

Informe de Avance: Simulación Numérica del Caso Bolund utilizando WRF-LES a Alta Resolución y Data Assimilation

Resumen En el presente informe se detalla el trabajo realizado hasta el momento para poder llevar a cabo las simulaciones del caso Bolund utilizando WRF-LES. Lo que se busca específicamente es simular el comportamiento del viento en la colina de Bolund, ubicada en Dinamarca, utilizando el software WRF y un modelo LES a una resolución máxima de ≈ 4 [m]. Este caso es un benchmark para modelos de CFD que buscan modelar viento en terreno complejo.

1. Definición del Problema

En el desarrollo de la caracterización y simulación del recurso eólico en terreno complejo, es necesario disponer de mediciones ya existentes para poder validar los experimentos que se puedan llevar a cabo en esta área. Es por esto que a lo largo de los años 2007 y 2008 se realizó una campaña de medición en la colina Bolund, ubicada en Dinamarca. El resultado de esta campaña fueron bases de datos para la velocidad del viento en distintos puntos de la colina, con la intención de que diversos modelos computacionales puedan contrastar sus resultados con estos datos.

Lo que se busca estudiar en este trabajo de tesis es analizar el comportamiento del modelo WRF a resoluciones extremadamente altas (≈ 4 [m] en la malla), entonces, se simulará la colina de Bolund a través de la técnica de dominios anidados de una vía, con la incorporación de un modelo LES para turbulencia en los dominios mas pequeños y haciendo simulaciones reales (no ideales, es decir, las condiciones de borde se tomarán de un modelo global). Luego se contrastarán estos resultados con los obtenidos por la campaña y se buscarán maneras de optimizar este tipo de simulaciones.

2. WRF

2.1. Generalidades

El modelo ARW-WRF (Advanced Research WRF) es un modelo atmosférico (es decir, simula el comportamiento de la atmósfera) no hidrostático que resuelve el sistema de ecuaciones para flujo compresible en su forma conservativa y utilizando una coordenada vertical de masa (o de presión hidrostática). Su coordenada vertical está definida como:

$$\eta = \frac{p_{dh} - p_{dht}}{\mu_d} \quad (2.1)$$

Donde p_{dh} corresponde a la componente hidrostática de la presión del aire seco, y:

$$\mu_d = p_{dhs} - p_{dht} \quad (2.2)$$

es la masa de aire seco para una columna. En estas ecuaciones los subíndices t y s corresponden a los límites superior (top) e inferior (surface) del dominio.

Las variables principales que resuelve el modelo son las velocidades covariantes (u, v, w), masa de aire seco, el geopotencial, temperatura potencial (θ) y energía cinética turbulenta (TKE) de submalla (SGS). La ecuación de momentum, temperatura potencial, SGS TKE y otros escalares relevantes tienen una forma acoplada con la masa de aire seco, de la forma:

$$\partial_t(\mu_d \theta) + \partial_x(\mu_d u \theta) + \partial_y(\mu_d v \theta) + \partial_\eta(\mu_d \omega \theta) = F \quad (2.3)$$

Donde F es la suma de la mezcla turbulenta junto con otras fuerzas y

$$\omega = d_t \eta \quad (2.4)$$

es la velocidad en la coordenada vertical. Notar que la ecuación 2.3 corresponde a una ecuación de conservación de un escalar pasivo. θ es la temperatura potencial.

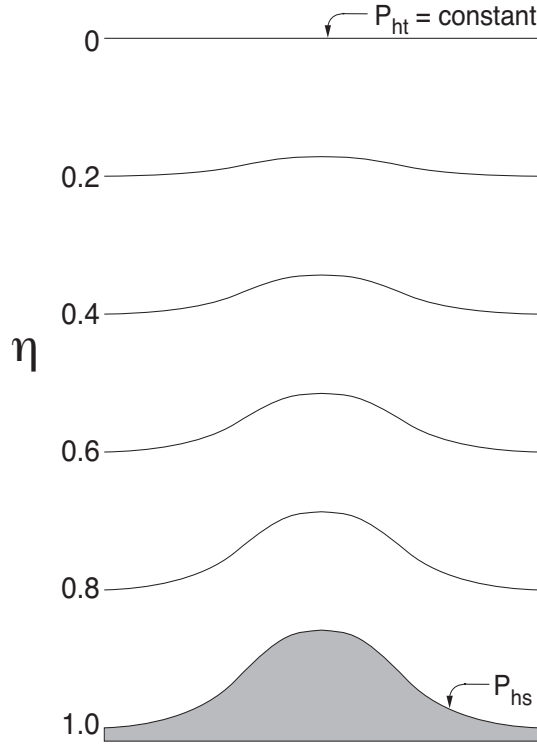


Figura 2.1: Estructura de la coordenada vertical.

La discretización en el tiempo se realiza a través de un esquema de integración temporal múltiple. Este esquema separa los modos de alta frecuencia (i.e. ondas acústicas y de gravedad) de los modos de baja frecuencia (modo físico). ARW utiliza un esquema RK3 y durante cada paso en el RK, el modo de alta frecuencia que se propaga horizontalmente es integrado a través de un esquema *forward-backward* utilizando un paso de tiempo acústico, que es típicamente un orden de magnitud mas pequeño que el paso físico, mientras que un esquema implícito es utilizado para el modo de alta frecuencia que se propaga de manera vertical.

2.2. Ecuaciones Resueltas

A modo de tener un primer acercamiento de las ecuaciones que el modelo resuelve numéricamente, considere las ecuaciones de Euler para aire húmedo en su forma conservativa y en función de las variables definidas en el párrafo anterior:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \vec{V}u) + \mu_d \alpha \partial_x p + (\alpha/\alpha_d) \partial_\eta p \partial_x \phi = F_U \quad (2.5)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \vec{V}v) + \mu_d \alpha \partial_y p + (\alpha/\alpha_d) \partial_\eta p \partial_y \phi = F_V \quad (2.6)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \vec{V}w) - g[(\alpha/\alpha_d) \partial_\eta p - \mu_d] = F_W \quad (2.7)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \vec{V}\theta) = F_\Theta \quad (2.8)$$

$$\partial_t \mu_d + (\nabla \cdot \vec{V}) = 0 \quad (2.9)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1}[(\vec{V} \cdot \nabla \phi) - gW] = 0 \quad (2.10)$$

$$\partial_t Q_m + (\nabla \cdot \vec{V}q_m) = F_{Q_m} \quad (2.11)$$

Junto a estas ecuaciones, se tienen las siguientes relaciones auxiliares:

$$\partial_\eta \phi = -\alpha_d \mu_d \quad (2.12)$$

$$p = p_0 \left(\frac{R_d \theta_m}{p_0 \alpha_d} \right)^\gamma \quad (2.13)$$

Donde la primera de estas corresponde a la definición del geopotencial y la segunda es la ecuación de estado para un gas.

$$\alpha = \frac{1}{\rho_d} \quad (2.14)$$

$$\alpha = \alpha_d (1 + q_v + q_c + q_r + q_i + \dots)^{-1} \quad (2.15)$$

$$\theta_m = \theta (1 + (R_v/R_d) q_v) \approx \theta (1 + 1,61 q_v) \quad (2.16)$$

$$Q_m = \mu_d q_m \quad ; \quad q_m = q_v, q_c, q_i, \dots \quad (2.17)$$

Para obtener la forma final de la ecuación que computa el WRF en su núcleo, falta separar los forzamientos debido a las proyecciones al globo terrestre, los por Coriolis y los términos de curvatura. Finalmente, y por motivos netamente computacionales, es mas efectivo expresar estas ecuaciones como una desviación de un estado de referencia hidrostáticamente balanceado.

Un desarrollo detallado de este procedimiento y la forma completa de como se ven las ecuaciones en su forma de perturbación se puede ver en Shamarock (2008).

2.3. Discretización Espacial

2.4. Discretización Temporal

Como se menciona anteriormente, el solver ARW utiliza un esquema de integración separado para los modos lentos o de baja frecuencia (que son los meteorológicamente relevantes) y los modos rápidos o de alta frecuencia. Para los modos lentos se utiliza un esquema RK3

2.5. Aspectos Numéricos

2.5.1. Filtros

2.5.2. Advección

2.5.3. Difusión

La difusión y los flujos turbulentos calculados según el espacio físico (x, y, z) se calculan haciendo uso de la métrica del espacio:

$$z_x = g^{-1} \delta_x \phi \quad (2.18)$$

$$z_y = g^{-1} \delta_y \phi \quad (2.19)$$

El término difusivo se agrega al lado derecho de las ecuaciones de Euler, junto al resto de las fuerzas externas. Estas se ven:

$$\partial_t U = \dots - m_x [\partial_x \tau_{11} + \partial_y \tau_{12} - \partial_z (z_x \tau_{11} + z_y \tau_{12})] - \partial_z \tau_{13} \quad (2.20)$$

$$\partial_t V = \dots - m_y [\partial_x \tau_{12} + \partial_y \tau_{22} - \partial_z (z_x \tau_{12} + z_y \tau_{22})] - \partial_z \tau_{23} \quad (2.21)$$

$$\partial_t W = \dots - m_y [\partial_x \tau_{13} + \partial_y \tau_{23} - \partial_z (z_x \tau_{13} + z_y \tau_{23})] - \partial_z \tau_{33} \quad (2.22)$$

Y el tensor de esfuerzos viscosos es:

$$\tau_{ij} = -\mu_d K_{h,v} S_{ij} \quad (2.23)$$

donde $K_{h,v}$ es la viscosidad turbulenta en dirección horizontal o vertical según la ecuación y S_{ij} es el tensor tasa de deformación.

Para las malla no LES:

$$K_h = C_s^2 l^2 [0,25(D_{11} - D_{22})^2 + D_{12}]^{0,5} \quad (2.24)$$

Con $C_s = 0,25$ y $l = \sqrt{\Delta x \Delta y}$. K_v queda definido según el esquema de parametrización utilizado para la capa límite planetaria.

Para las mallas con LES la viscosidad turbulenta se calcula en función de la energía cinética turbulenta e de la forma:

$$K_{h,v} = C_k l_{h,v} \sqrt{e} \quad (2.25)$$

donde C_k es una constante (normalmente $0,15 < C_k < 0,25$) y l es un largo característico que se calcula en función de la isotropía de la malla, la resolución, e y la estratificación de la forma:

$$l_v = \min[\Delta z, 0,76\sqrt{e}/N] \quad ; \quad N^2 > 0 \quad (2.26)$$

$$l_h = \Delta z \quad ; \quad N^2 \leq 0 \quad (2.27)$$

N es la frecuencia de Brunt-Väisälä. $N = \sqrt{g/\theta d_z \theta}$

Clausa 1.5TKE

La ecuación de transporte para e se define como:

$$\partial_t(\mu_d e) + (\partial_i V_i e)_\eta = \mu_d (\text{producción} + \text{flotación} + \text{disipación}) \quad (2.28)$$

Con:

$$\text{producción} = K_h(D_{11}^2 + D_{22}^2 + D_{12}^2) + K_v(D_{33}^2 + D_{13}^2 + D_{23}^2) \quad (2.29)$$

$$\text{flotación} = -K_v N^2 \quad (2.30)$$

$$\text{disipación} = -\frac{C e^{3/2}}{l} \quad (2.31)$$

$$C = 1,9C_k + \frac{(0,93 - 1,9C_k)l}{(\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}} \quad (2.32)$$

$$l = \min[(\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}, 0,76\sqrt{e}/N] \quad (2.33)$$

2.5.4. Microfísicas

3. Bases de datos utilizadas

3.1. Información Geográfica

La información estática que sirve como condición de borde inferior al modelo debe extraerse de datos satelitales u otros similares con el objetivo que sea uniforme y confiable. Esta información debe ser siempre georeferenciada (protocolo GIS).

WRF utiliza una base de datos estática lo suficientemente amplia como para poder satisfacer un uso normal del modelo, sin embargo, si se desea utilizar WRF en condiciones extremas, es decir, a escalas lo suficientemente pequeñas como para que las bases de datos no satisfagan la resolución, es necesario actualizar algunas bases de datos. La información a actualizar debe ser:

- **Altura del Terreno:** Para una obtención precisa de los niveles η en cada punto del dominio y por lo tanto una correcta representación del terreno complejo que va a ser el principal motivador de la turbulencia.
- **Uso de Suelo:** Posee la información acerca del % de vegetación, coeficiente térmico superficial y, lo más importante, el coeficiente de rugosidad (z_0), que es el parámetro a utilizar para estimar los flujos superficiales.

Las bases de datos a utilizar en las simulaciones serán:

- **GMTED2010:** Dataset por defecto del WRF para la altura del terreno. Obtenida el año 2010 por la USGS y la NGA con una resolución de 30'.

- ASTER: Es el único instrumento de alta resolución de la NASA ubicado en la plataforma Terra. Esta base de datos se hizo pública el año 2011 y entrega información de la altura del terreno con una resolución de $1' (\approx 30 \text{ [m]})$.
- MODIS: Información obtenida por los satélites de la NASA. Entregan información en 20 categorías a una resolución de $15'$ de arco.
- Corine: Obtenida el año 2012 (proyecto CLC12) a través de imágenes satelitales con 100m de resolución para toda Europa. Posee 44 categorías y es la base de datos de uso de suelo abierta de más alta resolución existente hasta ahora. Para este trabajo se usa la versión 18.5 modificada del año 2016.
- Bolund: Los autores del experimento de Bolund entregan bases de datos de la orografía del terreno y el coeficiente de rugosidad para este con una resolución de 25 [cm]

3.1.1. Incorporación a WRF

La manera en la que los datos descritos anteriormente son entregados, muchas veces no están en el formato en el que el preprocesador del modelo WRF (WPS) puede asimilarlo. Sin embargo, debido a los estándares exigidos para información georeferenciada, es posible manipularla de tal manera que puedan incorporarse al modelo. A continuación se describen algunos trabajos que debieron hacerse con las bases de datos.

1. ASTER: Cambio de formato de GeoTiff a binario.
2. Bolund Oro.: La información entregada por el experimento Bolund viene dada en un datum UTM Z32, por lo cual se debe transformar a WGS84, además, debido a la lectura de la información, los autores trasladaron las coordenadas, por lo cual hubo que invertir esta traslación. Se debió transformar la altura del agua entregada (los autores por motivos de interpolación de mareas declaran un $z = 0,75$ para agua) a un nivel de $z = 0$, para un correcto uso del modelo.
3. Corine: Se debió transformar su datum nativo de ETRS89 a WGS84. Debido a que la clasificación de suelo por Corine no está implementada en WRF, se debe hacer un remapeo de los índices al formato USGS. Este procedimiento está descrito en Pineta et. al. (2004). Por otra parte, la resolución de los datos CLC12 son bastante gruesos en comparación con los entregados por ASTER 1s, luego el WPS presentó algunos errores en reconocer las masas de tierra y para solucionar esto se procedió a hacer una afinación manual de los datos CLC12 en las zonas relevantes para la simulación. Esta afinación puede verse en las figuras anexas a este informe.
4. Bolund LU: Los autores del experimento entregan información acerca del z_0 en el dominio de Bolund y en el mismo formato en el que entregan la orografía, por lo tanto se debieron hacer las mismas transformaciones detalladas anteriormente y luego hacer calzar la información entregada con un índice de tipo de suelo y que además fuera consistente con las bases de datos de uso de suelo usadas en los dominios mas grandes.

3.2. Condiciones Iniciales y de Borde del Modelo

Para inicializar el modelo y para proveer de información en los contornos cada 6 horas, se utilizan los datos de los análisis operacionales provenientes del modelo global GFS con resolución de $0,5^\circ (\approx 55,6 \text{ [km]})$

Por otra parte, como el dominio mas grande a simular cae dentro de lo que es una simulación de mesoescala y tomando en consideración las proyecciones debido a la curvatura de la tierra para esta zona en particular, se decide fijar la condición de borde superior para la coordenada vertical de presión a $p_{\text{dht}} = 5000 \text{ [kPa]}$ siguiendo la recomendación del manual del programa.

La condición de borde inferior queda determinada por la información obtenida en los datos de uso de suelo para cada punto de la malla.

4. Definición de Dominios

Como se trabaja con dominios anidados, es importante evitar la simulación de la turbulencia en la *terra incognita* (Wyngaard, 2004). Por otro lado, las limitaciones van a estar impuestas por la resolución de las bases de datos utilizadas.

Para las condiciones iniciales, se tienen los resultados del modelo GFS que poseen una resolución aproximada de 55.6 [km] y una buena práctica dentro del modelo WRF es hacer interpolaciones en razones de 3 (o números impares). Por otro lado, la orografía de Bolund para que quede dentro de los límite del dominio mas fino, la resolución de este debe ser de aproximadamente 5 [m]. Finalmente para no realizar una simulación erronéa dentro de la zona gris de turbulencia, cuando la resolución sea la adecuada, se procederá a hacer una interpolación con razón de 5 para llegar automáticamente a una malla que cumpla con las condiciones de un correcto LES (tal cual como lo han hecho otros autores en sus investigaciones, buscar fuentes).

Las características de los dominios de simulación quedan de la siguiente manera, y se pueden ver en las figuras anexas a este informe:

Tabla 1: Propiedades de Dominios Definidos.

Dominio	d01	d02	d03	d04	d05	d06	d07	d08
Resolución [m]	15000	5000	1667	333	111	37	12	4
Orografía	GMTED2010	GMTED2010	GMTED2010	ASTER	ASTER	ASTER	ASTER	Bolund
Uso de Suelo	MODIS	MODIS	MODIS	CLC12	CLC12	CLC12	CLC12	Bolund
Micro-físicas	WSM5	WSM5	WSM5	WSM5	WSM5	WSM5	WSM5	WSM5
Cúmulos	Grell	–	–	–	–	–	–	–
Capa Superficial	MM5	MM5	MM5	MM5	MM5	MM5	MM5	MM5
PBL	YSU	YSU	YSU	–	–	–	–	–
Modelo LES	–	–	–	1.5TKE	1.5TKE	1.5TKE	1.5TKE	1.5TKE
Modelo de Suelo	Dif.	Dif.	Dif.	Dif.	Dif.	Dif.	Dif.	Dif.
Rad. Onda Larga	RRTM	RRTM	RRTM	RRTM	RRTM	RRTM	RRTM	RRTM
Rad. Onda Corta	Dudhia	Dudhia	Dudhia	Dudhia	Dudhia	Dudhia	Dudhia	Dudhia

5. Trabajo Futuro

Todo lo anterior deja el camino despejado para comenzar con las simulaciones preliminares, las cuales deben ir enfocadas a resolver los siguientes problemas:

- Definir la cantidad de niveles verticales para el modelo, considerando aproximadamente 10 niveles dentro de los primeros 100 metros.
- Definir Δt de integración para no exceder la condición CFL o estudiar el uso de un paso de tiempo adaptativo para ahorrar tiempo de simulación.
- Definir tiempo total de integración del modelo en función del tiempo de cálculo del servidor.
- Estudiar si es posible el uso de un modelo Smagorinsky para LES sin causar la inestabilidad de la simulación.
- Estudiar la aplicación de diversos filtros para amortiguar inestabilidades que puedan surgir debido a la extrema alta resolución.
- Definir puntos de control que calcen con aquellos puntos en donde se tiene información real del experimento Bolund y extraer en estos la serie de tiempo de la simulación.
- Estudiar el espectro de velocidad de la componente vertical de la velocidad aplicando la transformada de Fourier en e dominio temporal y en el dominio espacial. Comparar estos dos.
- Utilizar Data Assimilation en los puntos de control en un intervalo de tiempo definido y calcular la mejora de la solución para el tiempo futuro.