

Seminario de Investigación - Informe V

Introducción a WRF

Pablo Cárdenas Zamorano

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

29 de junio de 2016

Resumen En el presente informe se muestran los principales modelos atmosféricos utilizados a nivel mundial y se detalla principalmente en las características y estructura del modelo WRF (Weather Research and Forecasting). Finalmente se presenta como se utilizó este modelo para generar el explorador eólico Chileno.

1. Modelos Atmosféricos

Los modelos atmosféricos son modelos matemáticos que se construyen enmarcando el sistema de ecuaciones dinámicas primitivas que gobiernan los movimientos atmosféricos y que se complementan con la parametrización de aquellos fenómenos que no tienen una fórmula analítica para resolver. Muchos de estos modelos son numéricos, es decir, las ecuaciones son discretizadas y se pueden clasificar según su cobertura: global o regional, o según la manera en que se simplifican las ecuaciones: termotrópicos, barotrópicos, hidrostáticos o no hidrostáticos.

El pronóstico o diagnóstico de la atmósfera se realiza entonces, a través de un gran trabajo computacional. Los diferentes modelos ocupan diferentes métodos de solución, como por ejemplo, los modelos globales suelen usar método espectrales para la dimensión vertical, mientras que los modelos regionales prefieren elementos finitos o volúmenes finitos en las 3 dimensiones.

1.1. Tipos

Se presenta una descripción breve de los principales tipos de modelos:

Termotrópico Se basa en el supuesto de que si bien, la magnitud del viento térmico puede cambiar, su dirección no lo hace con respecto a la altura y por lo tanto los efectos de la baroclinicidad quedan reducidos a los cambios con la altura.

Barotrópico El supuesto es que la dirección y la velocidad del viento geostrófico son independientes de la altura, no existe cizalla vertical del viento. En otras palabras, la atmósfera está en equilibrio geostrófico.

Hidrostático Se filtran las componentes verticales de la ecuación de momentum (lo cual filtra también las ondas acústicas en esa dirección), esto permite amplificar el paso de tiempo para la integración numérica. Generalmente usan como coordenada vertical una coordenada de presión que sigue el contorno de la superficie.

No Hidrostático Resuelve completamente las ecuaciones asumiendo la compresibilidad del aire. Como componente vertical puede utilizar la altura o la σ -altura, la cual sigue el comportamiento del terreno.

1.2. Modelos Contemporáneos

A continuación se presenta un listado de los modelos numéricos más conocidos.

Modelos globales:

- GFP: Global Forecast System
- NOGAPS: U.S. Navy's Operational Global Atmospheric Prediction System Model
- GEM: Global Environmental Multiscale Model
- IFS: Integrated Forecast System
- UM: Unified Model
- GME: Operational Global Numerical Weather Prediction Model de la German Weather Service
- ARPEGE: Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
- IGCM: Intermediate General Circulation Model

Modelos regionales:

- WRF: Weather Research and Forecasting Model
- WRF-NMM: WRF Nonhydrostatic Mesoscale Model
- WRF-ARW: Advanced Research WRF
- NAM: North American Mesoscale Model
- RAMS: Regional Atmospheric Modeling System
- MM5: Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model
- ARPS: Advanced Region Prediction System
- HIRLAM: High Resolution Limited Area Model
- GEM-LAM: Global Environmental Multiscale Limited Area Model
- ALADIN: Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement InterNational
- COSMO: Consortium for Small-Scale Modelling

2. Modelo WRF

El modelo WRF es un modelo desarrollado por un consorcio formado por agencias nacionales de gobierno y universidades de Estados Unidos. Representa el “estado del arte” de modelos de diagnóstico y pronóstico del tiempo. Es un modelo no hidrostático que resuelve las ecuaciones primitivas que controlan el movimiento atmosférico y realiza esto solucionando aproximadamente 10 variables (las componentes del viento u, v, w , la temperatura, la presión, humedad, y otras especies microfísicas que representan las fases del agua) en una grilla tridimensional. El tamaño de las grillas define la resolución del modelo. WRF está diseñado para resolver fenómenos de la meso y micro escala, y por lo tanto su malla puede alcanzar resoluciones de hasta unos cientos de metros, aunque sacrificando recurso computacional. También, para incorporar todos los efectos atmosféricos, WRF utiliza mallas anidadas (multi-escala), donde la malla mas gruesa se encarga de capturar los fenómenos sinópticos, y las mallas mas finas, circulaciones regionales que podrían ser consecuencia de la interacción con el terreno.

WRF presenta dos variantes de su modelo o solvers: WRF-ARW (Advanced Research WRF) y WRF-NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) y a continuación se presentan las características y utilización de cada uno.

3. WRF-ARW

El modelo ARW se viene desarrollando desde los últimos años y su versión mas actual es la versión 3, este modelo es adecuado para un gran rango de aplicaciones en las distintas escalas incluyendo:

- Simulaciones idealizadas (LES, convección, ondas baroclínicas)
- Investigación en Parametrización
- Investigación en Asimilación de Información
- Investigación en Pronóstico
- NWP en tiempo real
- Investigación de Huracanes
- Investigación de clima regional
- Aplicaciones con modelos acoplados
- Enseñanza

El modelo es gratuito y de dominio público disponible para la comunidad.

3.1. Estructura Computacional de ARW

El sistema para modelar de WRF consiste en 4 grandes programas y se puede visualizar en el diagrama anexo a este informe:

1. WPS (WRF Preprocessing System)
2. WRF-DA

3. ARW solver
4. Post procesamiento y visualización

La mayor parte de los códigos de estos programas están escritos en Fortran 90.

3.1.1. WPS

Este programa es utilizado principalmente para simulaciones de datos reales. Sus funciones incluyen: definir los dominios de simulación, interpolar datos terrestres (como el terreno y tipo de suelo) al dominio de la simulación y extraer (el término es *degribbing* que significa sacar los datos de los archivos .grib normalizados para información histórica en meteorología) e interpolar información meteorológica desde otro modelo a este. Sus características principales incluyen:

- Información meteorológica de varios centros alrededor del mundo (formato GRIB)
- Proyecciones de mapa para sistemas: stereográfico polar, Lambert-Confirma, Mercator y latitud-longitud.
- Anidación (*nesting*)
- Interfaz para ingresar otros datos estadísticos.

Consiste en 3 subprogramas y el rol colectivo que cumplen es el de preparar el input del programa real, para simulaciones reales. Cada programa realiza una etapa de la preparación:

1. geogrid: define el dominio del modelo e interpola los datos estáticos geográficos a las mallas.
2. ungrib: extrae los campos meteorológicos de archivos con formato GRIB.
3. metgrid: interpola horizontalmente los campos meteorológicos ,extraídos con ungrib, a la malla generada con geogrid. (la interpolación vertical se hace en el programa real)

3.1.2. WRFDA

Es un programa opcional, su objetivo es generar la primera aproximación (background) y su respectivo error para entregar una estimación del estado atmosférico. Puede ser usado para asimilar observaciones dentro del análisis interpolado creado por el WPS. También se puede usar para actualizar las condiciones iniciales del modelo cuando WRF está corriendo en modo de ciclo. Características principales:

- Esta basado en una técnica de asimilación de datos variacional incremental y tiene capacidades 3D-Var y 4D-Var.
- Incluye la opción de asimilación híbrida de datos (variacional + conjunto)
- El analysis se realiza en una malla-A de Arakawa no escalonada
- Capacidad para computar sensibilidad adjunta
- La componente horizontal del error del background (primera aproximación) es representada a través de un filtro recursivo (para regional) o por espectros de

potencia (para global). La componente vertical es aplicada por medio de proyecciones en autovectores promedios generados climatológicamente y sus correspondientes autovalores.

- Los errores verticales y horizontales del background son no separables.
- Un programa auxiliar para actualizar el archivo con las condiciones de borde en WRF después de WRF-DA.

3.1.3. Solver

Es el componente clave del modelo, el cual está compuesto de varios programas de inicialización para simulaciones ideales o con datos reales, y el programa de integración. Características principales:

- Ecuaciones compresibles y no hidrostáticas con la opción de hidrostáticas.
- Aplicaciones globales y regionales.
- Términos de curvaturas y Coriolis completos.
- Anidación de dos vías, con múltiples nidos y niveles.
- Espaciamiento vertical de la malla puede variar con la altura.
- Malla-C de Arakawa escalonada.
- Opciones de RK-2 y RK-3 para integrar en el tiempo.
- Forma conservativa para variables de pronóstico.
- Opciones de 2do a 6to orden para la advección.
- Pequeños pasos temporales para modos de ondas acústicas y de gravedad
- Condiciones de borde laterales
 - Casos ideales: periódicos, simétricos y radiativo
 - Casos reales
- Opciones de física completa para: superficie del terreno, capa límite atmosférica, radiación, microfísica y convección de cúmulos.
- Modelos Oceánicos.
- Inicialización con filtro digital.
- Pasos de tiempo adaptativos.
- Algunos ejemplos idealizados.

3.1.4. Gráficos y Verificación

WRF soporta varios programas para realizar la visualización de datos, entre ellos: RIP4, NCL, VAPOR, MET, etc.

4. WRF-NMM

El modelo no hidrostático para mesoescala se encuentra actualmente en su versión 3 y se utiliza para una amplia gama de aplicaciones, entre ellas:

- Investigación en Parametrización
- Investigación en Pronóstico
- NWP en tiempo real

- Aplicaciones con modelos acoplados
- Enseñanza

El modelo también es gratuito y de dominio público disponible para toda la comunidad.

4.1. Estructura Computacional de NMM

Un diagrama completo se puede visualizar en el anexo 2 de este informe. A grandes rasgos el programa consiste en 4 componentes:

1. WPS
2. WRF-NMM Solver
3. Postprocesamiento y gráficos
4. MET (Model Evaluation Tool)

4.1.1. WPS

Funciona de la misma manera que en ARW ya que corresponde al mismo programa.

4.1.2. NMM Solver

Algunas características del solver:

- Modelo no hidrostático y compresible con opción de hidrostático.
- Coordenada vertical híbrida (σ -presión).
- Malla-E de Arakawa.
- Esquema forward-backward para las ondas rápidas que se propagan horizontalmente. Esquema implícito para las ondas acústicas verticales. Esquema de Adams-Bashforth para la advección horizontal, y Crack-Nicholson para la vertical. Se usa el mismo paso de tiempo para todos los términos.
- Opciones de física completa para: superficie del terreno, capa límite atmosférica, radiación, microfísica y convección de cúmulos.
- Conservación de un número de cantidades de primer y segundo orden, incluyendo energía y enstrofia.
- Anidación de una y dos vías.

Funciona por medio de dos programas, uno de inicialización *real-mm.exe*, y otro de integración *wrf.exe*.

4.1.3. Postprocesamiento

Se suelen utilizar dos programas auxiliares: RIP (Read Interpolate Plot) y UPP (Unified Post Processor).

UPP se utiliza para post-procesar los datos tanto de ARW como NMM y fue diseñado para:

- Interpolan las predicciones de la coordenada vertical del modelo a los niveles standard NWS.
- Cambiar los datos de la malla escalonada a una malla regular no escalonada.

- Computar cantidades de diagnóstico.
- Sacar los resultados en GRIB1, en los standard NWS y WMO.

RIP permite plotear los pronósticos tanto de ARW como NMM. Algunas características:

- Utiliza un programa de reprocesamiento que permite traspasar los datos de salida de WRF a un formato standart RIP
- Genera gráficos horizontales, secciones verticales, entre otros.
- Calcula y plotea trayectorias hacia adelante y hacia atrás.
- Genera un archivo que puede ser usado por el software VIS5D.

4.1.4. MET

Permite evaluar los datos utilizando las siguientes técnicas:

- Compara los valores de la malla por valores puntuales de observaciones.
- Compara valores de la malla con los valores mallados de las observaciones.

5. Aplicaciones

El modelo WRF es ampliamente utilizado alrededor de todo el mundo para calcular una variedad de fenómenos atmosféricos. Una aplicación relevante para esta investigación es la aplicación de este software para desarrollar el explorador eólico.

5.1. Explorador Eólico

Desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, en conjunto con otras instituciones. Al explorador eólico Chileno está basado en datos obtenidos a partir de simulaciones regionales realizadas en WRF que consistieron en las siguientes características:

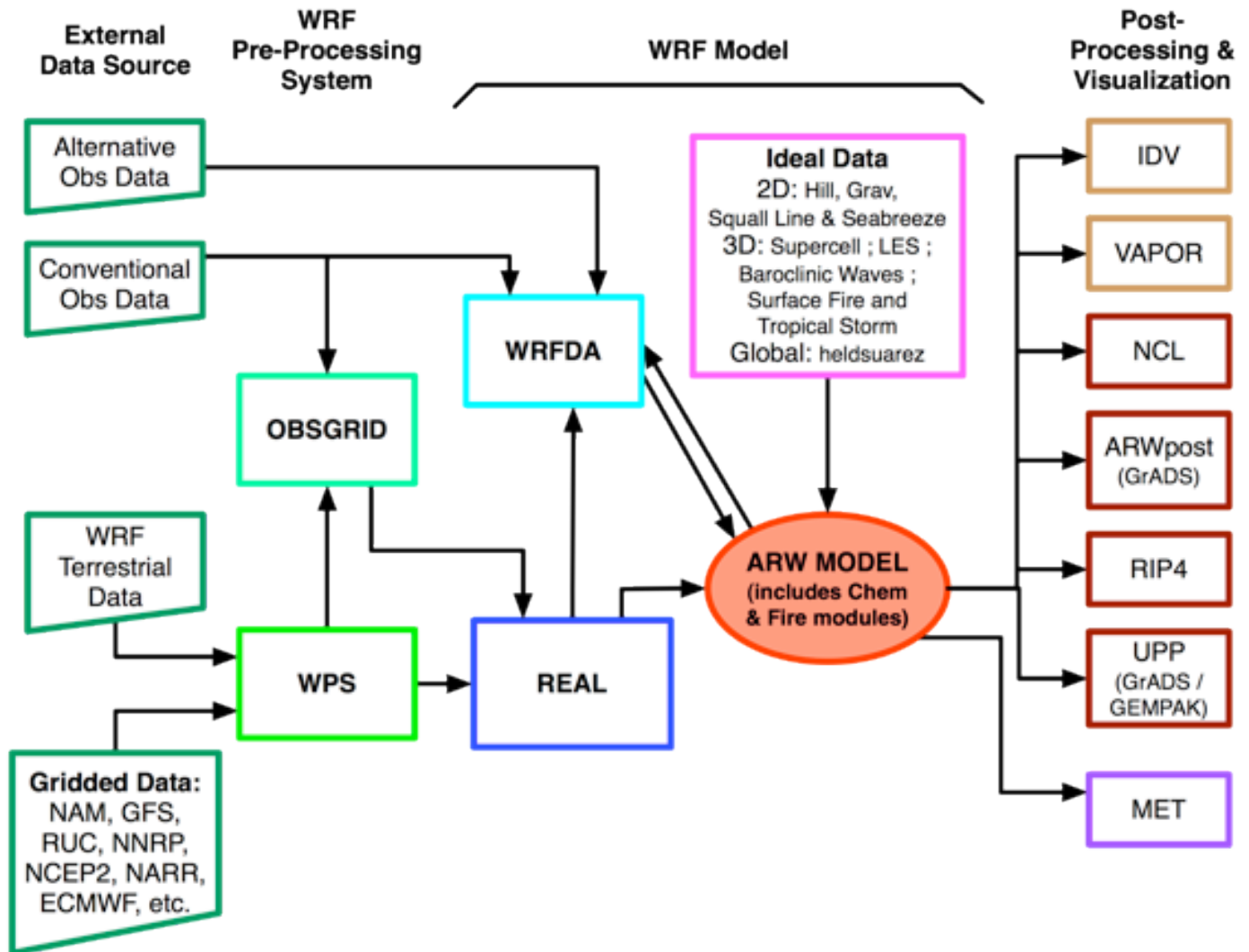
- Modelo: WRF-ARW Versión 3.2

- Periodo de simulación: Enero a Diciembre del año 2010. Con almacenamiento de datos cada una hora.
- Dominios Computacionales: 17. Abarcando desde Arica a Chiloé. Cada malla tiene un traslape con la otra de mínimo 24 km entre ellas, lo que permite reducir las discontinuidades en los campo de viento entre un dominio u otro.
- Resolución Horizontal: 1 [km]
- Coordenada Vertical: 41 niveles (12 en los primeros 250 metros). Recordar que la coordenada vertical está en función del terreno por lo tanto es espaciamiento físico es variable, pero se mantiene la tendencia de tener mas capas cerca de la superficie.
- Condición de borde: GFS (Global Forecast System) análisis operacionales
- Topografía: SRTM (90 m) (Shuttle Radas Topography Mision)
- Modelos de Parametrizaciones usado:
 - Microfísica: WSM 5-especie
 - Radiación onda larga: RRTM
 - Radiación onda corta: Dudhia
 - Capa Límite: QNSE
 - Capa Superficial: QNSE
 - Suelo: Esquema simple de 5 capas.
- Características de la superficie: las propiedades del terreno (rugosidad, vegetación, tipo de suelo, etc.) se definieron a través de los instrumentos satelitales MODIS de la NASA.

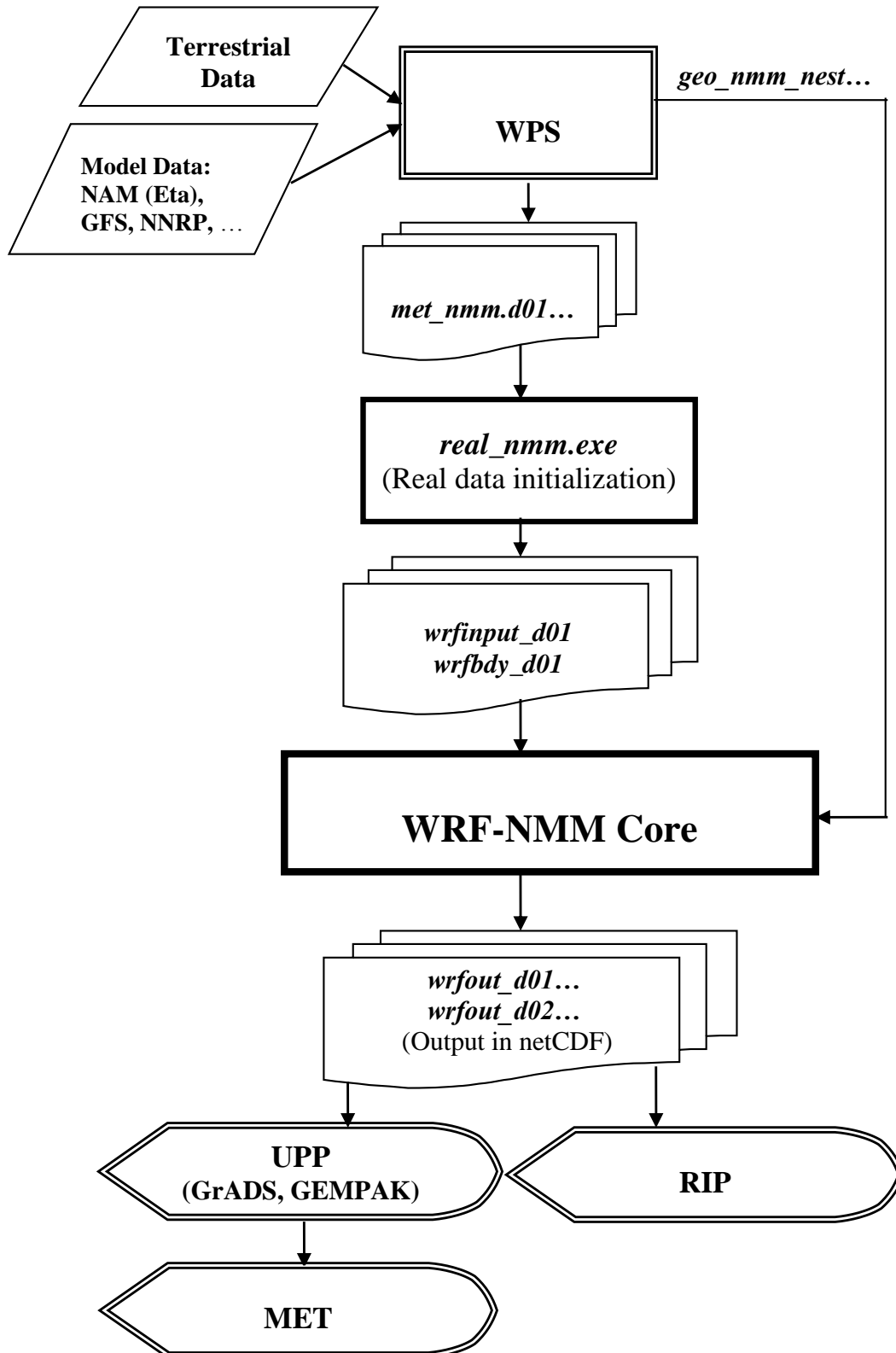
Referencias

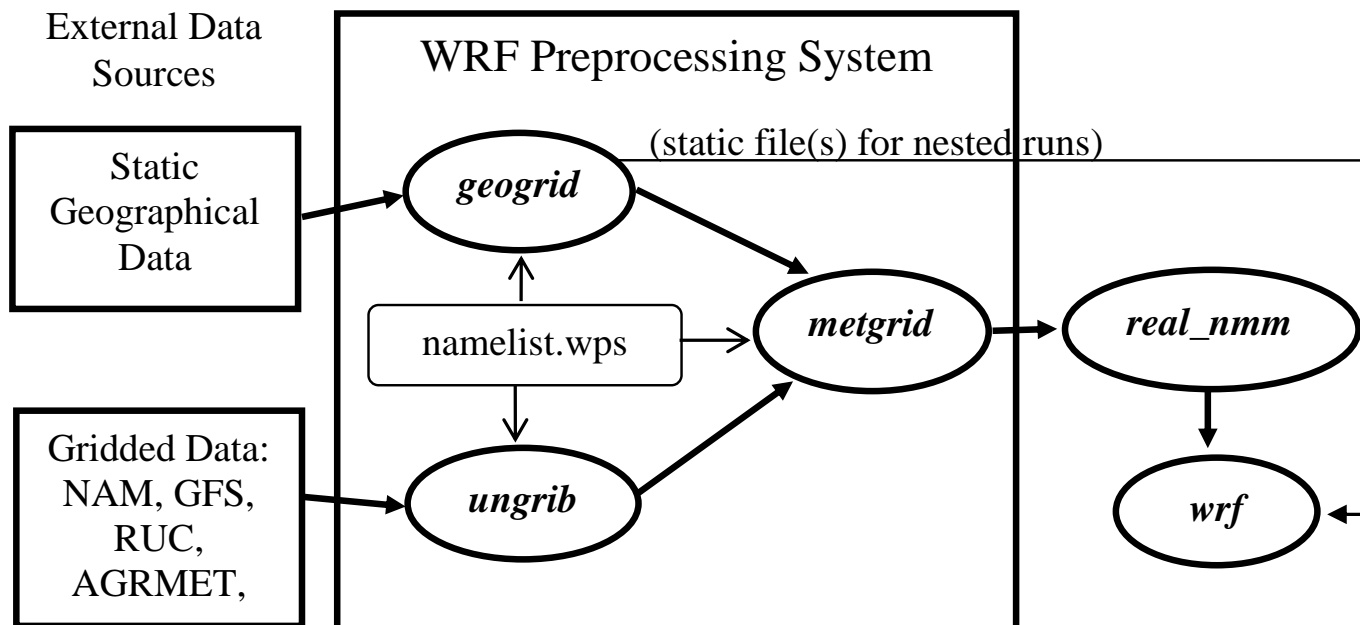
- [1] MMMD,NCAR, (2016), *ARW User Guide V3*.
- [2] NCAR, (2008), *ARW NCAR Tech Notes*.
- [3] NOAA,NCEP, (2014), *NMM User Guide V3*.
- [4] NCAR, (2010), *NMM NCAR Tech Notes*.
- [5] Ministerio de Energía, Universidad de Chile, (2012), *Documentación Explorador Eólico*.

WRF Modeling System Flow Chart

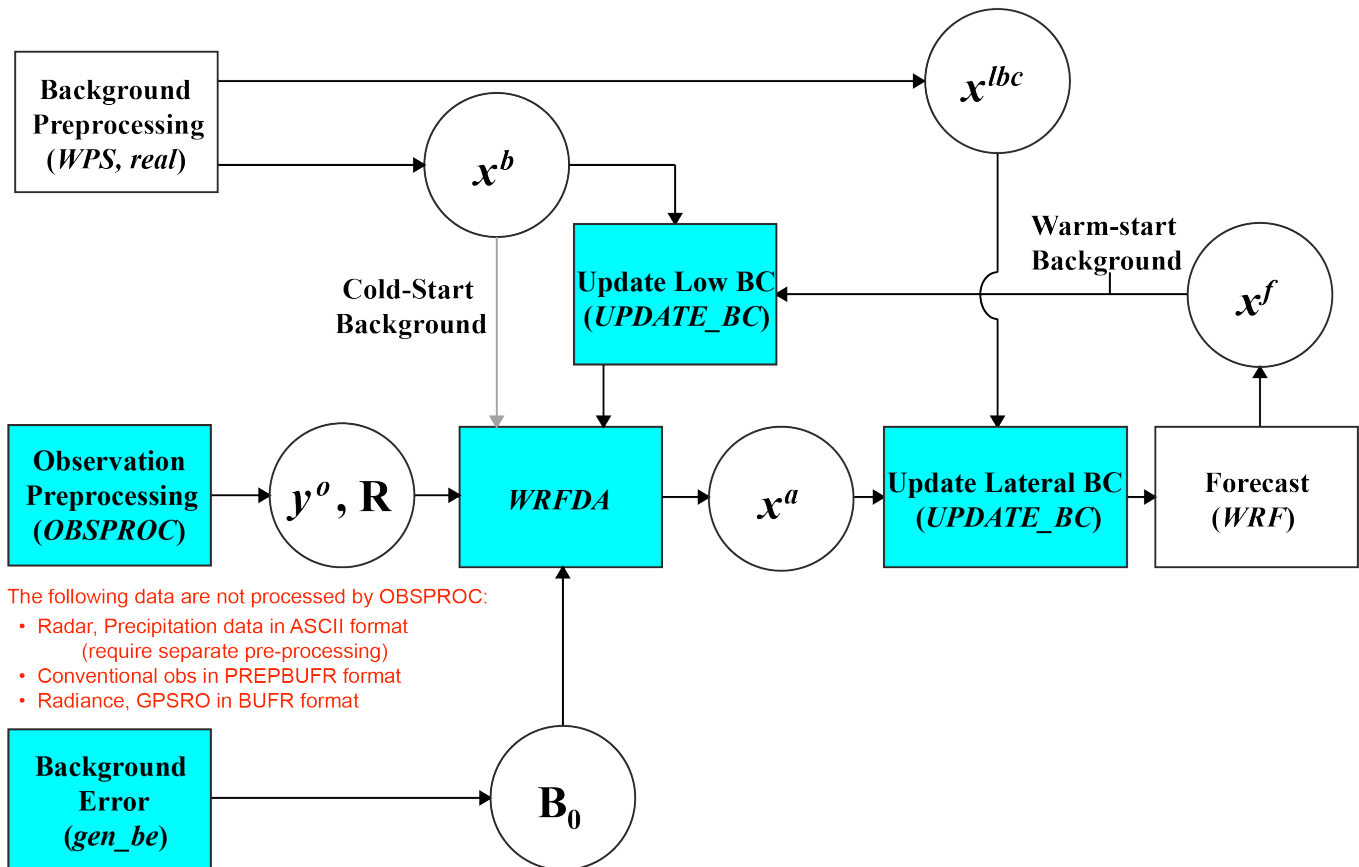


WRF-NMM FLOW CHART





WRFDA in the WRF Modeling System



x^b	first guess, either from a previous WRF forecast or from WPS/real.exe output.
x^{lbc}	lateral boundary from WPS/real.exe output.
x^a	analysis from the WRFDA data assimilation system.
x^f	WRF forecast output.
y^o	observations processed by OBSPROC. (note: PREPBUFR input, radar, radiance, and rainfall data do not go through OBSPROC)
B_0	background error statistics from generic BE data (CV3) or gen_be.
R	observational and representative error statistics.