



**Universidad
de Valparaíso**
CHILE

PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL OCEÁNICO



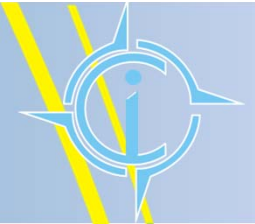
INGENIERÍA CIVIL
OCEÁNICA

EVALUACIÓN DE UN MODELO ANALÍTICO BIDIMENSIONAL DE CORRIENTES DE MAREA SEMIDIURNA PARA ESTIMAR POTENCIA DE ENERGÍA

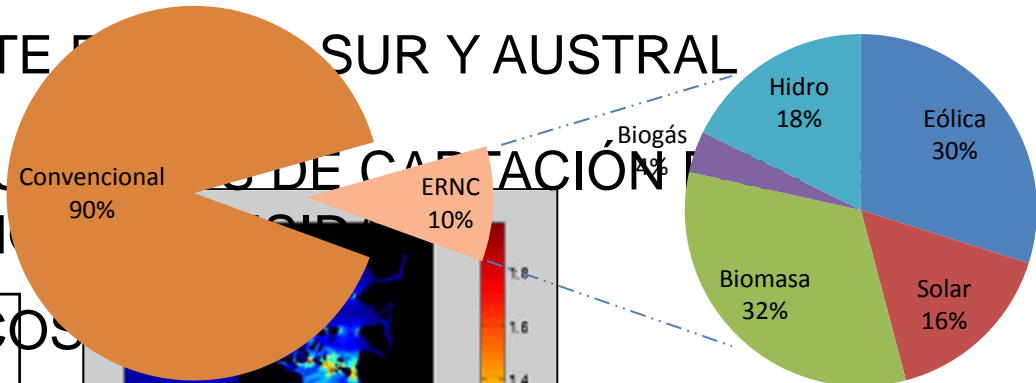
JOSÉ IGNACIO RIBBA ESTEVA

7 DE SEPTIEMBRE 2015

INTRODUCCIÓN

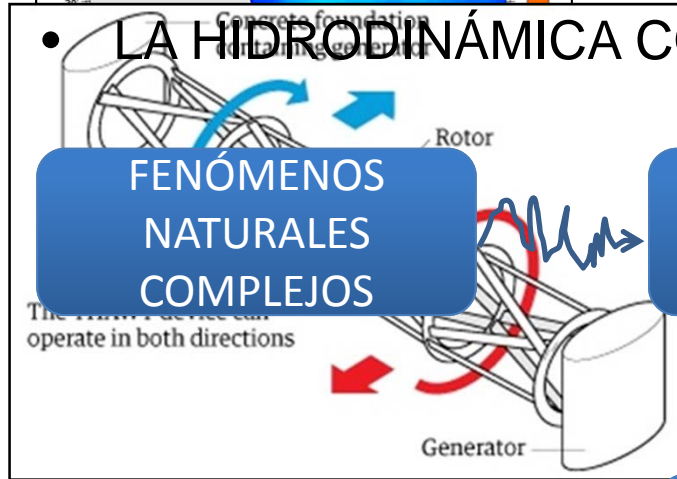


- ENERGÍAS LIMPIAS Y SU IMPORTANCIA PARA EL PAÍS
- RECURSO ABUNDANTE EN EL SUR Y AUSTRAL
- APARICIÓN DE INSTRUMENTOS DE CAPTACIÓN EN CORRIENTES DE MAREA



EN

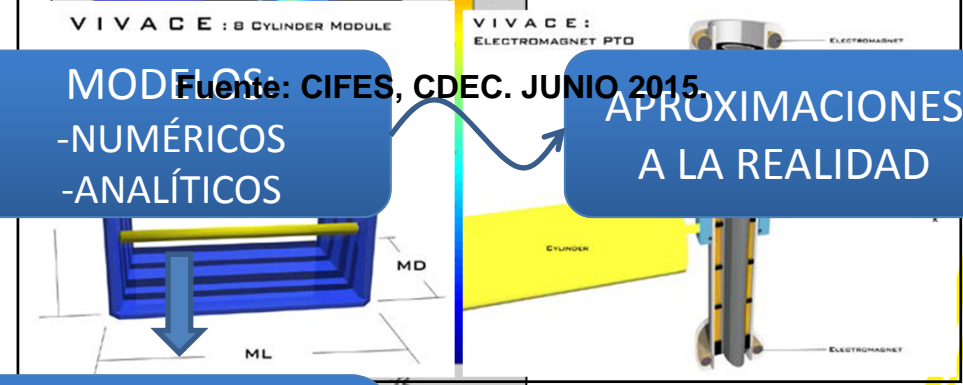
- LA HIDRODINÁMICA COSTERA



FENÓMENOS NATURALES COMPLEJOS

MODELOS -NUMÉRICOS -ANALÍTICOS

APROXIMACIONES A LA REALIDAD



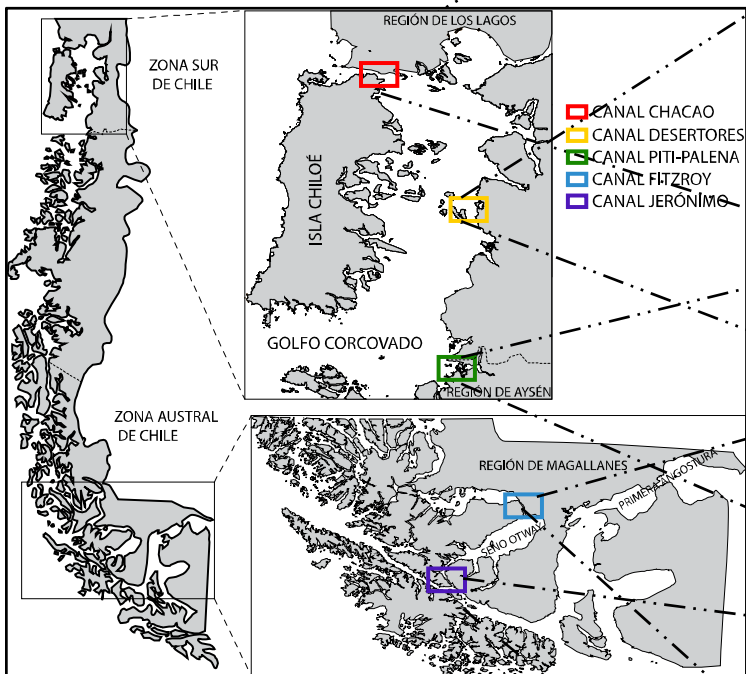
Fuente: Kepler Energy, 2014

MODELO ANALÍTICO HA SIDO APLICADO EN ESTUARIOS COSTEROS DE POCA PROFUNDAD

Fuente: CIFES, CDEC. JUNIO 2015.

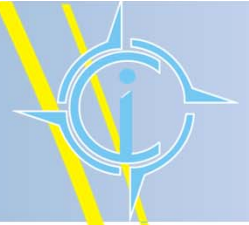
INTRODUCCIÓN

SITIOS DE ESTUDIO



	Corrientes (m/s)	Prof. Media Secc. (m)
C. Chacao	3	~73
C. Desertores	1.5	~138
C. Pitipalena	0.8	~28
C. Fitzroy	1	~21
C. Jerónimo	2.5	~96

OBJETIVOS



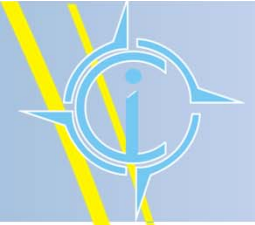
– OBJETIVO GENERAL

- Evaluar un modelo analítico de corrientes de marea que resuelve las velocidades de las corrientes en secciones transversales, para determinar la potencia energética disponible en canales del sur de Chile.

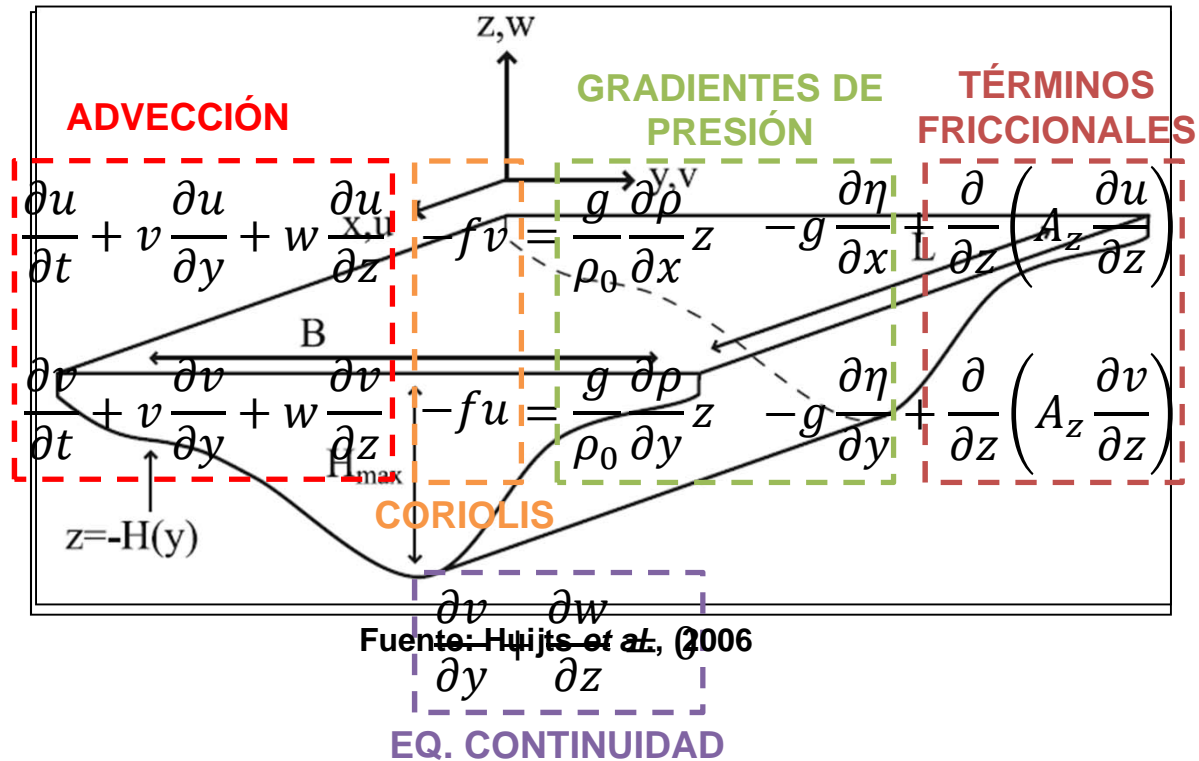
– OBJETIVOS ESPECÍFICOS

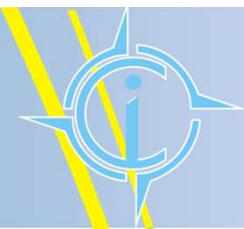
- Procesar datos de ADCP móvil disponibles en los sitios de estudio.
- Correr el modelo analítico en cuatro secciones transversales de los canales en estudio que poseen datos de ADCP móvil a lo ancho del canal.
- Efectuar correlaciones entre los datos observados y los modelados.
- Aplicar y evaluar el modelo en un canal con datos de ADCP móvil a lo largo del canal (C. Pitipalena).
- Estimar la potencia de energía en las secciones transversales.

MODELO ANALÍTICO



PL-SWE Estuarios con condiciones uniformes (Schramkowski & De Swart, 2002).





MODELO ANALÍTICO

ESCALA SUPERIOR DE MOVIMIENTOS DE ESFUERZO

$$A_z \frac{\partial u}{\partial z} = A_z \frac{\partial v}{\partial z} = 0,$$

$$\left[\begin{matrix} ig \frac{\partial \hat{\eta}_0}{\omega \partial x} \\ \cosh(\alpha z) \\ \cosh(\alpha H) \end{matrix} \right],$$

$$\tilde{\Psi} = \tilde{\Psi}_0 + \varepsilon \tilde{\Psi}_1$$

$$\alpha = \sqrt{i\omega/A_z}$$

- FONDO: NO HAY DESLIZAMIENTO E IMPERMEABILIDAD

$$u = v = w = 0$$

$$\left[\begin{matrix} \text{ACELERACIONES} \\ \text{LOCALES} \\ \frac{\partial \eta_0}{\partial x} = \frac{1}{U \omega A} \{ \alpha H - \tanh(\alpha H) \} dy \end{matrix} \right]^{-1}$$

- BORDES: NO EXISTE TRANSPORTE LATERAL DE AGUA

Balances longitudinal:
 $\int_0^{-H} v dz = 0$ para todo y

$$\frac{\partial u_0}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta_0}{\partial x} + A_z \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2}$$

Balances SISTEMA PARCIALMENTE MEZCLADO o BIEN MEZCLADO

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial y} \sim 0$$

CORIOLIS GRADIENTES PRESIÓN

- AMP. DE CORRIENTE

(a) Model prediction of tidal amplitude

(b) Observations of tidal amplitude

$$\frac{1}{A} \int_0^B \int_{-H}^0 u dz dy = U \cos(\omega t)$$

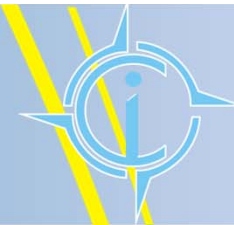
Velocidad media a lo largo del canal en una sección transversal específica.

Huijts et al. 2006

EQ. CONTINUIDAD

ANTECEDENTES PARA EL MODELO

C. DESERTORES

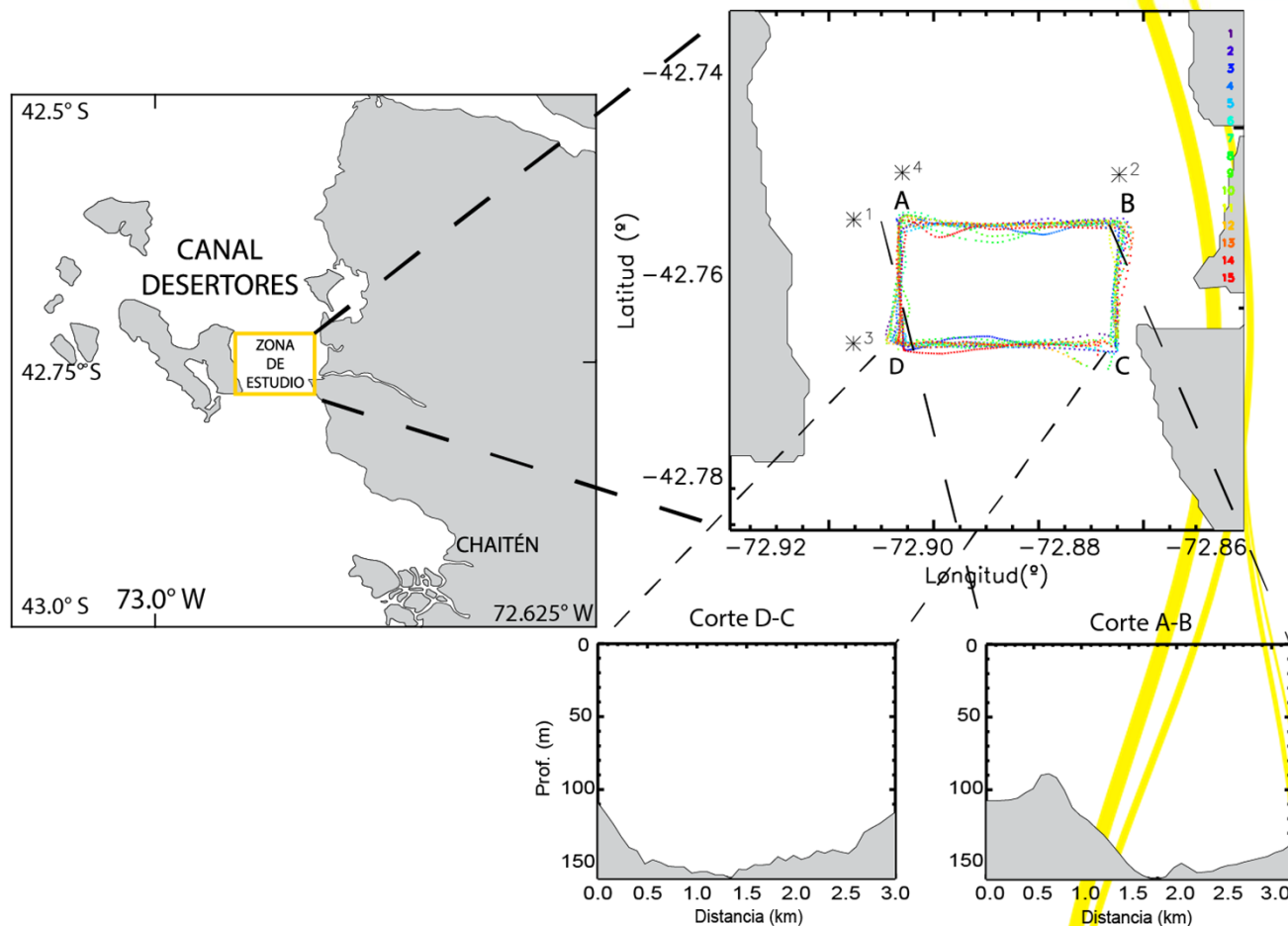


■ DATOS DE ADCP

- 15 Repeticiones por 24 horas.
- Transectos 1 y 3 con orientación E-W.
- Se analizó M_2 .

2004
abril

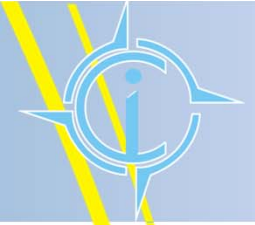
lu	ma	mi	ju	vi	sa	do
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30		
5:○ 11:● 19:● 27:●						



Datos proporcionados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, obtenidos durante una campaña de corrientes institucional en 2001 para satisfacer demanda de la carta náutica.

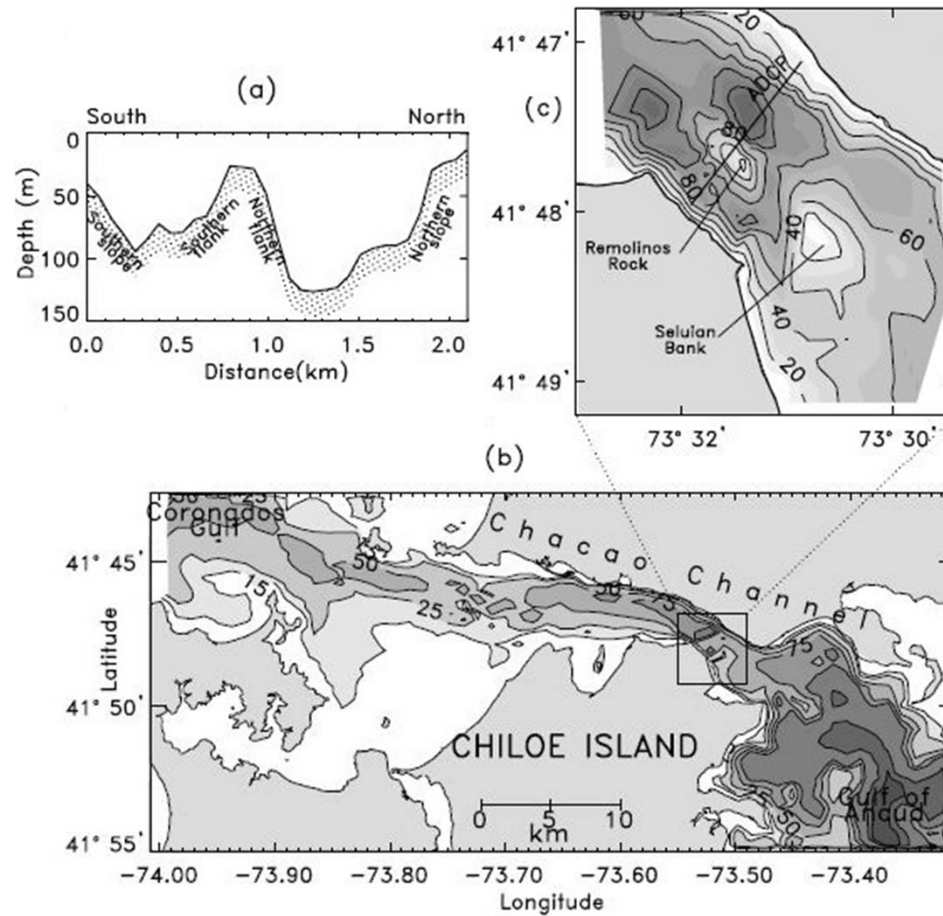
ANTECEDENTES PARA EL MODELO

C. CHACAO



■ DATOS DE ADCP

- 25 Repeticiones por 12.5 horas.
- Transecto N-S en sector de Roca Remolinos.
- Se analizó M_2 .



1998

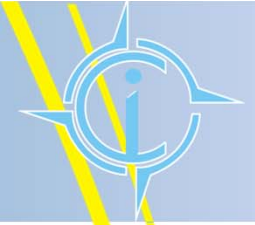
octubre

lu	ma	mi	ju	vi	sa	do
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	
5:○ 12:◐ 20:● 28:◑						

Datos proporcionados por el profesor Mario Cáceres, obtenidos para el estudio realizado por Cáceres *et al.*, 2003, en C. Chacao.

ANTECEDENTES PARA EL MODELO

C. JERÓNIMO



■ DATOS DE ADCP

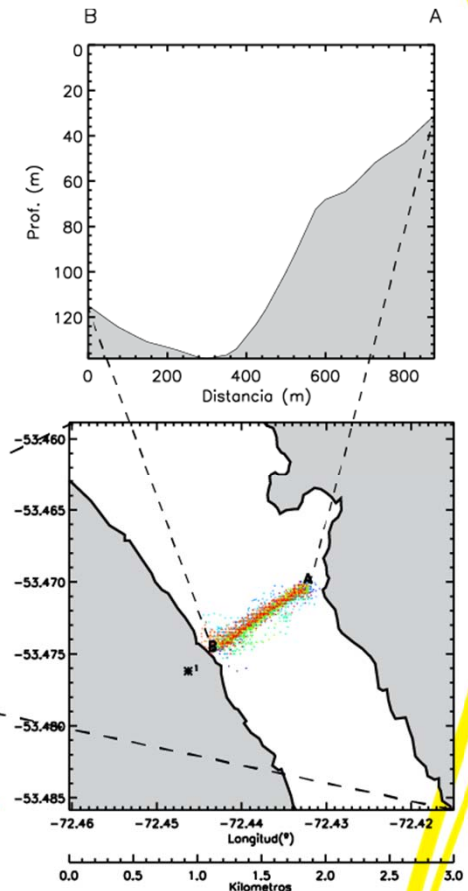
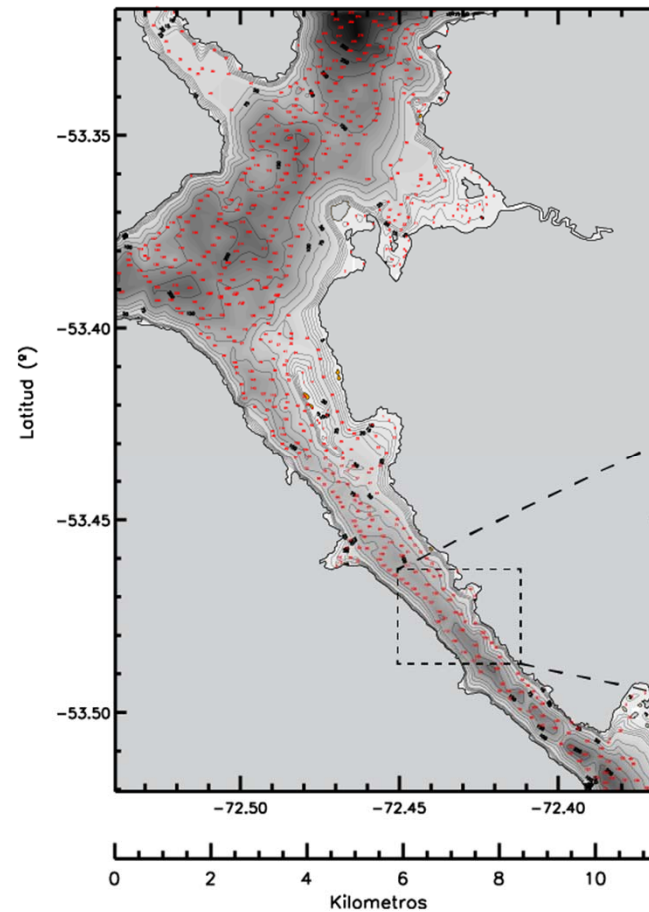
- 206 Repeticiones por 24 horas.
- Transecto sentido transversal en angostamiento.
- Se analizó M_2 .

2006

noviembre

lu	ma	mi	ju	vi	sa	do
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

5:○ 12:◐ 20:● 28:◑



Datos proporcionados por el SHOA en el marco de un acuerdo de cooperación para estudios de energía por corrientes de marea.

ANTECEDENTES PARA EL MODELO

C. FITZROY



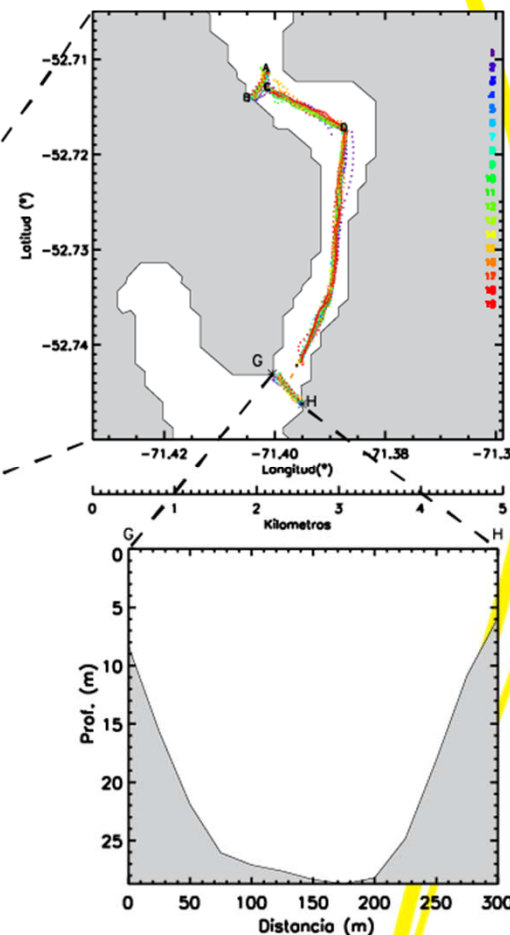
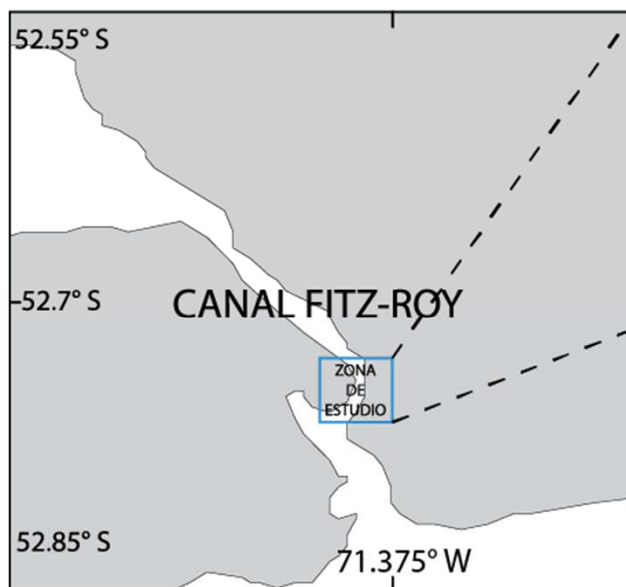
■ DATOS DE ADCP

- 19 Repeticiones por 24 horas.
- Transecto sentido transversal en angostamiento.
- Se analizó M_2 y K_1 .

2012

febrero

lu	ma	mi	ju	vi	sa	do
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29				
7:○ 14:● 21:● 29:○						



Datos proporcionados por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) en el marco de un acuerdo de cooperación.

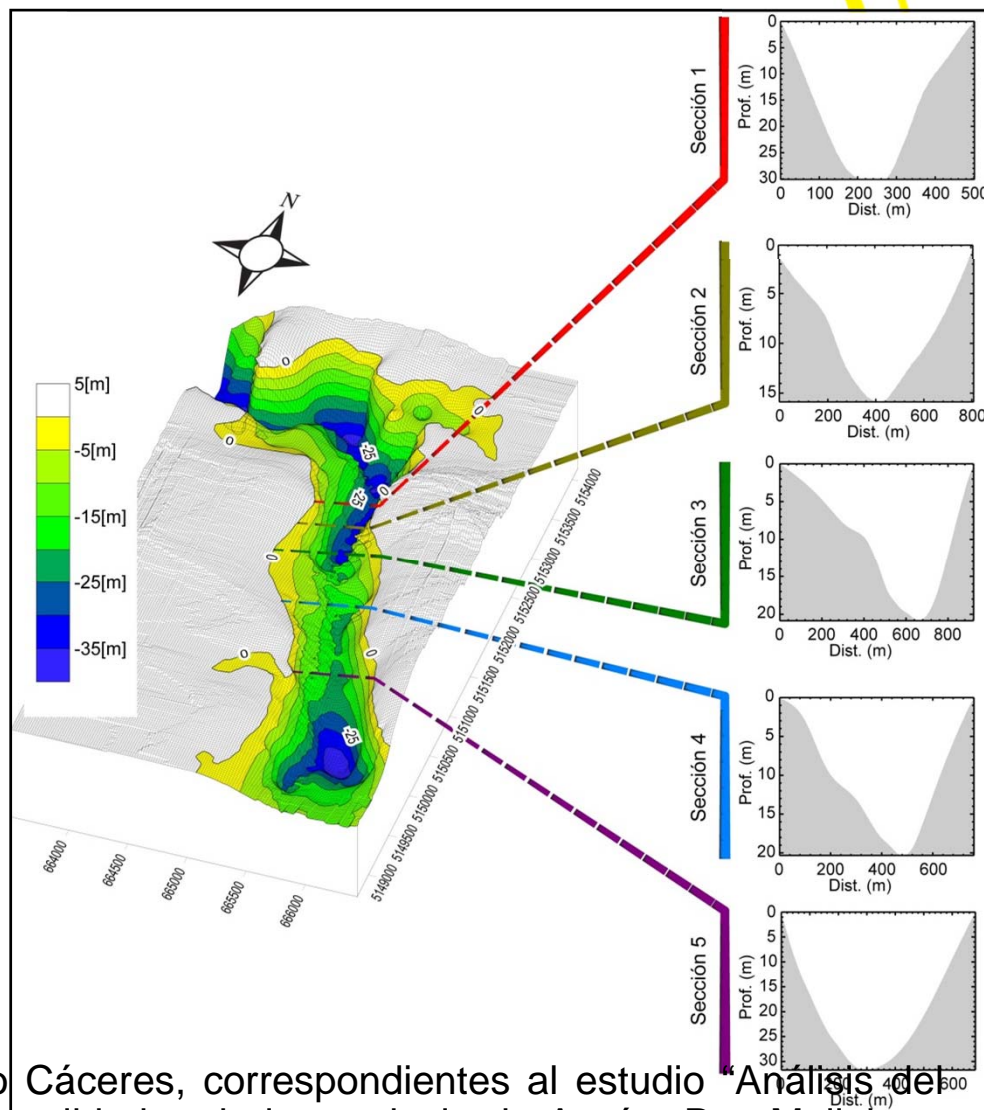
ANTECEDENTES PARA EL MODELO

C. PITIPALENA



■ DATOS DE ADCP

- 11 Repeticiones por 24.5 horas.
- Transecto longitudinal 1-2.
- Se analizó M_2 .

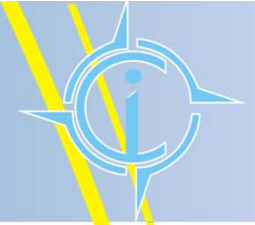


- Carta N° 7470, Bahía Tictoc a Rada Palena, escala: 1:50.000

Datos proporcionados por el profesor Mario Cáceres, correspondientes al estudio "Análisis del Comportamiento de la Marea Roja en dos localidades de la provincia de Aysén, Pto. Melinka y Pto. Raúl M. Balmaceda".

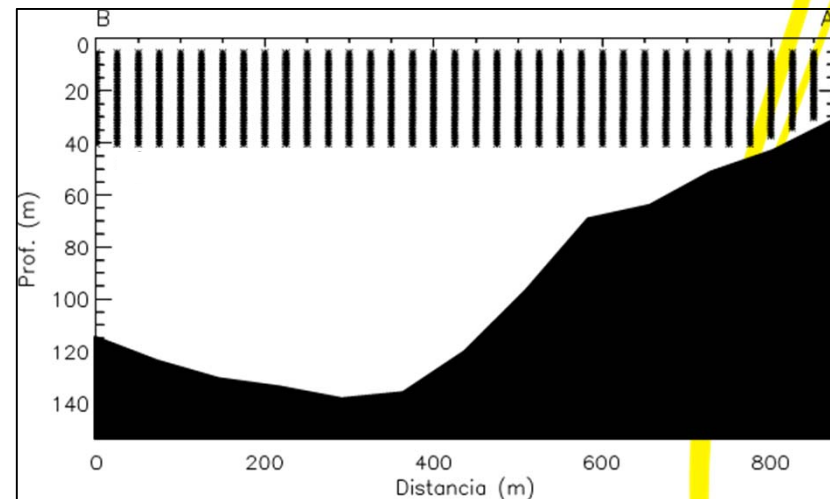
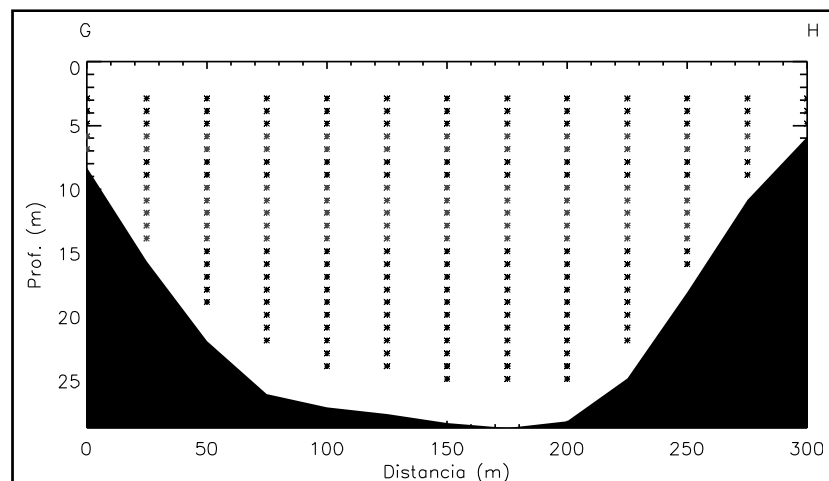
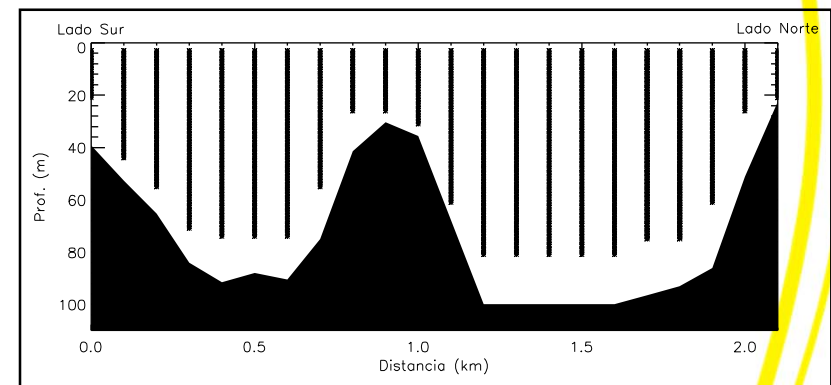
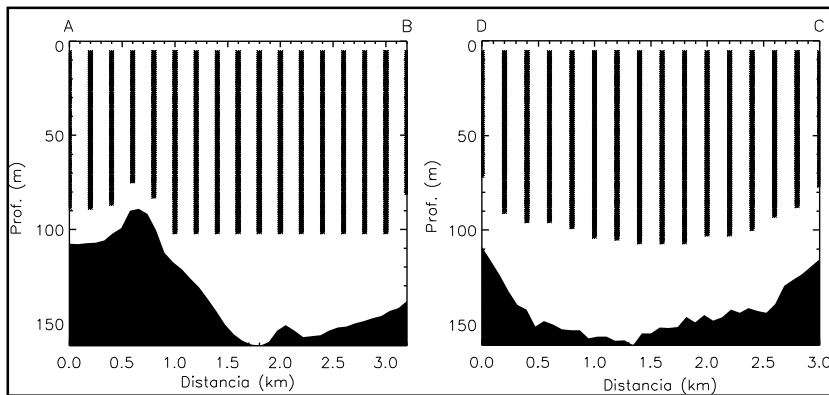
APLICACIÓN DEL MODELO

M. TRANSVERSALES



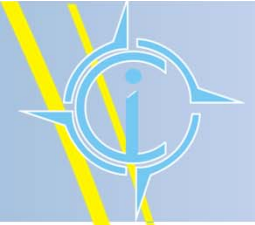
ENTRADA AL MODELO

- Separación media de las partículas de tamaño M_n de factores sección A variables en la sección.
- α_z : Coeficiente de viscosidad turbulenta para la sección.

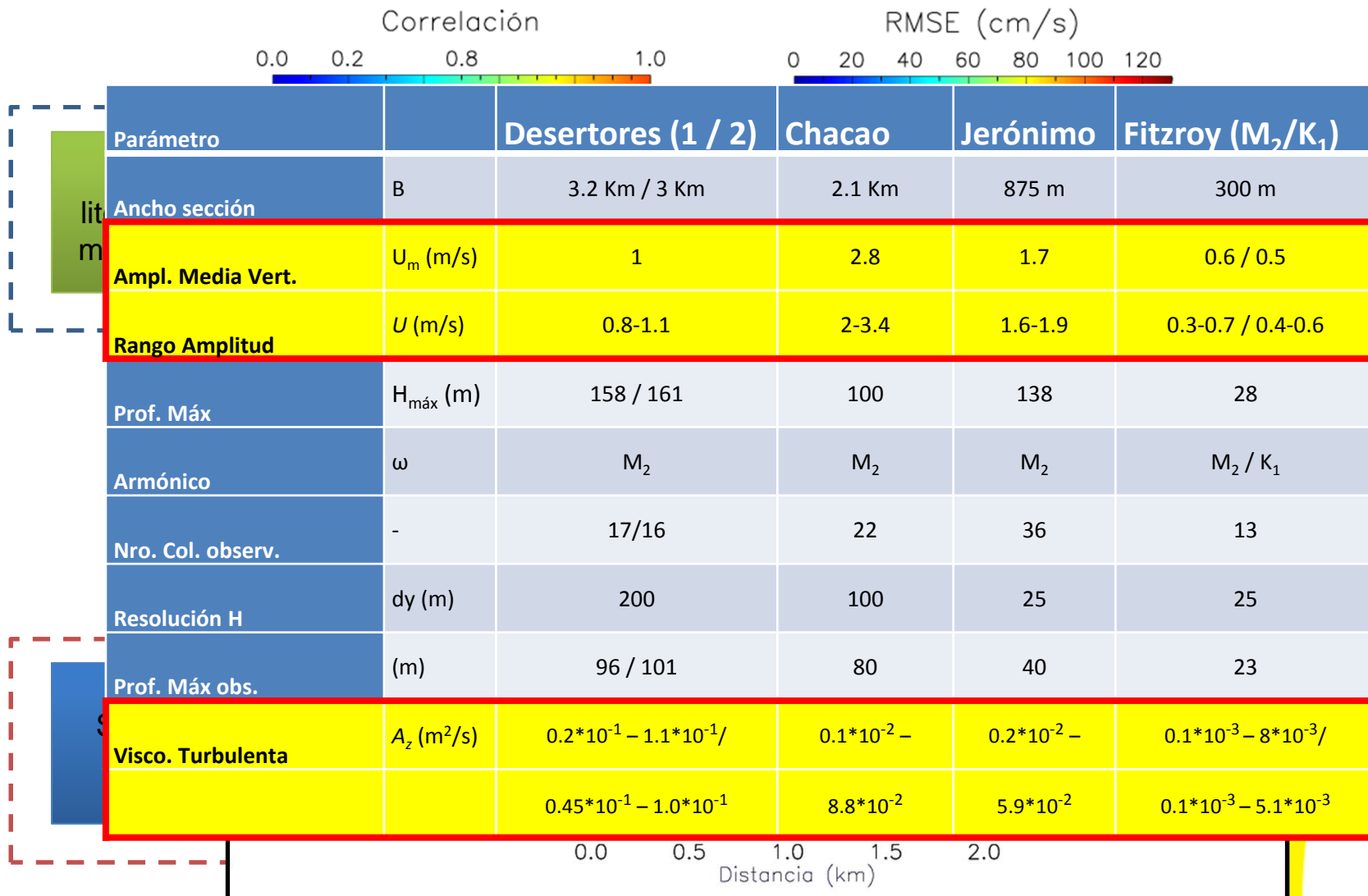


APLICACIÓN DEL MODELO

M. TRANSVERSALES



■ DETERMINACIÓN DE A_z v U



APLICACIÓN DEL MODELO

M. LONGITUDINAL



- Posicionamiento Georeferenciado
- Distancias N-S y O-E Transectos
- Extracción del perfil a través de un código de programación

Parámetro	Símbolo	Sec. 1 (a)	Sec. 2 (b)	Sec. 3 (c)	Sec. 4 (d)	Sec. 5 (e)
Prof. Media/2	H_0 (m)	7.5	3.75	5	5	10
Dens. de referencia	P_0 (kg/m ³)	1020	-	-	-	-
Delta dens. 3m-fondo	$\Delta\rho$ (kg/m ³)	1	-	-	-	-
Amplitud corr. media	U (m/s)	0.7	-	-	-	-
Richardson	R_i	0.20	0.10	0.13	0.13	0.26
Visco. Turbulenta	Az (m ² /s)	0.007	0.0043	0.005	0.005	0.0078

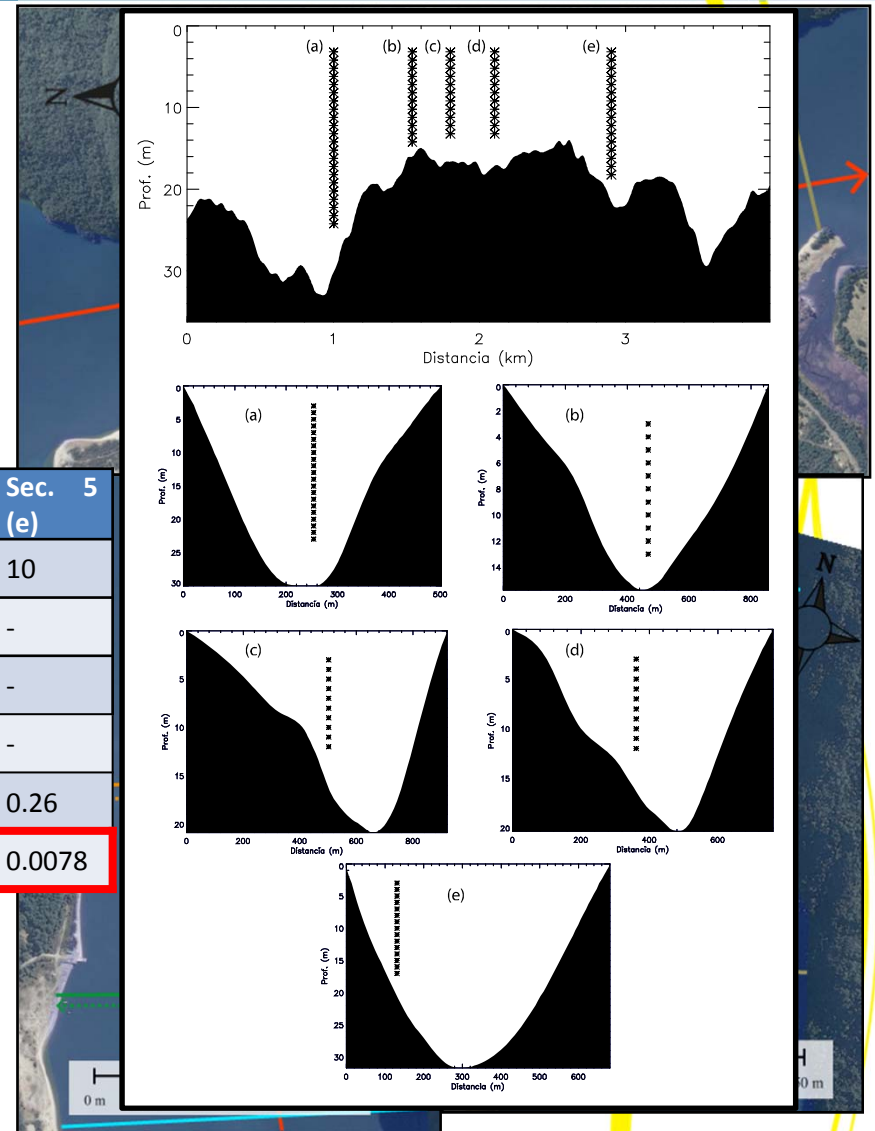
$$Az = A_0(1 + 10Ri)^{-1/2}$$

Munk & Anderson, 1948

$$A_0 = 2.5 * 10^{-3}UH_0$$

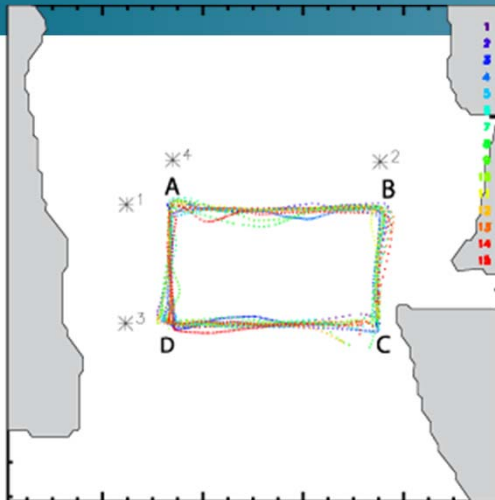
Bowden *et al.* (1959)

$$Ri = g(\Delta\rho/\rho_0)H_0/U^2$$

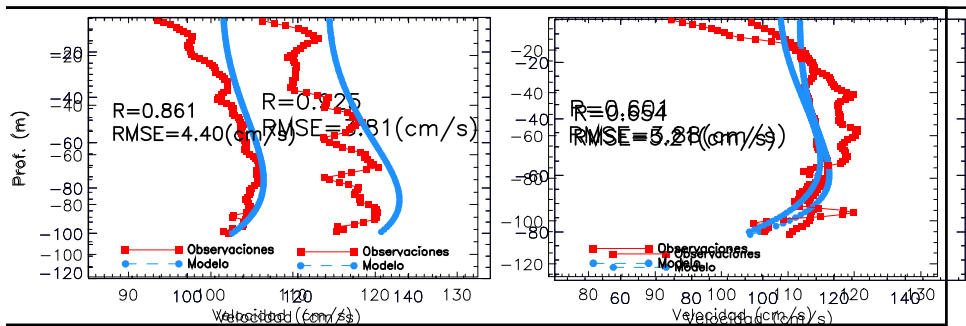


RESULTADOS

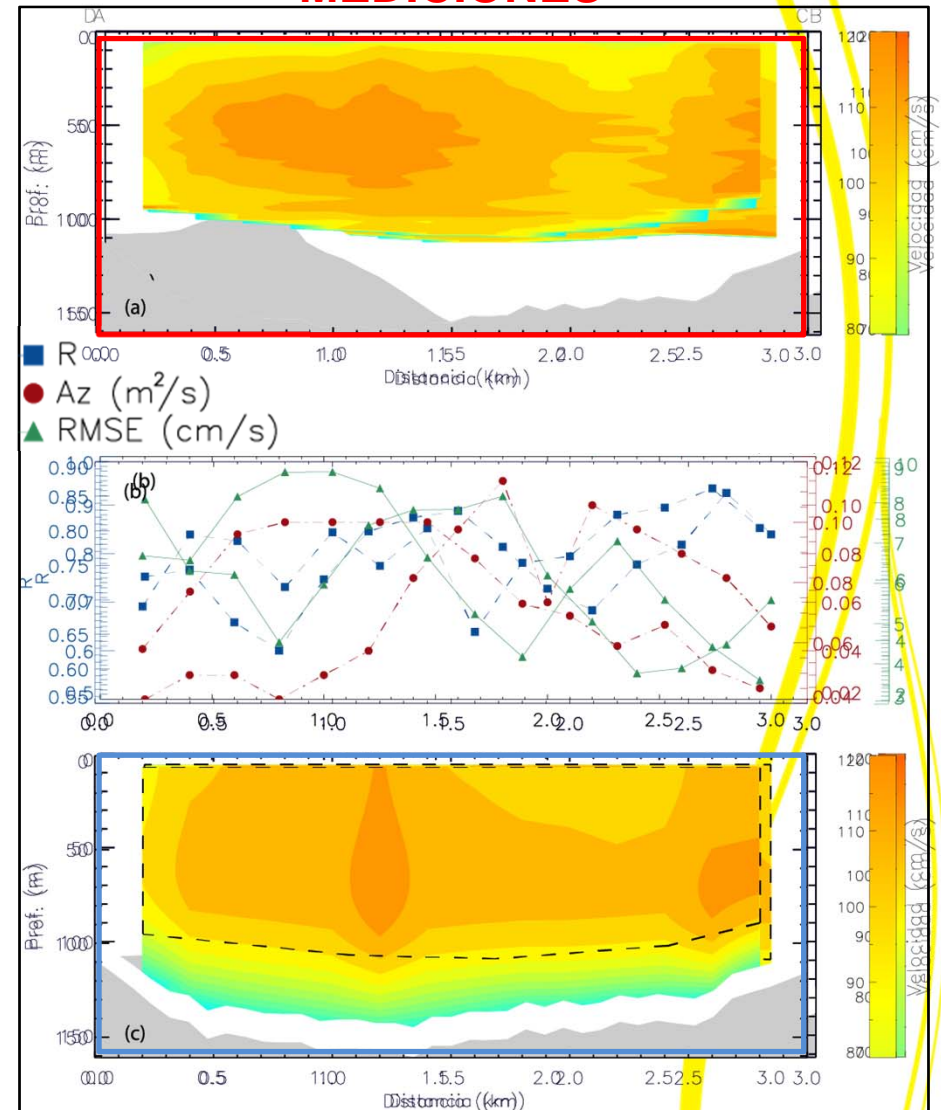
C. DESERTORES



- Mayores velocidades en el centro
- RMSE: 2 – 9 cm/s
- R: 0.6 – 0.96
- Perfiles comparables entre modelo y observaciones



MEDICIONES



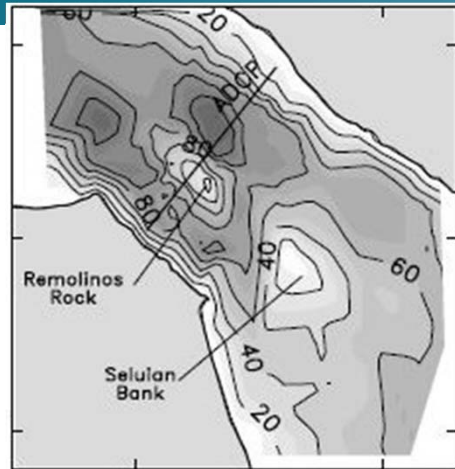
MODELO

RESULTADOS

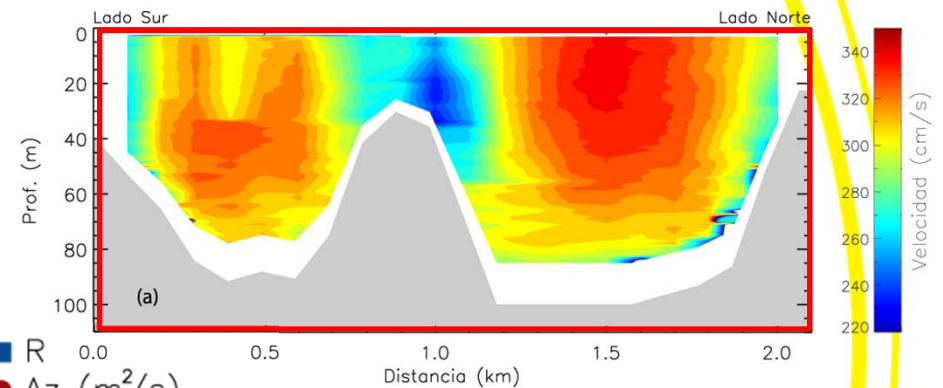
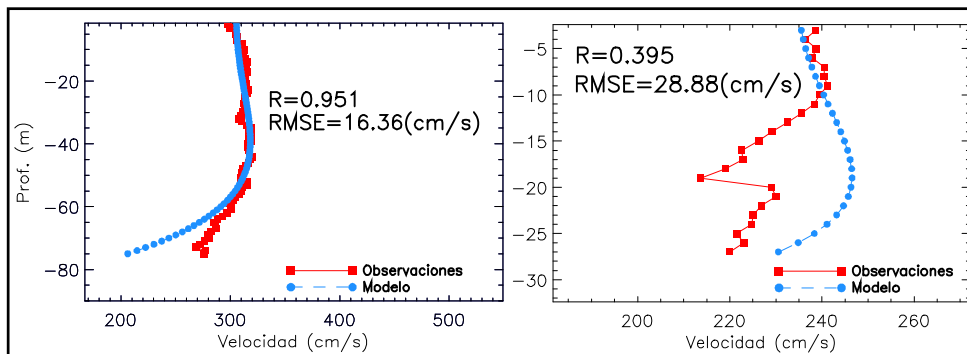
C. CHACAO



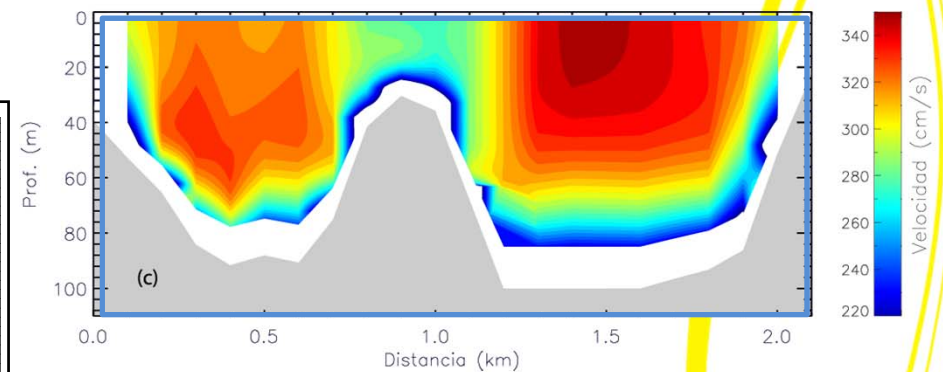
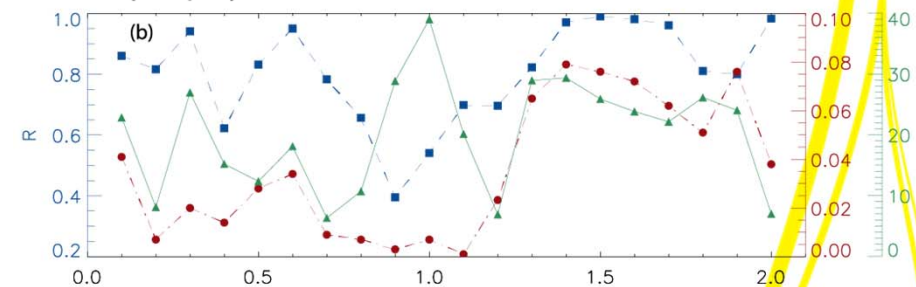
MEDICIONES



- Patrones distintos en lado sur y norte
- Escasa variabilidad lado norte
- RMSE: 10 – 25 cm/s
- R: 0.4 – 0.95
- Patrón comparable entre modelo y observaciones



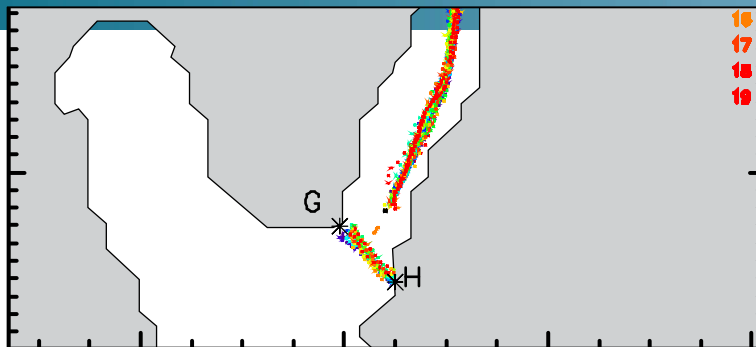
- R
- Az (m^2/s)
- ▲ RMSE (cm/s)



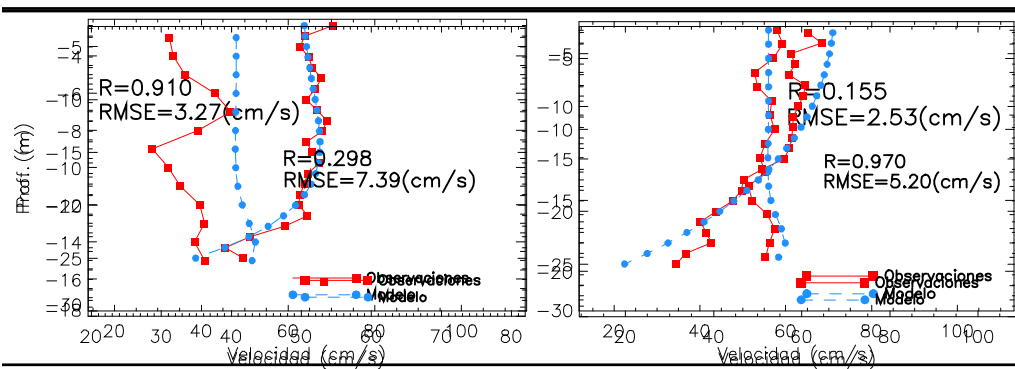
MODELO

RESULTADOS

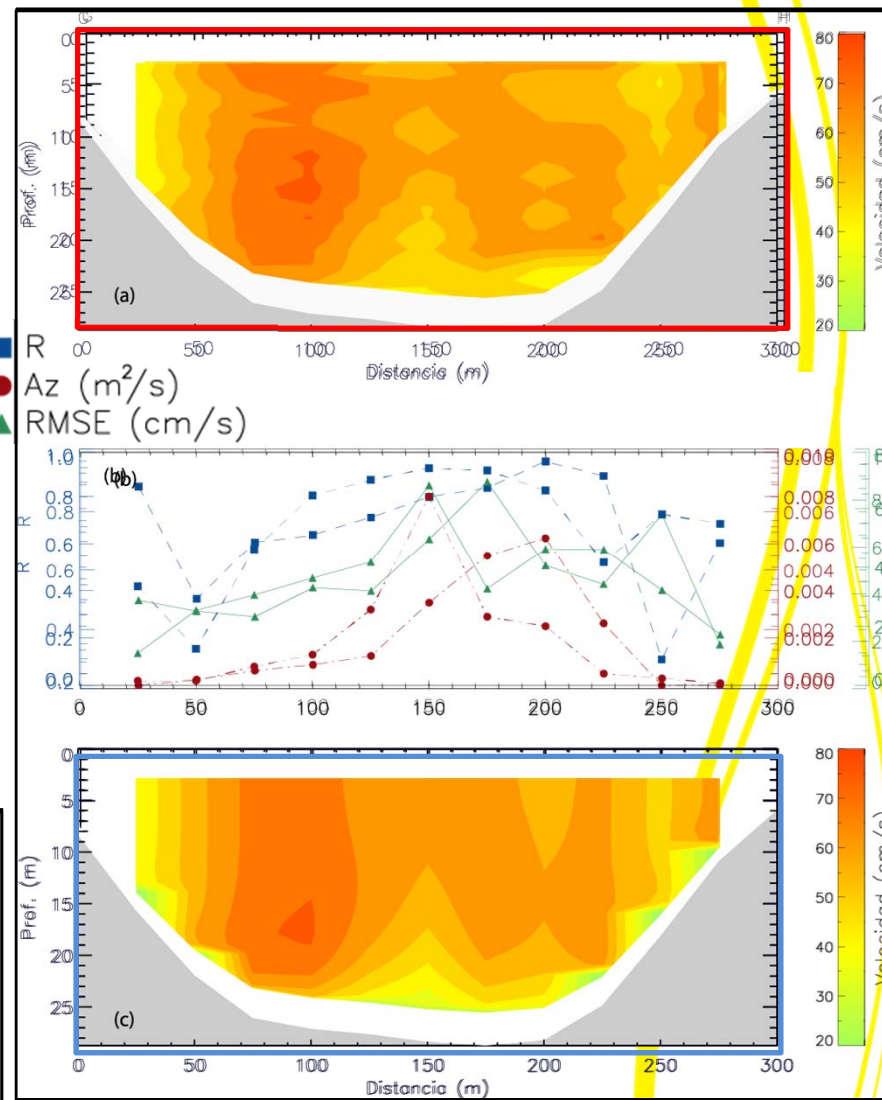
C. FITZROY M_{12}



- Patrones semejantes en ambos lados inferiores
- RMSE: 2 – 9 cm/s
- R: 0.35 – 0.91
- Modelo capta especialmente la dinámica de la reserva de agua derecha.
- Resultado desplazado hacia la derecha



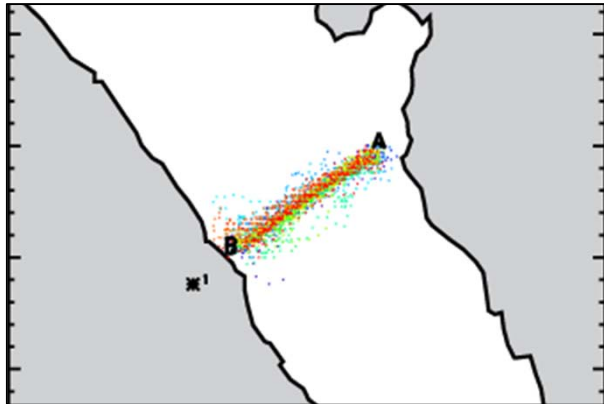
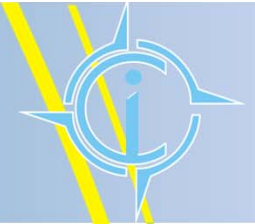
MEDICIONES



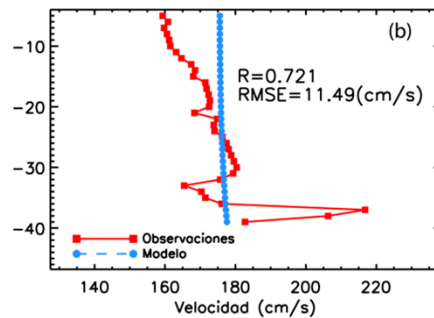
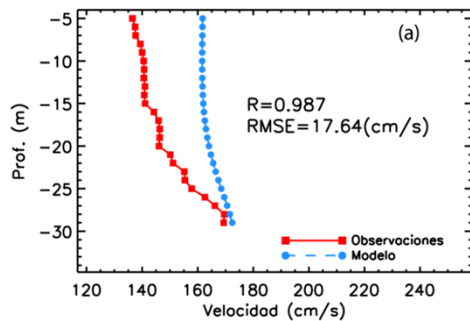
MODELO

RESULTADOS

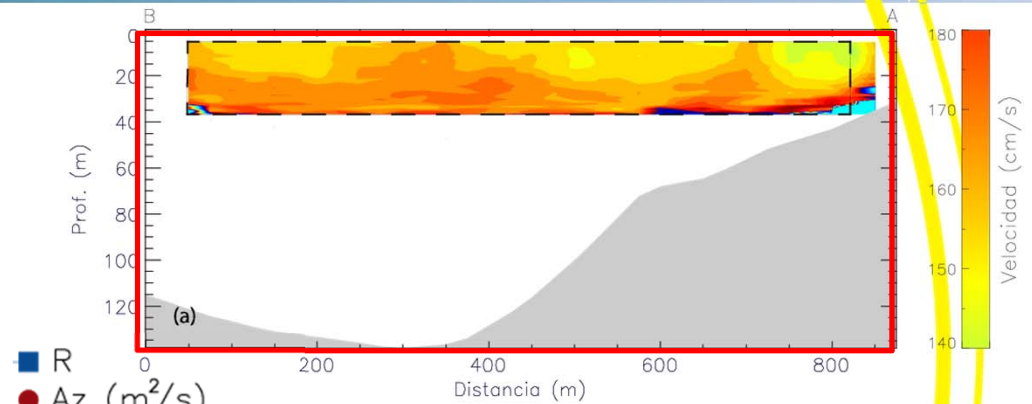
C. JERÓNIMO



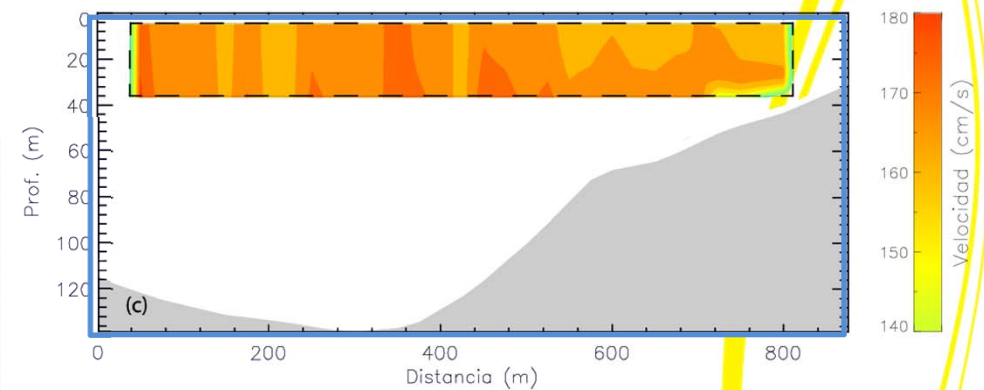
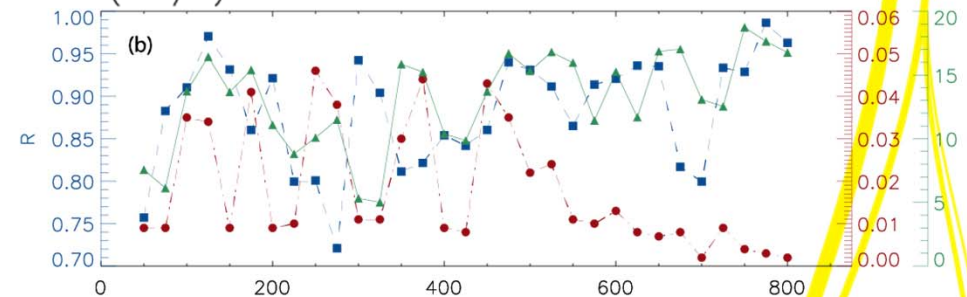
- Mayores velocidades en profundidad
- Irregularidad por falta de datos
- RMSE: 5 – 20 cm/s
- R: 0.79 – 0.98
- Patrón comparable entre modelo y observaciones en lado derecho



MEDICIONES



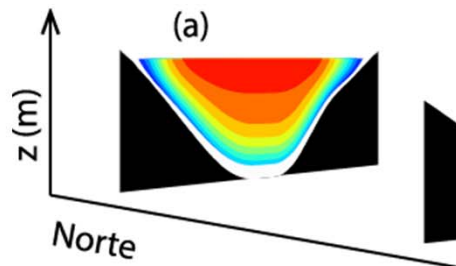
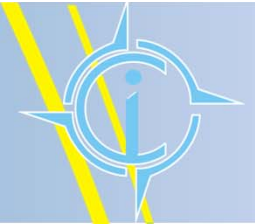
- R
- Az (m^2/s)
- ▲ RMSE (cm/s)



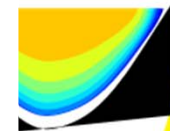
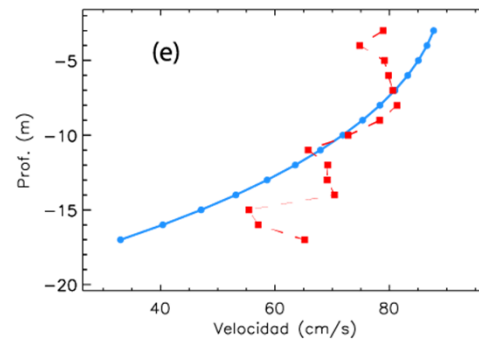
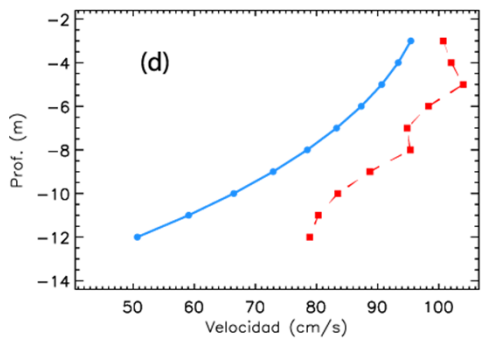
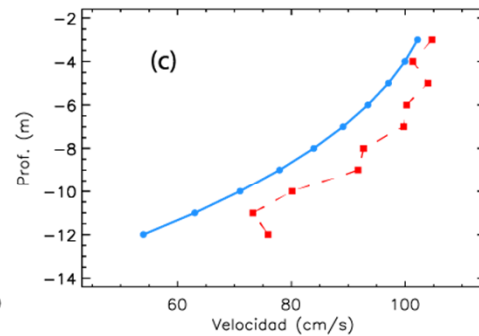
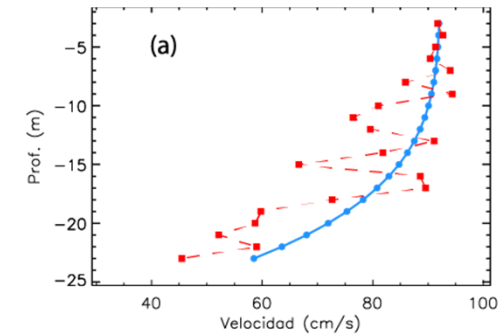
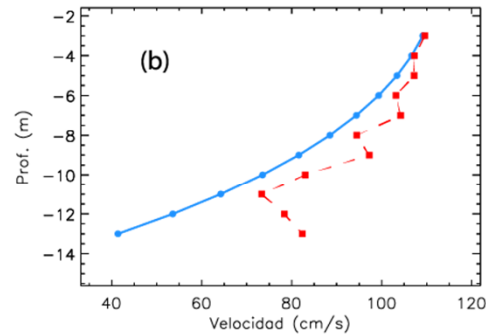
MODELO

RESULTADOS

C. PITIPALENA



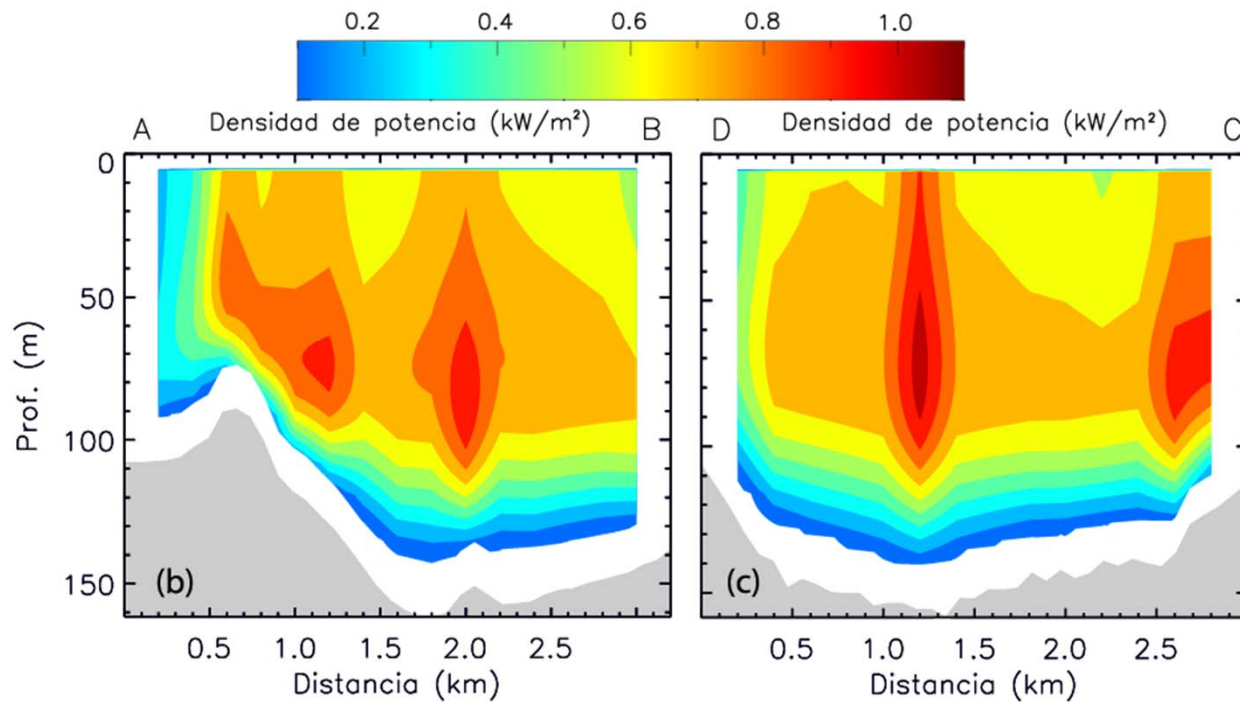
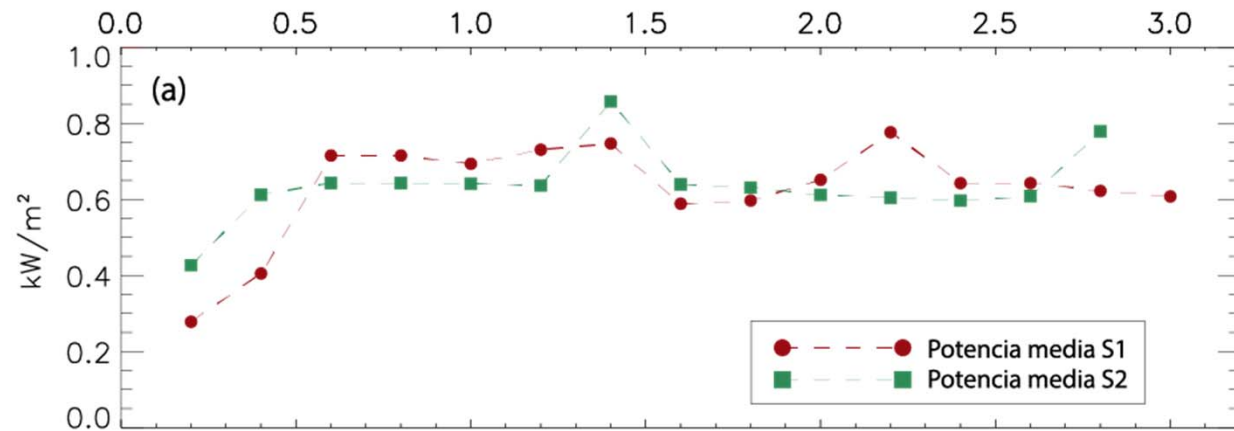
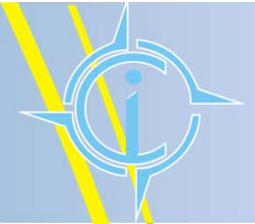
■ - - - Observaciones
● - - - Modelo



Parámetro	Símbolo	Sec. 1 (a)	Sec. 2 (b)	Sec. 3 (c)	Sec. 4 (d)	Sec. 5 (e)
Correlación	R	0.89	0.92	0.97	0.95	0.85
Err. Med. Cuad.	RMSE (cm/s)	9.0	15.5	10.2	15.4	11.8
Sesgo	BIAS (cm/s)	4.45	-10.3	-8.47	-13.5	-3.4

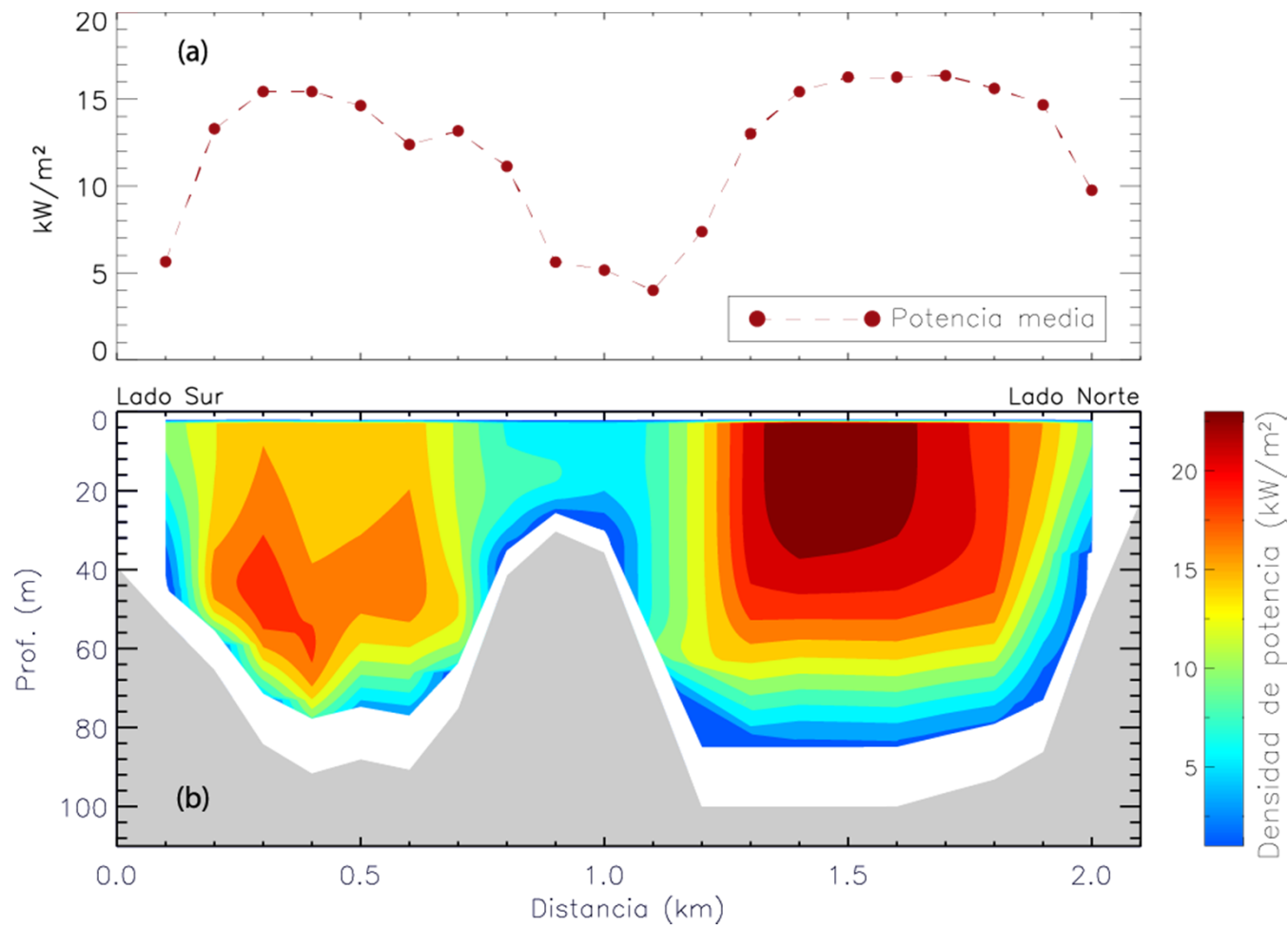
RESULTADOS

POTENCIA C. DESERTORES 1 Y 2



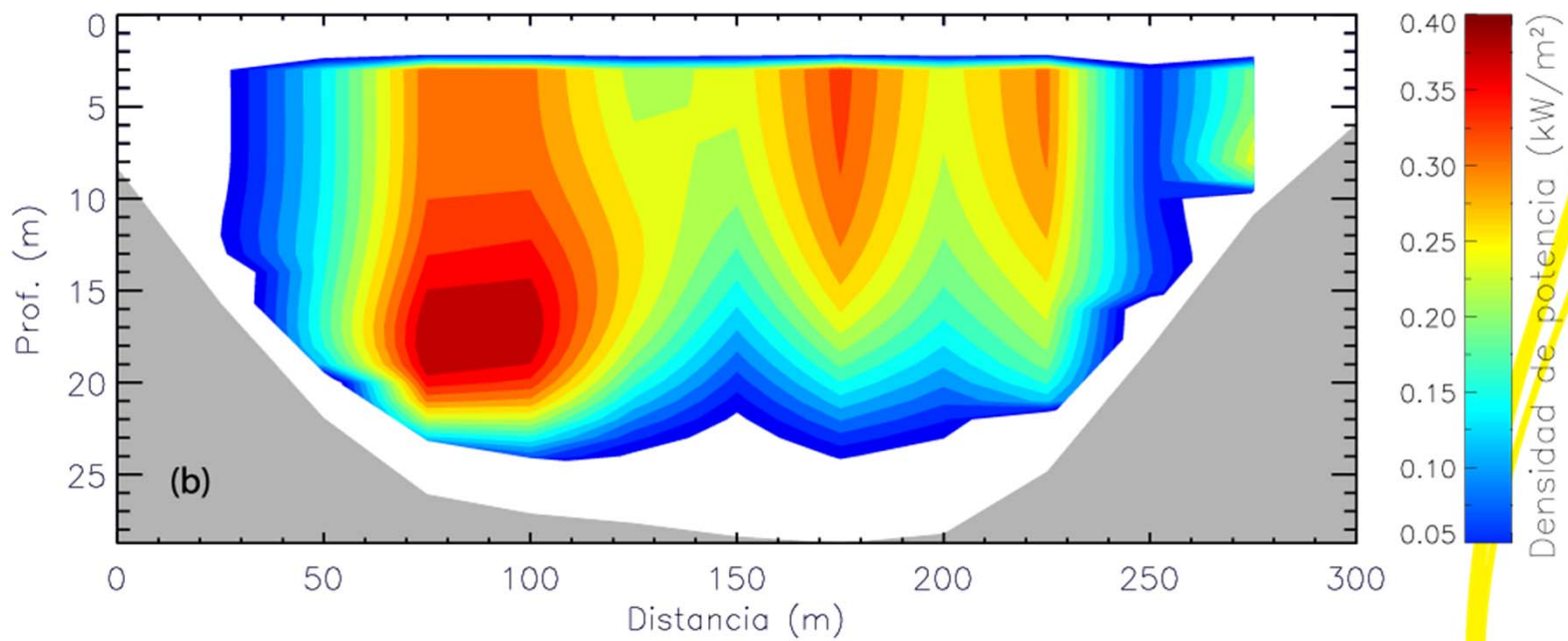
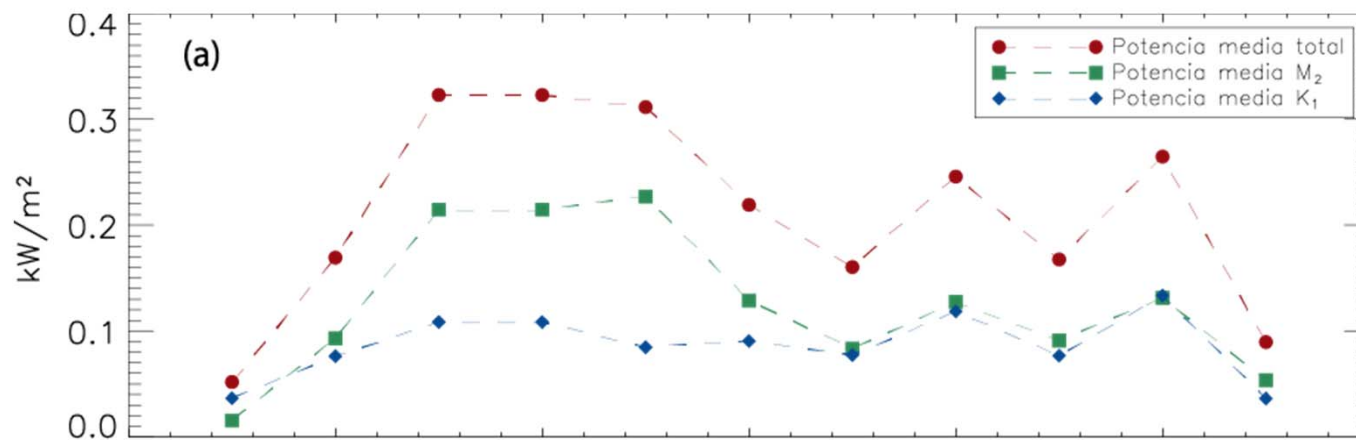
RESULTADOS

POTENCIA C. CHACAO



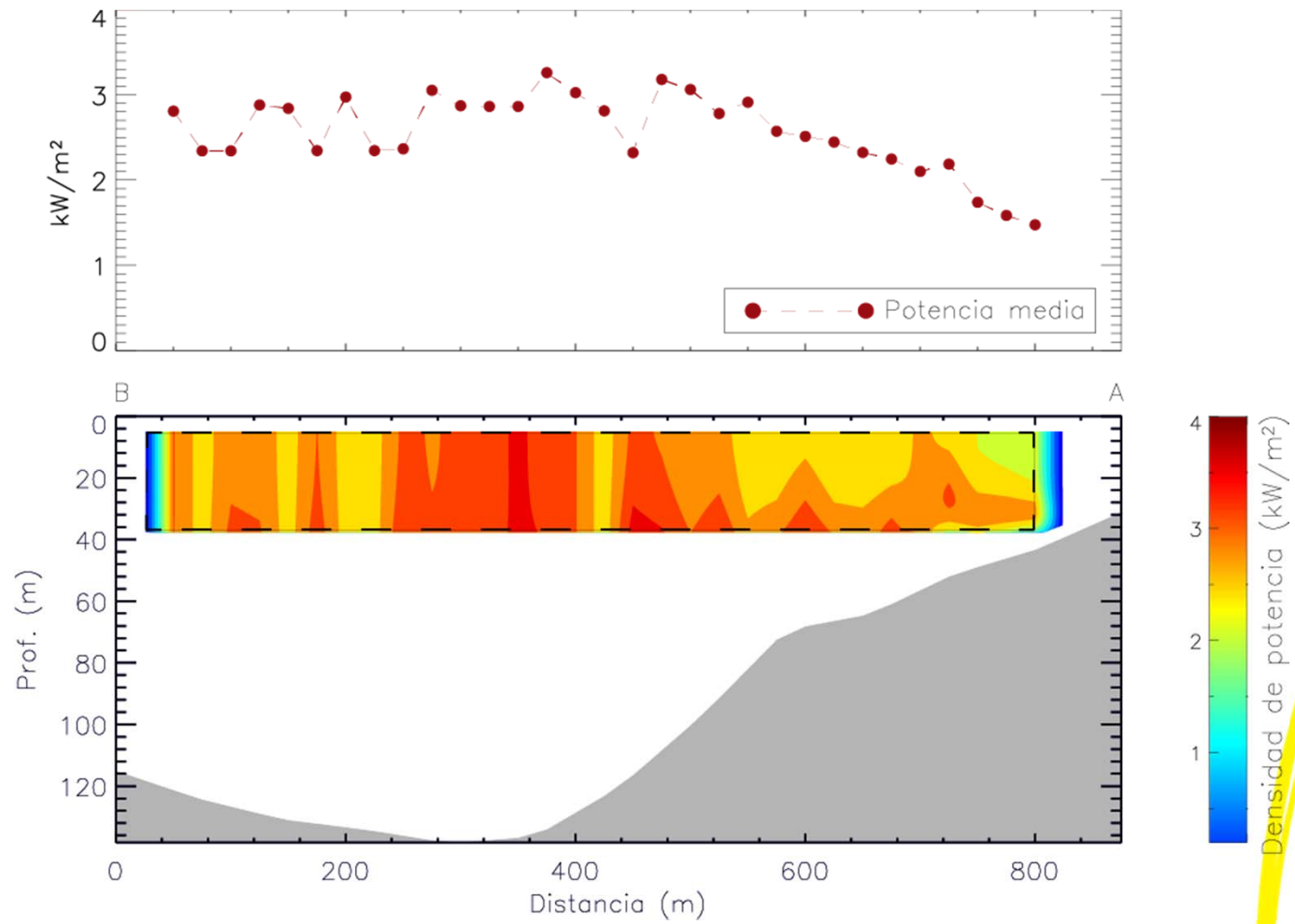
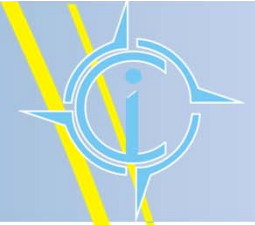
RESULTADOS

POTENCIA C. FITZROY



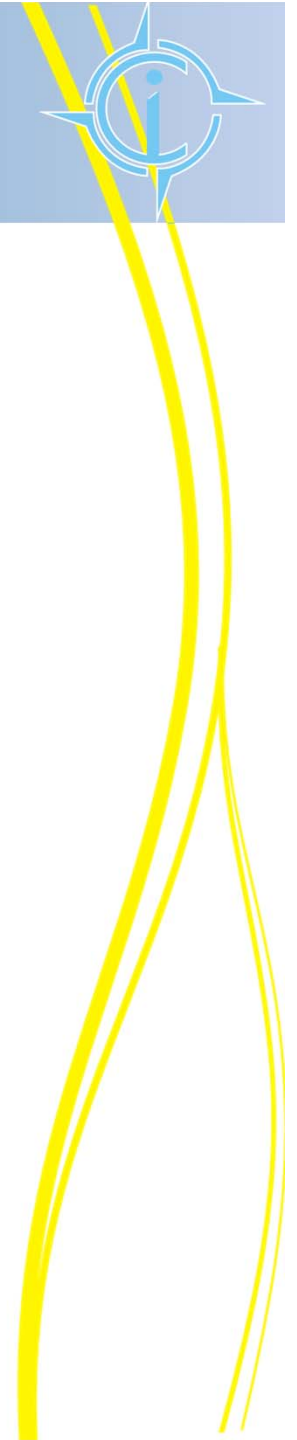
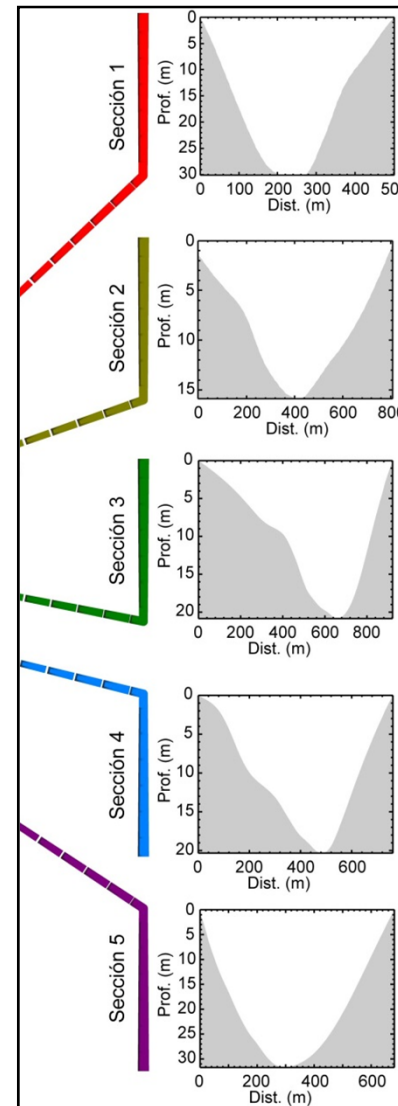
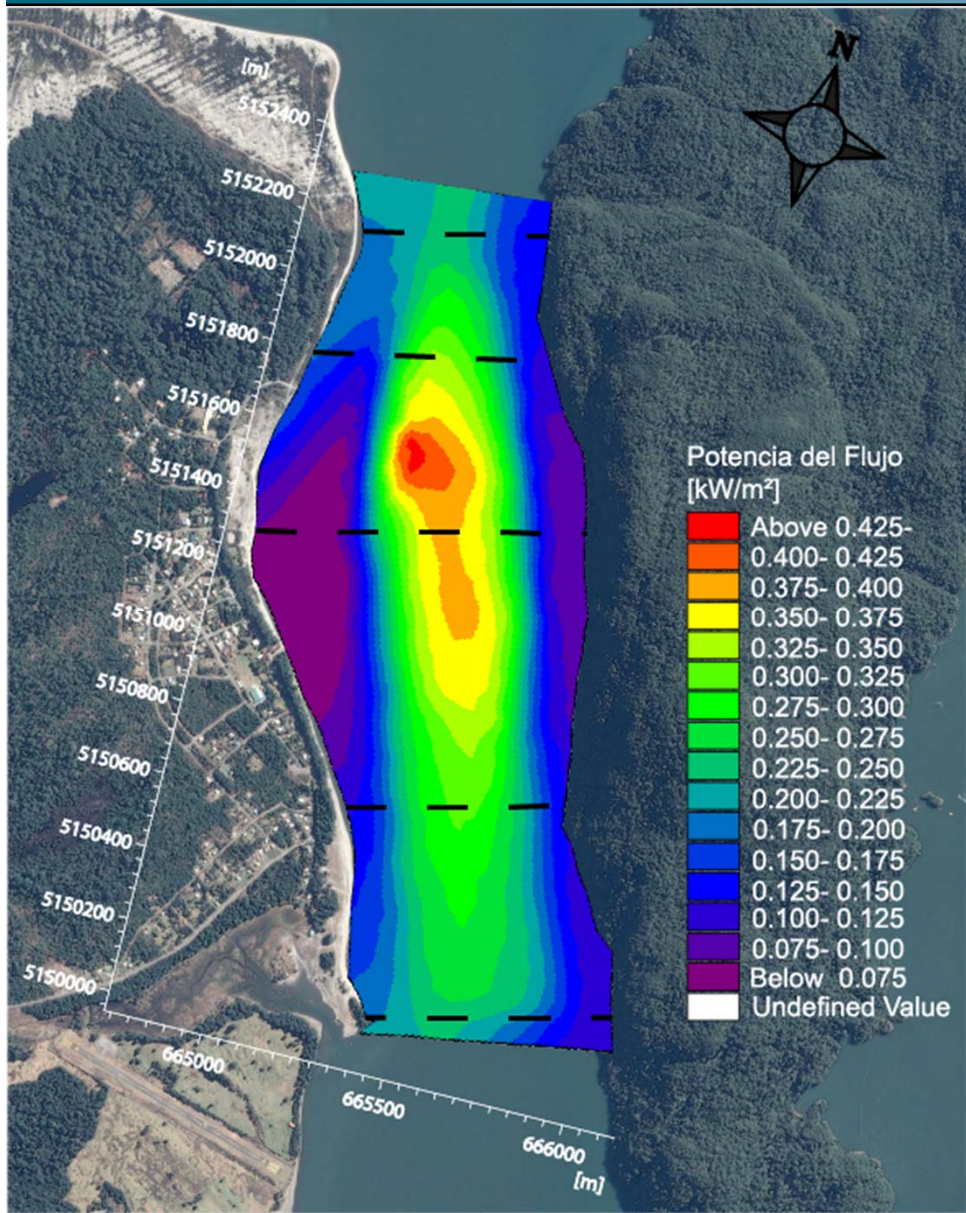
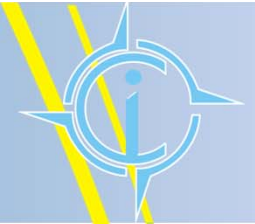
RESULTADOS

POTENCIA C. JERÓNIMO



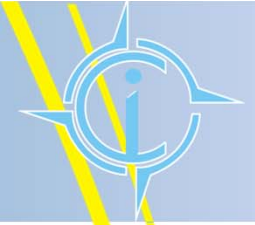
RESULTADOS

POTENCIA C. PITIPALENA



DISCUSIÓN

ASPECTOS DEL ANÁLISIS



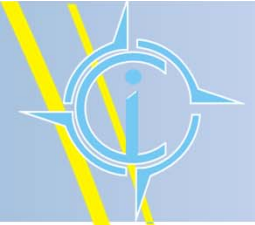
CANALES	Promedio R	Promedio RMSE (cm/s)
Chacao	0.82	20.5
Desertores (S1)	0.78	5.9
Desertores (S2)	0.77	6.4
Jerónimo	0.88	13.0
Fitzroy (M ₂)	0.67	3.5
Fitzroy (K ₁)	0.75	4.7

➤ MODELO:



DISCUSIÓN

ASPECTOS DEL ANÁLISIS



- SIMILITUD DINÁMICA ENTRE CANALES

$$Re = \frac{UL}{A_z} = \frac{F.Inerciales}{F.Viscosas}$$

$$R_0 = \frac{\bar{U}}{fL} = \frac{F.Inerciales}{Rotación}$$

$$E_k = \frac{A_z}{fH^2} = \frac{F.Viscosas}{Rotación}$$

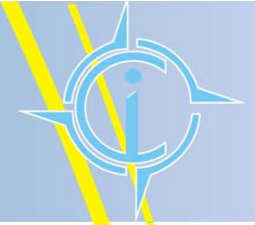
	A_z (m ² /s)	f (s ⁻¹)	H (m)	U (m/s)	L (m)	Ekman	Rossby	Reynolds	H/L
2 Chacao (Canal norte)	0.085	$9.69 \cdot 10^{-5}$	100	2.8	1000	0.088	28.883	32941.2	0.10
4 Pitipalena (Centro)	0.007	$1.006 \cdot 10^{-4}$	28	0.7	300	0.089	23.200	30000	0.09
6 Desertores (S1)	0.1	$1.284 \cdot 10^{-4}$	150	1.1	3000	0.035	2.855	33000	0.05
8 Jerónimo	0.03	$1.168 \cdot 10^{-4}$	130	1.7	900	0.015	16.166	51000	0.14
10 Fitzroy	0.004	$1.157 \cdot 10^{-4}$	30	0.7	300	0.038	20.162	52500	0.10

Distancia (km) Distancia (km)

Velocidad (cm/s)

Dos flujos que tienen diferentes escalas espaciales (ancho y profundidad en canales, p.e.), velocidades o propiedades de los fluidos que puedan ser aparentemente diferentes, estos pueden aún ser dinámicamente similares (Kundu, 1990).

CONCLUSIÓN

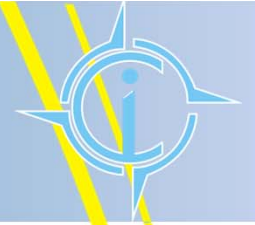


- Primera instancia de aplicación del modelo Huijts *et al.*, 2006
- Modelo fue aplicado con valores variables de Az en la dimensión horizontal en Jerónimo, Chacao, Desertores y Fitzroy; y constante en Pitipalena.
- Corrientes fueron reproducidas aceptablemente bien (R Y RMSE)
- C. Chacao y C. Jerónimo se presentan como los más energéticos. C. Desertores y Fitzroy y C. Pitipalena exhibe potencias de 0.5 kW/m^2 .

POTENCIA (kW/m^2)	Media en la sección	Máx.
C. Chacao	11.7	23.2
C. Jerónimo	2.56	4.02
C. Desertores (S1)	0.62	0.98
C. Desertores (S2)	0.64	1.05
C. Fitzroy (M ₂)	0.13	0.27
C. Fitzroy (K ₁)	0.08	0.19

• Simplificar la sección constante en toda de fondo.
 • Aspectos s mediciones forma de

REFERENCIAS



- *Bernitsas, M., Ben-Simon, Y., Raghavan, K., & Garcia, E. M. (2008). VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow. J. Offshore Mech. Arct. Eng.(130(4)), 1-18.*
- *Bowden, K. F., Fairbairn, L. A., & Huges, P. (1959). The distribution of shearing stresses in a tidal current. Geophys. J. Roy. Astr. S., 2(Issue 4), 288-305.*
- *Huijts, K., Schuttelaars, H., De Swart, H., & Valle-Levinson, A. (2006). Lateral entrapment of sediment in tidal estuaries: An idealized model study. J. Geoph. Res., 111(C1).*
- Kepler Energy. (19 de 8 de 2014). *Technology: Kepler Energy*. Obtenido de Kepler Energy: <http://www.keplerenergy.co.uk/technology.html>
- *Kundu, P. (1990). Fluid Mechanics. California: Academic Press.*
- *Munk, W. H., & Anderson, E. R. (1948). Notes on the theory of the thermocline. J. Mar. Res., 3, 276-295.*
- *Schramkowski, G. P., & De Swart, H. E. (2002). Morphodynamic equilibrium in straight tidal channels: Combined effects of Coriolis force and external overtides. J. Geophys. Res., 107(C12), 3227.*



**Universidad
de Valparaíso**
CHILE



INGENIERÍA CIVIL
OCEÁNICA