```

Al iniciar el script *configure* debe dar un mensaje como el siguiente:

De esta forma si se está usando *set\_configuration.sh* (Herramientas provistas por Mendieta).

```
checking for perl5... no
checking for perl... found /usr/bin/perl (perl)
Will use NETCDF in dir: /opt/netcdf-fortran/4.4.2-netcdf_4.3.3.1-gcc_4.9.2
Will use PHDF5 in dir: /opt/hdf5/1.8.15-gcc_4.9.2
which: no timex in (/opt/netcdf-fortran/4.4.2-netcdf_4.3.3.1-
gcc_4.9.2/bin:/opt/netcdf/4.3.3.1-gcc_4.9.2/bin:/opt/hdf5/1.8.15-
gcc_4.9.2/bin:/opt/openmpi-cuda/1.8.8-gcc_4.9-cuda_7.0-
clean/bin:/opt/gcc/4.9.3/bin:/opt/cuda/7.0/bin:/usr/lib64/qt-
3.3/bin:/usr/local/bin:/bin:/usr/bin:/usr/local/sbin:/usr/sbin:/sbin:/opt/ibutils/bin:
/opt/mendieta/bin:/home/lvargas/bin:/home/lvargas/conae/library/grads-2.0.2/bin)
```

O de esta forma si se está usando *set\_custom\_configuration.sh*.

```
checking for perl... found /usr/bin/perl (perl)
Will use NETCDF in dir: /home/<USER>/wrf_mendieta/library/netCDF
Will use PHDF5 in dir: /home/<USER>/wrf_mendieta/library/hdf5-1.8.13
which: no timex in (/opt/gcc/4.9.3/bin:/usr/lib64/qt-
3.3/bin:/usr/local/bin:/bin:/usr/bin:/usr/local/sbin:/usr/sbin:/sbin:/opt/ibutils/bin:
/opt/mendieta/bin:/home/<USER>/bin)
```

Se debe verificar que las variables NETCDF y PHDF5 apunten a los path seteados en los archivos *set\_configuration.sh* (*set\_custom\_configuration.sh*).

Elegir opciones 34-1 para usar procesos con memoria distribuida: Open MPI

```
34. x86_64 Linux, gfortran compiler with gcc (dmpar)
Compile for nesting? (1=basic) 1
```

Para utilizar Open MPI, se debe actualizar la variable DM\_CC con el valor -DMPI2\_SUPPORT en el archivo *configure.wrf*.

```
DM_CC          =      mpicc -DMPI2_SUPPORT
```

En caso de correr WRF en un solo nodo es necesario usar procesos con memoria compartida: OpenMP.

```
33. x86_64 Linux, gfortran compiler with gcc (smpar)
Compile for nesting? (1=basic) 1
./compile em_real &> compile.log
```

Comprobar la generación de los siguientes archivos .exe:

```
ls -lt main/*.exe

real.exe
tc.exe
nup.exe
ndown.exe
wrf.exe
```

### 3.9. Instalación de WPS

```
cd $WPS_DIR
./clean -a
./configure
```

Notar que al iniciar debe dar un mensaje como el siguiente:

```
Will use NETCDF in dir: /home/<USER>/library/netCDF
Found Jasper environment variables for GRIB2 support...
  $JASPERLIB = /home/<USER>/wrf_mendieta/library/jasper/lib
  $JASPERINC = /home/<USER>/wrf_mendieta/library/jasper/include
```

Elegir opción 1

Actualizar Vtable<sup>8</sup>.

```
cd ungrib/Variable_Tables
wget http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/src/Vtable.GFS_new
cd ../../
ln -s ungrib/Variable_Tables/Vtable.GFS_new Vtable
```

En caso de correr WRF en un solo nodo es necesario se debe declarar explícitamente el uso de OpenMP agregando el flag **-lgomp** a la variable WRF\_LIB en el archivo *configure.wps*.

```
WRF_LIB          =      -L$(WRF_DIR)/external/io_grib1 -lio_grib1 \
                        -L$(WRF_DIR)/external/io_grib_share -lio_grib_share \
                        -L$(WRF_DIR)/external/io_int -lwrfio_int \
                        -L$(WRF_DIR)/external/io_netcdf -lwrfio_nf \
                        -L$(NETCDF)/lib -lnetcdff -lnetcdf -lgomp
./compile &> compile.log
```

---

<sup>8</sup> Vtable: Tabla que lista los campos de interés a interpolar por WPS

Comprobar la generación de los siguientes archivos .exe:

```
ls -lt *.exe
metgrid.exe -> metgrid/src/metgrid.exe
ungrib.exe -> ungrib/src/ungrib.exe
geogrid.exe -> geogrid/src/geogrid.exe
```

Copiar este script:<sup>9</sup>

```
cp $WRF_BASE/link_grib.csh $WPS_DIR
```

### 3.10. Instalación de ARWpost

```
cd $ARWPOST_DIR
```

Agregar el flag **-lnetcdf** en src/Makefile

```
ARWpost.exe: $(OBJS)
    $(FC) $(FFLAGS) $(LDFLAGS) -o $@ $(OBJS)
        -L$(NETCDF)/lib -I$(NETCDF)/include -lnetcdf -lnetcdf
./clean -a
./configure
```

Elegir opción 3.

```
./compile
```

---

<sup>9</sup> Es el script original, pero con permisos de ejecución.



Comprobar la generación del siguiente archivo .exe:

```
ls *.exe
ARWpost.exe
```

### 3.11. Instalación de GrADS

```
cd $WRF_BASE/library
wget ftp://cola.gmu.edu/grads/2.0/grads-2.0.2-bin-CentOS5.8-x86_64.tar.gz
tar -xvzf grads-2.0.2-bin-CentOS5.8-x86_64.tar.gz
rm grads-2.0.2-bin-CentOS5.8-x86_64.tar.gz
cd grads-2.0.2
mkdir data
# Este directorio esta versionado en el repositorio
```

## 4. Obtención de datos terrestres

Los inputs para etapa de pre-procesamiento (geogrib.exe) se deben descargar de la siguiente manera:

```
cd $WPS_DIR
wget http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/src/wps_files/geog_complete.tar.bz2
tar -xjvf geog_complete.tar.bz2
rm geog_complete.tar.bz2

#datos adicionales
cd geog
wget http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/src/wps_files/topo_gmted2010_30s.tar.bz2
tar -xjvf topo_gmted2010_30s.tar
rm topo_gmted2010_30s.tar

wget http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/src/wps_files/topo_30s.tar.bz2
tar -xjvf topo_30s.tar.bz2
rm topo_30s.tar.bz2
```

```
wget http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/src/wps_files/modis_landuse_21class_30s.tar.bz2
tar -xjvf modis_landuse_21class_30s.tar.bz2
rm modis_landuse_21class_30s.tar.bz2
```

# Apéndice C: Scripts para instalación y ejecución de WRF

1. Script para seteo de entorno:
2. Script para ejecución del modelo: run\_wrf\_model.py
3. Script para descarga de inputs
4. Script para solicitud de recursos para N nodos: job\_wrf\_N\_nodes.sh
5. Script para envío de Jobs a los nodos de Mendieta, ejecución y recopilación de resultados:  
run\_wrf\_model.sh

## 1. Script para seteo de entorno: set\_configuration.sh

```
1  #!/bin/bash
2
3  ##### WRF Configuration #####
4
5  ### Environment modules
6  module load gcc/5
7  module load openmpi/2
8  module load hdf5/1.10.0p1
9  module load netcdf/4.4.1.1
10 module load netcdf-fortran/4.4.4
11
12
13 export WRF_VERSION=WRF3.6.1 #También disponible WRF.3.8
14 export WRF_BASE=$(pwd)
15 export WRF_DIR=$WRF_BASE/$WRF_VERSION/WRFV3 # Directorio principal de WRF
16 export WPS_DIR=$WRF_BASE/$WRF_VERSION/WPS # Directorio principal del pre-procesador WPS
17 export ARWPOST_DIR=$WRF_BASE/$WRF_VERSION/ARWpost # Directorio principal del post-procesador ARWPost
18 export GFS_DIR=$WRF_BASE/gribfiles # Directorio para grib files
19 export ENSAMBLE_DIR=$WRF_BASE/ensamble # Directorio para miembros de ensamble
20
21 export jasper=$WRF_BASE/library/jasper
22 export JASPERLIB=$WRF_BASE/library/jasper/lib
23 export JASPERINC=$WRF_BASE/library/jasper/include
24
25 export NETCDF=/opt/spack/opt/spack/linux-centos6-x86_64/gcc-5.4.0/netcdf-fortran-4.4.4-
26 farzkr5oqxp5k2u7bnyaps5g6pnvxffj/
27 export NETCDF_LIB="${NETCDF}/lib -lnetcdf"
28 export NETCDF_INC=$NETCDF/include
29 export HDF5=/opt/hdf5/1.8.15-gcc_4.9.2
30 export PHDF5=$HDF5
31 export CPPFLAGS="-I${NETCDF}/include -I${HDF5}/include"
32 export LDFLAGS="-L${NETCDF}/lib -L${HDF5}/lib"
33 export LD_LIBRARY_PATH=$NETCDF/lib:$LD_LIBRARY_PATH
34
35 export WRFIO_NCD_LARGE_FILE_SUPPORT=1
36 export WRF_EM_CORE=110
37
```

<sup>10</sup> EM- Euleian Mass.

```

38 ### Folder for grads configuration.
39 export GADDIR=$WRF_BASE/library/grads-2.0.2/data
40 export PATH=$PATH:$WRF_BASE/library/grads-2.0.2/bin
41
42 mkdir -p ensemble
43 mkdir -p output
44 mkdir -p logs
45 mkdir -p gribfiles

```

## 2. Script para ejecución del modelo: run\_wrf\_model.py

```

1  #!/usr/bin/python
2  import os
3  import getopt
4  import sys
5  import get_GFSX025_grib2 as grib
6  from datetime import datetime, timedelta
7  import time
8
9  SEPARATOR = '-' * 80
10
11 def update_namelist_wps(environment):
12
13     try:
14
15         print SEPARATOR
16         print "Set date for namelist.wps"
17
18         ENSAMBLE_DIR = environment["ENSAMBLE_DIR"]
19         os.chdir(ENSAMBLE_DIR)
20         patterns = {
21             "start_date" : " start_date = {0}\n".format(environment["start_date"]),
22             "end_date"   : " end_date = {0}\n".format(environment["end_date"])
23         }
24
25         namelist_wps = "namelist.wps"
26
27         with open(namelist_wps) as infile:
28             with open(namelist_wps, 'r+') as outfile:
29                 for line in infile:
30                     for k, v in patterns.iteritems():
31                         if k in line:
32                             line = v
33                             break
34                     outfile.write(line)
35
36         infile.close()
37         outfile.close()
38         os.system("head -15 " + namelist_wps)
39
40     except Exception:
41         raise
42
43
44 def update_namelist_input_output(member_path, environment):
45
46     try:
47         print SEPARATOR
48         print "Set date for namelist.input in {0}".format(member_path)
49         ENSAMBLE_DIR = environment["ENSAMBLE_DIR"]
50         os.chdir(ENSAMBLE_DIR + "/" + member_path)
51         patterns = {
52             "run_days"      : " run_days = {0}\n".format(environment["run_days"])

```

```

53         "run_hours"      : " run_hours = {0}\n".format(environment["run_hours"])    ),
54         "run_minutes"    : " run_minutes = {0}\n".format(environment["run_minutes"]) ),
55         "run_seconds"    : " run_seconds = {0}\n".format(environment["run_seconds"]) ),
56         "start_year"     : " start_year = {0}\n".format(environment["start_year"])   ),
57         "start_month"    : " start_month = {0}\n".format(environment["start_month"]) ),
58         "start_day"      : " start_day = {0}\n".format(environment["start_day"])     ),
59         "start_hour"     : " start_hour = {0}\n".format(environment["start_hour"])   ),
60         "start_minute"   : " start_minute = {0}\n".format(environment["start_minute"]) ),
61         "start_second"   : " start_second = {0}\n".format(environment["start_second"]) ),
62         "end_year"       : " end_year = {0}\n".format(environment["end_year"])       ),
63         "end_month"      : " end_month = {0}\n".format(environment["end_month"])      ),
64         "end_day"        : " end_day = {0}\n".format(environment["end_day"])         ),
65         "end_hour"       : " end_hour = {0}\n".format(environment["end_hour"])       ),
66         "end_minute"     : " end_minute = {0}\n".format(environment["end_minute"])    ),
67         "end_second"     : " end_second = {0}\n".format(environment["end_second"])    )
68     }
69
70
71     with open('namelist.input') as infile:
72         with open('namelist.input', 'r+') as outfile:
73             for line in infile:
74                 for k, v in patterns.iteritems():
75                     if k in line:
76                         line = v
77                         break
78             outfile.write(line)
79
80     infile.close()
81     outfile.close()
82     os.system("head -15 namelist.input")
83
84     print "Set date for namelist.ARWpost {0}".format(member_path)
85
86
87     patterns = {
88         "start_date"      : " start_date = {0}\n".format(environment["start_date"]),
89         "end_date"        : " end_date = {0}\n".format(environment["end_date"]),
90         "input_root_name" : " input_root_name =
91         ' ../wrf_run/wrfout_d01_{0}',\n".format(environment["start_date"])
92     }
93
94     namelist_awr = "namelist.ARWpost"
95
96     with open(namelist_awr) as infile:
97         with open(namelist_awr, 'r+') as outfile:
98             for line in infile:
99                 for k, v in patterns.iteritems():
100                     if k in line:
101                         line = v
102                         break
103             outfile.write(line)
104
105     infile.close()
106     outfile.close()
107     os.system("head -15 {0}".format(namelist_awr))
108
109 except Exception:
110     raise
111
112
113 def download_grib_files(environment, offset):
114
115     try:
116         print SEPARATOR
117
118         GFS_DIR = environment["GFS_DIR"]
119         os.chdir(GFS_DIR)
120         start_date_dir = environment["start_date"]
121         start_date = environment["start_date_int_format"]
122

```

```

123         if not os.path.exists(start_date_dir):
124             os.system("mkdir {0}".format(start_date_dir))
125
126         grib.download_grib_files(start_date, offset, GFS_DIR + "/" + start_date_dir)
127
128     except Exception:
129         raise
130
131
132 def load_configuration(environment, offset):
133
134     try:
135
136         update_namelist_wps(environment)
137         member_names = environment["ENSAMBLE"]
138         for member in member_names:
139             update_namelist_input_output(member, environment)
140
141
142     except Exception:
143         raise
144
145
146 def run_process_model(environment, nodes):
147
148     try:
149         os.chdir(environment["WRF_BASE"])
150         member_names = environment["ENSAMBLE"]
151         start_date = environment["start_date"]
152         end_date = environment["end_date"]
153
154         for member in member_names:
155             print SEPARATOR
156             execute_command = "sbatch job wrf {0} nodes.sh {1} {2} {3}".format(nodes, member,
157                                                                               start_date, end_date)
158             print execute_command
159             os.system(execute_command)
160
161             check_command = "squeue -u $USER"
162             print check_command
163             os.system(check_command)
164     except Exception:
165         raise
166
167
168 def get_member_names(environment):
169     """
170     This function return a list of member names:
171     [
172         member1,
173         member2,
174         .
175         .
176         .
177         memberN,
178     ]
179     """
180
181
182     try:
183
184         ENSAMBLE_DIR = environment["ENSAMBLE_DIR"]
185         os.chdir(ENSAMBLE_DIR)
186         member_names = []
187         subdirs = [x[0] for x in os.walk(ENSAMBLE_DIR)]
188         for subdir in subdirs:
189             member_names.append(subdir.split("/")[-1])
190
191         return member_names[1:]
192

```

```

193     except Exception:
194         raise
195
196
197 def define_environment(start_date, offset):
198     """
199     Format of start and end date:
200     start_date = YYYY-MM-DD_HH:MM:SS
201     end_date = YYYY-MM-DD_HH:MM:SS
202
203     Example:
204     start_date = 2015-02-24_18:00:00
205     """
206
207     try:
208
209         start_date_int_format = int(start_date)
210         start_date = datetime.strptime(start_date, "%Y%m%d%H")
211         start_year = "{0:02d}".format(start_date.year)
212         start_month = "{0:02d}".format(start_date.month)
213         start_day = "{0:02d}".format(start_date.day)
214         start_hour = "{0:02d}".format(start_date.hour)
215         start_minute = "{0:02d}".format(start_date.minute)
216         start_second = "{0:02d}".format(start_date.second)
217
218         end_date = start_date + timedelta(hours = int(offset))
219         end_year = "{0:02d}".format(end_date.year)
220         end_month = "{0:02d}".format(end_date.month)
221         end_day = "{0:02d}".format(end_date.day)
222         end_hour = "{0:02d}".format(end_date.hour)
223         end_minute = "{0:02d}".format(end_date.minute)
224         end_second = "{0:02d}".format(end_date.second)
225
226         run_days = "0"
227         run_hours = offset
228         run_minutes = "0"
229         run_seconds = "0"
230
231         start_date = start_date.strftime("%Y-%m-%d_%H:%M:%S")
232         end_date = end_date.strftime("%Y-%m-%d_%H:%M:%S")
233         print "Start forecast date: {}".format(start_date)
234         print "End forecast date: {}".format(end_date)
235
236
237     environment = {
238         "start_date_int_format" : start_date_int_format,
239         "start_date" : start_date,
240         "end_date" : end_date,
241         "offset" : offset,
242         "start_year" : start_year,
243         "start_month" : start_month,
244         "start_day" : start_day,
245         "start_hour" : start_hour,
246         "start_minute" : start_minute,
247         "start_second" : start_second,
248         "end_date" : end_date,
249         "end_year" : end_year,
250         "end_month" : end_month,
251         "end_day" : end_day,
252         "end_hour" : end_hour,
253         "end_minute" : end_minute,
254         "end_second" : end_second,
255         "run_days" : run_days,
256         "run_hours" : run_hours,
257         "run_minutes" : run_minutes,
258         "run_seconds" : run_seconds
259     }
260
261     if not os.getenv("WRF_BASE"):
262         print SEPARATOR

```

```

263         print "Before run this script you should run: . ./set_configuration.sh"
264         print SEPARATOR
265         sys.exit(1)
266
267         print "ENVIRONMENT VARIABLE LOADED: {}".format(os.getenv("WRF_BASE"))
268         environment["WRF_BASE"] = os.getenv("WRF_BASE")
269         print "ENVIRONMENT VARIABLE LOADED: {}".format(os.getenv("GFS_DIR"))
270         environment["GFS_DIR"] = os.getenv("GFS_DIR")
271         print "ENVIRONMENT VARIABLE LOADED: {}".format(os.getenv("ENSAMBLE_DIR"))
272         environment["ENSAMBLE_DIR"] = os.getenv("ENSAMBLE_DIR")
273         environment["ENSAMBLE"] = get_member_names(environment)
274
275         return environment
276     except Exception:
277         raise
278
279 def usage():
280
281     print SEPARATOR
282     print SEPARATOR
283     print """
284     Execution of WRF model:
285
286     ./run_wrf_model.py -i=STARTDATE -o=OFFSET -n=2
287     or:
288     ./run_wrf_model.py --start_date=STARTDATE --offset=OFFSET --nodes=2
289
290     Where STARTDATE has the following format: YYYYMMDDHH
291     and OFFSET is an integer value that represent the forecast hours
292     starting from the STARTDATE and defined in the range [0-168]hs.
293     The nodes flag is the number of:
294         nodes in multi partition, with nodes in [2,8].
295         nodes in phi partition, with nodes = 1.
296
297     Example:
298     ./run wrf_model.py -i=2015112218 -o=36 -n=2
299     means Forecast of 36 hs starting from the date:
300     year: 2015
301     month: 11
302     day: 22
303     hour: 18
304     forecast time: 36 hs
305
306     running in 2 nodes of multi partition
307
308     Warning: The date is valid only until 15 days behind
309     """
310     print SEPARATOR
311     print SEPARATOR
312
313     sys.exit(1)
314
315
316
317 def check_parameter(option, arg):
318
319     try:
320         arg = arg.replace("=", "")
321         arg = str(int(arg))
322         if option in ("-i", "--start_date"):
323             date = datetime.strptime(arg, '%Y%m%d%H')
324         elif option in ("-o", "--offset"):
325
326             #TODO: define the correct range of OFFSET to validate
327             # In the meantime we are defined the range of offset hours in [0-168]hs
328             if not (0 <= int(arg) and int(arg) <= 168):
329                 usage()
330         elif option in ("-n", "--nodes"):
331             if not int(arg) in range(1,9):
332                 usage()

```



```

333         return arg
334     except Exception:
335         usage()
336
337 def main():
338 
339     print """
340 
341          _____|_____
342      \   /    |  /   \   /   |
343       \ /      \| /____\ /___|_
344        V        V /   _)_   |_
345         \        V /___\_/_   |
346          \        V /   \_\_\_|_
347           \        V /___\_\_\_|_
348            \        V /___\_\_\_|_
349             """"
350 
351     time.sleep(1)
352     start_date = None
353     offset = None
354     nodes = 2 #default value in multi partition
355     try:
356         opts, args = getopt.getopt(sys.argv[1:], "hin:o:", ["help", "start_date=", "offset=", "nodes="])
357     except getopt.GetoptError as err:
358         usage()
359 
360     valid_start_date = False
361     valid_offset = False
362     valid_nodes = False
363     for o, a in opts:
364         if o in ("-h", "--help"):
365             usage()
366             sys.exit()
367         elif o in ("-i", "--start_date"):
368             a = check_parameter(o,a)
369             start_date = a
370             valid_start_date = True
371         elif o in ("-o", "--offset"):
372             a = check_parameter(o,a)
373             offset = a
374             valid_offset = True
375         elif o in ("-n", "--nodes"):
376             a = check_parameter(o,a)
377             nodes = a
378             valid_nodes = True
379         else:
380             usage()
381     if not valid_offset or not valid_start_date or not valid_nodes:
382         usage()
383 
384     try:
385         environment = define_environment(start_date, offset)
386         download_grib_files(environment, offset)
387         load_configuration(environment, offset)
388         run_process_model(environment, nodes)
389     except Exception:
390         raise
391 
392 if __name__ == "__main__":
393     main()

```

### 3. Script para descarga de inputs: get\_GFSX025\_grib2.py

```
1 #0.5 x0 .5 horizontal resolution on the specified geographical domain
2 # and for the specified meteorological parameters only(slice, i.e.sub - area of global data)
3
4 import datetime
5 import urllib2
6 import sys
7 import os
8 import time
9
10 #####
11
12 def chunk_report():
13     bar_len = 60
14     filled_len = 0
15     percents = 0
16     bar = '=' * filled_len + '-' * (bar_len - filled_len)
17
18     sys.stdout.write('[%s] %s%s ...\r' % (bar, percents, '%'))
19     sys.stdout.flush()
20
21 def request(url, file):
22
23     try:
24         print file
25         if os.path.exists(file):
26             # TODO here add checksum verification
27             return 0
28         req = urllib2.Request(url)
29         response = urllib2.urlopen(req)
30     except urllib2.HTTPError, e:
31         print 'The server could not fulfill the request.'
32         print 'Error code: ', e.code
33         return e.code
34     except IOError, e:
35         print 'The server could not fulfill the request.'
36         print 'IOError code: ', e
37         return -1
38     except urllib2.URLError, e:
39         print 'Failed to reach a server.'
40         print 'Reason: ', e.reason
41         return -1
42     else:
43         w = open(file, 'w')
44         w.write(response.read())
45
46         chunk_size=8192
47         while 1:
48             chunk = response.read(chunk_size)
49             if not chunk:
50                 break
51             chunk_report()
52             w.write(chunk)
53
54         response.close()
55         w.close()
56         return 0
57
58
59 def download_grib_files(start_date, offset, grib2_dir):
60
61     INIDATE = start_date
62     DIR_OPER_DATA = grib2_dir
63
64     # Mode of managing: automatic(WORK_MODE = 'auto': automatic retrials) or manual(WORK_MODE = 'man')
65     # WORK MODE = 'man'
66     WORK_MODE = 'auto'
```

```

67
68 # Date of forecast start(analysis)
69 DATE = INIDATE / 100
70 # Instant(hour, UTC) of forecast start(analysis)
71
72 FCI = INIDATE - DATE * 100
73
74 # Archive tar - file creation option(ARCHIVE = True or ARCHIVE = False)
75 ARCHIVE = False
76
77 if ARCHIVE:
78     DIR_ARCHIVE = DIR_OPER_DATA
79     LON_W = "-96"
80     LON_E = "-15"
81     LAT_N = "-10"
82     LAT_S = "-75"
83
84 #Data grid resolution( in degree)
85
86 ADGRID = "0.25"
87 #can be: 0.25, 0.5, 1.0, 2.5
88
89 # Defines connection timeout
90
91 urllib2.socket.setdefaulttimeout(30)
92
93 # Total forecast length( in hours) for which data are requested:
94 NHOURL = int(offset)
95 # Interval in hours between two forecast times:
96 DHOURL = 03
97 # Definition of date( in required format)
98 day = datetime.datetime.today()
99 ### tomorrow = day + datetime.timedelta(days = 1)### yesterday = day + datetime.timedelta(days = -
100 1)
101
102 # If the download is made early in the morning, the date is that of yesterday
103
104 #if day.hour < 6: #day = yesterday
105
106 ### day = "%4.4i%2.2i%2.2i" % (day.year, day.month, day.day)# structure definition
107 day = "%8.8i" % (DATE)
108
109 FCIA = "%2.2i" % FCI
110
111 print "Date and hour of GFS forecast initial time: ", day, FCI
112
113 # Definition of servers name# The first in the list below of those available is used
114
115 SERVER = []
116 SERVER.append("nomads.ncep.noaa.gov/")
117
118 # Definitions of server partial subdir.name
119
120 SERV_PASS = "cgi-bin/"
121
122 #Definition of requested levels and parameters
123
124 LEV_LIST = ["all"]
125 PAR_LIST = ["HGT", "LAND", "PRES", "PRMSL", "RH", "SOILW", "SPFH", "TMP", "UGRD", "VGRD", "WEASD",
126 "TSOIL"]
127
128
129 if WORK_MODE == "auto":
130     COUNTMAX = 50
131     icountmax = 100
132     S_SLEEP1 = 600
133     S_SLEEP2 = 60
134 else:
135     COUNTMAX = 1
136     icountmax = 1

```

```

137     S_SLEEP1 = 10
138     S_SLEEP2 = 1
139
140     NSERVER = len(SERVER)
141     N_LEV_TYPE = 1
142     NINSTANT = NHOURL / DHOURL + 1
143     NFILE_REQUESTED = [NINSTANT, 1]
144     FILE_NAME_DOMAIN = "&subregion=&leftlon=" + LON_W + "&rightlon=" + LON_E + "&bottomlat=" + LAT_S +
145     "&toplat=" + LAT_N
146
147     if ADGRID == "0.25":
148         FILE_NAME_INI = "filter_gfs_0p25.pl"
149         DIR_NAME = "&dir=%2Fgfs." + day + FCIA
150     if ADGRID == "0.5":
151         FILE_NAME_INI = "filter_gfs_hd.pl"
152         DIR_NAME = "&dir=%2Fgfs." + day + FCIA + "%2Fmaster"
153     if ADGRID == "1.0":
154         FILE_NAME_INI = "filter_gfs.pl"
155         DIR_NAME = "&dir=%2Fgfs." + day + FCIA
156     if ADGRID == "2.5":
157         FILE_NAME_INI = "filter_gfs_2p5.pl"
158         DIR_NAME = "&dir=%2Fgfs." + day + FCIA
159
160     # Full list of requested files
161
162     LIST_FILE_REMOTE = []
163     LIST_FLAG = []
164     LIST_FILE_LOCAL_FIN = []
165     NINST = NFILE_REQUESTED[0]
166     for INST in range(0, NINST):
167         if INST + 1 > NFILE_REQUESTED[0]:
168             continue
169         NLEV = len(LEV_LIST)
170         NPAR = len(PAR_LIST)
171         PARAMETERS = ""
172         for IPAR in range(0, NPAR):
173             PARAMETERS = PARAMETERS + "&var_" + PAR_LIST[IPAR] + "=on"
174         LEVELS = ""
175         if LEV_LIST[0] == "all":
176             LEVELS = LEVELS + "&all_lev=on"
177         else:
178             for ILEV in range(0, NLEV):
179                 LEVELS = LEVELS + "&lev_" + LEV_LIST[ILEV] + "=on"
180         HF = INST * DHOURL
181         HFA = "%2.2i" % HF
182         HFA2 = "%3.3i" % HF
183         if ADGRID == "0.25":
184             FILE_NAME_BASE = "?file=gfs.t" + FCIA + "z.pgrb2.0p25.f" + HFA2
185         if ADGRID == "0.5":
186             FILE_NAME_BASE = "?file=gfs.t" + FCIA + "z.mastergrb2f" + HFA
187         if ADGRID == "1.0":
188             FILE_NAME_BASE = "?file=gfs.t" + FCIA + "z.pgrbf" + HFA + ".grib2"
189         if ADGRID == "2.5":
190             FILE_NAME_BASE = "?file=gfs.t" + FCIA + "z.pgrbf" + HFA + ".2p5deg.grib2"
191         FILE_REMOTE = FILE_NAME_INI + FILE_NAME_BASE + LEVELS + PARAMETERS + FILE_NAME_DOMAIN +
192         DIR_NAME
193         FILE_LOCAL_FIN = "GFS_" + day + FCIA + "+" + HFA2 + ".grib2"
194         FLAG = 0
195         LIST_FILE_REMOTE.append(FILE_REMOTE)
196         LIST_FILE_LOCAL_FIN.append(FILE_LOCAL_FIN)
197         LIST_FLAG.append(FLAG)
198
199     NFILE = len(LIST_FLAG)
200
201     # Downloading of requested files
202     WORK = True
203     while WORK:
204         for ISERVER in range(0, NSERVER):
205             FILE_REMOTE0 = "http://" + SERVER[ISERVER] + SERV_PASS
206             print 'Request in server: ', SERVER[ISERVER]

```

```

207
208     COUNT = 1
209     while COUNT <= COUNTMAX:
210         print 'Attempt number: ', COUNT
211
212         NREQ = 0
213         NFLAG = 0
214         for IFILE in range(0, NFILE):
215             if LIST_FLAG[IFILE] == 0:
216                 NFLAG = NFLAG + 1
217                 FILE_REMOTE = FILE_REMOTE0 + LIST_FILE_REMOTE[IFILE]
218                 FILE_LOCAL = DIR_OPER_DATA + '/' + LIST_FILE_LOCAL_FIN[IFILE]
219
220                 ierr = 100;
221                 icount = 0
222                 while ierr != 0 and icount <= icountmax:
223                     icount = icount + 1
224                     ierr = request(FILE_REMOTE, FILE_LOCAL)
225                     print 'downloading error= ', ierr
226                     if ierr == 0: #succeseful downloading
227                         LIST_FLAG[IFILE] = 1
228                         NREQ = NREQ + 1
229                         print "Requested remote file downloaded in local file", FILE_LOCAL
230
231                     else:#unsucceseful downloading
232                         print 'Data file', FILE_REMOTE, 'not downloaded! sleep ', S_SLEEP2, '
233 s'
234                         time.sleep(S_SLEEP2)
235
236                 if NFLAG == NREQ:
237                     WORK = False
238                 if WORK:
239 trial"
240                     print "Not all requested files downloaded, sleeping", S_SLEEP1, "s before next
241                     time.sleep(S_SLEEP1)
242                 else:
243                     print '*****'
244                     print " All requested grib2 files downloaded !", day, FCI, 'UTC'
245                     print '*****'
246                     break
247                 COUNT = COUNT + 1
248                 if WORK:
249                     print "All acceptable attempts have been done in this server, sleeping ", S_SLEEP2, "s
250 before request other server"
251                     time.sleep(S_SLEEP2)
252                 else:
253                     break
254                 if not WORK:
255                     break
256                 else:
257                     if WORK_MODE == 'man':
258                         break
259

```

#### 4. Script para solicitud de recursos para N nodos: job\_wrf\_N\_nodes.sh

```
1  #!/bin/bash
2
3  #####
4  ### How to run:
5  ### sbatch job_wrf_2_nodes.sh A_Thompson_MYJ 2016-09-28_18:00:00 2016-09-30_06:00:00
6  ###
7
8  ##### Slurm configuration #####
9
10 ### Samples of job scripts in /usr/share/doc/mendieta/
11
12 #SBATCH --mail-type=ALL
13 #SBATCH --mail-user=lvc0107@famaf.unc.edu.ar
14 #SBATCH --job-name=WRF
15 #SBATCH --partition=multi
16 #SBATCH --exclusive
17
18 #SBATCH --nodes=2
19 #SBATCH --ntasks-per-node=20
20
21 ### Execution Time. Format: days-hours:minutes. Max time: Four days.
22 #SBATCH --time 0-3:30
23
24
25 ### Environment setup
26 . /etc/profile
27 ##### WRF Configuration #####
28
29
30 ./run_wrf_model.sh $1 $2 $3 2
31
```

#### 5. Script para envío de Jobs a los nodos de Mendieta, ejecución y recopilación de resultados: run\_wrf\_model.sh

```
1  #!/bin/bash
2  . ./set_configuration.sh
3
4  ##### WRF Configuration #####
5
6  SCENARIO=$1
7  ACTUAL_START_DATE=$2
8  ACTUAL_END_DATE=$3
9  NODES=$4
10 echo SCENARIO: $1
11 echo ACTUAL START DATE: $2
12 echo ACTUAL END DATE: $3
13 echo NODES: $4
14 RUN_PARAMETERS=$NODES'_nodes_'$SCENARIO
15 if [ -z $SLURM_JOB_ID ]; then
16     SLURM_JOB_ID=11111
17     TEMP_PATH=$WRF_DIR/test/em_real/$RUN_PARAMETERS/$SLURM_JOB_ID
18     while [ -d $TEMP_PATH ]
19     do
20         SLURM_JOB_ID=$((SLURM_JOB_ID + 1))
21         TEMP_PATH=$WRF_DIR/test/em_real/$RUN_PARAMETERS/$SLURM_JOB_ID
22         echo checking for $TEMP_PATH
23     done
24
25 fi
```

```

26
27 WPS_RUN_DIR=$WRF_DIR/test/em_real/$SRUN_PARAMETERS/$SLURM_JOB_ID/wps_run
28 WRF_RUN_DIR=$WRF_DIR/test/em_real/$SRUN_PARAMETERS/$SLURM_JOB_ID/wrf_run
29 ARWPOST_RUN_DIR=$WRF_DIR/test/em_real/$SRUN_PARAMETERS/$SLURM_JOB_ID/arwpost_run
30
31 mkdir -p $WPS_RUN_DIR
32 mkdir -p $WRF_RUN_DIR
33 mkdir -p $ARWPOST_RUN_DIR
34
35
36 ##### Model execution #####
37
38
39 ### Pre-processing configuration
40
41 echo Entering directory $WPS_RUN_DIR
42 cd $WPS_RUN_DIR
43
44 cp $WPS_DIR/link_grib.csh .
45 cp $SENSAMBLE_DIR/namelist.wps .
46 ln -s $WPS_DIR/geogrid .
47 ln -s $WPS_DIR/geogrid.exe .
48
49 ln -s $WPS_DIR/ungrib .
50 ln -s $WPS_DIR/ungrib.exe .
51 ln -s $WPS_DIR/metgrid .
52 ln -s $WPS_DIR/metgrid.exe .
53
54 ln -s $WPS_DIR/ungrib/Variable Tables/Vtable.GFS_new Vtable
55 ./link_grib.csh $GFS_DIR/$ACTUAL_START_DATE/GFS*
56
57 echo ===== PRE-PROCESSING STARTED =====
58
59 ./geogrid.exe
60 ./ungrib.exe
61 ./metgrid.exe
62
63
64 ### Processing Configuration
65
66 echo Entering directory $WRF_RUN_DIR
67 cd $WRF_RUN_DIR
68
69 ln -sf $WPS_RUN_DIR/met_em.* .
70 cp $WRF_DIR/run/* .
71 echo setting $SCENARIO
72 cp $SENSAMBLE_DIR/$SCENARIO/namelist.input .
73
74 rm -f real.exe
75 ln -s $WRF_DIR/run/real.exe real.exe
76
77 rm -f wrf.exe
78 ln -s $WRF_DIR/run/wrf.exe wrf.exe
79
80 rm -f ndown.exe
81 ln -s $WRF_DIR/run/ndown.exe ndown.exe
82
83 rm -f nup.exe
84 ln -s $WRF_DIR/run/nup.exe nup.exe
85
86 rm -f tc.exe
87 ln -s $WRF_DIR/run/tc.exe tc.exe
88
89 echo ===== PROCESSING STARTED =====
90 echo configuration used: $SRUN_PARAMETERS
91 echo JOBID: $SLURM_JOB_ID
92 echo JOBNAME: $SLURM_JOB_NAME
93 echo NODES: $SLURM_JOB_NUM_NODES
94 echo TASK PER NODES: $SLURM_TASKS_PER_NODE
95 echo Cores obtained: $SCORES

```

```

96 echo SLURM_NODELIST: $SLURM_NODELIST
97
98 echo real.exe execution
99 ###srun ./real.exe
100 ./real.exe
101
102 echo wrf.exe execution
103 echo execution time
104 ###time srun numactl --physcpubind=0-19 ./wrf.exe
105 time srun ./wrf.exe
106
107 echo execution status
108 tail -5 rsl.error.0000
109
110 echo output size:
111 ls -lh wrfout_d01_ $ACTUAL_START_DATE
112
113 echo ===== POST-PROCESSING STARTED =====
114
115 ### Post-processing configuration
116
117
118 echo Entering directory $ARWPOST_RUN_DIR
119 cd $ARWPOST_RUN_DIR
120
121 ### Target folder for ARWPost
122 mkdir -p output/meteogramas
123
124 cp $SENSABLE_DIR/$SCENARIO/namelist.ARWpost .
125
126 rm -f ARWpost.exe
127 ln -s $ARWPOST_DIR/ARWpost.exe ARWpost.exe
128
129 ./ARWpost.exe
130
131 cd output
132 cp $SENSABLE_DIR/*.gs .
133 echo =====
134 echo executing grads -pbcx 'run HPC_CBA_Tmax_Min.gs'
135 grads -pbcx 'run HPC_CBA_Tmax_Min.gs'
136 echo =====
137 echo executing grads -pbcx 'run HPC_CBA_Rain.gs'
138 grads -pbcx 'run HPC_CBA_Rain.gs'
139 echo =====
140 echo executing grads -pbcx 'run meteogramas_Precipitation.gs'
141 grads -pbcx 'run meteogramas_Precipitation.gs'
142 echo =====
143 echo executing grads -pbcx 'run meteogramas_rh.gs'
144 grads -pbcx 'run meteogramas_rh.gs'
145 echo =====
146 echo executing grads -pbcx 'run meteogramas_Temp.gs'
147 grads -pbcx 'run meteogramas_Temp.gs'
148 echo =====
149 echo executing grads -pbcx 'run meteogramas_WindDir.gs'
150 grads -pbcx 'run meteogramas_WindDir.gs'
151 echo =====
152 echo executing grads -pbcx 'run meteogramas_WindSpeed.gs'
153 grads -pbcx 'run meteogramas_WindSpeed.gs'
154
155 LOG_DIR=$SWRF_BASE/logs/$RUN_PARAMETERS
156 echo log dir: $LOG_DIR
157 OUTPUT_DIR=$SWRF_BASE/output/$RUN_PARAMETERS/meteogramas
158 echo output dir: $OUTPUT_DIR
159 mkdir -p $LOG_DIR
160 mkdir -p $OUTPUT_DIR
161 cp -avr $ARWPOST_RUN_DIR/output/meteogramas/* $OUTPUT_DIR
162 LOGFILE=$SWRF_BASE/slurm-$SLURM_JOB_ID.out
163 mv $LOGFILE $LOG_DIR
164
165 ##### Clean temporary files #####

```



```
166 cd SWRE_RUN_DIR/../../../../ ; rm -rf *
167
```

## Bibliografía y referencias

- [1] Mastrandrea, M. D., Field, C. B., Stocker, T. F., Edenhofer, O., Ebi, K. L., Frame, D. J., & Plattner, G. K. (2010). Guidance note for lead authors of the IPCC fifth assessment report on consistent treatment of uncertainties.
- [2] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp
- [3] Subbiah, A. R., Bildan, L., & Narasimhan, R. (2008). Background Paper on Assessment of the Economics of Early Warning Systems for Disaster Risk Reduction. World Bank Group for Disaster Reduction and Recovery.
- [4] Steppeler, J., Doms, G., Schättler, U., Bitzer, H. W., Gassmann, A., Damrath, U., & Gregoric, G. (2003). Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM. *Meteorology and atmospheric Physics*, 82(1), 75-96.
- [5] Kain, J. S., Weiss, S. J., Levit, J. J., Baldwin, M. E., & Bright, D. R. (2006). Examination of convection-allowing configurations of the WRF model for the prediction of severe convective weather: The SPC/NSSL Spring Program 2004. *Weather and forecasting*, 21(2), 167-181.
- [6] Narita, M., & Ohmori, S. (2007, August). Improving precipitation forecasts by the operational nonhydrostatic mesoscale model with the Kain-Fritsch convective parameterization and cloud microphysics. In *Preprints, 12th Conf. on Mesoscale Processes*, Waterville Valley, NH, Amer. Meteor. Soc (Vol. 3).
- [7] Lean, H. W., Clark, P. A., Dixon, M., Roberts, N. M., Fitch, A., Forbes, R., & Halliwell, C. (2008). Characteristics of high-resolution versions of the Met Office Unified Model for forecasting convection over the United Kingdom. *Monthly Weather Review*, 136(9), 3408-3424.
- [8] Kain, J. S., Weiss, S. J., Bright, D. R., Baldwin, M. E., Levit, J. J., Carbin, G. W., & Thomas, K. W. (2008). Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP. *Weather and Forecasting*, 23(5), 931-952.

- [9] Weisman, M. L., Davis, C., Wang, W., Manning, K. W., & Klemp, J. B. (2008). Experiences with 0–36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model. *Weather and Forecasting*, 23(3), 407-437.
- [10] Xue, M., Kong, F., Thomas, K. W., Wang, Y., Brewster, K., Gao, J., & Coniglio, M. (2010). CAPS realtime storm-scale ensemble and convection-resolving high-resolution forecasts for the NOAA Hazardous Weather Testbed 2010 Spring Experiment. In 25th Conference on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., Denver, Colorado, October (pp. 11-14).
- [11] Gritmit, E. P., & Mass, C. F. (2002). Initial results of a mesoscale short-range ensemble forecasting system over the Pacific Northwest. *Weather and Forecasting*, 17(2), 192-205.
- [12] P. Lynch. The origins of computer weather prediction and climate modeling. *Journal of Computational Physics*, 227(7):3431\_3444, 2008.
- [13] Integración de modelos numéricos de predicción meteorológica en sistemas de alerta temprana a emergencias. Tesis de Maestría de Andrés Lighezzolo.
- [14] E. Kalnay. Atmospheric modeling, data assimilation, and predictability. Cambridge University Press, 2003.
- [15] Stensrud, D. J., Wicker, L. J., Kelleher, K. E., Xue, M., Foster, M. P., Schaefer, J. T., & Tuell, J. P. (2009). Convective-scale warn-on-forecast system: A vision for 2020. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(10), 1487-1499.
- [16] Weisman, M. L., Skamarock, W. C., & Klemp, J. B. (1997). The resolution dependence of explicitly modeled convective systems. *Monthly Weather Review*, 125(4), 527-548.
- [17] Romero, R., Doswell III, C. A., & Riosalido, R. (2001). Observations and fine-grid simulations of a convective outbreak in northeastern Spain: Importance of diurnal forcing and convective cold pools. *Monthly weather review*, 129(9), 2157-2182.
- [18] Speer, M. S., & Leslie, L. M. (2002). The prediction of two cases of severe convection: implications for forecast guidance. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 80(1), 165-175.
- [19] Done, J., Davis, C. A., & Weisman, M. (2004). The next generation of NWP: Explicit forecasts of convection using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Atmospheric Science Letters*, 5(6), 110-117.

- [20] Richardson, D. (2011). From Observations to Forecasts—Part 11: Ensemble products for weather forecasters. *Weather*, 66(9), 235-241.
- [21] Epstein, E. S. (1969) <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3402/tellusa.v21i6.10143>
- [22] J.J. Ruiz, C. Saulo, and J. Nogués-Paegle. WRF model sensitivity to choose of Parameterization over South America: validation against surface variables. *Monthly Weather Review*, 138(8):3342\_3355, 2010
- [23] Ley de Moore: [The Future of Computing Performance: Game Over or Next Level?](#)
- [24] TOP500: <https://www.top500.org/>
- [25] Cátedra de Computación Paralela. FaMAF – UNC: <https://cs.famaf.unc.edu.ar/~nicolasw/Docencia/CP/2016/>
- [26] NUMA: [http://lse.sourceforge.net/numa/faq/index.html#what\\_does\\_numa\\_stand\\_for](http://lse.sourceforge.net/numa/faq/index.html#what_does_numa_stand_for)  
<http://frankdenneman.nl/2015/02/27/memory-deep-dive-numa-data-locality/>
- [27] Estructura de Clúster similar a Mendieta: <http://ccad.unc.edu.ar/files/presentacion-OAC.pdf>
- [28] Centro de computación y alto desempeño – UNC: <http://ccad.unc.edu.ar>  
<http://ccad.unc.edu.ar/equipamiento/cluster-mendieta>
- [29] MPI: <https://computing.llnl.gov/tutorials/mpi/#What>[https://www.meted.ucar.edu/training\\_course\\_es.php?id=19](https://www.meted.ucar.edu/training_course_es.php?id=19)
- [30] NetCDF: [http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/netcdf\\_introduction.html#architecture](http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/netcdf_introduction.html#architecture)
- [31] NetCDF-Fortran: [http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/building\\_netcdf\\_fortran.html](http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/building_netcdf_fortran.html)
- [32] Opciones de física a modelar: [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys\\_references.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys_references.html)

[33] Esquema de Microfísica de Thompson:

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys\\_refs/MICRO\\_PHYS/Thompson.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys_refs/MICRO_PHYS/Thompson.pdf)

[34] Esquema de Microfísica de Morrison - 2:

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys\\_refs/MICRO\\_PHYS/Morrison.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys_refs/MICRO_PHYS/Morrison.pdf)

[35] Esquema de Microfísica de momento doble – clase 6:

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys\\_refs/MICRO\\_PHYS/WDM5\\_6.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys_refs/MICRO_PHYS/WDM5_6.pdf)

[36] Esquema de microfísica de momento simple – clase 6:

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys\\_refs/MICRO\\_PHYS/WSM6.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys_refs/MICRO_PHYS/WSM6.pdf)

[37] Esquema de capa límite planetaria Mellor-Yamada-Janjic:

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys\\_refs/PBL/MYJ.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys_refs/PBL/MYJ.pdf)

[38] Esquema de Eliminación de escala cuasi-normal:

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys\\_refs/PBL/QNSE.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys_refs/PBL/QNSE.pdf)

[39] Esquema de Mellor-Yamada- Nakanishi Niino, nivel 3:

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys\\_refs/PBL/MYNN\\_part1.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys_refs/PBL/MYNN_part1.pdf)

[40] Modelo ETA: <http://etamodel.cptec.inpe.br/history/>

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys\\_refs/SURFACE\\_LAYER/eta\\_part1.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys_refs/SURFACE_LAYER/eta_part1.pdf)

[41] Arquitectura de core i7-2600K: [https://ark.intel.com/es/products/52214/Intel-Core-i7-2600K-Processor-8M-Cache-up-to-3\\_80-GHz](https://ark.intel.com/es/products/52214/Intel-Core-i7-2600K-Processor-8M-Cache-up-to-3_80-GHz)

[42] Arquitectura de E5-2620V3: [https://ark.intel.com/es/products/83352/Intel-Xeon-Processor-E5-2620-v3-15M-Cache-2\\_40-GHz](https://ark.intel.com/es/products/83352/Intel-Xeon-Processor-E5-2620-v3-15M-Cache-2_40-GHz)

[43] Instalación de WRF tomada de referencia:

<http://forum.wrfforum.com/viewtopic.php?f=5&t=7099>

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/users\\_guide\\_chap2.htm# Required Compilers and 1](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/users_guide_chap2.htm# Required Compilers and 1)

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/FAQ\\_files/FAQ\\_wrf\\_installation.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/FAQ_files/FAQ_wrf_installation.html)

[44] Compilación de WPS:

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/compilation\\_tutorial.php#STEP5](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/compilation_tutorial.php#STEP5)