



Simulación Multiescala de Viento Sobre Terreno Complejo Mediante el Método Embebido WRF-LES y Asimilación Variacional de Datos 4D

Pablo Andrés Cárdenas Zamorano

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica
Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor Guía: Ph.D. Alex Flores Maradiaga
Profesor Correferente: Ph.D. Carlos Rosales Huerta
Evaluador Externo: Ph.D. Ricardo Muñoz Magnino

Agosto, 2019

Motivación

¿Por qué Predecir el Viento?

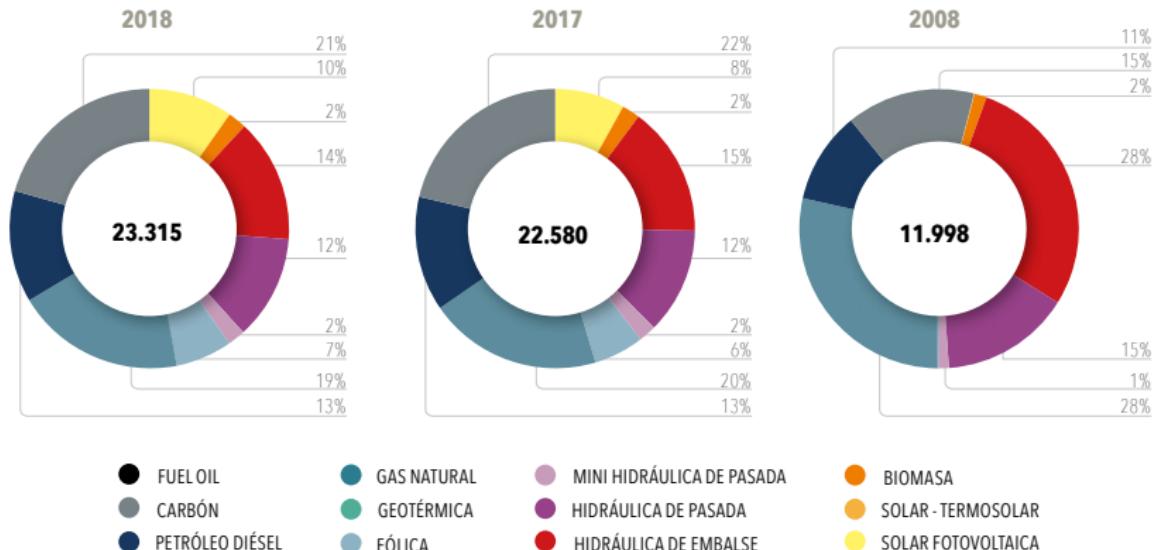


Figura 1: Evolución de la matriz energética chilena. Fuente: Comisión Nacional de Energía (2018).

Motivación

¿Por qué Predecir el Viento?

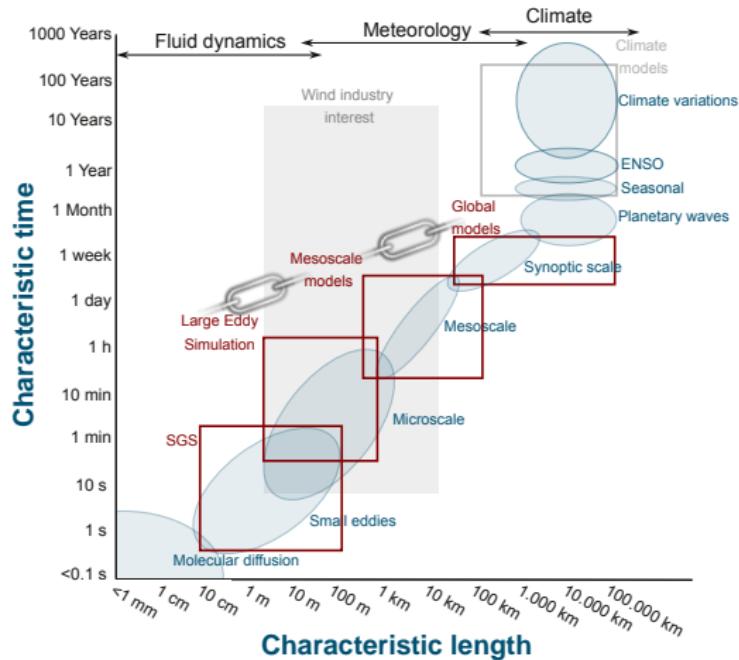


Figura 2: Unificación de escalas en dinámica atmosférica. Fuente: Montornés et al. (2017).

Motivación

¿Cómo Predecirlo?

- a. Extrapolación Estadística / Simulación Numérica.
- b. Modelos Meteorológicos / CFD.
- c. Correcta representación de la CLP (PBL).
- d. Turbulencia y Terreno Complejo.

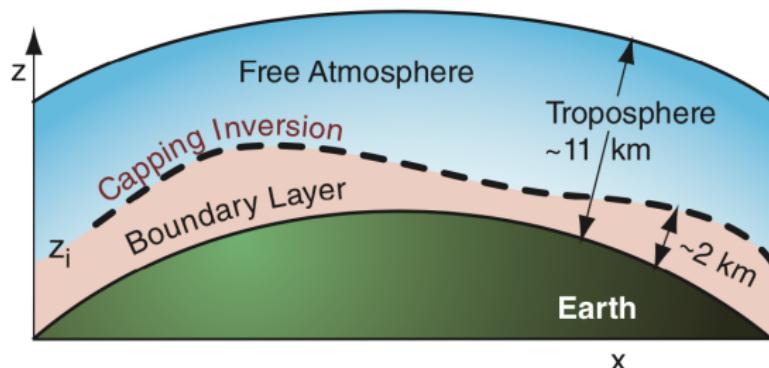


Figura 3: Esquema de la capa límite planetaria. Fuente: Stull (2018).

Motivación

¿Cómo Predecirlo?

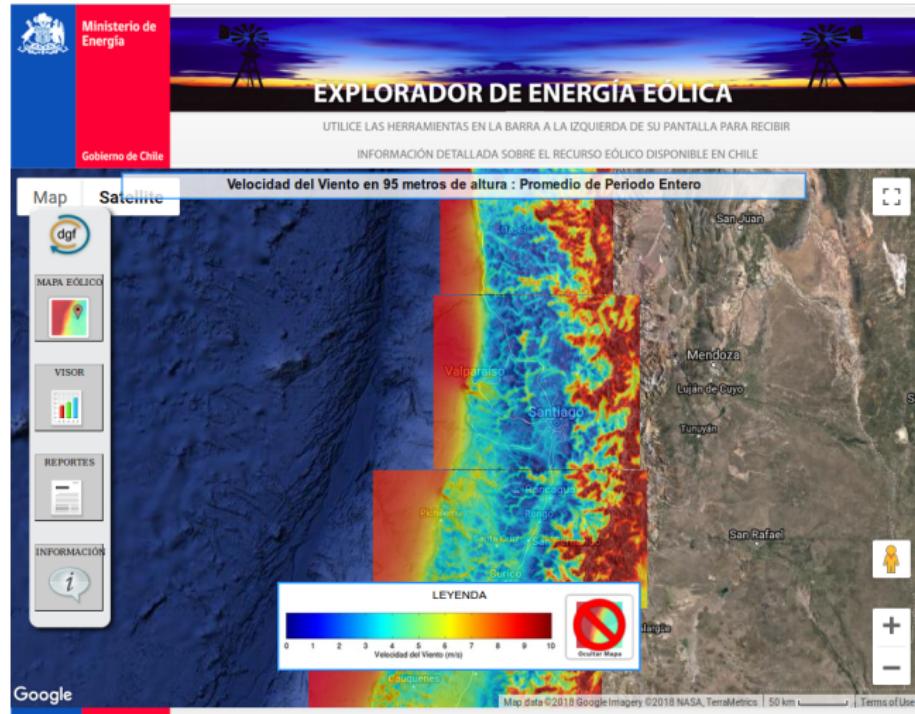


Figura 4: Interfaz online del explorador eólico de la Universidad de Chile.

Motivación

¿Cómo Predecirlo?

AEROTRANSPORTADA AUTONOMA (EMA2)

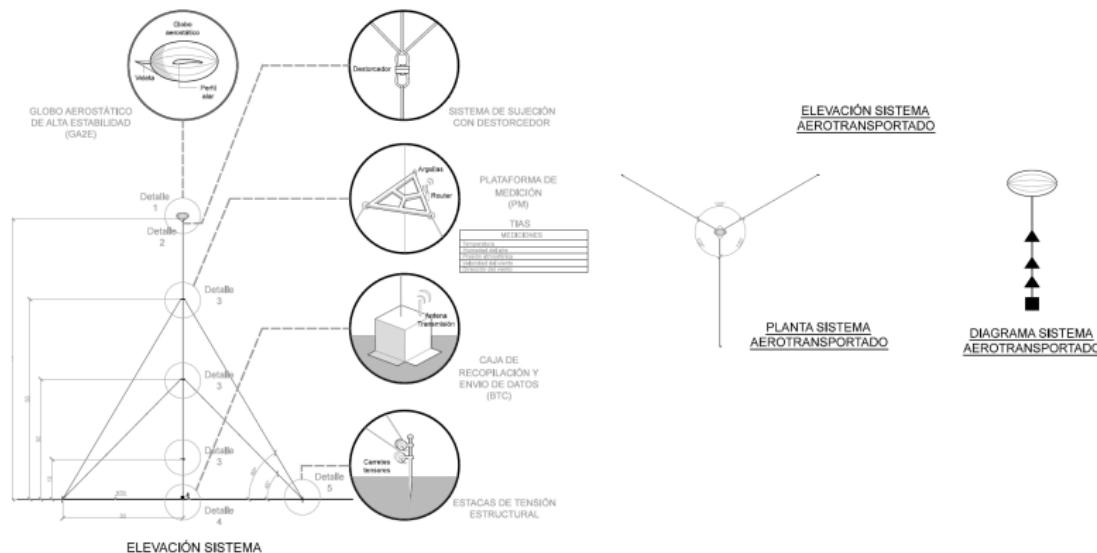
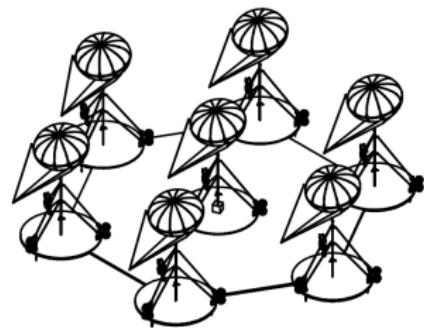


Figura 5: Esquema de la sonda FONDEF ID16I10105.

Motivación

¿Cómo Predecirlo?

(a)



(b)



Figura 6: Detalle del proyecto FONDEF ID16I10105. (a) Célula del sistema experimental de medición. (b) Prototipo en el laboratorio.

Hipótesis y Objetivos

Hipótesis

Se pueden mejorar las predicciones numéricas de viento a corto plazo sobre terreno complejo a través de simulaciones multiescala de alta resolución, LES y asimilación de datos 4D en la CLP.

Objetivo Principal

Implementar una metodología que incorpore escalamiento dinámico de dominios, nuevas bases de datos de alta resolución, LES y asimilación de datos 4D multipunto para mejorar los resultados de modelos numéricos de viento sobre terreno complejo.

Estado del Arte

- a. Problemáticas del escalamiento dinámico.
- b. Antecedentes de turbulencia atmosférica y terreno complejo.
- c. Desafíos de la alta resolución en terreno complejo.
- d. Contexto de la asimilación de datos.

Estado del Arte

Problemáticas del escalamiento dinámico

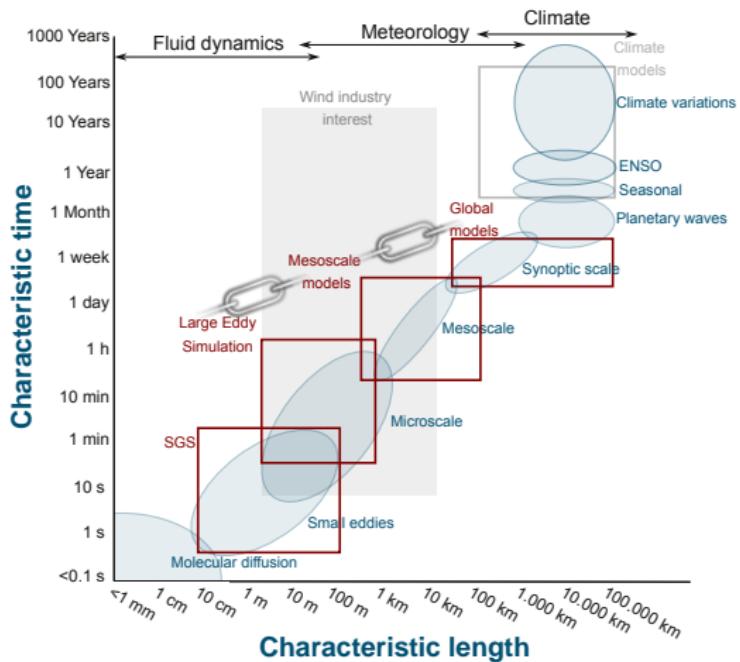


Figura 7: Unificación de escalas en dinámica atmosférica. Fuente: Montornés et al. (2017).

Estado del Arte

Problemáticas del escalamiento dinámico

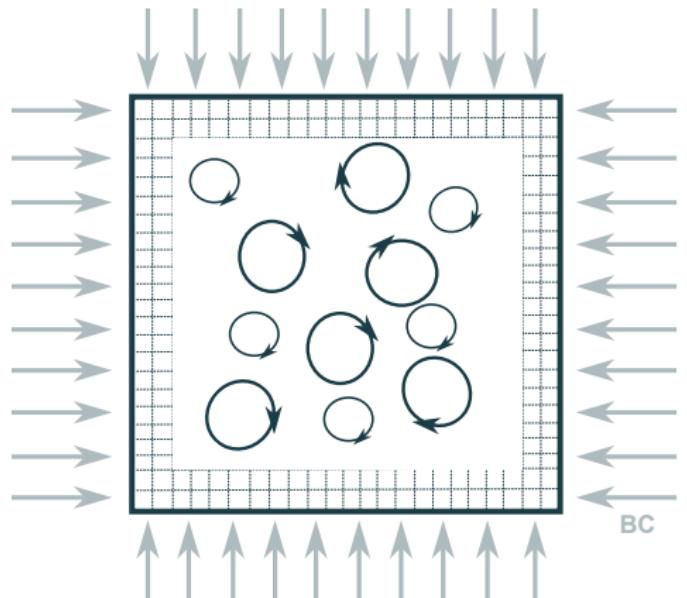


Figura 8: Idealización de los distintos tamaños de vórtices dentro de un dominio en la zona gris de la turbulencia. Fuente: Montornes et al. (2017).

Estado del Arte

Problemáticas del escalamiento dinámico

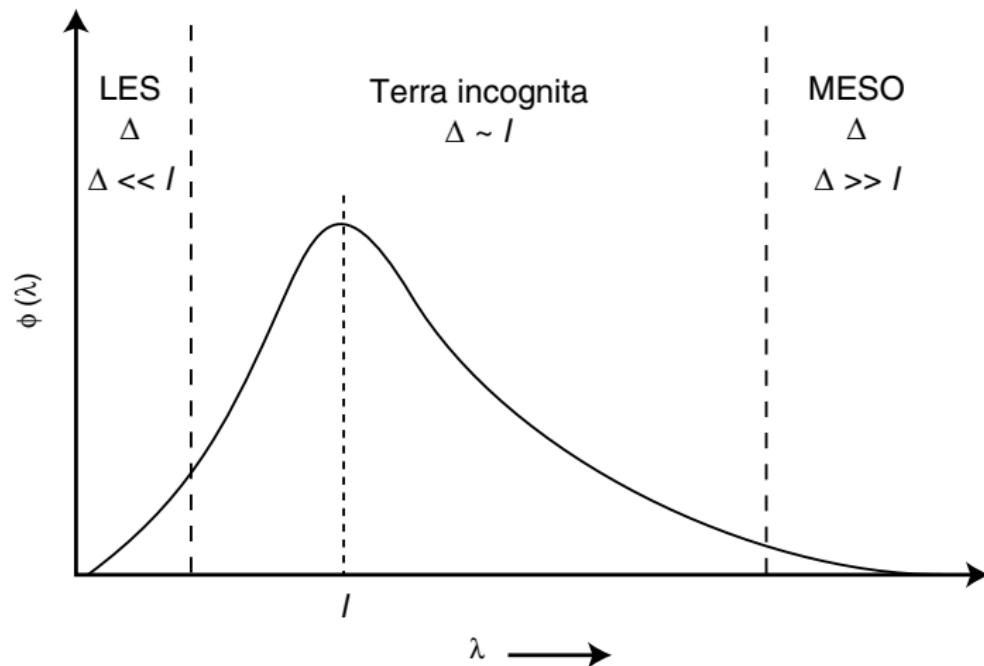


Figura 9: Espectro de energía cinética turbulenta multiescala. Fuente: Warner (2010).

Estado del Arte

Turbulencia Atmosférica y Terreno Complejo

- ▶ Modelos Lineales (Jackson y Hunt 1975, Mason y Sykes 1979)
- ▶ No lineales: 2D (Taylor 1977), RANS (Launder y Spalding 1974)
- ▶ LES: Desde los 90s se viene desarrollando para la CLP.
- ▶ Simulaciones Askeverin (2009) y cerros sinusoidales (2001).

Estado del Arte

Alta Resolución y Terreno Complejo

- ▶ Aspectos Computacionales.
- ▶ Aspectos Numéricos.
 - ▶ Precisión
 - ▶ Estabilidad
 - ▶ Difusión Numérica
 - ▶ Coordenadas
 - ▶ Benchmarking
- ▶ Parametrización de CLP.
- ▶ Inicialización y Datos de Entrada.

Estado del Arte

Alta Resolución y Terreno Complejo

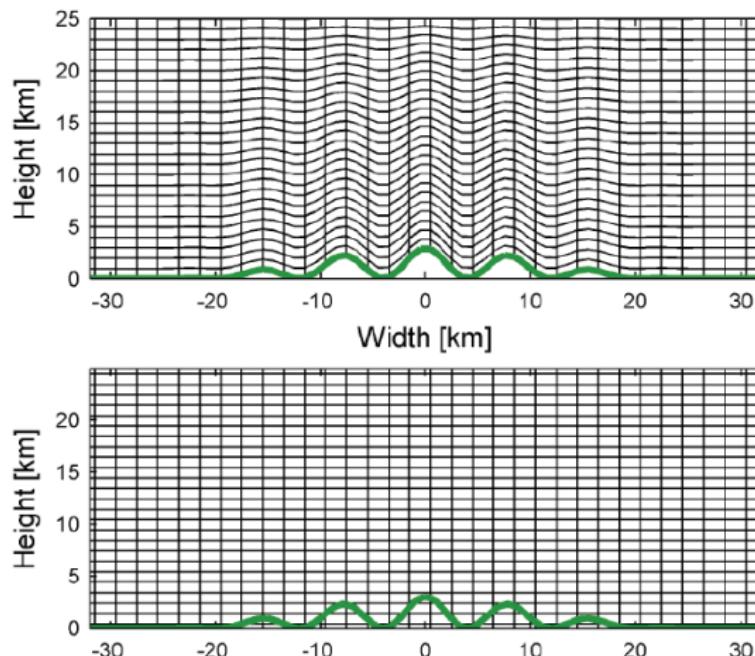


Figura 10: Comparación entre las coordenadas usuales sigma (arriba) y el método de frontera inmersa (abajo). Fuente: Arnold et al. (2010).

Estado del Arte

Alta Resolución y Terreno Complejo

- ▶ Aspectos Computacionales.
- ▶ Aspectos Numéricos.
 - ▶ Precisión
 - ▶ Estabilidad
 - ▶ Difusión Numérica
 - ▶ Coordenadas
 - ▶ Benchmarking
- ▶ Parametrización de CLP.
- ▶ Inicialización y Datos de Entrada.

Estado del Arte

Contexto de la Asimilación de Datos

- ▶ Busca obtener una mejor solución mediante la combinación de observaciones con los resultados de un modelo.
- ▶ Es satisfactorio para los casos de escalas planetarias y sinópticas.
- ▶ Para la Capa Límite Planetaria (CLP) se tienen 3 casos:
 - a. DA en CLP para mesoscala: Mejoras de hasta un 30 % en el error.¹
 - b. DA con datos superficiales: Mejoras en los resultados debido al cálculo de flujos turbulentos. No para terreno complejo.
 - c. DA en CLP para microescala: No existe literatura.

¹Cheng et al. (2017) y Dumais et al. (2013)

Marco Teórico

- a. Leyes fundamentales de un Fluido.
- b. Ecuaciones que rigen la Dinámica Atmosférica.
- c. Turbulencia.
- d. Fundamentos de Capa Límite Atmosférica.
- e. Simulación de Grandes Vórtices.
- f. Asimilación de Datos.

Marco Teórico

Leyes Fundamentales de un Fluido

Conservación de Masa:

$$\partial_t \rho + \partial_i (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Conservación de Momentum:

$$\rho \partial_t u_i = \rho g_i + \partial_j \sigma_{ij} \quad (2)$$

Conservación de Energía:

$$\rho \partial_t (e + K) = u_i \rho g_i + \partial_j (u_i \sigma_{ij}) - \partial_j q_i \quad (3)$$

Ecuación de Estado:

$$p = f(\rho, T) \quad (4)$$

Marco Teórico

Ecuaciones de Dinámica Atmosférica

Ecuaciones Primitivas:

$$d_t u = \frac{uv \tan \psi}{a} - \frac{uw}{a} - \frac{1}{\rho} \partial_x p - 2\Omega_e (w \cos \psi - v \sin \psi) + F_{rx} \quad (5)$$

$$d_t v = -\frac{u^2 \tan \psi}{a} - \frac{uw}{a} - \frac{1}{\rho} \partial_y p - 2\Omega_e u \sin \psi + F_{ry} \quad (6)$$

$$d_t w = \frac{u^2 + v^2}{a} - \frac{1}{\rho} \partial_z p + 2\Omega_e u \cos \psi - g + F_{rz} \quad (7)$$

$$\partial_t T = -u \partial_x T - v \partial_y T + (\gamma - \gamma_d) w + \frac{1}{C_p} d_t H \quad (8)$$

$$d_t \rho = -\rho (\partial_i u_i) \quad (9)$$

$$d_t q_v = Q_v \quad (10)$$

$$p = \rho R T \quad (11)$$

Modelo WRF

Metodología

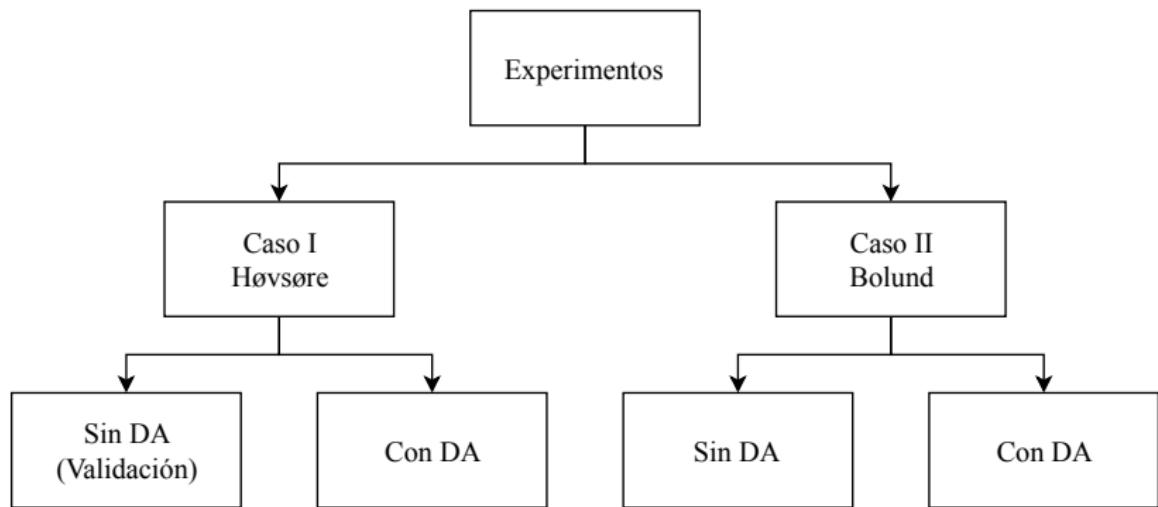


Figura 11: Diagrama de experimentos realizados.

Metodología

Selección de Dominios: Caso I Høvsøre



Figura 12: Fotografía del terreno en Høvsøre. Fuente: Peña et al.(2013)

Metodología

Configuración: Caso I Høvsøre

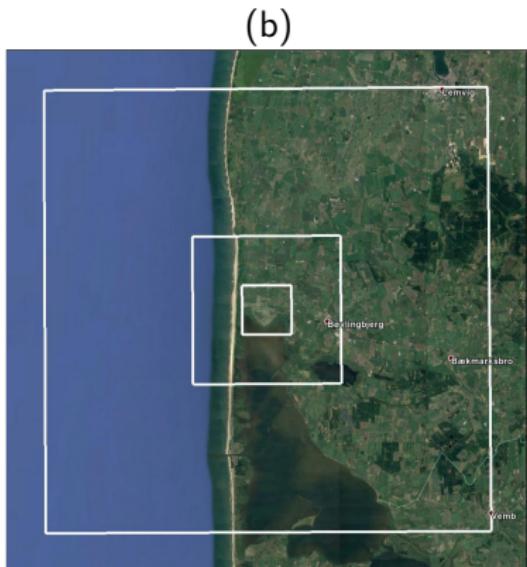
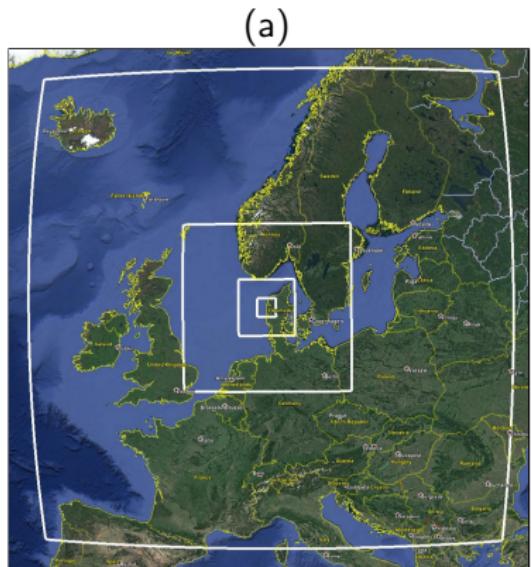


Figura 13: Información de los dominios de simulación para el caso Høvsøre. (a) Dominios d01-d04. (b) Dominios d05-d07.

Metodología

Configuración: Caso I Høvsøre

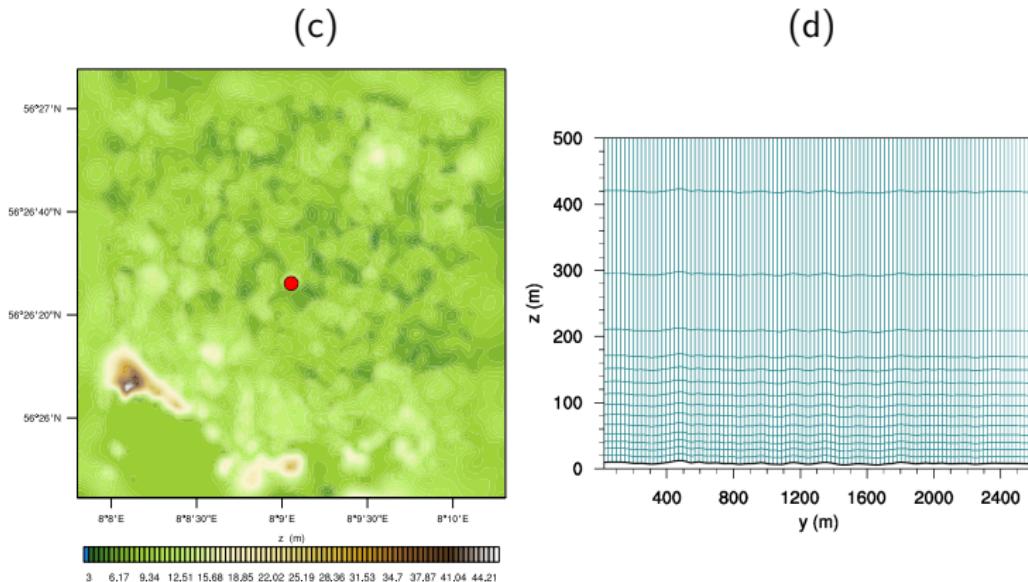


Figura 14: Información de los dominios de simulación para el caso Høvsøre. (c) Dominio d07 con el punto de control. (d) Distribución vertical de la malla adaptativa en escala 4:1.

Metodología

Configuración: Caso I Høvsøre

Tabla 1: Dominio numérico espacial y temporal para simulación del caso Høvsøre.

Parámetro	Selección
Fecha	2010-09-08
Hora Inicio	06:00:00 UTC
Hora Término	20:00:00 UTC
Puntos Malla Vert.	37
P_{top}	30000 [Pa]
# Dominios	7
Lat. Centro	56.440588
Lon. Centro	8.150896
Interválo Salida	10 [min]
Punto de Malla Total	2,831,472

Metodología

Configuración: Caso I Høvsøre

Tabla 2: Valores característicos de cada dominio en Høvsøre.

Dominio	d01	d02	d03	d04	d05	d06	d07
N_x	107	107	107	107	107	107	107
N_y	107	107	107	107	107	107	107
$\Delta x, y [m]$	30000	10000	3333.3	1111.1	222.22	74.074	24.691
$\Delta t [s]$	75	25	8.333	2.778	0.556	0.185	0.062
Orografía	GMTED	GMTED	GMTED	ASTER	ASTER	ASTER	ASTER
Uso de Suelo	USGS	USGS	USGS	CLC12	CLC12	CLC12	CLC12

Tabla 3: Parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo para Høvsøre.

Dominio	d01	d02	d03	d04	d05	d06	d07
Micro-físicas	WSM5						
Cúmulos	Grell	Grell	—	—	—	—	—
Capa Superficial	MYNN						
PBL	MYNN	MYNN	MYNN	MYNN	—	—	—
Modelo LES	—	—	—	—	1.5TKE	1.5TKE	1.5TKE
c_k	—	—	—	—	0.3	0.3	0.3
Modelo de Suelo	Difus.						
Rad. Onda Larga	RRTM						
Rad. Onda Corta	Dudhia						

Metodología

Selección de Dominios: Caso II Bolund



Figura 15: Fotografías de la colina de Bolund. Fuente: Chaudhari (2014)

Metodología

Configuración: Caso II Bolund



Figura 16: Distribución telescópica de las 8 mallas anidadas en el dominio numérico de la colinda Bolund.

Metodología

Configuración: Caso II Bolund

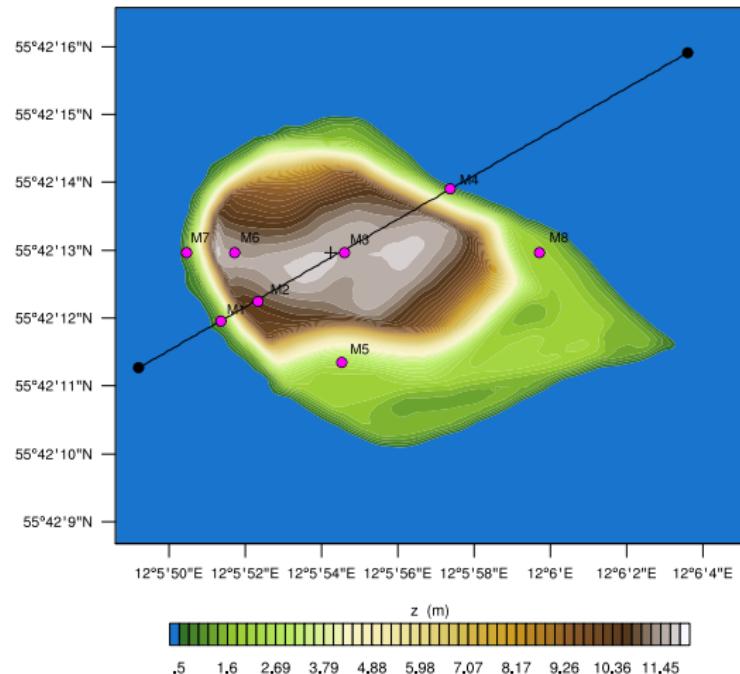


Figura 17: Ubicación espacial de los puntos de control en el dominio de Bolund. En cada punto de control se ubican anemómetros que miden a las alturas de 2m, 5m, y 9m sobre el suelo.

Metodología

Configuración: Caso II Bolund

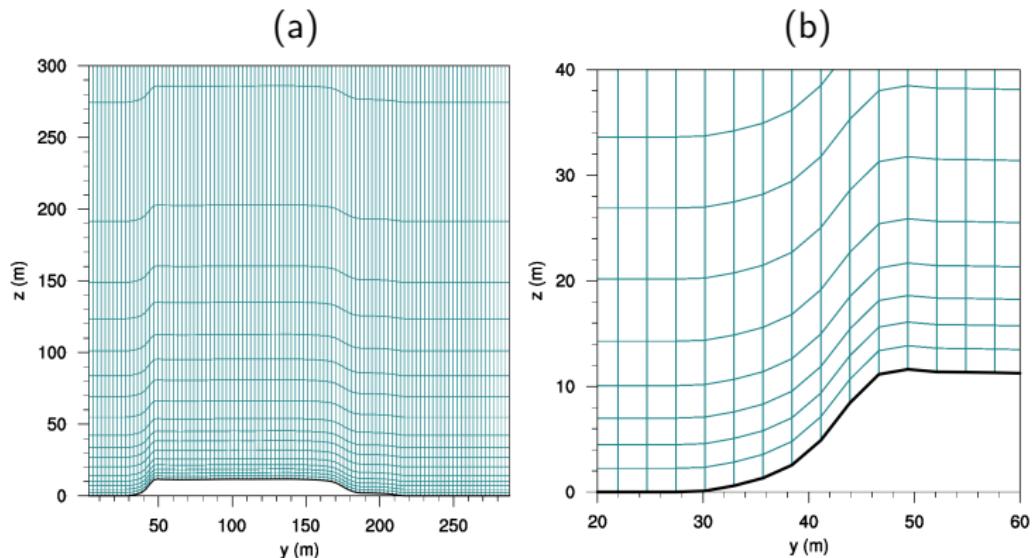


Figura 18: (a) Distribución de la malla vertical en la mitad del dominio en Bolund. (b) Detalle la pendiente abrupta (escala 1:1).

Metodología

Configuración: Caso II Bolund

Tabla 4: Dominio numérico espacial y temporal para simulación del caso Bolund.

Parámetro	Selección
Fecha	29-12-2007
Hora Inicio	06:00 UTM
Hora Término	15:00 UTM
Puntos Malla Vert.	41
P_{top}	30000 [Pa]
# Dominios	8
Lat. Centro	55.703474
Lon. Centro	12.098854
Interválo Salida	5 [min]
Punto de Malla Total	3,465,000

Metodología

Configuración: Caso II Bolund

Tabla 5: Valores característicos de cada dominio en Bolund.

Dominio	d01	d02	d03	d04	d05	d06	d07	d08
N_x	106	106	106	106	106	106	106	106
N_y	106	106	106	106	106	106	106	91
$\Delta x, y [m]$	10000	3333.3	1111.1	222.22	74.074	24.691	8.23045	2.74348
$\Delta t [s]$	12	4	1.3333	0.4444	0.0889	0.0296	0.0099	0.0033
Orografía	GMTED	GMTED	GMTED	ASTER	ASTER	ASTER	ASTER	Bolund
Uso de Suelo	USGS	USGS	USGS	CLC12	CLC12	CLC12	CLC12	Bolund

Tabla 6: Parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo para Bolund.

Dominio	d01	d02	d03	d04	d05	d06	d07	d08
Micro-físicas	WSM5							
Cúmulos	Grell	–	–	–	–	–	–	–
Capa Superficial	MYNN							
PBL	MYNN	MYNN	MYNN	–	–	–	–	–
Modelo LES	–	–	–	1.5TKE	1.5TKE	1.5TKE	1.5TKE	1.5TKE
c_k	–	–	–	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Modelo de Suelo	Difus.							
Rad. Onda Larga	RRTM							
Rad. Onda Corta	Dudhia							

Metodología

Configuración de la Asimilación de Datos

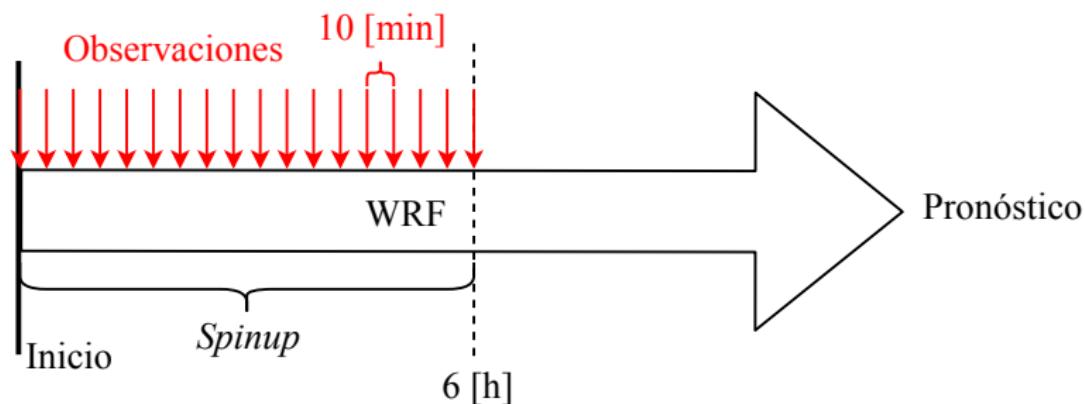


Figura 19: Esquema del proceso de asimilación de datos.

Metodología

Configuración de la Asimilación de Datos

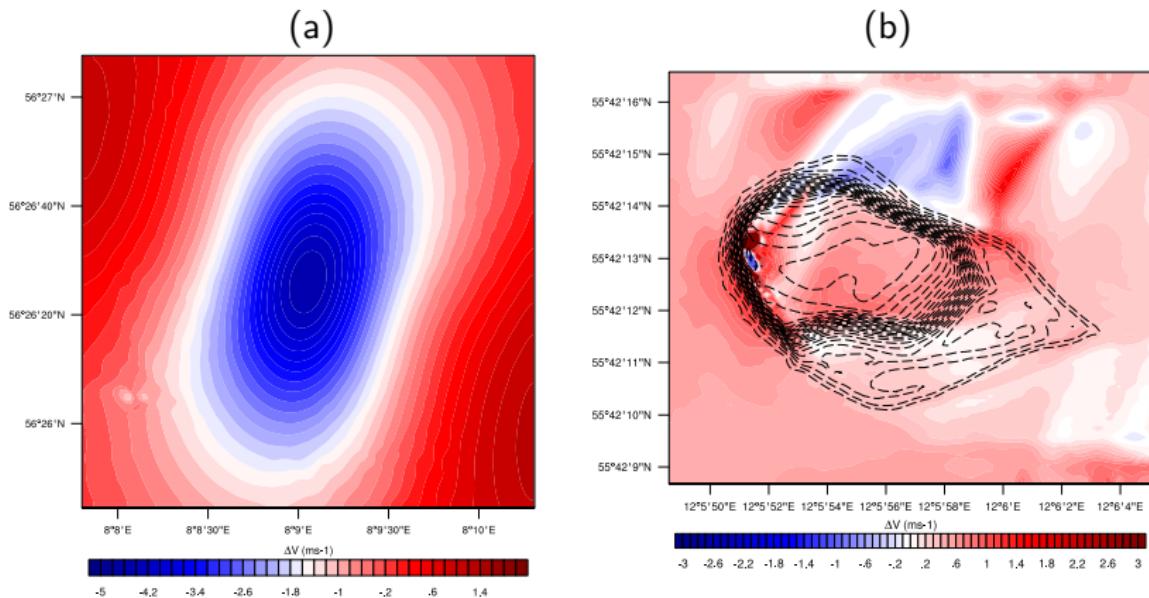


Figura 20: Diferencia de la magnitud del campo de velocidad en el primer nivel del modelo entre resultados sin y con asimilación de datos. (a) Caso I puntual. (b) Caso II con varios puntos.

Metodología

Estimación del Error

MAE:

$$E_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (12)$$

RMSE:

$$E_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (13)$$

Coeficiente de Pearson:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (14)$$

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

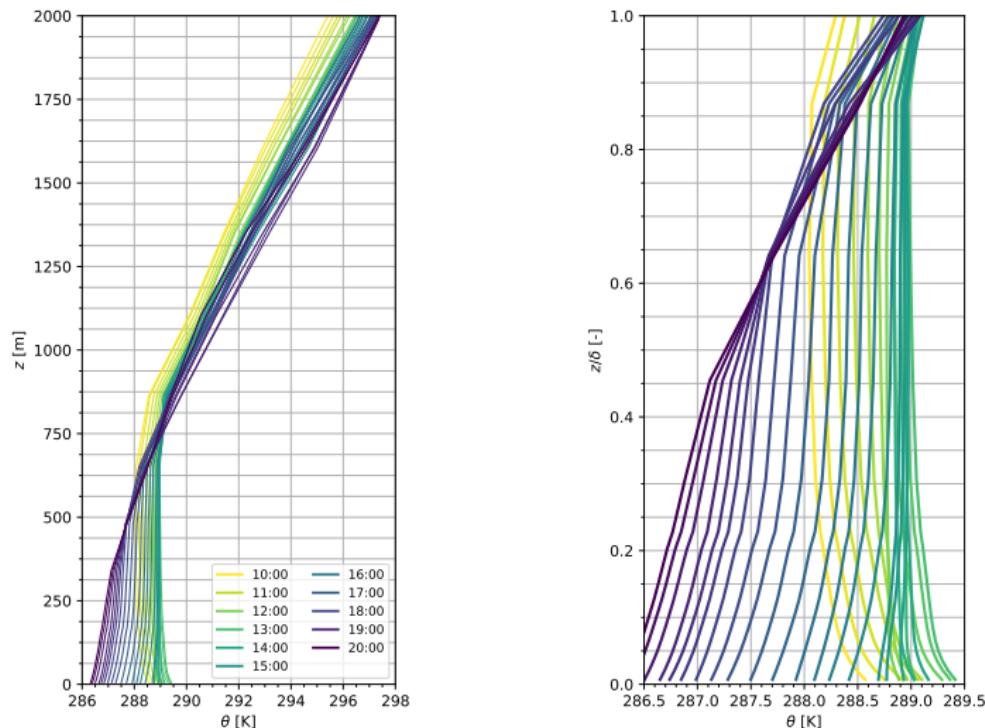


Figura 21: Perfil de temperatura potencial virtual en Høvsøre.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

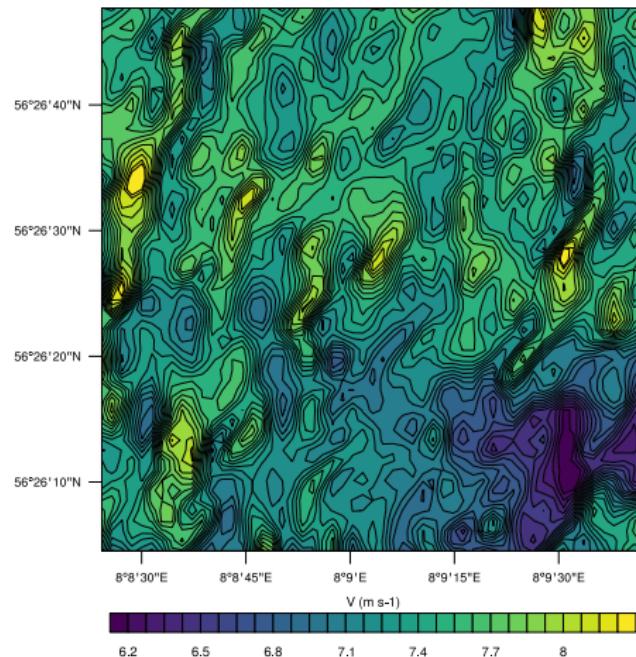


Figura 22: Magnitud de la velocidad en el primer nivel de la coordenada vertical ($z_1 = 5.25$ [m]) para las 15:00.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

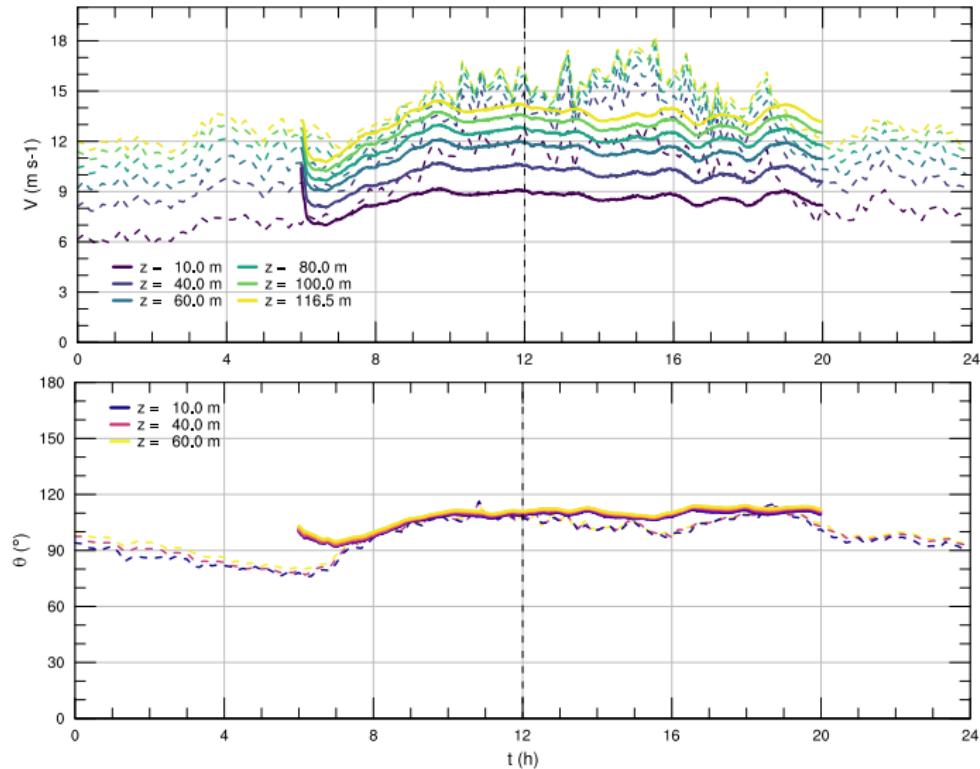


Figura 23: Serie de tiempo para la solución caso Høvsøre.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

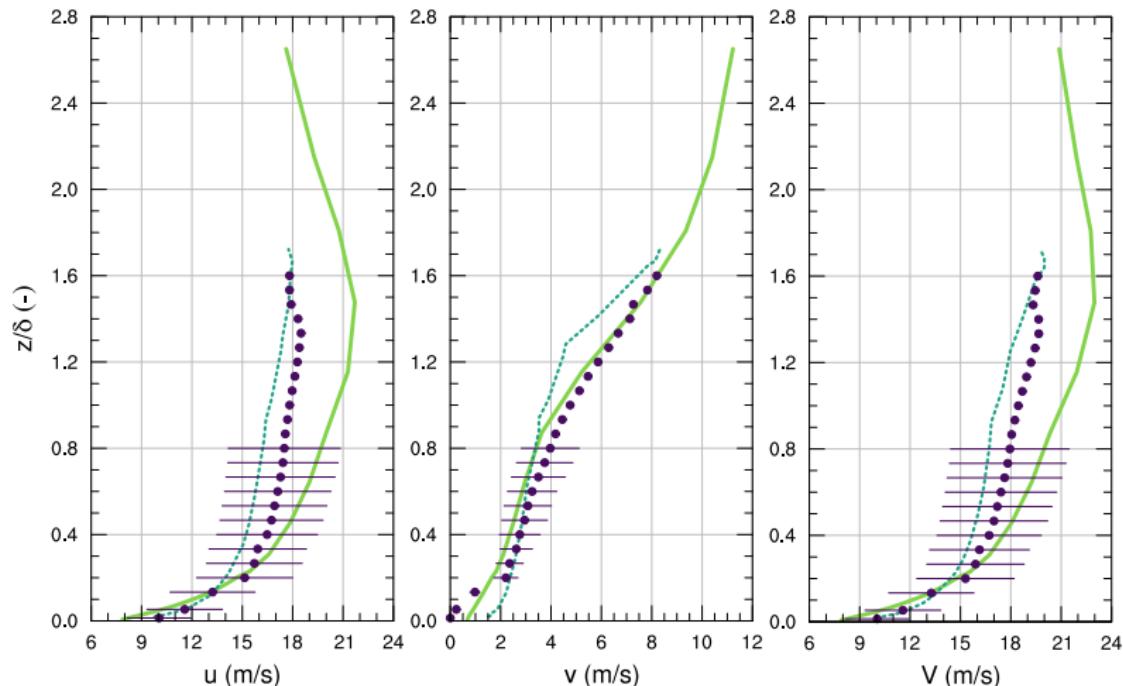


Figura 24: Validación con Peña et al. (2013). Valores promedios entre las 12:00 y 15:00.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

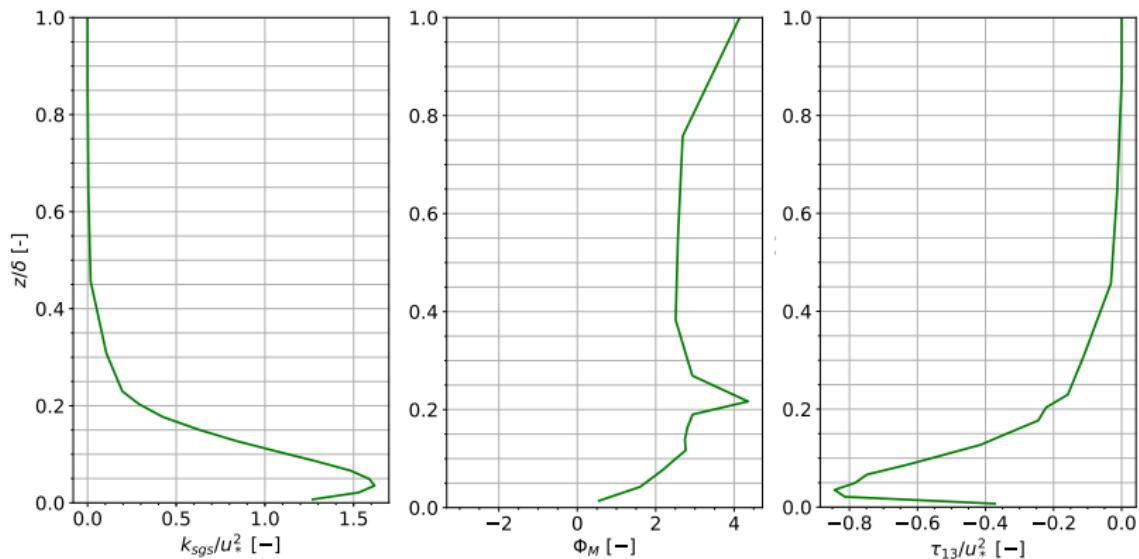


Figura 25: Variables de segundo orden adimensionalizadas. Promedios entre las 12:00 y 15:00 ($u_* = 0,552$ [m/s]).

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

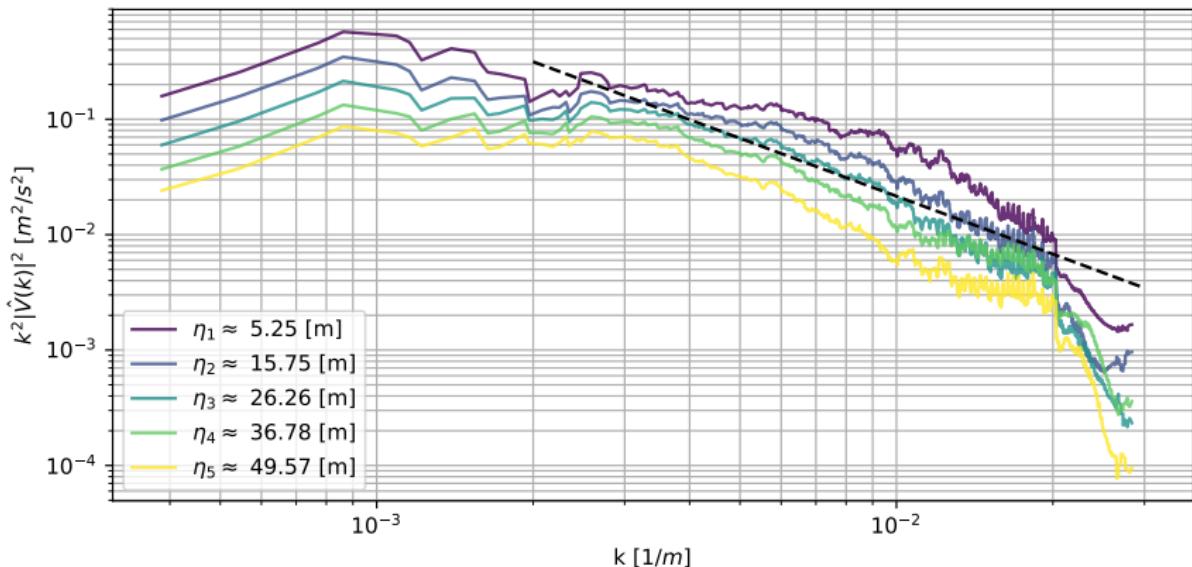


Figura 26: Espectros de energía cinética para la magnitud horizontal del viento a distintos niveles verticales en el dominio d07 caso Høvsøre.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

$$\text{MAE} = 2,41091 \text{ [m/s]} ; \text{ RMSE} = 2,80142 \text{ [m/s]}$$

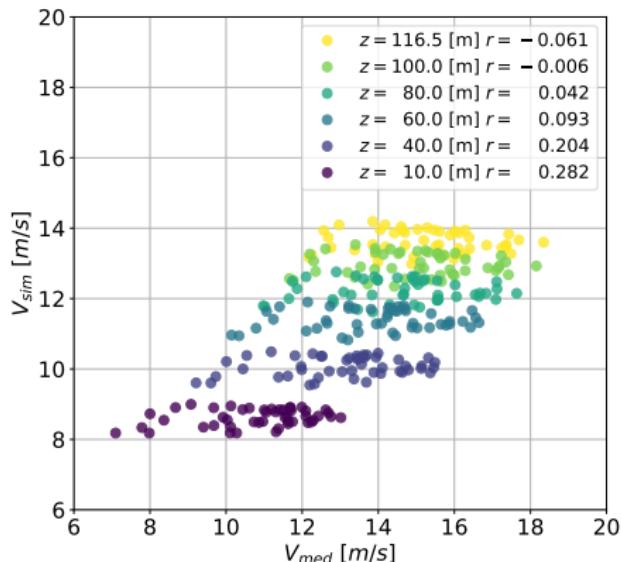


Figura 27: Gráfico de dispersión para las velocidades a distintas alturas en el mástil meteorológico de Høvsøre.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Asimilación de Datos

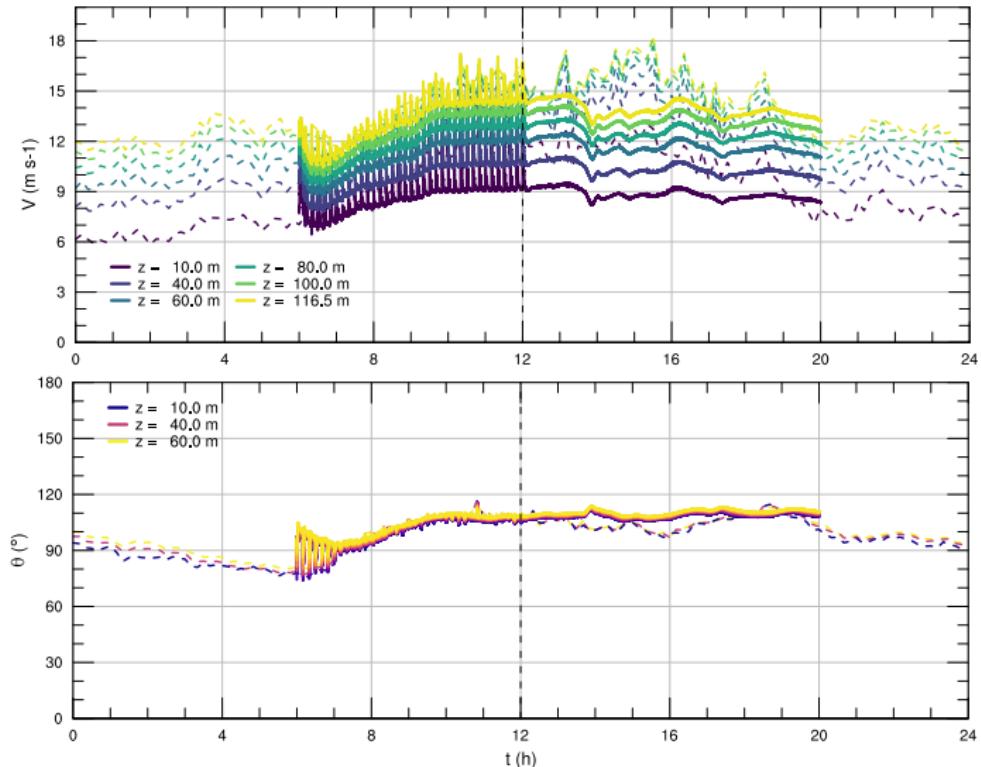


Figura 28: Serie de tiempo para la solución caso Høvsøre.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Asimilación de Datos

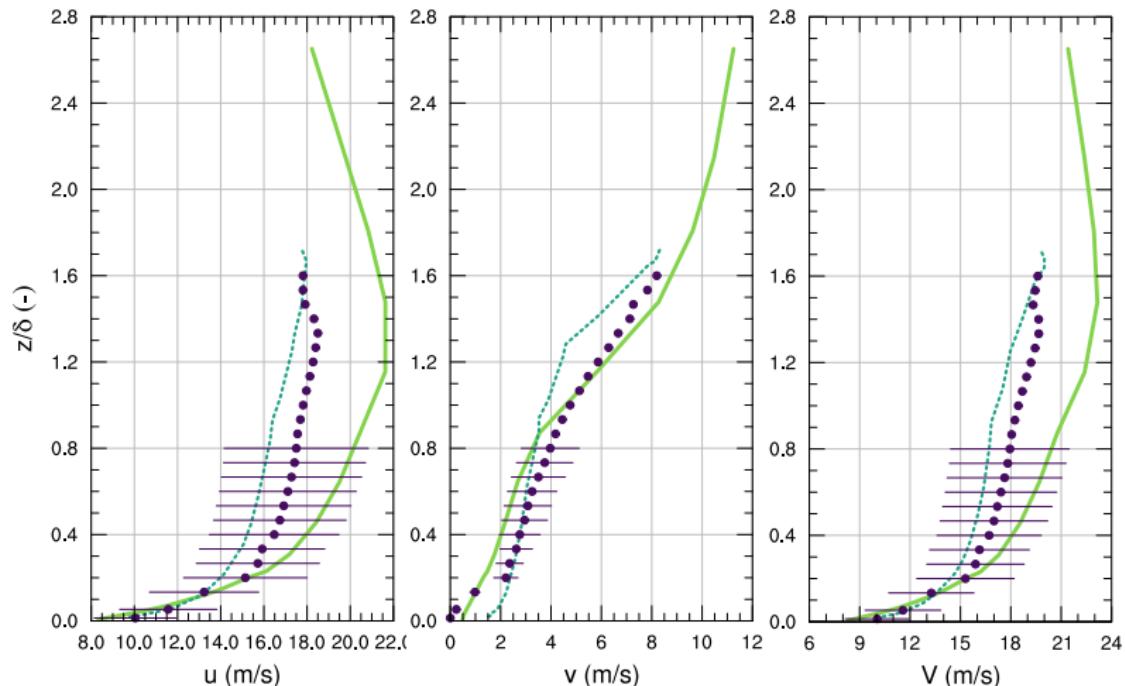


Figura 29: Validación con Peña et al. (2013). Valores promedios entre las 12:00 y 15:00.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Asimilación de Datos

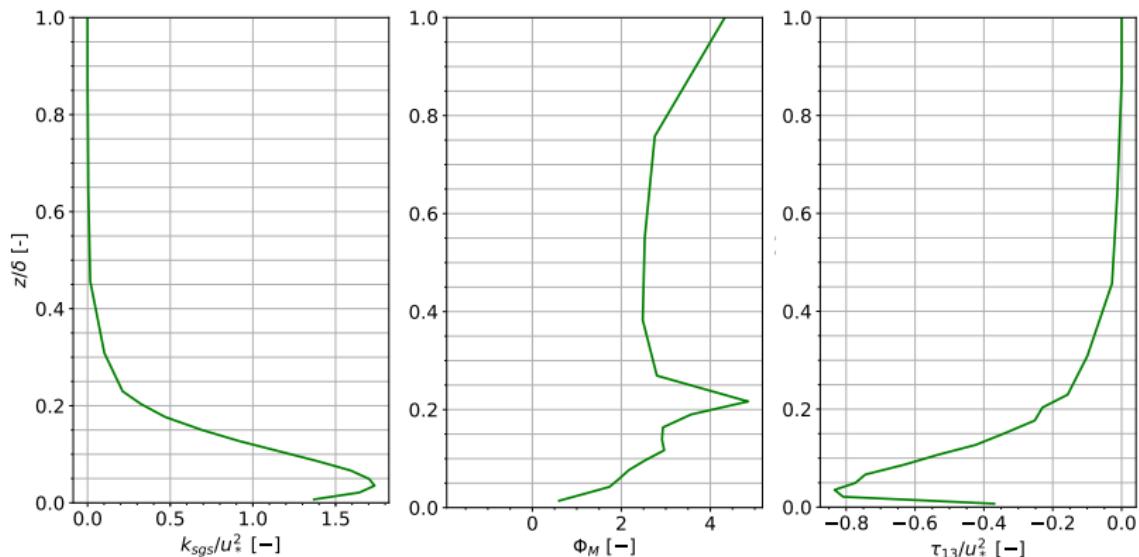


Figura 30: Variables de segundo orden adimensionales. Promedios entre las 12:00 y 15:00 ($u_* = 0,527$ [m/s]).

Resultados

Caso I: Høvsøre - Asimilación de Datos

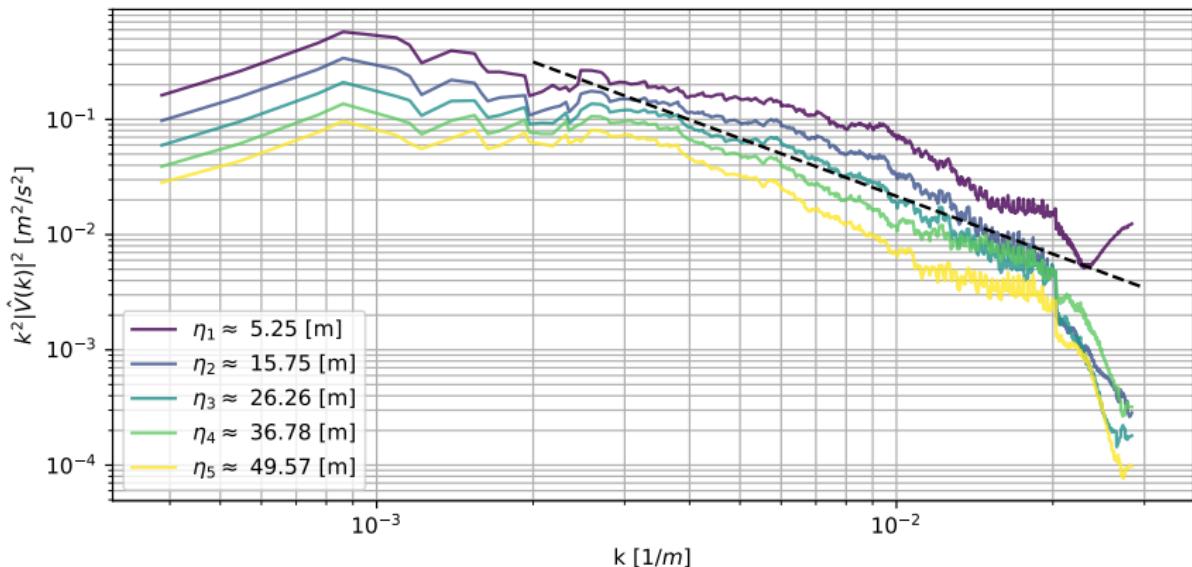


Figura 31: Espectros de energía cinética para la magnitud horizontal del viento a distintos niveles verticales en el dominio d07 caso Høvsøre.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Asimilación de Datos

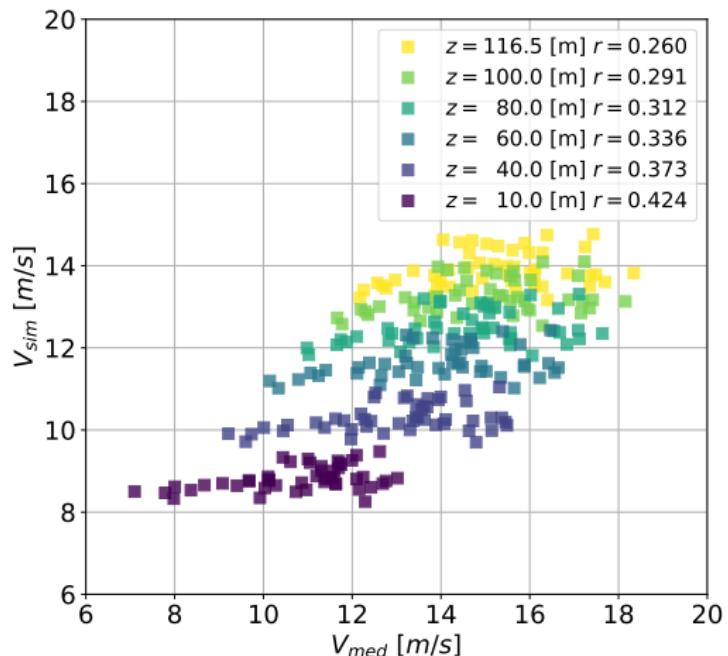


Figura 32: Gráfico de dispersión para las velocidades a distintas alturas en el mástil meteorológico de Høvsøre.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Síntesis

Observaciones relevantes:

- ▶ aaa
- ▶ bbb
- ▶ ccc
- ▶ ddd

Tabla 7: Comparación de métricas para el caso I Høvsøre.

	Sin DA	Con DA
MAE	2.41 m/s	2.17 m/s
RMSE	2.80 m/s	2.56 m/s
Δ RMSE	–	8,70 %
Δ MAE	–	10,47 %

Resultados

Caso II: Bolund

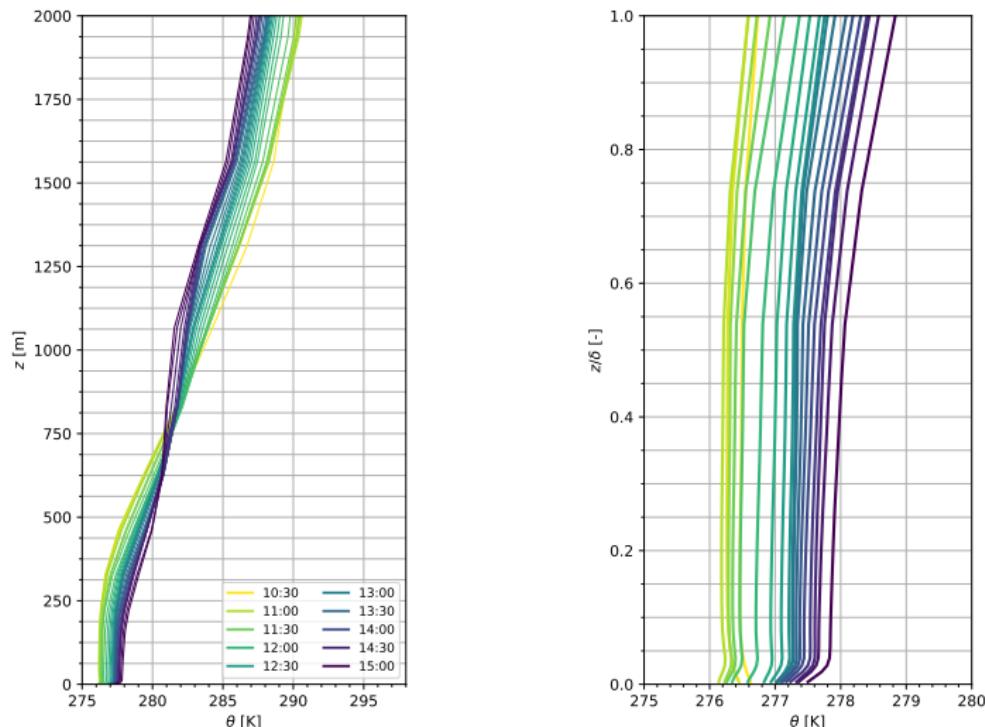


Figura 33: Perfil de temperatura potencial virtual en Bolund.

Resultados

Caso II: Bolund

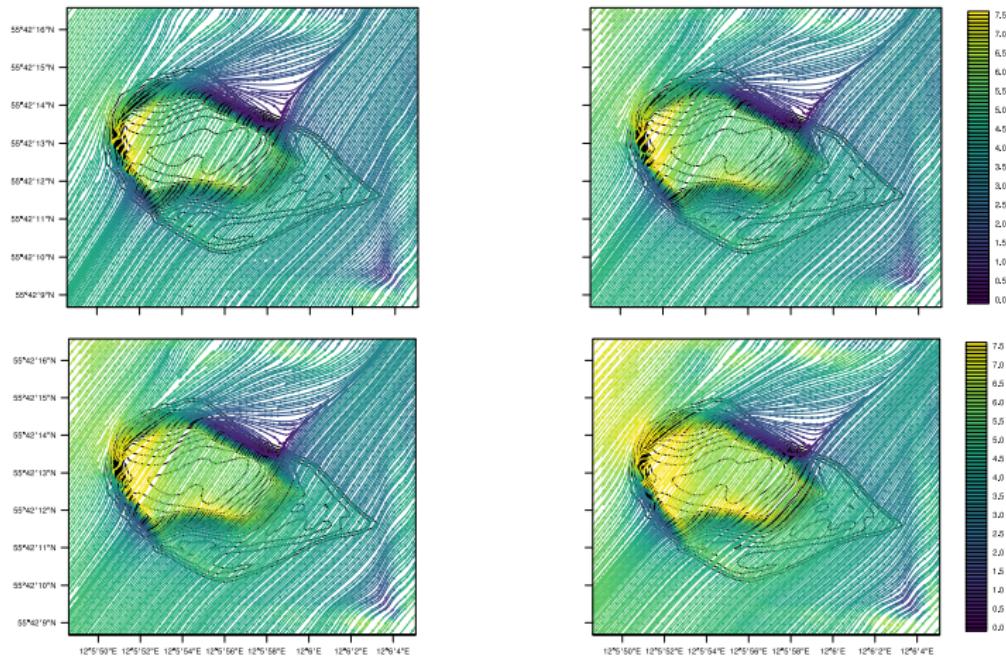


Figura 34: Líneas de flujo para la solución en Bolund en el primer nivel ($z_1 = 1,12$ [m]) para (a) 12:00, (b) 13:00, (c) 14:00 y (d) 15:00.

Resultados

Caso II: Bolund

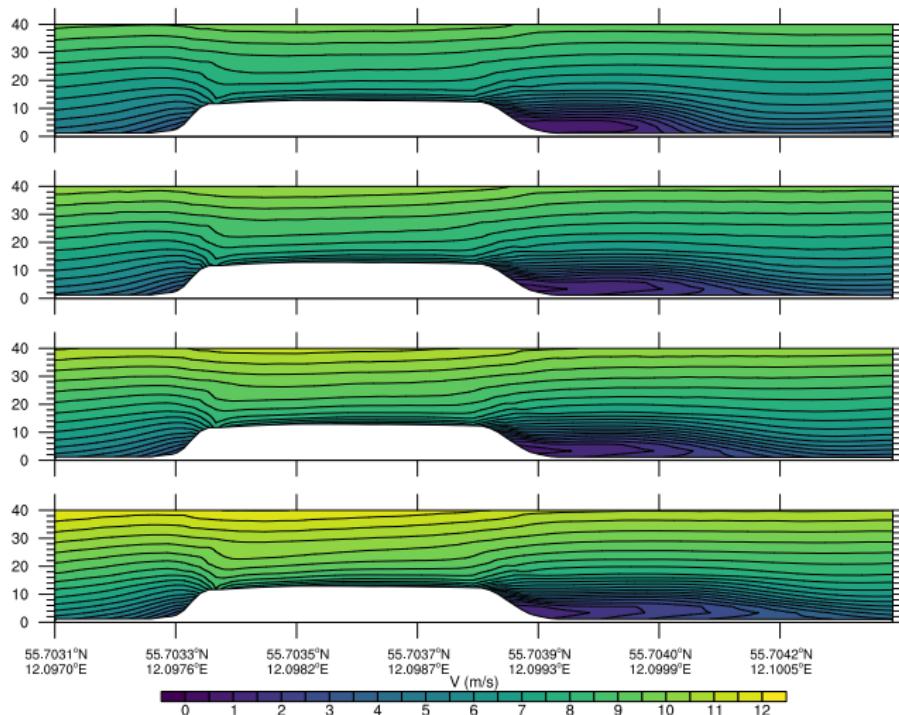
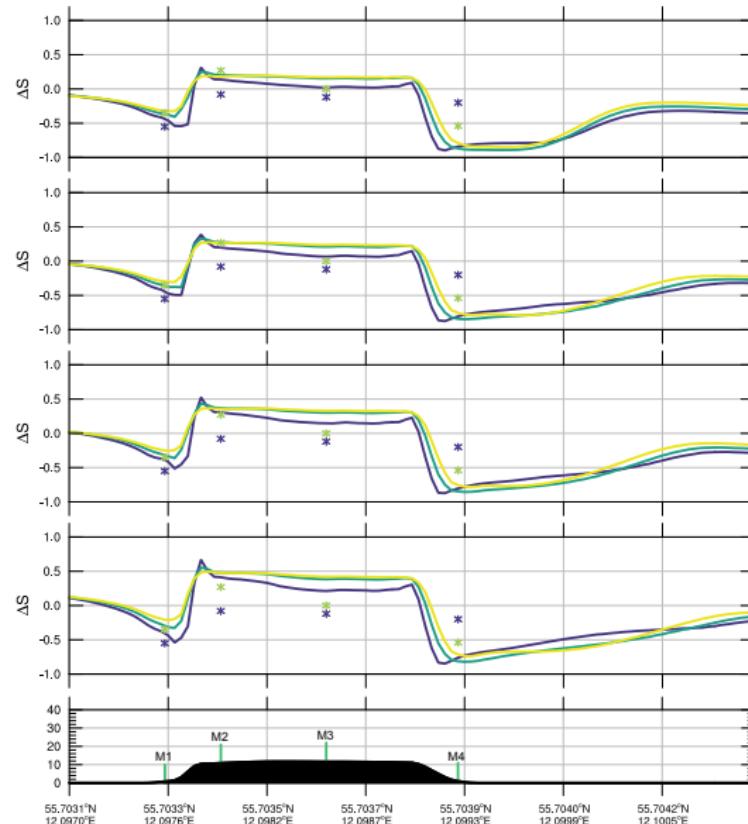


Figura 35: Contornos de rapidez del viento para la sección de corte vertical a 240° en Bolund. 12:00 a 15:00. Escala 1:1.

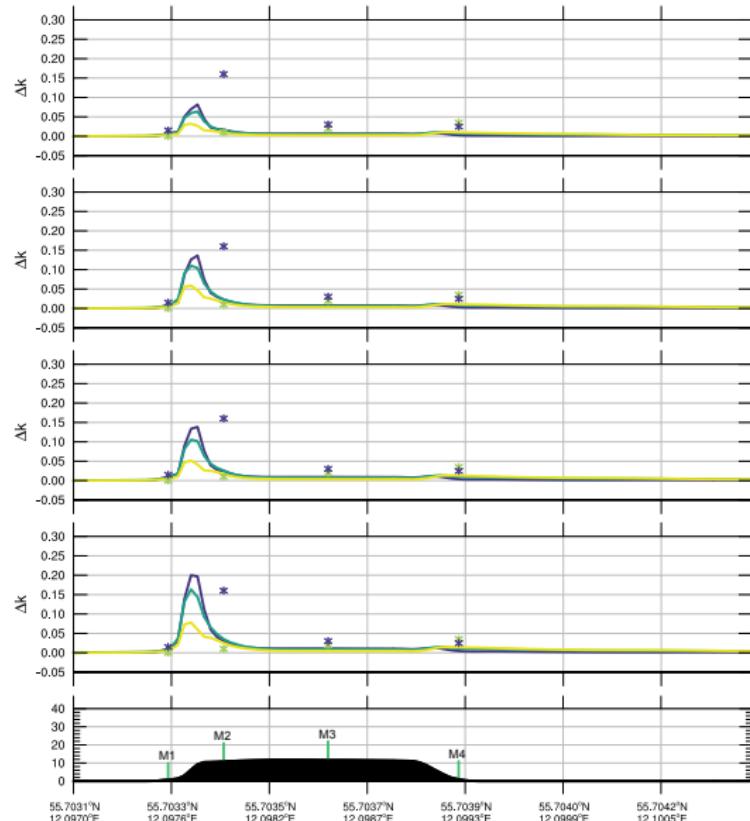
Resultados

Caso II: Bolund (Aceleración M1-M4)



Resultados

Caso II: Bolund (Delta TKE)



Resultados

Caso II: Bolund

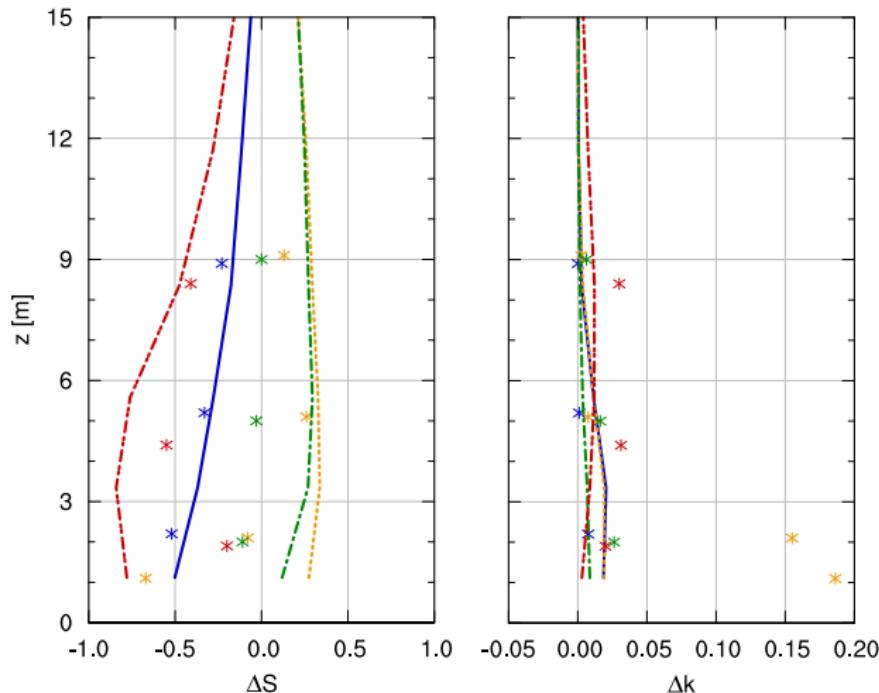


Figura 36: Perfil vertical promedio de 12:00 a 15:00 de (a) *speedup* y (b) variación adimensional de energía cinética turbulenta para las estaciones M1 (azul), M2 (naranja), M3 (verde) y M4 (rojo).

Resultados

Caso II: Bolund

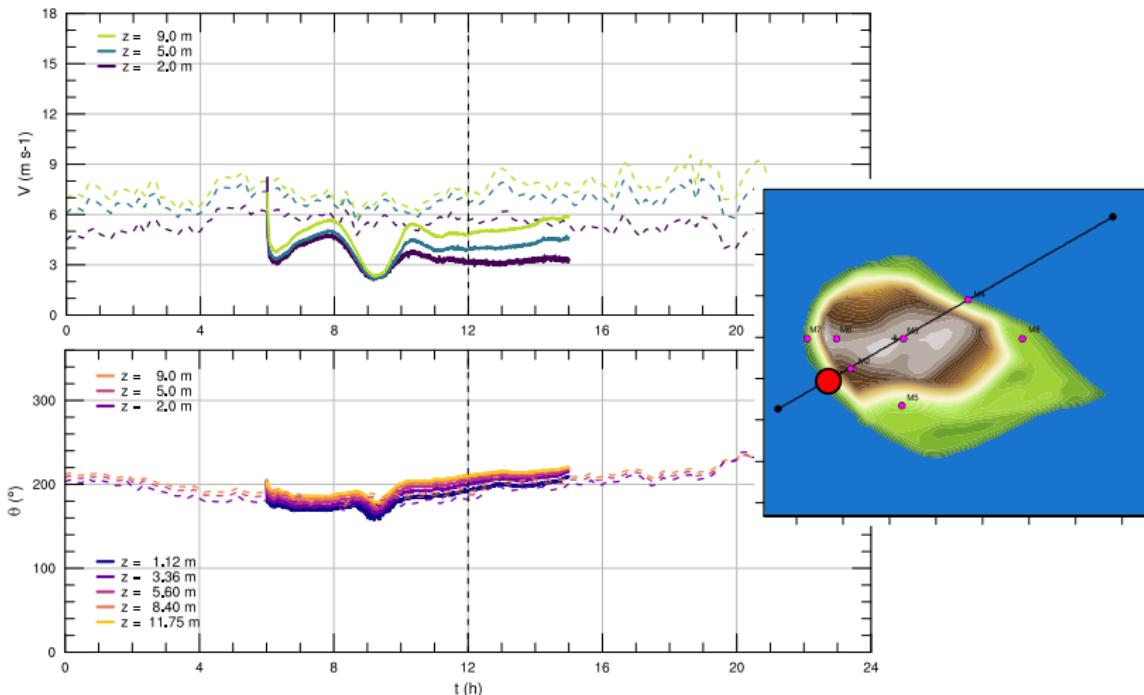


Figura 37: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M1.

Resultados

Caso II: Bolund

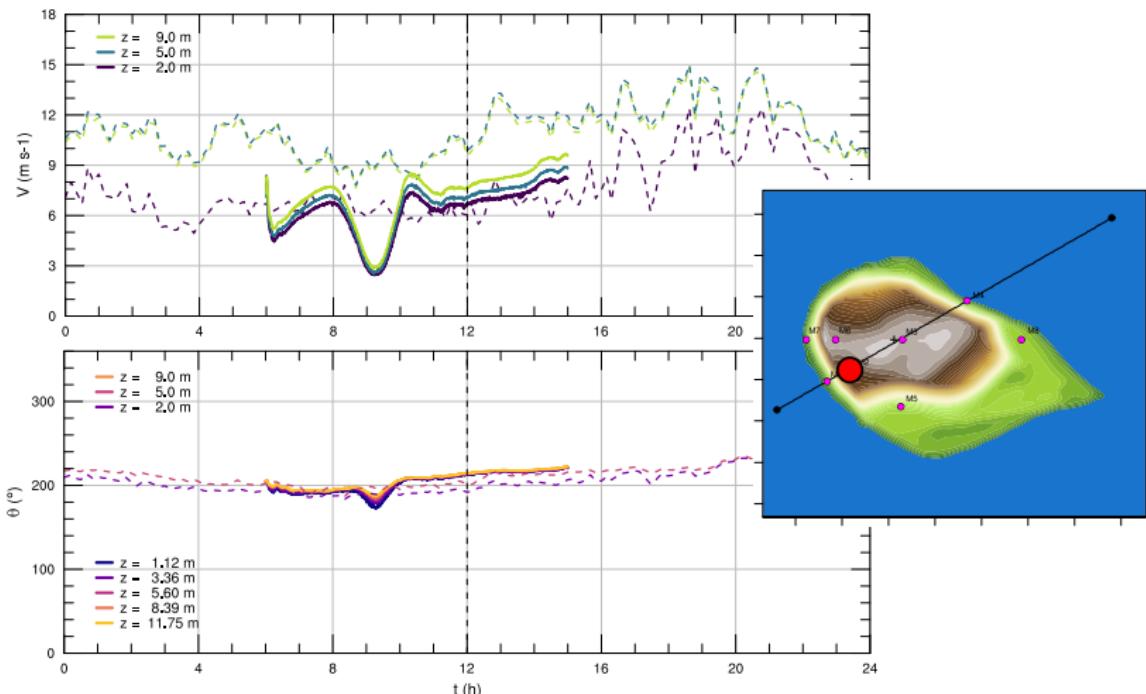


Figura 38: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M2.

Resultados

Caso II: Bolund

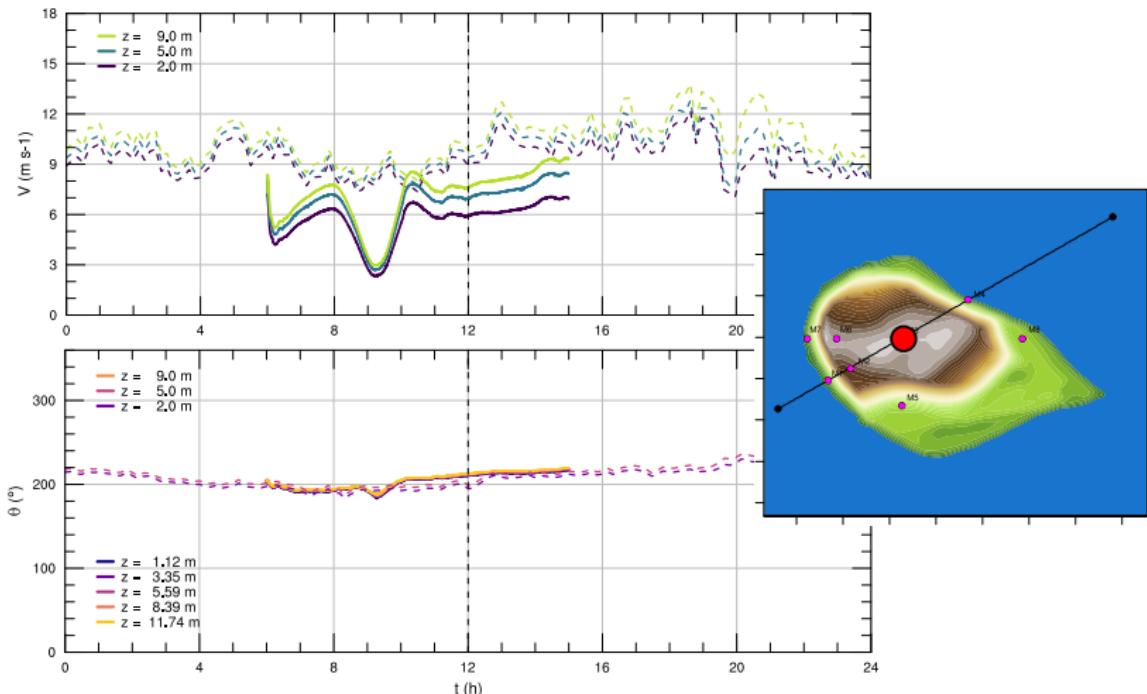


Figura 39: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M3.

Resultados

Caso II: Bolund

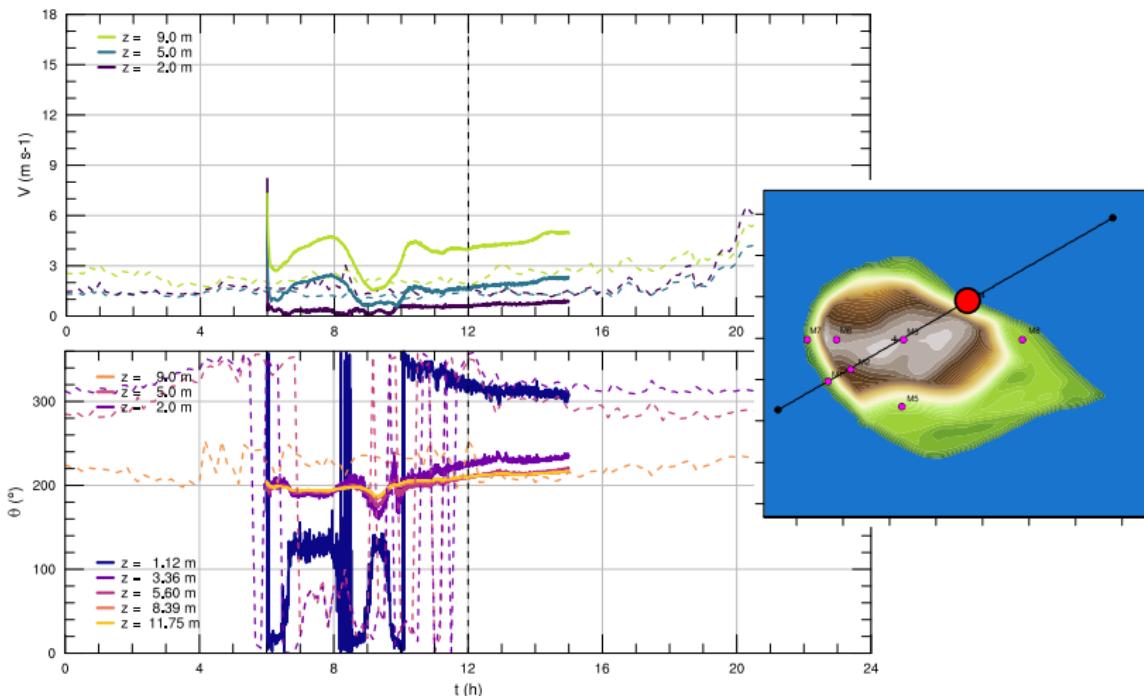


Figura 40: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M4.

Resultados

Caso II: Bolund

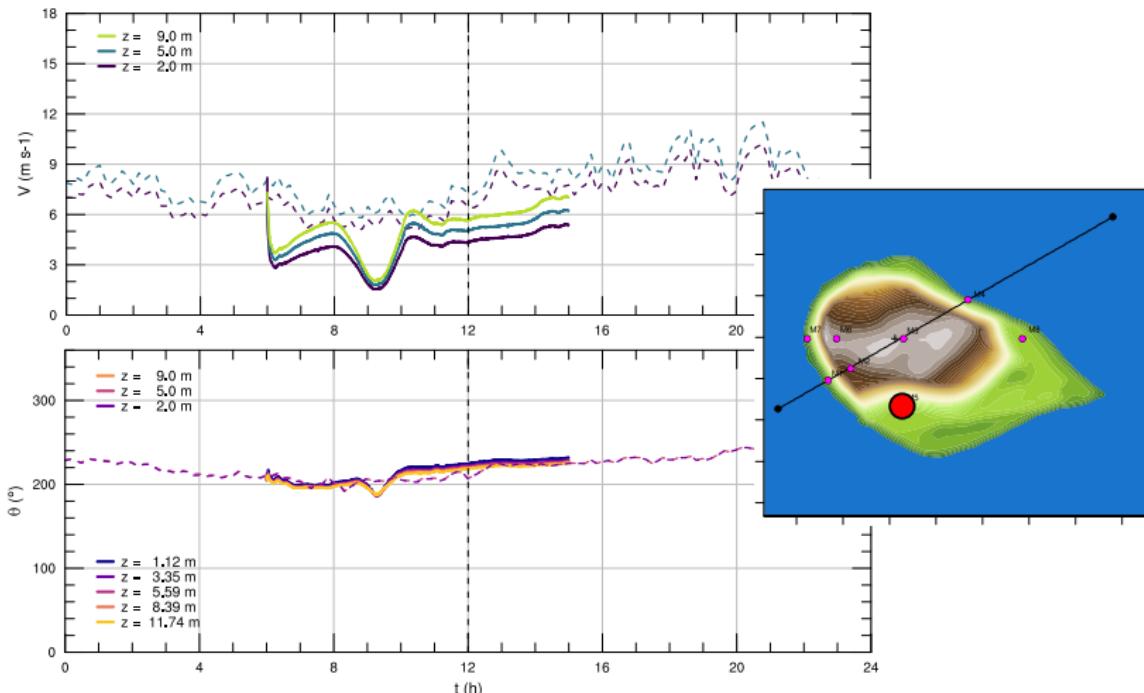


Figura 41: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M5.

Resultados

Caso II: Bolund

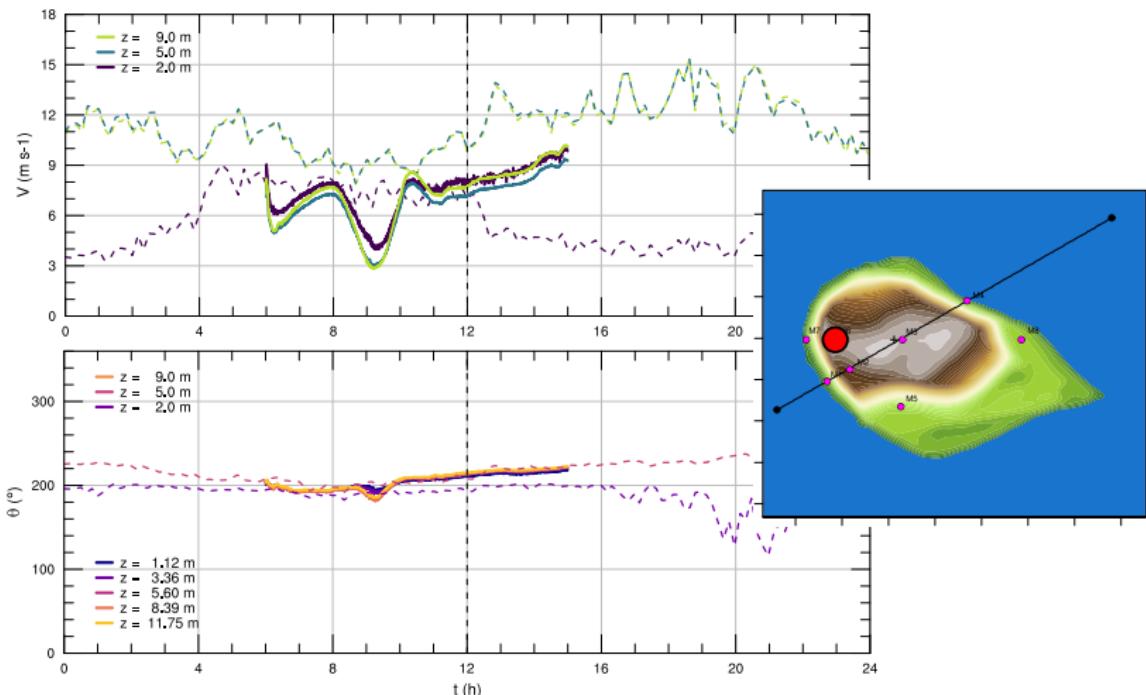


Figura 42: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M6.

Resultados

Caso II: Bolund

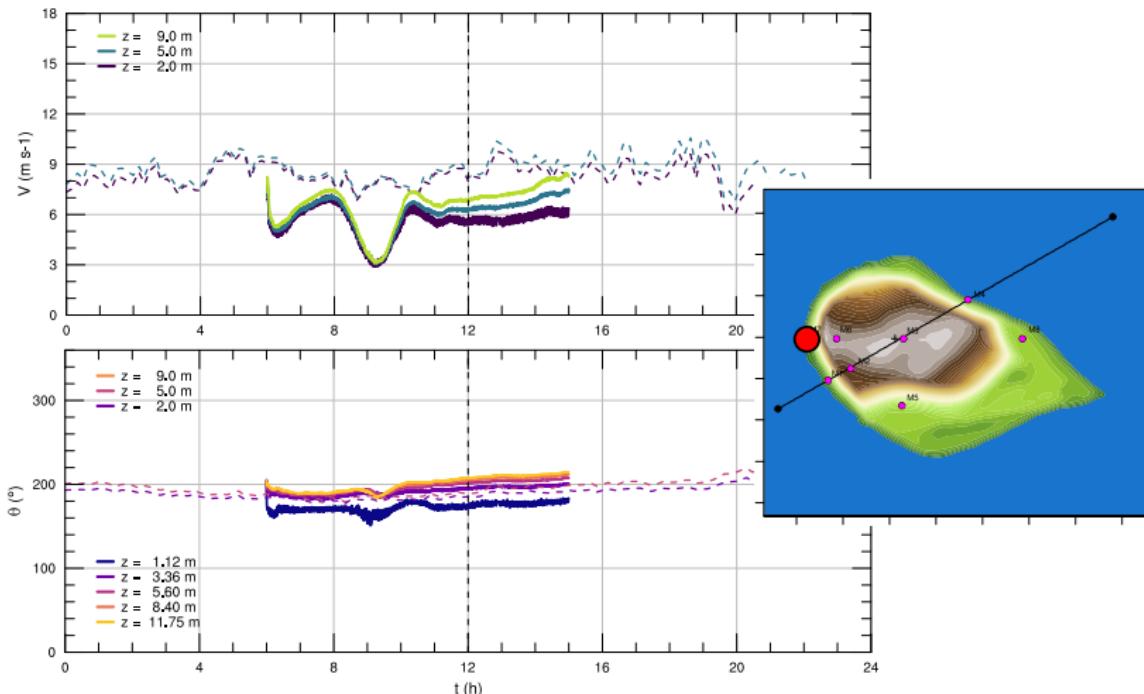


Figura 43: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M7.

Resultados

Caso II: Bolund

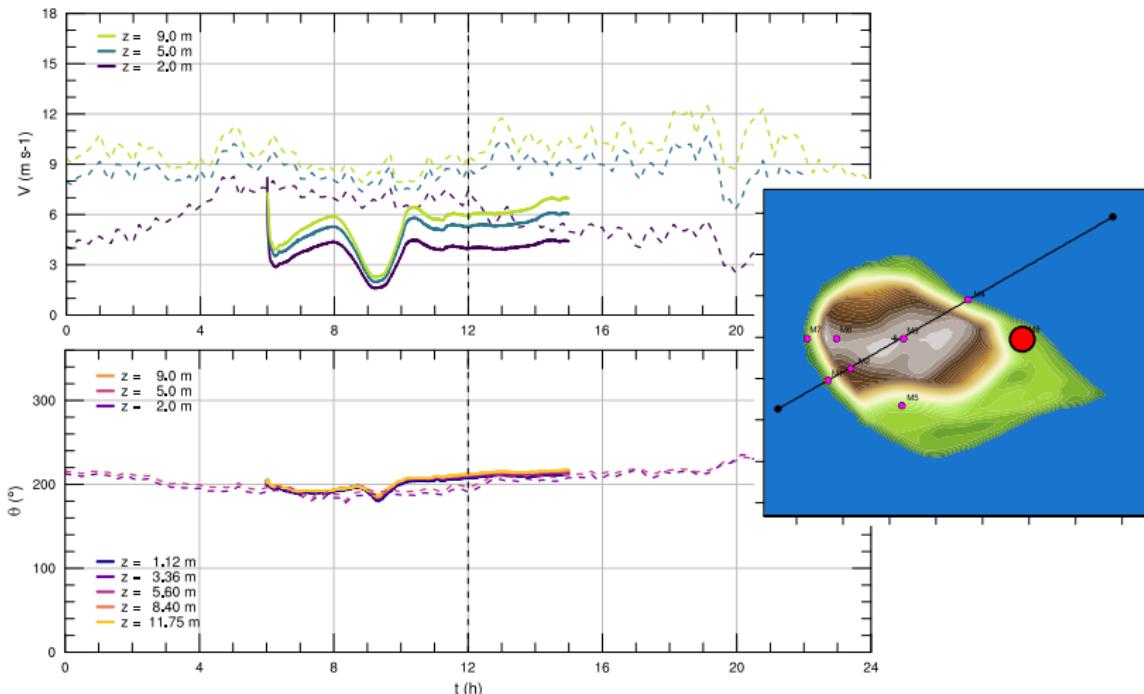


Figura 44: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M8.

Resultados

Caso II: Bolund

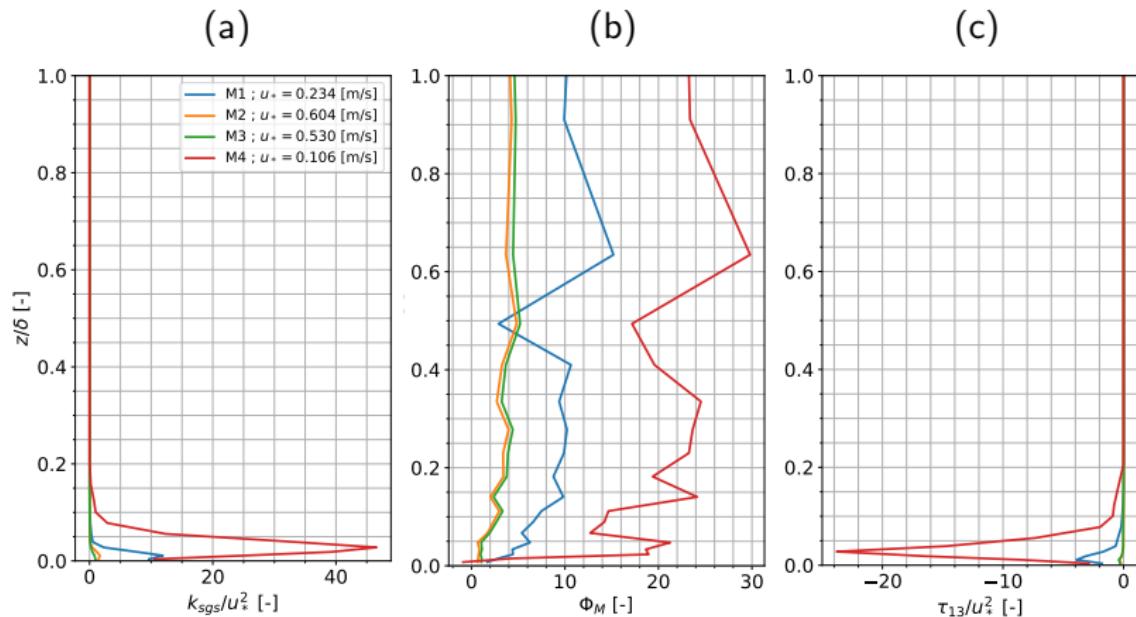


Figura 45: Variables adimensionalizadas de segundo orden para M1-M4 promediadas entre las 12:00 y las 15:00. (a) Energía cinética turbulenta de submallá, (b) Gradiente de velocidad, (c) Esfuerzo turbulento.

Resultados

Caso II: Bolund

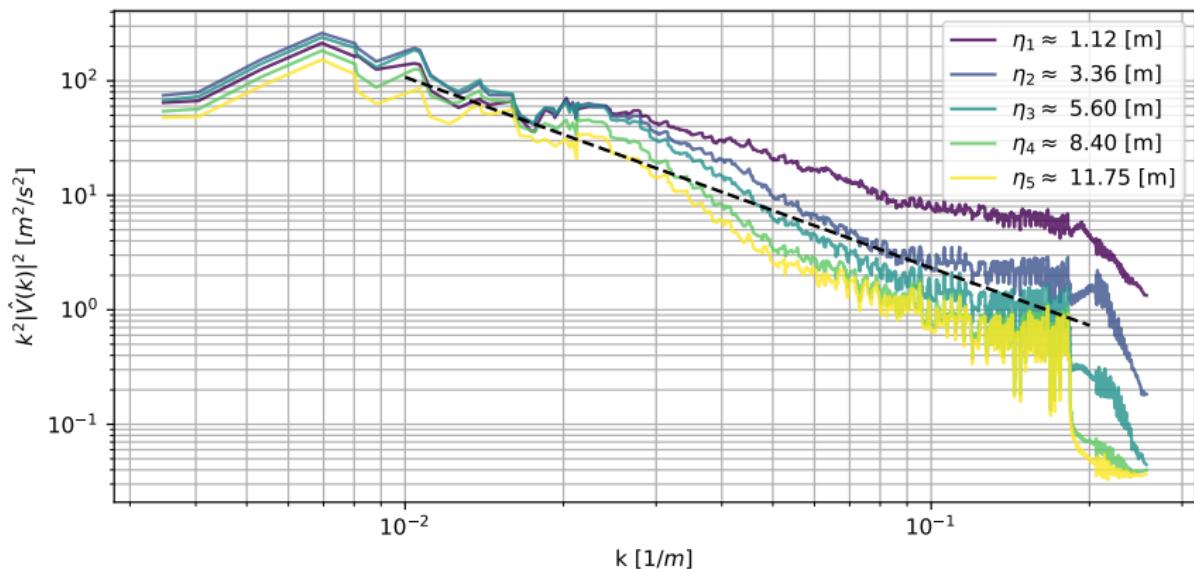
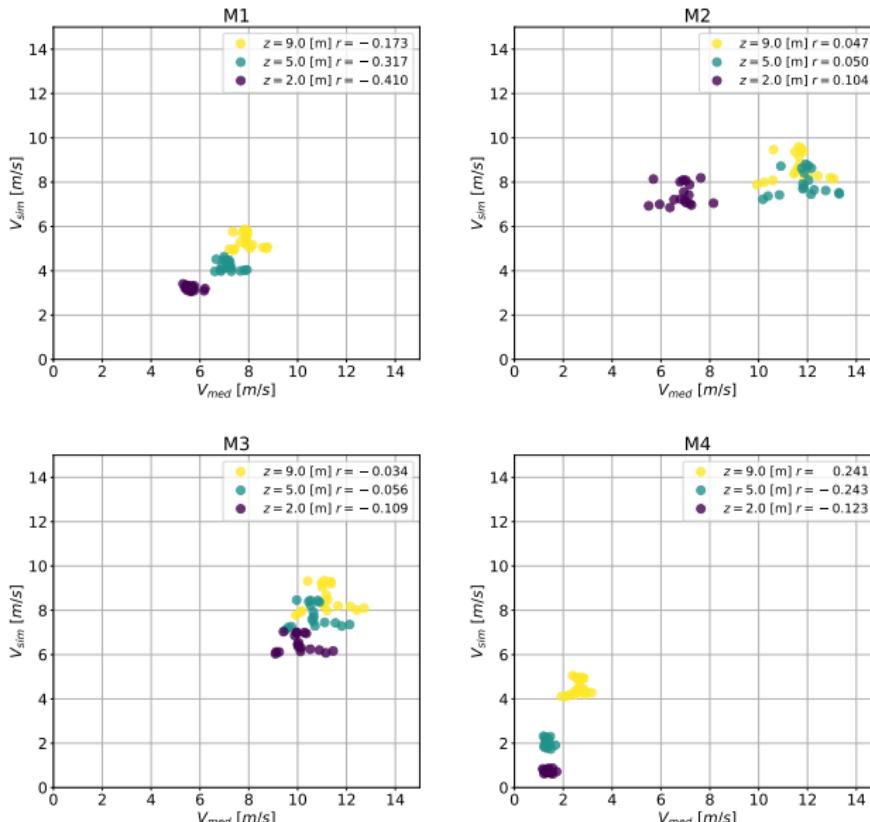


Figura 46: Espectros de energía cinética para la magnitud horizontal del viento a distintos niveles verticales en el dominio d08 caso Bolund.

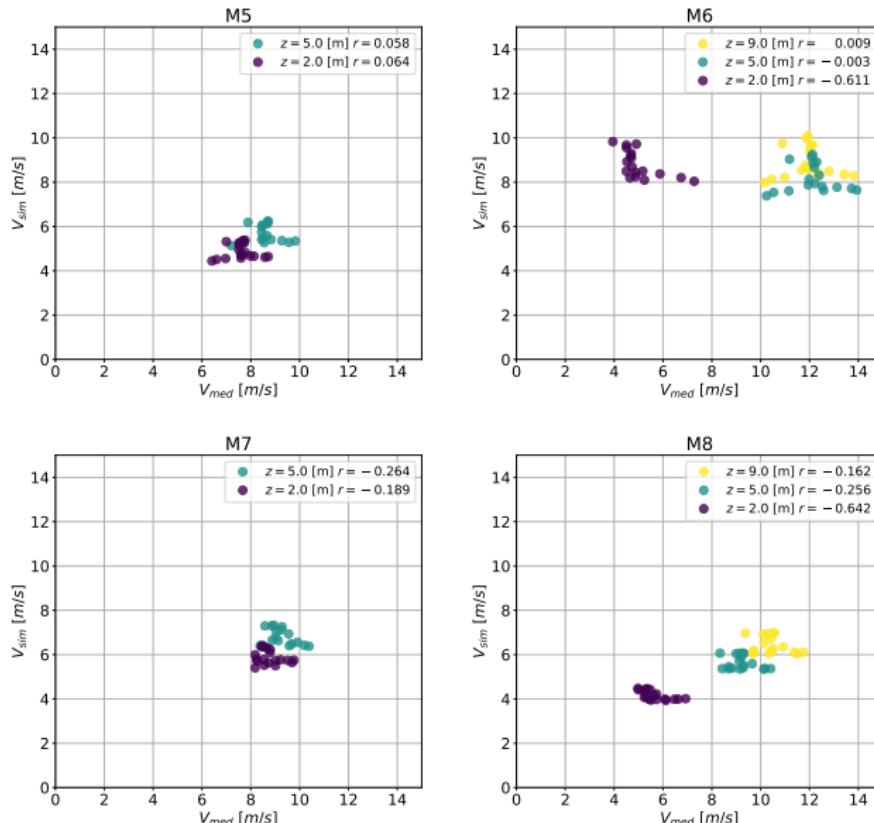
Resultados

Caso II: Bolund (Dispersión)



Resultados

Caso II: Bolund (Dispersión)



Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

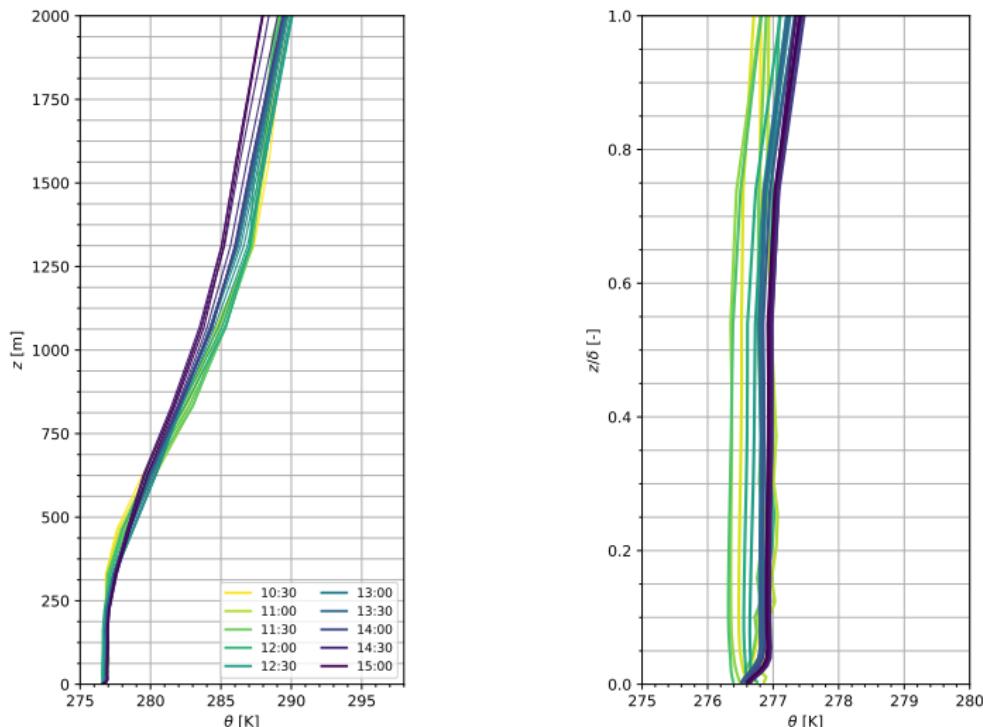


Figura 47: Perfil de temperatura potencial virtual en Bolund con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

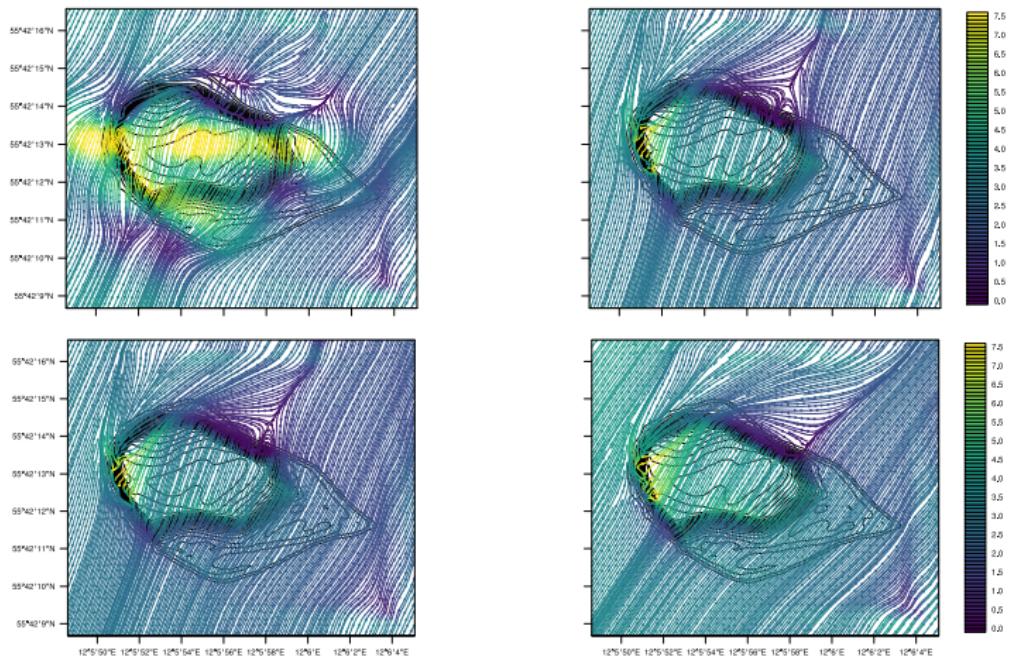


Figura 48: Líneas de flujo para la solución en Bolund con DA en el primer nivel ($z_1 = 1,12$ [m]) para (a) 12:00, (b) 13:00, (c) 14:00 y (d) 15:00.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

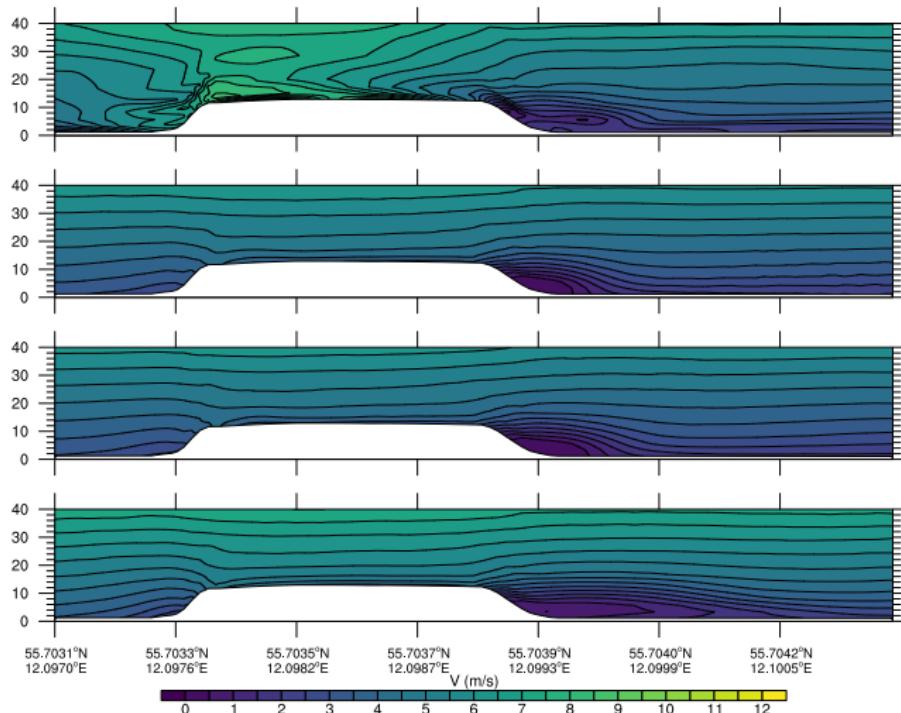
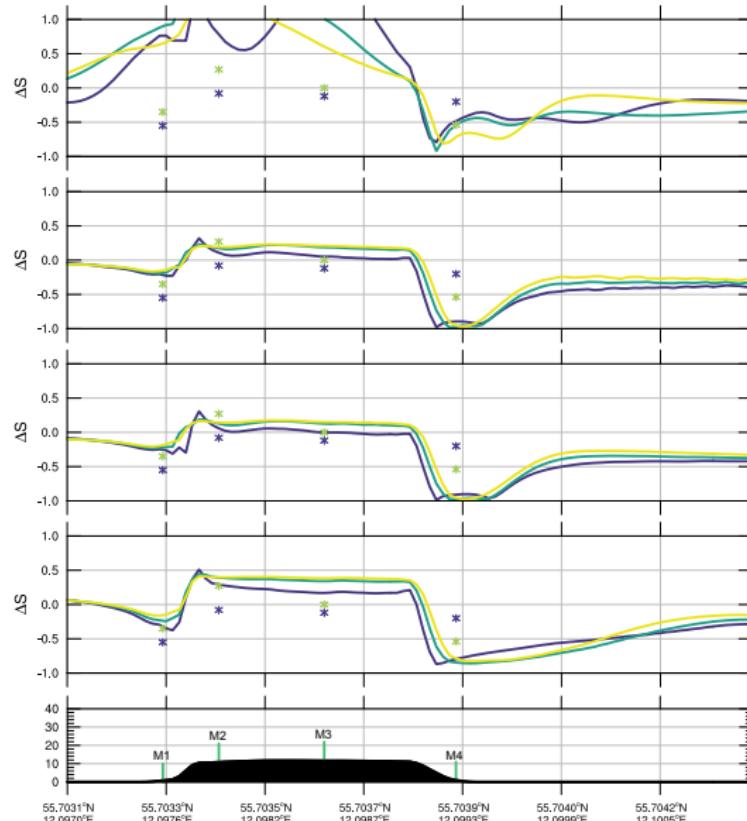


Figura 49: Contornos de rapidez del viento para la sección de corte vertical a 240° en Bolund con DA. 12:00 a 15:00. Escala 1:1.

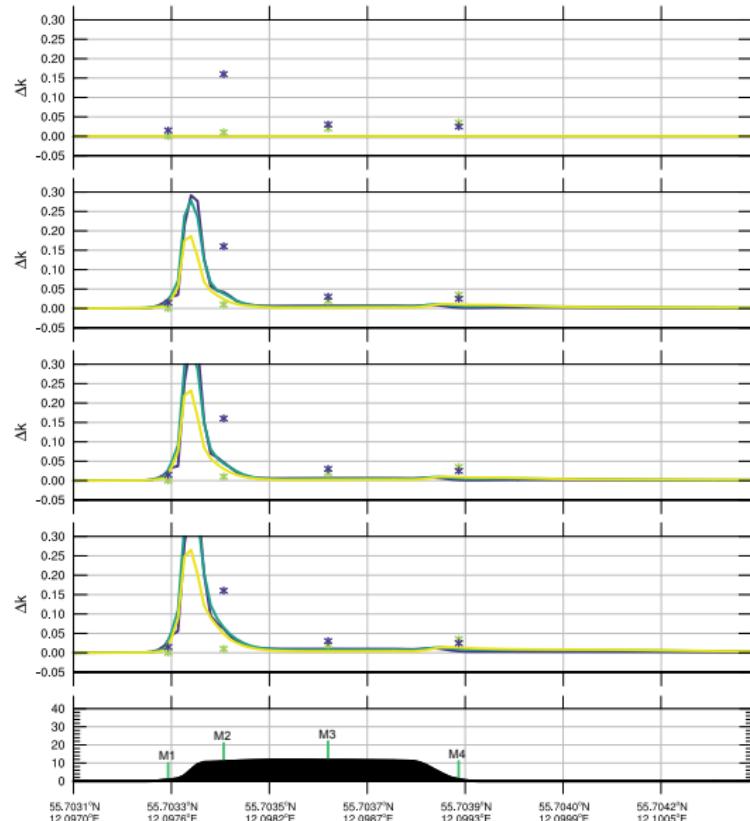
Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos (Aceleración M1-M4)



Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos (Delta TKE)



Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

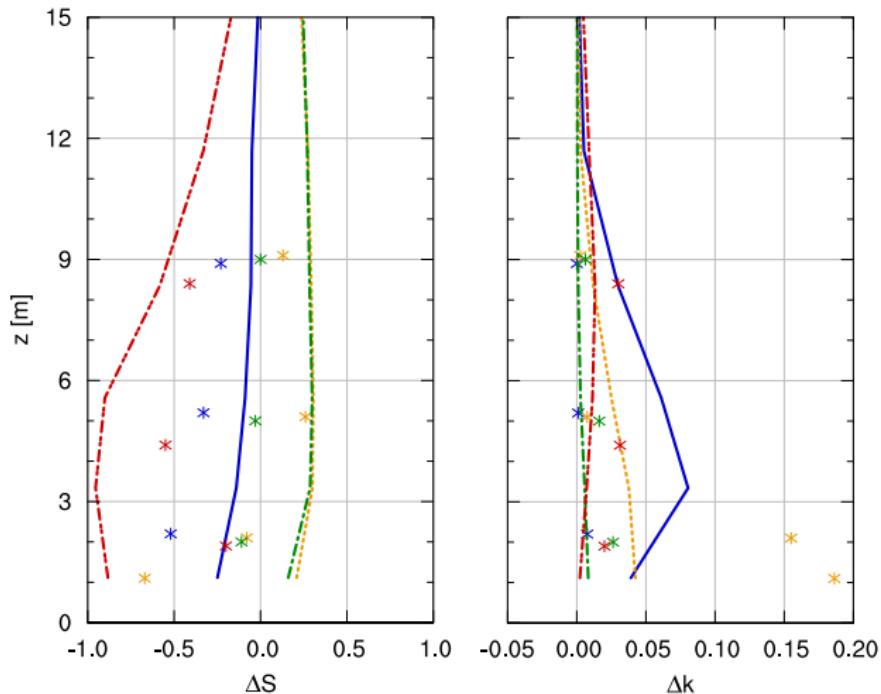


Figura 50: Perfil vertical promedio de 12:00 a 15:00 de (a) *speedup* y (b) variación adimensional de energía cinética turbulenta para las estaciones M1 (azul), M2 (naranja), M3 (verde) y M4 (rojo) para el caso con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

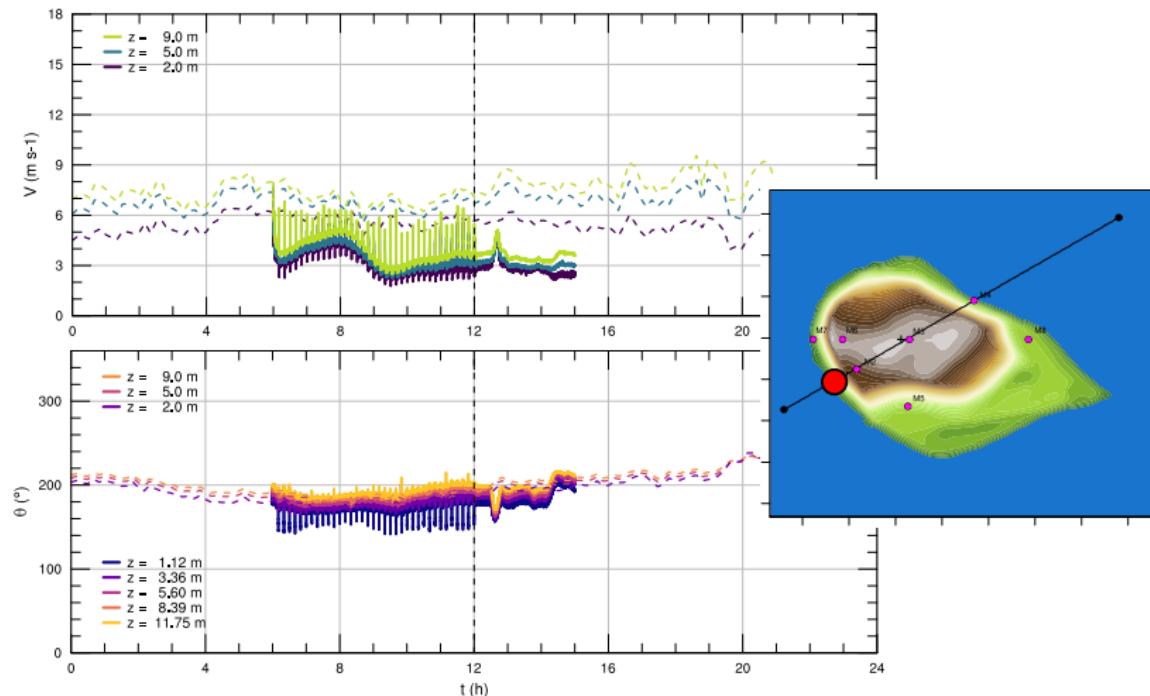


Figura 51: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M1 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

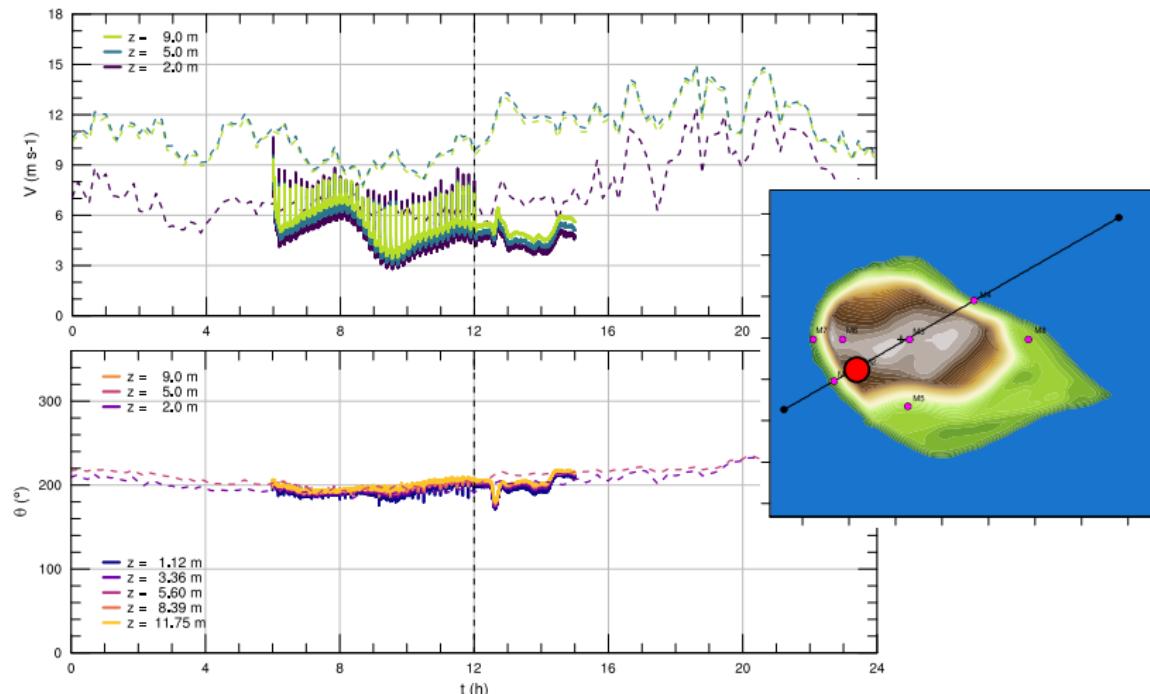


Figura 52: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M2 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

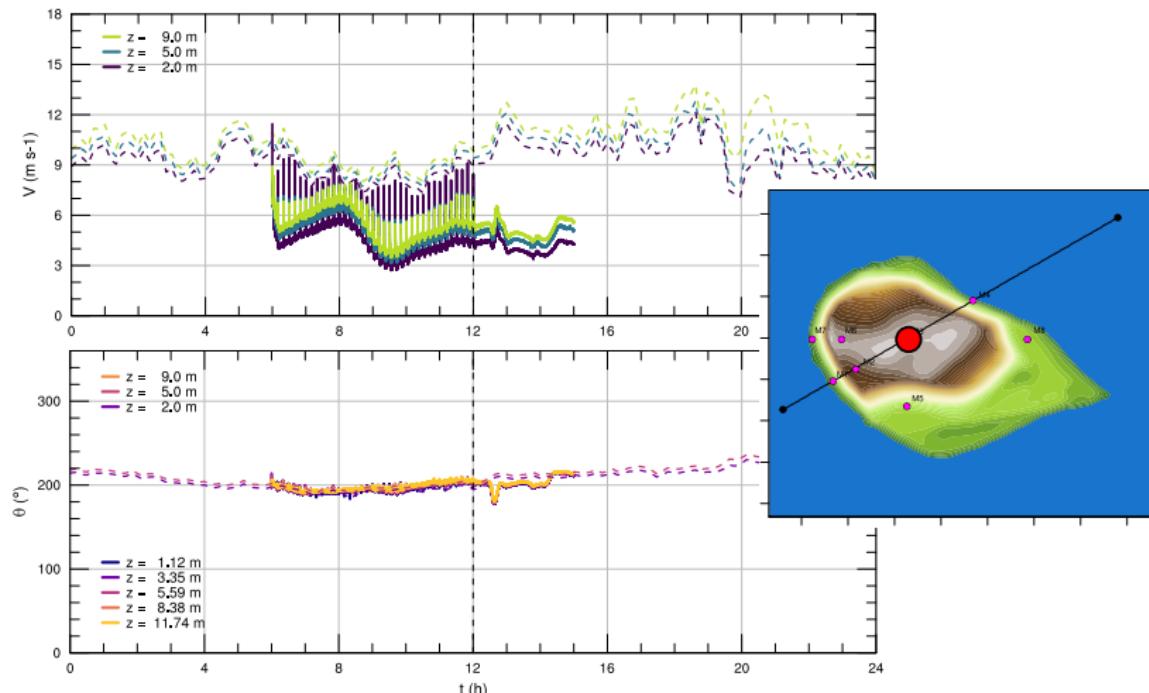


Figura 53: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M3 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

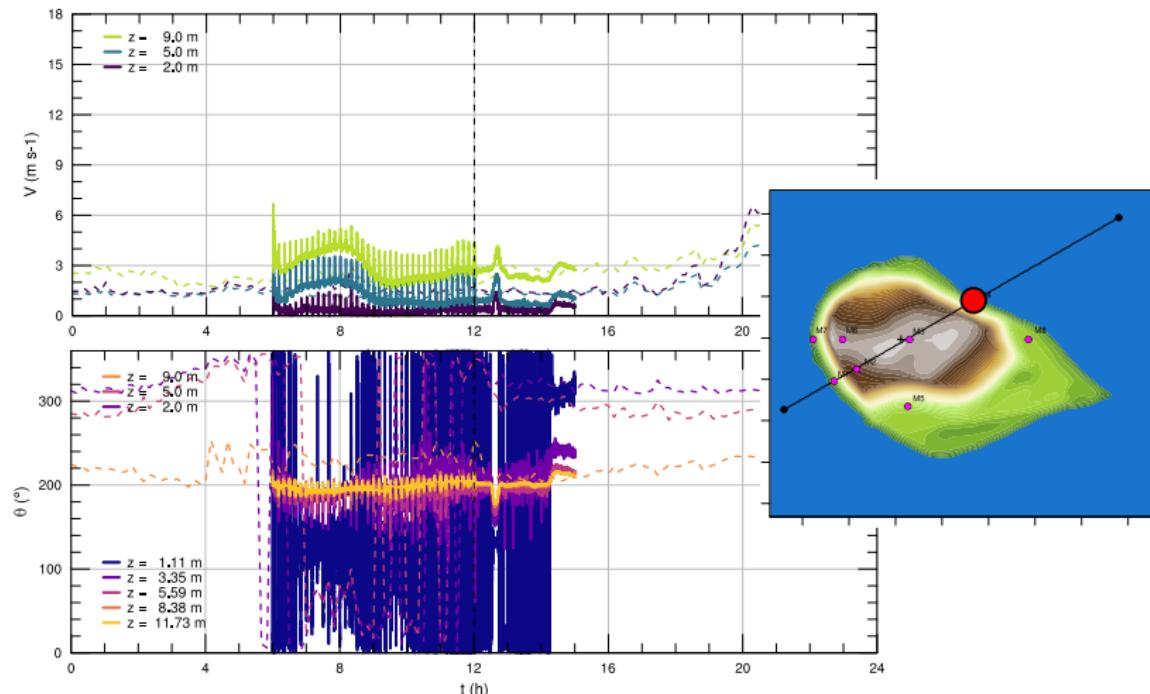


Figura 54: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M4 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

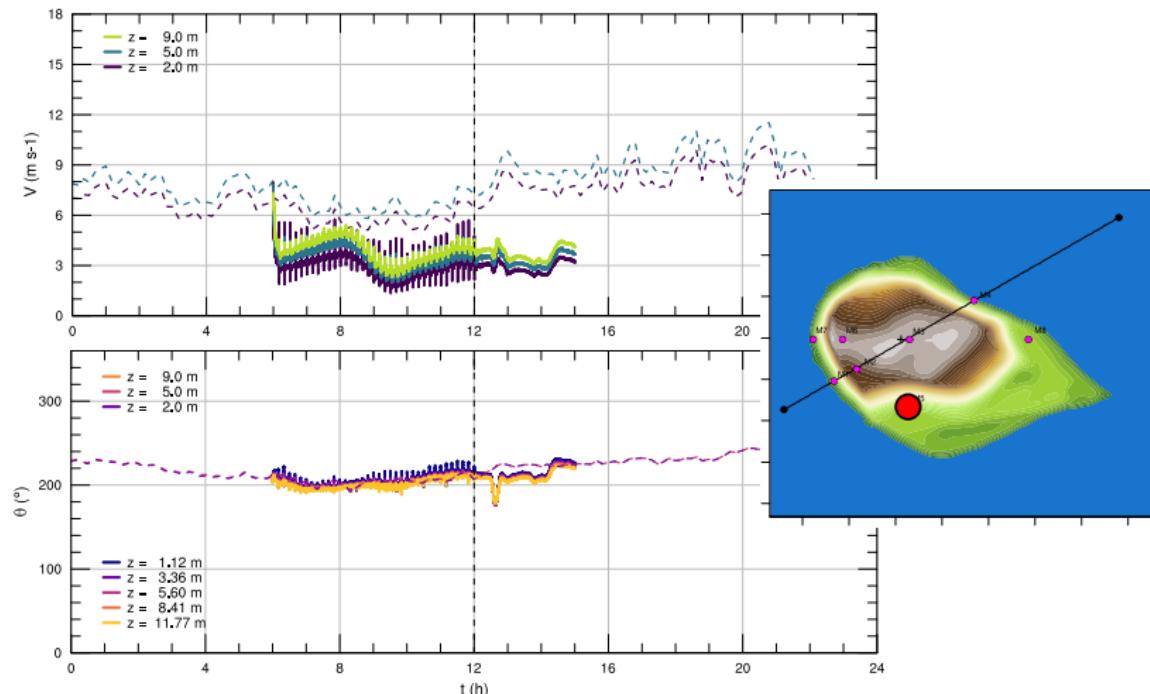


Figura 55: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M5 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

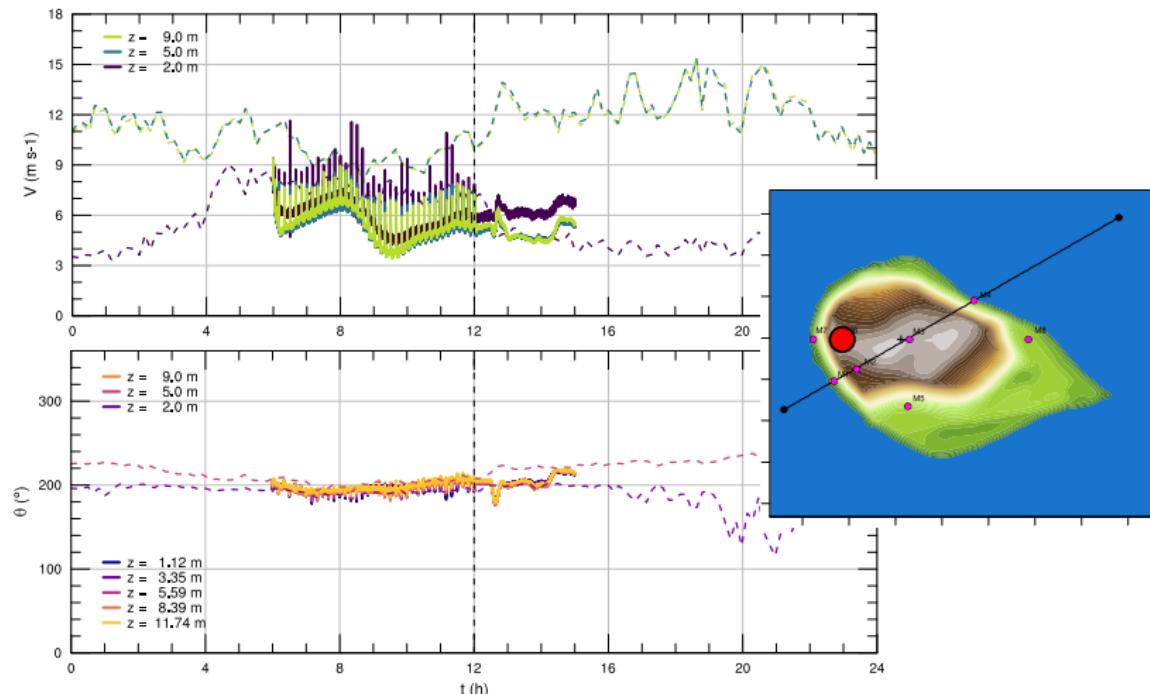


Figura 56: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M6 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

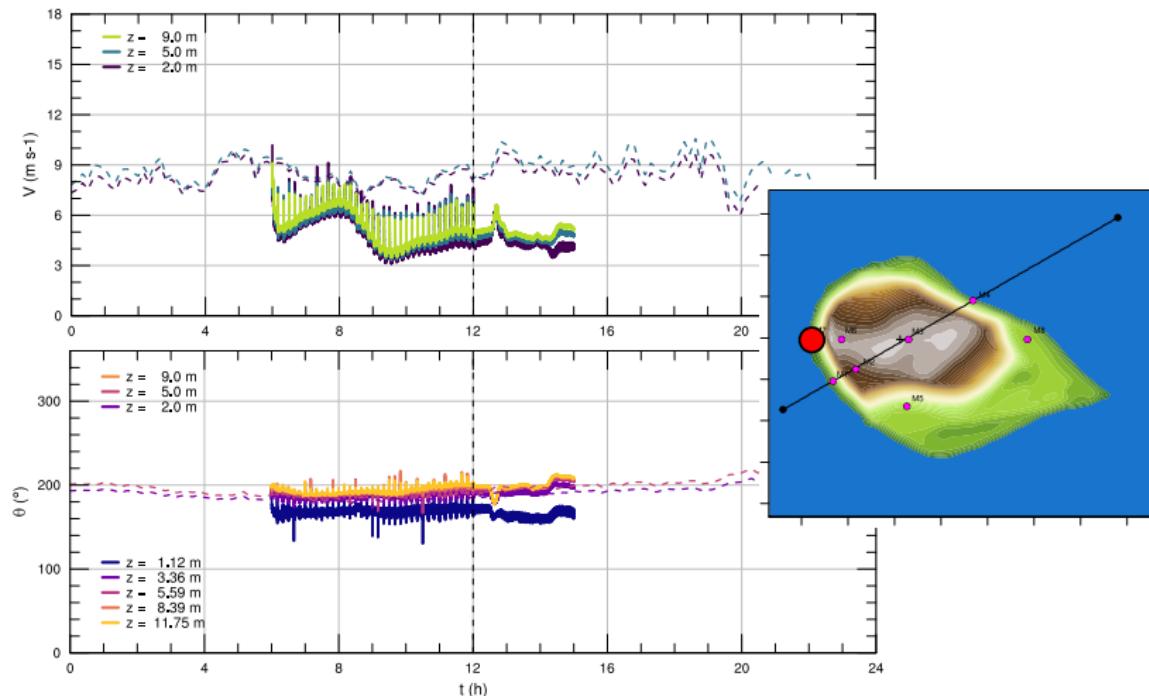


Figura 57: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M7 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

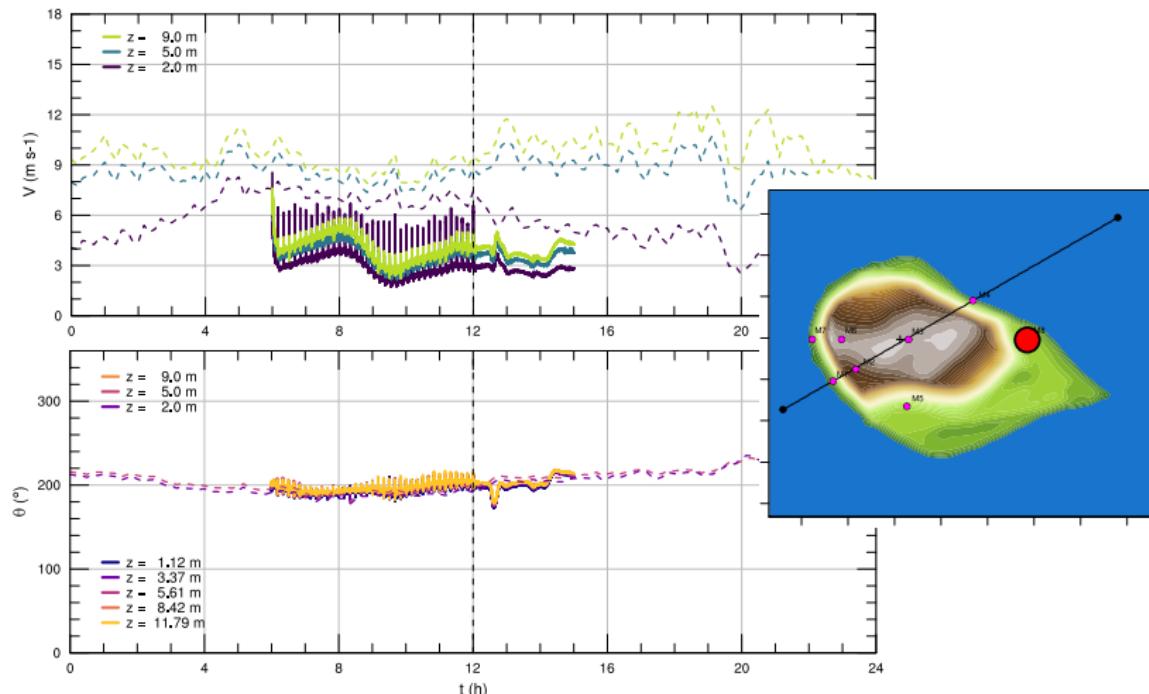


Figura 58: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M8 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

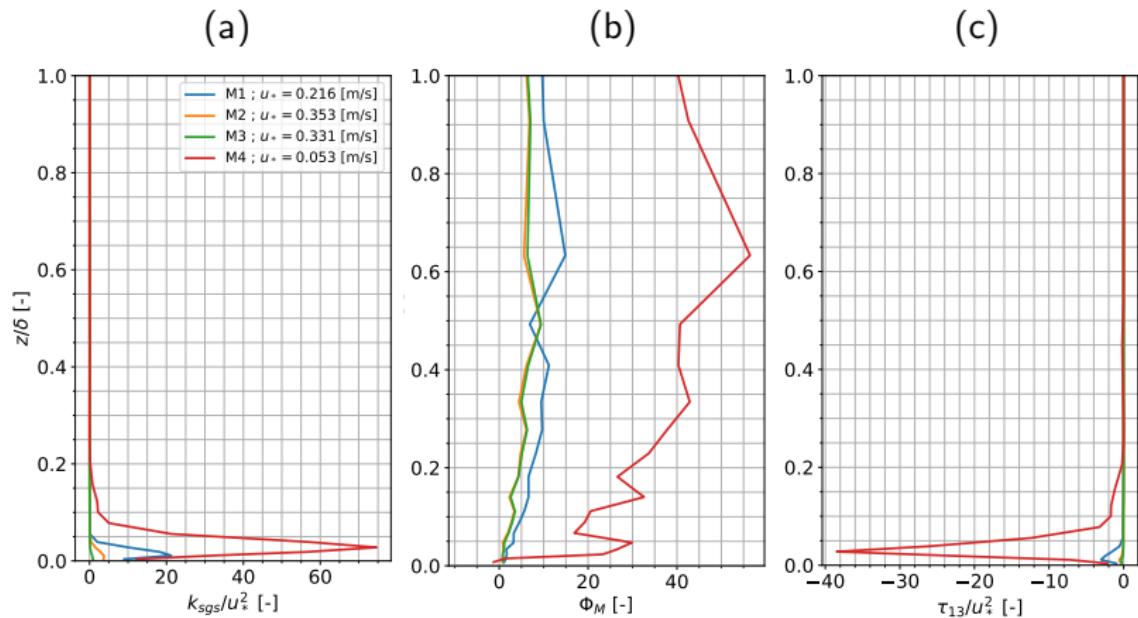


Figura 59: Variables adimensionadas de segundo orden para M1-M4 con DA promediadas entre las 12:00 y las 15:00. (a) Energía cinética turbulenta de submallá, (b) Gradiente de velocidad, (c) Esfuerzo turbulento.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

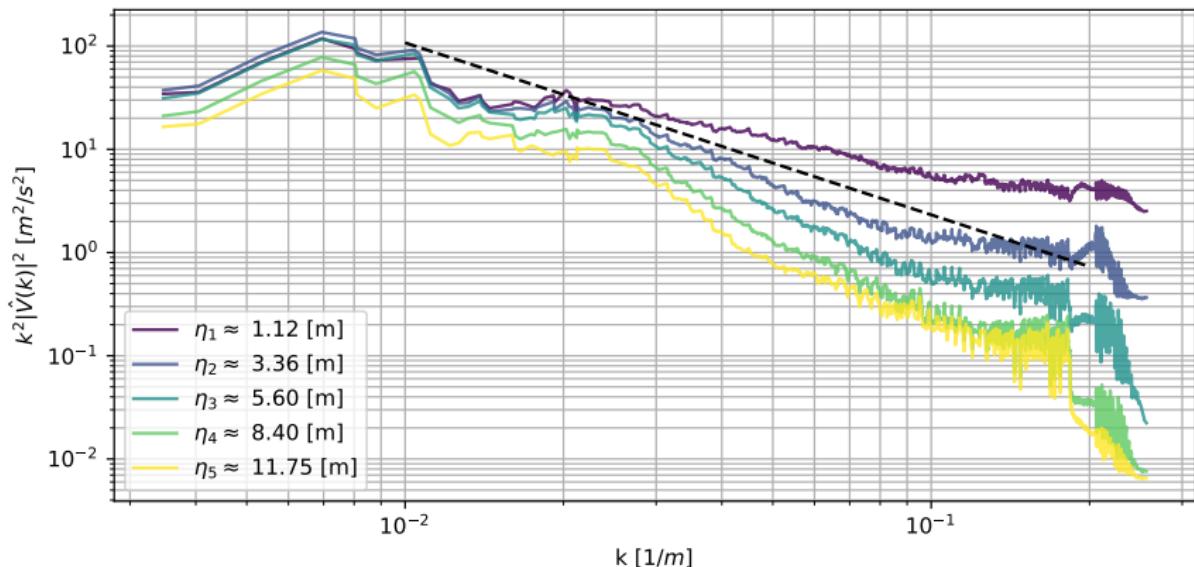
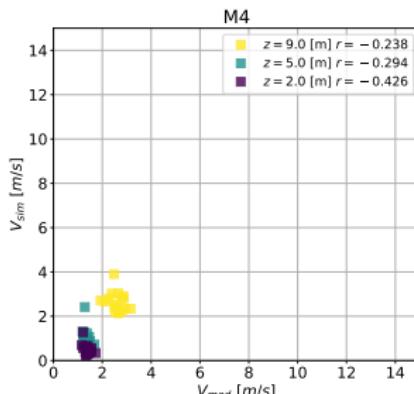
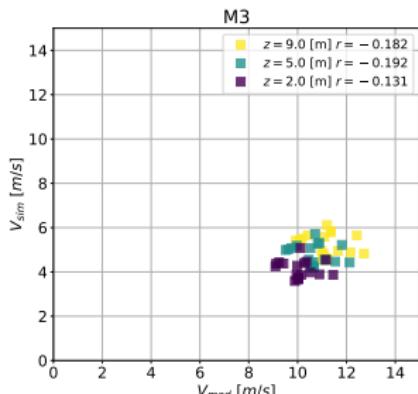
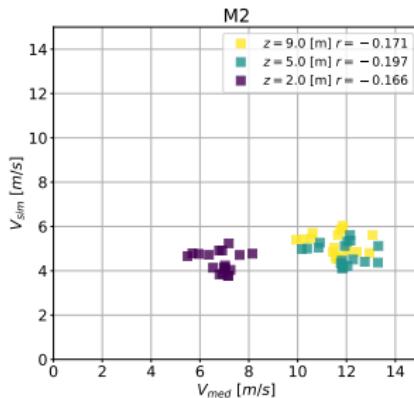
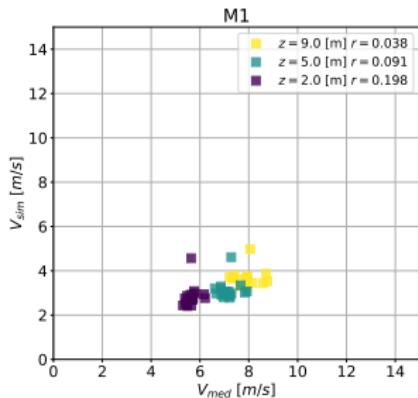


Figura 60: Espectros de energía cinética para la magnitud horizontal del viento a distintos niveles verticales en el dominio d08 caso Bolund con DA.

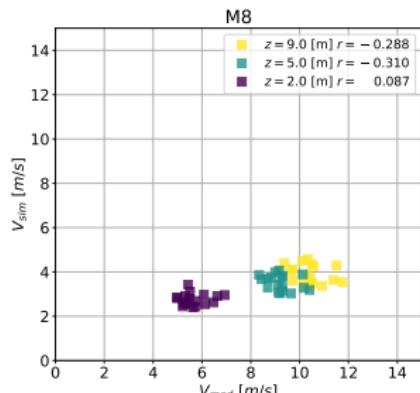
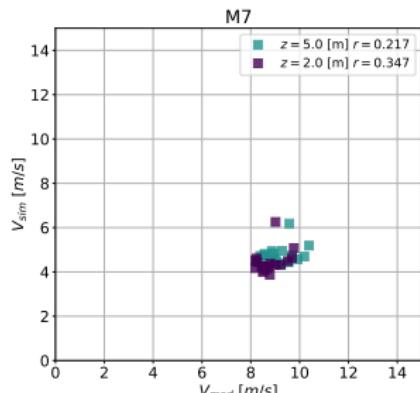
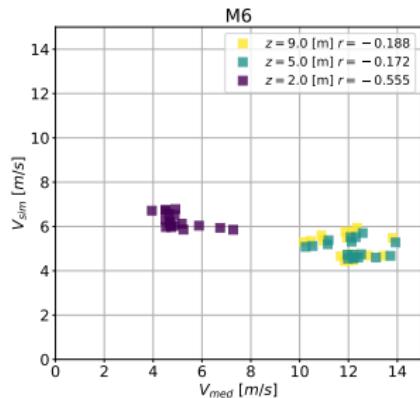
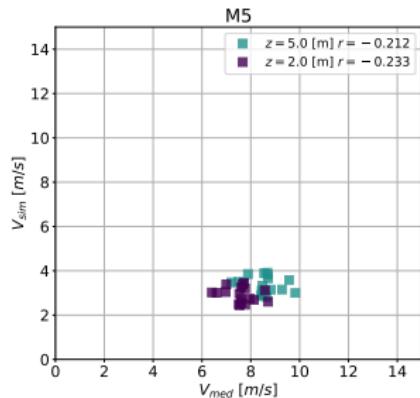
Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos (Dispersión)



Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos (Dispersión)



Resultados

Caso II: Bolund - Síntesis

Observaciones relevantes:

- ▶ aaa
- ▶ bbb
- ▶ ccc
- ▶ ddd

Tabla 8: Comparación de métricas para el caso II Bolund.

	Sin DA	Con DA
MAE	2.67 m/s	4.36 m/s
RMSE	2.95 m/s	4.90 m/s
Δ RMSE	–	–65,91 %
Δ MAE	–	–63,01 %

Conclusiones

Agradecimientos



Danmarks
Tekniske
Universitet

DGIIP



FONDEF
Fondo de Fomento al Desarrollo
Científico y Tecnológico



Simulación Multiescala de Viento Sobre Terreno Complejo Mediante el Método Embebido WRF-LES y Asimilación Variacional de Datos 4D

Pablo Andrés Cárdenas Zamorano

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica
Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor Guía: Ph.D. Alex Flores Maradiaga
Profesor Correferente: Ph.D. Carlos Rosales Huerta
Evaluador Externo: Ph.D. Ricardo Muñoz Magnino

Agosto, 2019