



ANÁLISIS MULTISECTORIAL EVENTOS 2015

Evento Hidrometeorológico Marzo – Terremoto/Tsunami
Septiembre

Comité Científico Técnico

2015



AGRADECIMIENTOS.....	3
ANTECEDENTES GENERALES	4
1. EVENTO HIDROMETEOROLÓGICO, 25 MARZO 2015	6
1.1. Sinopsis.....	6
1.2. Características Evento Hidrometeorológico	7
1.3. Evolución Evento	8
1.4. Impactos Sectoriales	11
1.5. Coordinaciones Sectoriales	16
1.6. Oportunidades de Mejora.....	21
1.7. Acciones Derivadas.....	22
2. EVENTO TERREMOTO Y TSUNAMI, 16 SEPTIEMBRE 2015	25
2.1. Sinopsis.....	25
2.2. Características Evento Geológico	25
2.3. Evolución Evento	30
2.4. Impactos Sectoriales	41
2.5. Coordinaciones Sectoriales	48
2.6. Oportunidades de Mejora.....	50
2.7. Acciones Derivadas.....	51
3. COMENTARIOS GENERALES	53
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

AGRADECIMIENTOS

La Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, ONEMI, agradece los aportes de los organismos que conforman el Comité Científico Técnico, los que permiten que la mirada integral de los análisis y las diferentes líneas de investigación, previas e inmediatamente ocurrido los eventos, contribuyan a mejorar la comprensión y caracterización de variables de riesgo relevantes para el país.

En el D.S. 509 Artículo 26º del año 1983 del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, se establece la posibilidad de conformar Comité Científicos – Técnicos asesores, integrados por especialistas del sector público y privado. Mediante Resolución Exenta Nº 2101 de septiembre del 2008 se crea el Comité Científico Técnico (CCT) de apoyo a la Dirección de ONEMI, con la finalidad de fortalecer las capacidades técnicas de monitoreo y vigilancia de diversos fenómenos naturales, propiciando el análisis “multi hazard”.

El CCT está integrado permanentemente por el Centro Sismológico Nacional (CSN), Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), Dirección Meteorológica de Chile (DMC), el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción. Este año, se han sumado enriqueciendo la discusión otros actores relevantes en materias afines, tales como el Ministerio de Medio Ambiente, el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y el Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN).

Han participado de este informe los siguientes profesionales:

Sergio Barrientos, Sebastián Riquelme – Director CSN, Jefe de Operaciones CSN

Jaime Leyton – Jefe Oficina de Análisis y Pronósticos, DMC

Paola Ramírez – Jefa Unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial, Sernageomin

Carlos Zuñiga, Cecilia Zelaya – Jefe Departamento de Oceanografía, Profesional SNAM SHOA

Jose Luis Palma, Klaus Bataille - Académico Departamento de Ciencias de la Tierra, UDEC

Gladys Santis - Oficina de Cambio Climático, MMA

Seremis de Medio Ambiente de las Regiones de Atacama y Coquimbo

Francisco Ortega, Profesor Asistente Área Tierra Solida, DGF

Rodrigo Cienfuegos - Director de CIGIDEN

Fernando Díaz, Natalia Gómez, Natalia Silva – División de Protección Civil, ONEMI



ANTECEDENTES GENERALES

Chile, dado el contexto tectónico en el que se sitúa, es uno de los países más sísmicos del mundo, con gran frecuencia, tamaño y diversidad de fuentes sismogénicas. La ubicación de Chile en un margen convergente de Subducción, conformado por las placas de Nazca y Sudamericana, propician la generación de tsunamis destructivos, así como también somos receptores de maremotos generados en otros extremos de la cuenca del Pacífico. Paralelo a la fosa Chile – Perú, se sitúa el arco volcánico (en Chile comprende el segmento Andes Centrales y Andes del Sur) que aloja a más de 90 volcanes activos. En conclusión, nuestro país está permanentemente expuesto a diversas amenazas de origen natural y según informes de referentes mundiales en materias de Reducción del Riesgo de Desastres, *“el grado de exposición de las personas y los bienes ha aumentado con más rapidez de lo que ha disminuido la vulnerabilidad, lo que ha generado nuevos riesgos y un incremento constante de las pérdidas relacionadas con los desastres, con un considerable impacto en los ámbitos económico, social, sanitario, cultural y ambiental a corto, mediano y largo plazo, en especial a nivel local y comunitario.”*¹

El Marco de Sendai (2015-2030), firmado por Chile en marzo del presente año, así como la Política Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (PNGRD)² presentada a la Presidenta de la República el 16 de diciembre del 2014, subrayan que la Gestión del Riesgo de Desastres debe funcionar desde un enfoque basado en principios tales que le den una connotación integral, prospectiva y participativa, es decir, integrando a todos los actores relevantes –públicos, privados, académicos y de la sociedad civil- de modo tal de considerar e integrar un enfoque multihazard y de riesgo a los instrumentos de ordenamiento y planificación territorial de una manera que garantice el desarrollo sostenible.

En consonancia con lo anterior, el aporte que realiza el sector académico es fundamental para el cabal conocimiento de las variables de peligro/riesgo desde una mirada científica - técnica que se nutre de metodologías y teorías propias de las ciencias de la Tierra que permiten caracterizar los fenómenos de origen natural, así como también se valida mediante observaciones, levantamientos, campañas ex post entre otros que permiten actualizar el conocimiento.

Los esfuerzos que ha hecho el país por considerar la gestión del riesgo de desastres como un eje prioritario en la formulación de herramientas de gestión son aun incipientes, pero sin duda sientan los cimientos de una institucionalidad que reconoce la necesidad de fortalecerse, pero no de

¹ Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres, 2015- 2030. Página 3, www.wcdrr.org

² Las bases de la Política Nacional para la GRD http://siac.onemi.gov.cl/documentos/onemi_nuevo.pdf fueron elaboradas en el seno de la Plataforma Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres.

manera individual en cuanto a sus componentes, sino que con una visión sistémica. A ello contribuyen los permanentes esfuerzos por modernizar los sistemas de alerta temprana y de monitoreo, la instalación de competencias especializadas para lograr contar con recurso humano altamente capacitado, la incorporación de un enfoque de riesgo en los instrumentos de planificación y ordenamiento territorial, la consideración en las políticas públicas de adaptación al cambio climático para alcanzar un desarrollo sostenible como país, entre otras acciones concretas que apuntan a una nación y comunidad más resiliente y preparada.

Sin duda, la realidad nacional en cuanto a la exposición de la población a peligros de origen naturales, sumada al contexto de calentamiento global, obligan a que el análisis de un determinado evento no sea aislado, sino que la comprensión de una variable de riesgo en sí y de sus factores subyacentes debe ser desde una óptica integral, que reciba aportes multisectoriales, reconociendo que hay eventos principales que gatillan eventos secundarios no menos destructivos, y que cada evento es una lección aprendida per se si se logra una oportuna evaluación ex post.

El presente informe elaborado por el Comité Científico Técnico Nacional, CCT³, asesor de ONEMI, tiene por objetivo conocer cabalmente dos de los principales eventos ocurridos en Chile en el año 2015, desde un enfoque integral y multivariable, que permita caracterizar el evento en sí mismo, su evolución, consecuencias y afectaciones sectoriales y acciones conjuntas llevadas a cabo en conjunto con ONEMI como organismo coordinador del Sistema Nacional de Protección Civil. Contando con este análisis detallado de ambos fenómenos de origen natural, se puede realizar en conjunto con los organismos miembros integrantes del CCT una evaluación de ambos eventos desastrosos para el país y qué gestiones actualmente se realizan en el territorio afectado.

1. Evento hidrometeorológico y posteriores aluviones ocurridos en el norte del país a partir del 25 de marzo del 2015.
2. Evento terremoto Illapel y posterior tsunami ocurrido el 16 de septiembre del 2015.

Así mismo, se busca sistematizar las experiencias de respuesta a emergencias desde el ámbito público, para visualizar las oportunidades de mejora y proponerlas en el marco del CCT, con el objetivo de generar instancias efectivas para la gestión del riesgo de desastres.

³ Resolución Exenta Nº 2101 Septiembre 2008: crea el Comité Científico Técnico de apoyo a la Dirección de ONEMI. Resolución Exenta Nº 1135 de mayo del 2009 modifica la anterior, precisando las instituciones que lo conforman de manera permanente: CSN, Sernageomin, SHOA, DMC, Depto. Cs. de la Tierra UDEC.

1. EVENTO HIDROMETEOROLÓGICO, 25 MARZO 2015

1.1. Sinopsis

18 aluviones generados por una baja segregada, conocida también como núcleo frío en altura, muy estacionario y con precipitaciones de características históricas e inusuales para las regiones del norte del País en más de 75 años, generaron 31 muertos, 16 desaparecidos, 35.086 damnificados, 2.071 viviendas destruidas y 6.253 con daño mayor.

El evento meteorológico de gran extensión territorial, con gran impacto regional y local no encuentra antecedentes similares en las áreas afectadas. El elemento iniciador fueron las precipitaciones de gran intensidad, con amplio alcance territorial y de larga duración temporal, y particularmente en una zona de extrema aridez no condicionada naturalmente a este tipo de fenómenos hidrometeorológicos extremos, por lo que el cambio climático ya como evidencia científica señala entre sus principales conclusiones que estos eventos extremos aumentarán de frecuencia con el tiempo.

En el caso particular de este evento, la tormenta ocurrió asociada a una configuración sinóptica de baja segregada en conjunción con una anomalía cálida de temperatura superficial del mar en las costas de Ecuador y Perú. Esta condición anómala de la Temperatura Superficial del Mar es coincidente con el inicio de El Niño y una gran anomalía de Temperatura Superficial del Mar cercana a la región del Niño 3.4 en el Pacífico central. La correspondiente anomalía positiva de vapor de agua en la costa pacífica de Perú y Ecuador fue subsecuentemente transportada por la baja segregada hacia la costa Norte de Chile con valores extremos de agua precipitable cercanos a los 45 mm.

Las precipitaciones fueron anormalmente intensas en zonas cordilleranas y precordilleranas, las que se produjeron con una altura del nivel de la isoterma cero muy alta, incrementando en un 100% la cantidad de agua en todas las cuencas de las localidades comprometidas. La intensidad de la precipitación fue tan grande que en la estación de Socaire, en la alta cordillera de la Región de Antofagasta el registro fue de 8,2 mm en 15 minutos. En la estación de Alto del Carmen, en la zona precordillerana de la Región de Atacama, fue de 11 mm en 30 minutos, es decir, el equivalente a un año de precipitación en Copiapó, en tan solo 30 minutos.

Pese a los registros señalados, que dan cuenta del carácter intensamente convectivo, es decir, que nubes de gran altura descargan una altísima cantidad de precipitación en poco tiempo, el fenómeno es considerado anómalo y se ubica en la escala de los casi nulamente ocurridos con anterioridad, desde que se dispone de registros, justamente por lo intenso, persistente y amplio en su alcance espacial.

Una de las grandes dificultades de este evento fue la escasísima información real del suceso, ya que en una distancia de 1250 km de extensión, existen no más de 6 estaciones meteorológicas disponibles entre la Región de Antofagasta y Coquimbo, para registro y no todas están en línea. Aunque lo estuvieran habría una estación cada poco más de 200 km para un promedio de 125 km de ancho, es decir, un lugar de medición cada 25.000 Km². Independientemente de la bajísima representatividad espacial de dichas estaciones, no se dispone de la tecnología adecuada que permita evaluar hacia dónde estará dirigida la mayor intensidad de estos eventos una vez que comienza su detección cuando dan cuenta de las primeras manifestaciones. Esta tecnología existe en el mercado, hay diversas empresas y existen estudios que expresan su necesidad desde hace más de 20 años.

La región de Atacama fue la que tuvo mayor afectación. Los aluviones dejaron muertos y daños a las viviendas e infraestructura en las ciudades de Copiapó, Paipote, Chañaral, Tierra Amarilla y otras localidades de la región.

A pesar que en algunas ciudades se construyeron obras de contención, tanto para crecidas como para aluviones, estas no fueron suficientes para controlar el gigantesco flujo del agua y lodo. Las obras de contención localizadas en el curso de la quebrada de Taltal no detuvieron el violento flujo, siendo insuficiente su estructura. El agua y los diversos materiales arrastrados, sobrepasaron la obra por encima y saliéndose de su canalización el flujo escurrió por el camino en forma paralela a las demás piscinas decantadoras, inundando la ciudad.

Estos procesos aluvionales extremos, capaces de modificar la geografía del lugar, ocurren en forma aislada y puntual, teniendo períodos de retorno de varias décadas, inclusive siglos.

En lo que respecta a la región de Coquimbo, este evento se presentó con fuerza principalmente en las comunas de Vicuña y La Higuera, en la primera se afectó mayoritariamente localidades pobladas y curso de agua del río Elqui; y en el caso de La Higuera, crecidas de quebradas secas que afectaron recursos naturales más que poblaciones.

1.2. Características Evento Hidrometeorológico

La Provincia de Chañaral tiene tres centros urbanos principales: Chañaral, Diego de Almagro y El Salado, que concentran más de 30 mil habitantes. El territorio es mayormente desértico y semidesértico y presenta cuencas andinas de alta montaña, en donde se concentran típicamente las lluvias ocasionales. Los centros urbanos de la provincia de Chañaral se encuentran en la Cuenca del Salado, la que colinda con el Salar de Atacama y se ubica en el desierto de Atacama, donde la media anual de precipitación es menor a 5 mm y es producida mayormente por lloviznas y nieblas costeras, y muy inusualmente, por eventos de precipitación.

El evento de precipitación entre los días 24 y 27 de marzo de 2015, produjo fenómenos de crecida y aluviones de gran impacto en el norte de Chile, específicamente a lo largo de los ríos Salado y Copiapó, y en Taltal y Antofagasta. En la Cuenca del Salado las localidades mas afectadas fueron Chañaral, Diego de Almagro y El Salado; mientras que en la Cuenca del Copiapó, las mayormente afectadas fueron Tierra Amarilla, Paipote y Copiapó.

Activación de quebradas secas, crecidas de ríos y aluviones

La geografía del área donde se emplazan las ciudades nortinas, como también las del centro, se constituye en un paisaje rodeado de cerros y laderas con una cubierta vegetal escasa o a veces nula y tapizada por un material detrítico aluvial y eólico de diversos tamaños disgregados en el terreno por la alternancia de temperaturas extremas propias del clima desértico.

Estas condiciones, imperantes en todo el paisaje árido y semiárido chileno, favorecen la generación de remociones en masa, aluviones, coladas de barro y desprendimientos, con el concurso del agua en cantidades importantes, producidos por lluvias anormalmente intensas que actúan como gatillador del fenómeno.

Cuando llueve sobre áreas desérticas o con poca cobertura vegetal, la gota de agua impacta directamente sobre el suelo desnudo disgregándolo, proceso que se multiplica en toda el área desprovista de vegetación. El agua forma una película sobre el suelo, para concentrarse y formar hilos de agua que a medida que recorren espacios van aumentando su caudal y desaguan en otros mayores sucesivamente. El material suelto y erosionado, es arrastrado por el agua, incrementando la cantidad de sólidos en ella, esta característica le otorga mayor poder erosivo. De esta forma, la mezcla de agua y lodo no solo erosiona y profundiza el lecho sino que, además, socava las márgenes y origina el desprendimiento de grandes masas de tierra, que son rápidamente disgregadas y unidas al flujo existente. El flujo adquiere volumen y velocidad, arrastrando cualquier elemento que se interponga a su paso, decantándolos posteriormente en la zona plana inmediatamente después de abandonar la pendiente cordillerana, dejando paso solo al flujo de agua que continúa escurriendo hasta perder energía.

1.3. Evolución Evento

La precipitación acumulada máxima del evento fue de 64 mm, medida en la estación de Pastillo de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas, ubicada en la parte alta de la cuenca del Río Copiapó, a 1300 msnm, siendo contrastada con los registros históricos de la estación de la DGA Iglesia Colorada, cercana al punto de medición, a una elevación de 1500 msnm. El análisis muestra que en las 3 horas consecutivas mas lluviosas este evento supero lo observado en promedio cada 30 años. Las 36 horas más lluviosas superan lo observado en promedio cada 50

años. Los registros también muestran que no existen periodos de tormenta de más de 3 días de duración, como así ocurrió en esta ocasión dado que se observaron precipitaciones durante 4 días seguidos. Es más, de acuerdo a la estación Las Vegas (DGA), en la parte alta de la cuenca del Río Salado, si bien existen años anteriores con igual o mayor cantidad de agua caída, la excepcionalidad del evento se debe en mayor medida a su ocurrencia durante el mes de marzo.

Este evento hidrometeorológico tuvo un desplazamiento desde el sur (Región de Coquimbo) hacia el norte (Región de Antofagasta) y su mayor intensidad se produjo en la precordillera de la parte norte de la Región de Atacama.

En la Figura 1 se presenta la descripción de las precipitaciones entre los días antes señalados. Durante el día 24 de marzo se concentraron principalmente en la zona media y alta de cuenca de la quebrada de Taltal, en las cabeceras de las cuencas del río Salado y del río Elqui. Además, se produjeron precipitaciones en menor medida en la cabecera de la cuenca del río Copiapó y en la cabecera de la cuenca del río Huasco, en particular en el río del Carmen.

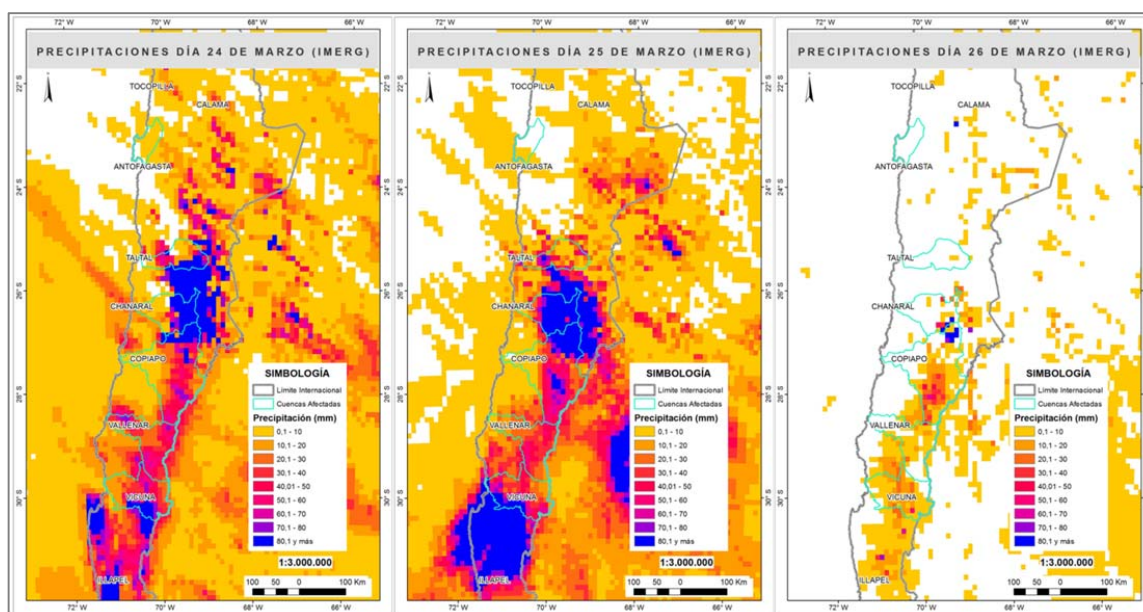
Durante el 25 de marzo las precipitaciones se concentraron en la cuenca del río Salado. Además, hubo precipitaciones en la parte baja de la cuenca de la quebrada Taltal, en la cabecera de la cuenca del río Copiapó, en toda la cuenca del río Huasco, y en la cuenca del río Elqui, en donde se concentró en los ríos Claro y Cochiguaz.

Por otra parte, durante el día 26 de marzo las precipitaciones disminuyeron, concentrándose en la cabecera de la cuenca del río Copiapó y en la zona media-alta de la cuenca del río Elqui. En la zona media de la cuenca del río Elqui también se registraron precipitaciones, mientras que en la cuenca de la quebrada Taltal no se registraron precipitaciones.

Durante los días 24 y 26 de marzo, a raíz del exceso de precipitaciones se sucedieron diferentes eventos aluvionales, inundaciones y rebalse de relaves, lo cual generó una emergencia sanitaria con declaratoria de estado de excepción en tres regiones del país.

Las principales cuencas afectadas fueron: quebrada Las Rocas (Antofagasta), quebrada Taltal (Antofagasta), río Salado (Atacama), río Copiapó (Atacama), río Tránsito (subcuenca del río Huasco, Atacama) y río Elqui (Coquimbo). A continuación se presenta una descripción de la cronología de los flujos aluviales (Figura 2), en donde se considera el *peak* de descarga.

Los flujos aluviales en la quebrada Las Pircas (río Tránsito) se registraron entre la tarde del día 24 hasta medio día del día 25, relacionados directamente con las precipitaciones que se dieron en la parte alta de la cuenca del río Huasco.

Figura 1. Distribución espacial de las precipitaciones para los días 24, 25 y 26 de marzo de 2015.

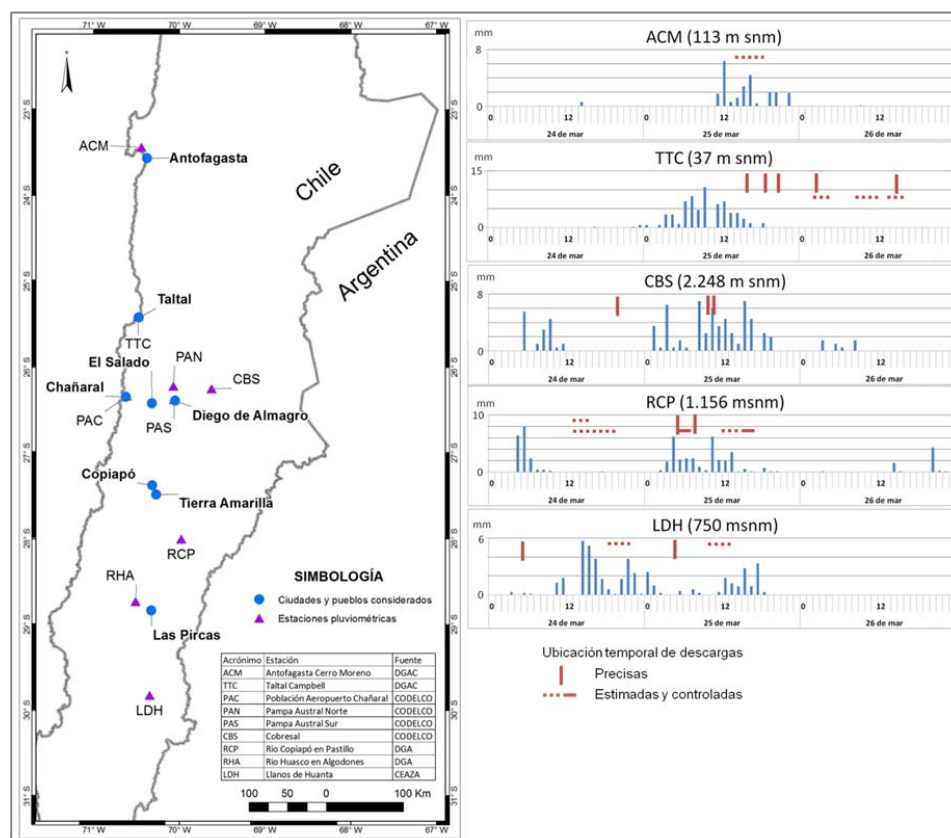
Fuente: SERNAGEOMIN.

Los flujos aluviales de la cuenca del río Copiapó afectaron principalmente a la ciudad de Copiapó, y localidades como Los Loros, Nantoco, Tierra Amarilla y Paipote. A lo largo de la cuenca los flujos se concentraron entre la tarde del día 24 hasta la tarde del día 25 de marzo.

En el río Salado se vieron afectadas las localidades desde Diego de Almagro hasta Chañaral. Los flujos se concentraron entre la tarde del día 24 hasta la mañana del día 25. En esta cuenca el flujo presentó una mayor agresividad tanto por condiciones geomorfológicas como hidrológicas.

En la cuenca de la quebrada Taltal se aprecia una cronología distinta, debido a la existencia de piscinas de control aluvional, las cuales provocaron el retardo en la llegada de los flujos a la ciudad. Por lo que el impacto de los flujos en la ciudad, se distribuye entre la tarde del día 25 y la tarde del día 26 de marzo de 2015.

Figura 2. Ubicación de estaciones más cercanas a sectores afectados por aluviones ocurridos entre el 24 y 26 de marzo de 2015, y registros pluviográficos correspondientes. Se indica la estimación horaria de algunos procesos catastróficos.



1.4. Impactos Sectoriales

El flujo aluvional se concentró en el cauce principal del Río Salado. Se observó que aguas arriba de Chañaral el flujo ocupó todo el ancho de la sección de más de 200 metros de ancho, provocando la carga de sedimentos que fue movilizaba aguas abajo. El sedimento aportado por el flujo aluvional hiperconcentrado consistió principalmente en arena gruesa y grava. Este tipo de depósito formó un relleno compacto de unos 2 metros de espesor que cubrió gran parte de la zona baja de Chañaral. El centro de Chañaral presentó alto nivel de destrucción con lodo, alcanzando una potencia de al menos dos metros. La mayoría de las casas y edificaciones destruidas por el flujo aluvional se concentran en el cauce de la Quebrada del Salado y en la desembocadura del mismo, donde se formó un delta de grandes proporciones. Se crearon en la línea de costa numerosas cuencas erosivas de hasta 15 metros de profundidad, el mar actualmente ha penetrado en estas zonas y la línea de costa avanzó al menos 700 metros tierra adentro.

El aluvión inundó la ciudad de Diego de Almagro por distintos frentes, siendo el cauce sur el que generó mayor daño, creando zanjas de más de 3 metros en la zona urbana. El agua y el barro afectaron aproximadamente a un 50% del territorio urbano, principalmente en las zonas aledañas al antiguo cauce. De acuerdo a evaluación en terreno del equipo de CIGIDEN, se observaron depósitos de sedimentos entre 50 a 150 cm de profundidad.

El evento hidrometeorológico en la Región de Atacama produjo impactos en las componentes ambientales: aire, recurso hídrico superficial y subterráneo y suelo, en las localidades de Copiapó, Tierra Amarilla, Diego de Almagro, El Salado y Chañaral.

En materia de calidad del aire, a partir de la segunda semana de ocurrido el aluvión se vio notoriamente afectada producto de la resuspensión de material particulado generado por el tránsito de vehículos por calles con lodo seco. La comunidad percibió el aumento drástico de material particulado en el aire, y además, se constató esta situación, con el análisis de los datos obtenidos de las estaciones monitoras de Calidad del Aire para MP10 y MP2.5, ubicadas en la población Cateador Almeyda de la ciudad de Copiapó. Estas estaciones miden en forma continua ambos contaminantes desde noviembre del año 2013, y se encuentran en línea, tiempo real, en la página web <http://sinca.mma.gob.cl>.

Luego de ocurrido el primer nivel de Alerta Ambiental respecto de las concentraciones de material particulado respirable, en la ciudad de Copiapó, el Comité Operativo de Emergencia decidió implementar la restricción vehicular de dos dígitos, la humectación de las principales vías, restricción de velocidad y la solicitud a la comunidad del uso de mascarillas. Para las demás localidades afectadas se humectaron las vías principales, restricción de velocidad y la solicitud el uso de mascarilla, entre otras.

Por otra parte, la SEREMI del Medio Ambiente, Región de Atacama, junto al Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) de la Universidad Católica, realizaron toma de muestras de lodo, polvo de calles y agua, en la ciudad de Copiapó, Chañaral, Diego de Almagro y El Salado, e instaló por 3 días, dos estaciones monitoras de MP10 en la ciudad de Copiapó, una estación monitora en la localidad de Paipote y una estación en la ciudad de Tierra Amarilla, esto, con el objeto de determinar el contenido de metales pesados y la concentración de material particulado respirable, respectivamente. Concretamente se realizó un screening geoquímico en áreas urbanas de Atacama cuyo objetivo principal fue identificar los contaminantes de interés, rangos de concentraciones según matriz ambiental, y su variabilidad. Por sus características el screening geoquímico es un estudio preliminar y requiere de fases posteriores de muestreo y análisis, orientados a estudiar con mayor profundidad, aspectos como la distribución espacial detallada de background natural, muestreo de áreas de mayor contaminación, análisis de biodisponibilidad de contaminantes por matriz ambiental, relación entre fuente de contaminación y concentraciones observadas, entre otros.

El Ministerio del Medio Ambiente, a través de la SEREMI del Medio Ambiente Región de Atacama, entre el 5 y 18 de abril, monitoreó en Copiapó material particulado respirable (MP10), mediante un equipo tipo “Minivol”, en dos sectores de la ciudad (sector El Palomar y sector Centro). Los equipos estuvieron monitoreando en forma continua dos semanas, por el cual se obtuvieron 24 filtros que fueron enviados al Instituto de Salud Pública (ISP) para realizar un análisis químico, con el objeto de determinar el contenido de metales pesados, tales como Cobre (Cu), Plomo (Pb), Mercurio (Hg) y Arsénico (As). Los resultados de los análisis han indicado que en los días monitoreados, la concentración de metales pesados en el material particulado respirable (MP10) no superan los valores de las normas de referencia analizadas. Para el caso del Plomo la Norma analizada es Chilena y para los otros metales son normas EPA (Environmental Protection Agency U.S.).

Tabla 1: Resumen de Número de muestras tomadas por campaña y por tipo de muestra.

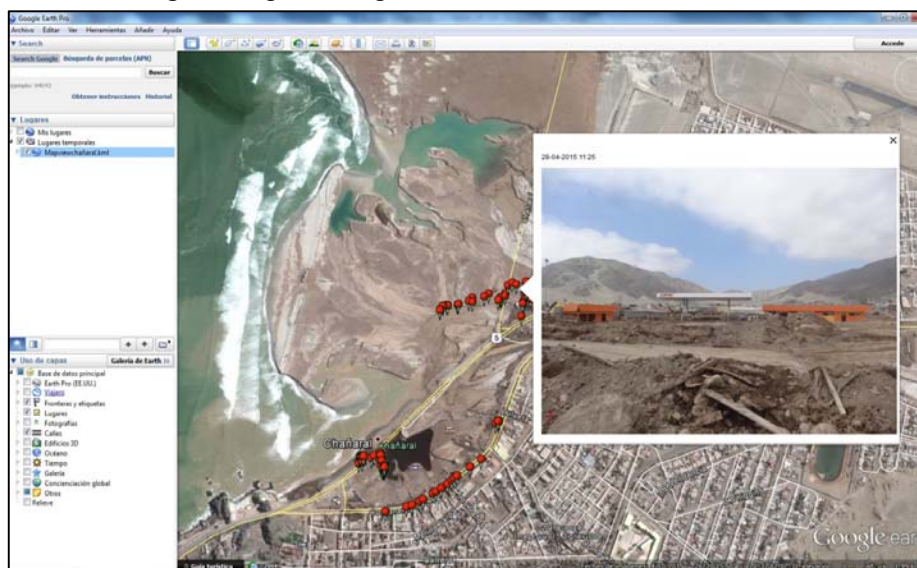
Matriz	Tipo de muestra	N° de muestras por campaña		
		Copiapó noviembre 2014	Copiapó abril 2015	Chañaral abril 2015
Sólida	Suelo	42	13	4
	Polvo calle	71	-	26
	Lodo	-	53	31
	Relave	30	53	14
	Lodo para análisis microbiológico	-	32	4
Aire	MP ₁₀ ¹	3 (11)	5 (8)	4 (4)
Agua	Agua potable	1	-	5 ³
	Aguas servidas tratadas	3	-	-
	Aguas naturales ²	6	5 (6)	6 (4)

Las muestras de MP₁₀ corresponden a los puntos de medición. Entre paréntesis aparece el número total de muestras tomadas.
 Los números entre paréntesis corresponden a las muestras de agua superficial que se sometieron a análisis microbiológico.
 Se tomaron 5 puntos durante la campaña en Chañaral en distintas zonas, incluyendo Copiapó.

Fuente: Informe Diagnostico Preliminar Adaptación ambiental y salud pública post aluvión: Chañaral y Atacama (Proyecto Chañaral). Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) de la Universidad Católica. Noviembre 2015.

La SEREMI del Medio Ambiente Región de Atacama realizó diversos terrenos con el fin de visualizar el estado de las matrices ambientales post aluviones registrados en la región. Dichos terrenos fueron realizados entre el 27 y 30 de abril de 2015. El objetivo fue tener una visión en terreno de los efectos post aluvión en las tres provincias de la región, respecto al estado de las principales áreas de relevancia ambiental, estado de cursos de agua, estado de Humedales costeros, sitios abandonados con presencia de contaminantes, puntos de descarga de aguas servidas, entre otros.

Imagen 1: Registro fotográfico de terreno en ciudad de Chañaral.



Fuente: SEREMI Medio Ambiente, Región de Atacama.

Considerando la envergadura de los acontecimientos, la Subsecretaría de Medio Ambiente ha orientado sus esfuerzos en planificar acciones en los territorios afectados a partir de la gestión de medidas que entreguen soluciones en materia ambiental a implementar en el corto y mediano plazo, enfocadas en el seguimiento, reparación, conservación y protección de las matrices ambientales afectadas (suelo, aire, agua, sedimento, biodiversidad). En este contexto, el MMA licitó el Estudio **“Propuesta de medidas para gestionar las matrices ambientales afectadas por la catástrofe ocurrida en la zona norte el presente año”**, el que se encuentra en desarrollo por parte de la consultora *Factorial Asesoría Ambiental* y debiera concluir con la propuesta de perfiles de iniciativas, análisis de oferta y demanda de la solución propuesta y la evaluación costo-beneficio y/o costo-eficiencia, para el primer semestre del año 2016.

Adicional a lo señalado, el Ministerio de Medio Ambiente está licitando estudios de riesgo en las zonas afectadas, estos son **“Diagnóstico y Evaluación de Potenciales Riesgos en las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla”** y **“Diagnóstico y Evaluación de Potenciales Riesgos en las comunas de Chañaral y Diego de Almagro”**. Los objetivos que persiguen estos estudios son diagnosticar la situación ambiental actual en las comunas de Copiapó, Tierra Amarilla, Chañaral y Diego de Almagro, establecer zonas de influencia y escenarios de exposición en el territorio de acuerdo a eventuales situaciones de riesgo, considerando la utilización de una herramienta de modelación, definir el modelo conceptual de la incidencia de las sustancias potencialmente contaminantes, que estén presentes en las matrices ambientales (aire, suelo, agua, sedimento, biota y alimento) y que puedan producir efectos negativos sobre los sujetos de protección (población, ecosistemas), determinar los niveles background para los suelos de la zona de estudio y finalmente la difusión de

los resultados obtenidos. Las consultorías tienen un plazo de 12 meses para entregar los resultados.

Por su parte, para la cuenca del Elqui en la región de Coquimbo, aguas arriba del embalse Puclaro se generaron crecidas con arrastre de material propios de actividades agrícolas principalmente, mangueras, madera, etc. y muchos residuos sólidos domésticos cercano a centros urbanos ya que las quebradas son usadas como vertederos clandestinos. Aguas abajo del embalse Puclaro, el efecto principal es la bajada por quebradas que generalmente no cuentan con cursos de agua permanente, como el caso más relevante de la Quebrada Marquesa en la comuna de Vicuña, que posee actividad minera (empresas mineras Nueva Talcuna y San Gerónimo), donde se han levantado sospechas de posibles arrastres de material de relave, principalmente abandonados, ya que los sitios mineros activos habrían resistido de buena manera según lo indicado por la Intendencia, Seremi de Minería y Sernageomin, luego de visitas a terreno a los mismos.

La autoridad sanitaria junto a la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas tomó muestras de la calidad del agua, para detectar posibles efectos en la Quebrada Marquesa ubicada en la cuenca del río Elqui. La importancia de la quebrada, es que aguas abajo de ella se encuentra la toma de agua de la sanitaria Aguas del Valle que abastece a las ciudades de La Serena y Coquimbo.

Se presentaron problemas de abastecimiento de agua potable por cerca de una semana, en las ciudades de La Serena y Coquimbo, principalmente por la turbiedad del río provocado por los sedimentos y materiales que arrastra.

Además de los efectos en la morfología de la cuenca por las crecidas y su biodiversidad; se suma el hecho de que la desembocadura del río Elqui, un humedal costero, posee aledaño a él una descarga de aguas servidas de la sanitaria, que ante situaciones de lluvia es abierto para evitar problemas con el sistema sanitario, generando descargas de aguas servidas, diluidas por agua lluvia, directamente sobre el humedal

En su desembocadura, el río Elqui arrastra todo el material al mar. Atendido el evento en cuestión, se generó un efecto de embancamiento de las playas de La Serena y Coquimbo, evidenciado a simple vista por el cambio de color de las aguas de azul a café, provocando además efectos en la fauna marina costera, similar al aluvión del año 1997, donde las áreas de manejo perdieron sus recursos bentónicos tales como machas, almejas y jaibas, además de cambios en el sedimento y agua de mar.

En la comuna de La Higuera, el sector de camino a Punta Choros, donde se emplazan la Reserva Nacional Pingüino de Humboldt y Reserva Marina de Islas de Choros y Damas, se produjeron bajada de aguas y barro por quebradas que permanentemente están secas. Este arrastre de material, escombros (desde sitios abandonados con potencial presencia de contaminantes cercanos a quebradas) llegó en algunos casos a la bahía, generando embancamiento de las playas

cercanas, con el consiguiente potencial efecto en la fauna marina costera, principalmente recursos bentónicos de interés comercial (machas, almejas, jaibas, lenguado, entre otros).

En la zona urbana del río Copiapó, existen pequeñas quebradas afluentes que cuentan con obras de control aluvional pero para este evento, ninguna de estas quebradas se activó debido a que la lluvia se concentró en la zona de la Cordillera, la única quebrada observada en terreno que aportó material al río Copiapó fue la Quebrada Paipote, la cual no contaba con obras para mitigar el riesgo aluvional. Es más, los desbordes de la quebrada Paipote son los que más afectaron las áreas urbanas de Copiapó y Paipote. Estos desbordes corresponden a 4 tipos:

- a) Desbordes por colmatación de cauce: Estos desbordes son normalmente de baja energía, y generan daños sólo por inundación.
- b) Desbordes por taponamiento del cauce: provocado por la acumulación de escombros en puentes. Este tipo de desborde puede ser de mediana a baja energía dependiendo de cuanto escombros se acumula en el puente y por cuánto tiempo.
- c) Desbordes por erosión de ribera externa en curvas del cauce: éstos son de media a alta energía, con gran poder destructivo en las inmediaciones donde pueden transportar grandes escombros.
- d) Desborde por angostamiento del cauce: Al entrar el cauce de la quebrada Paipote a la zona urbana de Copiapó, este sufre una dramática disminución de sección, lo que genera el desborde por toda la ribera este del cauce entre Calle Inca de Oro y Avenida Copayapu, drenando grandes cantidades de material hacia el centro de la ciudad.

1.5. Coordinaciones Sectoriales

Producto de la situación de emergencia ocurrida el 25 de marzo la Presidencia de la República decretó a la Región de Atacama en Estado de Excepción Constitucional de Catástrofe. En función del estado de excepción constitucional se conformó el Comité Operativo de Emergencia, tanto a nivel Regional como comunal, integrado por todos los servicios públicos incluyendo los Municipios respectivos.

En este contexto, los servicios públicos adoptaron medidas de urgencia que permitieran resolver la situación, resguardando la salud de la población afectada por el aluvión, especialmente en el ámbito de la calidad del aire, actuando cada uno en el ámbito de sus competencias.

Entre dichas medidas se puede señalar la declaración de alerta sanitaria por parte del Ministerio de Salud y la gestión de tránsito por la Secretaría Regional Ministerial de Transportes y Telecomunicaciones. Ambas gestiones, para la ciudad de Copiapó, se sustentaron en la

información sobre el estado de la calidad del aire, especialmente en lo referido al material particulado respirable MP10, conforme a los resultados entregados en línea por la estación monitora ubicada en Copiapó, perteneciente al Ministerio del Medio Ambiente y al Informe de Calidad del Aire emitido por la SEREMI del Medio Ambiente Región de Atacama.

La SEREMI de Transporte y Telecomunicaciones, en coordinación con la SEREMI del Medio Ambiente y la SEREMI de Salud, mes a mes evaluó la continuidad de la restricción vehicular en función de análisis de calidad del aire como promedio diario de MP10, obtenidos de la estación MP10 Copiapó de la Red Monitora perteneciente al Ministerio del Medio Ambiente. La restricción vehicular se mantuvo hasta el 30 de septiembre del presente año. Como asimismo, a partir del mes de julio se ha aplicado en las calles principales de la ciudad de Copiapó, un producto químico inocuo para la supresión de polvo denominado cloruro de Calcio.

Por otra parte, se informa diariamente a las autoridades regionales el estado de la calidad del aire, en función del ICAP registrado en la página web <http://www.sinca.cl>, y desde el Ministerio del Medio Ambiente se comunica a los medios de comunicación (radios y televisión regional, prensa escrita y online) dicho estado. De acuerdo al estado de calidad del aire, en el comunicado de prensa y en acuerdo con la SEREMI de Salud, se entregaron recomendaciones o medidas preventivas a la comunidad ante el aumento de concentración de MP10 para las ciudades afectadas.

El conjunto de las medidas implementadas en la ciudad de Copiapó (barrido de calles, supresor de polvo y restricción vehicular) fueron eficientes para mejorar la calidad del aire post aluvión.

Como consecuencia de la ocurrencia del aluvión, la ONEMI coordinó la instalación de viviendas de emergencia en distintas zonas, al respecto, el Ministerio del Medio Ambiente, contribuyó con la entrega de antecedentes de determinadas zonas que se definieron para la construcción de las viviendas de emergencia, y sobre las cuales, este Ministerio había realizado estudios y contaba con antecedentes de investigación preliminar de suelos con potencial presencia de contaminantes, de tal manera que se tomaran los resguardos pertinentes en cuanto a la evaluación de riesgos a la salud por parte de las autoridades competentes.

En la Región de Coquimbo, se realizaron visitas a terreno a los diferentes puntos de interés, donde se sospechaba impacto al medio ambiente, tales como sectores donde se emplazan sitios con potencial presencia de contaminantes (SPPC) en la cuenca del río Elqui y Quebrada Los Choros en la Higuera, sector de la desembocadura de ambas cuencas (humedales costeros).

La Seremi de Medio Ambiente asistió a sesión del Comité de Emergencia (COE) en Vicuña, para luego realizar visita a terreno a lugares afectados por arrastre de relaves mineros abandonados junto a municipio de Vicuña. Esto no se repite en la comuna de La Higuera, donde la coordinación

se presenta junto a la autoridad marítima, y con fecha 09/04/2015, se realiza salida terreno conjunta, para toma de muestras de agua de mar y sedimentos, en sector de la desembocadura de Quebrada Los Choros

Los efectos provocados por la activación simultánea de numerosas quebradas, en una amplia extensión del territorio, con numerosos centros poblados afectados por inundaciones y flujos de detrito y barro, constituyó por si solo un evento desafiante para el Servicio Nacional de Geología y Minería. Desde el punto de vista minero una cantidad aún indeterminada de depósitos de residuos mineros, la mayoría de los cuales constituyen pasivos ambientales, fueron arrastrados o removidos en forma total o parcial por la fuerza del agua. El efecto de la dispersión de contaminantes por este hecho particular está siendo actualmente evaluado por la Subdirección Nacional de Minería de SERNAGEOMIN en conjunto con el Departamento de Geoquímica de la SDNG, a través del levantamiento de la línea de base geoquímica Post aluviones.

Coordinación Comité de Datos para Emergencias

Con motivo del evento de marzo 2015, se creó el Comité de Datos para Emergencias, liderado por el Ministerio de Interior, cuyo propósito es concentrar la información de diversos organismos públicos que participan en la emergencia y así ponerla a disposición de autoridades para la toma de decisiones. Para ello se creó una Plataforma Tecnológica Integrada de datos en línea, de acceso remoto, disponible para las entidades públicas que alimentan el sistema.

En ocasión del evento de marzo, se realizaron 4 reuniones de coordinación en las cuales se recopilaban las necesidades de datos y se planificó la metodología para compartir la información recolectada por cada institución. Para el evento de septiembre se realizaron 3 reuniones y se utilizó la misma Plataforma Tecnológica Integrada, lo cual significó un considerable ahorro de tiempo. Gran parte de la comunicación diaria se realizó mediante redes sociales y correo electrónico.

Sin embargo, la idea es que los datos estén permanentemente actualizados en la plataforma, posterior a la emergencia, de modo de contar con información real al momento que se requiera. Este es un esfuerzo de cada institución.

En relación a la Plataforma Tecnológica Integrada, durante la emergencia de marzo SERNAGEOMIN:

- Implementó una réplica de geodatabase dispuesta por MOP, compuesta por 3 Feature Class (puntos, líneas, polígonos), en una instancia SDE del servidor institucional.
- Creó servicios Capabilities Feature Server, para posibilitar la bajada de los datos a través del consumo de servicio de mapas. Las Features Class contemplan un campo llamado "SEGUIMIENTO", en donde se registra si el estado del sector o infraestructura

monitoreada se encuentra operativo, no operativa, etc., que para efectos de los servicios se muestra dependiendo del estado, verde, rojo y amarillo.

Los servicios de la emergencia por inundación de marzo 2015, se encuentran operativos en las siguientes direcciones:

http://geoarcgis.sernageomin.cl/ArcGIS/rest/services/EmergenciaNorte/Area_de_Acopio/FeatureServer

http://geoarcgis.sernageomin.cl/ArcGIS/rest/services/EmergenciaNorte/Area_de_Afectacion/FeatureServer

http://geoarcgis.sernageomin.cl/ArcGIS/rest/services/EmergenciaNorte/Area_de_Campamento/FeatureServer

http://geoarcgis.sernageomin.cl/ArcGIS/rest/services/EmergenciaNorte/Area_de_Evacuacion/FeatureServer

http://geoarcgis.sernageomin.cl/ArcGIS/rest/services/EmergenciaNorte/Nivel_Inundacion/MapServer

<http://geoarcgis.sernageomin.cl/ArcGIS/rest/services/EmergenciaNorte/Relaves/MapServer>

El día 24 de marzo del presente año, la Subdirección Nacional de Geología instruyó el envío de dos profesionales a la región, para la evaluación de la situación. Al día siguiente la situación se agravó y se realizó una reunión de coordinación disponiendo de los recursos para atender la emergencia en las 3 regiones afectadas.

Así, se formaron grupos de trabajo para asistir la emergencia, tanto en terreno como en gabinete, con la participación de cerca de 50 funcionarios (profesionales, administrativos y auxiliares) y totalizando más de 2.500 horas de trabajo, distribuido de la manera siguiente:

- El equipo de Sensores Remotos se ocupó de la coordinación de descarga, procesamiento y entrega al interior de la institución, de la información proporcionada por el Charter Internacional activado por la Oficina Nacional de Emergencia el mismo día de la emergencia, y fue el nexo con las otras instituciones involucradas en el procesamiento de imágenes para la atención de emergencia, tales como CIREN – SAF – Ministerio de Interior.
- Los datos geospaciales fueron entregados a medida que estuvieron disponibles, a los profesionales de apoyo cartográfico de las distintas unidades, para preparar imágenes georreferenciadas y bases de datos con información atinente a la emergencia que sería utilizada por los equipos en terreno y para confeccionar informes y soporte espacial para la información recolectada. Compilación de imágenes aportadas por diversas instituciones,

nacionales e internacionales, que permitieron determinar las zonas afectadas. Adicionalmente, se prestó apoyo al Departamento de Relaves y de Gestión Ambiental en temas cartográficos.

- Un grupo multidisciplinario de geología, cartografía y gestión de emergencias conforman un equipo para levantar información existente desde la prensa, redes sociales y canales informativos oficiales, mientras se desarrolla la emergencia, para localizar geográficamente las zonas de catástrofe y sus mayores efectos. Con esto se generaron mapas donde se mostraban los sitios críticos, actualizados a diario y dispuestos inmediatamente a las autoridades para conocer los alcances de la emergencia. La versión final de este mapa muestra el número de aluviones y la fecha y hora de ocurrencia de los mismos.
- Grupos conformados por geólogos con experiencia de terreno en la zona afectada y geólogos especialistas de la Unidad de Peligros Geológicos se desplegaron en las regiones afectadas. De esta forma, 4 profesionales en la Región de Antofagasta, 11 en la de Atacama y 2 en la Región de Coquimbo completaron en total más de 120 días de terreno. Estos grupos emitieron informes diariamente, incluyendo la descripción de los fenómenos observados, su registro y caracterización geológica, extensión, afectación a infraestructura, además de recomendaciones para evitar o mitigar los efectos de fenómenos similares en el futuro y durante una posible nueva emergencia.
- Equipos de trabajo en gabinete se avocaron a la fotointerpretación de imágenes pre y post desastre para identificar las zonas afectadas, además de proponer zonas seguras para campamentos de emergencia, áreas de evacuación y zonas de acopio de sedimentos. Este trabajo se ha actualizado permanentemente en la medida que han surgido nuevos antecedentes.

Respecto a la entrega y flujo de información hacia los potenciales usuarios, se tiene que:

- Toda la información geológica generada fue entregada y publicada en la Plataforma Tecnológica Integrada de información digital liderada por Gobierno Interior (Infraestructura de Datos GeoEspaciales, IDE). Además, se entregó dicha información directamente a ONEMI, MINVU, DOH-MOP y SUBDERE, y a aquellos servicios y organismos públicos que así lo requirieron.
- Posteriormente se incorporó a la Plataforma Tecnológica Integrada los datos de altura de inundación y espesor de barro en aquellos sectores que fueron visitados, los que se complementan con fotografías de algunas zonas.
- Se prepararon informes resumen de los daños y observaciones de terreno en cada localidad, incluyendo la descripción del fenómeno ocurrido y las principales recomendaciones para el manejo de la emergencia, la planificación territorial y las medidas de mitigación necesarias para reducir el riesgo frente a estas situaciones.
- Adicionalmente, se generó un plan de trabajo para evaluar los cambios sufridos en la geoquímica de sedimentos de las zonas afectadas. Esto es posible ya que existe una línea

de base previa (análisis químicos de sedimentos pre aluviones), a escala regional, de las zonas afectadas. Este trabajo incluye el muestreo de las zonas afectadas en los alrededores de los depósitos de residuos mineros masivos. Los resultados de este trabajo, estarán disponibles a público como un Informe Registrado.

- Participación activa en reuniones con ONEMI, MINVU, DOH-MOP, MINSAL, Gobierno Interior y los COE Nacional y de Regiones, principalmente para coordinar la emergencia y acciones futuras. Esto incluye coordinación de trabajo post emergencia, orientado a generar información útil para la reconstrucción de las ciudades afectadas.
- Actualmente se continúa trabajando, principalmente con MINVU región de Atacama, en la localización de sitios seguros para la entrega de subsidios habitacionales en las comunas más afectadas. Este trabajo se realiza para asegurar que la reconstrucción de viviendas destruidas por los aluviones de marzo se realice fuera de áreas con peligro de ser afectadas por fenómenos de remoción en masa.

Como resultado de las actividades realizadas se generaron 7 informes en la región de Antofagasta, 10 en Atacama y 3 en Coquimbo. Se ha elaborado cartografía en 60 localidades incluyendo las zonas afectadas por aluviones e inundaciones, zonas de evacuación, áreas para campamentos de emergencia y de zonas acopio de material. Además, se ha elaborado un archivo digital de puntos con información de altura de inundación y espesor de sedimentos, complementado con fotografías de terreno en algunos casos.

Más de 2.800 toneladas de ayuda fueron enviadas a las zonas devastadas, en uno de los puentes aéreos más grandes de la historia (480 vuelos). Unos dos millones de toneladas de barro fueron removidos de la ciudad de Copiapó, por maquinarias, camiones y cientos de voluntarios y personal de las F.F.A.A. a través de las gestiones de ONEMI, como organismo coordinador del Sistema Nacional de Protección Civil.

1.6. Oportunidades de Mejora

El Crecimiento Urbano y la Planificación frente a los desastres

El ser humano tiene una visión distorsionada de la realidad donde habita y no concuerda con la apreciación que los científicos tienen del riesgo. El concepto de riesgo implica un análisis teórico probabilístico de un peligro potencial, basado en la actividad de un proceso devastador, conociendo el grado de vulnerabilidad de las personas y los bienes de un área en particular.

La intervención del medio desconociendo su dinámica está provocando severos problemas en su equilibrio. Cualquier modificación del entorno supone un sistema de procesos que actúan

desencadenando otros, que solo pueden detenerse o aminorarse mediante un dispositivo natural o artificial, pero cuidando de no activar otros procesos, hasta ahora pasivos.

Un adecuado conocimiento del medio permitirá establecer cuál es el grado de vulnerabilidad que experimentan las actividades humanas, con el fin de ir incorporando medidas estructuradas y no estructuradas tendientes a la reducción del impacto de los desastres.

La toma de conciencia por parte de las Autoridades Locales como las responsables de ordenar las actividades dentro de su área jurisdiccional, es la llave del éxito para frenar el impacto de los procesos naturales. Es la autoridad, la que puede modificar, cambiar, corregir, mediante normas o con el poder de la ley, los instrumentos de planificación territorial, como asimismo instar a sus conciudadanos hacia una cultura de prevención y mitigación frente a los fenómenos naturales o a aquellos que pueden ser provocados por el hombre.

Varias comunas se encuentran actualizando sus instrumentos de planificación, por ello se hace imperativo que dentro de la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE), se tome en consideración la temática del cambio climático, y sus impactos locales.

El Plan Regulador Comunal, vigente desde el año 2011, no presenta una definición de zonas de riesgo acorde a la realidad observada, por lo que el equipo de CIGIDEN recomienda su actualización a partir de nuevos estudios que definan las zonas aptas para el desarrollo urbano. Esto debiera implicar una modificación de las zonas de extensión urbana y vialidad, en especial la circunvalación proyectada. Asimismo, se requieren obras de encausamiento de mayor capacidad en la zona urbana, diseñadas para crecidas de esta magnitud. El área al sur del cauce también fue afectada por la inundación.

1.7. Acciones Derivadas

Cuatro investigaciones de académicos pertenecientes a distintos centros de investigación de la PUC: CIGIDEN, CEDEUS, Salud Pública de la Facultad de Medicina y la Facultad de Ciencias Biológicas forman parte del *Proyecto Chañaral UC*, los que realizaron un estudio de diagnóstico preliminar de la adaptación ambiental y los efectos de salud pública que tuvo el aluvión de marzo de 2015 en Chañaral y otras localidades de la Región, poniendo su conocimiento al servicio de la comunidad.

El grupo de Investigación a cargo del académico del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, Dr. Roberto Rondanelli, realizó un análisis de 37 estaciones que disponen de una larga serie de datos hasta el presente (1980-2015). Dicho análisis muestra que esta tormenta presentó la mayor extensión espacial de todas las tormentas que han afectado al Norte de Chile en ese periodo y presentó valores extremos de contenido total de vapor de agua, así como de inestabilidad entre los niveles de 900 y 500 hPa. Simulaciones numéricas realizadas con modelos

de mesoescala muestran un buen acuerdo en la precipitación acumulada en el evento respecto de las observaciones. Los productos satelitales de precipitación generados por distintos centros mundiales, resultan inadecuados para representar la precipitación ocurrida en el norte del país.

Varios servicios realizaron toma de muestras, reuniones y/o visitas a terreno cuyos resultados o gestiones no tenemos en vista a la hora de apoyar programas o desarrollar futuras actividades ya sea de prevención o mitigación ante futuros eventos. Por ello se hace necesaria la difusión de informes de eventos para coordinar de mejor manera las actividades de mejora.

En las semanas posteriores al evento hidrometeorológico, académicos del Departamento de Geofísica (DGF) e investigadores del Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, en conjunto con colaboradores en instituciones nacionales e internacionales, realizaron trabajos de investigación relacionados con los eventos aluvionales en los sectores de Tierra Amarilla (Sánchez, L. et al. 2015) y en la cuenca del Río Huasco (Aguilar, G. et al. 2015). El primer trabajo se centra en los flujos de detritos provenientes de la quebrada Carrizalillo y su distribución geomorfológica. Estos flujos produjeron un entrampamiento del río Copiapó y luego una post – apertura del cauce provocando varios puntos de desborde del río e inundación en la zona urbana de la comuna de Tierra Amarilla, todo esto asociado al evento de lluvias intensas del 24 - 26 de marzo del presente año en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo. En el segundo trabajo, se realizó un análisis de cuencas hidrográficas en donde Las lluvias torrenciales de finales de marzo de 2015 en la región de Atacama, generaron evento aluvional. Desde cuencas tributarias de la cuenca del Río Huasco, que en total drenan un área de 200 km², se denudaron por flujos de detritos y barro un volumen de $1.2 \pm 0.2 \text{ km}^3$. En base a estas medidas se calculó una denudación promedio de $6 \pm 1 \text{ mm}$. La comparación de estos valores con las tasas de erosión calculadas a diferentes escalas de tiempo (desde 10 a 106 años), permite señalar que este tipo de eventos tienen una recurrencia que involucran varias décadas y que no habían sido registrados durante los últimos 30 años.

Se requiere una retroalimentación con los servicios relacionados que realizaron algún tipo de acción que tenga algún impacto en el medio ambiente, de tal manera de tener en vista todos los antecedentes antes de iniciar proyectos de reconstrucción y/o limpieza y despeje de material que pudiesen afectar la biodiversidad.

La emergencia de marzo permitió detectar varias oportunidades de mejora al interior de la institución, así como incorporar los aprendizajes obtenidos de emergencias anteriores. Esto último permitió actuar con cautela frente al evento natural, ya que se desconocía cuál sería su desarrollo y alcance final.

Respecto a las oportunidades de mejora, el mayor problema detectado está en la llegada y flujo de información al interior y entre los organismos del estado. En varias oportunidades asistimos a reuniones donde las decisiones se estaban tomando sobre la base de información desactualizada, o que no correspondía a la emitida por el organismo oficial, en este caso SERNAGEOMIN, en lo

referente a la definición de las zonas afectadas y las áreas de seguridad para abordar la emergencia. De la misma manera, una misma institución solicitaba innumerables veces la misma información a través de distintas oficinas o departamentos, lo cual muestra que no existe comunicación al interior de las instituciones y que los conductos de información formal no funcionan. Esto se hace extensivo a las regiones, donde los organismos públicos se quejaban de la falta de información o que esta no estaba llegando a terreno.

Por otra parte, se evidencia un problema en los tiempos de respuesta, por la demora en la generación de datos base o de contexto. En esta categoría se ubica la determinación de zonas de afectación que aporta SERNAGEOMIN. Este es un insumo de primer orden para todas las instituciones y debe ser generado con la mayor rapidez posible, ya que la planificación de ayuda, subsidios, protección, acopio de materiales, cuantificación de daños, etc. dependen en gran parte de ella. Aun sabiendo el esfuerzo desplegado por los profesionales de SERNAGEOMIN, se requiere disminuir los tiempos de respuesta, para lo cual es necesario contar prontamente con los materiales necesarios para definir áreas de afectación como son las imágenes post evento, la cual no siempre es liberada en forma oportuna y confiable por los organismos que disponen de ellas.

2. EVENTO TERREMOTO Y TSUNAMI, 16 SEPTIEMBRE 2015

2.1. Sinopsis

El evento de magnitud de momento M_w 8.4 ocurrido el 16 de septiembre del 2015 a las 19:54, hora local, frente a las costas de Coquimbo, con epicentro a 37 km al Sur Oeste de la localidad de Canela Baja, con coordenadas epicentrales 71.74° W y 31.64° S a una profundidad de 23 km, según reporta el Centro Sismológico Nacional, produjo intensidades máximas de VIII grados en la Escala de Mercalli (ver Tabla 2), que generó un tsunami que afectó con fuerza a las costas del país, con particular impacto en la región de Coquimbo. Ocho minutos después de iniciado el terremoto, el SHOA emitió una Alarma de Tsunami para las costas de Chile, ONEMI solicitó la evacuación de todo el borde costero declarando Alerta Roja para todo el territorio nacional, sumada a las acciones preventivas que la Dirección Regional realizó oportunamente, acciones apegadas a los protocolos vigentes. En los minutos posteriores se constituyó el Comité de Operaciones de Emergencia nacional y regionales. Durante la madrugada del día 17 de septiembre, el SHOA canceló la Alarma de tsunami en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, La Araucanía, Los Ríos, Los Lagos, Aysén y Magallanes, permitiendo el retorno de las personas evacuadas a sus hogares. ONEMI procedió a levantar la Alerta Roja y declaró Alerta Amarilla en las regiones antes mencionadas, hasta concluir el proceso de retorno de la población situada en zona de inundación.

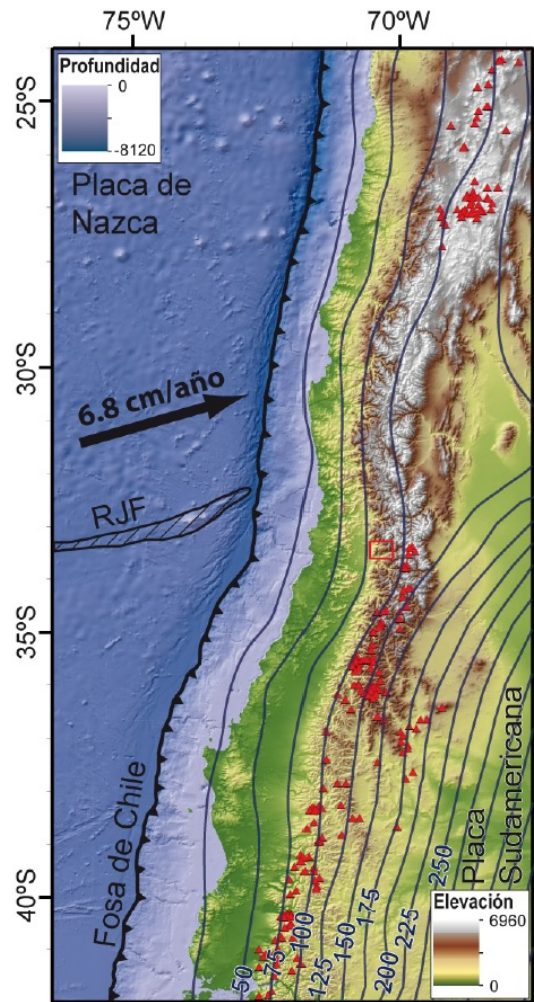
2.2. Características Evento Geológico

Contexto Sismotectónico

La sismicidad de Chile se encuentra principalmente dominada por la convergencia entre la placa de Nazca y placa Sudamericana, a razón de aproximadamente 7 cm/año (Figura 3). Hacia el sur de la Península de Taitao, es la placa Antártica la que penetra bajo la placa Sudamericana a aproximadamente 1,8 cm/año. En la zona austral, la Falla de Magallanes -que coincide con el Estrecho de Magallanes en su sector occidental y su continuación oriental a lo largo del Lago Fagnano - acomoda el movimiento de rumbo sinistral, del orden de 0.7 cm/año, entre las placas de Escocia y Sudamérica.

La gran velocidad de convergencia relativa entre las placas de Nazca y Sudamérica es la responsable de, no solamente la alta productividad sísmica que es una de las mayores del planeta, sino también de las grandes dimensiones que los terremotos alcanzan en esta región.

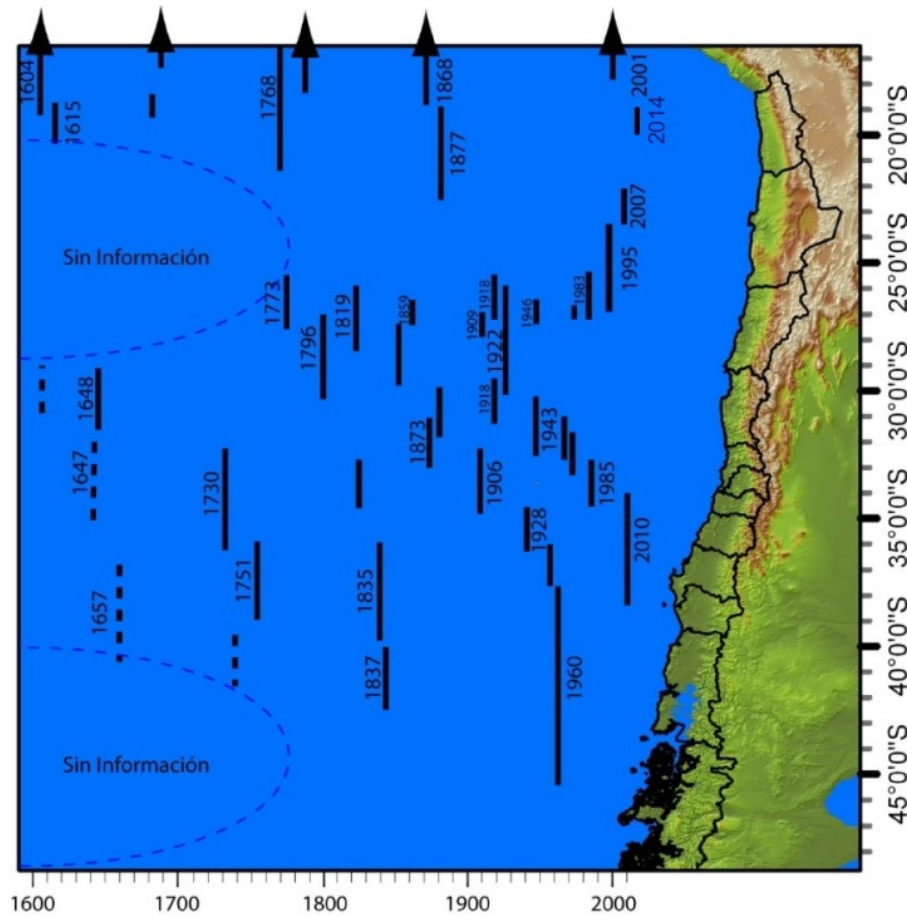
Figura 3. Contexto Tectónico de Chile central. En rojo representados los volcanes activos, el vector de convergencia y las curvas de profundidad de la placa de Nazca subductada.



Fuente: R. Rauld, 2011.

La mayor parte de la deformación asociada a la convergencia de las placas Sudamericana y Nazca es absorbida en la zona de contacto entre estas, lo que se ve evidenciado con la alta tasa de sismicidad que se observa en esta zona. Esta alta tasa de sismicidad además es reflejada por la frecuente ocurrencia, en términos geológicos, de grandes sismos ($M_w > 7.5$) generados en dicha interfaz (ver Figura 4).

Figura 4. Sismos interplaca históricos con magnitud estimada o calculada mayor a 7.2, y sus áreas de ruptura estimadas. Las líneas continuas señalan las zonas de ruptura bien delimitadas y las líneas discontinuas las zonas de ruptura inciertas.



Fuente: R. Rauld, 2011; modificada SHOA 2015.

Para los sismos de subducción con magnitudes mayores a 7.5 se ha propuesto, para Chile central, un período de recurrencia de entre 80 y 100 años (Comte et al., 1986; Barrientos, 2007), mientras que para sismos mayores a 8.5 se estiman períodos de recurrencia del orden de 250 a 500 años (Barrientos y Ward, 1990; Cisternas et al., 2005). En la Figura 4 se muestran los sismos mayores a una magnitud de 7.5 que se han registrado históricamente en el margen chileno. En esta figura se distingue una tendencia general de sentido norte a sur de sucesión de las rupturas sísmicas, en lo que podría denominarse como frente de ruptura (Barrientos, 1994). En la figura también se aprecia que las rupturas se repiten, y abarcan aproximadamente los mismos lugares o segmentos cada vez, lo que ha llevado a la incorporación del concepto de segmentos sísmicos (Nishenko, 1985; Comte et al., 1986; Comte y Pardo, 1991; Barrientos, 2007). Se observa también, la ocurrencia de sismos excepcionalmente grandes, con largos de ruptura mayores a 400 km, que no

se han repetido más de dos veces a la misma latitud durante el período de tiempo comprendido en el registro histórico.

Este movimiento relativo entre puntos al interior de las placas tectónicas ocurre de manera constante en el tiempo, produciéndose un proceso de deformación lenta, durante decenas a cientos de años, en los bordes entre placas tectónicas. En este proceso de deformación se acumula energía que posteriormente es liberada, mayormente, durante la ocurrencia de grandes terremotos, produciéndose en la zona de contacto entre las placas un movimiento relativo, de manera discreta en el tiempo y con una duración que varía entre algunos segundos a minutos. En Chile tenemos el sistema de subducción formado por las placas de Nazca y Sudamericana. Aquí la placa de Nazca subducta a la Sudamericana en un proceso de convergencia que ocurre a una velocidad de aproximadamente 7 cm/año. El contacto entre ambas placas se inicia en una depresión del fondo oceánico, la fosa (o trench en inglés), característica geográfica ubicada a unos 90-150 km al oeste de la costa. Luego el contacto entre placas se extiende de manera inclinada con un ángulo que varía entre los 18 y 24 grados aproximadamente, descendiendo bajo la placa Sudamericana hasta una profundidad de alrededor de 50-70 km. El ancho de esta zona inclinada, el contacto sismogénico de subducción, es de alrededor de 150 km con variaciones a lo largo del margen chileno.

Cuando ocurre un terremoto, el deslizamiento de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana no ocurre simultáneamente en toda la superficie de ruptura en el contacto sismogénico de subducción. La ruptura se inicia en el hipocentro y se propaga con una velocidad que en general es del orden de 2 a 3 km/seg. De este modo, para propagar una ruptura de 100 km se requiere alrededor de 30 a 50 seg. Además la amplitud del deslizamiento durante la ruptura no es uniforme, alcanzando deslizamientos máximos en algunos lugares de la superficie de ruptura. Esos máximos son justamente aquellos lugares donde hay máxima liberación de energía y donde el terremoto tiene un mayor momento sísmico. A partir de los sismogramas se puede resolver cómo esta energía se libera en función del tiempo una vez que ha comenzado el evento sísmico estimando lo que se llama la función de momento sísmico, que se puede tomar como una medida indirecta de como se libera energía en la fuente del terremoto a medida que va transcurriendo éste.

El terremoto del 16 de Septiembre de 2015 (Mw 8.4) es el mayor registrado en el país desde el 27 de febrero de 2010 (Mw 8.8) y el tercero mayor desde el 22 de mayo de 1960 (Mw 9.5), superando en tamaño a aquel ocurrido frente a las costas de Pisagua-Iquique el 1 de abril de 2014 (Mw 8.2). A diferencia de este último, este sismo no mostró actividad precursora inmediata en la zona epicentral. Los mecanismos de foco del sismo principal y sus réplicas más importantes, así como la ubicación espacial de éstos, son consistentes con la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental Sudamericana. Este terremoto se enmarca en una zona donde han ocurrido sismos de este mismo tipo con anterioridad, así como fue el terremoto del 6 de abril de 1943, cuya magnitud alcanzó a 8¼ (Lomnitz, 2004).

Con respecto al tamaño del terremoto, estimaciones preliminares indican que la longitud de ruptura alcanza a unos 200-250 km y ocurre un desplazamiento máximo de alrededor de 5-6 m. A partir de las amplitudes máximas del tsunami observadas en mareógrafos (inicialmente para Japón), Abe (1979) se ha desarrollado una manera alternativa de estimar el tamaño a partir del tsunami que produce el sismo. Para el evento del 2015, 11 estaciones japonesas indican $M_t=8.4$ en tanto que Honolulu e Hilo muestran 8.3 y 8.4 respectivamente.

Las coordenadas epicentrales indican una localización a 37 km al sur-oeste de Canela Baja. Este punto corresponde al inicio de la ruptura, la cual se extiende por más de 100 km hacia el norte y unas decenas de km hacia el sur. La zona de ruptura se puede entender como una zona (casi una superficie) en el contacto entre la placa de Nazca y placa Sudamericana que corresponde, en este caso, a la región de aproximadamente 200 a 220 km de longitud entre la Punta Lengua de Vaca (norte de la Península de Talinay) y alrededor de Los Vilos.

El epicentro no se encuentra en la zona de máximo deslizamiento, situación análoga a la evidenciada para el terremoto del Maule de 2010 (e.g., Lin et al. 2010). Aparentemente la ruptura tiende a iniciar en lugares en la falla que no coinciden con los de deslizamiento máximo. Máximos desplazamientos del orden de 5 a 6 m son consistentes con un déficit de deslizamiento acumulado desde la ocurrencia del último evento en la zona en 1943, a una tasa de convergencia del orden de 7 cm/año.

Con respecto a las observaciones del terremoto, se ha registrado una aceleración del orden de 80%g en la componente horizontal de la estación ubicada en Monte Patria. Es muy probable que se deba a efectos de suelo, puesto que solamente a 30 km de distancia, en la estación sismológica CO03, la aceleración máxima es del orden de 30%g. Datos de la red de GPS del CSN también aportan con una buena estimación de la fuente sísmica, y en general las soluciones de deslizamiento obtenidas a partir de desplazamientos permanentes de la corteza inferidos con estos instrumentos coinciden a grandes rasgos con las estimaciones de deslizamiento final obtenidas a partir de datos sísmicos. Por lo general, los datos de GPS representan el movimiento estático, cerca de la fuente, y los datos sísmicos representan la energía radiada de la fuente en el tiempo. El hecho de que estas soluciones concuerden a grandes rasgos es una señal de que se cuenta con una forma adecuada de representar físicamente el evento del terremoto. Debido a las características de cada tipo de observación geofísica, se promueve la utilización de manera conjunta de diversos tipos de observaciones (GPS, Sismogramas, DART, etc.) para poder estimar de mejor manera la distribución de deslizamiento en la superficie de ruptura. Los académicos del Departamento de Geofísica, Javier Ruiz y Francisco Ortega, se encuentran en proceso de desarrollar en Chile dichas técnicas de estimación.

Tabla 2: Intensidades en escala de Mercalli Modificada reportadas por ONEMI.

Localidad	IMM	Localidad	IMM
Coquimbo	VIII	Cauquenes	V
La Serena	VIII	Colbún	V
Los Vilos	VII	Constitución	V
El Quisco	VII	Linares	V
San Antonio	VII	Molina	V
Santiago	VII	Algarrobo	IV
Tiltil	VII	Bucalemu	IV
Rancagua	VII	Pichilemu	IV
Puchuncaví	VI	Curicó	IV
Valparaíso	VI	Talca	IV
Villa Alemana	VI	Concepción	IV
San Bernardo	VI	Los Ángeles	IV
San Pedro	VI	San Pedro de la Paz	IV
Talagante	VI	Saavedra	IV
Navidad	VI	Empedrado	III
Caldera	V	Lebu	III
Copiapó	V	Angol	III
Huasco	V	Curarrehue	III
Vallenar	V	Nueva Imperial	III
Litueche	V	Padre las Casas	III
Placilla	V	Temuco	III

2.3. Evolución Evento

Réplicas

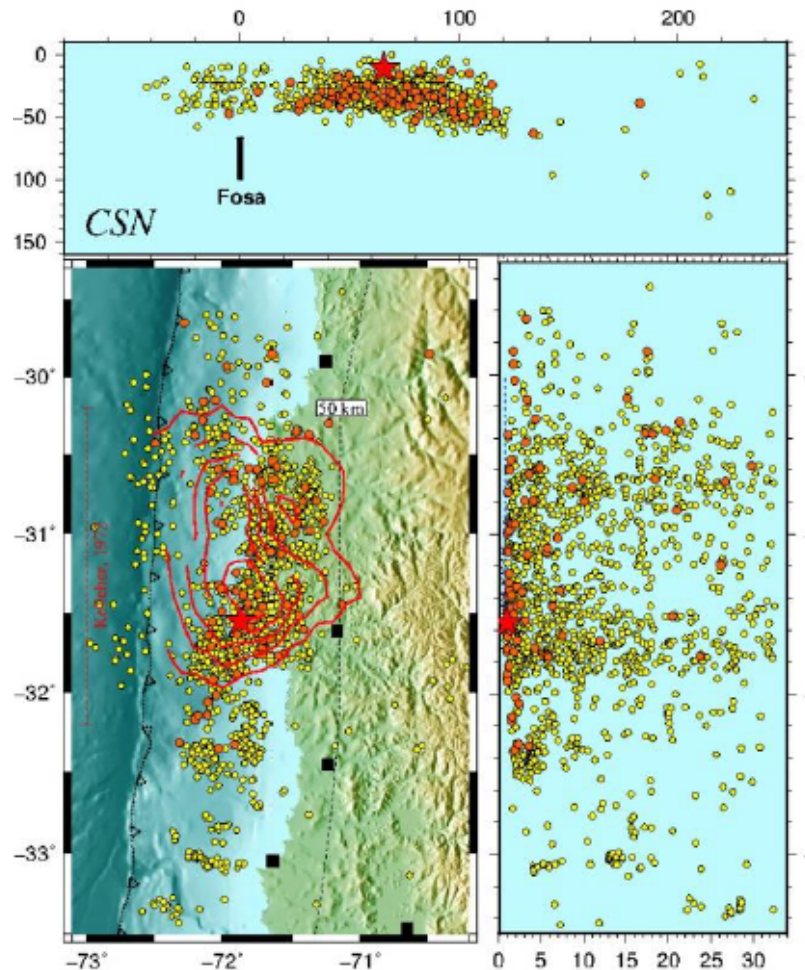
La mayoría de los sismos de contacto entre placas de magnitud significativa produce un número importante de réplicas. Se define como *réplica* a aquel sismo que ocurre con posterioridad a un sismo de magnitud mayor en un volumen cercano a la falla que se ha activado como respuesta al cambio de esfuerzos que éste ha generado en la región. Aunque existen varias aproximaciones, una muy utilizada es estimar la longitud de la ruptura asociada al sismo principal y luego extender esa dimensión desde ambos extremos de la falla. Todos los sismos contenidos en esta nueva región, de magnitud menor que el del sismo principal, pueden ser considerados como réplicas.

El mapa de la Figura 5, en el panel de abajo izquierda, muestra la ubicación de las réplicas en relación al epicentro del sismo principal (estrella roja) y desplazamiento en la falla (líneas de

contorno de color rojo). Los cuadrados negros representan las ciudades de Coquimbo, Illapel, la Ligua y Valparaíso de norte a sur respectivamente. El panel de abajo derecha muestra la evolución de las réplicas en función del tiempo y latitud; se puede apreciar una gran cantidad de réplicas en torno a la zona de mayor deslizamiento.

En la misma Figura 5, en el panel superior, se puede apreciar la distribución de réplicas en un perfil en profundidad; claramente las réplicas solamente se extienden hacia el oeste de la distancia correspondiente a 120 km, la que se encuentra asociada a una profundidad de 50 km, es decir, el contacto frágil entre ambas placas. Los mecanismos focales de las réplicas principales muestran geometría de fallamiento inverso de bajo ángulo. Se destaca la ubicación de sismicidad "outer-rise" (al igual que la vista en planta de la figura 5) hacia el oeste de la fosa (a la izquierda del eje de la fosa).

Figura 5: Réplicas del primer mes del terremoto de Illapel del 16 septiembre.



Fuente: CSN.

Durante los primeros 30 días posteriores a la ocurrencia del sismo principal, el CSN ha localizado más de 1400 réplicas. De éstas, la mayor réplica ha alcanzado una magnitud de 7.6, es decir 0.8 grados de magnitud menor que el sismo principal.

En los primeros días hubo más de 160 sismos por día (alrededor de 70 con magnitud mayor que 4.5), más de 80 cada 12 horas y 13 cada hora, especialmente en la primera parte de la secuencia. Estos valores son los esperados para un sismo de esta magnitud. Tal como ha sido el caso hasta el momento, el escenario futuro más probable es que sigan ocurriendo réplicas en la zona directamente afectada por el terremoto durante varios meses, disminuyendo su frecuencia de ocurrencia. Instrumentalmente estas réplicas ocurrirán por lo menos por un año, donde algunas serán sentidas por la población especialmente durante las primeras semanas.

Cada sismo de magnitud significativa produce aceleraciones que pueden ser registradas mediante unos instrumentos denominados *acelerómetros*. Es decir, pueden registrar el movimiento fuerte, a diferencia de los sismómetros (especialmente aquellos de banda ancha) que permiten registrar movimientos del suelo muy débiles. Instrumentos de este último tipo, adecuadamente instalados, permiten registrar sismos de magnitud del orden de 5 a 5.5 que ocurren en los extremos, por ejemplo en China o Japón.

En la componente horizontal (este-oeste), los valores de aceleración que se encuentran bajo el 30%g, con la clara excepción de la componente horizontal de la estación CI10. Esta estación muestra una aceleración del orden de 80%g, revelando que posiblemente se trata de una amplificación por condiciones locales del sitio (Leyton, comunicación personal). Los registros completos (tres componentes) se pueden descargar los valores numéricos de las aceleraciones, en <http://evtdb.csn.uchile.cl/>

Este sitio contiene una base de datos completa con todos los datos de aceleraciones que se han registrado en los instrumentos del CSN y redes colaboradoras (Integrated Plate Boundary Observatory Chile, IPOC, en el norte de Chile; Geophysical Research Observatories, GRO; Onemi-MINVU en todo el territorio nacional.

Tsunami

El terremoto de Illapel generó un tsunami en las costas de Chile que alcanzó a propagarse por todo el océano Pacífico. La propagación del tsunami fue monitoreada en el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM) mediante el software SAVTEC desde el momento del sismo.

Las ondas del tsunami fueron registradas desde la estación de Arica hasta la de Ancud (Figuras 10 a la 38) mientras que en el resto de las estaciones de la red nacional no hubo registro del tsunami.

El primer arribo de onda fue registrado en la estación de Pichidangui aproximadamente a las 20:06 HL (23:06 UTC), 12 minutos después de ocurrido el sismo. Posteriormente, se registró el arribo en

las estaciones de Coquimbo a las 20:14 HL (23:14 UTC), Quintero a las 20:17 HL (23:17 UTC) y Valparaíso a las 20:19 HL (23:19 UTC), respectivamente.

En la Tabla 3, se presenta las horas de arribo observadas en las estaciones de nivel del mar de la red nacional, además las horas de arribo pronosticadas por el software Tsunami Travel Time (TTT) para las mismas estaciones.

Tabla 3: Tiempos de arribo observados y pronosticados para el tsunami del 16 de septiembre de 2015.

Estaciones	Hora de Arribo (Observado)	Hora de Arribo (Pronosticada)
Arica	16-Sep-2015 22:07	16-Sep-2015 21:48
Pisagua	16-Sep-2015 21:45	16-Sep-2015 21:42
Iquique	16-Sep-2015 21:40	16-Sep-2015 21:34
Patache	16-Sep-2015 21:36	16-Sep-2015 21:35
Tocopilla	16-Sep-2015 21:19	16-Sep-2015 21:18
Mejillones	16-Sep-2015 21:16	16-Sep-2015 21:10
Antofagasta	16-Sep-2015 21:05	16-Sep-2015 21:06
Caleta Paposo	16-Sep-2015 20:50	16-Sep-2015 20:56
Taltal	16-Sep-2015 20:53	16-Sep-2015 20:56
Chañaral	16-Sep-2015 20:44	16-Sep-2015 20:47
Caldera	16-Sep-2015 20:36	16-Sep-2015 20:30
Huasco	16-Sep-2015 20:23	16-Sep-2015 20:29
Coquimbo	16-Sep-2015 20:14	16-Sep-2015 20:16
Pichidangui	16-Sep-2015 20:06	16-Sep-2015 20:09
Quintero	16-Sep-2015 20:17	16-Sep-2015 20:18
Valparaíso	16-Sep-2015 20:19	16-Sep-2015 20:15
San Antonio	16-Sep-2015 20:26	16-Sep-2015 20:27
Bucalemu	16-Sep-2015 20:34	16-Sep-2015 20:28
Constitución	16-Sep-2015 20:51	16-Sep-2015 20:44
Isla Quiriquina	16-Sep-2015 21:17	16-Sep-2015 21:09
Talcahuano	16-Sep-2015 21:26	16-Sep-2015 21:01
Coronel	16-Sep-2015 21:16	16-Sep-2015 21:10
Lebu	16-Sep-2015 21:04	16-Sep-2015 20:57
Queule	16-Sep-2015 22:06	16-Sep-2015 21:44
Corral	16-Sep-2015 21:57	16-Sep-2015 21:39
Bahía Mansa	16-Sep-2015 21:47	16-Sep-2015 21:37
Bahía Cumberland	16-Sep-2015 20:50	16-Sep-2015 20:50
Isla San Félix	16-Sep-2015 21:13	16-Sep-2015 21:17
Isla de Pascua	17-Sep-2015 01:20	17-Sep-2015 01:15

La Tabla 4 muestra un resumen de las amplitudes máximas y mínimas registradas durante la activación del SNAM ante la Alarma de tsunami y sus horas respectivas. La amplitud máxima registrada fue de 4.62 m en la estación de Coquimbo a las 21:23 hora local y la amplitud mínima también se registró en la estación de Coquimbo con 2.19 m a las 22:46 hora local.

Tabla 4. Amplitudes máximas registradas en las estaciones de nivel del mar a lo largo de Chile.

Localización estaciones	Amplitudes máximas observadas ⁴	
	Tiempo (H.L.)	Amplitudes (m)
Arica	2:43	(+)0.64
	4:35	(-)0.53
Pisagua	02:25	(+)0.2
	01:51	(-)0.23
Iquique	02:46	(+)0.30
	05:53	(-)0.3
Patache	01:49	(+)0.31
	06:14	(-)0.4
Tocopilla	02:47	(+)0.2
	1:35	(-)0.21
Mejillones	13:35	(+)0.3
	21:47	(-)0.34
Antofagasta	00:11	(+)0.5
	01:16	(-)0.50
Caleta Paposó	00:05	(+)0.23
	0:08	(-)0.27
Taltal	23:47	(+)0.4
	00:01	(-)0.33
Chañaral	21:56	(+)1.2
	23:49	(-)1.16
Caldera	04:37	(+)1.14
	04:28	(-)1.13
Hualco	22:00	(+)0.80
	22:06	(-)0.75
Coquimbo	21:23	(+)4.61
	22:44	(-)2.2
Pichdangui	20:14	(+)1.77
	20:58	(-)2.0
Quintero	21:04	(+)1.83
	20:47	(-)1.7
Valparaíso	21:43	(+)2.2
	21:56	(-)2.3
San Antonio	21:28	(+)1.01
	21:51	(-)1.20
San Félix	21:48	(+)0.67
	21:52	(-)0.71
Juan Fernandez	21:22	(+)1
	21:38	(-)1.4

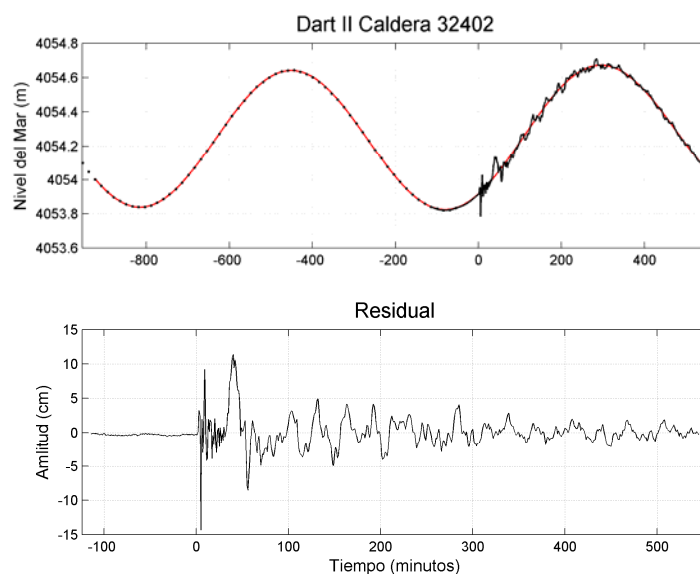
⁴ **Amplitud Máxima Observada:** Está referida a la máxima medición del registro de tsunami filtrado (sin la componente de marea) entre el nivel cero y la cresta (+) ó entre el nivel cero y un valle. Este valor de amplitud es medido al nivel medio del mar.

Localización estaciones	Amplitudes máximas observadas ⁴	
	Tiempo (H.L.)	Amplitudes (m)
Bucalemu	01:27	(+)0.7
	23:45	(-)0.9
Constitución	23:06	(+)1.34
	00:27	(-)1.00
Quiriquina	00:25	(+)0.9
	23:49	(-)0.96
Talcahuano	23:08	(+)1.2
	23:53	(-)1.4
Coronel	03:23	(+)0.7
	00:01	(-)0.67
Lebu	22:35	(+)0.40
	23:41	(-)0.35
Queule	01:41	(+)0.32
	00:51	(-)0.26
Corral	23:43	(+)0.4
	02:59	(-)0.36
Bahía Mansa	05:34	(+)0.41
	23:15	(-)0.4

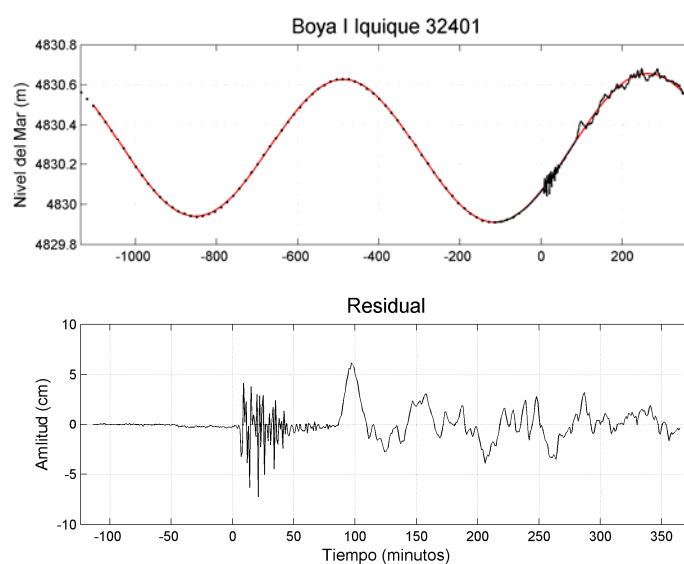
Registro Instrumental Tsunami

Chile cuenta con dos sistemas DART II localizados frente a las costas de Iquique el primero y el segundo frente a Caldera.

Para el evento del 16 de septiembre, ambos sistemas DART II se activaron por el sismo y registraron el tsunami generado. La Figura 6 muestra el registro del sistema DART II de Caldera, más cercano a la zona de ruptura, el cual se activó por las ondas sísmicas alrededor las de las 19:56 HL (22:56 UTC), para aproximadamente 38 minutos después registrar las máximas variaciones del nivel del mar de hasta 11 cm generadas por el arribo del tsunami.

Figura 6. Registro del tsunami por el sistema DART II de Caldera.**Fuente:** SHOA

El sistema DART II de Iquique (Figura 7), localizado a aproximadamente 1100 km al norte la zona de ruptura, se activó con el paso de las ondas sísmicas alrededor las de las 19:59 HL (22:59 UTC), aproximadamente 92 minutos después registrar el arribo del tsunami, cuyas máximas variaciones del nivel del mar fueron de 6 cm.

Figura 7. Registro del tsunami por el sistema DART II de Iquique**Fuente:** SHOA

El Profesor Experto del Departamento de Geofísica, M.Sc. Mauricio Fuentes, se encuentra realizando un estudio de los efectos en la costa del Tsunami que generó el terremoto de Illapel. Para ello utiliza modelaciones numéricas del run-up del tsunami comparando dos metodologías, utilizando un software de modelamiento numérico (NEOWAVE) para modelar la evolución del tsunami en el Océano Pacífico, y una solución analítica rápida del problema simplificado, desarrollada por el Profesor Fuentes, en la que se pueden obtener soluciones del run-up factibles de ser utilizadas en la respuesta ante este tipo de eventos, donde se cuenta con poco tiempo para realizar cualquier acción. Como resultado se obtiene una estimación de primer orden del run-up a lo largo de la costa chilena. Dentro de este trabajo, se compara las soluciones analíticas y numéricas con mediciones en terreno del run-up del tsunami, observando resultados consistentes al utilizar ambas metodologías. Además, se realiza una inversión de la fuente sísmica usando los datos DART y mareógrafos dispuestos en la costa chilena. (Fuentes, M., 2015).

Alzamiento y Subsistencia de la Costa

Tal como del estudio de Interferometría Radar InSAR y el modelo de desplazamiento predicen (Figura 8), no solamente hubo desplazamiento de más de 1 m hacia el oeste, sino que también un levantamiento de la costa del orden de varios decímetros. En la costa se puede apreciar este levantamiento a través de un marcador biológico denominado *Lithothamnium*. Este marcador corresponde a un alga coralina de color rosado que vive en el inter-mareal expuesta a la suficiente cantidad de agua que le permite crecer en ese ambiente. Cuando esta alga se muere, se torna desde un color rosáceo a blanco dejando una banda alba que se puede reconocer en la zona. El ancho de esta banda se ha reconocido e interpretado como reflejo del levantamiento que ha sufrido la costa asociado a terremotos en el pasado (Antofagasta, 1995, Ortlieb et al, 1996; Barrientos, 2010).

Es necesario destacar que la ocurrencia de este sismo ha dejado tensionadas las dos zonas aledañas, la que se encuentra vecina hacia el norte y aquella vecina hacia el sur. Kelleher (1972) indica que la zona de ruptura del sismo de 1943 se extendió entre los 30.2°S y 32.2°S, es decir prácticamente ocupa la misma región en la que ocurrió el sismo de 2015, habiendo ocurrido en 1880 otro sismo de importancia ($M=8.2$). Beck et al. (1998) establecen que la función de tiempo en la ruptura fue de 24 s produciendo un tsunami local de 4 m el que alcanzó 10-30 cm en Japón.

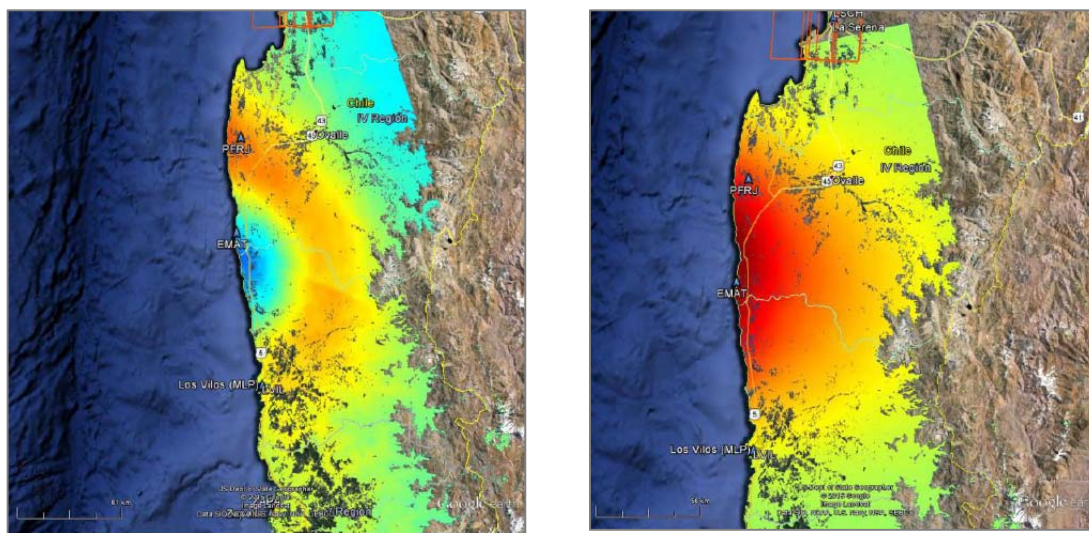
Por otra parte, los mismos autores indican que el terremoto de 1922 tuvo una duración en la fuente de 75 s, componiéndose de tres sub-fuentes que representan una compleja liberación de momento, produciendo daño por una extensión de más de 500 km (Willis, 1929). El tsunami local alcanzó 7 m en la región epicentral (Caldera - Coquimbo) en tanto que en Japón alcanzó una altura entre 30 y 70 cm. A pesar de la evidente acción del tsunami en las costas de Chile, no es clara la extensión hacia el sur de la zona de ruptura asociada al terremoto de 1922. Un valor de función de tiempo en la fuente de 75 s indica una magnitud del orden 8.3 a 8.4. De hecho, para este sismo,

Ms ha sido reportada con un valor de 8.3; sin embargo, la estimación a partir de la altura del tsunami generado alcanza a 8.7 (Abe, 1989).

La zona ubicada hacia el sur, es decir la región comprendida entre Los Vilos y Pichilemu (32°S - 34°S), ha sido afectada por terremotos de magnitud variable a través del tiempo. El registro histórico (Lomnitz, 2004; Udías et al., 2012) de los sismos de mayor magnitud comienza en 1647, continúa en julio de 1730, posteriormente en noviembre de 1822, culminando en agosto de 1906, julio de 1971 y marzo de 1985. Aunque es difícil la estimación de magnitud de aquellos sismos más antiguos, se cree que todos ellos poseen una magnitud de alrededor de 8 excepto el ocurrido en 1730 (Lomnitz, 2004), que produjo un maremoto significativo, el único que ha dejado un registro en las costas de Japón. En marzo de 1985 ocurrió un sismo $M_w=7.8$, Okal (2005) estima que el sismo de agosto de 1906 tuvo un momento equivalente a 2.8×10^{21} Nm, lo que equivale a un sismo de magnitud $M_w=8.2$.

La zona comprendida entre las regiones de ruptura de 2010 y 2015 deberá activarse en el futuro, ya que la placa de Nazca ha quedado rezagada en este sector. Sin embargo, no se puede determinar cuándo esto puede ocurrir. La magnitud del sismo podría alcanzar un valor de 8.5+.

Figura 8. Resultados InSAR, Cambios en la costa y en el interior del continente asociados al terremoto del 16 de septiembre de 2015. Izquierda: cambios verticales, los valores extremos oscilan entre 18 cm de levantamiento y 15 cm de hundimiento. Derecha: cambios horizontales, el color rojo intenso sería del orden de 2m de desplazamiento hacia el oeste.

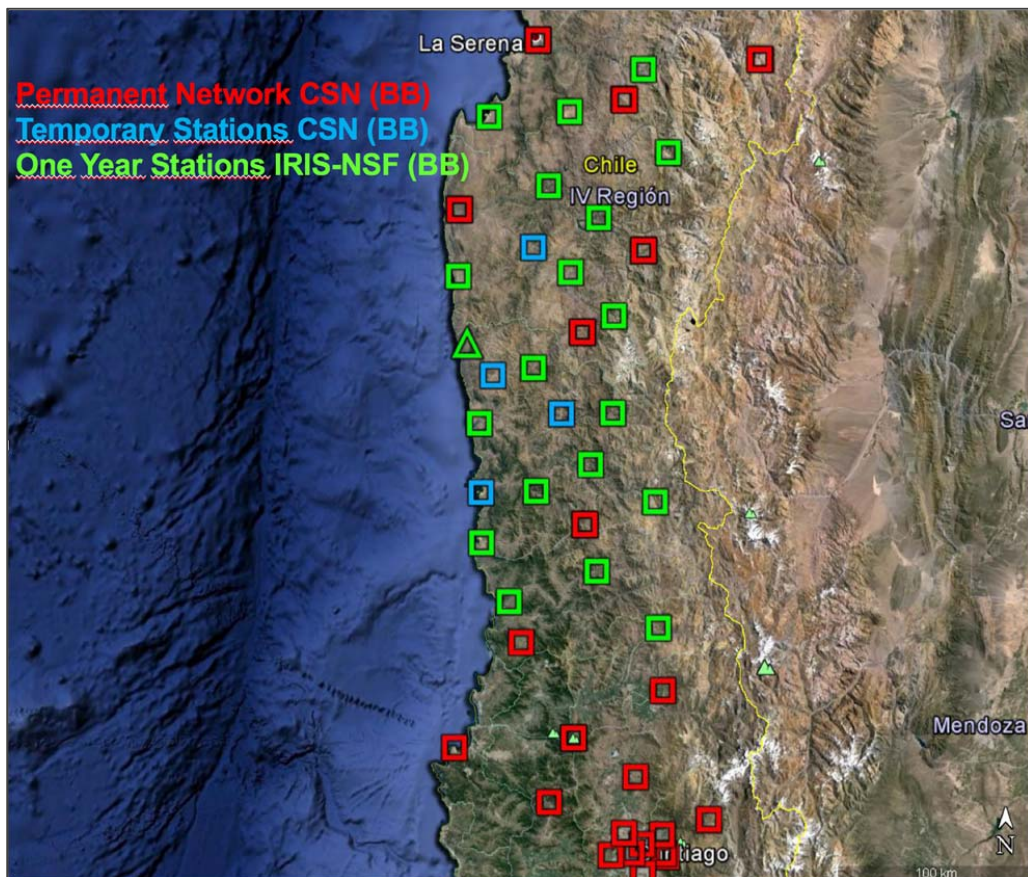


Fuente: www.insarap.org

Una tarea importante para poder comprender los procesos geofísicos que controlan la ocurrencia de terremotos, es el monitoreo temprano y extensivo de las réplicas de éste. Es por eso que la Dra. Diana Comte, Académica del Departamento de Geofísica e Investigadora Titular del Advanced

Mining Technology Center de la Universidad de Chile (AMTC), lideró la instalación de 18 sismómetros de período corto de 3 componentes en la zona epicentral, de manera de complementar densificando la red sismológica permanente del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (Figura 9). Las estaciones de período corto fueron remplazadas por instrumentos de banda ancha de IRIS PASCAL a través de un proyecto de colaboración NSF RAPID donde participó la Universidad de Florida, RPI, y la Universidad de Chile. Los datos que se generan de estas mediciones estarán disponibles en el sitio web de IRIS y podrán ser utilizados en conjunto con otros tipos de datos geofísicos (Ej. GPS) por investigadores en diferentes instituciones a lo largo del mundo, con el fin de entender la evolución de la sismicidad en la zona, inferir la estructura sísmica de la región iluminada por el terremoto y sus réplicas, y una caracterización de la mecánica del sistema de subducción en dicha región. (Comte, D., et al. 2015).

Figura 9. Redes sismológicas midiendo la actividad de réplicas del terremoto de Illapel (Mw 8.3) 2015.

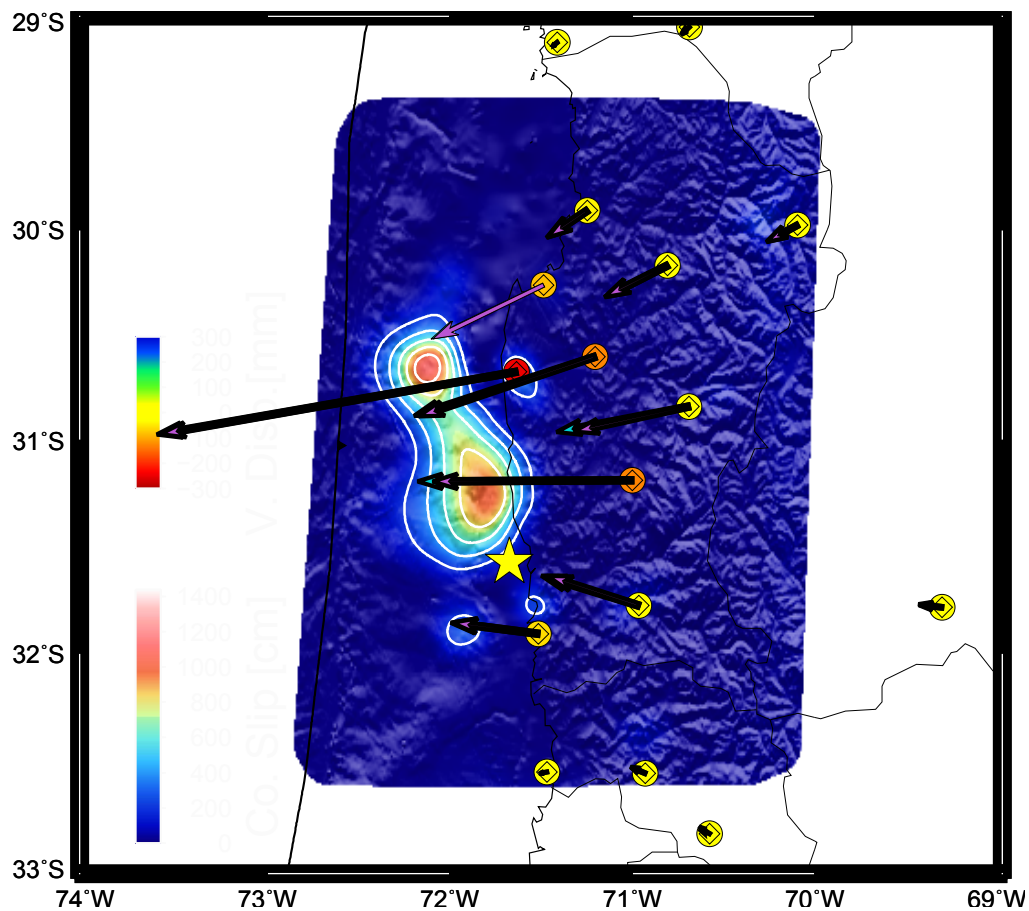


Fuente: Comte, D., 2015.

En este contexto, el Dr. Francisco Ortega y la alumna de Magíster en Geofísica Valeria Becerra, DGF de la Universidad de Chile, han procesado los datos de GPS disponibles y obtenido un modelo

de los deslizamientos del terremoto de Illapel (Ver Figura 10). Además el Dr. Javier Ruiz ha realizado una modelación cinemática de la historia de ruptura del terremoto de Illapel utilizando datos sismológicos a distancias regionales. (Comte, D., et al. 2015).

Figura 10. Resultados preliminares de deslizamiento del Terremoto de Illapel (Mw 8.3) 2015 a partir de observaciones de instrumentos GPS de las redes del CSN (UCHile) y RAMSAC (Argentina) realizado por Francisco Ortega y Valeria Becerra (Departamento de Geofísica Universidad de Chile).



Fuente: Ortega – Becerra, DGF UChile. 2015.

El académico del Departamento de Geofísica, Dr. Sergio Ruiz, se encuentra realizando con la ayuda de colaboradores internacionales, una caracterización del terremoto de Illapel utilizando acelerogramas y datos de cGPS. Se ha estimado el área de ruptura del terremoto y sus características dinámicas. Se han relocalizado y estimado el tensor de momento de las réplicas; confirmando su distribución alrededor del área de ruptura. Finalmente se está estudiando el comportamiento de la secuencia sísmica, desde su fase precursora hasta la sismicidad que ocurre hoy en día.

2.4. Impactos Sectoriales

La Tabla 5 resume las cifras relacionadas a las afectaciones a personas y viviendas, desglosadas por regiones, de acuerdo a información recopilada por los Centros de Alerta Temprana de las Direcciones Regionales de ONEMI.

Para entender los conceptos que abajo se expresan, se hace necesario plasmar las definiciones que el Sistema Nacional de Protección Civil establece para cada uno de ellos. Las definiciones se toman del Manual del Curso de Operaciones de Emergencia Nivel I,

- **Afectados:** Numero de personas que con ocasión de una emergencia o desastre ven perturbado directamente su quehacer habitual, afectado su calidad de vida. Especialmente aplicable en corte de energía eléctrica, teléfono, agua y aislamiento.
- **Damnificados:** Numero de personas que han sufrido, en su persona o sus bienes, especialmente en su condición de habitabilidad, daños evaluables y cuantificables provocados directamente por una emergencia o desastre, como también los familiares que viven a sus expensas. También se consideran damnificadas las personas que por la misma causa, hayan perdido su fuente laboral, ocupación o empleo.
- **Albergados:** Numero de personas que con ocasión de una emergencia o desastre habitan temporalmente en un lugar especialmente habilitado para la atención de damnificados.
- **Fallecidos:** Numero de personas que con ocasión de una emergencia o desastre fallecen y han sido plenamente identificados como tales por las instancias correspondientes.
- **Heridos:** Numero de personas que con ocasión de una emergencia o desastre son atendidas en los servicios de salud.
- **Desaparecidos:** Numero de personas que con ocasión de una emergencia o desastres no han sido ubicadas o presuntivamente han fallecido y no han podido ser calificadas como tales, por las instancias correspondientes.
- **Vivienda Daño Menor:** Vivienda con daños hasta un 30%. Normalmente los ocupantes permanecen en la vivienda. Con una reparación menor puede ser recuperada totalmente en el corto plazo.
- **Vivienda Daño Mayor:** Vivienda con daños entre un 31% y 65%. Los ocupantes deben ser evacuados. Con una reparación mayor puede ser habitada nuevamente, no es habitable en el corto plazo.
- **Vivienda Destruida:** Vivienda que por la magnitud de los daños no puede ser habitada nuevamente. Los ocupantes son evacuados. Es irrecuperable.

Tabla 5: Cuadro Resumen de afectaciones regionales producto Terremoto 16 Septiembre 2015.

Terremoto Illapel	Personas								Viviendas		
	Total Afectados	Damnificados	Albergados	Aislados	Fallecidos	Heridos	Evacuados	Desaparecidos	Daño Menor	Daño Mayor	Destruída
<i>Arica y Parinacota</i>	18.000						18.000				
<i>Tarapacá</i>	80.000						80.000				
<i>Antofagasta</i>	23.000						23.000				
<i>Atacama</i>	3.284	8					3.276		2		
<i>Coquimbo</i>	188.812	27.688	132		11	12	161.100	1	7.298	2.736	2.303
<i>Valparaíso</i>	300.042	37			3	2	300.000			6	2
<i>Metropolitana</i>	1				1						
<i>O'Higgins</i>	21.055	5					21.050		1	1	
<i>Maule</i>	17.900						17.900				
<i>Biobío</i>	16.200						16.200				
<i>Araucanía</i>	4.971						4.971				
<i>Los Ríos</i>	1.309						1.309				
<i>Los Lagos</i>	11.321						11.321				
<i>Aysén</i>	2.508						2.508				
Total Nacional	688.403	27.738	132	0	15	14	660.635	1	7.301	2.743	2.305

La región con mayor afectación fue la de Coquimbo, donde los primeros reportes indicaron la evacuación del Hospital de Los Vilos, por encontrarse en zona de inundación. En la demás regiones, los centros hospitalarios ubicados en el borde costero, realizaron evacuación vertical. Hubo alrededor de 96.000 clientes sin energía eléctrica y más de 9.000 clientes sin suministro de agua potable. Las rutas, mayoritariamente presentaron cortes y rodados en toda la región de Coquimbo. Las comunas más afectadas fueron Canela, Illapel, Salamanca y Combarbalá. Las personas que estaban acampando en el sector de la Pampilla en vísperas de Fiestas Patrias fueron ubicadas en zona de seguridad. El Terminal del Puerto de Coquimbo no pudo operar por daños en la infraestructura, al igual que 17 caletas inhabilitadas por daños estructurales. El tsunami dejó 9 embarcaciones varadas, afectó a 394 embarcaciones a nivel regional, de las cuales 131 presentaron pérdida total.

Los sectores Salud, Educación, Obras Públicas y Agricultura, entre otros, debieron activar sus planes de contingencia frente a la emergencia. Múltiples fueron las tareas desarrolladas por las

F.F.A.A. y Carabineros, y entre estas estuvo la evacuación de pacientes desde la región de Coquimbo hacia la ciudad de Santiago, vía aérea en un avión Hércules y por tierra en vehículos avanzados del Ejército. En la región de Valparaíso, el tsunami afectó a 8 viviendas y 11 locales comerciales resultaron destruidos.

Las cifras peak en el país fueron las siguientes: 660.635 evacuados, 15 personas fallecidas, 14 heridos, 428 albergados, 27.722 damnificados, 2.442 viviendas destruidas, 2.712 con daño mayor y 7.970 con daño menor. La emergencia en su fase inicial generó gastos del orden de los 30 mil quinientos millones de pesos.

Los efectos del tsunami generado por el evento del 16 de septiembre de 2015, fueron evidentes en las ciudades de Coquimbo, Tongoy, Los Vilos, y Concón, además se registró destrucción de pequeñas caletas de la IV región.

Entre los días 17 al 20 de septiembre del 2015 personal del SHOA efectuó un estudio en terreno para medir las principales áreas inundadas por el tsunami, los *run up*⁵ alcanzados y efectos en el borde costero de las principales localidades afectadas.

Los efectos del tsunami en Concón fueron localizados y se registraron en el sector de playa La Boca. Locales de estructura liviana y algunos restaurantes ubicados en dicho sector resultaron destruidos. A continuación se presentan algunas fotografías tomadas en terreno.

Figura 11. Efectos del Tsunami en local ubicado en el sector de Playa La Boca, Concón.



Fuente: SHOA

⁵ Run up se define como la altura máxima medida a partir de la inundación horizontal, es decir cuán adentro el tsunami penetró en tierra. Diferencia entre la cota del punto de máxima intrusión horizontal alcanzado por el tsunami y el nivel de referencia vertical relevante al tsunami.

Para la localidad de Los Vilos, los efectos del tsunami también fueron localizados y se registraron en el sector de la costanera y playa Los Vilos, afectando a un grupo de viviendas ubicadas muy cerca del límite de playa. A continuación se presentan algunas fotografías tomadas en terreno.

Figura 12. Efectos del Tsunami en casas ubicado en el sector de Av. Costanera, Los Vilos.



Fuente: SHOA

Los efectos el tsunami para el balneario de Tongoy fueron bastante significativos para el comercio local y pescadores del lugar. Se localizaron particularmente en playa Soccos y sectores bajos de la península de Tongoy. A continuación se presentan algunas fotografías tomadas en terreno.

Figura 13. Efectos del Tsunami en sector del centro del balneario de Tongoy.



Fuente: SHOA

Para el puerto de Coquimbo los efectos del tsunami fueron significativos, causando graves daños a dicha ciudad. La estructura portuaria fue afectada, así como el Mercado local, caleta de pescadores, comercio y viviendas particulares. A continuación se presentan algunas fotografías tomadas en terreno.

Figura 14. Efectos del Tsunami en sector de la Caleta de Pescadores de Coquimbo.



Fuente: SHOA

Figura 15. Observaciones de campo, run up e inundaciones.



Fuente: JICA – CIGIDEN (marco del proyecto SATREPS)

Desde el punto de Medio Ambiente, se recibe la siguiente información proporcionada por las Secretarías Regionales Ministeriales de las regiones comprometidas.

Se visitó el humedal El Culebrón de la Región de Coquimbo, sector puente de la costanera. Con la entrada del agua, un bloque de cemento de anclaje y sostén del ducto, que transporta las aguas servidas desde sectores de las comunas de Coquimbo y La Serena, fue arrastrado ocasionando el quiebre total del ducto y el vertimiento directo de las aguas servidas al humedal, desde el día del siniestro hasta la madrugada del día 21 de septiembre. El ducto fue reemplazado por uno nuevo, evitando que se siguiera vertiendo aguas servidas al humedal. La empresa no cuenta con información del volumen de agua que fue vertido, ya que frente a la contingencia una parte del caudal fue desviado a la comuna de la Serena.

En la inspección fue posible observar embancamiento de arena en la zona media del humedal hacia el puente del tren y hacia el área de la costanera, el sistema de ribera fuertemente afectado por el ingreso del agua. En la zona de embancamiento se registró una agregación de aves costeras (principalmente gaviotas y pelicanos). No se observaron aves muertas. Tampoco se percibió mal olor en el área, aparentemente debido a que existe una conexión permanente entre mar y el humedal, aportando a la mezcla y evitando su estancamiento (la inspección se realizó desde el puente de la costanera).

Una vez ocurrido los eventos de terremoto y maremoto, la Seremi de Medio Ambiente de Coquimbo inicia un trabajo de recolección de información con servicios relacionados, para generar una visión general de los distintos puntos afectados en la región. Se realizaron visitas a terreno a los diferentes puntos de interés, enfocado en los lugares donde se emplazan sitios con potencial presencia de contaminantes (SPPC), y sectores impactados por derrames de aguas servidas en lugares de importancia para la biodiversidad como el humedal El Culebrón.

Se visitó el sector de las plantas de aguas servidas situadas frente al puerto de Coquimbo. El Sr. Marcelo Vega, jefe de departamento de tratamiento de la empresa, informó que ambas plantas están funcionando y tratando la totalidad de las aguas transportadas por los colectores. No existió daño estructural en las bombas y estanques que contienen aguas servidas que son transportadas al emisario. Las demás instalaciones de las plantas tienen daños severos.

La empresa no ha realizado inspecciones en los emisarios submarinos de la Serena y Coquimbo, de manera que se desconoce si existen fisuras de material y posible vertimiento de agua dentro de la zona de protección litoral.

En la visita realizada en conjunto con personal del Puerto de Coquimbo, el Departamento de Medio Ambiente del Municipio de Coquimbo y Seremi del Medio Ambiente, se pudo observar los sectores de acopio de concentrado de cobre. En general los galpones de acopio de material sólido se observaron en buenas condiciones. No obstante, la carpa de acopio dispuesta en el extremo oeste del puerto presenta graves daños. De acuerdo a lo señalado por personal del Puerto de

Coquimbo, esta carpa contenía concentrado en un área protegida por unas estructuras llamadas “new jersey” y que corresponden a barreras de hormigón de altura aproximada de 3 metros, lo que impidió que el material fuera transportado por el agua que ingreso a la carpa. El extremo de la carpa sin contención se observó fuertemente afectado por el ingreso del mar. Según personal del Puerto de Coquimbo en esta área no había acopio de concentrado de cobre. En las inmediaciones de la carpa se observa material disperso, pero en bajas cantidades.

Con fecha 21 de septiembre, y en el marco de las actividades de apoyo por la contingencia del terremoto del 16 de septiembre en la región de Coquimbo, la Seremi de Medio Ambiente realiza reuniones y visita a terreno a sector rural de Illapel a la planta minera Catia, donde colapsaron dos muros del tranque de relaves de la empresa.

Asisten a la visita, profesionales de la Superintendencia de Medio Ambiente división de fiscalización, profesional de Seremi de Minería, Seremi de medio ambiente, y posteriormente Sernageomin.

Este colapso generó arrastre de material de relaves mineros a dos quebradas, una de las cuales posee escurrimiento de aguas superficiales provenientes de actividades mineras de compañía minera Santa Teresa ubicada aguas arriba, la cual posee RCA por lo que la SMA gestiona medidas de contingencias. Se estima escurrimiento por arrastre de aguas superficiales de 10 km aguas abajo del tranque. Se gestionó apoyo a la compañía minera para realizar medidas de contención del material para disminuir el contacto del material de relave con las aguas que escurren por las quebradas, junto a SERNAGEOMIN, DGA y DOH además de personal del Ejército de Chile.

A causa del terremoto, se evidenciaron impactos en sector costero, por arrastre de material de distinto origen a cuerpos de agua como la bahía de Coquimbo y Tongoy, contaminación por arrastre de material de cultivos marinos y otras actividades costeras, derrame de aguas servidas a las bahías por colapso de planta de aguas servidas, modificación del borde costero y sector de humedales tales como El Culebrón, estero Tongoy Salinas Chica, Salinas Grande y Pachingo.

En este caso se replicó la coordinación interna del Ministerio de Minería desarrollada durante el evento de marzo, lo cual favoreció una rápida respuesta y el despliegue de profesionales en terreno para mapear las zonas afectadas por tsunami, así como determinar el alcance los daños, con la observación de fenómenos de remoción en masa y licuefacción, desencadenados por el evento sísmico.

Para la evaluación de zonas afectadas por el terremoto, se desplegaron 4 grupos de trabajo en terreno, con 8 geólogos en total.

Los productos generados por SERNAGEOMIN consistieron en:

- Mapas de zonas inundadas por el tsunami, con alturas de inundación y daños (10 localidades costeras).

- Catastro de zonas con remociones en masa (en poblados y ciudades interiores de la región de Coquimbo).

2.5. Coordinaciones Sectoriales

Desde el momento de la percepción del sismo, el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM) activó sus protocolos operacionales para evaluar la amenaza de tsunami para las costas de Chile y emitir de forma rápida y eficaz una Alarma por evento de tsunami.

En consecuencia, para el evento del 16 de septiembre de 2015, el SNAM emitió 15 boletines, los cuales incluyen boletines de Alarma, actualizaciones que incluían información de las amplitudes del tsunami medidas en las estaciones de nivel del mar, tiempos de arribo estimados, y cancelaciones de la Alarma de Tsunami para las regiones que ya no presentaban amenaza, de acuerdo a la evolución del evento.

Por su parte, basado en la evaluación realizada por el SNAM, la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública (ONEMI), estableció efectuar la evacuación de las comunidades costeras a lo largo de la costa.

A partir del Boletín N° 7 del SHOA, emitido a las 22:25 HL (01:25 UTC - 17-09-2015) el SNAM comienza la cancelación gradual de la Alarma de Tsunami, considerando los resultados de los pronósticos efectuados con modelación numérica y el monitoreo del nivel del mar, para las regiones que no presentaban amenaza de tsunami. La primera región en la que se canceló la Alarma de Tsunami fue la Región de Magallanes y la Antártica chilena.

En la tabla N° 6, se presenta un resumen de las principales acciones y boletines emitidos por el SNAM y que dan cuenta del desarrollo y monitoreo del evento tsunamigénico en curso.

Tabla 6. Resumen de las acciones tomadas y boletines emitidos por el SNAM.

FECHA (dd/mm/aa)	HORA LOCAL	ACCIONES Y BOLETINES
16-09-2015	19:54	Se percibe sismo con una intensidad máxima registrada en Coquimbo y La Serena (VIII Mercalli).
16-09-2015	19:58	Se recibe información sísmica preliminar del ATWC (CISN Display), informando una magnitud 7.2 a 187 km al SSW de Coquimbo.
16-09-2015	19:59	Se recibe información sísmica preliminar del PTWC (P-Time) con una magnitud 7.9, y referencia geográfica 76 km al NW de Pichidangui.
16-09-2015	20:00	Se recibe boletín preliminar de sismo de CSN con una magnitud 7.2, referencia geográfica 177 km al NNW de Valparaíso.

16-09-2015	20:01	Se recibe reporte preliminar de sismo de GEOFON con magnitud 7.7, referencia geográfica cerca de la costa central de Chile. Se recibe el Boletín N°1 del PTWC indicando una amenaza de tsunami por un sismo de magnitud 7.9 cerca de la costa central de Chile.
16-09-2015	20:02	SNAM emite Boletín N°1 "Alarma de Tsunami" para Chile y zonas insulares, por un sismo de magnitud 7.9, de referencia geográfica: 76 km al NW de Pichidangui. (Fuente: PTWC).
16-09-2015	20:03	Se registra la activación del sistema DART II de Caldera.
16-09-2015	20:05	ONEMI emite Boletín de "Evacuación Preventiva" para la región de Valparaíso
16-09-2015	20:10	ONEMI emite Boletín de "Evacuación por Alarma de Tsunami" para Chile.
16-09-2015	20:12	Activación de red de sirenas de la Autoridad Marítima
16-09-2015	20:13	SNAM emite Boletín N°2 "Alarma de Tsunami" para Chile y zonas insulares, informando los tiempos estimados de arribo de las ondas del tsunami. Sismo de magnitud 7.9, de referencia geográfica: 76 km al NW de Pichidangui. (Fuente: PTWC).
16-09-2015	20:14	Se recibe información sísmica desde el USGS/NEIC con información de sismo de magnitud 8.3.
16-09-2015	20:25	Sr. Director del SHOA se comunica telefónicamente con Sr. Director del CSN, quien confirma que la magnitud del sismo es mayor a 8.0 Mw. Se recibe el Boletín N°2 del PTWC indicando una amenaza de tsunami por un sismo de magnitud 8.3 cerca de la costa central de Chile.
16-09-2015	20:28	Se observa las ondas del tsunami en la estación de Pichidangui con una amplitud de 1.4 m.
16-09-2015	20:33	SNAM emite Boletín N°3 "Alarma de Tsunami" para Chile y zonas insulares, informando nueva magnitud calculada de 8.3 y registro del tsunami en Pichidangui con un amplitud de 1.4 m.
16-09-2015	20:43	SNAM emite Boletín N°4 "Alarma de Tsunami" para Chile y zonas insulares, informando registro del tsunami con amplitudes de 0.8 m en Coquimbo, 1.9 m en Pichidangui, 1.1 m en Quintero, 1.3 m en Valparaíso y 0.44 m en San Antonio.
16-09-2015	20:50	Se observa una amplitud del tsunami superior a 3 m, en Coquimbo.
16-09-2015	21:01	SNAM continúa emitiendo boletines constantemente para informar sobre las amplitudes de tsunami registradas en la red de estaciones de nivel del mar.
16-09-2015	21:41	SNAM emite Boletín N°6 "Alarma de Tsunami" para Chile y zonas insulares, actualizando información sísmica reportada por CSN con nueva magnitud de 8.4 y amplitudes de tsunami registradas en la red de estaciones de nivel del mar.
16-09-2015	22:25	SNAM emite Boletín N°7 "Cancelación parcial de Alarma de Tsunami" indicando que se cancela el estado de Alarma para la región XII de Magallanes y Antártica chilena. Además informa sobre amplitudes del tsunami registradas desde Iquique a Bahía Mansa.

16-09-2015	23:22	SNAM emite Boletín N°8 "Cancelación parcial de Alarma de Tsunami" indicando que se cancela el estado de Alarma para las regiones XI y XII. Además informa sobre amplitudes del tsunami registradas desde Arica a Bahía Mansa. SNAM continúa emitiendo Boletines de cancelación parcial de la alarma de tsunami de acuerdo al monitoreo por las estaciones de nivel del mar.
17-09-2015	06:22	SNAM emite boletín N° 15 "Cancelación total de Alarma de Tsunami" indicando que se cancela el estado de Alarma para todo territorio nacional. Se estiman variaciones de 0,3 m hasta 1 m sobre el nivel medio del mar para la III y IV región. Las autoridades marítimas del área controlaran las actividades en sus jurisdicciones.

Los productos elaborados, por parte de SERNAGEOMIN, durante la emergencia por terremoto del 16 de Septiembre en la Región de Coquimbo, se encuentran en:

http://geoarcgis.sernageomin.cl/ArcGIS/rest/services/Emergencia_16Septiembre/Area_Afectacion_Tsunami/MapServer

http://geoarcgis.sernageomin.cl/ArcGIS/rest/services/Emergencia_16Septiembre/Visitas_Autorizadas/FeatureServer

2.6. Oportunidades de Mejora

Debido a que la Seremi de Medio Ambiente de Coquimbo no posee oficinas provinciales, no es posible actuar de la manera más rápida antes los diferentes eventos o contingencias que requieren análisis ambiental, por lo que se requiere una coordinación permanente y capacitada con los servicios locales que tienen competencia ambiental, así como también con los municipios, ya que se requiere de respuestas oportunas y eficaces ante la comunidad.

Varios servicios realizaron toma de muestras, realizaron reuniones y visitas a terreno cuyos resultados o gestiones no tenemos en su totalidad. Por ello se hace necesaria la socialización de informes de eventos con los servicios públicos para coordinar de mejor manera las actividades de reconstrucción y mejora.

Debido a que uno de los aspectos importantes para entender la ocurrencia de terremotos, es entender como éstos se cargan, es que en la Universidad de Concepción, estamos investigando otros modelos posibles. En particular, la posibilidad de que un aspecto relevante del proceso de subducción es el hecho que la placa elástica que subducta tiene un espesor finito, del orden de 10-20 km. Esto implica que un terremoto como el de Illapel, pueda ser descrito como un movimiento múltiple, donde fuera del sismo principal de movimiento inverso, ocurra un sismo en la interface

inferior con movimiento normal. La suma de estos dos eventos representaría la subducción de un segmento de placa de dicho espesor, como si fuese un ladrillo que subducta. Los primeros resultados obtenidos utilizando la fase W y datos de GPS, confirman esta posibilidad, donde la magnitud del evento normal es un grado menor que el evento principal. La importancia de este modelo es el de reconocer el rol que tiene la interface inferior en el ciclo sísmico entero, lo que podría dar luz sobre detalles del proceso de carga. El proceso intersísmico es dominado por los desplazamientos que ocurren en la placa subductada. Esto también podría tener implicancias en el modelo de generación de tsunamis ya que esta idea tiene un impacto en el movimiento del fondo oceánico que podría inferirse.

En relación a la experiencia nacional obtenida a partir del terremoto – tsunami del 27 de febrero del año 2010, los esfuerzos para mejorar la comprensión de los fenómenos tsunamigénicos han experimentado una mejora sustancial. Por ejemplo, el proyecto SATREPS⁶ que ha reunido a varios científicos nacionales e internacionales especialistas en la materia, para mejorar la caracterización de los maremotos, tanto desde la modelación del fenómeno geofísico hasta aspectos de mejora de los sistemas de alerta temprana y educación a la población, en un trabajo mancomunado entre los organismos técnicos competentes en la materia en Chile y la Academia. Algunos de los resultados apuntan a entregar herramientas que permitan afinar los protocolos de alerta de tsunamis en las costas de Chile, generar planes de continuidad operacional de infraestructura portuaria, guías para recomendaciones de diseño tsunami resistente, entre otros aspectos fundamentales para el desarrollo del país y una respuesta eficaz ante desastres de este índole.

2.7. Acciones Derivadas

Desde la Intendencia de la Región de Coquimbo, se solicitó a la Seremi de Medio Ambiente coordinar actividades de limpieza de playas, que deberán ser en conjunto con otras actividades como la limpieza del fondo marino de las costas de la bahía Tongoy. Estas actividades se desarrollan junto a SERNAPESCA, la Autoridad Marítima, el Municipio de Coquimbo y la comunidad.

SERNAGEOMIN ha decidido elaborar un procedimiento interno que le permita recoger las experiencias derivadas de las emergencias por desastres naturales (desencadenados por sismos y precipitaciones intensas) ocurridos el año 2015, con el objetivo de dar una respuesta adecuada y oportuna, disponiendo para ello de los recursos humanos y materiales necesarios. Cabe destacar,

6 Programa gubernamental de cooperación internacional SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development) auspiciado por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) y la Agencia de Ciencia y Tecnología de Japón (JST). Participan de Chile, el SHOA, MOP, CIGIDEN, ONEMI. <http://ares.tu.chiba-u.jp/peru/S/project/index.html>

que hasta el momento, la respuesta de la institución se ha dado por iniciativa y proactividad de los mismos profesionales de la Subdirección Nacional de Geología, quienes en forma solidaria han apoyado durante las emergencias a la Unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial (esta última cuenta actualmente con 5 profesionales para cubrir todo el país), en el levantamiento de información y desarrollo de actividades en terreno.

Se han elaborado 26 informes por parte de SERNAGEOMIN luego de los eventos de flujos aluviales de marzo 2015, 1 general, 7 de la Región de Antofagasta, 11 de la Región de Atacama, 3 de la Región de Coquimbo, 2 de hidrología y 2 de análisis geoquímico.

3. COMENTARIOS GENERALES

A modo general, se puede mencionar que dado que Chile es un laboratorio natural en cuanto a manifestación y recurrencia de eventos, la relación academia – tomadores de decisiones debe ser cada vez más estrecha y mancomunada. El Comité Científico Técnico tiene por desafío convertirse en una instancia formal que no solo canalice lo que los organismos científicos – técnicos proporcionen como output de las respectivas líneas de trabajo/investigación, sino que también nutrirse de las necesidades que ONEMI, como coordinador del Sistema Nacional de Protección Civil y de la Plataforma Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres, identifique y detecte como brechas a subsanar, de modo tal de contar con una permanente retroalimentación que permita que las gestiones que apuntan a reducir los impactos de los desastres de origen natural y antrópico se fundamenten en argumentos técnicos válidos y vigentes, surjan nuevas orientaciones para el óptimo y oportuno monitoreo de amenazas, caracterización integral de variables de riesgo, entre otras líneas de acción tendientes a hacer que el país, con el foco en lo local, tengan un mejor conocimiento y preparación ante los eventos desastrosos que nos afectan año a año.

Es necesario orientar los esfuerzos hacia el desarrollo de políticas y sistemas preventivos, más que reactivos, a fin de mitigar los efectos generados por fenómenos naturales recurrentes, tales como, terremotos, tsunamis, remociones en masa y otros que deben empezar a abordarse de una manera integral y relevante. Así como también se vuelve visible la necesidad de aumentar fondos de investigación concursables para realizar investigación en áreas prioritarias para el país, que faciliten la construcción de espacios de desarrollo, innovación, tecnología y conocimiento a la vanguardia.

Se destaca la importancia de la elaboración de planes de evacuación que consideren las variables de riesgo presentes en las zonas a abordar, con un enfoque multiriesgo y acompañados de un proceso sistemático de educación y asimilación por parte de la población involucrada en el territorio a intervenir mediante los procesos de preparación para una respuesta eficaz.

Se hace necesario comenzar a desarrollar herramientas para estimar caudales y tiempos de ocurrencia de crecidas de una manera más oportuna, así como se ha avanzado en sistemas de alertamiento temprano para variables geológicas mayormente recurrentes en el país. Para ello se torna prioritario una mayor integración y distribución de redes de estaciones/sensores para contar con series temporales de datos que faciliten la elaboración de análisis históricos confiables y con ello, mejorar la comprensión del comportamiento hidrometeorológico e hidráulico de cauces y quebradas, así como permitir diversas modelaciones de eventos en distintos escenarios de periodos de retorno.

Acorde a las evidencias del cambio climático en el país, el análisis de ciertas variables detonantes de eventos hidrometeorológicos catastróficos, tales como precipitaciones y temperaturas, debe considerar el aporte de nuevos factores relevantes, por ejemplo la isoterma cero, entre otros relevantes.

El diseño de medidas estructurales de mitigación, debiera considerar la frecuencia de eventos excepcionales, y cómo estos influyen en la reducción del riesgo de desastres en las localidades involucradas, por lo que las actualizaciones de los planes de ordenamiento territorial debieran referirse a ellos así como sugerir recomendaciones cada vez que exista un estudio fundado de riesgo.

Es necesario una mejor coordinación posterior a los eventos catastróficos para conocer las diferentes acciones sectoriales de los gobiernos regionales y locales, de tal manera de poder aportar, desde el punto de vista sectorial, medidas de mitigación o forma de accionar, tales como intervenciones en el borde costero (por ejemplo habilitación de sectores de playas) o en otros sectores afectados, caminos por lugares de interés para la biodiversidad (por ejemplo atravesos en humedales costeros), modificación de cauces, entre otros aspectos integrales a considerar, los cuales se cautelan cuando la transdisciplinariedad se vuelve crucial.

En las localidades costeras se deben generar proyectos interdisciplinarios que consideren la evaluación de peligros geológicos multi-criterios para definir zonas seguras para tsunamis, remociones en masa y otras variables de riesgo, así como disponer de vías de evacuación protegidas y de fácil acceso (caso Puerto Oscuro) que consideren y se adecuen a realidades, tanto de la comunidad como de las características geomorfológicas de la localidad a intervenir.

Se destaca la importancia de que para una efectiva gestión del riesgo de desastres, el sector académico y técnico debe ser considerado en todas las etapas del ciclo, de modo tal de tener un argumento científico para la asertiva toma de decisiones y para la permanente actualización y mejora de procedimientos que apunten a una preparación eficaz ante desastres, avalado por una sólida institucionalidad cuyo foco se centre en comunidades y gobiernos mas y mejor educados al respecto y por ende, mas resilientes.

Son insuficientes los avances que puedan hacerse en diversas líneas de investigación, en el robustecimiento de las distintas redes de monitoreo y sistemas de alerta temprana, si todo lo que ello arroje no es traspasado en un lenguaje claro y universal a los diferentes agentes interesados, de manera transversal y en todos los niveles políticos administrativos del país, con el objeto de efectuar gestiones oportunas tendientes a reducir los impactos que los desastres provocan, sin olvidar que la exposición de las personas e infraestructura ha aumentado de una manera mas rápida de lo que ha disminuido la vulnerabilidad, sumado a ello la aparición de nuevas variables de riesgo.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abe, K, (1989). Quantification of tsunamigenic earthquakes by the M_s scale *Tectonophysics*, **166**, 21-34.
- Aguilar, G., Cabré, A., Guaita, C., González, F., Ortega-Culaciati, F., Carretier, S., Riquelme, R., Comte, D. (2015). Denudación por flujos de detritos durante las lluvias torrenciales de Marzo de 2015 en Atacama. Resumen extendido en XIV Congreso Geológico Chileno 2015. (ver actas de congreso o solicitar directamente a german.aguilar@amtc.cl).
- Barrientos, S. (2010). Informe actualizado del Terremoto de Cauquenes del 27 de febrero de 2010, informes disponibles en www.sismologia.cl.
- Barrientos, S. (2015). Informe Técnico Terremoto Illapel, 16 Septiembre.
Beck, S., S. Barrientos, E. Kausel, M. Reyes (1998), Source characteristics of historic earthquakes along the central Chile subduction zone, *J. South Am. Earth Sci.*, **11**, 115-129.
- CIGIDEN. (2015). Diagnostico preliminar Chañaral y Atacama. Adaptación ambiental y salud publica post aluvión: Chañaral y Atacama.
- Comte, D., Carrizo, D., Peyrat, S., Russo, R., Roecker, S., Opazo, T., Peña, G., Baeza, S., Arriaza, R., Ortega-Culaciati, F., Ruiz, J., Contreras-Reyes, E., Becerra, V. (2015). The September 16, 2015 Illapel (Mw 8.3) Earthquake: Comprehensive Analysis from Seismic and Geodetic Observations. Charla invitada a la sesión especial del terremoto de Illapel (Mw 8.3) 2015 en la conferencia American Geophysical Union Fall Meeting 2015 (S54C-03).
- Fuentes, M. (2015). A study of the 2015 Mw 8.3 Illapel Earthquake and tsunami: Numerical and Analytical approaches. Charla invitada a la sesión especial del terremoto de Illapel (Mw 8.3) 2015 en la conferencia American Geophysical Union Fall Meeting 2015 (S54C-03).
- Kelleher, J. A. (1972). Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions. , *J. Geophys. Res.*, **77**, 2087-2103.
- Lin, Y. N. N. et al. (2013), Coseismic and postseismic slip associated with the 2010 Maule Earthquake, Chile: Characterizing the Arauco Peninsula barrier effect, *J Geophys Res-Sol Ea*, **118**(6), 3142–3159, doi:10.1002/jgrb.50207.
- Lomintz, C. (2004) Major earthquakes of Chile: A historical survey, 1535 to 1960, *Seism. Res. Lett.*, **75**, 368-378.
- Okal, E., (2005), A re-evaluation of the great Aleutian and Chilean earthquakes of 1906 August 17. *Geophys. J. Int.* **161**, 268-282.
- Oficina Nacional de Emergencia, ONEMI. Boletín Estadístico de Emergencias N°9 - Periodo 01 al 30 de Septiembre de 2015, <http://repositoriodigitalonemi.cl/web/handle/2012/1736>

- Ortlieb, L., S. Barrientos and N. Guzmán, Coseismic coastal uplift and cralline algae record in Northern Chile: the 1995 Antofagasta earthquake case (1996), *Quaternary Sci. Rev.* 15, 949-960.
- Pardo, M., D. Comte, T. Monfret, R. Boroscheck, M. Astroza (2002). The October 15, 1997 Punitaqui earthquake (Mw=7.1): a destructive event within the subducting Nazca plate in central Chile, *Tectonophysics* 345, 199-210.
- Sánchez, L., Aguilar, G., Börgel, R., Comte, D., Ortega-Culaciati, F., Regard, V., (2015). Estudio de los aluviones e inundación de Tierra Amarilla asociado a las lluvias torrenciales de marzo de 2015. Resumen extendido en XIV Congreso Geológico Chileno 2015. (ver actas congreso o solicitar directamente a lsanchez@ug.uchile.cl, german.aguilar@amtc.cl).
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, SHOA. (2015). Informe Preliminar evento Illapel M 8.4, 16 de septiembre de 2015.
- Udías, A., R. Madariaga, E. Buforn, D. Muñoz y M Ros (2012). The large Chilean historical earthquakes of 1647, 1657, 1730 and 1751 from contemporary documents, *Bull. Seism. Soc. Am.* 102, 1639-1653.