## Tabla de Contenido

	Intr	oducci	lón	1
1	<b>Intr</b> 1.1 1.2 1.3	oducci Antece Objeti Estruc	<b>ón</b> edentes	<b>1</b> 1 3 3
<b>2</b>	Mai	rco con	nceptual	<b>5</b>
	2.1	Introd	ucción	5
	2.2	El cicl	o sísmico	5
		2.2.1	Fase intersísmica	6
		2.2.2	Fase cosísmica	7
		2.2.3	Fase Postsísmica	7
3	Geo	desia 1	Marina: métodos e instrumentación	11
	3.1	Introd	ucción	11
	3.2	Motiva	ación y desarrollo	11
	3.3	Técnic	as de observación	12
		3.3.1	Acoustic ranging	13
		3.3.2	Otras técnicas	16
	3.4	Sensor	es de presión APG	17
		3.4.1	Funcionamiento de un APG	17
		3.4.2	Características instrumentales	19
		3.4.3	Fuentes de ruido en sensores APG	20
4	Met	odolog	gía de procesamiento y análisis de observaciones APG	<b>22</b>
	4.1	Introd	ucción	22
	4.2	Ecuaci	ión hidrostática	22
	4.3	Model	amiento de Mareas oceánicas	25
		4.3.1	Teoría de mareas	25
		4.3.2	Correción de los registros APG por mareas oceánicas	28
	4.4	Efecto	de Barómetro Invertido	30
	4.5	Superf	icie instántanea del oceáno	31
		4.5.1	Análisis de Componentes Principales (PCA)	31
	4.6	Estruc	tura de densidad en el océano	35
		4.6.1	Ecuación de estado	35
		4.6.2	Sondajes de conductividad, temperatura y profundidad	35

<b>5</b>	Chi	le-PEPPER: observaciones de Geodesia marina, entre los 34-35 °S,
	en l	a zona de ruptura del terremoto de Maule 2010, Mw=8.8 38
	5.1	Introducción
	5.2	Antecedentes y objetivos
		5.2.1 Antecedentes y marco tectónico
		5.2.2 Objetivos
		5.2.3 Experimento v datos
	5.3	Procesamiento de datos
		5.3.1 Decimación $\dots \dots \dots$
		5.3.2 Respuesta v deriva instrumental
		5.3.3 Estimación del modo común de error
	5.4	Resultados, análisis y discusión 48
	0.1	5.4.1 Análisis de la Densidad de Potencia Espectral (PSD) de observaciones
		de APG
		5.4.2 Señal espuria de período largo 50
		5.4.3 Análisis de transientes de desplazamiento
	5.5	Conclusiones 54
	0.0	
6	CEI	RS: observaciones de Geodesia marina, entre los 34.5°-35.5 °S, en la
	zona	a de ruptura del terremoto de Maule 2010, Mw=8.8 56
	6.1	Introducción
	6.2	Antecedentes del experimento y objetivos
		$6.2.1$ Objetivos $\ldots \ldots 57$
		6.2.2 Experimento v datos
	6.3	Procesamiento
		6.3.1 Remuestreo de datos
		6.3.2 Algoritmo iterativo para la estimación de parámetros
		6.3.3 Resultados de la inversión de especies armónicas de marea y deriva
		instrumental $\ldots \ldots \ldots$
		6.3.4 Conversión de presión a profundidad del fondo oceánico
	6.4	Análisis del campo de desplazamiento vertical
	-	6.4.1 Transientes de deformación
	6.5	Modelamiento elástico
		6.5.1 Modelamiento directo
		6.5.2 Inversión bayesiana de las coordenadas del centroide
	6.6	Discusión v conclusiones 77
	0.0	
<b>7</b>	San	riku-Oki: Observaciones de Geodesia marina en el mayor precursor
	$\mathbf{del}$	Mega-terremoto de Tohoku-oki, 11 de marzo del 2011, Mw=9.0 79
	7.1	Introducción
	7.2	Antecedentes sismotectónicos y objetivos
		7.2.1 Antecedentes sismotectónicos
		7.2.2 Objetivos
	7.3	Procesamiento de los datos APG
	7.4	Resultados
	7.5	Discusión y conclusiones

8	Mo	lelamiento del tensor de momento sísmico mediante observaciones de	
	geo	lesia marina y terrestre	92
	8.1	Introducción	92
	8.2	Solución del problema directo	93
		8.2.1 Teoremas de Elasto-estática	93
		8.2.2 Funciones de Green en un semi-espacio elástico, isótropo y homogéneo	94
		8.2.3 Cálculo de los desplazamientos estáticos	96
		8.2.4 Comparación con Okada 1992	98
	8.3	Problema inverso	99
		8.3.1 Tensor de momento completo	100
		8.3.2 Tensor de momento deviatórico	101
		8.3.3 Algoritmo de <i>qrid search</i>	102
	8.4	Pruebas numéricas con datos sintéticos	102
		8.4.1 Inversión del tensor de momento sísmico completo en una red densa v	
		equiespaciada de estaciones	102
		8.4.2 Inversión del tensor de momento sísmico completo y posición del cen-	
		troide en una red densa y equiespaciada de estaciones.	105
		8.4.3 Inversión del tensor de momento sísmico (completo y deviatórico) y	
		de la posición del centroide en una red artifical de estaciones en un	
		ambiente de subducción	107
		8.4.4 Inversión del tensor de momento sísmico y el centroide a partir de datos	
		sintéticos generados usando una falla finita	115
	8.5	Casos de estudio: Inversión del tensor de momento sísmico usando datos reales	3 119
		8.5.1 Parámetros de la inversión	119
		8.5.2 Tocopilla 2007, $M_w = 7.7$	120
		8.5.3 Sanriku-oki 2011, $\mathbf{M}_{\mathbf{w}} = 7.3$	125
		8.5.4 Iquique 2014, $M_w = 8.1$	127
	8.6	Conclusiones	131
	C		101
	Con		131
		8.6.1 Perspectivas para el establecimiento de una red sismogeodesica marina	100
	נוים	de caracter permanente	133
	BIDE		133
$\mathbf{A}$	Ane	xos procesamiento y resultados de registros de presión	145
	A.1	Anexos Capítulo 5: Observaciones de APGs del proyecto Chile-PEPPER, te-	
		rremoto de Maule del 2010, $M_w = 8.8$	145
		A.1.1 Figuras	145
	A.2	Anexos Capítulo 6: Observaciones de APGs del proyecto CERS, terremoto de	
		Maule del 2010, $Mw = 8.8$	148
		A.2.1 Tablas	148
		A.2.2 Figuras	152
	A.3	Anexos Capítulo 7: Observaciones del terremoto de Sanriku-Oki 2011, $M_w =$	
		7.3, Japón	160
		A.3.1 Figuras	160
		A.3.2 Tablas	160

В	Mét	odos i	nversos: mínimos cuadrados	161
	B.1	Introd	ucción	161
	B.2	Proble	ema inverso lineal	161
		B.2.1	Mínimos cuadrados simples	162
		B.2.2	Mínimos cuadrados con pesos	162
		B.2.3	Información a priori	163
	B.3	Proble	ema inverso no lineal	164
	B.4	Enfoq	ue Bayesiano del problema inverso	164
		B.4.1	Distribución a posteriori de los parámetros del modelo	165
$\mathbf{C}$	El t	ensor	de momento sísmico	167
	C.1	Teoría	de elasticidad infinitesimal lineal	167
		C.1.1	Ecuación de Movimiento	167
		C.1.2	Ley de Hooke generalizada	168
	C.2	Teorer	na de Representación	168
		C.2.1	Teorema de representación de fuentes sísmicas	169
	C.3	Deriva	ción del tensor de momento sísmico	169
		C.3.1	Descripción por medio de dislocaciones	169
		C.3.2	Descripción por medio de una distribución de fuerzas	170
	C.4	Descor	mposición del tensor de momento	172
		C.4.1	Fuentes Doble-cupla	172
		C.4.2	Descomposición de una fuente puntual general	172
		C.4.3	Descomposición de la parte deviatórica del tensor de momento	172
		C.4.4	Comparacion con Okada	173
	C.5	Tests 1	numéricos	175
		C.5.1	Inversión con centroide fijo en una red densa y equiespaciada de estacione	es175
		C.5.2	Inversión del tensor de momento sísmico completo y posición del cen-	
			troide en una red densa y equiespaciada de estaciones	176
		C.5.3	Inversión del tensor de momento sísmico (completo y deviatórico) y de	
			la posición del centroide en una red artificial de estaciones	176
		C.5.4	Inversión del tensor de momento sísmico y el centroide a partir de fatos	
			sintéticos generados con una falla finita rectangular y slip uniforme.	179
	C.6	Casos	de estudio: inversión del tensor de momento usando datos reales $\ldots$	182
		C.6.1	Tocopilla 2007, $\mathbf{M}_{\mathbf{w}} = 7.7$	183
		C.6.2	Sanriku-oki 2011, $\mathbf{M}_{\mathbf{w}} = 7.3$	185
		C.6.3	Iquique 2014, $\mathbf{M}_{\mathbf{w}} = 8.1$	187

## Índice de Tablas

3.1	Características Digiquartz®especificadas por el fabricante. La exacti-	
	tud, precisión y resolución del sensor se indican en función del rango completo	
	de medición	19

4.1	<b>Especies armónicas de las mareas parciales</b> . En la primera y segunda columna se indica el constituyente de marea y su notación. En las columnas siguientes se indican los números de Doodson, Amplitud de marea y Período asociados a una especie determinada. Modificado de (Stewart, 2008) y (Balmforth et al., 2004)	28
4.2	<b>Frecuencias astronómicas fundamentales</b> . En la primera columna se in- dica el período de las frecuencias astronómicas fundamentales y a continuación una descripción con el elemento celeste al que se le asocia su origen	28
5.1	Ubicación y características instrumentales APGs Chile-PEPPER. En las columnas se indican las coordenadas de los instrumentos, fechas de inicio y término y tasa de muestreo de cada estación.	43
8.1	Parámetros para cálculo desplazamientos estáticos.	96
8.2	Resultados inversión del tensor de momento sísmico en grilla equies- paciada. Se muestran tres casos usando varianzas distintas, indicándose en la primera columna aquella utilizada en las componentes horizontales. En las otras columnas se muestran $M_o$ el momento sísmico escalar, el mecanismo focal ( <i>strike,dip</i> y <i>rake</i> ), porcentaje de las componentes ISO, DC y CLVD ( <i>Com- pensated Linear Vector Dipole</i> ), y el mecanismo obtenido. Para este último se grafica la parte deviatórica del tensor.	105
8.3	Resumen de los resultados de la inversión asumiendo un tensor de momento sísmico completo. Se usan distintas configuraciones de redes de APGs y GPSs, las que se indican en las columnas. Los parámetros que se muestran en las filas de la tabla son el momento sísmico escalar $(M_o)$ , la geometría de la fuente ( <i>strike</i> , <i>dip</i> y <i>rake</i> ) y los porcentajes de las componentes de la descomposición del tensor: ISO, DC y CLVD	114
8.4	Resumen de los resultados de la inversión asumiendo un tensor de momento sísmico deviatórico. Leyenda idéntica a la de la tabla 8.3	114
8.5	Resumen de la inversión del tensor completo y deviatórico usando datos sintéticos generados con una fuente finita con un momento escalar de $M_o = 10^{20}$ Nm ( $M_w = 7.3$ ). Los parámetros que se muestran en las filas de la tabla son el momento sísmico escalar ( $M_o$ ), la geometría de la fuente ( <i>strike</i> , <i>dip</i> y <i>rake</i> ) y los porcentajes de las componentes de la descomposición del tensor: ISO, DC y CLVD. En las columnas se indican el tensor que representa mejor a la fuente finita, la solución de mínimos cuadrados asumiendo tensor completo y la que se obtiene al asumir un tensor deviatórico.	117
8.6	Resumen de la inversión del tensor completo y deviatórico usando datos sintéticos generados con una fuente finita con un momento escalar de $M_o = 10^{21}$ Nm ( $M_w = 8.0$ ). La leyenda es idéntica a la de la tabla 8.5	117

8.7	Resumen de la inversión del tensor completo y deviatórico para el	
	terremoto de Tocopilla del 2007, $M_w = 7.7$ . Los parámetros que se mues- tron on los filos de la tabla son el momento sígmico escalar $(M_{\rm e})$ la gramatica	
	tran en las mas de la tabla son el momento sismico escalar $(M_o)$ , la geometria de la fuente (atrika, din y raka) y los percentajos de las componentes de la	
	descomposición del tensor: ISO DC y CLVD En las columnas se indican el	
	tensor publicado por el gCMT para este sismo la solución de mínimos cua	
	drados asumiendo tensor completo y la que se obtiene al asumir un tensor	
	deviatórico	124
88	Resumen de la inversión del tensor completo y deviatórico para el	121
0.0	terremoto de Sanriku-oki del 2011. $M_{\rm rr} = 7.3$ . Los parámetros que se	
	muestran en las filas de la tabla son el momento sísmico escalar $(M_{\alpha})$ . la	
	geometría de la fuente ( <i>strike</i> , <i>dip</i> y <i>rake</i> ) y los porcentajes de las componentes	
	de la descomposición del tensor: ISO, DC y CLVD. En las columnas se indican	
	el tensor publicado por el gCMT para este sismo, la solución de mínimos	
	cuadrados asumiendo tensor completo y la que se obtiene al suponer un tensor	
	deviatórico.	124
8.9	Resumen de la inversión del tensor completo y deviatórico para el	
	terremoto de Iquique del 2014, $M_w = 8.1$ . Los parámetros que se muestran	
	en las filas de la tabla son el momento sísmico escalar $(M_o)$ , la geometría	
	de la fuente ( <i>strike</i> , <i>dip</i> y <i>rake</i> ) y los porcentajes de las componentes de la	
	descomposición del tensor: ISO, DC y CLVD. En las columnas se indican	
	el tensor publicado por el gUMT para este sismo, la solucion de minimos	
	deviatórico	120
		130
A.1	Coordenadas de las estaciones del Proyecto CERS: Código, ubicación	
	(latitud, longitud) y profundidad de los sitios de la red de Geodesia marina	
	(sensores APGs) en el experimento CERS	148
A.2	Constituent estimation. Constituent names and their respective periods (1 <sup>st</sup> 2 <sup>nd</sup> columns)	
	at station bpr001( $T_1$ ). Estimated Amplitudes and phase lags are shown in the 3 <sup>rd</sup> and 5 <sup>th</sup>	
1.0	columns and the corresponding $95\%$ confidence intervals displayed in columns 4 and 6	149
A.3	Constituent estimation. Constituent names and their respective periods $(1^{st} \text{ and } 2^{ind})$	
	columns) at station vsm001( $T_2$ ). Estimated Amplitudes and phase lags are shown in the	
	$3^{10}$ and $5^{10}$ columns and the corresponding 95% confidence intervals displayed in columns	150
A 4	4 and 0	190
A.4	Estimated values for instrumenta drift model parameters $(A_1, A_2, A_3 \neq A_4)$ . For each site $0.5 \% (2, \sigma)$ confidence intervals are shown	151
15	For each site $95.70(2-6)$ confidence intervals are shown	101
A.9	28 <sup>th</sup> March 2010 soismic ovent. Source characteristics according to different	
	agencies are shown	151
A 6	Magnitude location and focal mechanism if available for the Constitucion	101
11.0	14 <sup>th</sup> February 2011 seismic event. Source characteristics according to different	
	agencies are shown	151
A.7	Maximum Likelihood (MAP) solutions and confidence intervals (95%) deter-	-~+
	mined from the marginal a posteriori distributions are shown. This confidence	
	intervals enclose a $95\%$ of the area of the distribution and thus is likely that	
	the true model lies inside the intervals	151

A.8	Estimaciones del desplazamiento cosísmico ( $\Delta u_{co}$ ) y afterslip ( $\Delta u_{afterslip}$ ) Sanriku-	
	oki 2011, $M_w = 7.3$ . En la segunda y tercera columna se muestran los desplazamientos	
	cosísmicos estimados y sus respectivos intervalos de confianza, del mismo modo, en las co-	
	lum nnas 3 y 4 se indica la estimación de afters lip en cada estación	160
C.1	Características de la grilla 2D de cálculo de los desplazamientos. Se	
	muestra el largo, $l_x$ , y ancho $l_y$ , así como el número de puntos de la grilla $n_x$	
	y $n_y$ , en la dirección x e y respectivamente	175
C.2	Niveles de ruido para cada uno de los tres casos estudiados	176
C.3	Características de la grilla de cálculo de los desplazamientos. Test	
	para la inversión del tensor de momento utilizando un algoritmo de tipo grid	
	search. Se muestra el largo, $l_x$ , y ancho $l_y$ , así como el número de puntos de la	
	grilla $n_x$ y $n_y$ , en la dirección x e y respectivamente	176
C.4	Parámetros de fuente pruebas numéricas con datos sintéticos. Tabla	
	con los parámetros de fuente (latitud, longitud y profundidad de fuente) de los	
	mecanismos escogidos (strike, dip y rake) para generar datos sintéticos para	
	un sismo interplaca, outer-rise e intraplaca de magnitudes, M8.0, M7.3 y M6.7,	
	respectivamente.	176
C.5	Modelo de velocidad 1-D Husen et al. (1999)	182

## Índice de Ilustraciones

15

16

3.4	Esquema de un sensor APG. Dentro de una cámara al vacío, recubierta por una	
	carcasa metálica, se encuentra el manómetro de Bourdon. Este último consiste en un	
	tubo metálico con forma de J, donde el sensor de presión se encuentra en el extremo	
	de la parte curva del tubo. A su lado se ubica un sensor de temperatura que se utiliza	
	para la corrección de los registros. La presión del agua se ejerce sobre el extremo	
	exterior del tubo en una espiral, la cual en su interior contiene aceite para evitar la	
	corrosión de las componentes internas del sensor. Modificado de Paroscientific (2011)	17
3.5	Esquema cristal de cuarzo. Se muestra el montaje del oscilador de cuarzo. En	
0.0	su superficio se disponen electrodes para forzar el cristal a su modo fundamental de	
	su superincie se disponen electrodos para forzar el cristar a su modo fundamentar de	
	vibración. Los paneles de excitación sintónizan la frecuencia del circuito con la de la	10
9.0	placa plezoelectrica. Modificado de Paroscientific (2011)	10
3.0	Densidad de potencia espectral de registros OBPs obtenidos me-	
	diante APGs. La curva azul y verde corresponde a la densidad de potencia	
	espectral o PSD ( <i>Power Spectral Density</i> ) de sensores adecuados para operar	
	a 2000 m y 4000 m de profundidad respectivamente. Modificado de Webb and	
	Nooner $(2016)$	21
11		
4.1	<b>Presion oceanica.</b> Con las nechas rojas se ilustra los movimientos de la supernicie oceani-	
	ca instantanea $\eta(\mathbf{x}, t)$ debido a los renomenos que la modifican. Estos son principalmente:	
	mareas oceanicas, carga atmosferica y forzamiento de viento o de inestabilidades gravitacio-	
	nales. El datum vertical se denota con $z_o$ y corresponde al MSL. Con línea punteada azul se	
	muestra la profundidad del fondo marino $z_s$ . En línea punteada roja se muestra un ejemplo	
	de la estructura vertical de la densidad potencial $\rho(z,t)$ que varía en profundidad y en el	~ (
	tiempo. Modificado de Phillips (2006) $\ldots$	24
4.2	Potencial gravitatorio de mareas. En la figura se muestra la tierra sujeta al potencial	
	gravitacional de un cuerpo celeste. Este último causa deformación del océano por medio	
	de gradientes en la fuerza centrífuga y gravitatoria. Las flechas indican las aceleraciones	
	centrífuga, de gravedad y residuales de marea de acuerdo a la leyenda en la figura. Modificado	
	de Lowrie (2007) y Stewart (2008) $\ldots \ldots \ldots$	25
4.3	Espectro de amplitud de presión en las bandas de frecuencia (a) semidiurna y	
	(b) diurna. Registros obtenidos por APGs en la zona de ruptura del terremoto de Maule	
	2010. Con línea segmentada negra se indica la especie armónica con el mayor contenido de	
	energía en el registro, mientras que con la línea segmentada verde se indican el resto de las	
	especies en la banda correspondiente. Para cada armónico se indica al costado izquierdo de la	
	línea segmentada la nomenclatura pertinente, por ejemplo, $M_2, S_2, K_2, K_1$ (ver nomenclatura	
	en la tabla 4.1). $\ldots$	27
4.4	<b>Registro de OBP Japón.</b> En el panel de arriba se muestra una serie de tiempo de presión	
	antes de realizar la corrección por marea. En zoom se muestra una ventana de 50 días para	
	destacar su modulación de amplitud. En el panel de abajo se muestra la misma serie de	
	tiempo una vez restada la contribución de mareas oceánicas, las que han sido estimadas por	
	medio de BAVTAP-C (Tamura et al. 1001) en donde se observa claramente la señal de	
	desplazamiente vertieel producide por un terromoto	20
15	Descomposición en unlong singulares (SVD) none el coso de mais a Estructure de	29
4.0	Descomposición en valores singulares $(S \vee D)$ para el caso de $m > n$ . Estructura de	
	las matrices que componen la descomposición de valores singulares. En el lado derecho los	9 A
1.0	segmentos pintados en bianco corresponden a los segmentos de la matriz que son nulos .	34
4.0	Analisis de Componentes Principales. Descomposición de modos ortogonales de la	n /
	matriz de observaciones.	34

4.7Sondaje CTD. Los datos corresponden a sondajes realizados el en verano del 2017, durante la expedición AT37-09 en el R/V Atlantis, en un experimento de Geodesia Marina situado alrededor de los 21.0°S. En cada panel se indica la variable de estado (Temperatura, salinidad, conductividad y anomalía de densidad) medida a la presión indicada (profundidad) en la columna de agua. Cada línea sólida de color representa un sondaje en una ubicación distinta del área de estudio. El instrumental sufrió algunos problemas durante el experimento, 36 5.1Terremoto del Maule 2010  $M_w$ =8.8. Mapa de la zona de ruptura de Maule 2010, en la que se enmarca el área de estudio (rectángulo con línea negra segmentada). En ambos paneles (a) y (b), se muestra la distribución de slip obtenida por Yue et al. (2014) y en línea azul se muestra el límite oriental del prisma de acreción (Contreras-Reyes et al., 2010). En el panel de la izquierda se muestran los tensores de momento del GCMT durante el primer mes posterior al terremoto, con elipses blancas y negra en línea punteada sismos de tipo Outer rise e intraplaca sobre la litósfera continental. En el panel de la derecha se indica la 405.2Mapa APGs. Ubicación de los sitios de medición en el proyecto Chile-PEPPER. Los cuadrados rojos simbolizan los sitios equipados con DPGs (Differential Pressure Gauge) mientras que los blancos corresponden a las estaciones equipadas con APGs (Absolute Pressure 42Gauge). Se utilizó la batimetría publicada por Weinrebe and Hasert (2015) . . . . . . 5.3Respuesta instrumental APGs. En el panel de arriba y con línea roja se indica la ganancia mientras que en el panel de abajo y en línea azul se indica el espectro de fase (sin desenvolver o *unwrapped*). Demarcado con rectángulos transparentes de color gris se 45muestra la banda de frecuencias atenuada por el filtro *antialiasing* que se aplicó a los datos. 5.4Series de tiempo sin marea y ajuste de señal de período largo. En los paneles de la izquierda se muestran los registros de las estaciones APG que operaron sin defectos instrumentales evidentes: CP01, CP04 y CP10. Para cada señal se ha removido la contribución de mareas por medio del modelo TPX08. Con línea segmentada negra se adjunta el ajuste de una señal de período largo modelada mediante b-splines cúbicos. En los paneles de la 46 5.5**Registros de presión finales.** En los datos que se exhiben en colores se muestran las series de tiempo una vez removida la deriva instrumental. Además en cada panel y con línea negra se muestran los datos descontando una estimación del modo común de error (Primera 47PSDs registros de presión. En escala de color se muestra la PSD calculada mediante el 5.6método de Welch para cada uno de los días escogidos (día juliano y año respectivo indicados en formato ddd-yy). Mientras que los registros en las estaciones CP01, CP04 y CP10 son 49bastante coherentes se observa un mal desempeño instrumental de los sitios CP02 y CP03. 5.7Estimación de desplazamientos equivalentes de la deriva de período largo. En flechas rojas se indica el desplazamiento vertical de las estaciones, inferido por medio de los registros de presión. Los números sobre cada flecha indican el orden en que se observa el comienzo del transiente de período largo en cada estación. 50Transiente de desplazamiento APGs Chile-PEPPER. Evento A. A las 23:05 UTC 5.8del 10 de mayo del 2012 se observa un transiente del tipo escalón, es decir, instantáneo para la tasa de muestreo del registro. En cada panel se muestra el desplazamiento vertical de los instrumentos. En línea negra segmentada se muestra el ajuste de mínimos cuadrados para 52cada sensor, con desplazamientos estimados en -1.06 cm, 0.66 cm y 0.32 cm. . . . . .

5.9	<b>Transiente de desplazamiento APGs Chile-PEPPER. Evento B.</b> A las 19:40 UTC del 17 de junio del 2012 se observa un desplazamiento gradual con duración de $\approx$ 4.00h. En los paneles se muestran las series registradas por cada instrumento y en línea negra segmentada se indica el ajuste de mínimos cuadrados respectivo. Los desplazamientos estimados son -1.65 cm, -1.67 cm y 2.95 cm, siguiendo los paneles de arriba a bajo	52
5.10	<b>Transiente de desplazamiento APGs Chile-PEPPER. Evento C.</b> El 06 de enero del 2013 aparece un transiente complejo en las series de tiempo del desplazamiento. En él parece distinguirse la superposición de dos fenómenos, los que no logran modelarse de forma adecuada. La señal completa tiene una duración de aproximadamente dos semanas	53
6.1	Mapa del centro-sur de Chile y área de estudio del proyecto CERS. El mapa de color muestra la batimetría de alta resolución compilada por Weinrebe and Hasert (2015). En diamantes blancos se indica la ubicación de los sensores APG y con una estrella roja la del epicentro del terremoto del 27 de febrero del 2010, $M_w = 8.8$ (CSN). Se gráfica además la sismicidad obtenida del catálogo del CSN ( $M_w \ge 4.0$ ) en el período 2010/03/01-2011/03/31, los puntos negros representan la sismicidad previa a la instalación de los APGs y los puntos blancos la que ocurrió durante el transcurso del experimento. En puntos azules se indica la sismicidad ( $M_w < 4.0$ ) que fue detectada por la red del CSN	58
6.2	Series de tiempo residuales para los sensores (a) BPR001 (T1) y (b) VSM01 (T2). En el panel superior se muestra la serie de tiempo de presión una vez removida las mareas, con línea segmentada negra se grafica la serie predicha con los parámetros estimados para el modelo de deriva. En el panel del medio e inferior se muestran la serie de tiempo removiendo sólo la deriva instrumental y restando el resto de transientes respectivamente. Notar que la escala vertical está en unidades de presión.	63
6.3	Series de tiempo de elevación del fondo oceánico. Panel superior: Elevación del fondo oceánico en los sitios de medición BPR001 y VSM00, los que se indican en rojo y azul respectivamente. Panel inferior: Diferencia en la elevación del sitio BPR001 $(T_1)$ con respecto a VSM001 $(T_2)$ .	64
6.4	<b>Desplazamiento vertical del fondo marino.</b> a) En el panel superior se muestran el desplazamiento vertical en los sensores BPR001 $(T_1)$ y VSM001 $(T_2)$ , con línea sólida roja y azul respectivamente. Las líneas punteadas en cada serie de tiempo muestran la tendencia de los registros. En el panel inferior, con línea negra, se muestra la elevación relativa de $T_1$ respecto a $T_2$ en el período señalado. La línea punteada roja muestra los datos predichos mediante una estimación de mínimos cuadrados según el modelo descrito en el texto principal b) Las leyendas las mismas que en a) salvo que en el panel inferior de la presente, se indican con letras B, C D y E los transientes de deformación descritos en el texto principal. Las circunferencias de color azul señalan episodios subsidencia y las de color rojo de alzamiento.	68
6.5	Sismicidad del catálogo del CSN durante la operación de la red temporal de APGs. En cada subfigura (a)-(e) se muestra la sismicidad correspondiente al período indicado, el cual se halla asociado a cada uno de los transientes de deformación descritos en el cuerpo principal. En puntos grises se han graficado los sismos con $M < 4.0$ mientras que la sismicidad $M \ge 4.0$ se ha graficado con la escala de color indicada bajo cada panel. Los diamantes blancos son las estaciones APG y la escala de color en las barras sirve para identificar la evolución temporal de la sismicidad	70
6.5	Cont	71

- 6.6 Funciones de distribución marginales para el sismo de Cobquecura,  $M_w = 6.0$ , 28 de marzo del 2010. En cada panel se indica la fdp 2D a posteriori, para cada combinación de coordenadas en pares ((lon, lat), (lat, z), (lon, z)). La escala de colores muestra la verosimilitud escalada a su valor máximo. El círculo amarillo corresponde a la estación T1; las estrellas roja, celeste y amarilla corresponden a los hipocentros del GCMT, CSN y NEIC respectivamente, siendo estas últimas dos puestas en transparencia pues están levemente fuera del mapa a profundidad de 21.5 y 20.0 km respectivamente. El diamante azul corresponde al modelo  $\mathbf{m}_{MAP}$ . La línea segmentada negra corresponde a la fosa y las líneas de contorno grises a la profundidad de la interfaz de subducción de acuerdo al SLAB1.0 756.7Marginales 1D sismo de Cobquecura,  $M_w = 6.0$ , 28 de marzo del 2010. Se muestran las distribuciones marginales de las coordenadas del centroide (lon, lat y  $z_s$ ) de modo tal que en la abscisa se grafica una medida normalizada de  $\mathcal{L}(\mathbf{m})$ . La constante de normalización 756.8 Funciones de distribución marginales sismo de Constitución,  $M_w = 6.3$ , 14 de febrero del 2011. La leyenda de esta figura es idéntica a la de la figura 6.6. 76

- 7.5 Sanriku-oki: predicción series de tiempo de desplazamiento. Se muestran las series de tiempo originales (en color) y las predicciones obtenidas (línea sólida negra) en cada estación, al re-estimar los parámetros mediante sustracción de un ruido de modo común o CME (*Common Mode Error noise*) descrito en la sección de procesamiento. Las unidades de desplazamiento están en cm y el tiempo se muestra en días desde el 01/01/2011. . . .
- 7.6 Sanriku-oki: mapa de desplazamiento vertical del cosísmico y *afterslip*. a) Las flechas rojas corresponden a los desplazamientos cosísmicos estimados en las estaciones APG, las cuales se señalizan con pentágonos amarillos. La batimetría se muestra con líneas negras las curvas de nivel intercaladas cada 1000 m. El frente indicado con triángulos corresponde a la fosa de Japón. b) Idéntico a a) salvo que las flechas representan el total de desplazamiento *postsísmico* de cada estación, acumulado entre el 9 y 11 de marzo del 2011. . . . . . .
- 7.8 Distribución de *slip* cosísmico para el terremoto de Sanriku-oki obtenido por Ruiz et al. (2018). Se muestra la distribución espacial de los desplazamientos cosísmicos en escala de colores (cm) obtenidos mediante un método de inversión cinemático que incorpora datos sismológicos y geodésicos, incluyendo las estimaciones de APG presentadas en este capítulo. Los círculos blancos corresponden a la sismicidad, con profundidad  $\leq$  60 km, localizada por la JMA(M<sub>JMA</sub> $\geq$  1.5) en el período transcurrido entre el precursor y mainshock. Las curvas de nivel en azul corresponden al modelo de *slip* de Minson et al. (2014) para el terremoto de Tohoku-oki. Los contornos en gris representan la interfaz de subducción de acuerdo al modelo de SLAB1.0 (Hayes et al., 2012) y las curvas de nivel se intercalan cada 10 km. La línea punteada corresponde a la fosa de Japón. Las estrellas azul y roja corresponden a los epicentros del mainshock y precursor respectivamente. . . . . .
- 8.1 Sistema coordenado utilizado para el cálculo de los desplazamientos estáticos. Sistema de coordenadas de Okada (1992), modificado del artículo del mismo autor. Se indica el sistema coordenado de mano derecha que se ha usado, donde  $x_i$  son las coordenadas del punto de observación y  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ son las coordenadas de la aplicación de una fuerza puntual e impulsiva de magnitud F. La fuerza ubicada  $(\xi_1, \xi_2, -\xi_3)$  corresponde a una fuerza imagen. 95

89

88

- 8.8 **Distribución de estaciones utilizada para la red artificial**. En diamantes rojos se indican las estaciones de GPS terrestres que pueden tener 2 o 3 componentes y en círculos morados se indican las estaciones de APG. Las líneas sólidas negras corresponden a las curvas de nivel de la batimetría cuya profundidad se haya en el rango de los 1000-6000 m. El mecanismo focal mostrado en la figura corresponde al sismo que se usó para la generación de datos sintéticos, el que corresponde a un sismo interplaca. El centroide del sismo se indica en el extremo de la línea negra que está más lejano al mecanismo focal. 108
- 8.10 Inversión del tensor de momento sísmico usando observaciones de sensores APGs. Soluciones del mecanismo focal en profundidad. En los paneles de la izquierda se grafica el misfit y mecanismo focal asociados a la solución que minimiza localmente el error dad una profundidad. En los panel de la derecha se grafica con diamantes azules y línea segmentada la magnitud versus profundidad, asociadas a la solución antes descrita. Los paneles de arriba y abajo son los resultados de la inversión del tensor completo y deviatórico respectivamente. En los cuatro paneles los símbolos de color amarillo, diamante y mecanismo focal, muestran el mecanismo focal del tensor a estimar. La profundidad de la fuente se fijó en 25 km.
- 8.11 Inversión del tensor de momento sísmico usando observaciones de sensores APGs y GPS3d. Solución del tensor de momento sísmico (a) completo y (b) deviatórico. El mapa de colores representa el misfit graficado en una grilla que muestra en escala de colores cálidos el logaritmo del misfit a la profundidad en la que se obtiene la solución que minimiza globalmente el error. Las flechas azules y rojas corresponden a las residuales entre los datos predichos y los sintéticos en las componentes vertical y horizontal respectivamente. Con cuadrados se indican las estaciones dónde se generaron las observaciones sintéticas. En rojo y amarillo se indican: la solución obtenida y el mecanismo con el que se generaron los datos sintéticos. La ubicación del centroide se señala con las línes negras que salen de los mecanismos. . . . .

- 8.12 Inversión del tensor de momento sísmico usando observaciones de sensores APGs y GPS3d. Soluciones del mecanismo focal en profundidad. En los paneles de la izquierda se grafica el *misfit* y mecanismo focal asociados a la solución que minimiza localmente el error dada una profundidad. En los panel de la derecha se grafica con diamantes azules y línea segmentada la magnitud versus profundidad, asociadas a la solución antes descrita. Los paneles de arriba y abajo son los resultados de la inversión del tensor completo y deviatórico respectivamente. En los cuatro paneles los símbolos de color amarillo, diamante y mecanismo focal, muestran el mecanismo focal del tensor a estimar. La profundidad de la fuente se fijó en 25 km.

- 8.15 Inversión del tensor de momento sísmico para el Terremoto de Tocopilla del 2007,  $M_w = 7.7$ . Soluciones del mecanismo focal en profundidad.. En los paneles de la izquierda se grafica el *misfit* y mecanismo focal asociados a la solución que minimiza localmente el error a una profundidad dada. En los paneles de la derecha se grafica con diamantes azules y línea segmentada, la magnitud versus profundidad asociadas a la solución antes descrita. Los paneles de arriba y abajo son los resultados de la inversión del tensor completo y deviatórico respectivamente. En los cuatro paneles los símbolos de color amarillo (diamante y mecanismo focal) muestran la solución del tensor de momento reportada por el gCMT, así como también la línea segmentada amarilla, que indica la profundidad publicada por este mismo catálogo. . . .

8.17 Inversión del tensor de momento sísmico para el Terremoto de Sanrikuoki del 2011,  $M_w = 7.3$ . Soluciones del mecanismo focal en profun**didad.** En los paneles de la izquierda se grafica el *misfit* y mecanismo focal asociados a la solución que minimiza localmente el error a una profundidad dada. En los paneles de la derecha se grafica con diamantes azules y línea segmentada, la magnitud versus profundidad asociadas a la solución antes descrita. Los paneles de arriba y abajo son los resultados de la inversión del tensor completo y deviatórico respectivamente. En los cuatro paneles los símbolos de color amarillo (diamante y mecanismo focal) muestran la solución del tensor de momento reportada por el gCMT, así como también la línea segmentada amarilla, que indica la profundidad publicada por este mismo catálogo. . . . 1268.18 Inversión del tensor de momento deviatórico para el Terremoto de Iquique del 2014,  $M_w = 8.1$ . El mapa de color muestra el valor del misfit para la grilla del centroide a la profundidad en que se alcanza el mínimo global. Los triángulos invertidos de color rojo indican las estaciones GPS utilizadas en la inversión y las flechas negras y azules los residuales en las componentes horizontal y vertical respectivamente. Los mecanismos en rojo y amarillo son: la mejor solución de mínimos cuadrados y la del gCMT respectivamente. La barra de colores corresponde al  $\log_{10}(\text{misfit})$ . 1288.19 Inversión del tensor de momento sísmico para el Terremoto de Iquique del 2014,  $M_w = 8.1$ . Soluciones del mecanismo focal en profundidad. En los paneles de la izquierda se grafica el *misfit* y mecanismo focal asociados a la solución que minimiza localmente el error a una profundidad dada. En los paneles de la derecha se grafica con diamantes azules y línea segmentada, la magnitud versus profundidad asociadas a la solución antes descrita. Los paneles de arriba y abajo son los resultados de la inversión del tensor completo y deviatórico respectivamente. En los cuatro paneles los símbolos de

	<b>`</b>	•	/		
de momento	reportada j	por el gCMT,	así como t	ambién la líne	ea segmentada
amarilla, que	indica la p	rofundidad pu	ıblicada por	· este mismo c	atálogo

129

A.1	Series de tiempo decimadas APGs. Se muestran las trazas con los datos obtenidos en cada APG luego de la decimación. Las unidades de presión se encuentran en $mH_2O$ y el tiempo es en días desde el 10 de mayo del 2012 (comienzo del experimento). El código de la estacióne está indicado en la parte superior de cada figura	146
A.2	Modos temporales de la descomposición SVD de registros de APGs. En cada panel se adjuntan los modos espaciales de la descomposición SVD de los datos de presión. El orden de los modos 1 <sup>ero</sup> , 2 <sup>do</sup> y 3 <sup>ero</sup> es descendente dependiendo del valor propio asociado a cada modo (varianza).	147
A.3	Modos espaciales y espectro de valores singulares de la descomposición SVD de registros de APGs. En el panel superior de la izquierda se muestra el espectro de valores singulares de las tres componentes principales. En los siguientes paneles se grafican mapas con los modos espaciales asociados a cada componente principal.	147
A.4	<b>Ejemplos de registros de APG en la zona de subducción de Cascadia</b> . Se muestran las series de tiempo medidas en dos sitios, indicados en la parte superior de cada figura, durante los años 1 y 3 de la iniciativa (izquierda y derecha respectivamente).	148

color amarillo (diamante y mecanismo focal) muestran la solución del tensor

A.5	<b>Raw data de registros APGs</b> . Las estaciones $bpr001(T_1)$ y $vsm001(T_2)$ se muestran en rojo (panel inferior) y azul claro (panel superior) respectivamente. Amplitud de la señal en [hPa] y duración del registro desde la fecha de instalación en 2010 hasta la fecha de recuperación en 2011.	152
A.6	<b>Predicción de marea mediante registros de presión</b> . Los constituyentes de marea han sido estimados por minimización de norma $L_1$ con el software de MATLAB <b>UTide</b> . <b>Panel de arriba</b> : Predicción en estación $bpr001(T_1)$ . <b>Panel de abaio</b> : Predicción de vsm $001(T_2)$ .	152
A.7	. Detided pressure time series are shown along with initial models (segmented black line) used for instrumental drift estimation. <b>Top:</b> Station $bpr001(T_1)$ detided pressure records. <b>Bottom:</b> Station $vsm(T_2)$ detided pressure records.	153
A.8	Espectro de amplitud de Fourier de registros de APG. Las estaciones $bpr001(T_1)$ y vsm001( $T_2$ ) se muestran en rojo y azul claro respectivamente. En el panel de arriba se observan los peaks de los armónicos diurnos y semi-diurnos mientras que en el panel de abajo se muestran los constituyentes de marea de período corto (> 1h)	154
A.9	Fourier spectrum amplitude for pressure records. The amplitude at each frequency is shown in red and light blue at sites $bpr001(T_1)$ and $vsm001(T_2)$ respectively. Sumperimposed in solid black line is shown the fourier spectra of detided records (Fig. A.7), power at diurnal and semidiurnal periods is noticeably reduced	155
A.10	Salinity profile as function of pressure at CTD sites M2 and T2 $\ldots$ .	156
A.11	Temperature profile as function of pressure at CTD sites M2 and T2 $\ldots$ .	156
A.12	Surface vertical static displacements. Vertical displacements along a E-W profile crossing the source centroid, which have been computed for different source mechanisms and medium elastic properties (a) dip, (b) Young's modulus E, (c) Poisson ratio $\nu$ and (d) source depth. The source has been modelled as a dislocation ith uniform slip embedded in an elastic, isotropic, homogeneous halfspace.	157
A.13	Coseismic surface displacements following the $28^{th}$ March 2010, $M_w = 6.0$ Cob- quecura event. Surface vertical static displacements are shown together with the trench axis (black dash-dotted line) and plate interface iso-depths contours (gray dashed line). Filled stars represent the epicenter as reported by different agencies, GCMT(red), NEIC(yellow), CSN(cyan) and the filled yellow circle shows bpr001 location. Surface displacement contours are indicated with solid black lines and the colorbar indicates the amplitude of vertical dis-	159
A.14	placements	199
	solid black lines and the colorbar indicates the amplitude of vertical displacements. $\ldots$	159
A.15	Espectro de valores singulares para la descomposición SVD ( <i>Singular Value De-</i> <i>composition</i> ), Sanriku-oki 2011. Se muestran los valores singulares de la descomposición SVD, normalizados por el máximo de ellos.	160
C.1	Pares de fuerzas que representan las componentes del tensor de momento sísmico $M_{pq}$	171

C.2	<b>Desplazamientos estáticos en falla de tipo</b> <i>dip-slip</i> vertical. En ambos paneles las flechas grises indican los desplazamientos horizontales y la escala de color para los verticales, todos en unidades de cm. En el panel a) se muestran los desplazamientos calculados mediante las rutinas del Cap. 8 y en b) los residuales entre estos desplazamientos y la rutina DC3D0.	173
C.3	<b>Desplazamientos estáticos en falla de tipo dip-slip oblicuo</b> (45°).En ambos paneles las flechas grises indican los desplazamientos horizontales y la escala de color para los verticales, todos en unidades de cm. En el panel a) se muestran los desplazamientos calculados mediante las rutinas del Cap. 8 y en b) los residuales entre estos desplazamientos y la rutina DC3D0.	174
C.4	<b>Desplazamientos estáticos generados por una fuente explosiva</b> . En ambos paneles las flechas grises indican los desplazmientos horizontales y la escala de color los verticales, todos en unidades de cm. En el panel a) se muestran los desplazamientos calculados mediante las rutinas del cap. 8 y en b) los residuales entre estos desplazamientos y la rutina DC3D0	174
C.5	<b>Desplazamientos estáticos</b> <i>tensile-crack</i> . En ambos paneles las flechas grises indican los desplazmientos horizontales y la escala de color los verticales, todos en unidades de cm. En el panel a) se muestran los desplazamientos calculados mediante las rutinas del cap. 8 y en b) los residuales entre estos desplazamientos y la rutina DC3D0	175
C.6	Inversión del tensor de momento sísmico y mapas de misfit sólo con APGs. La escala de colores muestra el logartimo en base 10 del misfit asociado a la solución de mínimos en cada punto de la grilla. La estrella roja y el diamante blanco son la solución de mínimo error y el centroide verdadero respectivamente.	177
C.7	Inversión del tensor de momento sísmico con APGs y GPSs de tres componentes. Mapas de misfit. La escala de colores muestra el logarítmo en base 10 del misfit asociado a la solución de mínimos en cada punto de la grilla. La estrella roja y el diamante blanco son la solución de mínimo error y el centroide verdadero respectivamente. (a) Tensor completo y (b) Tensor deviatórico	178
C.8	Fuente finita escenario Tocopilla, terremoto hipotético $M_w = 8.0$ . Campo de despla- zamiento y residuales predichos con la con la solución de mínimo misfit. En los paneles (a) y (b) se muestra el campo de desplazamiento predicho por las soluciones de tensor completo y deviatórico respectivamente, en cambio en los paneles (c) y (d) se muestran los residuales obtenidos en el mismo orden	179
C.9	Fuente finita escenario Tocopilla. Mapa de Misfit para tensor de momento sís- mico deviatórico. La escala de colores muestra el logartimo en base 10 del misfit asociado a la solución de mínimos cuadrados en cada punto de la grilla. La estrella roja y el diamante blanco son la solución de mínimo error y el centroide verdadero respectivamente. Terremoto hipotético (a) $M_w = 7.0$ y (b) $M_w = 8.0.$	180
C.10	Fuente finita escenario Tocopilla, terremoto hipotético $M_w = 8.0$ . Solución de Mecanismos en profundidad. En los paneles de la izquierda se muestra el mecanismo que se obtiene en el mínimo local de misfit para una profundidad dada, en el panel de la derecha se indica la magnitud obtenida para cada una de estas soluciones. Los símbolos rojos (mecanismos y diamantes) son los mínimos locales y los símbolos amarillos representan la solución verdadera. En los paneles de arriba se muestra la solución obtenida con el tensor de momento sísmico completo, mientra que abajo se muestra la solución con fuente puramente deviatórica.	181

C.11 Terremoto de Tocopilla. Mapas de misfit en 2D, obtenidos a la profundidad, longitud y	
latitud del centroide óptimo, en los paneles $(a)$ , $(b)$ y $(c)$ respectivamente. La escala de colores	
muestra el logarítmo en base 10 del misfit asociado a la solución de mínimos cuadrados en	
cada punto de la grilla. La estrella roja y el diamante blanco son la solución de mínimo error	
y el centroide verdadero respectivamente	183
C.12 Terremoto de Tocopilla. Campo de desplazamiento y residuales predichos con la solución	
de mínimo misfit. En los paneles (a) y (b) se muestra el campo de desplazamiento predicho	
por las soluciones de tensor completo y deviatórico respectivamente, en cambio en los paneles	
(c) y (d) se muestran los residuales obtenidos en el mismo orden	184
C.13 Terremoto de Sanriku-oki. La escala de colores muestra el logartimo en base 10 del misfit	
asociado a la solución de mínimos en cada punto de la grilla. La estrella roja y el diamante	
blanco son la solución de mínimo error y el centro ide verdadero respectivamente $\ .\ .\ .$	185
C.14 Terremoto de Sanriku-oki. Campo de desplazamiento y residuales predichos con la so-	
lución de mínimo misfit. En los paneles (a) y (b) se muestra el campo de desplazamiento	
predicho por las soluciones de tensor completo y deviatórico respectivamente, en cambio en	
los paneles (c) y (d) se muestran los residuales obtenidos en el mismo orden. $\ldots$	186
C.15 Terremoto de Iquique. La escala de colores muestra el logartimo en base 10 del misfit	
asociado a la solución de mínimos en cada punto de la grilla. La estrella roja y el diamante	
blanco son la solución de mínimo error y el centro ide verdadero respectivamente $\ .\ .\ .$	187
C.16 Terremoto de Iquique. Campo de desplazamiento y residuales predichos con la solución	
de mínimo misfit. En los paneles (a) y (b) se muestra el campo de desplazamiento obtenidos	
con tensor completo y deviatórico respectivamente mientras que en los paneles (c) y (d) se	
muestran los residuales en el mismo orden.	188