



UNIVERSIDAD DE CHILE



Informe
Programa de Riesgo Sísmico
2016
Universidad de Chile



UNIVERSIDAD DE CHILE





ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	6
ANTECEDENTES	8
Una Actividad de Interés Nacional en la Universidad de Chile	8
Nacimiento del PRS	9
Organización actual del PRS	10
PROYECCIÓN DEL PROGRAMA	14
Curso de Formación General	14
Relación de trabajo con organismos públicos	15
ACTIVIDADES REALIZADAS Y LOGROS ALCANZADOS 2014-2016.....	17
1. Proyecto Línea Infrasonido remoto para identificación de eventos sísmicos volcánicos en Chile	17
2. Proyecto Línea Riesgo Sísmico: Método para la estimación analítica de altura de tsunami (run-up) en las zonas costeras para terremotos tsunamigénicos ($M>7$) dentro de los primeros 10 a 15 minutos con modelo de fuente sísmica finita. Fase I.	27
3. Proyecto Línea de Tsunamis: Desarrollo de una metodología y herramienta para la estimación del Riesgo de Tsunami en Chile.....	32
4. Proyecto Línea Inversión del Tensor de Momento Sísmico	37
5. Proyecto Desarrollo e implementación de herramientas y metodologías para estudio de terremotos usando datos de tsunami	40
6. Proyecto Línea Peligro Sísmico: Estimación de la amenaza sísmica en Chile Central con manejo de escenarios; Etapa I.	46
.....	48
7. Proyecto Línea Tsunamis: Aplicaciones de alerta temprana	49
8. Proyecto: Difusión educacional y aplicaciones	54



9. Proyecto: Desarrollo de sistemas de control de calidad para la base de datos sismológica nacional	56
10. Proyecto: Nuevos algoritmos de detección automática para sistemas de monitoreo sísmico en tiempo real	57
11. Desarrollo de productos y servicios para la difusión de información sismológica... ..	58
12. Proyecto: Incorporación de los nuevos antecedentes relativos al peligro sísmico en los planes regionales de la Región Metropolitana de Santiago.....	59
(a) Propuesta de incorporación de los nuevos antecedentes relativos al peligro sísmico en el Plan Regional de Ordenamiento Territorial.	59
(b) Participación en el Consejo Público Privado de Santiago.....	60
Resiliente.....	60
(c) Partner académico de la Intendencia en la temática del riesgo sísmico en la Región Metropolitana de Santiago.....	60
13. Proyecto: Investigación interdisciplinaria sobre la crisis sísmica e institucional de Aysén 2007.....	61
14. Proyecto: Curso de Formación General interdisciplinario sobre desastres en Chile. ..	62
15. Proyecto: Diploma de Postítulo de la FCFM, “Ingenierías & Ciencias aplicadas a la Reducción del Riesgo de Desastres”	64
16. Proyecto: Fiesta de las Ciencias Explora 2015	65
17. Proyecto: Tenten, participación al concurso AULAB 2015	66
18. Proyecto Caracterización Geofísica de la Cuenca de Santiago para la estimación de Riesgo Sísmico	68
19. Proyecto: Nuevas estimaciones del peligro sísmico en la cuenca de Santiago con métodos probabilísticos.....	75
20. Proyecto: Nuevas estimaciones del peligro sísmico en la cuenca de Santiago con método semi-determinístico	79
21. Proyecto: Nuevos modelos de propagación de ondas a escala regional en la zona central de Chile	80
22. Proyecto: Construcción de un modelo de velocidad 3D de la cuenca de Santiago a escala métrica	81



UNIVERSIDAD DE CHILE



23. Proyecto Modelamiento microscópico: Física estadística de la deformación frágil (sismos/fallas) en la corteza.....	85
24. Proyecto Sismotectónica Falla San Ramón.....	88
GESTIÓN PRESUPUESTARIA 2016.....	89
GESTIÓN PRESUPUESTARIA 2015.....	91
GESTIÓN PRESUPUESTARIA 2014.....	93



UNIVERSIDAD DE CHILE



INTRODUCCIÓN

El Programa de Riesgo Sísmico (PRS) es una iniciativa de la Universidad de Chile, con financiamiento vía Ley Anual de Presupuesto, alojado en el Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Está orientado a la transferencia tecnológica y de conocimientos, desde la academia a la sociedad, a través de la investigación, el desarrollo y la innovación (I&D+I) en torno a nuestra realidad sismológica. Este proyecto se encuentra enmarcado dentro de las Actividades de Interés Nacional (AIN) que lleva adelante la Universidad de Chile.

Desde su creación en el año 2000, el PRS ha desarrollado diversas líneas de trabajo orientadas a la transferencia tecnológica y de conocimientos, a través de la investigación, el desarrollo y la innovación, desde la academia a la sociedad. En 16 años ha impulsado iniciativas que van en directo beneficio de instituciones públicas que participan en la gestión de los riesgos sismológicos en nuestro país.

El Programa Riesgo Sísmico anima una importante actividad de investigación y extensión focalizada a la transferencia tecnológica y difusión educativa en el tema del riesgo sísmico en Chile. Es una comunidad de más de 30 especialistas, de los cuales 11 son estudiantes de pre y postgrado, 2 postdocs, y más de 17 investigadores, de los cuales 6 son académicos jornada completa, 2 profesores expertos y 2 profesores sénior invitados.

El impacto científico-tecnológico en el periodo 2014 – 2016 se refleja en 29 publicaciones ISI, 34 presentaciones en workshop internacionales y 11 tesis de grado, dos de ellas de doctorado.

En lo que va corrido del año 2016, el PRS ha publicado 18 artículos. Todo este trabajo ha contribuido a fortalecer las capacidades científicas y tecnológicas del país en temas de sistemas de detección, alerta temprana y modelamiento de tsunamis. A nivel regional, se destacan los avances en temas de caracterización de la amenaza sísmica en la zona central de Chile, en particular en la Región Metropolitana de Santiago, y las acciones de difusión educativa en colegios de las Regiones VIII, XI, V y RM.



UNIVERSIDAD DE CHILE



El PRS tiene también una fuerte impronta de colaboración con instituciones públicas y privadas, que en el último año se ha traducido en fluidas colaboraciones con la Intendencia de la Región Metropolitana, el GORE de RM, el Ministerio de Obras Públicas, el Senado de la República, la Superintendencia de Bancos e Instituciones Financieras, Colegios Profesionales, etc.

En la academia el PRS contribuye con seminarios, docencia y formación de especialistas en el tema de riesgo sísmico. Al menos dos destacados profesores son invitados a Chile cada año para impartir cursos y seminarios en sismología teórica y/o temas de frontera mejorando la oferta en la formación del capital humano avanzado del país.

A partir de 2014, el PRS ha realizado un proceso de fortalecimiento de su institucionalidad, lo que le ha permitido no sólo organizar y guiar su actividad, sino también dar cuenta y reportar su trabajo a través de informes periódicos que incluyen su gestión presupuestaria anual, además de la información disponible permanentemente a través de su sitio web <http://dgf.uchile.cl/riesgosismico/index.html>

Adicionalmente, los resultados del PRS han sido presentados en otras instancias, como la Comisión Futuro del Senado.

El presente informe 2016 da continuidad a los reportes anteriores y pretende mostrar el avance en las diferentes líneas de investigación y desarrollo de innovación tecnológica.

Cabe destacar que estos avances han aportado importantes conocimientos respecto de los últimos eventos sísmicos de gran magnitud que han afectado nuestro país, en cuanto a terremotos y tsunamis. Como una muestra de aquello, en el Anexo N° 1 se incluyen algunos recortes de prensa que resultan ilustrativos.



UNIVERSIDAD DE CHILE



ANTECEDENTES

Una Actividad de Interés Nacional en la Universidad de Chile

La Universidad de Chile históricamente ha aportado sus conocimientos para dar respuesta a las demandas específicas del Estado. De hecho, en la actualidad, el país cuenta con instituciones que realizan tareas estratégicas y que están o estuvieron vinculadas al trabajo y las investigaciones de la Universidad de Chile, específicamente del Departamento de Geofísica. Un ejemplo de aquello es la Dirección Meteorológica de Chile que tuvo su origen en la Universidad de Chile.

Lo anterior es una prueba, entre muchas otras, de que esta Universidad ha desarrollado desde sus inicios un extenso abanico de actividades de interés nacional e impacto regional, en directo beneficio del país.

Con el fin de llevar adelante estas iniciativas nacionales, la Universidad de Chile creó la categoría denominada Actividad de Interés Nacional (AIN). De acuerdo al Instructivo N°28 de fecha 14 de Noviembre de 2014 del Vicerrector de Asuntos Económicos y Gestión Institucional que “Aprueba instrucciones sobre operaciones para la ejecución de los convenios de actividades de interés nacional”: “Las Actividades de Interés Nacional (AIN) se rigen por un convenio entre la Universidad de Chile y el Ministerio de Educación, el cual requiere contar con mayor detalle, que asegure la pertinencia y la oportunidad del gasto acorde a los términos del convenio ya mencionado. Lo anterior requiere un registro ordenado y sistemático de los gastos referido a las actividades y/o proyectos los cuales deberán ser informados tanto a las autoridades de la universidad como a las autoridades externas (Contraloría General de la República (CGR) o al Ministerio de Educación (MINEDUC) en las instancias que corresponda”.



UNIVERSIDAD DE CHILE



El Instructivo antes mencionado define como Actividad: “Toda labor realizada de modo permanente que forma parte del quehacer propio y constante que se desarrolla al interior de cada una de las Facultades, Centros, Programas, Institutos, etc. de la Universidad. Se caracterizan por generar un vínculo con la ciudadanía, a través del conocimiento y el quehacer generado por la Universidad de Chile, y por la prestación de servicios a la comunidad (...)”

El PRS es, de esta manera, una AIN. Es un programa de la Universidad de Chile, con financiamiento propio vía Ley Anual de Presupuesto, alojado en el Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Está básicamente orientado a la transferencia tecnológica y de conocimientos, desde la academia a la sociedad, a través de la investigación, el desarrollo y la innovación (I&D+I), además de la extensión para la sensibilización de nuestra sociedad en torno a nuestra realidad sísmológica.

El PRS pretende constituirse en un nexo virtuoso entre los sísmólogos del Departamento de Geofísica y el Centro Sísmológico Nacional, en todas aquellas áreas y/o materias en que confluyan sus intereses y/o investigaciones, asegurando la transferencia de conocimientos y tecnologías que aportan a la gestión de riesgos socio naturales en nuestro país.

Nacimiento del PRS

El Programa de Riesgo Sísmico tiene su origen en 1999. Ese año, el Estado inició un incipiente apoyo económico para mejorar el sistema de monitoreo sísmico del país, operado hasta ese momento por el Servicio Sísmológico Nacional (SSN), el cual era mantenido exclusivamente con los aportes del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Se respondía así a las necesidades y carencias del país en materias de monitoreo sísmico y de investigaciones sísmológicas y tsunamigénicas.

Luego de gestiones realizadas ante el Congreso Nacional, a partir del año 2000, el Servicio Sísmológico Nacional comenzó a recibir recursos de forma periódica, por glosa especial en el ítem Universidad de Chile de la Ley de Presupuesto de la Nación. Para formalizar este aporte, se gestionó con las Vicerrectorías de Asuntos Económicos y Gestión Institucional (VAEGI) y de Investigación y Desarrollo (VID) la creación de una Actividad de Interés Nacional (AIN) denominada “Programa de Riesgo Sísmico” (PRS).



UNIVERSIDAD DE CHILE



Por otra parte, en el año 2009, el Rector de la Universidad de Chile, mediante la dictación del Decreto Universitario Exento N° 0011718, sanciona la creación del Centro Sismológico Nacional (CSN), como entidad nueva, distinta, separada del Departamento de Geofísica y dependiente del Decano de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, el cual pasó a sustituir al SSN. No obstante, el CSN en sus inicios careció de financiamiento real, motivo por el cual, desde el año 2009 hasta el mes de marzo del año 2013, este centro fue mantenido con los dineros del PRS, fecha en que comenzaron a llegar las primeras remesas de recursos desde la Oficina Nacional de Emergencias (ONEMI) para la gestión y operación del CSN.

A partir del año 2014, los recursos ingresados a la Universidad de Chile vía glosa del Programa de Riesgo Sísmico, fueron re orientados en su utilización de acuerdo a las directrices entregadas por la Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo, VID, y consensuadas con la Dirección del PRS y el equipo del Programa.

Organización actual del PRS

A partir de 2014, el PRS definió que su visión es ser un programa de excelencia y vanguardia en la prevención de los desastres asociados a terremotos, que contribuya al desarrollo sustentable, orientando sus esfuerzos hacia una sociedad menos vulnerable y un país más seguro frente a la amenaza sísmica.

Su misión, en consecuencia, es asegurar la transferencia tecnológica y de conocimientos, a través de la investigación, el desarrollo y la innovación (I&D+I), desde la academia a la sociedad con productos cuyo impacto está en el ámbito de las políticas públicas y tomadores de decisiones. Particularmente el PRS permite, facilita, potencia y asegura la transferencia e innovación tecnológica efectiva desde la Academia al Centro Sismológico Nacional.

Sus objetivos apuntan a mejorar los sistemas de monitoreo y de alerta sísmica/tsunamis del país, así como también a la experimentación, innovación y desarrollo tecnológico y de nuevas líneas de trabajo para reducir los niveles de exposición y vulnerabilidad de la población a causa de terremotos, tsunamis y fenómenos extremos asociados.



Sus líneas de trabajo son:

- a) Desarrollo de Plataforma para visualización, control de calidad y acceso a la Base de Datos sismológica nacional.
- b) Diseño e implementación de herramientas para visualizar y evaluar soluciones Tensor de Momento (FMNEAR y W-Phase).
- c) Caracterización y estudios de Peligro y Riesgo Sísmico.
- d) Estudios orientados a la identificación de fallas geológicas sísmicamente activas.
- e) Implementación de programas de difusión educativa para la reducción del riesgo sísmico.
- f) Estudios para la generación, eficiencia, diseño, aplicabilidad e implementación de nuevos algoritmos destinados a mejorar los procesos de detección automática de eventos de los sistemas de monitoreo sísmico en tiempo real.
- g) Estudios y experimentación orientados a la innovación tecnológica de nuevos dispositivos observacionales (Inclinómetros, cGPS, GPS, InSAR, etc) de captura de señales sismológicas que permitan mejorar los sistemas y procesos de monitoreo sísmico y de alerta temprana.
- h) Desarrollo de un polo de investigación aplicada focalizado en tsunamis que contempla aspectos de modelamiento de tsunamis, evaluación del peligro y riesgo de tsunamis y contribuir a mejorar los sistemas de alerta temprana de tsunamis en el país.
- i) Desarrollo de programas de colaboración científica, tecnológicos y de implementación de redes sismológicas conjuntas entre universidades e institutos de investigación o instituciones del Estado y otros entes privados, a nivel nacional e internacional, para la observación y monitoreo sísmico y de sistemas de alerta temprana de tsunamis.
- j) Línea de desarrollo de productos y servicios para la difusión de información sismológica.



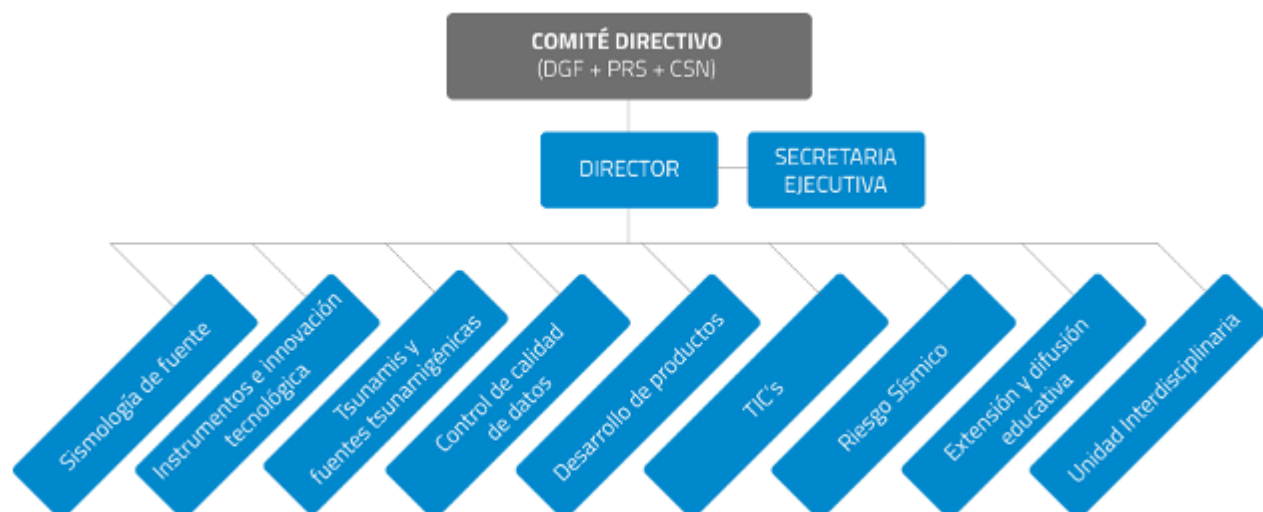
UNIVERSIDAD DE CHILE



Los **productos en desarrollo** son:

- a) Elaboración de la Base de Datos Geofísica y de las herramientas de análisis y visualización para el Mapa de Amenaza Sísmica de "Orden Cero" para la Región Metropolitana de Santiago.
- b) Desarrollo e implementación de metodología para simulación de movimientos fuertes para manejo de escenarios de Peligro y Riesgo Sísmico en el contexto de la Subducción Andina.
- c) Desarrollo e implementación de un Programa de Difusión Educativa en Colegios y Liceos a nivel nacional;
- d) Estudios destinados a identificar en el subsuelo la traza y dimensión de la Falla San Ramón en la Región Metropolitana de Santiago;
- e) Desarrollo de software para el análisis y visualización de datos sísmicos y con aplicación a la difusión educativa sobre el peligro y riesgo sísmico en colegios.
- f) Diseño, desarrollo e Implementación de un sistema de análisis e inversión del proceso de ruptura sísmica con datos de banda ancha y gran rango dinámico en campo lejano como fase inicial de la construcción en Chile de un sistema de alerta temprana de altura de ola de tsunami ante la ocurrencia de un terremoto tsunamigénico.

Para llevar adelante estas tareas, el PRS cuenta con un equipo que se organiza de la siguiente manera:





PROYECCIÓN DEL PROGRAMA

La labor del Programa de Riesgo Sísmico se ha venido fortaleciendo a través de nuevas redes de trabajo, tanto al interior de la Universidad de Chile como hacia fuera con organismos del sector público.

A nivel de la Universidad, desde hace casi dos años, el PRS ha comenzado a trabajar con un grupo especializado de investigación fundamental y aplicada que pretende aportar al país los conocimientos, para realizar una eficaz gestión de los riesgos socio naturales.

Este grupo de trabajo ha constituido un espacio transversal y multidisciplinario que promueve la coordinación, integración, desarrollo y divulgación de saberes y prácticas que sean capaces de atender eficazmente los requerimientos del Estado y de la sociedad.

En este espacio de convergencia participan académicos de la Universidad de Chile con reconocida experiencia y conocimiento en materias de gestión de riesgos de desastres sicionaturales. Cada uno de ellos aporta desde muy diversas disciplinas, tales como: psicología, economía, ingenierías, sismología, climatología, medicina, derecho, geografía y arquitectura, entre otras y se quiere abordar todos los riesgos de desastres.

En el trabajo de este grupo, en el que el PRS participa, se busca un enfoque transdisciplinario en el que se integran los diversos saberes provenientes de las disciplinas que atienden los temas de la reducción de los riesgos sicionaturales en sus distintas fases: caracterización de amenazas, prevención, mitigación, respuesta, recuperación y reconstrucción.

Curso de Formación General

Una de las iniciativas relevantes en las que ha participado el Programa de Riesgo Sísmico es el Curso de Formación General (CFG) Gestión del Riesgo de Desastres Socio Naturales, de la Universidad de Chile.



UNIVERSIDAD DE CHILE



Con él se pretende abordar, crítica e integralmente, la manera en que las situaciones de riesgo se enfrentan en Chile. Busca analizar la problemática, con toda su complejidad, en la que muchas disciplinas están comprometidas, todos los cuerpos sociales y los niveles local, comunal, nacional y mundial. En el curso de 2015 participaron 25 estudiantes. En 2016, luego de un retorno positivo, se reprobó la postulación al curso en el que están participando 30 estudiantes.

Los profesores responsables del CFG y el equipo docente está confirmado por académicos de distintas facultades de la Universidad de Chile.

Los objetivos del curso son entender los paradigmas en las políticas de reducción del riesgo de desastres siconaturales; relacionar las temáticas actuales a nivel mundial y nacional (sustentabilidad, cambio climático, descentralización y proyecto de ley de modificación de la ONEMI, entre otras) y analizar críticamente la gestión pública del riesgo de desastres socio naturales en Chile. Todo lo anterior a través de un diálogo y una reflexión transdisciplinaria, y con la participación de actores de la reducción de riesgos en Chile (MOP, SERNAGEOMIN, FUSUPO, actores privados, etc.).

Relación de trabajo con organismos públicos

En marzo 2015, el Programa de Riesgo Sísmico inició una relación de trabajo con el Gobierno Regional Metropolitano de Santiago (GORE-RMS), a través de un seminario organizado por el GORE-RMS con presencia de equipos del GORE-RMS, de Consejeros Regionales y equipos de sectores interesados (OREMI, MINVU, MOP) con el fin principal de dar cuentas de los avances y resultados obtenidos por la Universidad de Chile, y en particular por los equipos del PRS, sobre el peligro sísmico en la región.

Los equipos del GORE-RMS responsables de la planificación territorial en el marco del Plan Regional de Ordenamiento Territorial (PROT), en fase de consulta, manifestaron su interés en integrar los nuevos antecedentes de la academia en las problemáticas de efectos de sitio y de estimación de peligro asociado a la Falla San Ramón.



UNIVERSIDAD DE CHILE



Entre 2015 y 2016, el PRS fue invitado a exponer sobre estas temáticas en diferentes instancias del GORE-RMS (Comisión de Ordenamiento Territorial del Consejo Regional, proyecto “Smart Cities” de la Intendencia con IBM, proyecto “100 Resilient Cities” de la Intendencia con la Rockefeller Foundation), lo que conllevó a la presentación de una propuesta de trabajo en junio 2016.

En 2016, en el marco de la iniciativa “100 Ciudades Resilientes (100RC)” de la Fundación Rockefeller, la Intendencia de la RMS invitó al PRS como miembro del Consejo Público Privado de Santiago Resiliente. El PRS también fue invitado a ser Partner académico de referencia para la temática del riesgo sísmico en la región.



ACTIVIDADES REALIZADAS Y LOGROS ALCANZADOS 2014-2016

A continuación se presenta una síntesis de las líneas y proyectos desarrollados por el Programa de Riesgo Sísmico en el período 2016, que tiene como antecedente lo realizado en los años 2014 - 2015.

1. Proyecto Línea Infrasonido remoto para identificación de eventos sísmicos volcánicos en Chile

Investigadores: Rodrigo de Negri, Jaime Campos.

Fase I: Análisis de datos de las estaciones I13CL e I14CL del Sistema Internacional de Monitoreo de las N.U. Caso del megaterremoto M8.8 del 27/F 2010

Descripción

El presente estudio corresponde a la síntesis sobre el trabajo realizado durante el Semestre Primavera 2016 en torno al uso de infrasonido para la detección, localización, caracterización y cuantificación de actividad volcánica y sísmica en Chile. Esta línea de trabajo, en esta primera fase que lleva relativamente pocos meses de pleno desarrollo, tiene como objetivo identificar las posibles líneas de investigación y factibilidad de explotación de datos de infrasonido en el contexto andino a distancias regionales para definir un proyecto doctoral que acompañe el desarrollo del mismo. Este informe no contempló los análisis de datos a escala local, algunos de ellos existentes en Chile para algunos volcanes, como tampoco datos a escala global, eventualmente disponibles a nivel del CTBTO en Viena, Austria. Sólo se analizaron datos a escala regional capturados por los arreglos de antenas de infrasonido instalados en Isla de Pascua (a ~3.600 km) e Isla Juan Fernandez (a ~610 km). Las tareas realizadas en este periodo van desde la obtención de los datos y capacitación en el uso de



UNIVERSIDAD DE CHILE



software apropiado para manipularlos, hasta la comprensión teórica de los procesos físicos involucrados en la propagación y la fuente de la señal de infrasonido.

Actualmente se han sentado las bases y objetivos para el uso y explotación científica de datos de las estaciones IS13 e IS14 del Sistema Internacional de Monitoreo (IMS, por su sigla en inglés) en Chile, a través del trabajo en colaboración con la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), punto focal nacional y referente ante la Comisión del Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares (TPCE y su sigla en inglés es CTBT). Se busca así crear un puente de comunicación y colaboración entre la Universidad de Chile a través del PRS y la CCHEN, agilizando el uso de datos del IMS y capacitando a aquellas personas que se involucran en el proceso.

Fundamentos teóricos

El infrasonido se refiere a las ondas acústicas que se propagan en un rango de frecuencias no audible, es decir, bajo los 20 Hz. La generación de infrasonido se ve en diversos fenómenos de la naturaleza, y en particular en volcanes durante períodos de actividad. La relación más interesante desde un punto de vista geofísico es que el infrasonido propagado a través de la atmósfera se presenta en fenómenos de escalas relativamente grandes, con una atenuación inversamente proporcional a la frecuencia, permitiendo observabilidad en un rango local (15 km), regional (15 – 250 km) y global (> 250 km).

Si bien la observación de fenómenos acústicos producidos por volcanes ha sido objeto de interés desde finales del siglo XIX, tras la explosión del volcán Krakatoa (Indonesia), y las bases teóricas sobre la propagación de ondas en la atmósfera han sido desarrolladas desde trabajos fundacionales como el de Pekeris (1949), no ha sido sino desde el inicio de operaciones en 1996 del Sistema Internacional de Monitoreo a partir del Tratado Comprensivo para la Prohibición de Ensayos Nucleares, que el uso del infrasonido a escala global ha mostrado su mayor desarrollo. Se ha mostrado que el infrasonido de largo alcance ha sido efectivo en la detección, localización y caracterización de erupciones moderadas a grandes. Es por este motivo que se ha usado para crear sistemas de monitoreo de actividad volcánica (Kamo et al, 1994; Fee et al, 2011), llegando a establecerse proyectos internacionales como el proyecto ASHE (Acoustic Surveillance of Hazardous Eruptions en inglés). Proyecto piloto para mitigar el peligro de ceniza volcánica probado en Ecuador y Washington, EEUU (Garces et al, 2008), que ha utilizado de arreglos del IMS con mucho éxito para entrenar y mantener algoritmos automatizados de alerta de actividad volcánica peligrosa para la población y aviación.



Objetivos

El proyecto que nos proponemos se encuentra en una fase inicial que pretende hacer uso de los datos de las estaciones chilenas IS13 e IS14 del IMS, para investigar el nivel de infrasonido observable previo, durante y posterior a eventos sísmicos y volcánicos de gran magnitud. En particular buscamos determinar si es posible hacer uso de los arreglos mencionados para observar actividad en el territorio nacional, obteniendo un rango de resolución que permita establecer un monitoreo remoto.

Con respecto a los datos de las estaciones IS13 e IS14, se decidió partir analizando los registros de infrasonido en torno a tres eventos de magnitudes grandes: el terremoto del 27 de febrero de 2010, la erupción del volcán Puyehue-Cordón Caulle en junio de 2011, y la erupción del volcán Calbuco en abril de 2015. Las ventanas de tiempo usadas, de tres meses cada una, fueron escogidas para poder observar los cambios en torno a los momentos de mayor liberación de energía de cada evento.

Luego de analizar el procesamiento de los datos y la determinación de la factibilidad de su uso para los nes propuestos, podremos establecer la utilidad con mayor certeza de los registros de los arreglos del IMS en Chile para su uso en la investigación de fenómenos geofísicos que afectan al país y la región. Además de esto, es nuestra intención establecer una vía de comunicación, trabajo y uso de los datos existentes del IMS en el CCHEN, generando herramientas de análisis que permitan aprovechar su disponibilidad en diversas áreas de desarrollo.

Avances

El uso del infrasonido en geofísica en la actualidad está en un punto de efervescencia. Esto lo demuestran los muchos proyectos que hay en desarrollo, especialmente en Estados Unidos y Japón. Dentro de los proyectos en desarrollo cabe mencionar el uso de grandes redes sísmicas (iMush, VolcanoSRI), proyectos dedicados a la observación y monitoreo remoto (Alaska), la generación del catálogo global de volcanismo explosivo, la caracterización de actividad volcánica (Sakurijama), y la co-locación de sensores acústicos y sísmicos (Ichihara, 2012; Matoza & Fee, 2014).



El presente trabajo se puede situar dentro del área de detección y caracterización remota de fenómenos volcánicos y sísmicos mediante sensores acústicos. Se busca también hacer uso de datos sísmicos que complementen las observaciones, y permitan caracterizar mejor las fuentes. Sea como sea, no queremos restringirnos a un área específica sin antes hacer una búsqueda de todas las posibles aplicaciones en el contexto de Chile.

DETECCION DEL MEGATERREMOTO M8.8 DEL 27/F 2010

Estaciones IS13CL e IS14CL:

En Chile hay dos arreglos de alta calidad de sensores de infrasonido: IS13CL e IS14CL, ubicados en la Isla de Pascua y la Isla Robinson Crusoe, respectivamente (Figura 1) y ambos forman parte del IMS.



Figura 1. Estaciones en Chile con arreglos de antenas de infrasonido en Isla de Pascua (IS13CL) e Isla Juan Fernandez (IS14CL).



UNIVERSIDAD DE CHILE



Chile tiene acceso a dichos datos pues es parte del acuerdo del CTBTO, dándole derecho a hacer uso de ellos a través del punto focal nacional (CCHEN). El estado actual de ambos arreglos es bueno, manteniéndose activos bajo el cuidado de la CCHEN. Los datos no son aprovechados más allá de los fines del CTBTO, por lo que Chile posee un rol más bien de puente de los mismos, enviándolos continuamente a Viena desde el centro de acopio de datos. Es importante notar que en dicho lugar no existe personal capacitado para interpretar y procesar la información que obtienen, por lo que no existe un puente real entre el mundo académico chileno y el CTBTO. La intención de ambas partes (CCHEN y nosotros) es crear dicho puente, y permanecer en contacto creando instancias de capacitación (charlas, cursos, etc.).

Las estaciones IS13CL e IS14CL son remotas, queriendo decir que se encuentran a más de 250 km de distancia del continente (Figura 2). Esto implica que el análisis que se pueda realizar con dichas estaciones depende fuertemente de las condiciones de la atmósfera en la trayectoria de las ondas de sonido. El trabajo de los datos entonces requerirá la incorporación de un modelo de propagación para poder localizar las fuentes que puedan existir en el continente.

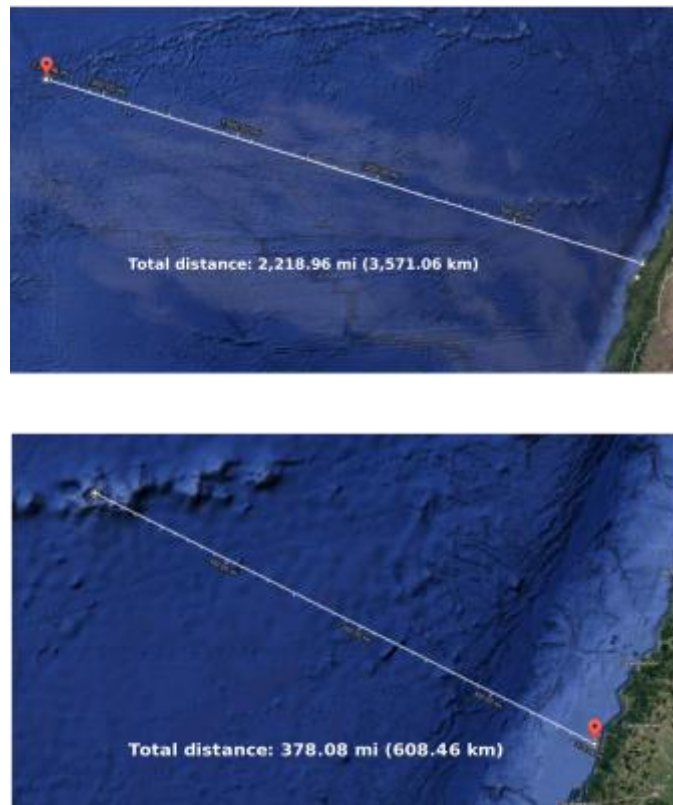


Figura 2. Imagen superior: distancia desde arreglo IS14CL a zona epicentral de la ruptura sísmica del terremoto M8.8 del 27 de febrero de 2010; Imagen inferior: distancias desde el arreglo IS13CL al mismo punto epicentral correspondiente al centroide del terremoto del 27/F 2010..

Ambas estaciones poseen ocho sensores representando un arreglo. El arreglo está dispuesto de esta forma para poder ser usado en la detección de frentes de onda coherentes.

Herramientas de análisis de datos de infrasonido del CTBTO

El CTBTO entrega a cada centro de datos una estación de trabajo con muchas herramientas para analizar datos y detectar actividad relacionada a ensayos nucleares. Las estaciones del IMS no sólo poseen sensores de infrasonido, sino que complementan otro tipo de sensores,



como los hidroacústicos y los radioactivos. Existen dos herramientas principales para el procesamiento de datos de infrasonido: Geotool y DTK-GPMCC (Figura 3). Ambos programas vienen preinstalados en una versión de CentOS6 adecuada para fines del CTBTO. Es importante notar que el acceso y uso de estas herramientas está adscrito al centro de datos de cada país, y no está pensado para ser usado de otra forma, por lo que el uso en mi propia investigación ha sido gracias a la ayuda del personal del CCHEN que nos ha facilitado las herramientas.

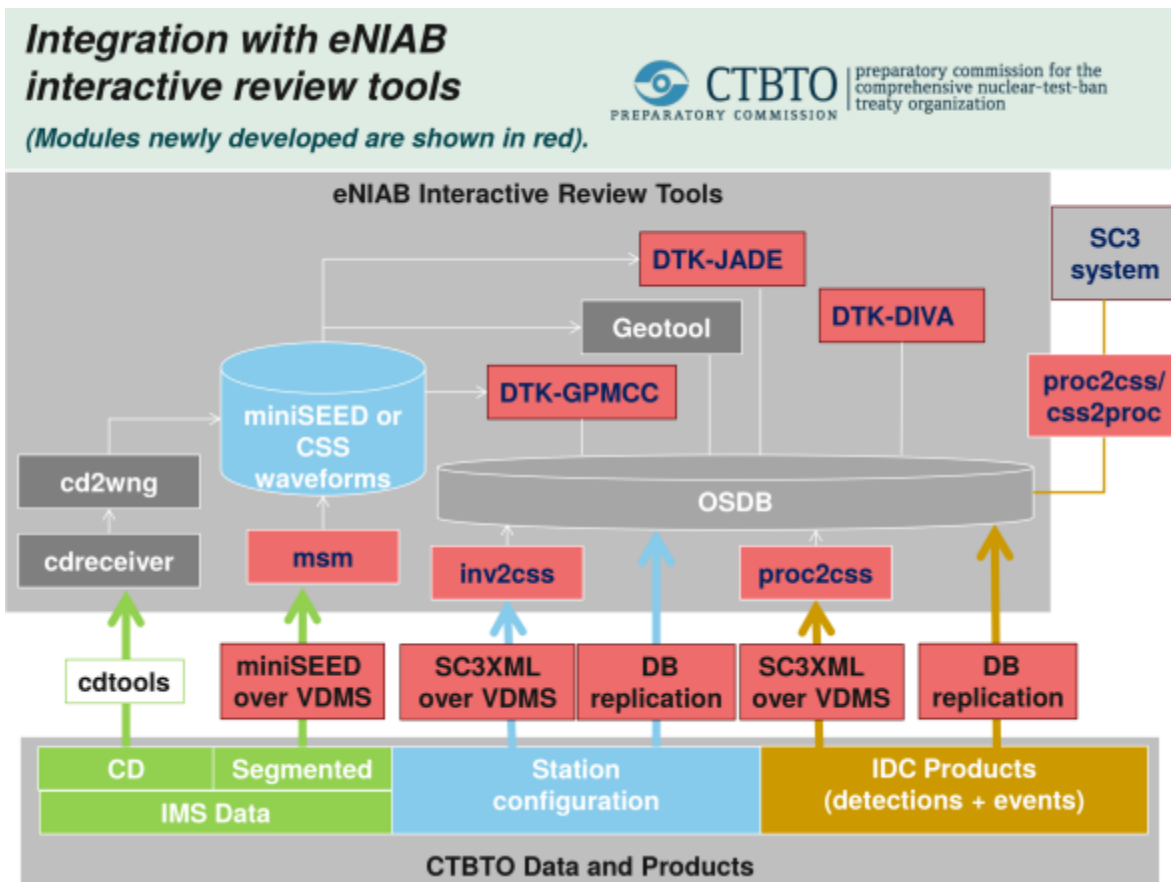


Figura 3. Mapa de herramientas dedicadas al análisis de datos de las estaciones del IMS.

Para el análisis de los datos de infrasonido que tenemos, el trabajo se ha centrado en el uso de dos herramientas: Geotool y DTK-GPMCC. Geotool es un programa diseñado para poder



estudiar grandes bases de datos generadas por los registros continuos de las estaciones. Permite realizar muchos análisis de los mismos en tiempo y frecuencia. DTK-GPMCC es un programa diseñado para poder detectar arribos coherentes dentro de todas las señales. Es el primer paso antes de realizar un análisis más acabado de las mismas. Permite discriminar entre “ruido coherente” y señales debidas a actividad volcánica y sísmica.

Resultados

En el presente informe se muestran algunos resultados relativos al terremoto M8.8 del 27 de febrero de 2010, donde se usó DTK-GPMCC para discriminar arribos de ondas posiblemente causadas por el mismo (Figuras 4, 5 y 6).

Es interesante notar que al comparar los días 26 y 27 de febrero, se puede ver claramente una detección de un frente de ondas coherente cercano a las 10:00 GMT. Este frente de ondas además viaja desde un azimuth aproximado de 115 grados, coincidiendo con la zona de ruptura que generó el terremoto. El día siguiente (Figura 6), existe una gran cantidad de detecciones proviniendo de un rango de azimuth mayor, lo que es esperable tras un evento tan grande.

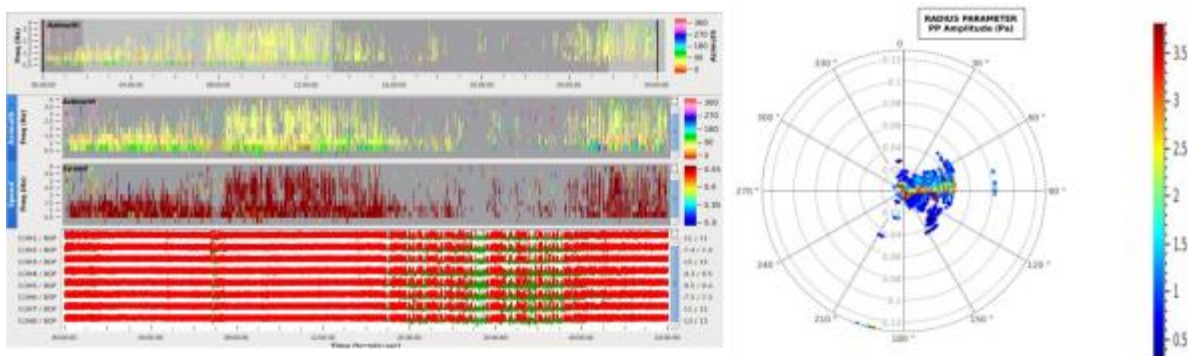


Figura 4. Izquierda: detecciones de ondas de interés. Derecha: gráfico polar de arribos. Día 26 de febrero de 2010.

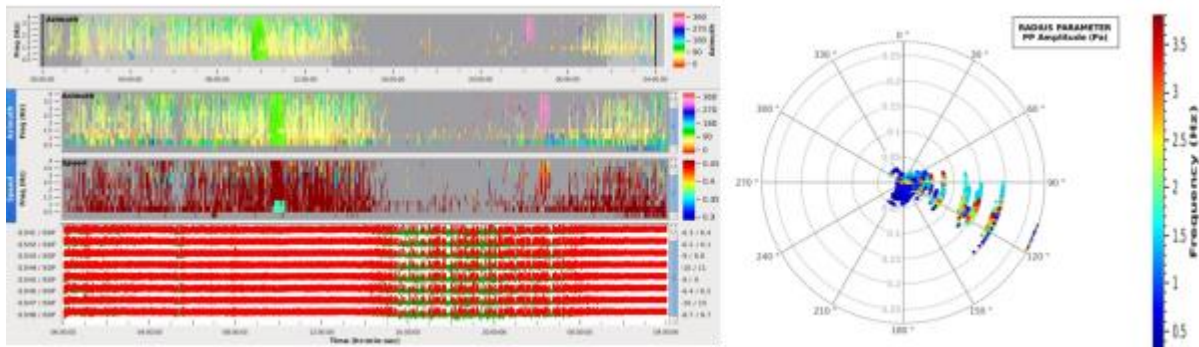


Figura 5. Izquierda: detecciones de ondas de interés. Derecha: gráfico polar de arribos. Día 27 de febrero de 2010.

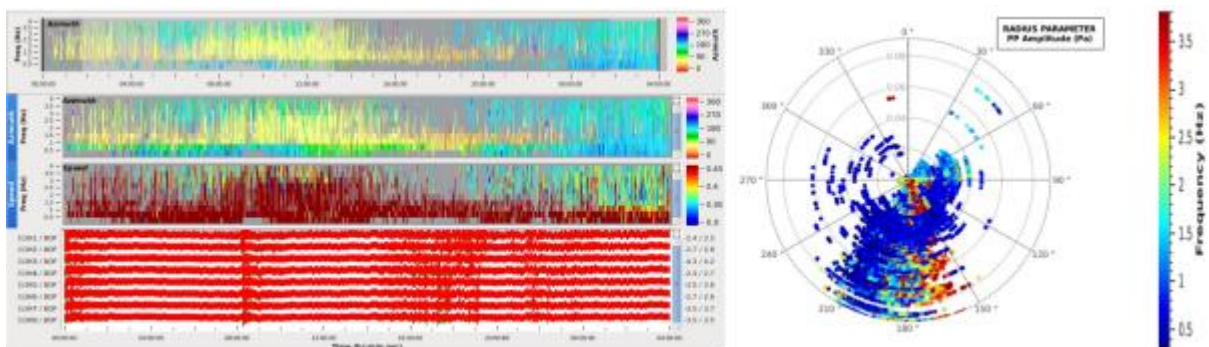


Figura 6. Izquierda: detecciones de ondas de interés. Derecha: gráfico polar de arribos. Día 28 de febrero de 2010.

Una vez detectadas las señales de interés se pueden usar diversos métodos de análisis, como beamforming, para extraer la información que permita caracterizar mejor el fenómeno. También es necesario precisar las características del medio a través del que viajan las ondas acústicas. Esto usualmente se hace mediante un mapa atmosférico como InfraMAP [Gibson & Norris, 2002] (Figura 7).

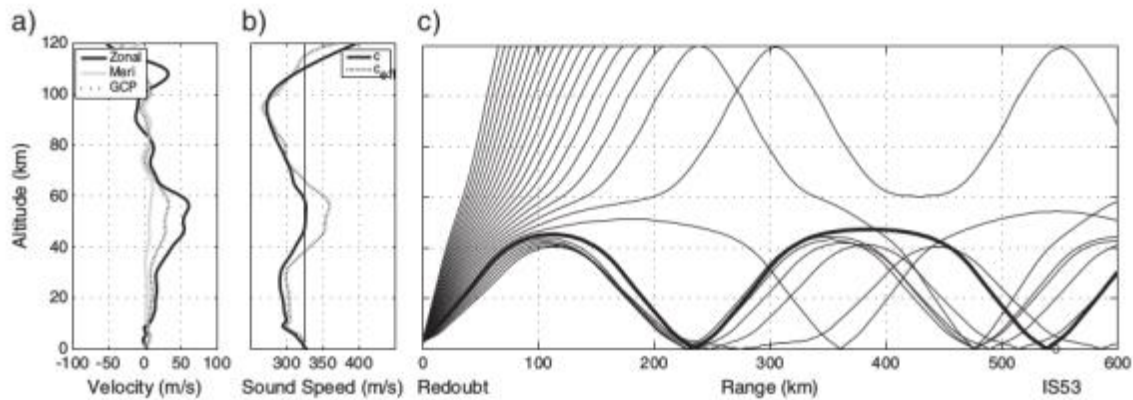


Figura 7. InfraMAP: 3-D Hamiltonian Ray Tracing Program for Acoustic Waves in the Atmosphere (HARPA). Mapa que muestra las zonas de amplificación y de sombra a partir de modelos de velocidades y vientos en la atmósfera.

Conclusiones

- Se detectan frentes de onda posiblemente relacionados con el terremoto M8.8 del 27-02-2010.
- El método PMCC puede ser muy útil para detectar actividad sin procesamiento previo de los datos de estaciones del IMS
- Para poder analizar los parámetros que describen las ondas filtradas con mayor certeza, es necesario usar algún método como Beamforming.
- Se debe modelar la estructura atmosférica para determinar con exactitud los parámetros derivados de los eventos filtrados.
- En el caso de un terremoto, no se puede conocer previamente la localización, por lo que estudiar el infrasonido de la forma expuesta serviría para complementar observaciones sísmicas más que detectar eventos.

Trabajo a Futuro

- Analizar datos en torno a las erupciones del volcán Puyehue-Cordón Caulle (Junio, 2011) y Calbuco (Abril, 2015).
- Aplicar algún método de la familia de Beamforming a los frentes de onda filtrados por el algoritmo PMCC.
- Usar más herramientas del CTBTO.



2. Proyecto Línea Riesgo Sísmico: Método para la estimación analítica de altura de tsunami (run-up) en las zonas costeras para terremotos tsunamigénicos ($M > 7$) dentro de los primeros 10 a 15 minutos con modelo de fuente sísmica finita. Fase I.

Investigadores: Jaime Campos, Francisco Javier Bravo, Sebastián Riquelme, Mauricio Fuentes.

Motivación: En el contexto de la subducción andina los terremotos tsunamigénicos que pueden generar grandes tsunamis corresponden a aquellos que producen un importante campo de desplazamiento vertical del fondo oceánico, especialmente cuando éste ocurre en la región de la fosa marina. En Chile y a lo largo de toda la costa oeste de Sudamérica, esta zona de gran profundidad (>8 km) es donde se produce eficientemente la excitación de la columna de agua que da origen al tsunami, y en el contexto de la subducción andina se localiza a unos ~ 70 km de la costa, a diferencia de Japón que en promedio esta distancia es 100 a 200 km. Esto significa que el impacto del run-up asociado directamente a la propagación del tsunami en Chile y a lo largo de la costa de Sudamérica ocurre a menos de 15 a 20 min después del inicio del terremoto (no se considera el ingreso de mar debido subsidencia de la zona costera por la ruptura sísmica), mientras que en Japón este lapso de tiempo puede llegar a ser 2 veces mayor. De aquí la necesidad de contar con un método que permita, con toda la tecnología disponible, definir cuantitativamente y en pocos minutos la zona del fondo oceánico que será afectada por un importante desplazamiento vertical para poder realizar simulaciones analíticas que permitan una respuesta de las posibles zonas costeras afectadas en los primeros 15 a 20 min.

Descripción: Se desarrollan los aspectos teóricos para la inversión de una fuente sísmica, físicamente en acuerdo con los modelos sismológicos asociada a terremotos tsunamigénicos, utilizando formas de onda en campo lejano y soluciones analíticas para la propagación de tsunami en campo cercano, para estimación de altura de tsunami (run-up) y las zonas de inundación en la región epicentral costera. El método cubre desde terremotos tsunamigénicos ($M > 7$) a megaterremotos ($M > 8.8$) y proporciona una respuesta científica-tecnológica del run-up dentro de los primeros 10 a 15 minutos. Los modelos sismológicos de fuente finita son más confiables que los que utilizan una aproximación de fuente puntual para una adecuada la



estimación del campo de desplazamiento del fondo oceánico asociado a la zona de la ruptura sísmica.

El objetivo es mejorar en Chile la estimación rápida del run-up en caso de tsunami como información útil para las autoridades y población. Este eje de trabajo comprende, en una primera etapa (Fase I), la determinación del detalle del desplazamiento de una ruptura sísmica finita a pocos minutos después de ocurrido un terremoto utilizando datos telesísmicos, para así alimentar con esta información al eje de caracterización del evento tsunaménigo del sistema de proceso y análisis para determinar de forma rápida posibles zonas de inundación y sus alturas de run-up (Fase II para el 2017).

Objetivos Fase I:

- 1) Obtener una solución preliminar detallada de la ruptura sísmica para una fuente finita dentro de los primeros 10-15 min después de ocurrido un terremoto utilizando datos tele sísmicos.
- 2) Incorporación de nuevas y diversas formas de ondas (señales) necesarias para obtener una solución preliminar rápida y robusta del proceso de ruptura de la falla finita.
- 3) Validación de la metodología en campo lejano y asegurar estabilidad del proceso de inversión (parametrización).

Estado de Avances y Tareas Realizadas:

La implementación del programa de inversión usando ondas de cuerpo en campo lejano está completado. También los aspectos de arquitectura de software y compatibilidad para incorporarlo al eje de algoritmos y procesos en tiempo real del prototipo desarrollado en el PRS para mejorar el sistema de alerta temprana de tsunamis en Chile. El programa ha sido testeado en diversos eventos ocurridos en Chile y los resultados son coherentes tanto con análisis posteriores hechos en el centro sismológico nacional (CSN) como con el servicio sismológico de U.S (USGS). La [Fig. 1] presenta resultados del programa aplicado a datos del terremoto de Iquique M8.2 del 2014: figura al lado derecho muestra la función fuente sísmica, o sea, una representación de la liberación de energía sísmica con el tiempo durante la ocurrencia del evento, y la figura de la izquierda, la distribución de la ruptura sísmica sobre el área de falla del terremoto. Estos resultados fueron validados posteriormente cuando se



incorporó a los datos telesísmicos los de cGPS¹ obtenidos y procesados posteriormente de campo cercano. Esto últimos datos aportan señal de muy baja frecuencia y permite robustez en la solución final del proceso de ruptura sísmica. [Fig 2].

Durante este periodo también se han realizado tests de validación de la etapa de la inversión de la fuente con datos de otros grandes terremotos ocurridos recientemente y de los cuales se cuenta con la solución del mecanismo focal y Momento sísmico -con el método de la Fase W implementada también por el equipo del PRS- y simultáneamente con datos cGPS en campo cercano y regional. Con esta información es posible entonces estimar rápidamente los parámetros focales y Momento sísmico (Mo) de un terremoto, o sea, la geometría de la falla, centroide y la magnitud, y disponer de un modelo de desplazamiento del fondo oceánico en la zona de la ruptura sísmica para eventos tsunamigénicos para mejorar la estimación analítica del run-up y zona de inundación en la región costera más cercana y expuesta al terremoto. Esta metodología es una propuesta única a nivel global y junto a las pruebas realizadas para validarla con datos de terremotos recientes ha permitido una nueva publicación en la prestigiosa Geophysical Research Letters [1]

Observaciones y futuros avances:

El problema inverso de la determinación de la Fuente Finita en esta Fase I es un problema que requiere diversos parámetros para asegurar estabilidad. Esto en la perspectiva de su futura utilización dentro de los procesos de rutina del CSN. Es sabido que diferentes metodologías de elección de estos parámetros producen diferentes soluciones. Un avance futuro consiste en la implementación de un criterio de elección de estos parámetros que permita robustez y obtener soluciones en el menor tiempo posible. Esta implementación implica además la paralelización del código, el cual tiene un estado de avance importante (80%)

Publicaciones:

[1.] Riquelme, S., F. Bravo, D. Melgar, R. Benavente, J. Geng, S. Barrientos, and J. Campos (2016), W phase source inversion using high-rate regional GPS data for large earthquakes, Geophys. Res. Lett., 43, 3178–3185, doi:10.1002/2016GL068302.

¹ cGPS corresponde a datos de desplazamiento obtenidos con GPS en registro continuo (ejemplo: muestras a 1 Hz)

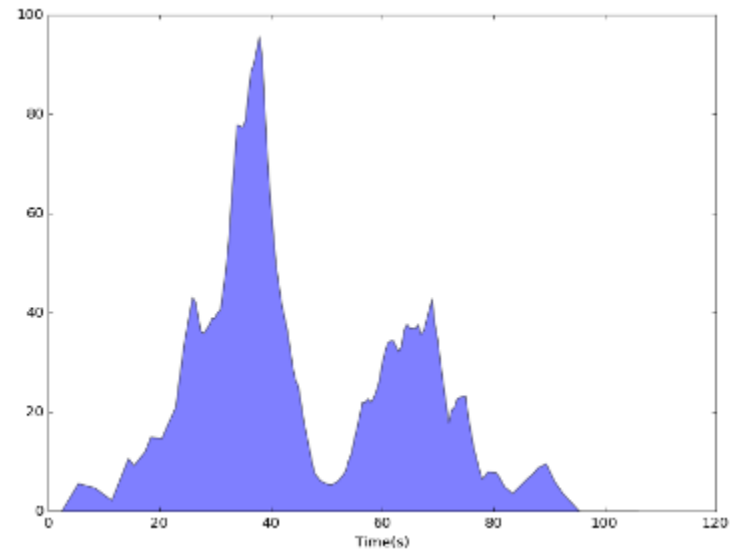
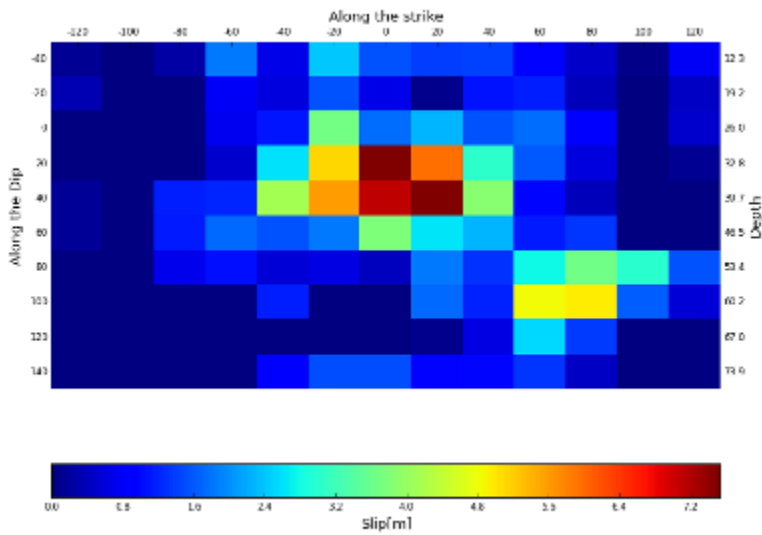


Figura 1: Resultado de la inversión de la Falla Finita para el terremoto de Iquique, 2014. La imagen de la izquierda representa la distribución de deslizamiento co-sísmico sobre la superficie de ruptura; La imagen de la derecha, la función “fuente temporal” del sismo, o sea, la evolución de la tasa de momento sísmico con el tiempo.



Figura 2: Ajuste de las mediciones GPS incluidas en la inversión de la Falla Finita para el terremoto de Iquique, 2014

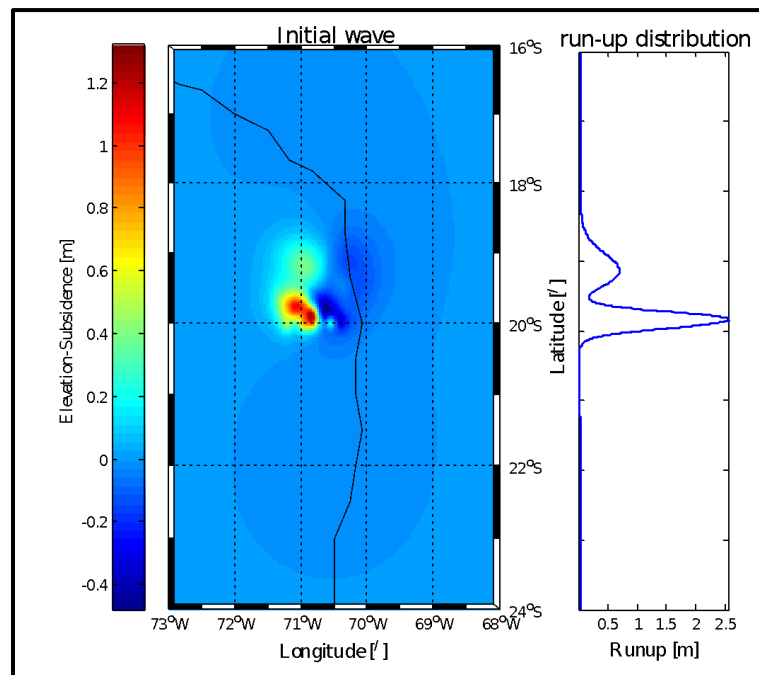


Figura 3: Alturas de runup teóricas para el tsunami de Iquique, 2014



3. Proyecto Línea de Tsunamis: Desarrollo de una metodología y herramienta para la estimación del Riesgo de Tsunami en Chile.

Investigadores: Jaime Campos, Mauricio Fuentes, Sebastián Riquelme, Rodrigo Sánchez

Objetivos:

- a. Desarrollo de escenarios estocásticos de fuentes sísmicas y correlación con el run-up.
- b. Desarrollo de nuevas metodologías en modelamiento analítico para el cálculo rápido de alturas run-up.
- c. Desarrollo de nuevas técnicas de inversión de fuente sísmica con registros de movimientos del nivel del mar (boyas DART)
- d. Generar nuevos y mejorados modelos de fuentes estocásticas.

Descripción

El contexto de la subducción andina, y Chile en particular, corresponden a regiones donde se pueden producir megaterremotos ($M > 8.8$) con una alta probabilidad que el evento sísmico sea tsunamigénico, o sea, capaz de generar un tsunami devastador. Los actuales métodos en uso para estimación del Riesgo de Tsunami se basan en modelos físicos de la fuente sísmica que utilizan una descripción de la ruptura sobre un plano de falla homogéneo, lo que recientemente se ha demostrado es ineficiente para estimar el impacto del run-up en las zonas costeras (valores de run-up unas 6 veces menor que los de ruptura heterogénea y más reales). Esta línea de trabajo se propone desarrollar una nueva metodología que considere modelos de fuente finita de ruptura sísmica heterogéneos para terremotos tsunamigénicos en el contexto de la subducción andina (Chile en particular).

Tareas Realizadas:



El modelamiento de fuente finita con ruptura sísmica heterogénea (Modelo físico de fuente tipo k-2) incluye la definición de una geometría realista, es decir, que incorpora las variaciones tanto en el dip como en el strike de la zona de contacto interplaca, donde se produce el área de la ruptura sísmica. La metodología adoptada es generar una grilla regular (mapeable en una matriz) que sea consistente con la geometría del modelo SLAB 1.0 del USGS. Una vez que la zona es definida, se realiza el cálculo de una determinada cantidad de fuentes sísmicas estocásticas y se genera su correspondiente campo de desplazamiento del fondo oceánico para la etapa de simulación de tsunamis.

Por otra parte, el grupo ha desarrollado importantes contribuciones en aspectos analíticos del modelamiento de tsunamis. Esto fue puesto a prueba en el tsunami de Illapel (16-11-2015).

Estado de Avances:

- a. 100%
- b. 90%
- c. 20%
- d. 10%

Observaciones y futuros avances:

Debido a los buenos resultados obtenidos, se espera finalizar los objetivos antes planteados y comenzar con algún tipo de proyecto para transferir el conocimiento y metodologías adquiridas a las instituciones gubernamentales que lo requieran (CSN, SHOA, MOP, etc).

Publicaciones:

- Fuentes M., (2016). Quick estimation of linear tsunami run-up. Enviado para publicación en Geophys. J. Int.



- Fuentes M., Riquelme S., Hayes G., Medina M., Melgar D., Vargas G., González J., and Villalobos A. (2016). A study of the 2015 Mw 8.3 Illapel earthquake and tsunami. Numerical and analytic approaches. Aceptado para publicación en Pure and Applied Geophysics.
- Melgar D., Fan W., Riquelme S., Geng J., Liang C., Fuentes M., Vargas G., Allen M., Shearer P., and Fielding E., (2016). Slip segmentation and slow rupture to the trench during the 2015, Mw8. 3 Illapel, Chile earthquake. Geophys. Res. Lett., 43(3), 961-966. • Riquelme S., Fuentes M., and Hayes G., (2015). A rapid estimation of near-field tsunami runup. J. Geophys. Res.: Solid Earth, 120(9), 6487-6500.
- Ruiz J., Fuentes M., Riquelme S., Campos J., and Cisternas A., (2015). Numerical simulation of tsunami runup in northern Chile based on non-uniform k-2 slip distributions. Nat. Hazards 79(2), 1177-1198.
- Fuentes M., Ruiz J., Riquelme S., (2015). The runup on a multilinear sloping beach. Geophys. J. Int., 201(2), 915-928.

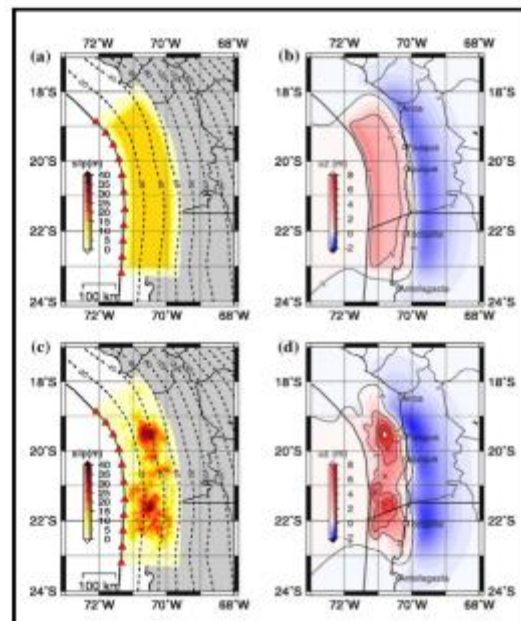


Figura 1: Ejemplo de un escenario simple y uno heterogéneo

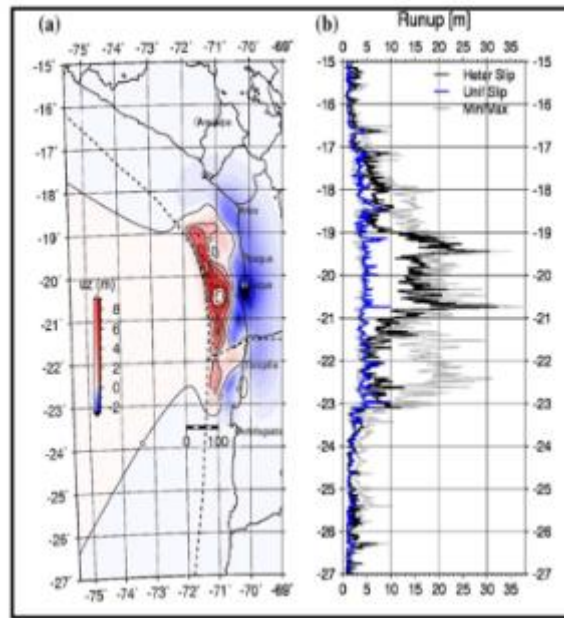


Figura 2: Estadística de 90 escenarios de tsunamis

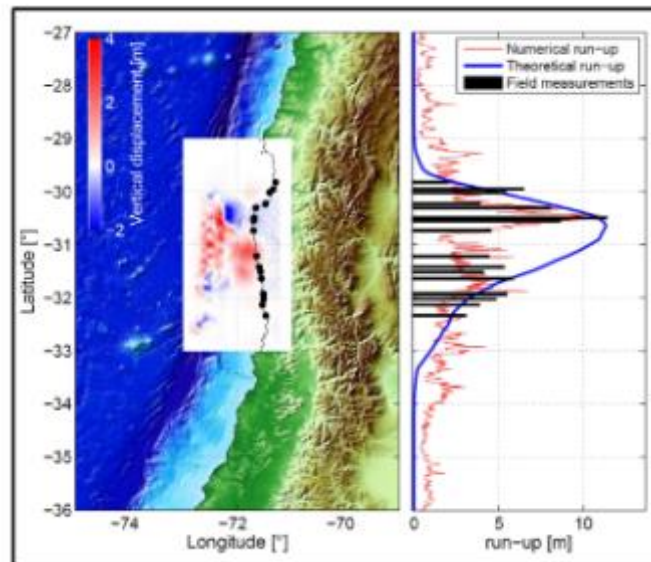


Figura 3: Modelo tsunami de Illapel 2015 con nueva técnica analítica

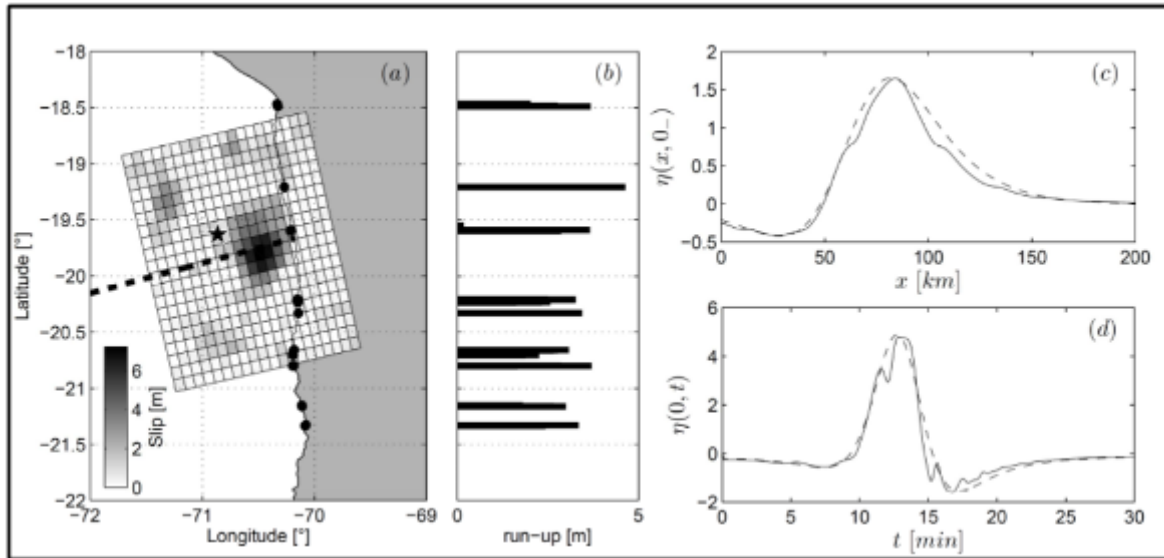


Figura 4: Nueva solución analítica probada para el tsunami en Iquique (2014)



4. Proyecto Línea Inversión del Tensor de Momento Sísmico

Estudiante tesista: José A. Mieres Madrid. Actividades desarrolladas como una parte del trabajo de Tesis de Magíster en Ciencias, mención Geofísica.

Profesor: Javier Ruiz

Objetivo:

Como un aporte a las actividades de interés desarrolladas en el Programa de Riesgo Sísmico, se propone una metodología que permite calcular el tensor de Momento Sísmico mediante la utilización de datos de deformación estática. Conocer el tensor de momento sísmico es importante, pues en base a él podemos obtener información de primer orden de la fuente sísmica, que a su vez puede usarse para determinar si esta es capaz de generar o no tsunami. La metodología desarrollada permite la incorporación de datos de desplazamiento vertical y horizontal, obtenido mediante observaciones de geodesia espacial. En el presente estudio no se aplican criterios de restricción para la fuente sísmica asumiendo que sea del tipo puramente double-couple (DC), por ejemplo, de modo que esta es general y aplicable a distintos tipos de mecanismo de la fuente sísmica (terremotos de zonas de subducción, deformación volcánica, explosiones, etc.).

Metodología:

Después de una revisión de bibliografía pertinente a las fuente sísmicas y su representación como fuente puntual, se procedió a revisar como la fuente sísmica se relaciona con el tensor de momento sísmico, M_{ij} . Este tensor de segundo orden no tiene una descomposición única, de modo que pueden representarse procesos cuya física es muy diferente pero cuyos efectos observables, en términos de deformación estática, son indistinguibles. Como segundo paso, se calcularon numéricamente las ecuaciones que rigen el desplazamiento estático en un semi-espacio elástico, isótropo y homogéneo. Esto permite obtener las Funciones de Green del problema. Con lo anterior el problema directo de calcular la deformación horizontal y vertical asociada a una fuente representado por su tensor de momento, M_{ij} , queda totalmente resuelto [Aki & Richards, 2002], ver Figura 1. Así, la ecuación que permite calcular el campo de desplazamientos en la dirección n -ésima del sistema de coordenadas utilizado, se puede escribir como sigue,

$$u_n = M_{pq} * G_{np,q}$$



donde $*$ representa convolución, y $G_{np,q}$ representa la función de Green del problema.

En seguida utilizamos datos sintéticos que nos permiten testear la metodología. Estos datos consisten en datos de desplazamiento calculados con una rutina de matlab, a los que se le añade ruido gaussiano. Luego invertimos M_{ij} utilizando un criterio de minimización con norma L_2 [Menke 2012], ver Figura 2.

Observaciones y futuros avances:

Eventualmente, se planea extender la metodología al caso en que la estructura elástica del medio represente de manera más realista los parámetros elásticos reales del medio. En adición, se pretende abordar el problema de estimación utilizando técnicas de inversión más robustas. Se espera testear la metodología planteada usando datos de Geodesia marina del terremoto de Sanriku-Oki del 9 de Marzo de 2011, $M_w=7.3$ [Ohta et al., 2012].

Resultados:

Los resultados de la metodología descrita se adjuntan en las figuras a continuación:

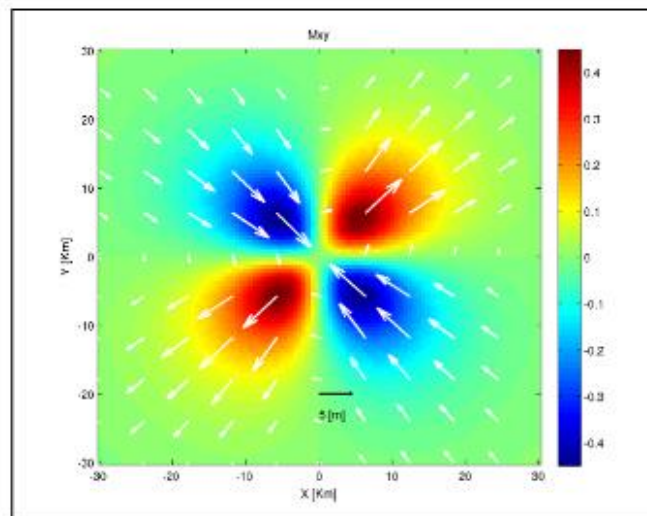


Figura 1: Mapa de desplazamiento vertical y Horizontal para una falla de tipo strike slip vertical, representada por un tensor de Momento cuya única componente no nula es M_{xy} .

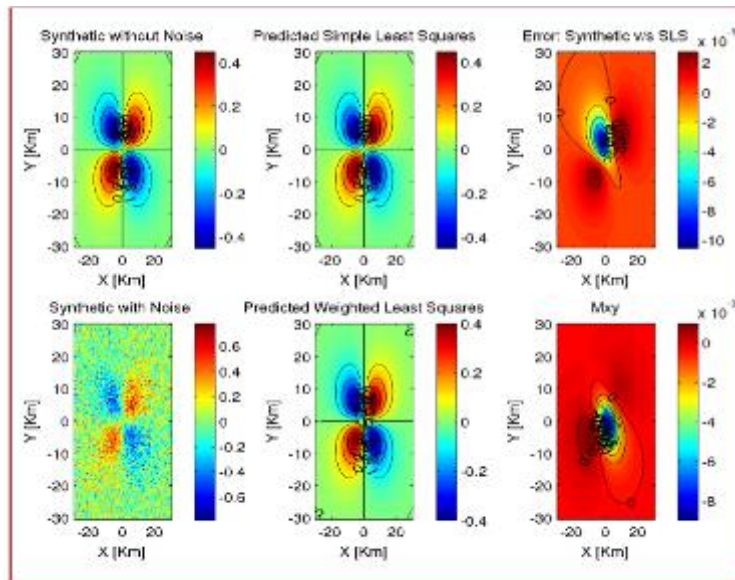


Figura 2: Ejemplo de Inversión de mínimos cuadrados. En la figura superior izquierda se muestran los datos sintéticos sin ruido, y en la inferior con ruido Gaussiano. En la columna del medio se muestran los resultados de la inversión de mínimos cuadrados, mientras que en las figuras del extremo derecho se muestra el error (real versus observado) en las componentes horizontales del modelo predicho para los datos con ruido.



5. Proyecto Desarrollo e implementación de herramientas y metodologías para estudio de terremotos usando datos de tsunami

Investigadores: Sebastián Arriola Santibáñez - Javier Ruiz P.

Objetivo:

Estudiar la fuente de terremotos y los tsunamis provocados por ellos.

Lo realizado:

Se definieron modelos simples de fuente sísmica constituidos por planos de falla rectangulares y distribuciones de deslizamientos elípticas. Como ejemplo, se utilizó el terremoto del Norte de Chile de magnitud Mw 8.2 del 1 de Abril del 2014, para poder validar el uso del modelo numérico de propagación de tsunami con un ejemplo real de evento sísmico ocurrido en el país. Cada uno de estos modelos de fuente sísmica se corresponde con el terremoto de Magnitud Mw 8.2 mencionado anteriormente, es decir, preservan el momento sísmico escalar.

Se diferencian entre ellos en aspectos como su geometría, orientación espacial, y tamaño y ubicación de la aspereza elíptica que define el desplazamiento en la falla. Utilizando las fórmulas de Okada (Okada 1992), se puede calcular la deformación del fondo oceánico producto de cada uno de los modelos de fuente, y luego dicha deformación se utiliza como input en el software NEOWAVE, que modela la propagación del tsunami y entrega resultados de la altura del mar teórica esperada en el tiempo para distintos puntos de interés, que se corresponden con las posiciones geográficas de 3 boyas DART y 10 mareógrafos a lo largo de la costa chilena. La Figura 1 muestra los distintos modelos de desplazamientos cosísmicos y la deformación asociada.

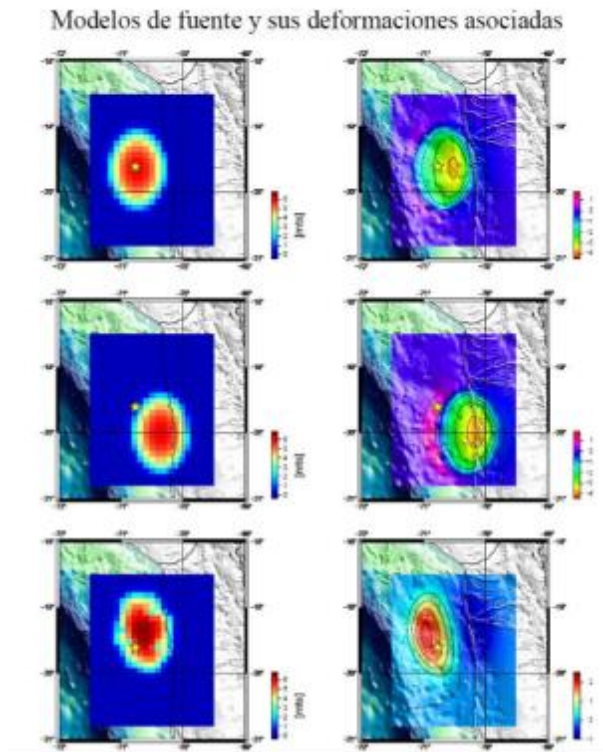


Figura 1. (Derecha) Distintos modelos forward de distribución de desplazamiento y (izquierda) su deformación cosísmica asociada.

Los registros capturados por las boyas DART y los mareógrafos se comparan con los resultados obtenidos por el software numérico para los distintos modelos de fuente, lo que permite validar el uso del modelo numérico para la zona de estudio, pues dichos modelos simples de fuente logran explicar de buena forma los registros de las 13 estaciones. La Figura 2 muestra la comparación de la altura de tsunami registradas en las boyas DART y las calculadas numéricamente.

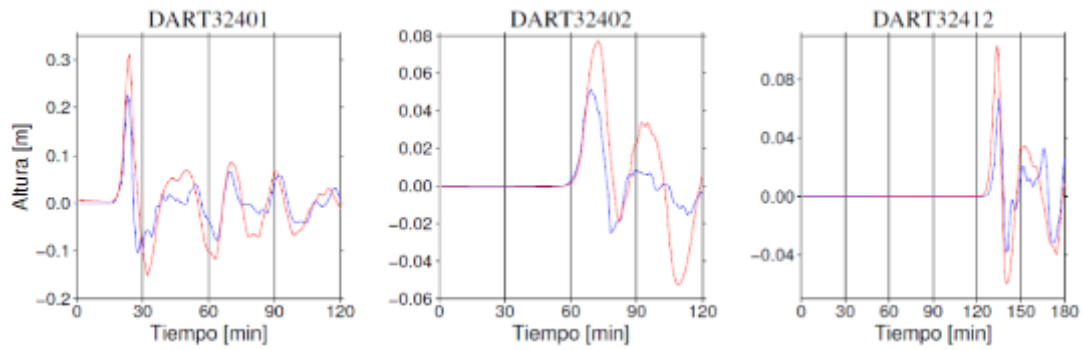


Figura 2. Registros de las 3 boyas DART y el ajuste logrado por el modelo forward.

Para el caso del ajuste en los mareogramas ubicados a lo largo de la costa del norte de Chile, están mostrados en la Figura 3.

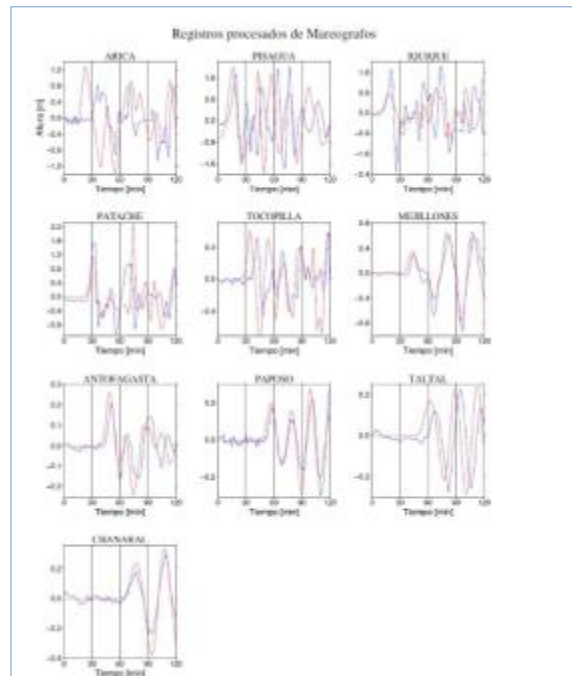


Figura 3. Registros de los 10 mareógrafos y el ajuste logrado por el modelo forward.



Posteriormente, se implementa un algoritmo de inversión para obtener un modelo de slip sobre el plano de falla de un evento sísmico. Es decir, una vez ocurrido el terremoto, se puede obtener a través de los registros en distintas localidades así como en boyas DART ubicadas en el océano un mapa de deslizamiento en la corteza. Primero que todo, se define un plano de falla con una determinada geometría acorde a la bibliografía, nuevamente como ejemplo se usa el caso particular del terremoto del 1 de Abril. Dicho plano es discretizado en subfallas, donde a cada subfalla se le asigna un desplazamiento de magnitud unitaria, con tal de que al simular la propagación del tsunami para cada subfalla con desplazamiento unitario, se obtengan las respectivas funciones de Green asociadas. Dichas funciones de Green y los registros de las boyas DART se utilizan para plantear un sistema matricial que se invierte mediante un criterio de "Nonnegative least squares".

Resultados:

En el contexto de las alertas tempranas de tsunami a localidades costeras, los resultados se deben obtener rápidamente, sin desperdicio alguno de tiempo. Para realizar una alerta de tsunami, sólo se cuenta con datos registrados por boyas: Tener el registro de un mareógrafo significa que la emisión de la alerta fue fallida. Por otro lado, la evidencia empírica muestra que los modelos y los datos no se ajustan bien de la misma forma a través del tiempo. La calidad del ajuste se vuelve dependiente del tiempo, sugiriendo que debemos enfocarnos en segmentos particulares de los registros si queremos ajustar bien los datos con nuestro modelo.

A través de la observación de los registros en las boyas, se puede determinar el inicio del registro del evento propiamente tal. Los datos aumentan en amplitud monótonamente por un momento, y luego empiezan a decrecer. La línea vertical de la derecha marca el tiempo justo después de la cresta de la primera ola del tsunami (es decir, justo después del punto llamado "quarter-wave" o cuarto de ola).



Registros de boyas DART a utilizarse en la inversión

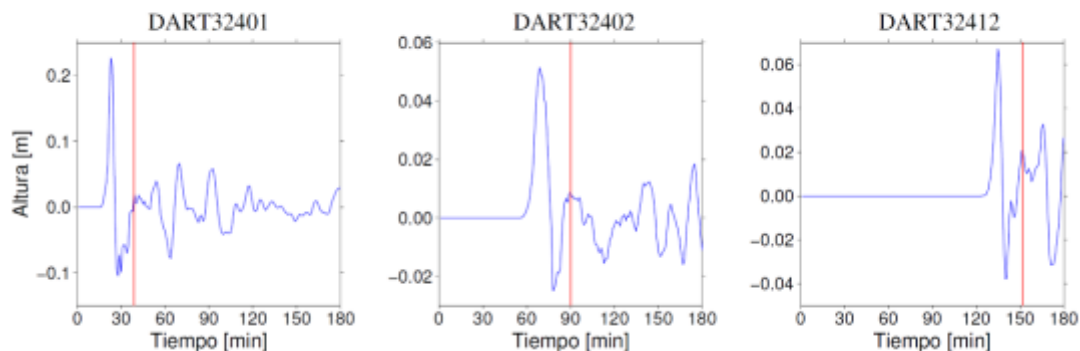


Figura 4. Registros de boyas DART a utilizar en la inversión. La línea roja indica el final de la serie de tiempo a utilizarse.

Percival et al. (2011) demostró que a medida que agrega nuevos datos al algoritmo de inversión, los cambios en el ajuste se vuelven cada vez menores, indicando que, a partir de cierto punto, añadir más datos no genera cambios. La forma óptima para realizar la inversión es incluir los datos que se corresponden con la primera ola completa, determinada mediante análisis de las formas de onda. El uso de esta primera ola completa para la inversión nos permite obtener una estimación de la fuente que no difiere de lo obtenido al utilizar un mayor volumen de datos; incluso los datos y el modelo sustancialmente dejan de coincidir más allá de ese punto; es decir, el poder explicativo del modelo disminuye cuando se utiliza en la inversión más datos que la primera ola completa observada en la boya.

Con lo descrito anteriormente ya implementado, se obtiene un modelo de fuente así, que se muestra en la Figura 5 el modelo de slip junto con el ajuste logrado en las estaciones.

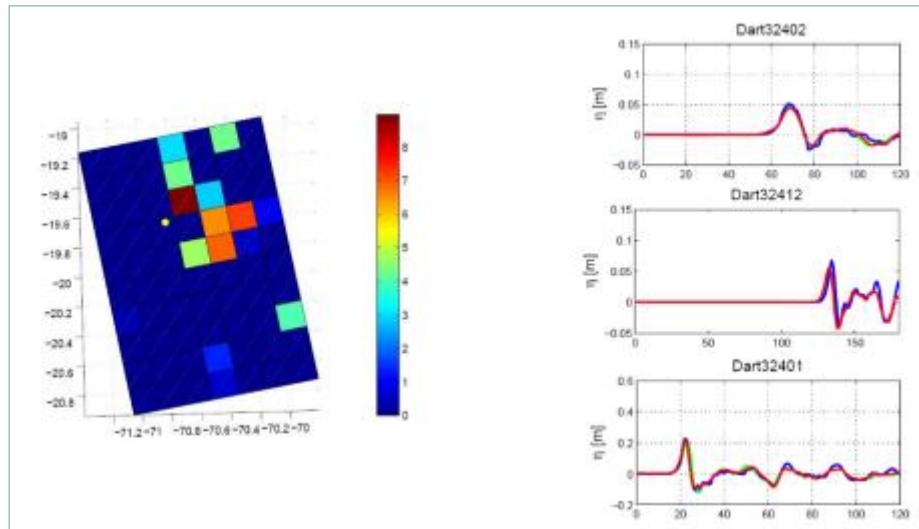


Figura 5. (Izquierda) Modelo de fuente obtenido con la inversión y (Derecha) el ajuste obtenido en boyas DART y estaciones de mareógrafos.

Publicación:

"Resolution analysis of the tsunami generated by the 2014 Mw 8.1 Pisagua earthquake using a simple slip model". Ruiz, J. A.; Riquelme, S.; Fuentes, M. A.; Arriola, S.; Yamazaki, Y.; Schindelé, F.; Campos, J. A., 2014, American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, abstract #S31D-4468.

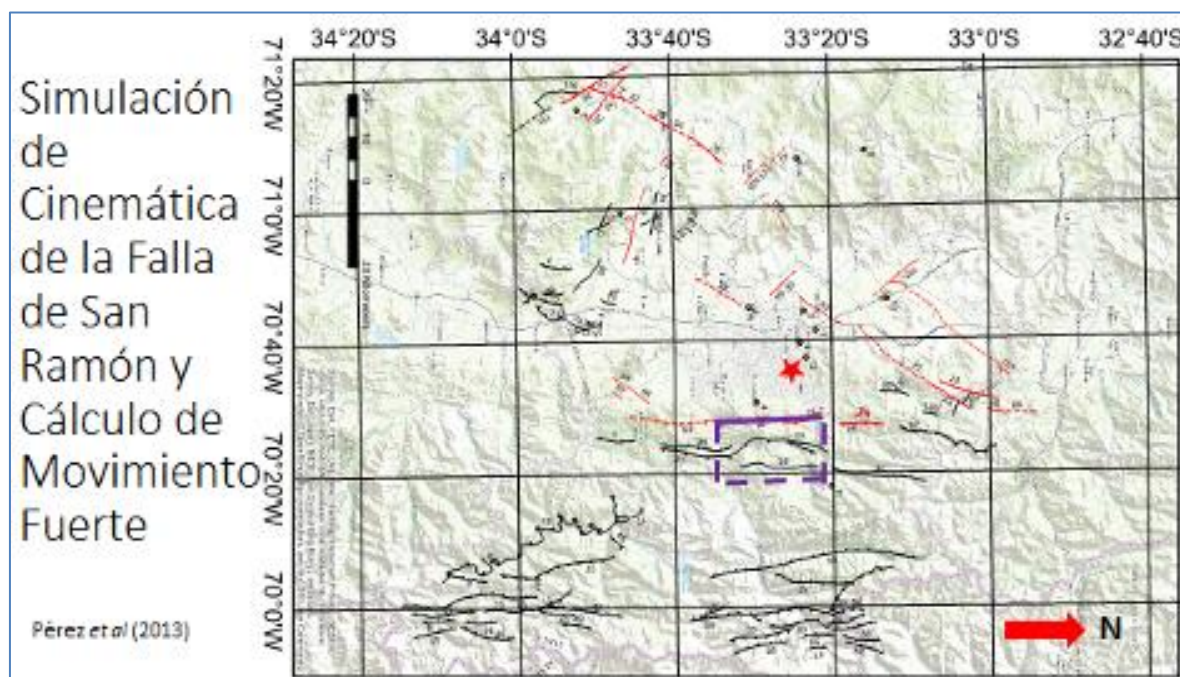


6. Proyecto Línea Peligro Sísmico: Estimación de la amenaza sísmica en Chile Central con manejo de escenarios; Etapa I.

Investigador: Jorge Crempien, Jaime Campos

En colaboración con el CMM de la U. de Chile.

Objetivo: Como primera fase (Etapa I) se busca implementar una metodología que incorpore el *estado del arte* en la estimación de la amenaza sísmica para la Región Metropolitana de Santiago. Para ello se ha optado por la estrategia del método determinístico “manejo de escenarios” que, en esta primera parte, contempla la realización de estudios de casos mediante simulaciones de movimiento fuerte haciendo propagar una ruptura sísmica finita (físicamente en acuerdo con los avances actual de la sismología) localizada a lo largo de la Falla San Ramón. Las simulaciones contempla la activación de la Falla San Ramón en varios escenarios verosímiles y con diferentes velocidades de ruptura.





El modelamiento del Peligro Sísmico en la Región Metropolitana del gran Santiago es uno de los temas más importantes y para el cual el estado no ha logrado articular esfuerzos, de sus diversas instituciones y orgánicas locales y regionales, para producir un resultado sobre la amenaza sísmica en la región que permita disponer de esta información clave para la gestión territorial. Los métodos clásicos para estimar Peligro Sísmico en Chile son muy pocos y disponibles fundamentalmente en empresas y grandes aseguradoras nacionales e internacionales. El equipo del PRS ha decidido tomar la tarea de desarrollar una metodología diferente de la clásica (métodos estocásticos) y se ha propuesto abordar este desafío mediante una estrategia determinística (manejo de escenarios) mediante el uso del potencial de cálculo masivo disponible en el CMM de la U. de Chile e incorporando los nuevos antecedentes científicos sobre la amenaza sísmica asociada a la Falla San Ramón.

Para esto, en esta Etapa I, se han desarrollado modelos de simulación teóricos de la ruptura sísmica de la falla San Ramón y modelos simples de estructura de velocidades del subsuelo para considerar los efectos de propagación y de respuesta de la cuenca de Santiago en la generación de la aceleración esperada del suelo y espectro de respuesta (PGA y PGV) en algunos sitios representativos al interior de la ciudad. p

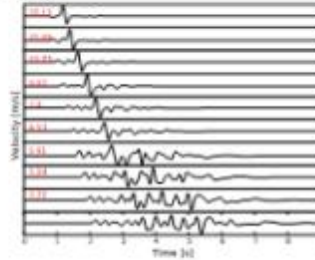
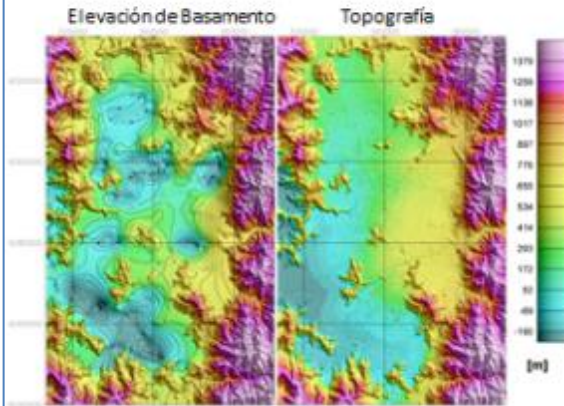
Otras tareas realizadas:

- Presentaciones en la Universidad de Chile, Pontificia Universidad Católica, Universidad de Los Andes, University of California-Santa Barbara, congreso CSEB.
- Estudio e informe “Estimación de Peligro y Riesgo Sísmico en la Región Metropolitana” realizado para la ONEMI con el fin de proporcionar de información pertinente para el diseño del Simulacro y Simulaciones de octubre 2016.



Incorporación de los Efectos de Cuenca

Sismogramas de prueba calculados en Leftraru cada 1km Con SW4 para una fuerza puntual de doble cupla



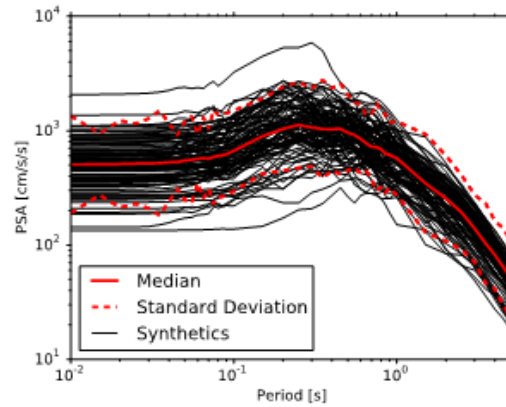
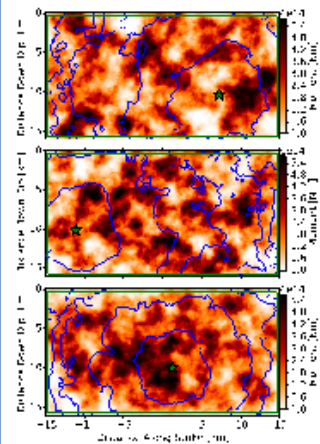
Cálculo de Tracciones como funciones de Green

$$u_n(\mathbf{y}, t) = \int_{-\infty}^t dt' \iint_{\Sigma} \mathbf{s}(\mathbf{x}, t') \bullet T^n(\mathbf{x}, t - t'; \mathbf{y}, 0) d\Sigma$$

$$T^n(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, 0) = \hat{n} \bullet \sigma_{\hat{\sigma}}^n$$

Spudich y Archuleta (1987)

Simulación de Cinemática de la Falla de San Ramón y Cálculo de Movimiento Fuerte



Espectro de respuesta en un sitio a $R_{rup} = 10\text{km}$

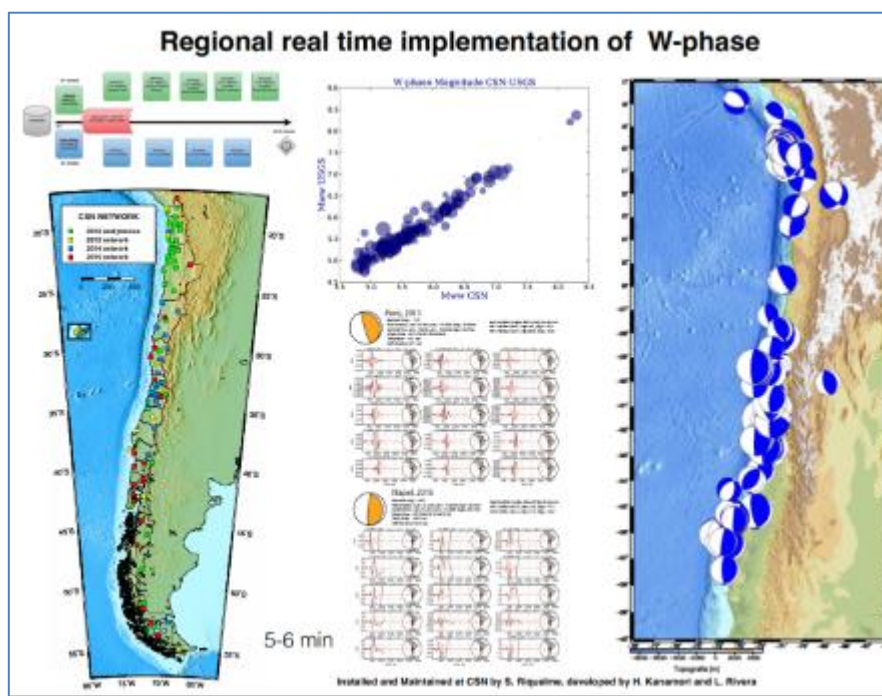


7. Proyecto Línea Tsunamis: Aplicaciones de alerta temprana

Investigadores: Sebastián Riquelme, M. Fuentes, A. Cisternas, J. Campos

Descripción:

Esta línea de trabajo es una de las principales y fue iniciada en el PRS tempranamente luego del devastador tsunami asociado al megaterremoto M8.8 del 27/F 2010. Durante este poco tiempo el **“Equipo Tsunami del PRS”** logró mejorar e implementar un método eficiente y rápido (< 5 min) de estimación de la magnitud de un gran sismo, así como el tensor de momento sísmico (mecanismo focal), para generar información científica pertinente y clave que contribuya con mayor antecedentes a los organismos definidos por el estado que tienen la responsabilidad de incorporar inteligencia a la “data técnica” al momento que tienen que procesar y analizar en tiempo real la posibilidad de identificar una situación de tsunami.





**Catalog based on
Regional W-phase Moment Tensor**

CSN
CENTRO NACIONAL DE SISMOTECNIA

CSN W-Phase

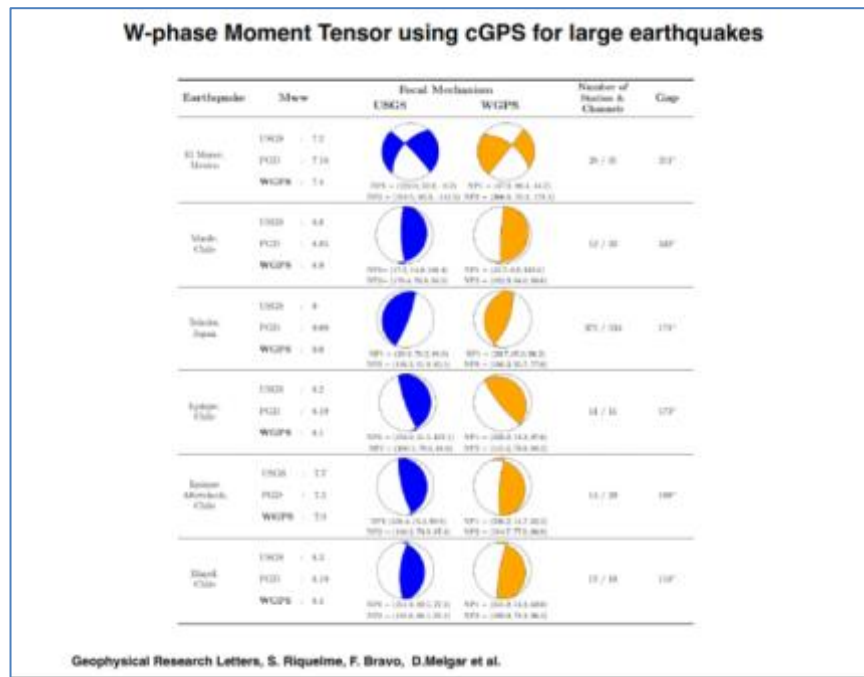
Fecha	Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud	Referencia geográfica
2015/06/28 15:28:04	-23.975	-67.012	200.5	5.8	UNKNOWN
2015/06/26 02:51:18	-30.720	-71.152	40.5	6.2	UNKNOWN
2015/06/22 07:12:58	-31.378	-71.078	50.5	5.9	UNKNOWN
2015/06/21 17:39:58	-31.759	-71.671	35.5	6.5	UNKNOWN
2015/06/21 05:38:33	-31.485	-71.712	23.5	6.0	UNKNOWN
2015/06/19 12:52:19	-32.234	-72.328	23.5	6.2	UNKNOWN
2015/06/18 08:10:44	-32.108	-72.946	17.5	6.2	UNKNOWN
2015/06/16 22:54:28	-31.453	-71.981	30.5	6.4	UNKNOWN
2015/06/01 15:28:48	-19.775	-66.420	80.5	5.4	UNKNOWN
2015/06/23 23:10:03	-29.671	-71.426	45.5	5.6	UNKNOWN
2015/06/12 00:14:38	-31.632	-71.606	40.5	5.5	UNKNOWN
2015/06/01 11:30:26	-30.048	-69.024	15.5	5.1	UNKNOWN
2015/07/17 11:11:22	-35.722	-72.245	23.5	5.2	UNKNOWN
2015/07/16 10:48:05	-29.533	-71.635	23.5	5.1	UNKNOWN
2015/06/20 05:22:19	-36.377	-73.600	30.5	5.6	UNKNOWN

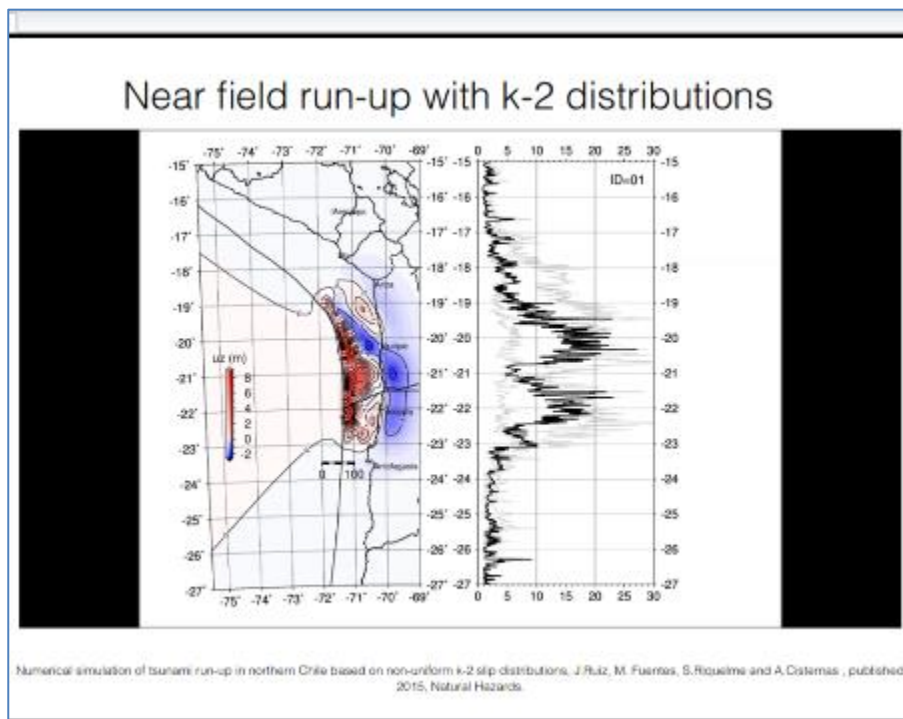
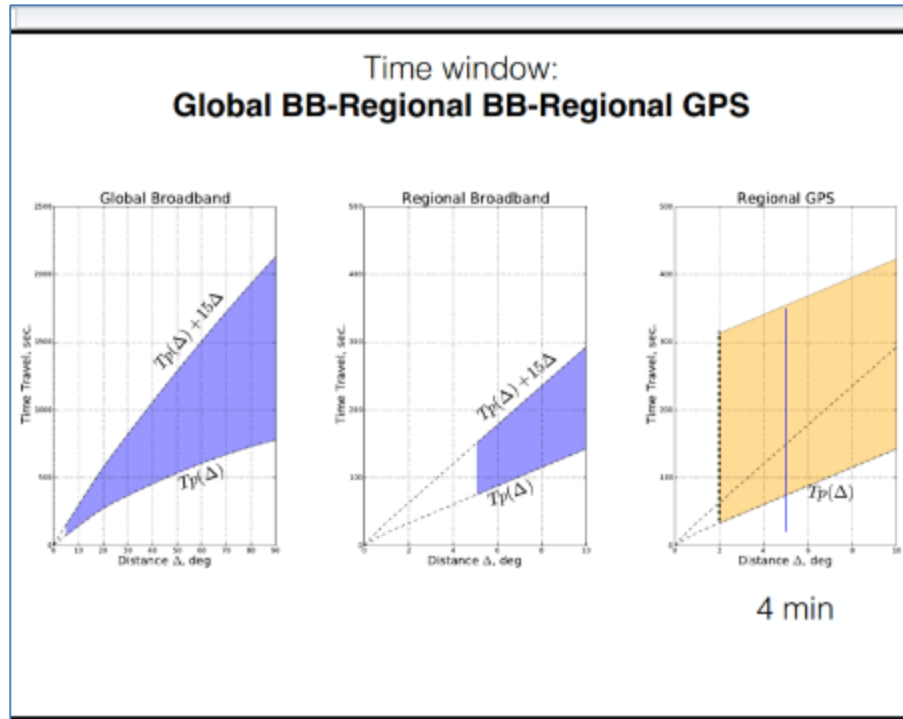
2011: 6 events 2012: 14 events 2013: 9 events 2014: 58 events 2015: 47 events

Mww 6.5 **Mww 5.5** **Mww 5.1** **Mww 4.9** **Mww 4.8**

36 103

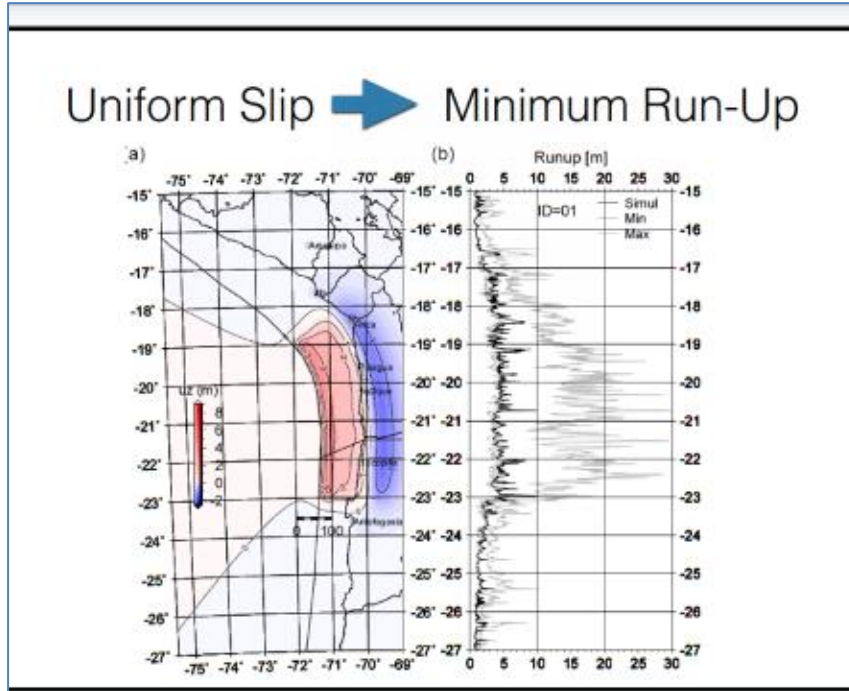
Number of Stations





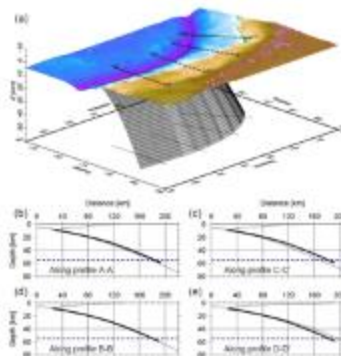
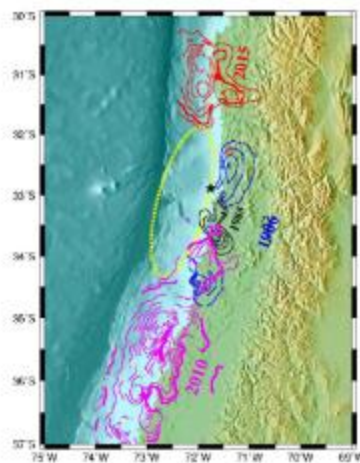


Uniform Slip → Minimum Run-Up



Next Step: Do this **Globally**

2015 – 2010 – 1985 – 1906 – ??



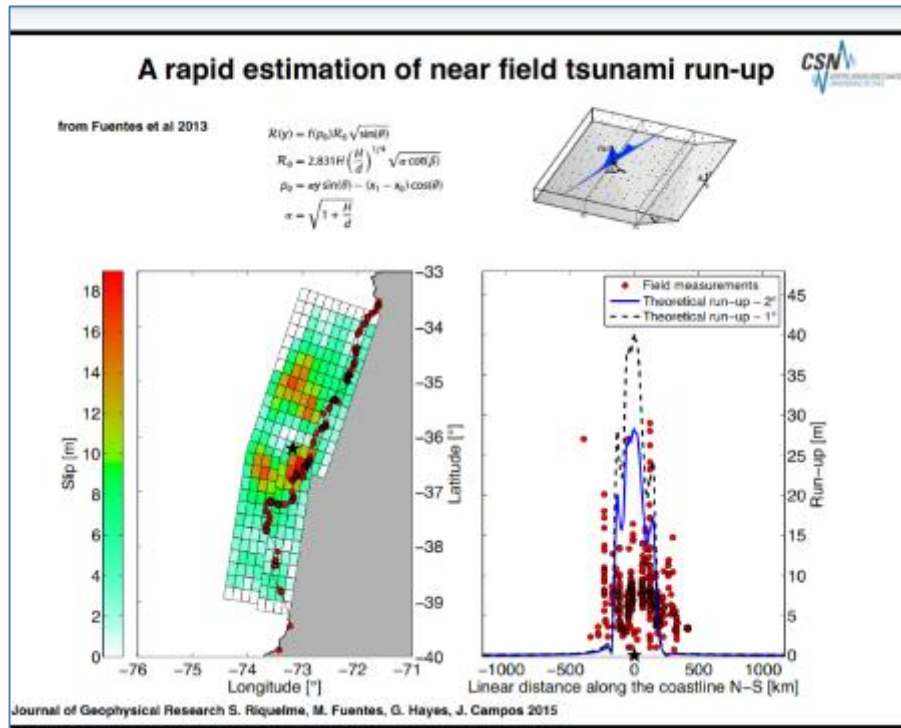


Figura que resume los diferentes resultados del equipo tsunami: (a) estimación del mecanismo focal y magnitud en < 5 min (W-Phase), (b) simulación de la ruptura sísmica sobre una falla extendida para estimar del campo de deslizamiento vertical del fondo oceánico, (c) aporte con una solución analítica del problema físico-matemático que no había sido resuelto hasta el presente para obtener en campo cercano estimación del run-up del impacto del tsunami a lo largo de la zona costera localizada en la región epicentral del terremoto; (d) desarrollo de una nueva metodología para la estimación del Riesgo de Tsunami a lo largo de Chile y que contempla fuente sísmica físicamente compatible con los avances científicos. Esto permite aportar con una solución a nivel mundial para superar los métodos utilizados hasta ahora y que subestiman el run-up hasta cerca de 1/3 del valor real a causa del uso de fuentes sísmicas con ruptura homogéneas.



8. Proyecto: Difusión educacional y aplicaciones

Investigador: Senén González, Jaime Campos, Sandra Rojas, Julián Cortés, Juliette Marin.

Objetivo: Generar actividades educativas con estudiantes de 7º año básico a 4º año medio para abordar diversas temáticas en torno a las ciencias de la tierra.

Tareas realizadas:

Vinculación con el medio:

- Finalización de programa interactivo para la detección de sismos por estudiantes.
- Actividades con colegios para la localización de zona segura frente a tsunamis.
- Preparación de las actividades con los colegios durante 2016: medición del radio de la tierra, medición de la altura a través de la presión atmosférica
- Preparación de convenio con Universidad Central para trabajos conjuntos.

Extensión:

- Se realizan las gestiones para coordinar la restauración de la muestra Exposismos, con el apoyo de Explora Conicyt.
- Participación en la propuesta para llevar a Exposismos a nivel regional y luego nacional

Aplicaciones:

- Aplicación para comparar mecanismos focales (W-Phase, FMNEAR, etc.)
<http://dgf.uchile.cl:20580/~sgonzale/focalMechanism>



Observaciones y futuros avances:

- Finalizar el convenio con Universidad Central
- Finalizar las reparaciones de Exposismos
- Presentar proyecto de itinerancia de muestra Exposismos
- Realizar actividades de en colegios (relacionadas con ciencias de la tierra)
- Aplicar comparaciones a tiempo real en la aplicación para mecanismos focales
- Añadir otras características a la aplicación, como:
 - Visualización de sismogramas
 - Consultas por estaciones
 - Agregar más esquemas de comparación (USGS, CMT, etc.)

Imágenes:



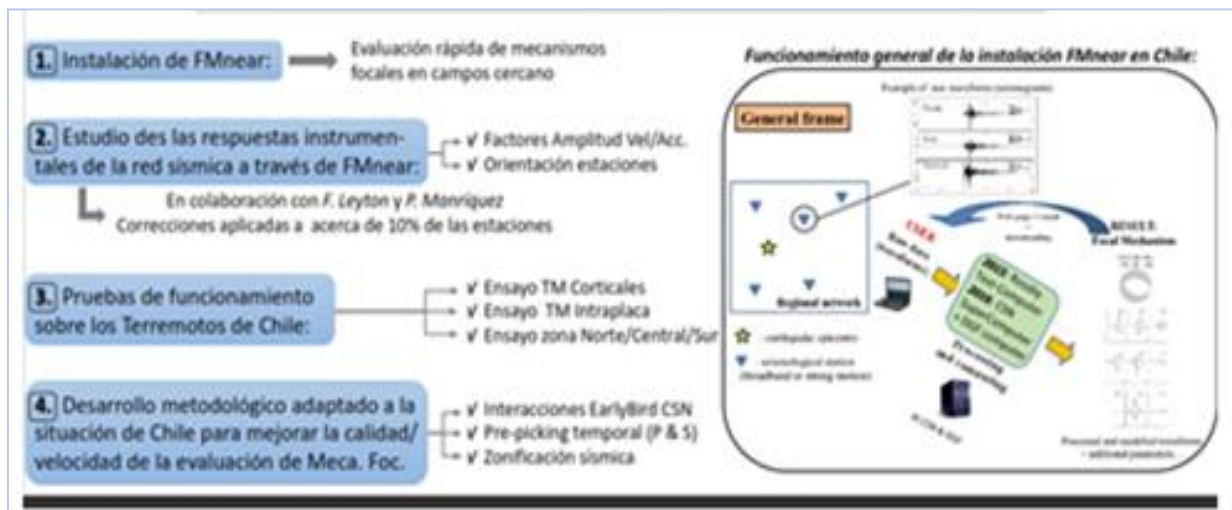


9. Proyecto: Desarrollo de sistemas de control de calidad para la base de datos sismológica nacional

Investigadores: Benoit Derode, Senén González, Bertrand Delouis, Sebastián Riquelme, Jaime Campos

Objetivo:

Desarrollar e implementar una metodología para la verificación de QA/QC de las señales sísmicas disponible en la base de datos del CSN. Esta metodología se basa en estudio de caso (terremotos locales y regionales) mediante algoritmos y programas de tratamiento de señales para verificar y validar la data sismológica a nivel nacional.



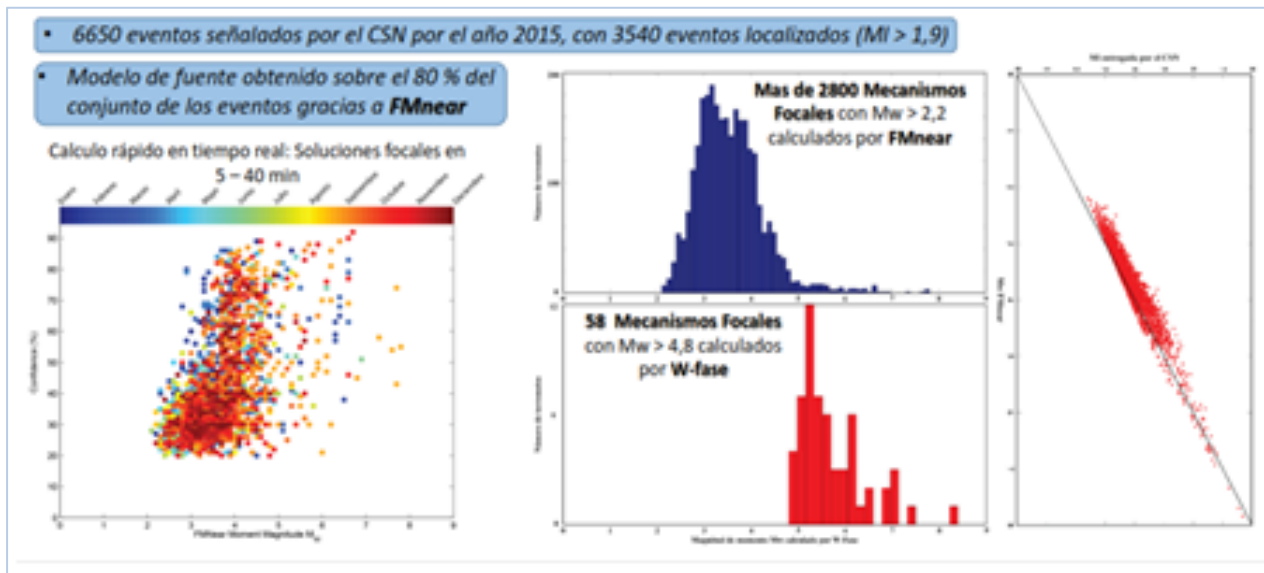


10. Proyecto: Nuevos algoritmos de detección automática para sistemas de monitoreo sísmico en tiempo real

Investigadores: Benoit Derode, Senén González, Bertrand Delouis, Sebastián Riquelme, Jaime Campos

Objetivo:

Desarrollar e implementar nuevos algoritmos destinados a mejorar procesos de detección automática de eventos en sistemas chilenos de monitoreo sísmico en tiempo real, estudiando en particular la generación, eficiencia, diseño, aplicabilidad e implementación de estos algoritmos.





11. Desarrollo de productos y servicios para la difusión de información sísmológica.

Investigadores: Benoit Derode, Senén González, Bertrand Delouis, Sebastián Riquelme, Jaime Campos, Adrian Contreras, Emilio Tapia, Rodrigo Scheihing.

Objetivo:

Desarrollar una plataforma de visualización en tiempo real de información sísmológica, para público general y para uso científico.

1. Implementación FMnear en Tiempo-Real: → Instalación segura en el nuevo Data-Center del CSN
Instalación en paralelo de trabajo en un computador del DGF / PRS

2. Evaluación rápida: Inter-dependencia de técnicas de localización: → CSN Manual
W-phase
FMnear

3. Creación de sitio web Tiempo-Real de parametrización de fuente sísmica:

Comparación de mecanismos focales calculados, según la técnica y/o la base de datos utilizada:
FMnear / W-Phase / USGS / GCMT / SCARDEC / etc...

Fecha	Latitud	Longitud	Profundidad	Mw
2010-02-27 00:00:00	-33.50	-70.50	100	2.1
2010-02-27 00:00:00	-33.50	-70.50	100	2.1
2010-02-27 00:00:00	-33.50	-70.50	100	2.1
2010-02-27 00:00:00	-33.50	-70.50	100	2.1
2010-02-27 00:00:00	-33.50	-70.50	100	2.1
2010-02-27 00:00:00	-33.50	-70.50	100	2.1
2010-02-27 00:00:00	-33.50	-70.50	100	2.1
2010-02-27 00:00:00	-33.50	-70.50	100	2.1
2010-02-27 00:00:00	-33.50	-70.50	100	2.1
2010-02-27 00:00:00	-33.50	-70.50	100	2.1

S. Gonzalez

Observaciones y futuros avances:

- La plataforma tiene gran potencial de extensión a nivel regional ya que no existen plataformas de visualización de información sísmológica, con validación y verificación de la data, en tiempo real. Una extensión natural es entonces incluir información de países vecinos
- Una posible extensión de alto impacto es incluir en la plataforma de uso público información relevante sobre demografía, infraestructura crítica, etc.
- Otra extensión de alto impacto es la incorporación de herramientas para ingenieros civiles (por ejemplo espectros a partir de acelerogramas reales).



12. Proyecto: Incorporación de los nuevos antecedentes relativos al peligro sísmico en los planes regionales de la Región Metropolitana de Santiago.

(a) Propuesta de incorporación de los nuevos antecedentes relativos al peligro sísmico en el Plan Regional de Ordenamiento Territorial.

Investigadores: Juliette Marín, Jaime Campos.

Objetivo:

Formular una propuesta para la incorporación de nuevos antecedentes científicos en la caracterización del peligro sismotectónico, en el marco del Plan Regional de Ordenamiento Territorial (PROT) de la Región Metropolitana de Santiago.

Tareas realizadas:

- Formulación y gestión de proyecto.
- Entrega de la propuesta ante los equipos del Gobierno Regional de la RMS.
- Presentaciones de la propuesta: Comisión de Ordenamiento Territorial e Instrumentos de Planificación del Consejo Regional ; División de Planificación y Desarrollo; Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo.

Estado de avance propuesta: 100%



UNIVERSIDAD DE CHILE



(b) Participación en el Consejo Público Privado de Santiago Resiliente.

Investigadores: Julián Cortés, Jaime Campos.

Objetivo: Participar en la construcción de la estrategia regional para la resiliencia.

Observaciones:

- En 2016, en el marco de la iniciativa “100 Ciudades Resilientes (100RC)” de la Fundación Rockefeller, la Intendencia de la RMS invitó al PRS como miembro del Consejo Público Privado de Santiago Resiliente.

(c) Partner académico de la Intendencia en la temática del riesgo sísmico en la Región Metropolitana de Santiago.

Investigadores: Juliette Marin, Jaime Campos.

Objetivos:

- Aportar los últimos antecedentes científicos y el estado del arte en la estimación del riesgo sísmico para su incorporación en los planes regionales que contribuyan a la resiliencia de la Región Metropolitana de Santiago.
- Ser la contraparte científica de la Intendencia de la RMS en temáticas relativas al riesgo sísmico en la región.

Observaciones:

- En 2016, en el marco de la iniciativa “100 Ciudades Resilientes (100RC)” de la Fundación Rockefeller, la Intendencia de la RMS invitó al PRS como Partner académico de referencia para la temática del riesgo sísmico en la región.



13. Proyecto: Investigación interdisciplinaria sobre la crisis sísmica e institucional de Aysén 2007.

Investigadores: Enrique Aliste, Jaime Campos, Julián Cortés, Juliette Marín, Angelina Quezada.

Objetivo:

Desarrollar de un estudio interdisciplinario para analizar el caso de la gestión del desastre de Aysén 2007 en vista de formular aprendizajes para el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres.

Tareas realizadas:

- Julio 2015: Inicio del 1er estudio *“Aysén 2007, de una deficiencia de la gestión del riesgo de desastres a una crisis de gobernanza”*.
- Noviembre 2015: Presentación del 1er estudio en el Seminario internacional del Centro de Estudios de Conflicto y Cohesión Social (COES).
- Diciembre 2015: Postulación y adjudicación de fondo a través del Programa de Fomento a Iniciativas Interdisciplinarias y Transdisciplinarias de la Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Chile.
- Marzo 2016: Integración del profesor Enrique Aliste (FAU, FACSÓ). Inicio del 2do estudio *“Instituciones, sociedad civil, ciencia: una mirada crítica al terremoto de Aysén 2007”*.
- Junio 2016: Integración de la estudiante Angelina Quezada para apoyar con la sistematización de antecedentes.

Estado de avance: 50 %

Observaciones y futuros avances:

- Se piensa publicar los resultados de la investigación en dos revistas de orientación transdisciplinaria.
- Se piensa difundir los resultados de la investigación en un formato abierto.
- Se espera difundir los resultados de la investigación con la organización de un Workshop transdisciplinario en Santiago.



14. Proyecto: Curso de Formación General interdisciplinario sobre desastres en Chile

Equipo: Jaime Campos, Julián Cortés, Juliette Marín.

Objetivo: Desarrollar el 1er curso de formación general interdisciplinario sobre los desastres sicionaturales en Chile, la gestión de sus riesgos y los aportes de las diferentes disciplinas de la Universidad para la construcción de resiliencia ante desastres.

Tareas realizadas:

- Julio 2015: Concepción y diseño del CFG.
- Agosto 2015: Postulación y aceptación del curso ante la Vicerrectoría de Asuntos Académicos.
- Semestre Primavera 2015: 1era edición del CFG, “Gestión del Riesgo de Desastres Socio-Naturales : una Introducción Crítica e Integral a la Situación Chilena”.
Lanzamiento del blog del curso.
- Agosto 2016: Postulación y aceptación de una nueva edición del curso ante la Vicerrectoría de Asuntos Académicos.
- Semestre Primavera 2016: 2nda edición del CFG, “Desastres Sicionaturales en Chile : una Introducción Crítica”.

Estado de avance CFG-2015: 100%.

Estado de avance CFG-2016: 50%.

Observaciones y futuros avances:

- En la 1era edición de 2015, participaron más de 10 académicos de 5 facultades diferentes.
- La 1era edición fue calificada muy exitosamente por los estudiantes y docentes participantes. Cuatro estudiantes continuaron con prácticas y/o tesis relacionadas a la temática del CFG y con vinculación con el equipo docente.



UNIVERSIDAD DE CHILE



- La 2da edición propone diferentes mejoras y considera la invitación a participar a actores de la gestión de los riesgos de desastres en Chile: Sernageomin, MOP, Fundación de Superación de la Pobreza, Banco Santander.

VID INSTITUCIÓN EDUCACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
UNIVERSIDAD DE CHILE

CFG Cursos de Formación General
Sistema Transversal
Año de Inicio de la Carrera

CURSO FORMACIÓN GENERAL
GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES SOCIO-NATURALES:
“UNA INTRODUCCIÓN CRÍTICA E INTEGRAL A LA SITUACIÓN CHILENA”

OBJETIVO: “Desarrollar una mirada transdisciplinaria, potenciando habilidades comunicacionales y de trabajo en equipo”.

“La importancia creciente en magnitud y frecuencia de eventos de desastres durante las últimas décadas, junto con sus consecuencias mayores en términos humanos, sociales y económicos, han mostrado la falta de planificación y gestión de riesgos previo a la ocurrencia del evento, demandando en el cuestionamiento de los paradigmas fundacionales del sistema de gestión del riesgo en Chile.

La vigencia de este tema y su gran impacto social requieren de una participación activa de los diferentes niveles de la comunidad, y para ello se necesitan ciudadanos formados en estos temas, conscientes de su responsabilidad y capaces de formular una visión crítica incorporando un enfoque interdisciplinario (social-cultural, físico, salud, político, institucional, productivo) y considerando el uso de los recursos y el desarrollo sustentable y resiliente.”

Profesor responsable:
Jaime Campos | FCFM
Rose Marie Garay | FCFM
Ricardo Tapia | IIAU

Enrique Aliste | IIAU
Paulina Aldunce | FIC-Agro
Sonia Pérez | FACSIO
Carlos Góida | Fac. Med.
Richard Weber | FCFM
Daniela Ejsnerstewicz | Fac. Der.
Julian Cortez | FCFM

Fechas del curso:
Todos los martes desde
25 de agosto

Horario:
16:15 a 17:45 hrs.

Lugar:
FACULTAD DE DERECHO | Sala 34

Asistente Principal - Contacto:
Juliette Marin | FCFM
jmarin@dgef.uchile.cl

Comisión de Riesgos Socionaturales
UNIVERSIDAD DE CHILE

www.dgef.uchile.cl



UNIVERSIDAD DE CHILE



15. Proyecto: Diploma de Postítulo de la FCFM, “Ingenierías & Ciencias aplicadas a la Reducción del Riesgo de Desastres”

Equipo: Jaime Campos, Juliette Marín.

Objetivo: Desarrollar el 1er diplomado interdisciplinario de la FCFM sobre desastres sicionaturales en Chile y herramientas desde la ingeniería, gestión y ciencias físicas.

Tareas realizadas:

- Agosto 2015: Concepción y diseño del Diploma.
- Marzo 2016: Coordinación del equipo docente y coordinación más específica de dos módulos.
- Julio 2016: Presentación ante el Consejo de la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Estado de avance: 75%

Observaciones y futuros avances:

- Se espera la 1era edición durante el semestre de Otoño 2017.
- Potencial de crecimiento en la modalidad de *blended learning* para las próximas ediciones.



UNIVERSIDAD DE CHILE



16. Proyecto: Fiesta de las Ciencias Explora 2015

Equipo: Jaime Campos, Julián Cortés, Senén González, Juliette Marín.

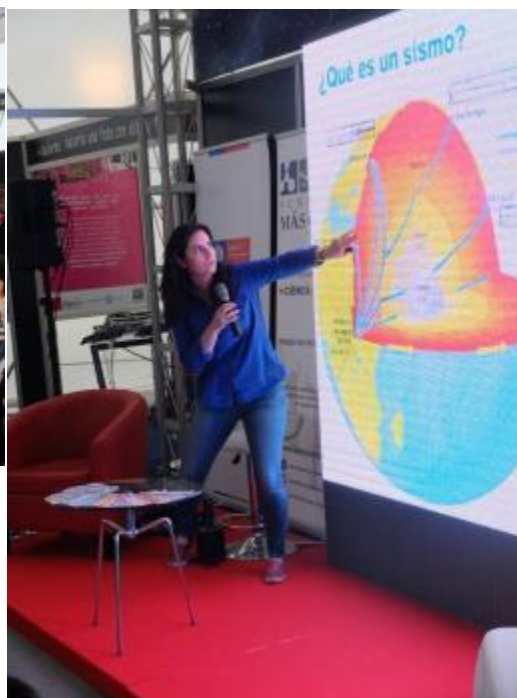
Objetivo: Difundir temas de la ingeniería y sismología a la ciudadanía.

Tareas realizadas:

- Noviembre 2015: Presentación por Juliette Marín de “Los sismos y sus mitos” en la Fiesta de las ciencias de Explora.
- Noviembre 2015: Realización de actividad con sismógrafo en el marco de la Fiesta de las ciencias de Explora.

Estado de avance: 100%

Imágenes:





17. Proyecto: Tenten, participación al concurso AULAB 2015

Equipo Tenten: Andrés Martínez, Daniela Calle, Ximena González, Catalina Morales.

Equipo PRS: Jaime Campos, Juliette Marín.

Objetivo: Apoyar e incentivar la participación de estudiantes en un concurso nacional de innovación para la reducción de los desastres en Chile (concurso AULAB, organizado por el Laboratorio de Gobierno).

Estado de avance: 100%

Observaciones:

- El proyecto patrocinado por el PRS, denominado “TenTen”, fue completamente ideado y elaborado por estudiantes del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y de Concepción. La iniciativa fue seleccionada en una primera etapa y el equipo participó en un campamento los días 21 y 22 de noviembre 2015. En la siguiente etapa, el proyecto no fue escogido.

La propuesta del equipo de estudiantes del proyecto TenTen era la creación e implementación de una plataforma online automática, rápida y de fácil acceso, que informa al público acerca de los peligros asociados a la ocurrencia de desastres naturales. Tiene tres niveles: el primero con información general (qué es un volcán, por ejemplo), el segundo es un mapa georreferenciado con toda la información disponible y, finalmente, un nivel donde se puede consultar a expertos. La plataforma ayuda en la toma de decisiones de mecanismos de emergencia y reúne la información, que ya existe en variadas fuentes públicas, tanto nacionales como internacionales, en un solo lugar.



UNIVERSIDAD DE CHILE



The screenshot shows a web browser window with the URL www.tenenchile.cl. The page features the PRS logo and the text "Ten Ten Chile Información de amenazas" next to the Universidad de Chile crest. On the left is a map of Chile with the southern part highlighted in blue and the northern part in yellow. On the right, there are four navigation buttons: "Vulcanología", "Meteorología", "Sismología", and "Hidrología".



18. Proyecto Caracterización Geofísica de la Cuenca de Santiago para la estimación de Riesgo Sísmico

Investigadores: Sergio Contreras, Daniel Díaz, Emilio Vera, Andrei Maksymowicz, Luis Villegas, Maximiliano Leiva y Felipe González.

Objetivo general: Caracterización geofísica de la cuenca de Santiago para una estimación del riesgo sísmico y microzonificación de la cuenca.

Objetivos específicos:

1. Desarrollar un método para construir un modelo geofísico que permita caracterizar la cuenca de Santiago con el propósito de describir su morfometría y relleno.
2. Construir un modelo geofísico para la caracterización de la cuenca de Santiago.
3. Hacer un análisis e interpretación del modelo geofísico de la cuenca de Santiago para una microzonificación sísmica (estimación de riesgo sísmico).

Principales Conclusiones:

1. El resultado del cálculo en la anomalía de Bouguer residual, sugiere la presencia de otros cuerpos anómalos que hacen imprecisa la determinación del espesor sedimentario en algunos sectores de la cuenca, sin información complementaria que ayude a estimar profundidades a la que se encuentra el basamento.
2. El modelado 2D presenta dificultades principalmente en la determinación de regionales y en la existencia de altos gravimétricos en algunos perfiles que pueden ser producto de dos situaciones: la disminución de espesor sedimentario debido a cerros y montes que se encuentran cubiertos bajo los sedimentos o a la existencia de cuerpos anómalos de mayor densidad que influyen en los valores gravimétricos medidos.



3. Se observan depocentros importantes al interior de la cuenca, en el sector de Buin-Paine, en la comuna de Puente Alto, en el sector oriente de Santiago (principalmente Las Condes-La Reina) y en el sector Poniente de Santiago (principalmente en Renca, Lo Prado, Conchalí, Cerro Navia y Pudahuel, además del sector de Caren).

Recomendaciones:

1. Integrar modelos TEM desarrollados para el amarre de perfiles de gravimetría modelados, principalmente donde se observa importantes anomalías de gravedad positiva.
2. Trabajar en conjunto con expertos de PRS en la construcción de una metodología que permita integrar información de riesgo sísmico con el modelo geofísico de la cuenca de Santiago.
3. Avanzar con el trabajo de modelado gravimétricos 2.5D y 3D de la cuenca.

Otros avances:

- Proyecto tesis de Magíster: Maximiliano Leiva “CARACTERIZACIÓN SOMERA DE LA FALLA SAN RAMÓN MEDIANTE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA”
- Proyecto Tesis de Magíster: Bárbara Blanco. “MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN LA CUENCA DE SANTIAGO”
- Publicaciones en el Congreso Geológico 2015.
- Publicaciones en el Congreso SAGEEP 2016, Denver, EEUU.

Futuros avances:

1. Proyecto N_BHM1601_01 Elaboración de la Base de Datos Geofísica y de las herramientas de análisis y visualización para el Mapa de Amenaza Sísmica de “OrdenCero” para la Región Metropolitana de Santiago.
2. Morfometría de la cuenca mediante método TEM-Grav. Focalizar estudios gravimétricos y TEM en la zona sur. Estaciones cada 500[m].
3. Integración de la morfometría de la cuenca con variables como Intensidad sísmica y niveles freáticos.



4. Aplicación de metodología Grav-TEM en el estudio de la morfometría de la cuenca de Rancagua. Trabajo en colaboración con el equipo de Sergio Ruiz.
5. Estudios de ruido sísmico (MASW) en zonas urbanas de la cuenca de Santiago como nuevo método geofísico para el estudio de Cuencas.
Target: caracterización de la cuenca en V_p - V_s en el relleno sedimentario y techo del basamento. Primera etapa experimental. Trabajo en colaboración con el equipo de Sergio Ruiz.

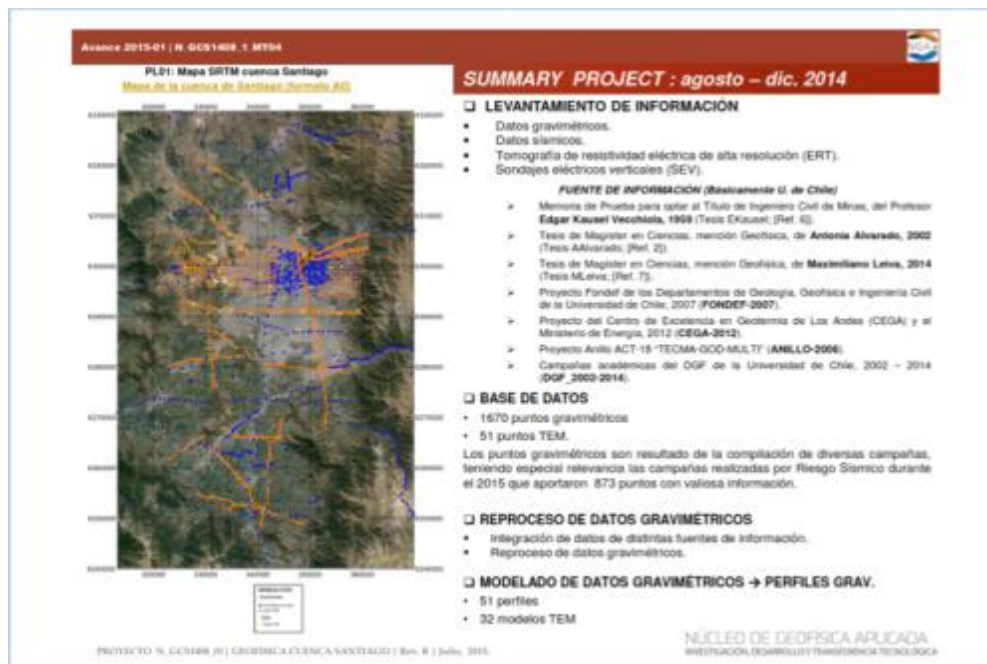


Figura 1: Perfiles de los trabajos de campo realizados en la cuenca de Santiago sobre los cuales se han tomado datos para la caracterización geofísica de la Región Metropolitana que permita elaborar un mapa de respuesta sísmica y mapa de peligro sísmico del Programa Riesgo Sísmico (PRS).

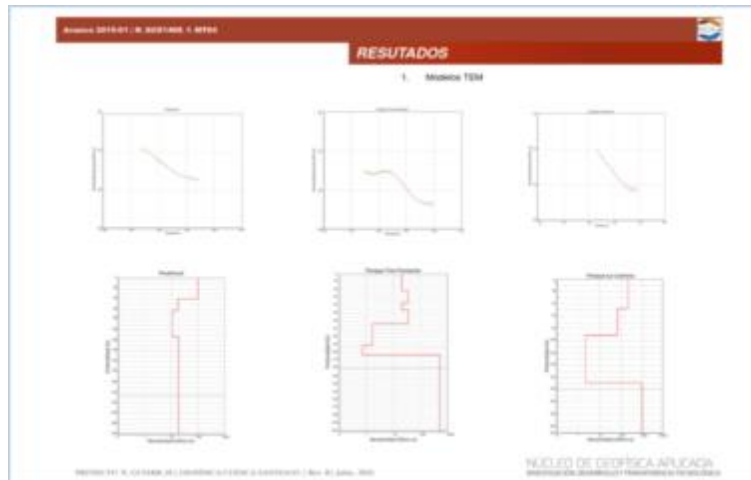


Figura 2: Determinación de la resistividad eléctrica de la estructura del subsuelo mediante el método del Transiente Electromagnético (TEM). Resultados de la morfometría de la cuenca de Santiago.

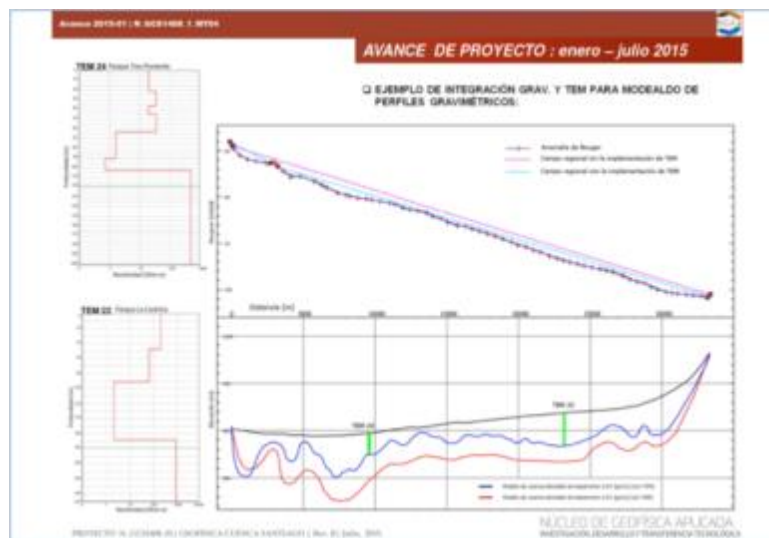
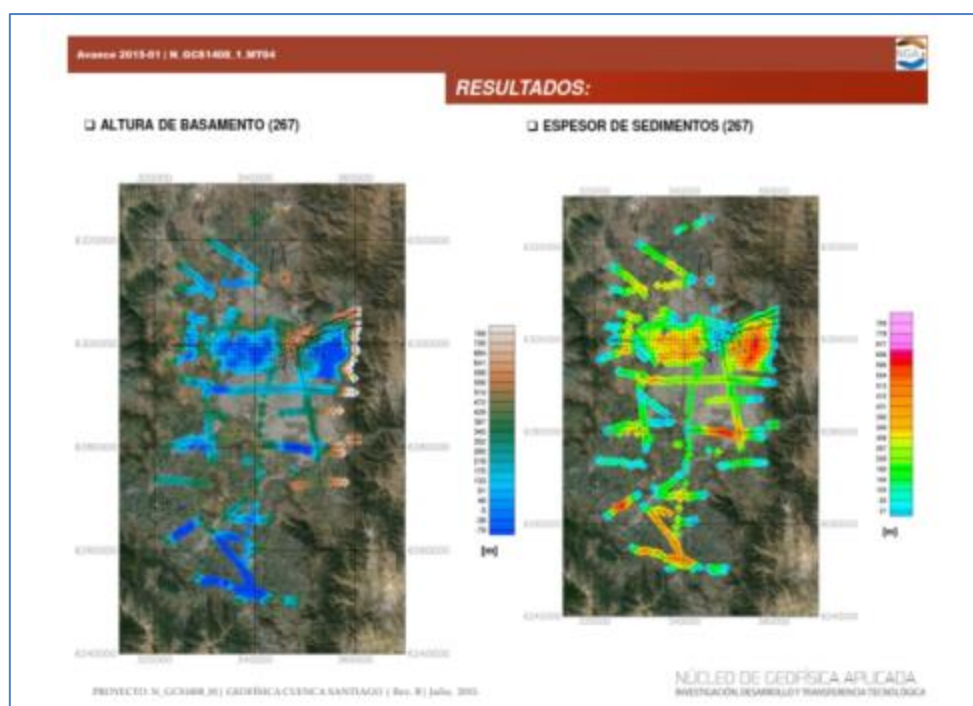
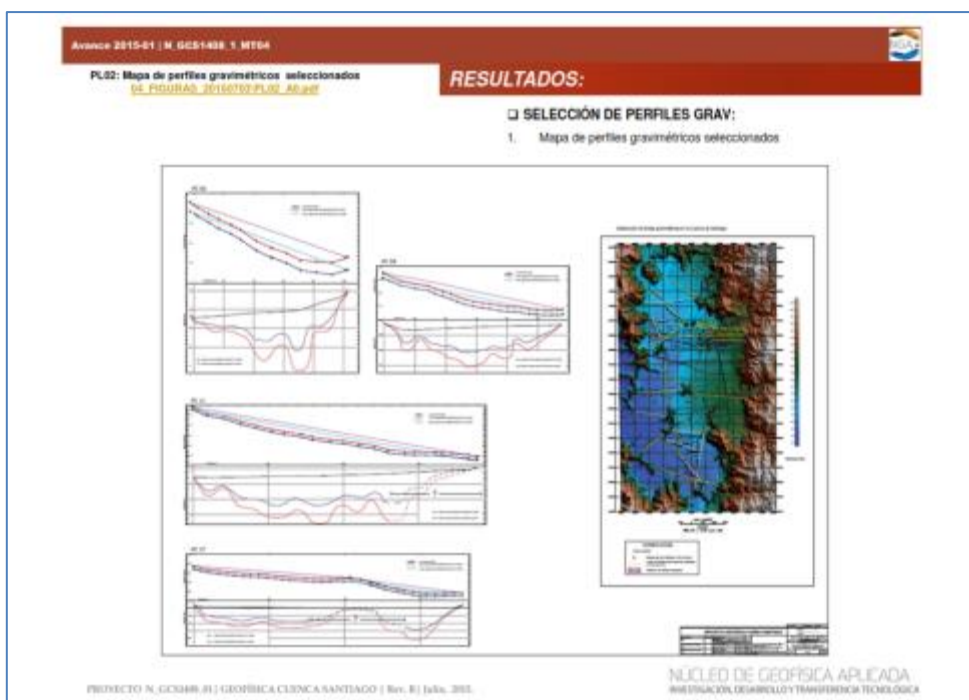
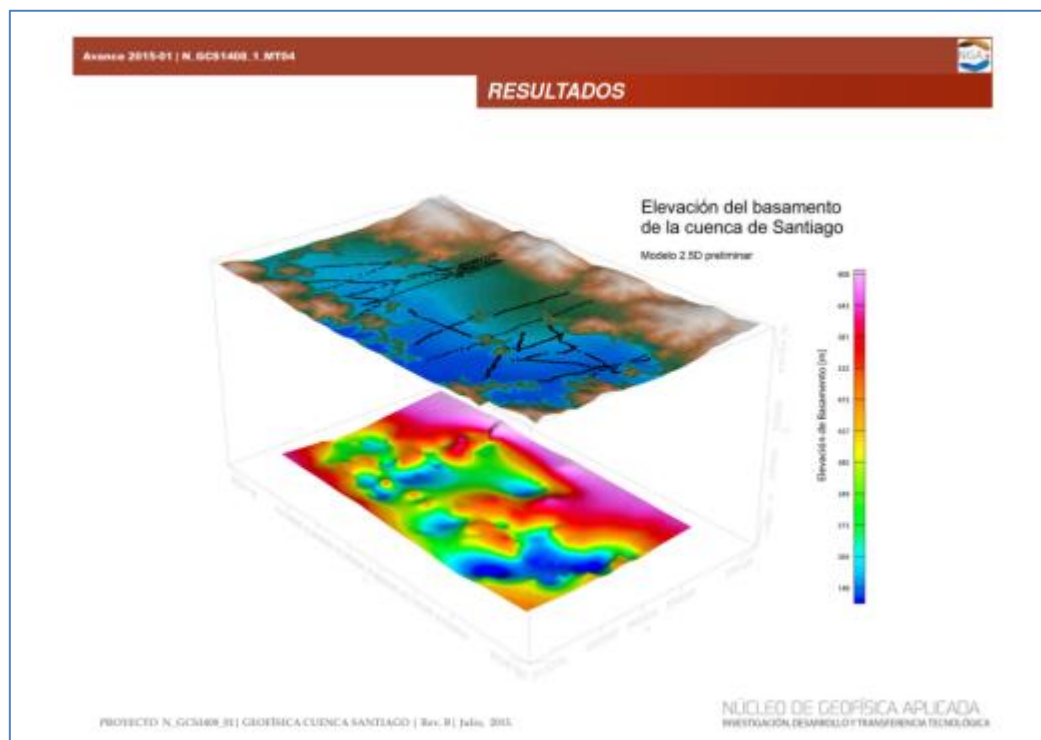
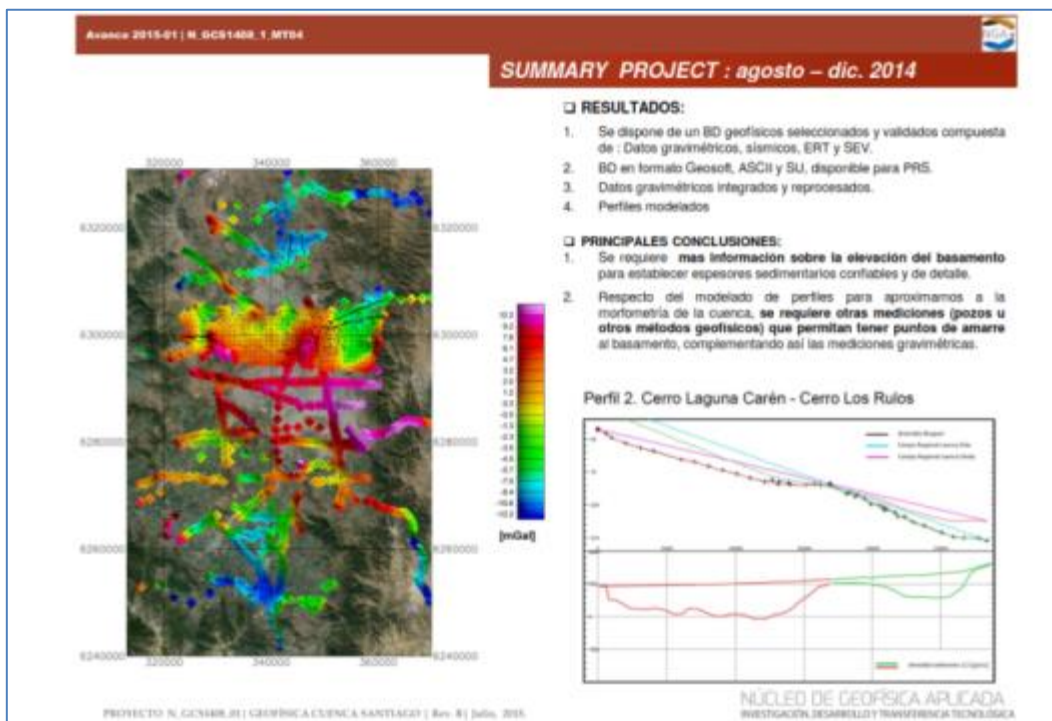
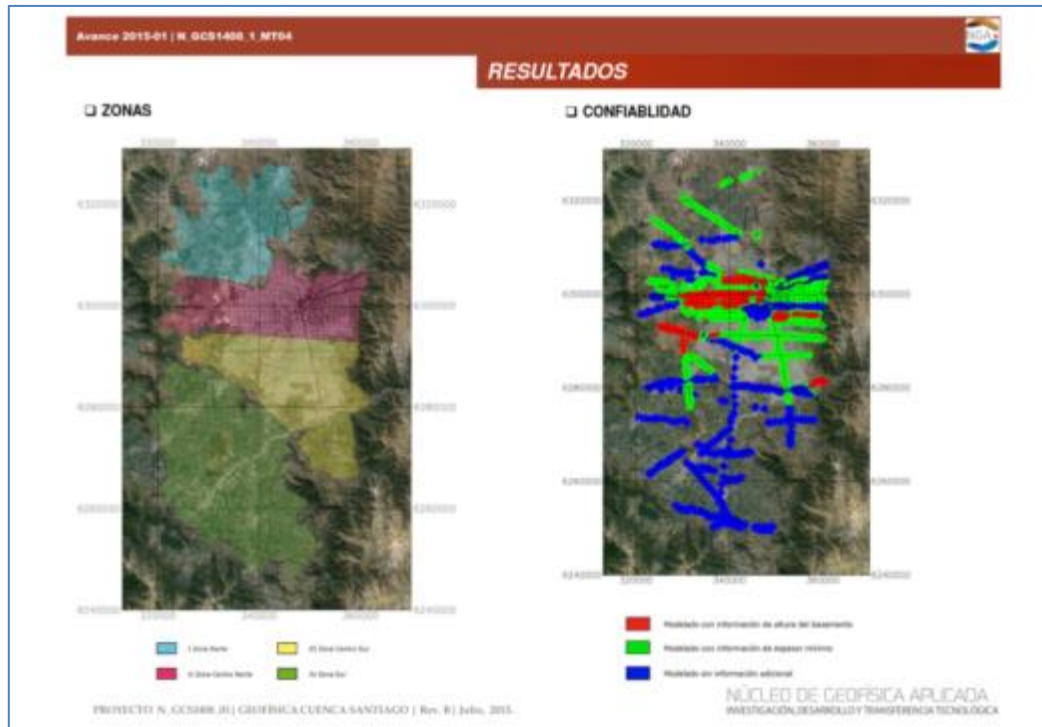


Figura 3: Modelamiento conjunto de resultados del modelo TEM (técnica electromagnética en el dominio del tiempo) y datos de gravedad para el amarre y modelamiento conjunto a lo largo de perfiles en la cuenca de Santiago, principalmente donde se observa importantes anomalías de gravedad positiva.





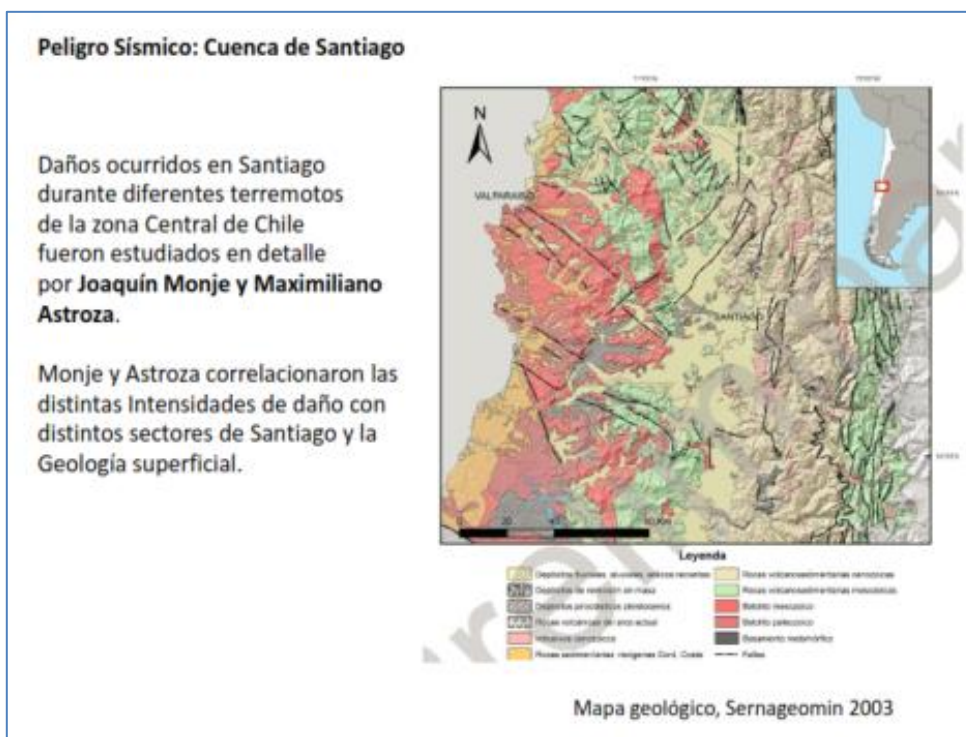




19. Proyecto: Nuevas estimaciones del peligro sísmico en la cuenca de Santiago con métodos probabilísticos

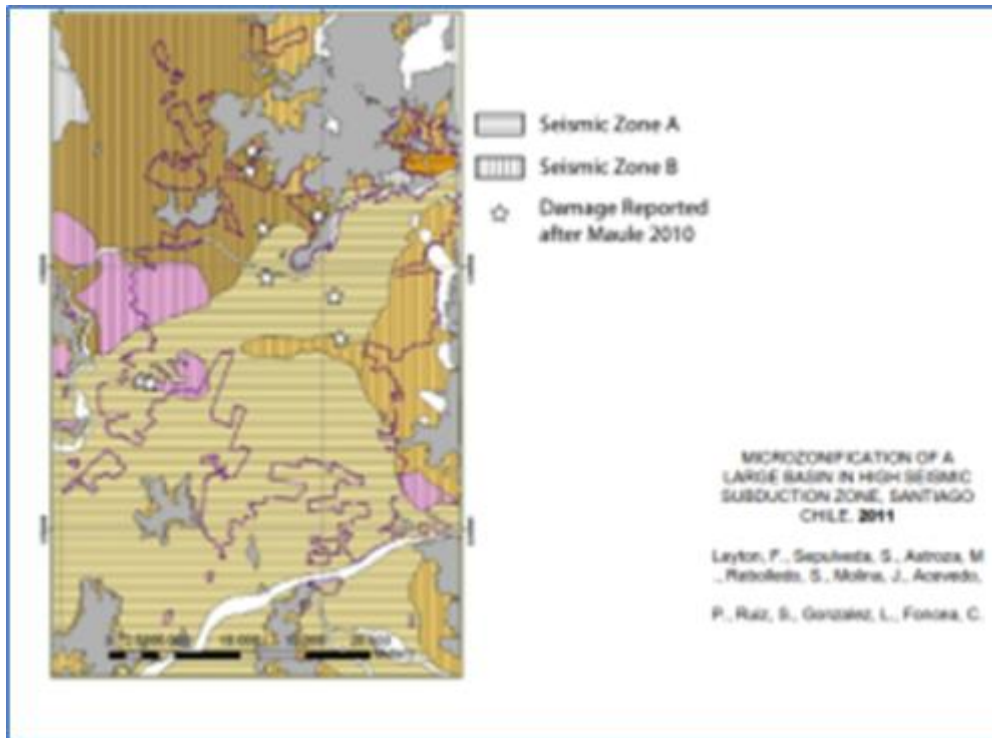
Investigadores: Sergio Ruiz, Cesar Pasten., Felipe Leyton, E. Rivera, C. Otárola, C. Herrera, B. Idini, M. Sáez, J. Salomón, R. Silva.

Objetivo: Mejorar las estimaciones del peligro sísmico en la cuenca de Santiago usando métodos probabilísticos e incorporando estudios de efectos de sitio y nuevas formulas de atenuación.

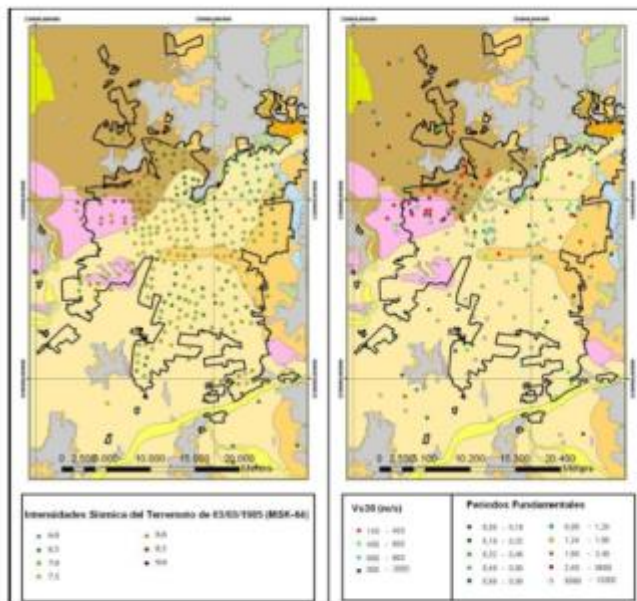




UNIVERSIDAD DE CHILE



La cuenca de Santiago: ETAPA 0



MICROZONIFICACION OF A LARGE BASIN IN HIGH SEISMIC SUBDUCTION ZONE, SANTIAGO CHILE. 2011

Leyton, F., Sepulveda, S., Astroza, M., Rebolloso, S., Molina, J., Acevedo, P., Ruiz, S., Gonzalez, L., Foncea, C.



Peligro Sísmico Probabilístico: Versión 1.0

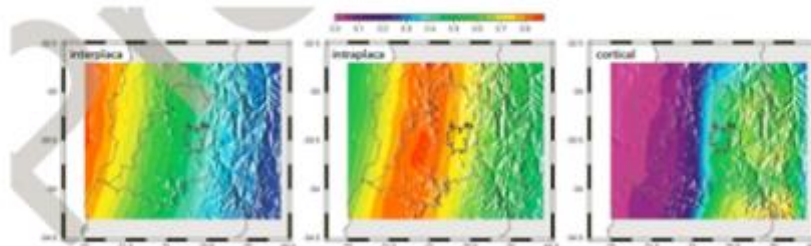
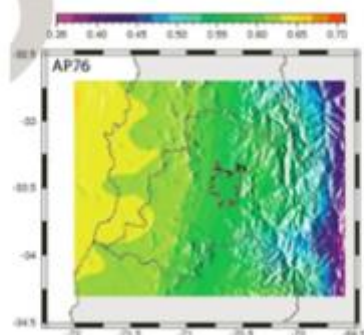


FIG. 11. PGA esperado para un periodo de retorno de 1950 años (ver detalles en figura 10).



Leyton, F., Ruiz, S y Sepúlveda, S., (2009)

Peligro Sísmico Probabilístico: Versión 1.0

Fórmulas de atenuación utilizadas: Ruiz y Saragoni (2005)
Problemas en esta y otras fórmulas para incorporar adecuadamente el **efecto del Suelo**

Peligro Sísmico Probabilístico: Versión 2.0

Fórmulas de atenuación que incorporen el efecto del Suelo medido usando H/V
Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S. and Pastén, C. (2016)
Submitted Bulletin of Earthquake Engineering



Peligro Sísmico Probabilístico: Versión 2.0 Nuevas Fórmulas de Atenuación

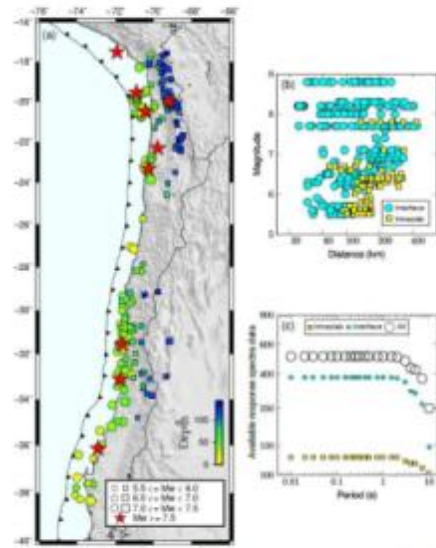


Fig. 6. Description of the database used. (a) Spatial distribution of the Chilean earthquake epicenters with strong motion records used in the GMPE and the other confidence database. The location controls and recorded response configurations are shown. (b) Magnitude versus distance of the response spectra data used in the GMPE database. (c) Peak number of response spectra data used in the GMPE database at each period.

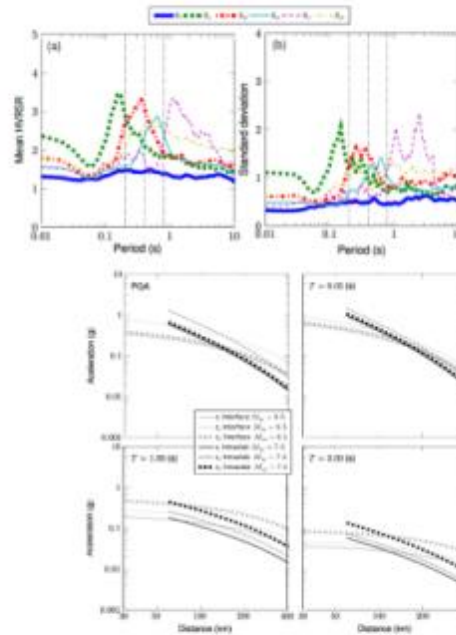


Fig. 7. Horizontal motion prediction confidence profiles and peak type using different site conditions. (a) Peak H/V ratio versus period and distance. The vertical axis scale positions are for $R_b = 0.5$ and for special conditions positions for $R_b = 1.5$.

Idini et al. (2016)

Peligro Sísmico Probabilístico: Versión 2.0

Nuevas Fórmulas de Atenuación

Considerando los efectos de suelo obtenidos usando medidas de H/V

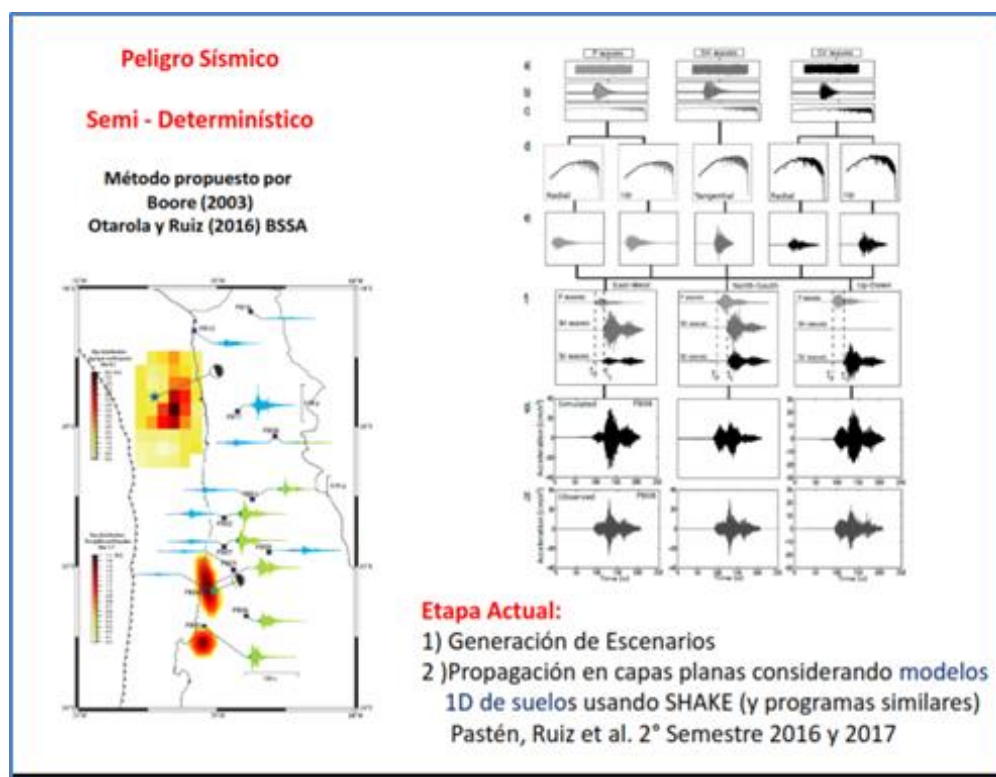
Leyton, Ruiz, Pastén et al.: 2° Semestre 2016



20. Proyecto: Nuevas estimaciones del peligro sísmico en la cuenca de Santiago con método semi-determinístico

Investigadores: Sergio Ruiz, Cesar Pasten., Felipe Leyton, E. Rivera, C. Otárola, C. Herrera, B. Idini, M. Sáez, J. Salomón, R. Silva.

Objetivo: Implementar un nuevo método semi-determinístico para estimar el peligro sísmico en la cuenca de Santiago con el fin de mejorar la caracterización sísmica de la región y validar resultados existentes.

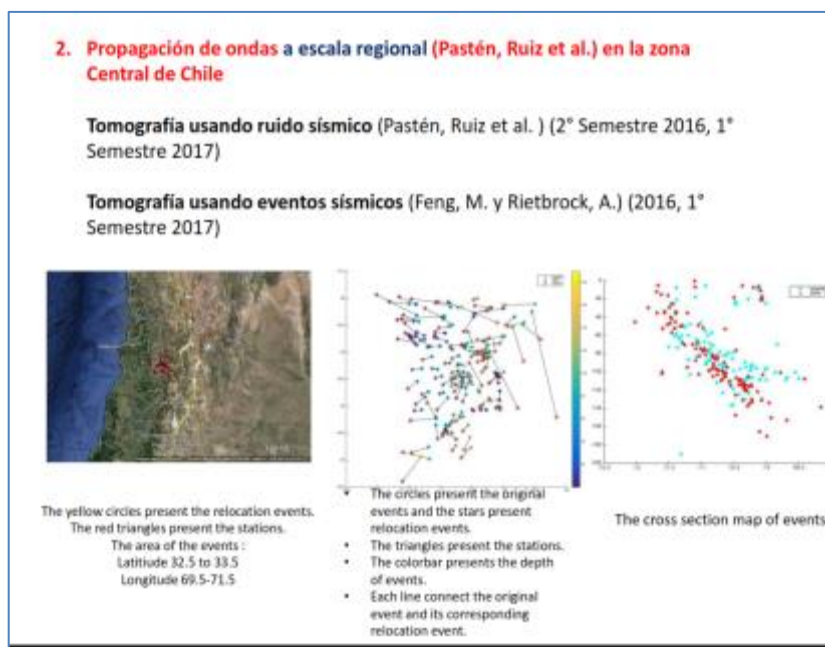
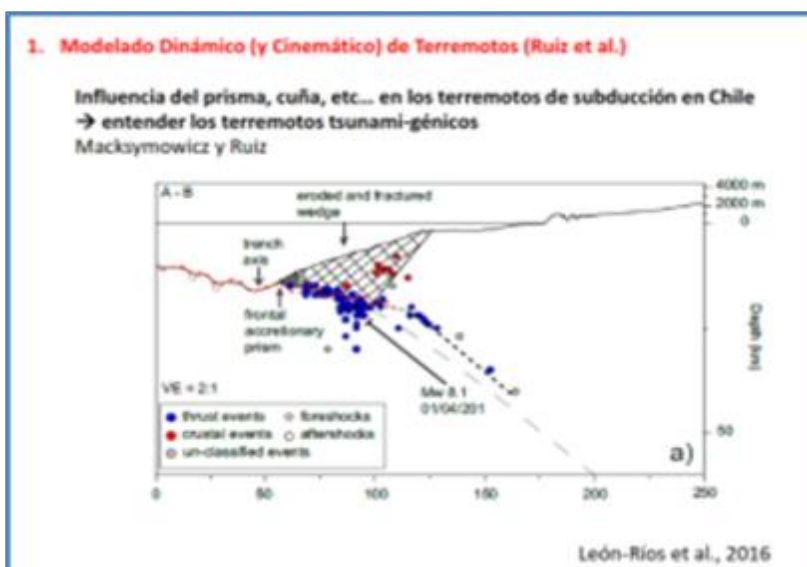




21. Proyecto: Nuevos modelos de propagación de ondas a escala regional en la zona central de Chile

Investigadores: Sergio Ruiz, Cesar Pasten., Felipe Leyton, E. Rivera, C. Otárola, C. Herrera, B. Idini, M. Sáez, J. Salomón, R. Silva.

Objetivo: Construir un modelo adecuado a la realidad nacional, con un modelado dinámico y cinemático de terremotos que incluya la influencia del prisma y una mejora del modelado de la propagación de ondas a escala regional en la zona central de Chile.





22. Proyecto: Construcción de un modelo de velocidad 3D de la cuenca de Santiago a escala métrica

Investigadores: Cesar Pastén, Felipe Leyton, Sergio Ruiz, Sergio Contreras, Daniel Díaz, Emilio Vera, Andrei Maksymowicz, Luis Villegas, Maximiliano Leiva y Felipe González.

Objetivo: Construir un modelo de velocidad 3D de la cuenca de Santiago que permita entender y simular la propagación de ondas a escala regional.

<p>3. Propagación a escala de cuenca (Pastén, NGA, Leyton, Ruiz et al.)</p> <p>Objetivo Final: Modelo de velocidad 3D de la Cuenca (escala métrica).</p> <p>Geometría de la Cuenca: NGA</p> <p>Perfiles de Velocidad: Escala de kilómetros [1 – 3] km</p> <p>Pastén, C., Saéz, M., Ruiz, S., Leyton, F., Salomón, J. and Poli, P. (2016) Deep Characterization of the Santiago Basin using HVSR and Cross-Correlation of Ambient Seismic Noise. Engineering Geology, 201, 57-66</p> <p>Perfiles de Velocidad: Escala de centenas de metros (10 a 500 metros)</p> <p>Test de Ruido Sísmico: Pastén, NGA y Ruiz (2° Semestre 2016)</p> <p>Toma de medidas y desarrollo de perfiles de velocidad (2017)</p> <p>"TOMOGRAFÍA A ESCALA DE CUENCA"</p> <p>2° Semestre 2016 y 2017</p>	<p>Perfiles de Velocidad: Escala de kilómetros (1 – 5) km</p> <p>Pastén, C., Saéz, M., Ruiz, S., Leyton, F., Salomón, J. and Poli, P. (2016) Deep Characterization of the Santiago Basin using HVSR and Cross-Correlation of Ambient Seismic Noise. Engineering Geology, 201, 57-66</p>
---	---





Correlación Cruzada

La correlación cruzada (C.C) de dos señales mide el grado de similitud entre ellas

Temporalmente la C.C. entre x_1 y x_2 para un desfase τ , se expresa como :

$$C_{12}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} x_1(t) \cdot x_2(t + \tau)$$

Espectralmente la C.C. se expresa como :

$$\rho_{12}(w) = F(w) \cdot G^*(w)$$

Donde F es el espectro de Fourier de x_1 y G^* el conjugado del espectro de Fourier de x_2

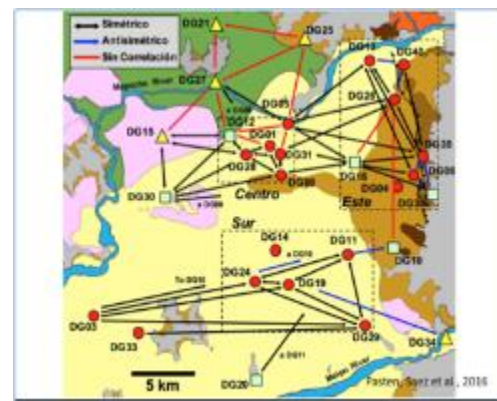


Función de Green

Shapiro and Campillo (2003) muestran que la C.C. de ruido sísmico es similar a la función de Green entre los sensores

$$\frac{dC_{12}(t)}{dt} = -G_{12}(t) + G_{12}(-t) \approx -G_{12}(t) + G_{12}(-t)$$

Estimar la función de Green (función impulso) permite conocer la características dispersivas del medio



Curvas de dispersión

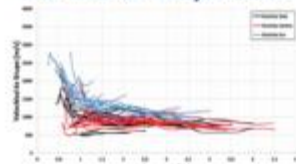
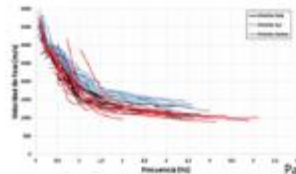
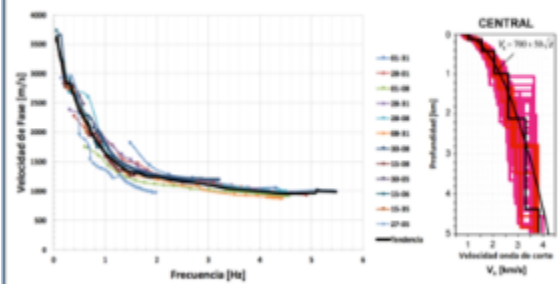


Figura 1.25. Velocidad de grupo de los sismos que originan los Ruido Sísmico Centro y Sur



Pasten, Sáez et al., 2016

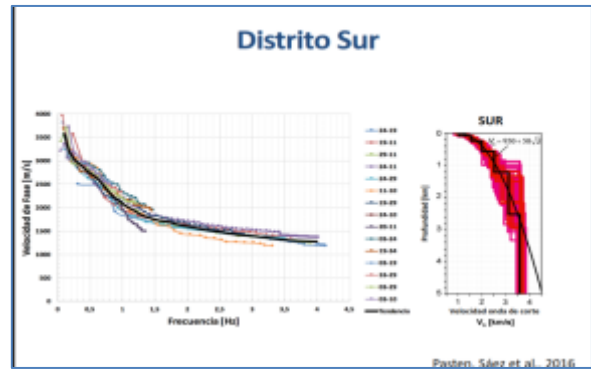
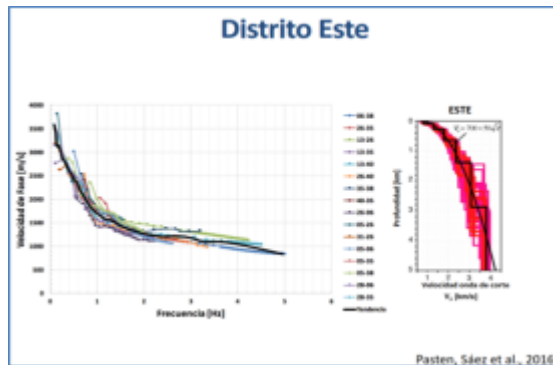
Distrito Centro



Pasten, Sáez et al., 2016



UNIVERSIDAD DE CHILE



Método de Ruido Sísmico funciona bien para escala regional y kilométrica

1° Test escala Pequeña (Instrumentos Trominos)

2° Test escala cuenca (decenas – centenas de metros) (Instrumentos ¿?)

Test: 1 Ruido sísmico en pequeña escala. Experimento Lolleo, único lugar en Chile donde hay un pozo con información geotécnica (geofísica) hasta la roca (60 metros)

Pastén, Sáez, Leyton, Ruiz (1° Semestre 2016)



Buenos resultados, pero a priori no se observa la capa invertida

Test 2

Escala de centenas de metros (10 a 500 metros)

Pastén, NGA, Leyton, Ruiz

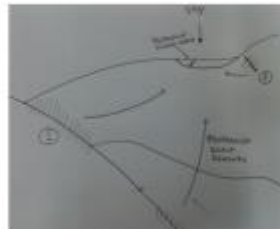
Trominos, Banda-Ancha????



“TOMOGRFÍA A ESCALA DE CUENCA”

2° Semestre 2016 y 2017

Propagación Numérica de la Cuenca



Programa Bielik, Taborda et al.
Elementos Finitos

Mockzo, Kristek et al.
Diferencias Finitas

Decisión 1° Semestre 2016
Simulaciones sintéticas 2° Semestre 2016
Caso Real Cuenca de Santiago 2017
Cuenca de Santiago + Cuenca de Rancagua 2018

Catálogo Información

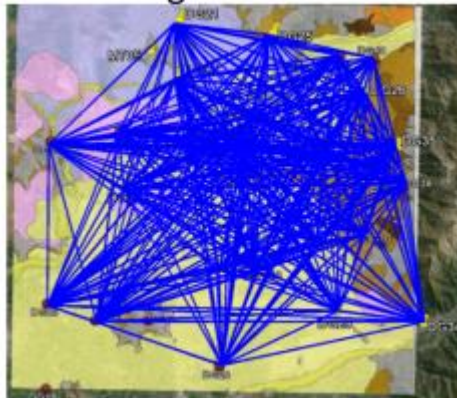


Figura 5: Rayos EK para $f=0.5[\text{Hz}]$. 356 pares útiles.



23. Proyecto Modelamiento microscópico: Física estadística de la deformación frágil (sismos/fallas) en la corteza

Investigador: Patricio Toledo, Jaime Campos.

Descripción : En el caso de la sismicidad observada en la corteza terrestre, en particular las réplicas, se puede decir que existe una declinación en el tiempo de la intensidad de los eventos $M(t)/M_0=(T_M/t)^c$ debida probablemente a una disminución en la tasa de generación de esfuerzos asociada a una etapa de relajación. Es posible introducir el periodo “de interevento” T_r por medio de la expresión $T_r/(M_0T^{-1}_0)=f(H_T)$. Cuando sea posible establecer que f alcanza una asíntota, lo que es esperable en los tiempos largos o pequeños, será posible invocar la similaridad y se tendrá $T_r \approx 1/t^{c-e}$, que es la celebrada Ley de Omori. Por lo que el proceso de generación de réplicas con decaimiento algebraico sólo puede ocurrir cuando la intensidad de los eventos decae más rápido que la generación de tensiones (o reacomodo de los esfuerzos desviatoricos) en la corteza. Es posible que la generación sea constante, en cuyo caso el proceso de aparición de réplicas será solamente función de la declinación en la intensidad de los eventos. Este es un mecanismo de cascada directa, ya que después de ocurrida la caída de tensión producto de un evento, la heterogeneidad en el espacio es necesariamente de menor escala que el evento principal, dando lugar a un proceso de liberación de energía hacia las escalas más pequeñas. Hay que observar que una ley inversa se cumple para los precursores –por los mismos argumentos acá presentados- lo que explicaría la aceleración de la sismicidad reportada como propuso Lomnitz (1994).

Ha quedado bien establecida la aparición de las leyes de potencia en el contexto del proceso de disipación de la energía que alimenta la dinámica de la corteza terrestre. Se puede generalizar la mecánica de la siguiente forma: se dispone de un fenómeno donde las variables (tal vez todas) presentan escalamientos del tipo algebraico. En una representación logarítmica estas se presentan con forma lineal, y estas variables típicamente alcanzan varios ordenes de magnitud, que se ha visto puede deberse a que estos sistemas tienen la capacidad de gastar su energía disponible a lo largo de varias escalas.

Este trabajo se concentrará en el análisis estadístico del fenómeno de la deformación frágil de la corteza (sismos) buscando una manera correcta de parametrizar el fenómeno, lo cual ha de ser con una teoría que sea simple e igualmente válida para la variable o su inversa. Este tipo de teorías se basan en el principio de la covarianza general sobre el cual descansa la



descripción moderna de la mecánica (Arnold, 1989) o el análisis dimensional (Barenblatt, 2003).

Estas duplas de variables se conocen como pares de Jeffreys y entre ellos podemos destacar el periodo y la frecuencia. Puesto que frecuentemente presentan grandes rangos dinámicos, se deben graficar en escala logarítmica y muestran además la anomalía del primer dígito (Tarántola, 2006).

La descripción del fenómeno de generación de sismicidad, en base a invarianza de escala y anomalía del primer dígito nos lleva a introducir una noción de métrica necesaria para cuantificar estos elementos. En el caso que las muestras C1 y C2 de observables (catálogos de sismicidad en una región) representen distribuciones de probabilidad, se tiene que el valor medio de estas distancias:

$$H(C2, C1) = C2 \text{ Log } C1^{-1} C2$$

Se conoce como la entropía relativa en el contexto de la física estadística (Volkenstein and Shenitzer, 2009) o contenido de información relativa (Shannon, 1948), y en el ámbito de la informática y la complejidad (Gell-Mann and Lloyd, 1996).

Main idea: Self-similarity in energy dissipation is a well stated fact. How about entropy?

$$\Delta(p, q) = \sum_{\lambda \in \Lambda} (p_{\lambda} - q_{\lambda}) \log \frac{p_{\lambda}}{q_{\lambda}},$$



Main idea: Entropy is also self-similar. We built a seismic detector based on this idea

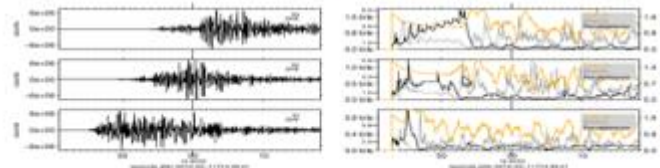
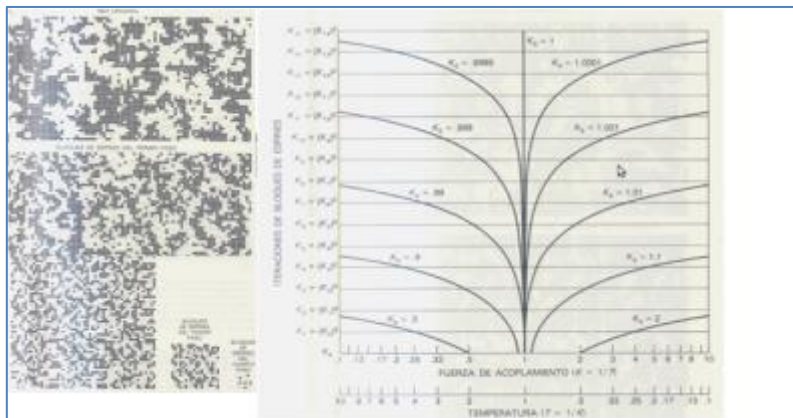


Fig. 5 Pichilemu 11/3 aftershock 1. Left panel shows east component signals recorded at stations S1, S2 and S3. Our local magnitude is ≈ 6.7 , with a source lasting approximately 3 to 4 seconds, a long time average of 2 seconds was chosen. On right panel three transients could be seen: STA/LTA, STJ/LTJ and $\Delta(p,q)$ pseudodistance for each station. Although shear waves peak stronger in horizontal components, the $\Delta(p,q)$ signal is sharp at the initial energy arrival. Short time versus long time triggers are noisier.

Proposed work: We are working on a microscopic model of fault interaction, we hope we can apply a Renormalization Group (RG) approach to understand upscaling and therefore energy dissipation from **smaller-to-bigger scale** (direct cascade) maybe the bigger-to-smaller scale transfer also maybe understood (inverse cascade)





UNIVERSIDAD DE CHILE



24. Proyecto Sismotectónica Falla San Ramón

Investigador: Gabriel Vargas

Proyecto que complementará las actividades de observación e investigación financiadas por la ONEMI a través del CSN y que tiene un horizonte de trabajo de tres años de duración. Se trata fundamentalmente de la instalación de más instrumentos sismológicos en torno a la Falla San Ramón para mejorar la resolución y niveles de detección para su monitoreo sísmico. Se realizará una explotación y análisis de la DATA adquirida por la adquisición de 3 nuevas estaciones multiparamétricas, una de ellas dentro en pozo.



GESTIÓN PRESUPUESTARIA 2016

	Monto	%
Apoyo Estudiantes ¹	68.100.000	22%
Honorarios Investigadores ²	116.740.000	38%
Honorarios Personal ³	84.353.332	27%
Gastos Operación ⁴	41.274.668	13%
Total	310.468.000	

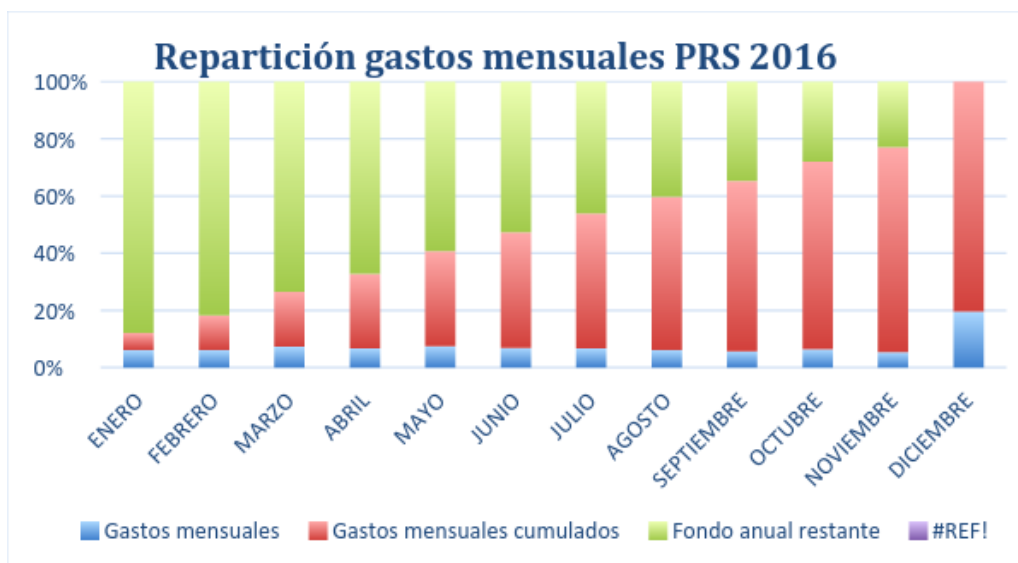
1- Integración de tesis y prácticas profesionales.

2- Académicos invitados, postdoc, investigadores del PRS.

3- Personal técnico, administrativos, apoyo de terreno.

4- Gastos Operacionales, corresponde a compra y mantención de equipos, impuestos, insumos oficina, traslados, viáticos.







GESTIÓN PRESUPUESTARIA 2015

	Monto	%
Apoyo Estudiantes ¹	41.133.286	36,15%
Honorarios Investigadores ²	31.859.789	28,00%
Honorarios Personal PRS ³	20.670.302	18,17%
Gastos Operacionales ⁴	20.108.541	17,67%
Total :	113.771.918	

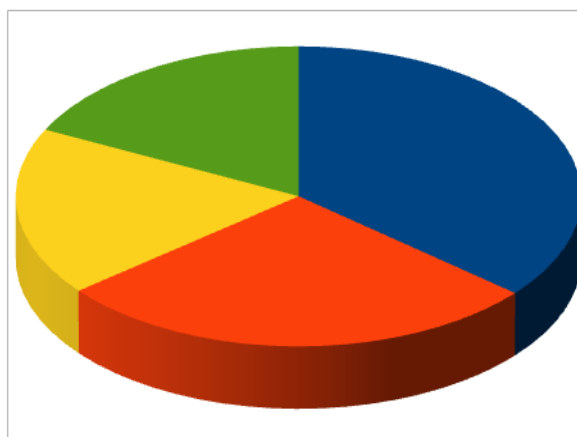
1- Integración de tesis y prácticas profesionales.

2- Académicos invitados, postdoc, investigadores del PRS.

3- Personal técnico, administrativos, apoyo de terreno.

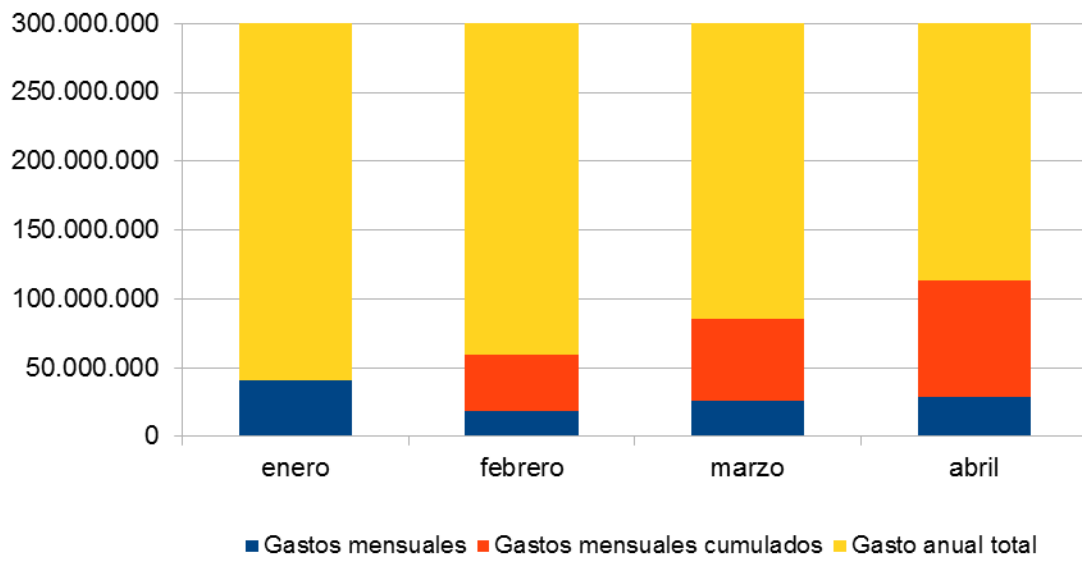
4- Gastos Operacionales, corresponde a compra y mantención de equipos, impuestos, insumos oficina, traslados, viáticos.

Repartición gastos PRS 2015 por categoría



- Apoyo Estudiantes (1)
- Honorarios Investigadores (2)
- Honorarios Personal PRS (3)

Repartición gastos mensuales PRS 2015





GESTIÓN PRESUPUESTARIA 2014

	Monto	%
Apoyo Estudiantes ¹	41.681.430	14%
Honorarios Investigadores ²	80.199.995	27%
Honorarios Personal PRS ³	65.103.549	22%
Gastos Operacionales ⁴	109.930.226	37%
Total :	296.915.200	

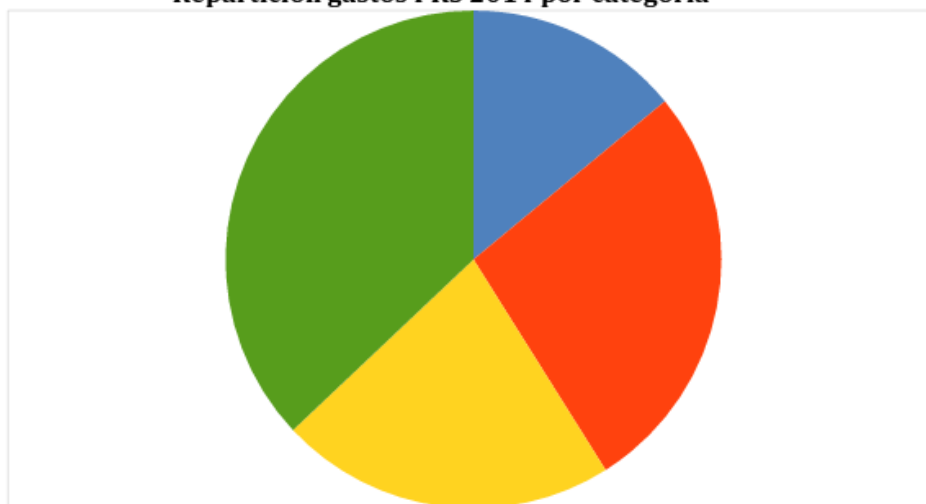
1- Integración de tesis y prácticas profesionales.

2- Académicos invitados, postdoc, investigadores del PRS.

3- Personal técnico, administrativos, apoyo de terreno.

4- Gastos Operacionales, corresponde a compra y mantención de equipos, impuestos, insumos oficina, traslados, viáticos.

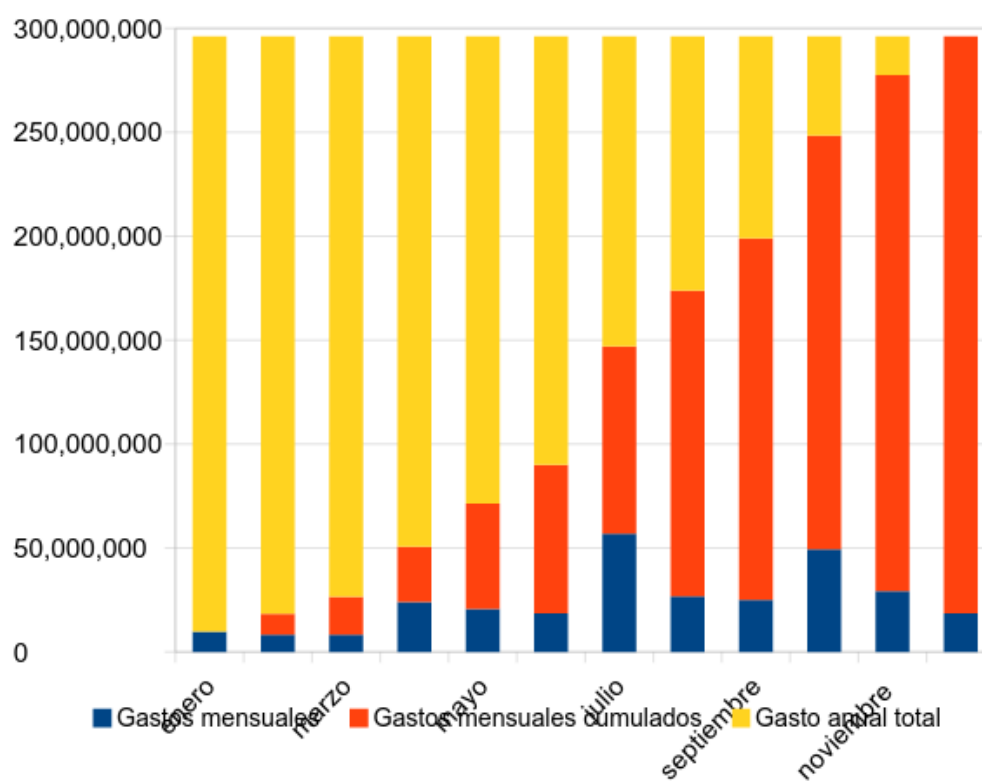
Repartición gastos PRS 2014 por categoría



- Apoyo Estudiantes (1)
- Honorarios Investigadores (2)
- Honorarios Personal PRS (3)
- Gastos Operacionales



Repartición gastos mensuales PRS 2014



ANEXO

Publicaciones ISI, Tesis y Congresos

Publicaciones ISI

2016

1. Herrera, C., *Ruiz, S*, Madariaga, R., Poli, P. (2016). Inversion of the dynamic parameters of the 2015 Jujuy intermediate depth earthquake, and their values compared with other intraslab earthquakes. Submitted Geophysical Journal International.
2. Poli, P., Maksymowicz, A. and Ruiz, S.. (2016). The Mw8.3 Illapel earthquake (Chile): seismic and aseismic activity associated with hydrated slab structures. Submitted Geology.
3. Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., Pastén, C. (2016). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. Submitted Bulletin of Earthquake Engineering
4. Otárola, C. and Ruiz, S. (2016) Stochastic Generation of Accelerograms for Subduction Earthquakes. Accepted Bulletin of the Seismological Society of America.
5. Madariaga, R. and Ruiz S. (2016). Earthquake dynamics on circular faults: a review 1970-2015. Journal of Seismology DOI: 10.1007/s10950-016-9590-8
6. Ruiz, S., Klein, E., del Campo, F., Rivera, E., Poli, P., Metois, M., Vigny, C., Baez, JC., Vargas, G., Leyton, F., Madariaga, R., Fleitout, L., (2016) The seismic sequence of the 16 September 2015, Illapel Mw 8.3 earthquake. Seismological Research Letters DOI: 10.1785/0220150281
7. León-Ríos, S., Ruiz, S., Maksymowicz, A., Leyton, F., Fuenzalizada, A., Madariaga, R. (2016). Diversity of the Iquique's foreshocks and aftershocks: A clue about complex rupture process of a Mw 8.1 earthquake. Journal of Seismology DOI 10.1007/s10950-016-9568-6
8. Pastén, C., Saéz, M., Ruiz, S., Leyton, F., Salomón, J.* and Poli, P. (2016) Deep Characterization of the Santiago Basin using HVSR and Cross-Correlation of Ambient Seismic Noise. Engineering Geology, 201, 57-66, doi:10.1016/j.enggeo.2015.12.021



9. Mauricio Fuentes, Sebastián Riquelme, Gavin Hayes, Miguel Medina, Diego Melgar, Gabriel Vargas, José González and Angelo Villalobos. A Study of the 2015Mw8.3 Illapel Earthquake and Tsunami: Numerical and Analytical Approaches. Pure and Applied Geophysics, 2016 Springer International Publishing, DOI: 10.1007/s00024-016-13050
10. Riquelme, S., Bravo, F., Melgar, D., Benavente, R., Geng, J., Barrientos, S., Campos, J. W-phase source inversion using high-rate regional GPS data for large earthquakes. Geophysical Research Letters.
WphaseGPS_FINAL_JC_Parte_1.pdf
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_articulos/descarga/8869720/1130636/0/84601/1
WphaseGPS_FINAL_JC_Parte_2.pdf
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_articulos/descarga/8869720/1130636/0/84601/2
11. Derode, B., Riquelme, S., Campos, J., Delouis, B. Energy-partitioning of intermediate-depth earthquakes: Overview of the Northern Chilean seismic cloud and implications on the dynamic of rupture. Geophysical Research Letters.
GRL_IDEQ_Derode_2016_CAMPOS_AKNOW.pdf
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_articulos/descarga/8869720/1130636/0/84602/1
12. William D. Barnhart^{1*} Jessica R. Murray² Richard W. Briggs³ Francisco Gomez⁴ Charles P.J. Miles⁴ Jerry Svarc² Sebastian Riquelme⁵ Bryan J. Stressele. Early Afterslip of the 2015 Illapel, Chile Earthquake: Evidence for Frictional Heterogeneity and Permanent Coastal Uplift.
Accepted. JGR
13. M. Fuentes, S. Riquelme, M. Medina, D.Melgar, G.Hayes, G.Vargas et al. A study of the 2015 Mw 8.3 Illapel Earthquake and tsunami. Numerical and Analytic approaches. PAGEOPH.
14. S. Riquelme, F.Bravo, D. Melgar , R.Benavente, J.Geng, S.Barrientos and J. Campos GRL. W-phase source inversion using high-rate regional GPS data for large earthquakes.
15. Diego Melgar · Wenyan Fan · Sebastian Riquelme · Jianghui Geng · Cunren Liang · Mauricio Fuentes · Gabriel Vargas · Richard M. Allen · Peter M. Shearer · Eric J. Fielding. Slip segmentation and slow rupture to the trench during the 2015, Mw8.3 Illapel, Chile earthquake.
16. Diego Melgar · Richard M. Allen · Sebastian Riquelme · Jianghui Geng · Francisco Bravo · Juan Carlos Baez · Hector Parra · Sergio Barrientos · Peng Fang · Yehuda Bock · Michael Bevis · Dana J. Caccamise · Christophe Vigny · Marcos Moreno · Robert Smalley
Local tsunami warnings: Perspectives from recent large events.



17. Benoit Derode, Bertrand Delouis, Jaime Campos. Intermediate-depth earthquake properties and diversity in Chile. *Geophysical Research Letters* 2016, to be submitted.
18. Maria Valentina Tombolini Echeverria, Senén González Cornejo and Francisco Alarcón Pontigo. Development of an information platform for observation of seismic events in Chile using RAD methodology. *IEEE ICA/ACCA 2016 - ISSN 0719-5567, VOL. 22. Curicó, Chile, 19-21 de octubre 2016*

2015

1. Maksymowicz, A., Trehu, A., Contreras-Reyes, E., Ruiz, S. (2015) Density-depth model of the continental wedge at the maximum slip segment of the Maule Mw8.8 megathrust earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 409, 265-277
2. Mauricio A. Fuentes, Javier A. Ruiz, and Sebastián Riquelme, The runup on a multilinear sloping beach model, *Geophys. Journal International* (May, 2015) 201 (2): 915-928, DOI:10.1093/gji/ggv056.
3. Ruiz, J. A., Fuentes, M., Riquelme, S., Campos, J., Cisternas, Armando, Numerical simulation of tsunami runup in northern Chile based on non-uniform k-2 slip distributions, *Nat Hazards* (2015) 79:1177–1198, DOI:10.1007/s11069-015-1901-9. NHAZ-D-15-00181.pdf
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_articulos/descarga/8869720/1130636/0/84599/1
4. Toledo, P., and Campos, J. An earthquake trigger based on entropy of anomaly. Indexación: ISI. *PLOS ONE* 2015
0-Art.Trigger_PLOS2015.pdf
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_articulos/descarga/8869720/1130636/0/84597/1
5. Toledo, P., Riquelme, S., and Campos, J. Earthquake source parameters which display first digit phenomenon. *Nonlinear Processes in Geophysics*. Indexación: ISI. ISSN: DOI: 10.5194/npg-22-1. 2015. Vol.: 22. Nº: 1. Páginas: 1-8
0-Toledo.et.al_2015.pdf
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_articulos/descarga/8869720/1130636/0/84598/3
6. Riquelme, S., Fuentes, M., Hayes, G., Campos, J. A rapid estimation of near-field tsunami runup. *Journal Geophysical Research*. Indexación: ISI. ISSN: 10.1002/2015JB012218. 2015. Vol.: 120. Páginas: 6487–6500
Riquelme_et_al-2015-Journal_of_Geophysical_Research__Solid_Earth-2.pdf
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_articulos/descarga/8869720/1130636/0/84600/1



7. Diego Melgar · Brendan W. Crowell · Jianghui Geng · Richard M. Allen · Yehuda Bock · Sebastian Riquelme · Emma M. Hill · Marino Protti · Athanassios Ganas. Earthquake magnitude calculation without saturation from the scaling of peak ground displacement: GPS PGD Scaling.
8. P. A. Toledo · S. Riquelme · J. A. Campos. Earthquake source parameters which display first digit phenomenon.
9. Derode, B., Riquelme, S. Bravo, F., and Campos, J. Statistical variations of source parameters in inter- and intraplate earthquakes in Chile and their correlations with the slab properties.

2014

1. Ruiz, S., M. Metois, A. Fuenzalida, J. Ruiz, F. Leyton, R. Grandin, C. Vigny, R. Madariaga, J. Campos. (2014) Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique Mw 8.1 earthquake. *Science*, 345, 1165-1169, DOI: 10.1126/science.1256074
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_articulos/descarga/8869720/1130636/0/84595/1
2. Hayes, G. P., Herman, M. W., Barnhart, W. D., Furlong, K. P., Riquelme, S., Benz, H. M., ... & Samsonov, S. (2014). Continuing megathrust earthquake potential in Chile after the 2014 Iquique earthquake. *Nature*, 512(7514), 295-298.



TESIS

2016

1. Generación de acelerogramas artificiales usando funciones de green empíricas. Stefano Cararo C.
https://ucampus.uchile.cl/m/fcfm_ucurriculum/archivo?rut=17122325&carr_codigo=46&id=memoria
https://ucampus.uchile.cl/m/fcfm_ucurriculum/autores?accion=buscar&q=17122325
Tesis de Magíster 24/03/2016 Profesor Guía FCFM
2. Inversión Cinemática y Dinámica de la Fuente Sísmica de Terremotos Intraplaca de Profundidad Intermedia en Zonas de Subducción. Carlos Herrera R.
https://ucampus.uchile.cl/m/fcfm_ucurriculum/archivo?rut=17602944&carr_codigo=46&id=memoria
https://ucampus.uchile.cl/m/fcfm_ucurriculum/autores?accion=buscar&q=17602944>
Tesis de Magíster 08/04/2016 Profesor Guía FCFM
3. Análisis de las variaciones de resistividad eléctrica utilizando transiente electromagnético en la Cuenca de Santiago. Bárbara Blanco Arrué
Prof. Guía FCFM 2016.

2015

1. Generación de acelerogramas artificiales usando un método estocástico de falla finita, aplicado a terremotos de subducción. Cristian Otárola Bravo
https://ucampus.uchile.cl/m/fcfm_ucurriculum/autores?accion=buscar&q=14152919>
Tesis de Magíster 16/03/2015 Profesor Guía FCFM
2. Análisis de la Distribución Espacial de la Sismicidad Precursora y Post Sísmica del Terremoto Mw 8.1 de Iquique 2014. Sergio León R
https://ucampus.uchile.cl/m/fcfm_ucurriculum/archivo?rut=15979925&carr_codigo=46&id=memoria>
https://ucampus.uchile.cl/m/fcfm_ucurriculum/autores?accion=buscar&q=15979925>
Tesis de Magíster 08/04/2015 Profesor Guía FCFM
3. Procesamiento y análisis de motogramas de terremotos de subducción chilenos. Efraín Rivera Berrios
https://ucampus.uchile.cl/m/fcfm_ucurriculum/archivo?rut=16027804&carr_codigo=46&id=memoria
https://ucampus.uchile.cl/m/fcfm_ucurriculum/autores?accion=buscar&q=16027804>
Tesis de Magíster 30/03/2015 Profesor Guía FCFM
4. Estimación de velocidades de onda de corte: registro de ondas superficiales LOVE v/s refracciones de ondas internas SH. Felipe Andrés González Rojas
Prof. Guía: FCFM 2015



5. Caracterización somera de la Falla San Ramón mediante tomografía de resistividad eléctrica. Maximiliano Leiva Sotomayor.
Prof. Guía: FCFM. 2015.

2014

1. Algoritmo de detección de ondas p invariante de escala: caso de réplicas del sismo del 11 de marzo de 2010. Patricio Antonio Toledo Peña
Tesis de Doctorado 30/10/2014. Universidad de Chile. Profesor Tutor FCFM
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_tesis_memorias/descarga/8869720/1130636/0/68824/1
2. Análisis de la sismicidad y de parámetros de alerta temprana de terremotos para la zona de Iquique, norte de Chile. Gianina Meneses Provoste
https://ucampus.uchile.cl/m/fcfm_ucurriculum/archivo?rut=15722896&carr_codigo=46&id=memoria
https://ucampus.uchile.cl/m/fcfm_ucurriculum/autores?accion=buscar&q=15722896
Tesis de Magíster 07/04/2014 Profesor Guía FCFM
3. Correlación de razones espectrales H/V y características geotécnicas de suelos de Santiago usando registros sismológicos. Francisca Lezana González.
https://ucampus.uchile.cl/m/fcfm_ucurriculum/archivo?rut=16986749&carr_codigo=10&id=memoria
https://ucampus.uchile.cl/m/fcfm_ucurriculum/autores?accion=buscar&q=16986749
Memoria de Título 11/12/2014 Profesor Guía FCFM



Congresos

2017

1. Título: Ambient seismic noise tomography of Santiago basin: Preliminary results
Congreso: XVI World Conference on Earthquake
2. Estimation of shear-wave velocity-depth models using Love surface waves records: A comparison with other seismic methods. Felipe González, Emilio Vera² y Sergio Contreras¹.
Congreso: WCEE Chile 2017. <http://www.16wcee.com>

2016

1. Título: Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago
Congreso: IX Congreso chileno de ingeniería geotécnica
3. Título: Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago
Congreso: IX Congreso chileno de ingeniería geotécnica
4. Título: "Kinematic and dynamic inversion of the 2015 Jujuy intermediate depth earthquake".
2nd Colloquium of Geophysical Signatures of Earthquakes and Volcanoes.
5. Título: Development of an information platform for observation of seismic events in Chile using RAD methodology. Octubre 2016.
<http://acca2016.utralca.cl/>
6. Título: "Emergence of high frequency P, S and T waves using seismic noise at regional distances."
Congreso: II Colloquium of Geophysical Signatures of Earthquakes and Volcanoes, 2016
7. Congreso: SAGEEP, 2016. <http://www.eegs.org/sageep-2016>.
3D gravity model of Santiago basin (central Chile) and implications on basement anomalies. Maximiliano Leiva^{1,2*}, Andrei Maksymowicz², Luis Villegas¹ y Sergio Contreras¹



8. Congreso: SAGEEP, 2016. <http://www.eegs.org/sageep-2016>.
Estimation of shear-wave velocity-depth models using Love surface waves records: A comparison with other seismic methods. Felipe González, Emilio Vera² y Sergio Contreras¹.
9. Congreso: SAGEEP, 2016. <http://www.eegs.org/sageep-2016>.
Goelectric study of Santiago basin using Transient Electromagnetic Method (TEM).
Bárbara Blanco*^{1,2}, Daniel Díaz^{1,2} Y Emilio Vera¹.
10. Congreso: SAGEEP, 2016. <http://www.eegs.org/sageep-2016>.
Shallow expression mapping of crustal fault using Electrical Resistivity Tomography.
Maximiliano Leiva^{1,2*}, Emilio Vera², Daniel Díaz², Andrei Maksymowicz² y Luis Villegas¹
11. Congreso: Second Colloquium of Geophysical Signatures of Earthquakes and Volcanoes (2GSEV), 2016. www.2gsev.cl.
Goelectric study of santiago basin using Transient Electromagnetic Method (TEM).
Bárbara N. Blanco ^{1,2} , Daniel A. Díaz ^{1,2}, Maximiliano J. Leiva ^{1,2}, Andrei Maksymowicz ^{1,2}.
12. Congreso: 23rd Electromagnetic Induction in the Earth Workshop, Chiang Mai, Thailand, 2016.
Geo-electric study of Santiago basin using Transient Electromagnetic (TEM).
Bárbara N. Blanco ^{1,2} , Daniel A. Díaz ^{1,2}, Maximiliano J. Leiva ^{1,2}, Andrei Maksymowicz ^{1,2}

2015

1. Título: Deep Characterization of the Santiago Basin for Seismic Site-Response Evaluation Using Seismic Noise Cross-Correlation
Congreso: XV Panamerican Conference on soil mechanics and geotechnical engineering
2. Título: "Inversión cinemática del sismo Mw 6.7 de Jujuy en Argentina ocurrido el 11 de febrero de 2015".
Congreso: XIV Congreso Geológico Chileno.
3. Título: "Análisis del enjambre sísmico Copiapó-Atacama 2006 realizando una inversión telesísmica."
Congreso: XIV Congreso Geológico Chileno



4. Título: Los Terremotos de Iquique 2014
Congreso: XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015
Chile, Santiago. Marzo - 2015
Ruiz_etal2014_ACHISINA.pdf
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_otras_publicaciones/descarga/8869720/1130636/0/24453/1
5. Derode, B., Riquelme, S., Bravo, F., Campos, J.
Título: Statistical variations of source parameters in inter- and intraplate earthquakes in Chile and their correlations with the slab properties.
Congreso : AGU Fall Meeting, San Francisco, 14-19 December 2015. EEUU, San Francisco.
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_congresos/descarga/8869720/1130636/0/136389/1
6. Bravo, F., Campos, J.
Título: Slip Distribution of the Chilean Earthquake of March 3, 1985 on the Central Chile Seismic Gap.
Congreso : AGU Fall Meeting, San Francisco, 14-19 December 2015, EEUU, San Francisco.
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_congresos/descarga/8869720/1130636/0/136390/1
7. Campos, J., Riquelme, S., F. Bravo, Cisternas, A., Barrientos, S.
Título: W-phase CMT Regional Real Time Implementation in Chile Evolution of the algorithm: 2011 – today.
Congreso : AGU Fall Meeting, San Francisco, 14-19 December 2015, EEUU, San Francisco.
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_congresos/descarga/8869720/1130636/0/136391/1
8. Riquelme, S., Bravo, F., Melgar, D., Benavente, R., Campos, J.
Título: W-phase Source Inversion Using High-rate Regional GPS Data for Large Earthquakes.
Congreso : AGU Fall Meeting, San Francisco, 14-19 December 2015, EEUU, : San Francisco
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_congresos/descarga/8869720/1130636/0/136392/1
9. Estructura de resistividad somera en torno a la traza de la Falla de San Ramón. Maximiliano Leiva^{1,2*}, Emilio Vera², Daniel Díaz², Andrei Maksymowicz² y Luis Villegas¹
Congreso: XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena 2015.
10. Estudio Geoelectrico de la cuenca de Santiago utilizando el Método de Transiente Electromagnético (TEM). Bárbara Blanco^{*1,2}, Daniel Díaz^{1,2} Y Emilio Vera¹.



Congreso: XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena 2015.

11. Modelación del basamento de la cuenca de Santiago a lo largo de un perfil aplicando el método gravimétrico. Daniel Cabrera^{1,2}, Andrei Maksymowicz¹, Luis Villegas², Sergio Contreras², Barbara Blanco^{1,2}, Daniel Díaz¹.

Congreso: XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena 2015.

2014

1. Ruiz, J. A., Riquelme, S., Fuentes, M. A., Arriola, S., Yamazaki, Y., Schindelé, F., and Campos, J. A.,
Título: Resolution analysis of the tsunami generated by the 2014 Mw 8.1 Pisagua earthquake using a simple slip model.
Congreso: American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, abstract #S31D-4468.
2. J. Campos, S. Riquelme, B. Delouis, J. Ruiz and F. Bravo.
Título: Terremotos de Profundidad Intermedia en Chile
Congreso: Colloquium Geophysical Signatures of Earthquakes and Volcanoes, Chile, Concepción. Marzo 2014.
Colloquium.pdf
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_congresos/descarga/8869720/1130636/0/136381/1
3. Campos, J., Fuentes, M..
Título: A rapid estimation of tsunami run-up based on finite fault models
Congreso : AGU Fall Meeting, San Francisco, 15-19 December 2014, EEUU, San Francisco
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_congresos/descarga/8869720/1130636/0/136382/1
4. Ruiz, J., et al., J. Campos
Título: Resolution analysis of tsunami generated by the 2014 Mw 8.1 Pisagua earthquake using a simple slip model.
Congreso : AGU Fall Meeting, San Francisco, 15-19 December 2014. EEUU, San Francisco.
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_congresos/descarga/8869720/1130636/0/136383/1
5. Leyton, F., Ruiz, S., Quilaqueo, M., Campos, J.
Título: Repeating Earthquakes in Northern Chile
Congreso : AGU Fall Meeting, San Francisco, 15-19 December 2014, EEUU, San Francisco.
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_congresos/descarga/8869720/1130636/0/136384/1



6. Sobiesiak, M., et al., Campos, J.
Título: Structural Aspects of the Iquique Area With Possible Influence on the Mw 8.2, 2014, Pisagua Earthquake
Congreso : AGU Fall Meeting, San Francisco, 15-19 December 2014, EEUU, San Francisco
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_congresos/descarga/8869720/1130636/0/136385/1
7. Derode, B., Riquelme, S., Ruiz, J., Leyton, F., Campos, J., Delouis, B.
Título: Exploring Thermal Shear Runaway as a triggering process for Intermediate-Depth Earthquakes: Overview of the Northern Chilean seismic nest.
Congreso : AGU Fall Meeting, San Francisco, 15-19 December 2014, EEUU, San Francisco.
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_congresos/descarga/8869720/1130636/0/136386/1
8. Vargas, G., et al., Campos, J.
Título: Assessing giant tsunamigenic subduction earthquakes in the Northern Chile Seismic
Congreso: AGU Fall Meeting, San Francisco, 15-19 December 2014, EEUU, San Francisco.
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_congresos/descarga/8869720/1130636/0/136387/1
9. Riquelme, S., Ruiz, J., Fuentes, M., Yamazaki, Y., Campos, J.
Título: Tsunami Scenarios in Northern Chile after the 2014 Iquique Earthquake using n
Congreso: AGU Fall Meeting, San Francisco, 15-19 December 2014, EEUU, San Francisco.
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_congresos/descarga/8869720/1130636/0/136388/1
Abstract_7b.png.pdf
http://sial.fondecyt.cl/index.php/investigador/f4_congresos/descarga/8869720/1130636/0/136388/2