

Turbulencia en zonas frontales superficiales del océano

Pablo Cornejo^{1,2}

¹Departamento de ingeniería mecánica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

²Departamento de geofísica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

**Mechanical Engineering Department of. 333
Engineering Faculty Building, 3° floor
Edmundo Larenas s/n, Concepción, Chile.**

**Phone: 56-41-2203547
Email: pablo@dgeo.udec.cl**

...

Presentación aborda parte de investigación doctoral

- Atención a procesos fluido-dinámicos de pequeña escala del océano debido a un interés oceanográfico: disipación de energía, productividad primaria, clima.
- Interés más fundamental (mecánica de fluidos), donde los sistemas frontales del océano son zonas donde tiene lugar una cascada directa de energía de forma simultánea con una cascada inversa.

AGENDA

- MOTIVACION
- OBJETIVOS
- DESCRIPCION DEL MODELO
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- TRABAJO EN PROGRESO

MOTIVACIÓN



Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

MOTIVACIÓN



Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

MOTIVACIÓN



Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

MOTIVACIÓN

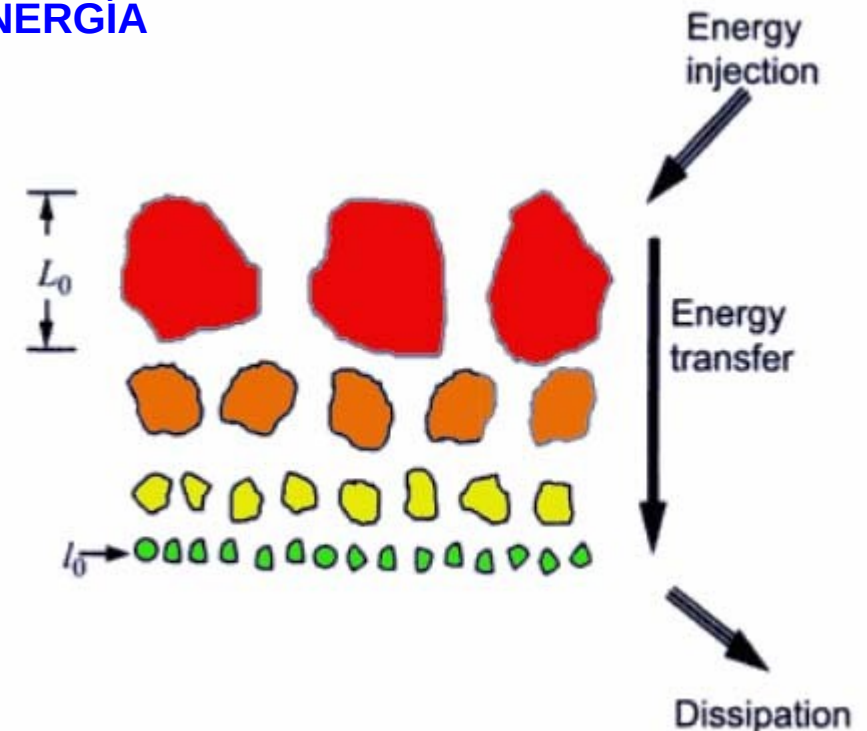
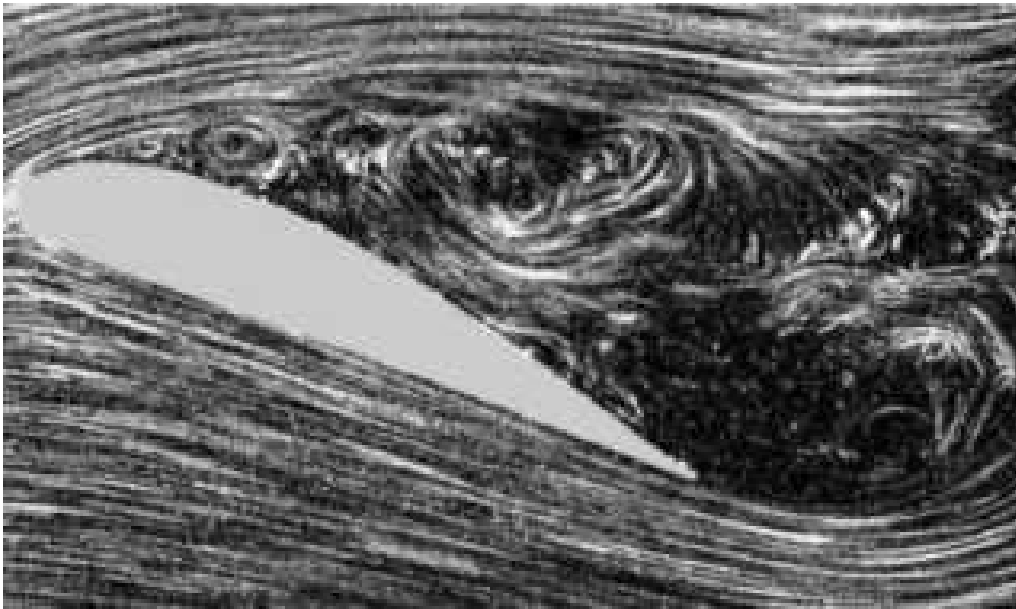
El entendimiento del comportamiento turbulento de los flujos de fluidos es uno de los problemas más misteriosos y frustrantes de toda la mecánica clásica.

- La mayoría de los flujos son turbulentos, y en muchos casos los flujos de fluidos representan la física dominante en todas las escalas espaciales y temporales: desde la formación del universo, los sistemas de circulación y respiración de los seres vivos, el océano y la atmósfera, las galaxias.
- A pesar de lo universal de la ocurrencia de los flujos de fluidos y de la ubiquidad de la turbulencia, “el problema de la turbulencia” se mantiene hasta el día de hoy sin solución y es el último problema sin resolver en física clásica.
- De esta forma el estudio de la turbulencia está motivado por ambos: el inherente reto intelectual de entenderla y la utilidad práctica que reviste la predicción de sus efectos.

MOTIVACIÓN: TURBULENCIA 3D

- Involucran un amplio espectro de variabilidad espacial y temporal.
- Dependientes del tiempo, no-lineales, alta mezcla.
- Descritos por la mecánica del medio continuo.

CASCADA DE ENERGÍA

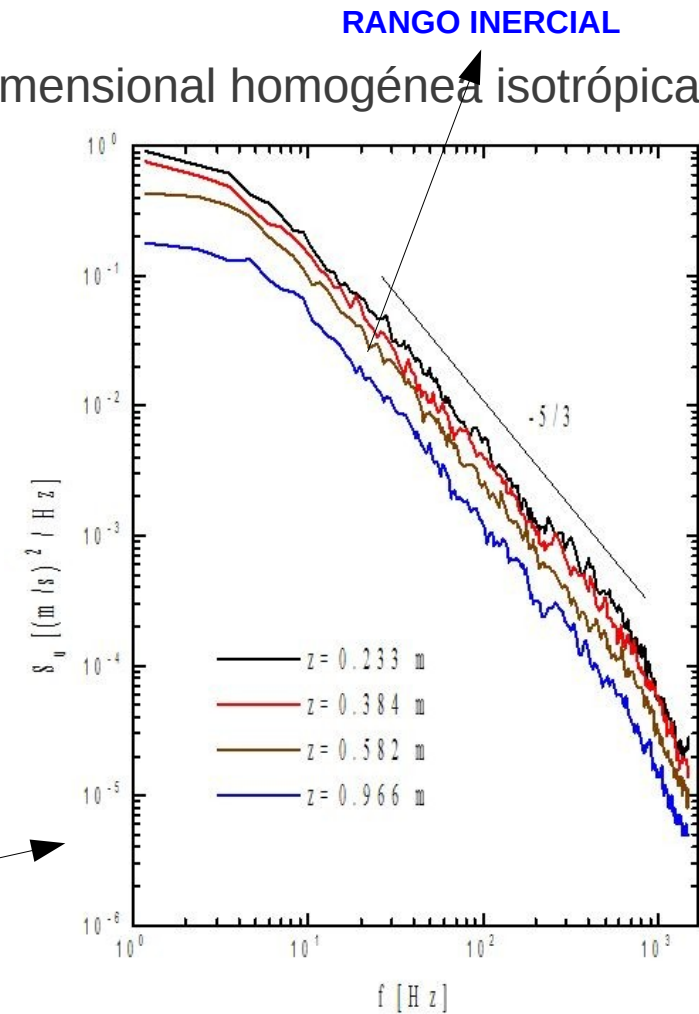
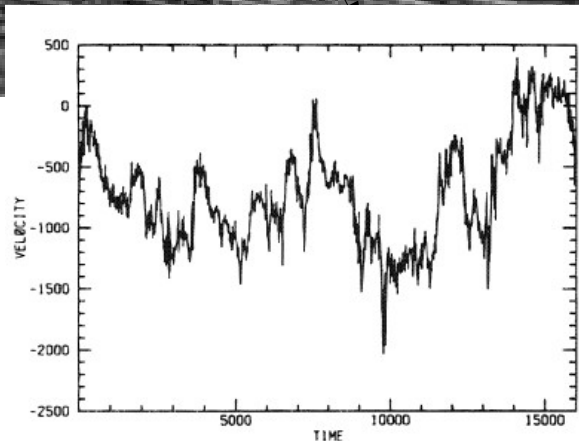
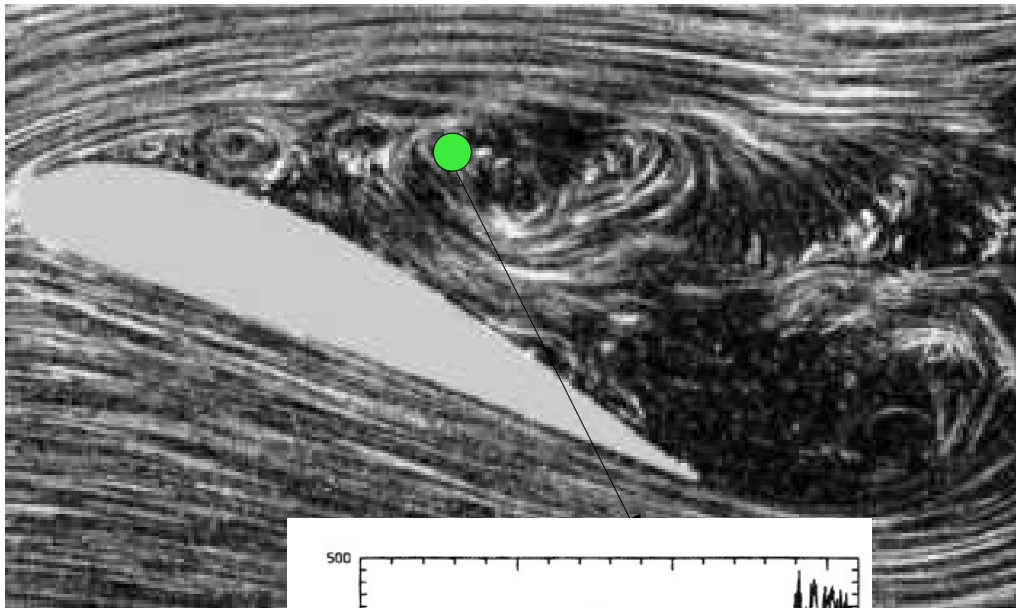


Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

MOTIVACIÓN: TURBULENCIA 3D

- Teoría k41 de Andrei Kolmogorov: turbulencia tridimensional homogénea isotrópica.



MOTIVACIÓN: MODELACIÓN TURBULENCIA

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \rho \cdot g_x,$$

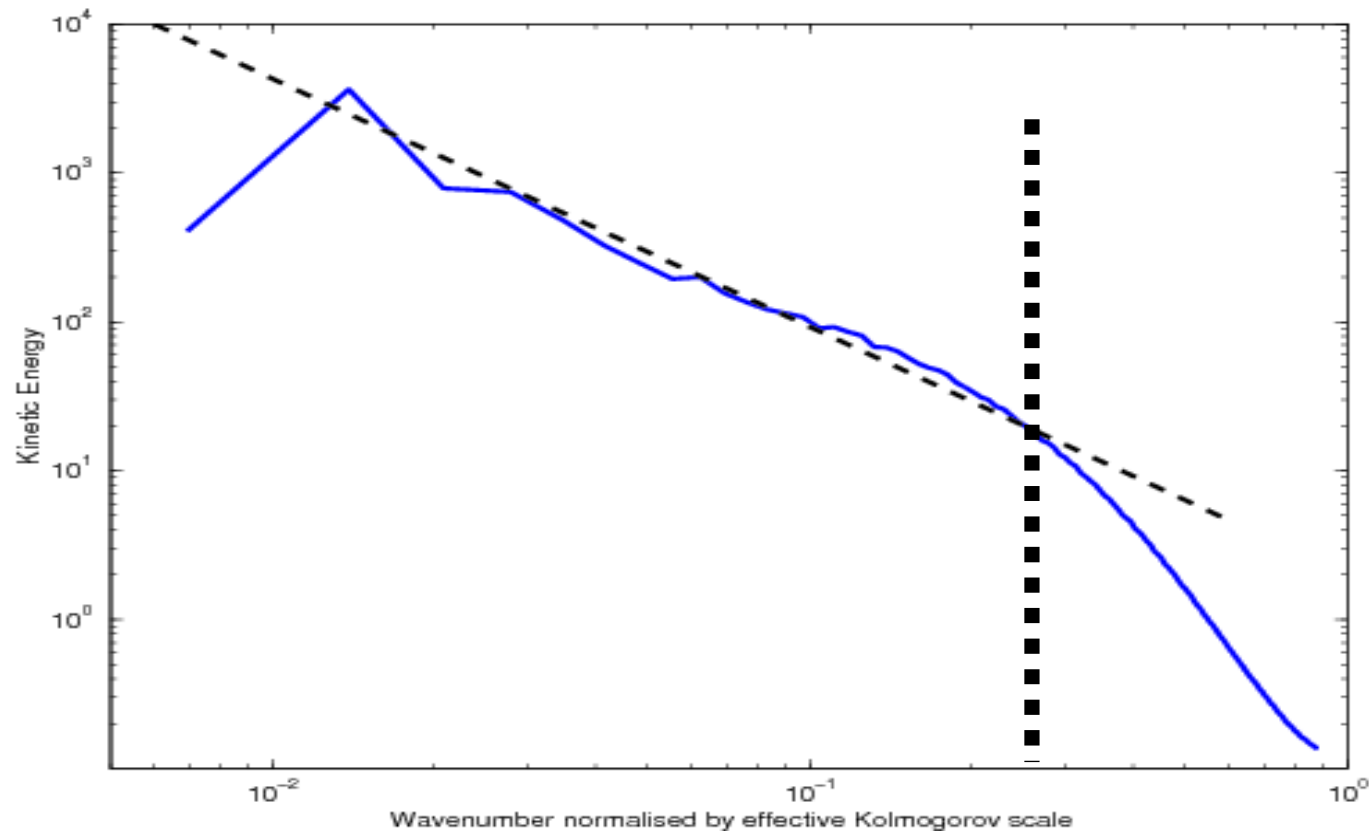
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + \rho \cdot g_y,$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho \cdot g_z.$$

- Sistema sin solución analítica
- Solución numérica: directa (prohibitiva en la vida real, elevado costo computacional)
filtrado de las ecuaciones (temporal y espacial)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j})$$

MOTIVACIÓN: MODELACIÓN TURBULENCIA



MOTIVACION: EL OCEANO

- El océano es un sistema dinámico que involucra la interacción de procesos advectivos y propagación de ondas de un amplio espectro de escalas espaciales y temporales con los ingredientes especiales de **ROTACIÓN de la Tierra Y ESTRATIFICACIÓN de la columna de agua.**



MOTIVACIÓN: GFD

- Aproximaciones realizadas en dinámica de fluidos geofísicos
- Aproximación de Boussinesq: *La densidad se considera constante en los términos de variación local y términos advectivos, y variable sólo en el término gravitacional.*
- Aproximación hidroestática: En GFD, dada sus dimensiones $H \ll L$, la dinámica de las escalas horizontales dominan sobre las verticales.

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho \cdot g_z.$$
$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g$$

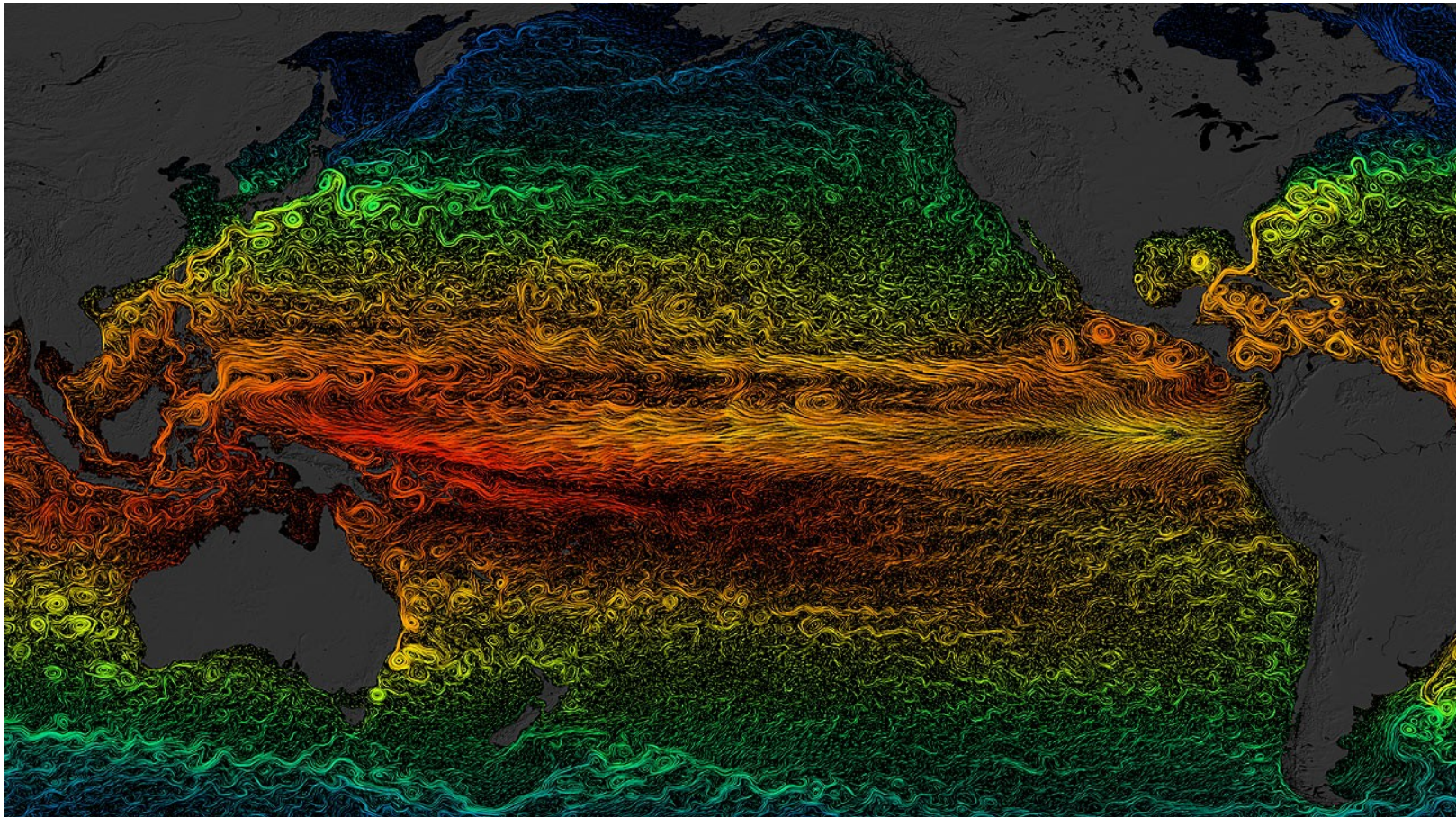
***¿Son estas aproximaciones estrictamente necesarias?: NO**

***¿Cómo se calculan las velocidades verticales?: Ecuación de continuidad**

***¿Alguna otra aproximación?**

MOTIVACION: EL OCEANO

- Escalas involucradas
- Presupuesto de energía dado por el forzante atmosférico.
- Cascada inversa de las estructuras de mesoescala ($O(100)$ km)



Santiago, July 8th, 2014

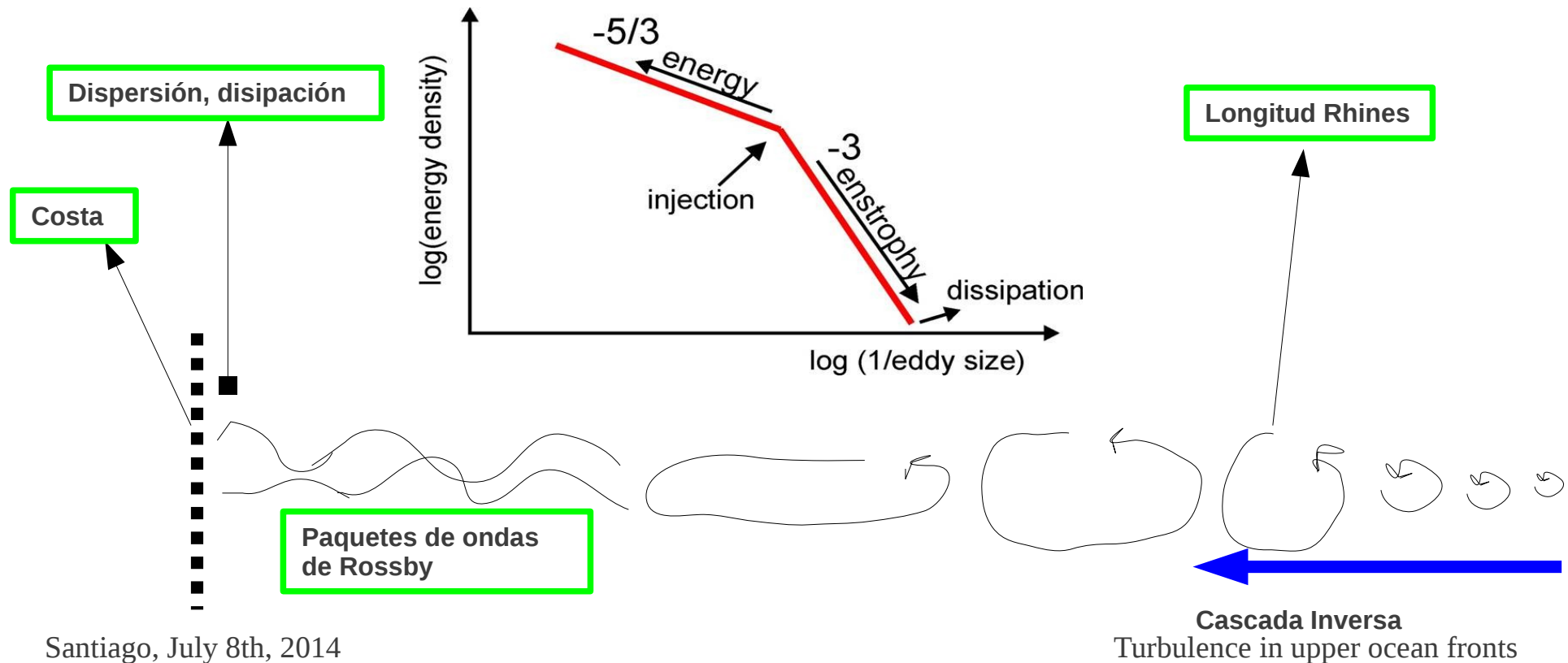
Turbulence in upper ocean fronts

MOTIVACION: CASCADA INVERSA DE LA ESTRUCTURAS DE MESOESCALA

Estructuras de mesoescala ($O(100)$ km) :

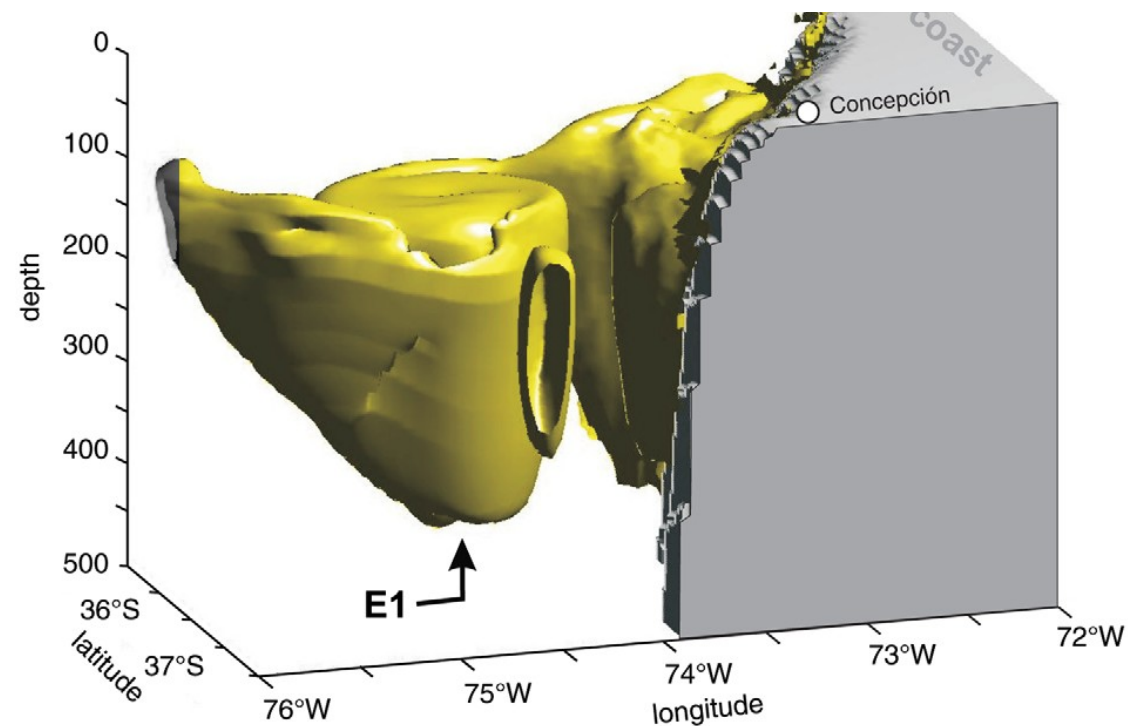
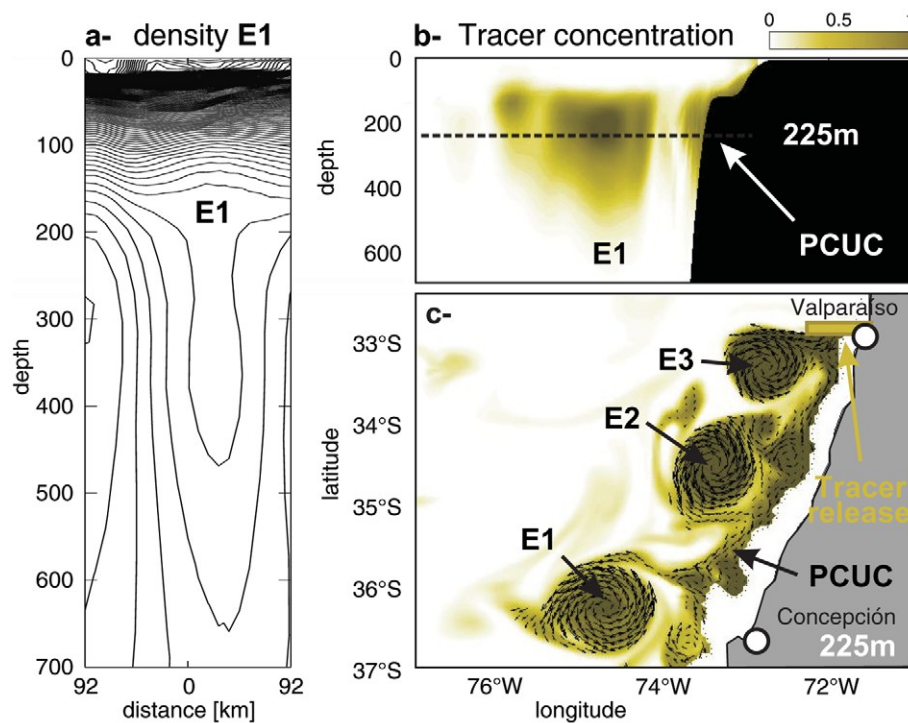
- Cascada inversa: estructuras bidimensionales de alta razón de aspecto
- Flujo en equilibrio de viento térmico (thermal wind balance): difícil extraer energía.

En bajas latitudes



MOTIVACION: EL OCEANO

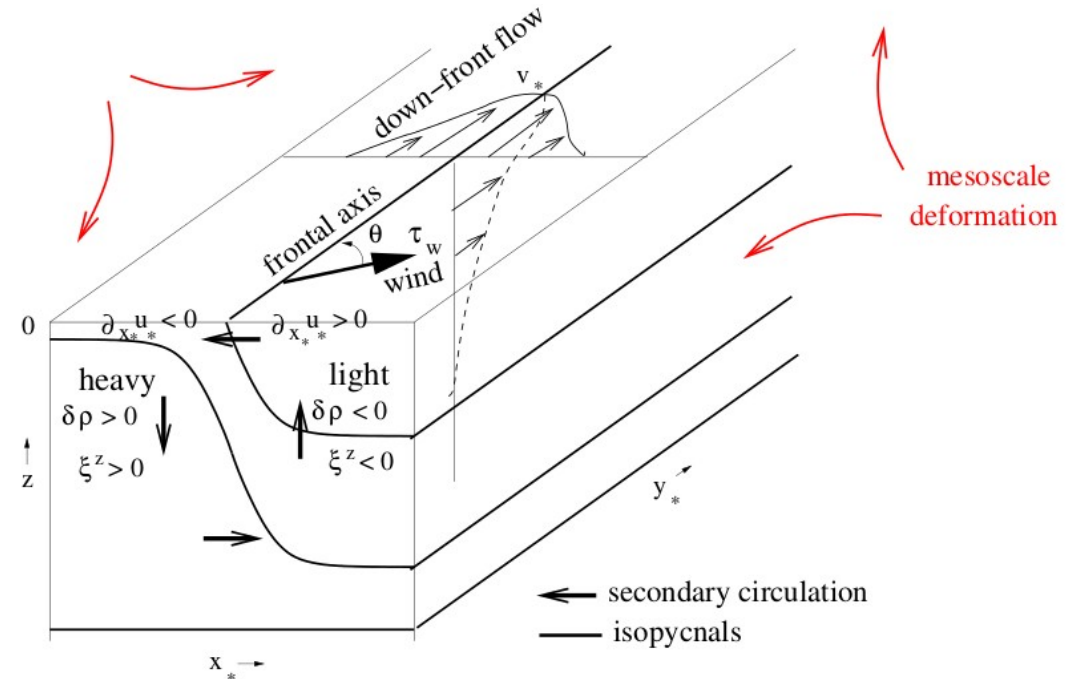
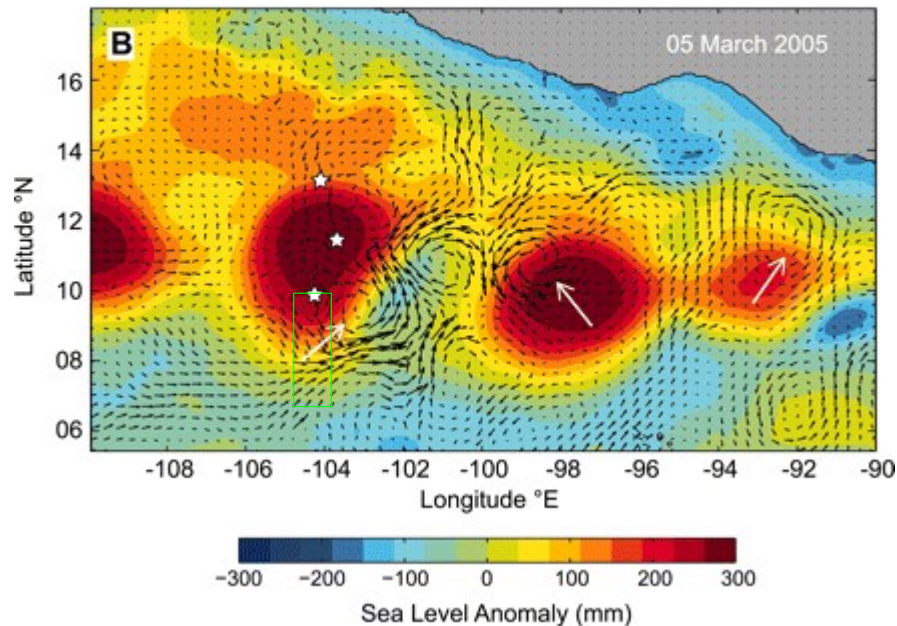
- Mesoescala (O(100) km) en la costa de Chile. [Hormazabal et al, 2013]



MOTIVACION: FRENTES DE MESOESCALA

La dinámica de mesoescala motiva una importante pregunta

- La disipación dentro de las capas límites no logra equilibrar la energía entrante como forzante atmosférico. **¿Qué vías alternativas de disipación existen para equilibrar la energía entrante?**
- En el perímetro de las estructuras de mesoescala se generan frentes que promueven la generación de estructuras de submesoescala las cuales desarrollan cascada directa de energía.



MOTIVACION: SUBMESOESCALA

- Submesoescala: *Regimen de GFD que emerge de procesos advectivos y que tiene un grado de control de la rotación planetaria más débil que la mesoescala y estratificación estable. $Ri \sim Ro \sim 1$*
- Escala espacial $\sim O(10)$ km, escala temporal $\sim O(10e5)$ s
- Aún se está en una etapa temprana del entendimiento de la turbulencia de submesoescala, el cual está restringido por las limitaciones de capacidad computacional y observacional además de ciertas limitaciones mentales, las que poco a poco están siendo sobrepasadas. [McWilliams 2009].
- Las estructuras de submesoescala desarrollan cascada directa de energía y velocidades verticales superiores a las asociadas a la mesoescala por lo cual juegan un rol importante sobre la disipación de energía, el clima y la productividad primaria.

MOTIVACION: SIMULACION DE SISTEMAS FRONTALES DEL OCEANO

John Taylor, Cambridge
Skylingstand and Samelson, Oregon State
Patrick Klein, IFREMER
James Mc Williams, UCLA
Amit tandom, UMASS
Amala Mahadevan, Woods Hole Ocean Institution
Tamay Özgökmen, University of Miami

Estudios existentes en su mayoría heredan el paradigma de la modelación oceanográfica regional o emplean modelos de turbulencia de baja complejidad.

MOTIVACION: SIMULACION DE SISTEMAS FRONTALES DEL OCEANO

x - momentum:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v =$$

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mathcal{A} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mathcal{A} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_E \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

CTE

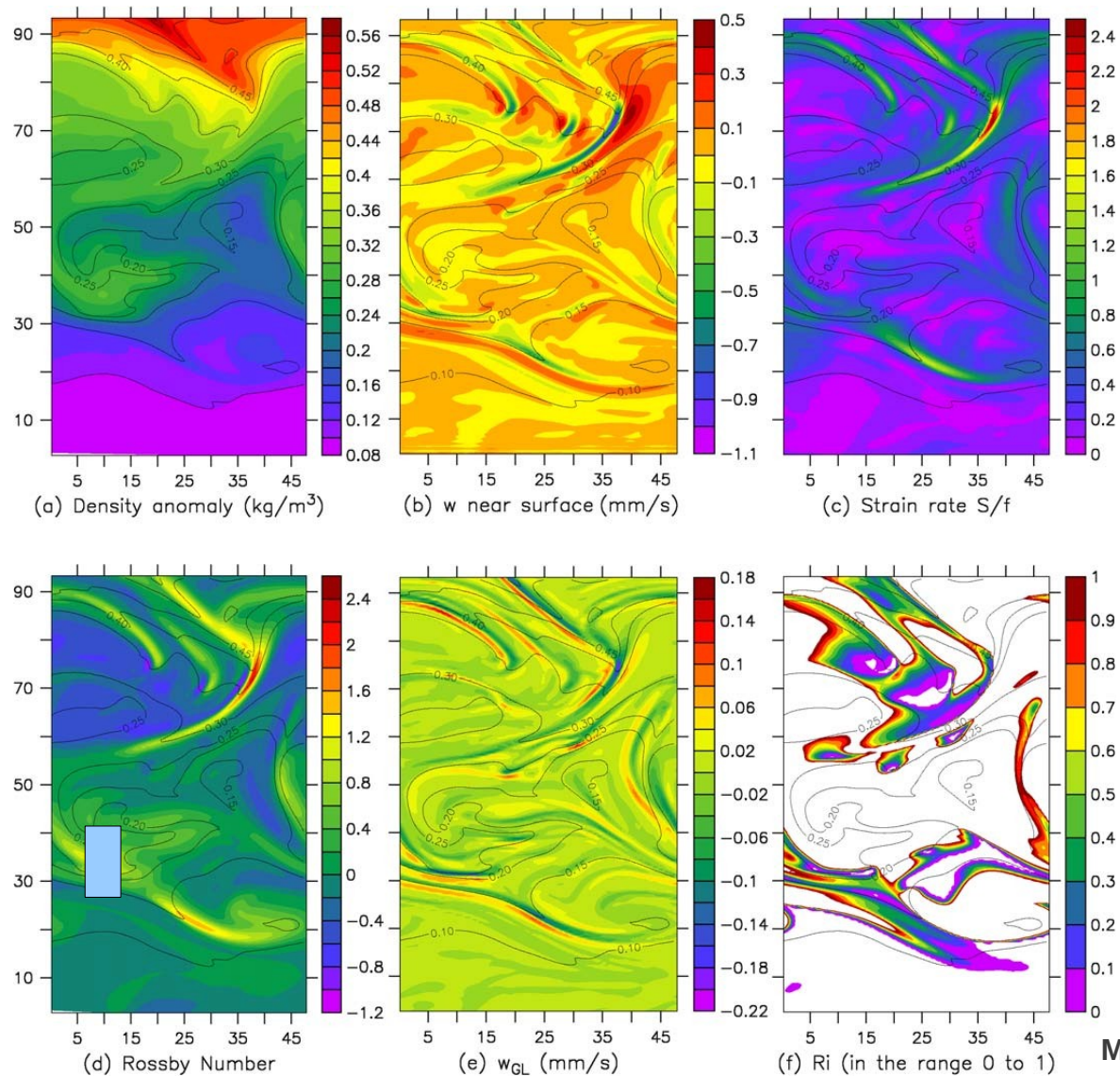
$$\mathcal{A} = \Delta x \Delta y \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2},$$

CTE

Perfil $f(z)$

Modelo de cero, una o dos ecuaciones

MOTIVACION: SIMULACION DE SISTEMAS FRONTALES DEL OCEANO

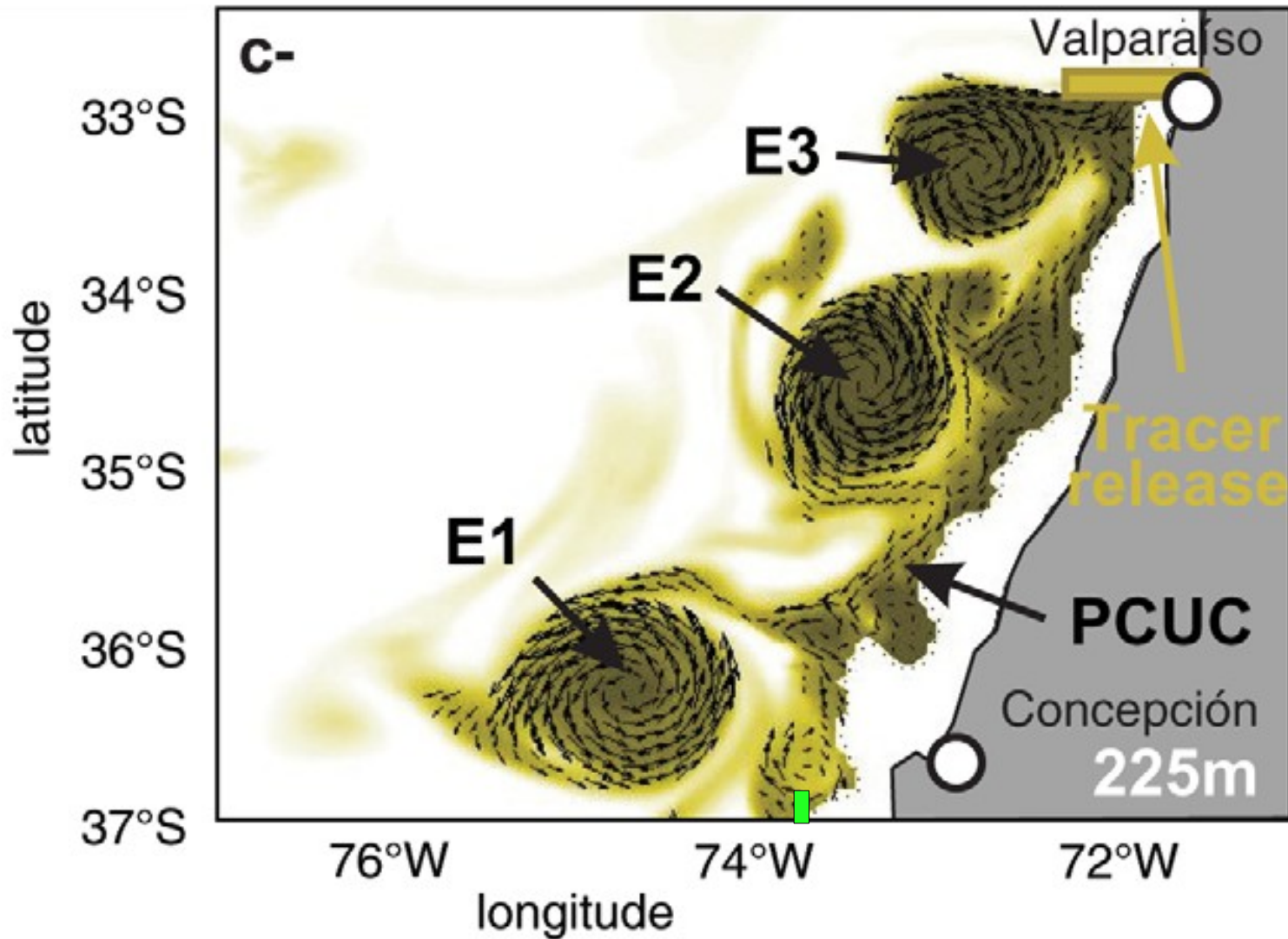


Mahadevan and Tandon 2006

Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

MODELO DEL FRENTE



MODELO DEL FRENTE

- Objetivo: simulación de un frente superficial del océano de pequeña escala (10 km) teniendo lugar en latitud media empleando herramientas de modelación basadas en dinámica de fluidos computacional estado del arte modificadas.
- Estudiar los campos de velocidad vertical y distribución espectral de energía y su comparación con las predicciones teóricas existentes..
- Emplear modelos de viscosidad lineal y modelos basados en los segundos momentos..

MODELOS DE TURBULENCIA: LEVM

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j})$$

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\overline{S}| \quad |\overline{S}| \equiv \sqrt{2 \overline{S}_{ij} \overline{S}_{ij}}. \quad L_s = \min(\kappa d, C_s \Delta) \quad \Delta = V^{1/3}$$

Corrección de longitud de mezcla para grillas no-isotropicas: Scotti et.al 1997

$$\tau_{ij} = -2[\mathcal{L}(\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3)]^2 |\tilde{S}| \tilde{S}_{ij}, \quad f(a_1, a_2) \simeq \cosh \sqrt{\frac{4}{27}[(\log a_1)^2 - \log a_1 \log a_2 + (\log a_2)^2]}.$$

$$\mathcal{L}(\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3) = C_s \Delta_{eq} f(a_1, a_2),$$

(3)

MOTIVACION: REYNOLDS STRESS MODEL

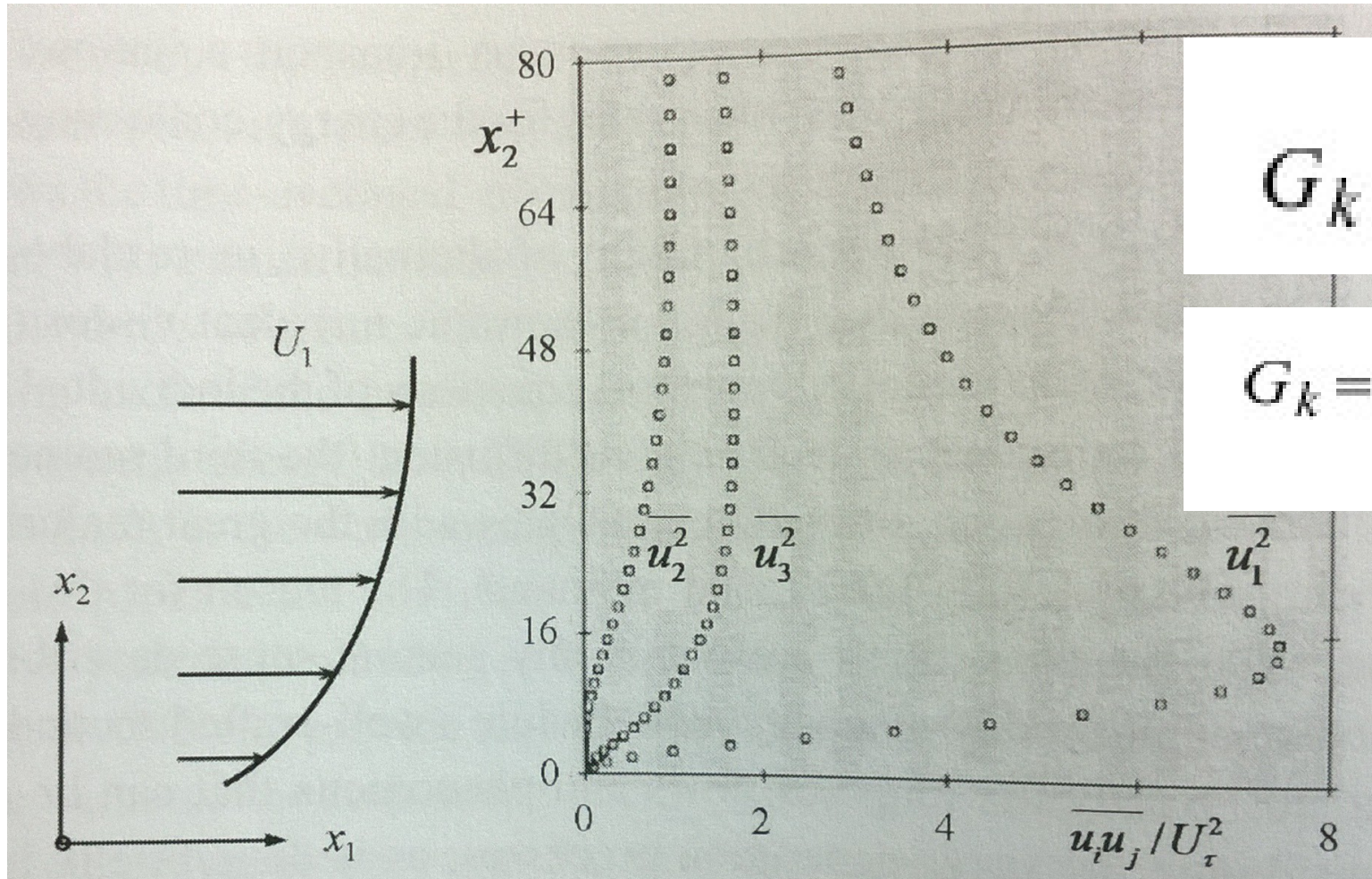
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j})$$

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j})}_{\text{Local Time Derivative}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j})}_{C_{ij} \equiv \text{Convection}} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + p (\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j) \right]}_{D_{T,ij} \equiv \text{Turbulent Diffusion}}$$

$$+ \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right]}_{D_{L,ij} \equiv \text{Molecular Diffusion}} - \underbrace{\rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)}_{P_{ij} \equiv \text{Stress Production}} - \underbrace{\rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta})}_{G_{ij} \equiv \text{Buoyancy Production}}$$

$$+ \underbrace{p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)}_{\phi_{ij} \equiv \text{Pressure Strain}} - \underbrace{2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}}_{\epsilon_{ij} \equiv \text{Dissipation}}$$

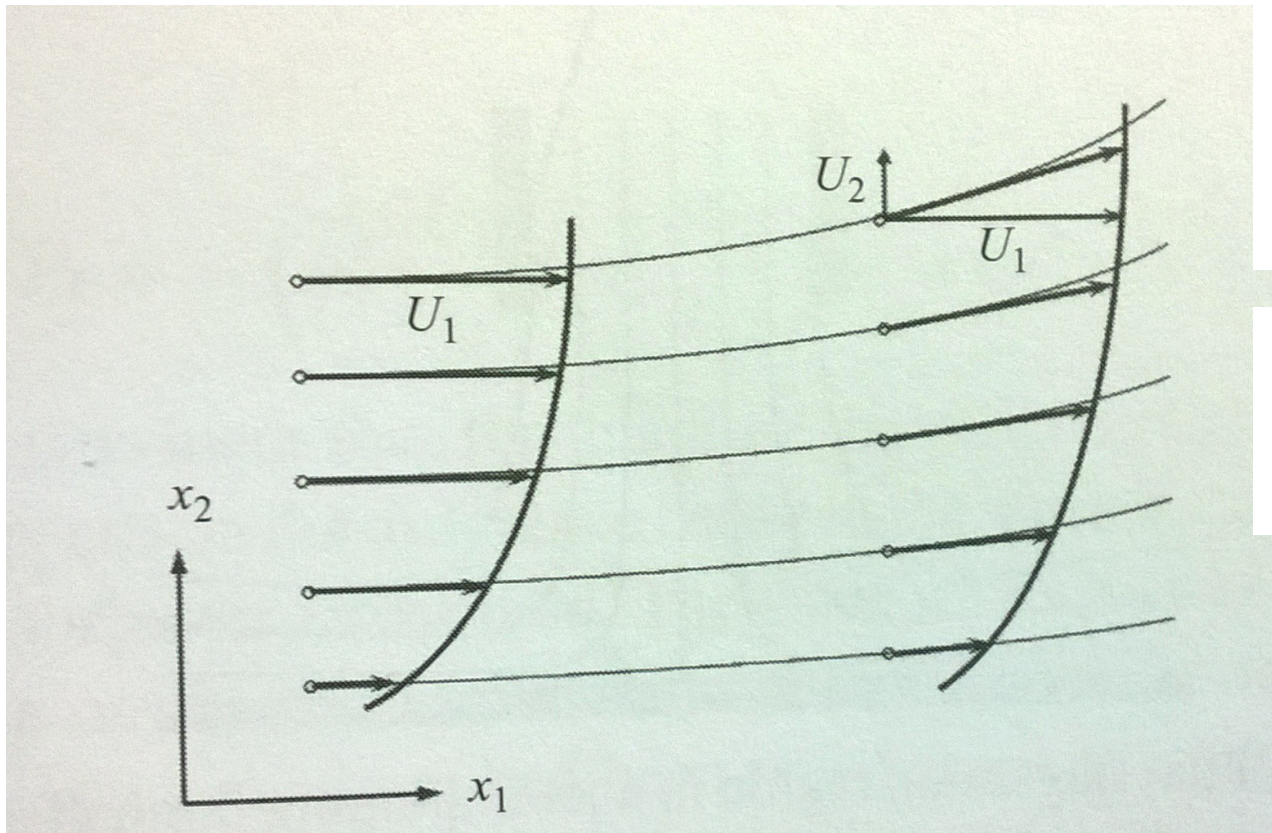
MOTIVACION: TURBULENCIA NO ISOTROPICA



$$G_k = \mu_t S^2$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

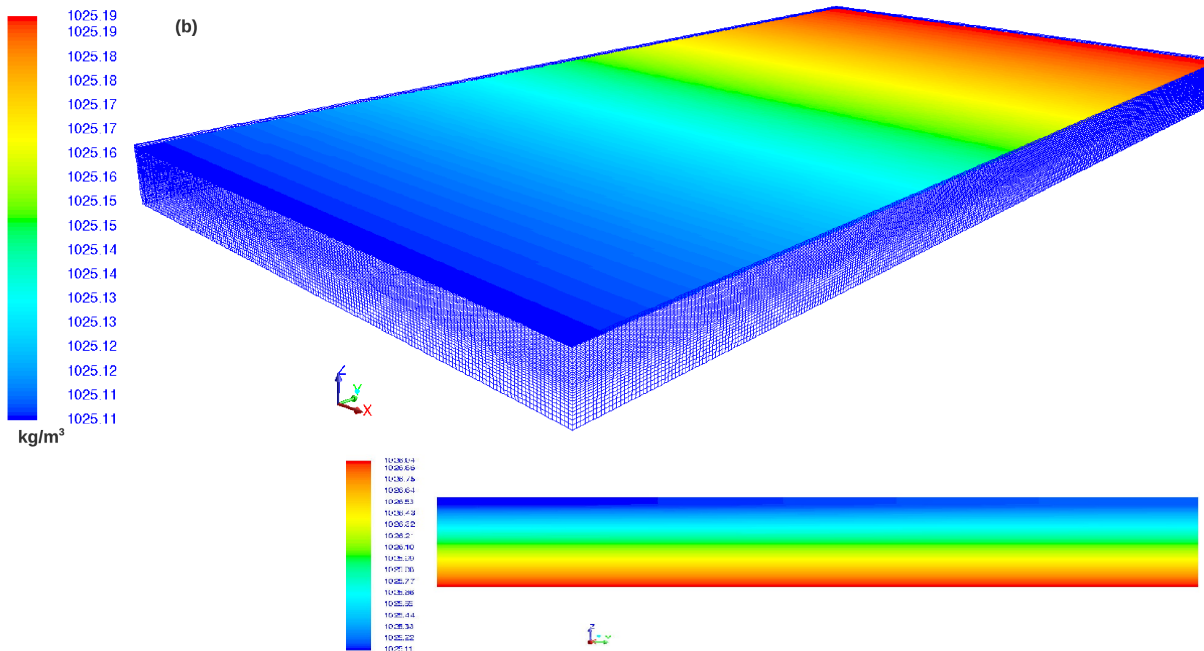
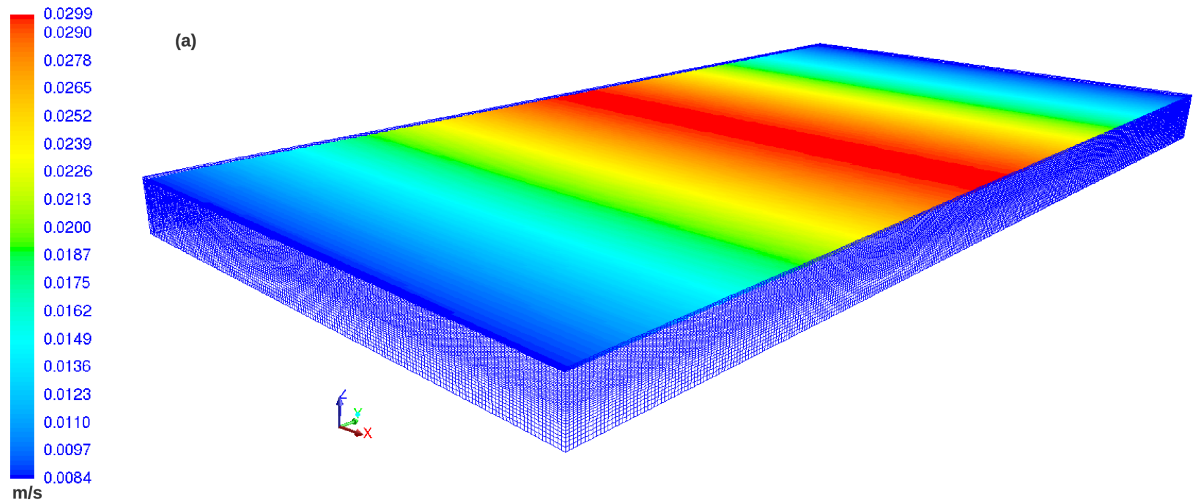
MOTIVACION: TURBULENCIA NO ISOTROPICA



$$G_k = \mu_t S^2$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

DESCRIPCIÓN DEL MODELO



Dimensiones: 10 km x 5km x 500 m

Grilla: 30 m dx=dy

10 m dz en los primeros

100 metros de profundidad

Frente de intensidad $1e-5$ kg/m³ /m se extiende hasta 50 m de profundidad.

$f = 1e-4$ asociado con latitud media.

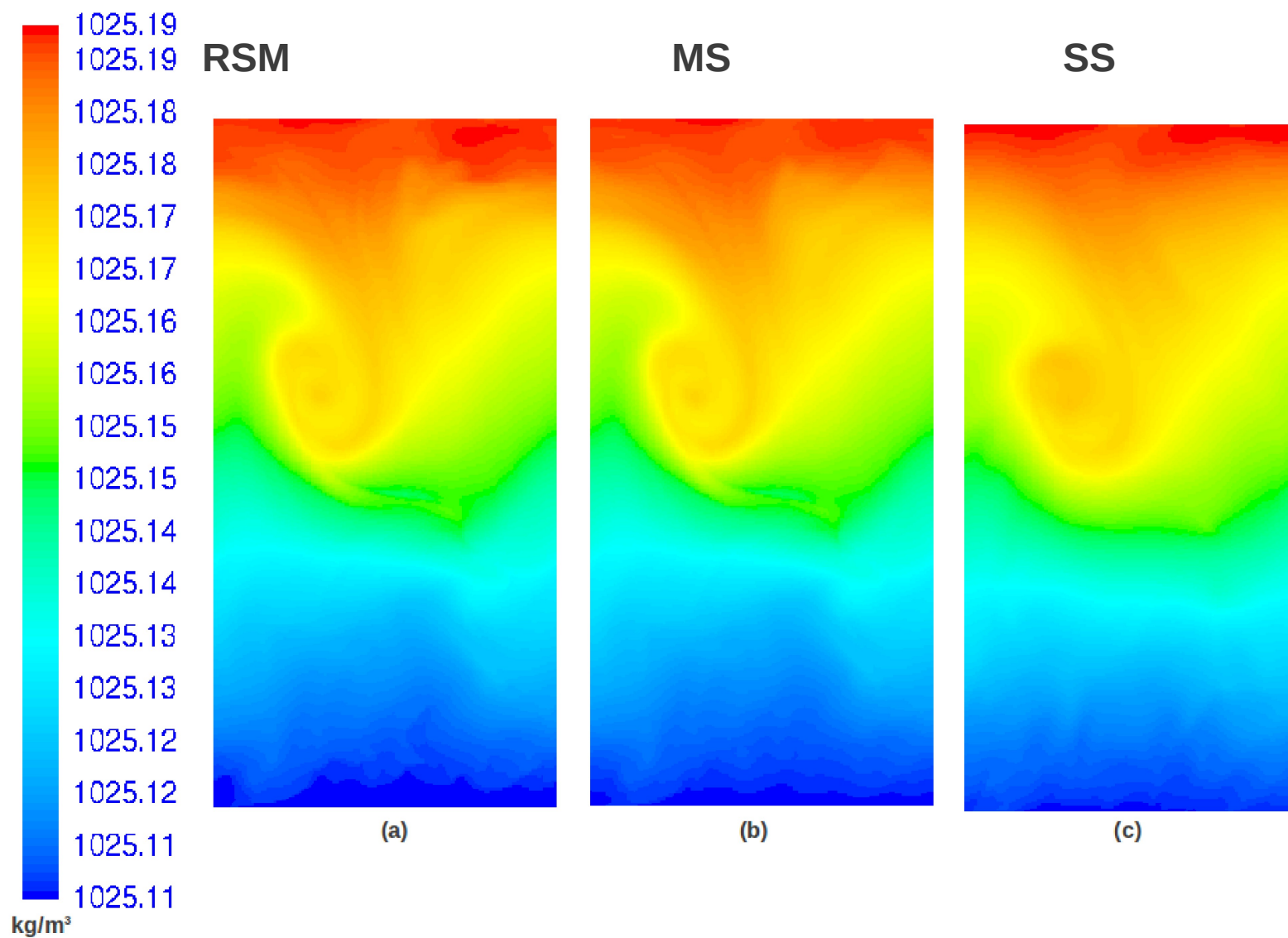
El modelo es implementado en un código multipropósito introduciendo modificaciones para incorporar los efectos de la rotación planetaria y la estratificación de la columna de agua.

El modelo de Smagorinsky también fue modificado para incluir la corrección para grillas no-isotrópicas.

Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

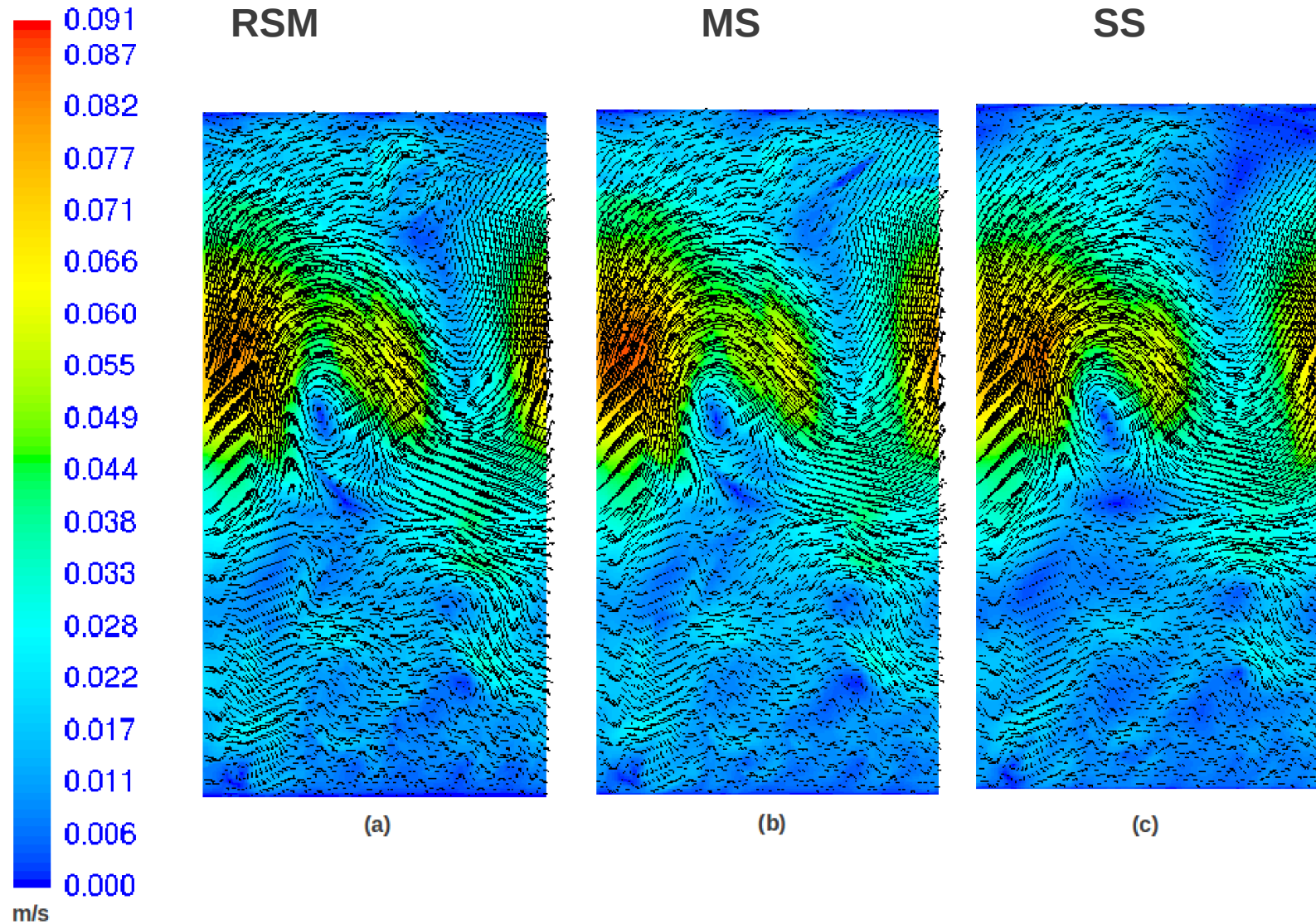
RESULTADOS



Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

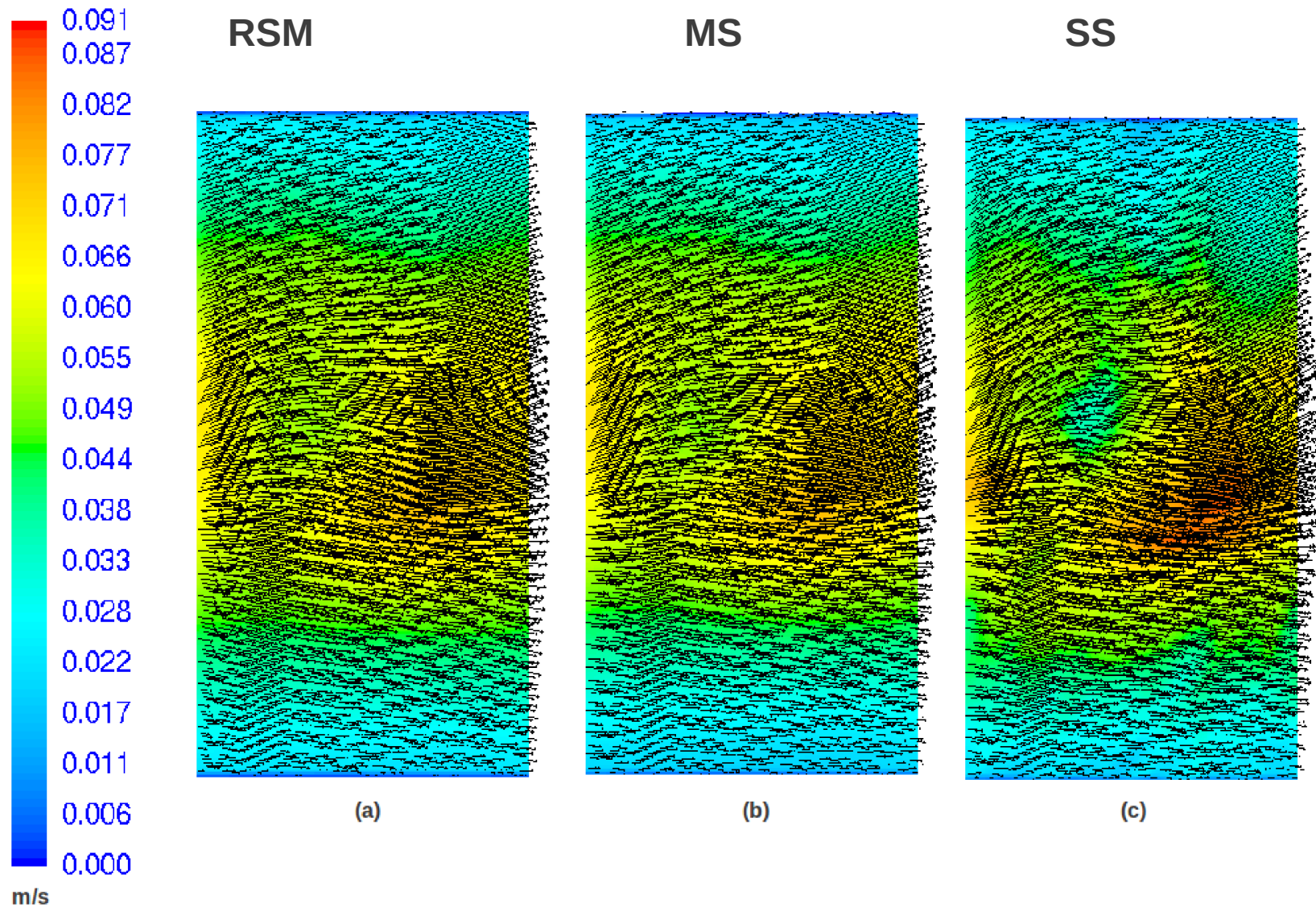
RESULTADOS



Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

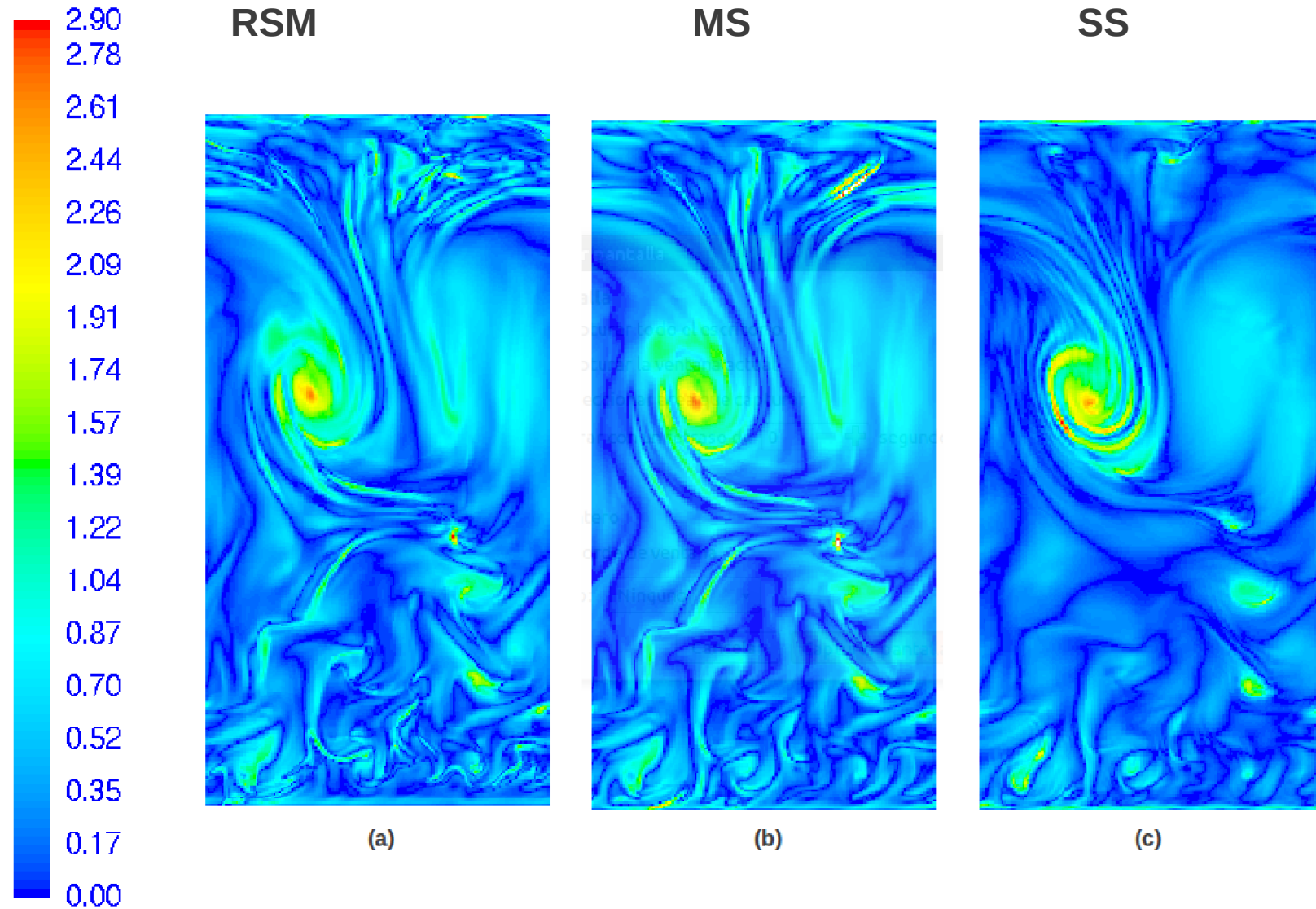
RESULTADOS



Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

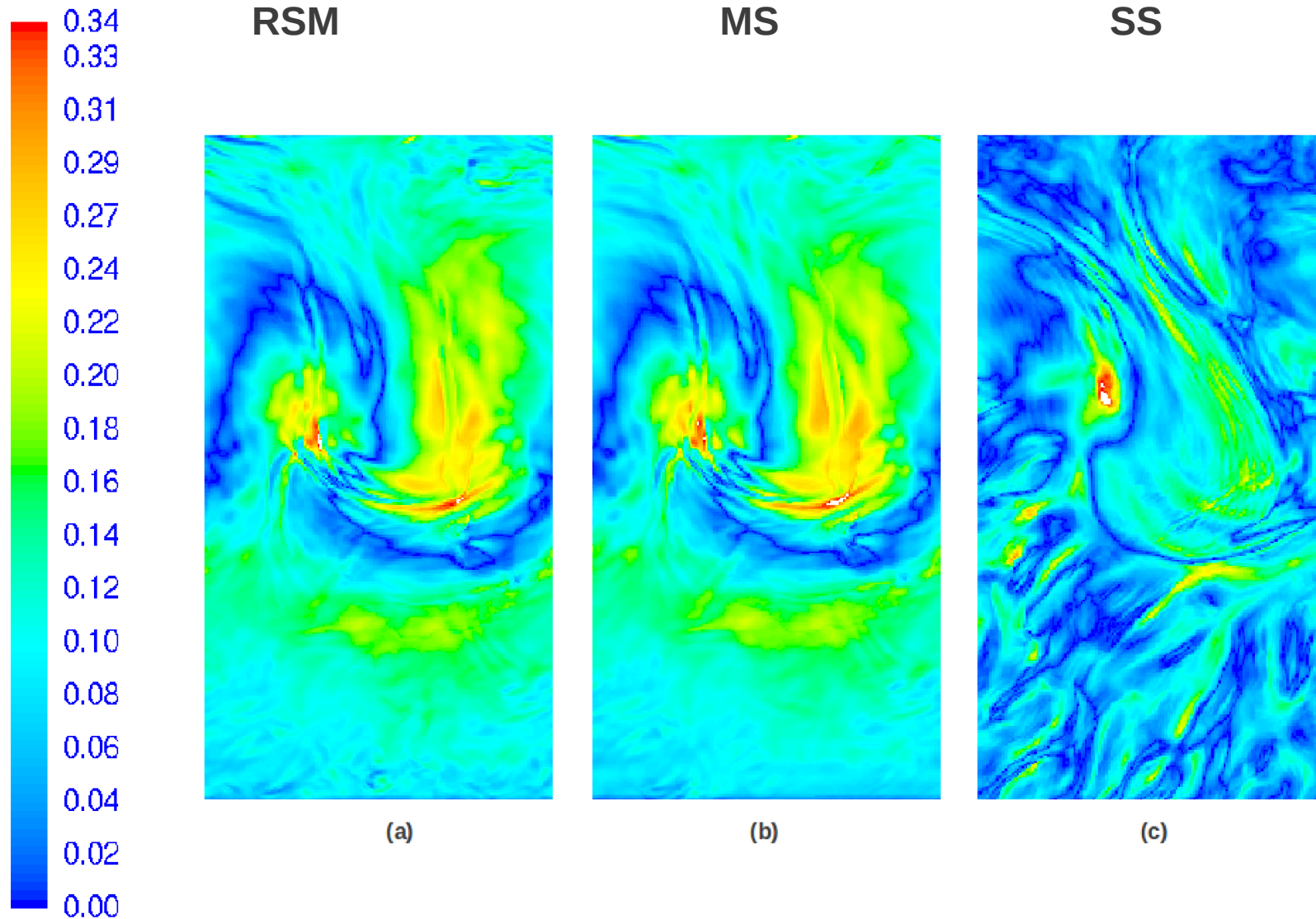
RESULTADOS



Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

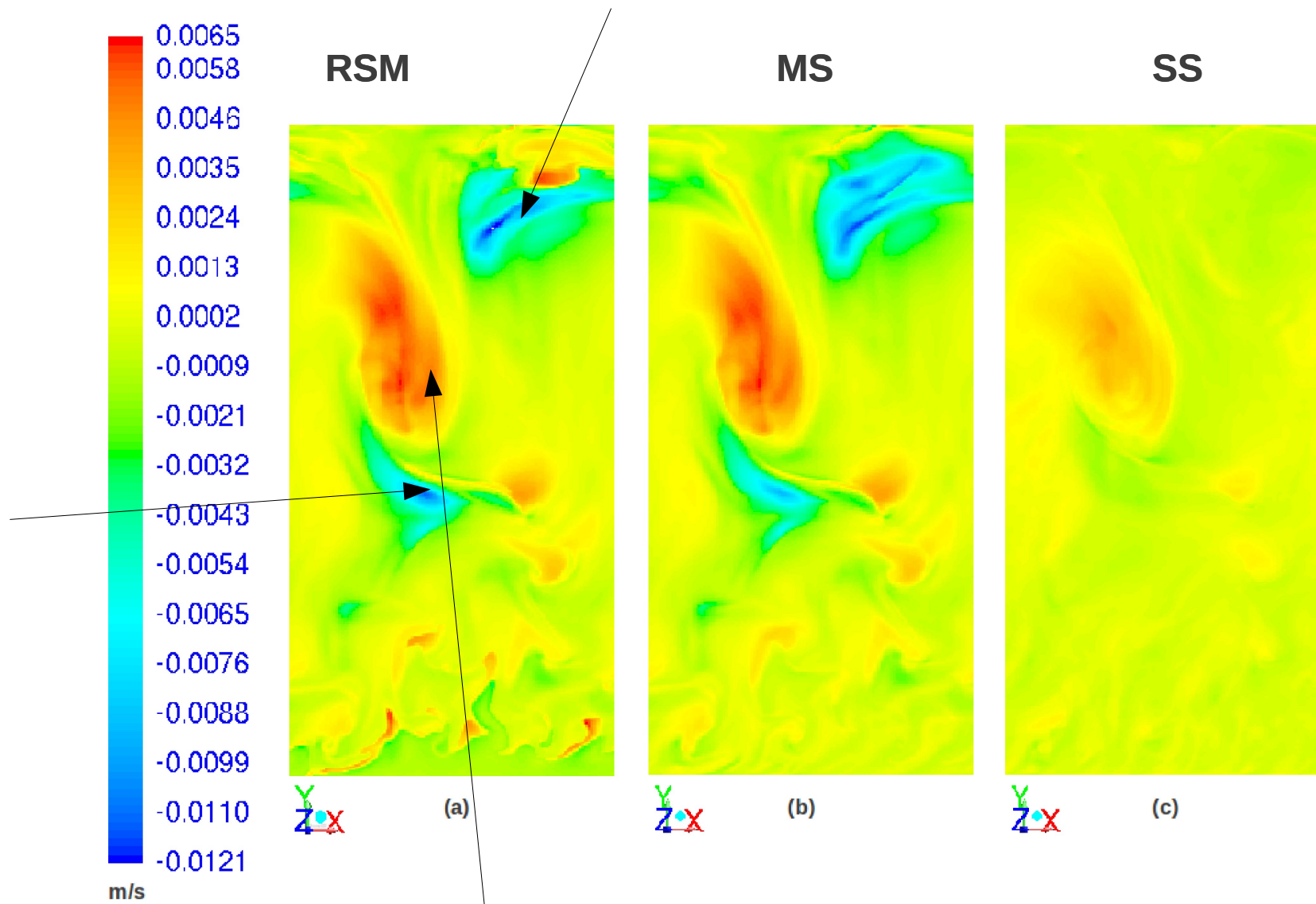
RESULTADOS



Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

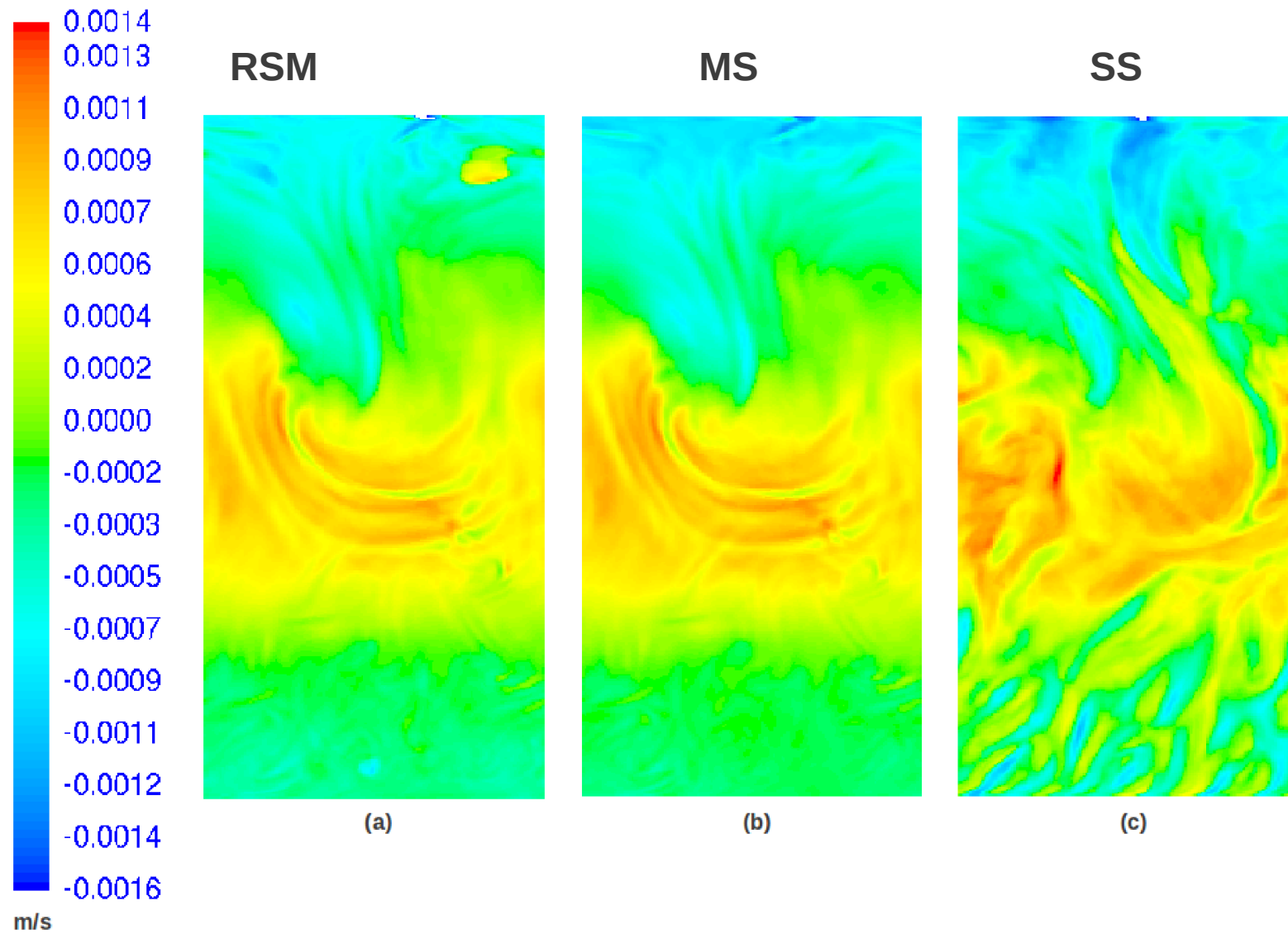
RESULTADOS



Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

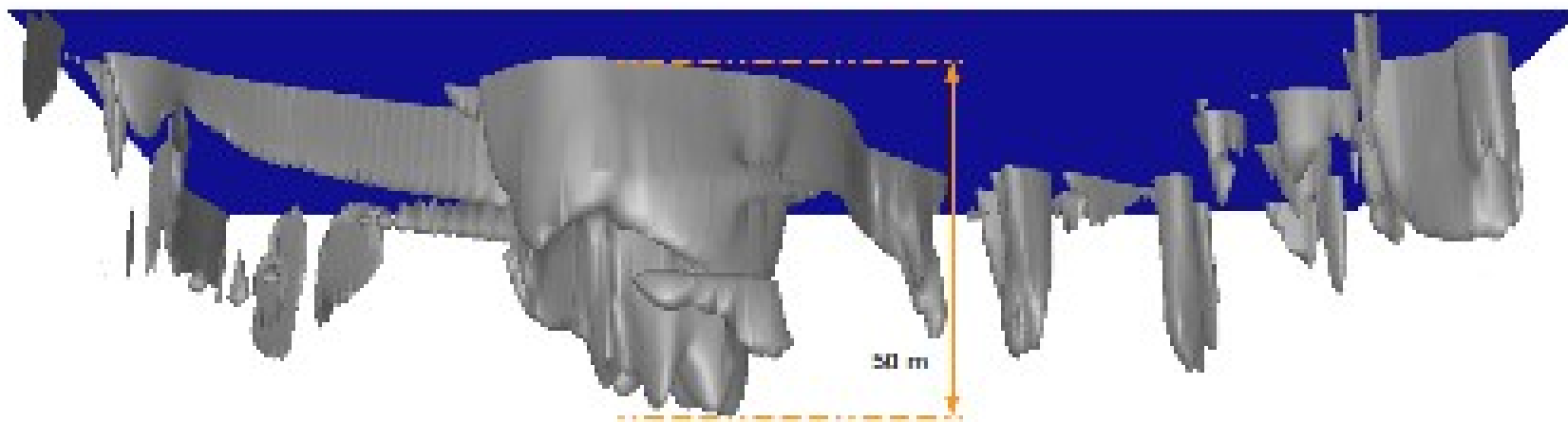
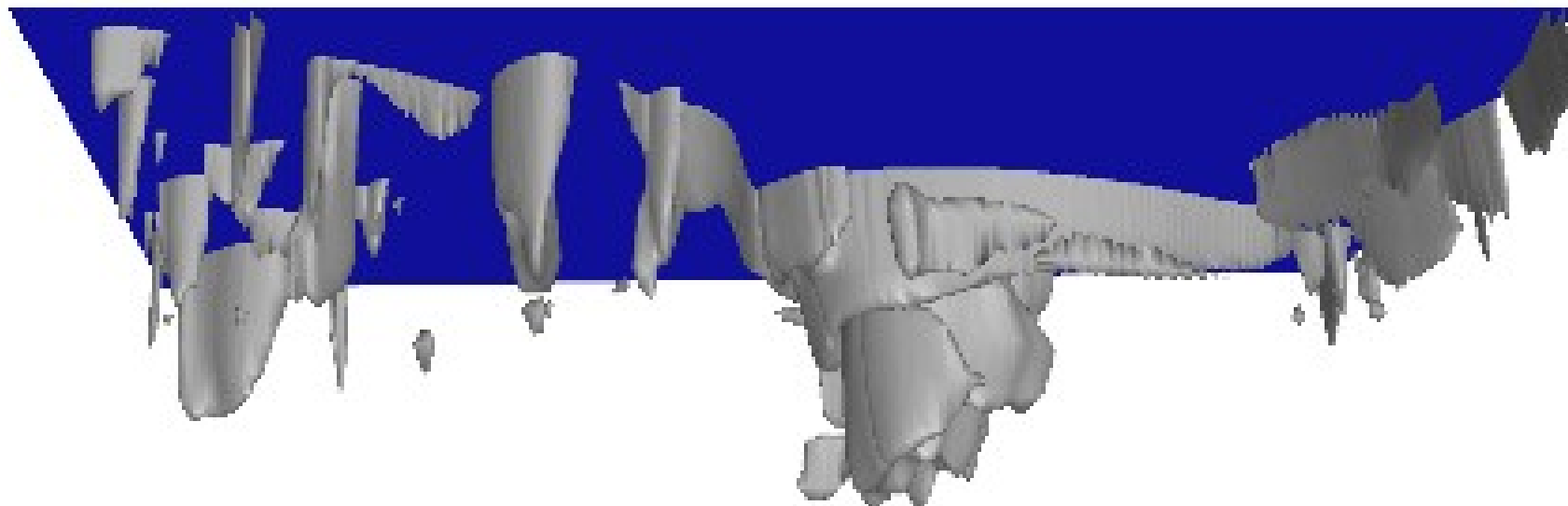
RESULTADOS



Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

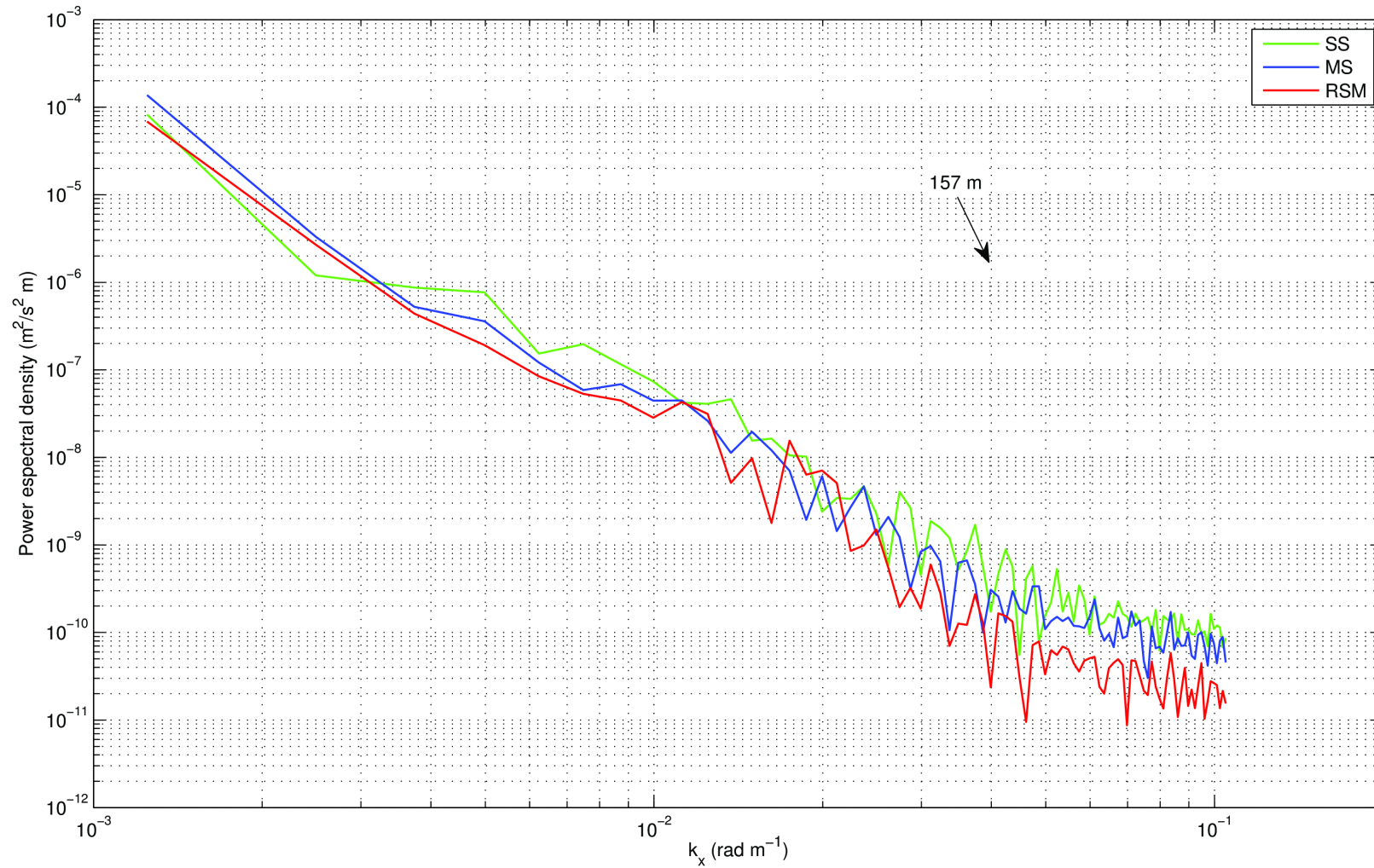
RESULTADOS



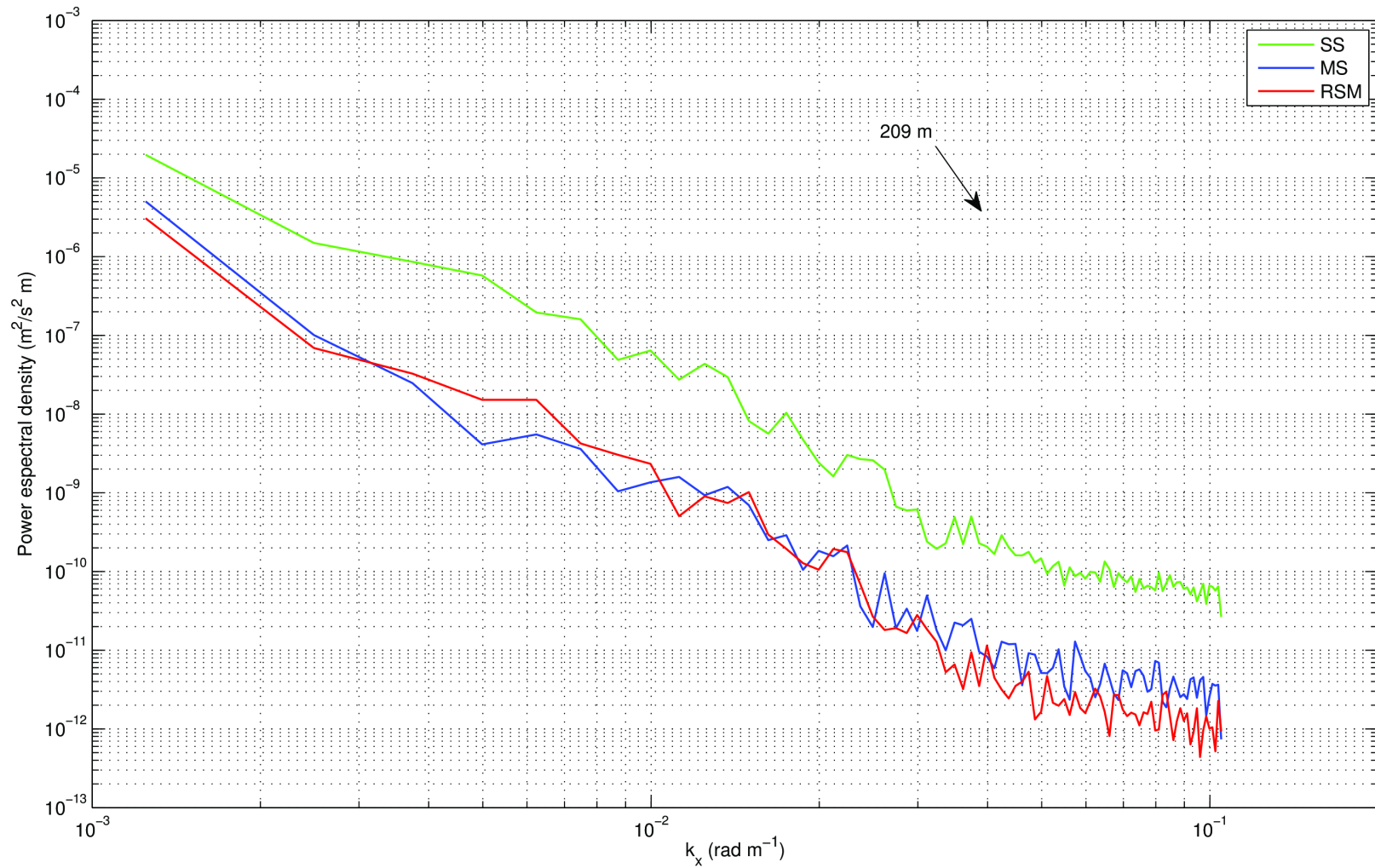
Santiago, July 8th, 2014

Turbulence in upper ocean fronts

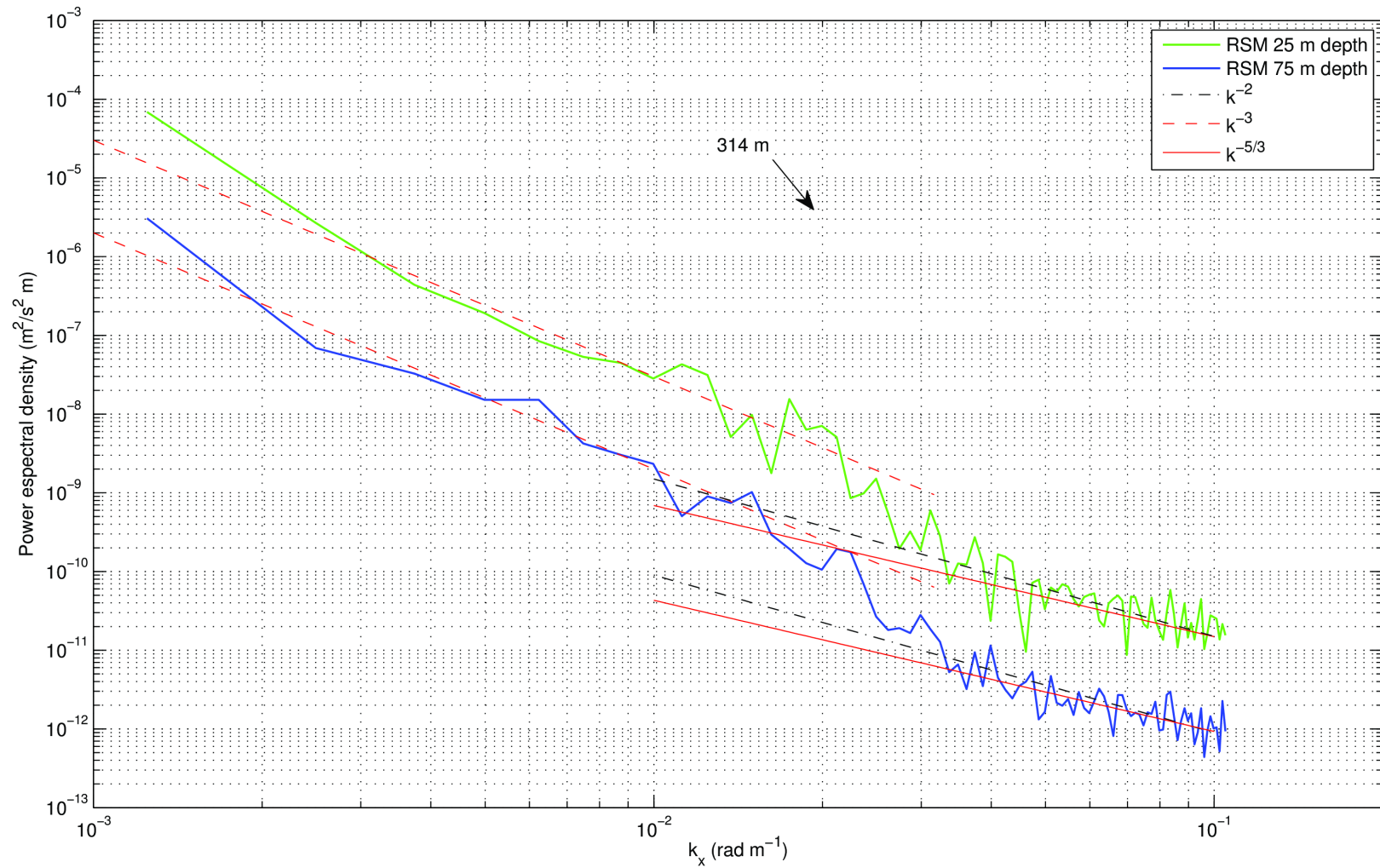
RESULTADOS



RESULTADOS



RESULTADOS



CONCLUSIONES

- Se implementaron las modificaciones necesarias para describir la dinámica de fluidos geofísicos en un ambiente de modelación mediante dinámica de fluidos computacional estado del arte.
- Se simuló un frente superficial de océano de pequeña escala teniendo lugar en latitud media.
- Se encontró un flujo de corte de altamente inestable confinado dentro de la capa de mezcla.
- Dentro de la capa de mezcla fueron encontradas características turbulentas de pequeña escala con velocidades verticales hasta dos órdenes de magnitud superiores que las reportadas en la literatura. Fuera de dichas estructuras y bajo la capa de mezcla la velocidad vertical escala con los trabajos existentes $O(1e-4)$ m/s.

CONCLUSIONES

- La corrección implementada al modelo de Smagorinsky para grillas no-isotrópicas permite mejora las predicciones del modelo standard. Esta mejora es más significativa bajo la capa de mezcla en ausencia de altas curvaturas de flujo.
- Dentro de la capa de mezcla, debido a la alta curvatura de flujo, la diferencia entre las predicciones de los modelos RSM y MS aún persisten especialmente para las pequeñas escalas.

TRABAJO EN PROGRESO

- Empleo del modelo periódico implementado para estimar la doble cascada de energía que tiene lugar en los sistemas frontales.
- Estudio de los factores que incentivan las cascadas directa e inversa.