



**Universidad de Concepción**

Facultad de Ciencias Ambientales  
Programa de Doctorado en Ciencias Ambientales mención Sistemas Acuáticos  
Continenciales

Efectos geomorfológicos y ambientales del terremoto  
Mw=8,8 del 27 de Febrero del 2010 sobre los humedales  
costeros de la región del Biobío: el caso de la marisma

Tubul-Raqui



Tesis para optar al grado de

**Doctor en Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos  
Continenciales**

**Daniela Fernanda Constanza Vásquez Contreras**

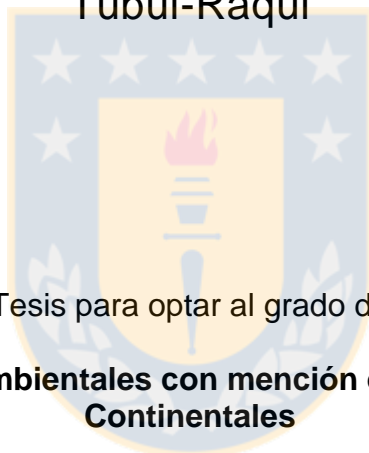
Enero 2017  
CONCEPCIÓN-CHILE



**Universidad de Concepción**

Facultad de Ciencias Ambientales  
Programa de Doctorado en Ciencias Ambientales mención Sistemas Acuáticos  
Continetales

Efectos geomorfológicos y ambientales del terremoto  
Mw=8,8 del 27 de Febrero del 2010 sobre los humedales  
costeros de la región del Biobío: el caso de la marisma  
Tubul-Raqui



Tesis para optar al grado de

**Doctor en Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos  
Continetales**

**Daniela Fernanda Constanza Vásquez Contreras**

Profesor Guía: Dr. Claudio Valdovinos Zarges

Dpto. de Sistemas Acuáticos, Facultad de Ciencias Ambientales

Universidad de Concepción

Enero 2017

CONCEPCIÓN-CHILE

Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado

La Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos Continentales “Efectos geomorfológicos y ambientales del terremoto Mw=8,8 del 27 de Febrero del 2010 sobre los humedales costeros de la región del Biobío: el caso de la marisma Tubul-Raqui” de la Srta. Daniela Vásquez Contreras, realizada en la Facultad de Ciencias Ambientales, Centro Eula-Chile, Universidad de Concepción, ha sido aprobada por la siguiente Comisión de Evaluación:

Dr. Claudio Valdovinos Zarges  
Profesor Guía  
Universidad de Concepción

---

Dra. María Mardones Flores  
Comité de tesis  
Universidad de Concepción



---

Dr. Fernando Peña Cortez  
Comité de tesis  
Universidad Católica de Temuco

Dedicada a mis  
padres Susana y Oscar



Es difícil pensar en totalidades  
cuando hemos crecido analizando  
las cosas, haciéndolas pedacitos y  
tratando con ellas separadamente  
(Denise Mc Cluggage)

## Agradecimientos

Agradezco a todas aquellas personas que me han dan dado ánimo durante esta etapa de mi vida, sobre todo en los momentos de flaqueza. A todas aquellas amistades que me han acompañado en este recorrido por esta Tierra, dándome fuerzas y enseñándome lo que realmente debemos valorar, haciendo de mí una mejor persona. A mis amigos de toda la vida, amigos y colegas de la universidad, a los amigos de las aventuras más locas y divertidas de las montañas de nuestro hermoso país y sus límites, y a todas esas hermosas personas que he conocido en este gran viaje por la vida. No hace falta mencionar todos los nombres, pues son muchos, pero creo que cada uno de ustedes sabrá que les estoy agradecida del alma.

A mis colegas, confidentes, amigas y compañeras de oficina de doctorado Natalia y María Elisa por su apoyo, su hermosa amistad, siempre dispuestas a entregar lo mejor como personas y a no dejarme decaer cuando creí que nada sería posible. A Jacqueline “Jack” por ser mi pilar de apoyo durante los primeros años del programa, por brindarme su alegría y humor característicos y muy buenas ideas. De manera muy especial quiero agradecer la muy importante ayuda de mi amigo y colega Gianfranco, por su tiempo y energías, su amistad y simplemente por ser tú.

A mi familia, en especial mis padres Susana y Oscar a quienes dedico este trabajo, por su apoyo incondicional, su constante ayuda y preocupación y velar por el bienestar de nuestro pequeño núcleo familiar.

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos al Dr. Claudio Valdovinos (Profesor Guía) por aceptarme como su alumna tesista, a pesar de su escaso tiempo. Sus consejos e ideas han influido significativamente en el desarrollo de este trabajo de investigación. Agradezco enormemente su apoyo y financiamiento. También un afectuoso agradecimiento a todos aquellos académicos que tuvieron la buena disposición de invertir parte de su tiempo en conversar respecto a las

distintas ideas que fueron surgiendo para desarrollar el tema de esta tesis: de manera muy cariñosa a la Dra. María Mardones Flores y a la Dra. Carolina Martínez. Como madres e investigadoras ellas son un modelo a seguir para todas aquellas mujeres que deseen aventurarse en este hermoso pero exigente, y muchas veces hostil, mundo de la ciencia y la investigación. A los académicos Dr. Marcus Sobarzo, Mg. Patricio Acevedo, Dr. Jorge Quezada, Dr. Timothy Warner, Dr. Benjamin Crosby y muy especialmente al Dr. Gerardo Perillo por recibirme en una estadía corta en el Instituto Argentino de Oceanografía IADO en Bahía Blanca, Argentina.

También quisiera expresarle mis agradecimientos a la Dra. Evelyn Habit, actual directora del Programa, porque ha realizado un gran trabajo en su rol, con mucha preocupación por traer mejoras al programa y motivar a seguir adelante para finalizar este ciclo con éxito.

Finalmente deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Programa Formación de Capital Humano Avanzado de CONICYT por otorgar el financiamiento a través de la Beca de Doctorado Nacional (2011-2015), a nuestra casa de estudios por el apoyo y la extensión del Premio Universidad e igualmente a la dirección de Postgrado, por otorgar financiamiento para la asistencia a eventos académicos.

## Tabla de contenidos

Agradecimientos.....	V
Lista de Figuras.....	IX
Lista de Tablas.....	XI
Lista de Gráficos.....	XII
Resumen.....	XIII
Abstract.....	XIV
1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- Hipótesis.....	11
1.2.- Objetivo General.....	12
1.3.- Objetivos Específicos.....	12
2.- RESULTADOS	
2.1.- Artículo científico publicado en la Revista de Geografía Norte Grande: Cambios en el relieve generados como consecuencia del terremoto Mw = 8,8 del 27 de febrero de 2010 en el centro-sur de Chile.....	13
2.2.- Artículo científico sometido a publicación en el <i>Journal of Coastal Research</i> : Respuestas Morfológicas de los Humedales Costeros frente a un Alzamiento Co-sísmico en Chile Centro-Sur.....	28
2.3.- Artículo científico en preparación: Una aproximación a la evaluación de la integridad ecológica de una marisma afectada por el megaterremoto del 2010 en Chile centro-sur: El caso de Tubul-Raqui.....	61
3.-CONCLUSIONES.....	109

4.- REFERENCIAS.....111

5.- ANEXOS.....116





## Lista de Figuras

Figura 1.1. Patrón de movimientos cosísmicos verticales en un terremoto de subducción. Pág. 15

Figura 1.2. Área afectada por el terremoto del 27 de Febrero de 2010. Pág. 16

Figura 1.3. Punta Lavapié: Izquierda 2008, derecha 2010. Pág. 18

Figura 1.4. Emersión de la plataforma de abrasión marina en la base del acantilado costero del borde occidental de la Península de Arauco. Pág. 18

Figura 1.5. Isla Santa María. Arriba Caleta Hernández, abajo Puerto Sur. Pág. 19

Figura 1.6. El desecamiento del Río Lebu impide la navegación. Pág. 19

Figura 1.7. Llico (37,19°S/73,56°W). Izquierda 2007, centro 17-3-2010, derecha: 6-5-2011. Pág. 19

Figura 1.8. Evolución del litoral de Tubul. Pág. 21

Figura 1.9. Desecamiento del humedal de Tubul-Raqui. Pág. 21

Figura 1.10. Inundación de un muelle y vegetación ribereña en la ribera oriental del lago Lleulleu. Pág. 22

Figura 2.1. Área de estudio y diseño de muestreo. Pág. 32

Figura 2.2. A) Apariencia de las unidades morfológicas el 18 de octubre, 2009, condición de referencia B) Imagen del 2009 vectorizada mediante interpretación en ArcGIS. C) Apariencia de las unidades morfológicas el 19 de Agosto, 2011 D) Apariencia de las unidades morfológicas el 24 de Enero, 2012. Pág. 38

Figura 2.3. Carta geomorfológica de la zona baja de la marisma Tubul-Raqui. Pág. 41

Figura 2.4. Cambios geomorfológicos, río Tubul. Cuadrantes de los sitios 1, 2 y 3 ordenados en orden de lejanía a la desembocadura del río Tubul. Pág. 42

Figura 2.5. Cambios geomorfológicos, río Raqui y estero Las Peñas. Cuadrantes de los sitios 4, 5, 6 y 7 ordenadas en orden de lejanía a la desembocadura del río Raqui. Pág. 43

Figura 2.6. A) Perfil batimétrico del sitio de estudio 4, localizado en la desembocadura del río Raqui. Se compara y ejemplifica la situación pre (2009) y post (2012) alzamiento

cosmismo. B) Modelo digital de elevaciones MDB representado la batimetría pre y post alzamiento. Pág. 44

Figura 2.7. Variación porcentual de superficie del canal principal del río, por sitio de estudio y por período analizado. Pág. 47

Figura 2.8. Variación porcentual de superficie en los canales de marea mayores, por sitios de estudio y por período analizado. Pág. 47

Figura 2.9. Variación porcentual de superficie de canales de marea menores, por sitios de estudio y por período analizado. Pág. 48

Figura 2.10. Variación porcentual de superficie de pozas salinas, por sitios de estudio y por período analizado. Pág. 48

Figura 2.11. Variación porcentual de superficie de la marisma media, por sitio de estudio y por período analizado. Pág. 48

Figura 2.12. Ordenación de los 7 sitios de estudio, analizadas en 3 años (2009, 2011, 2012), considerando los datos de superficie de cada unidad morfológica. Pág. 50

Figura 3.1. Localización de la marisma Tubul-Raqui. El paisaje de la marisma antes del terremoto del 27/F visualizado a través de los usos del suelo del año 2009. Pág. 67

Figura 3.2. Modelo ecológico conceptual de la marisma Tubul-Raqui. Diagrama de flujo de energía (derecha) y estresores a nivel de paisaje relacionados a sus posibles efectos sobre la marisma (izquierda). Pág. 72

Figura 3.3. Aplicación del Índice de integridad ecológica en la marisma Tubul-Raqui en el año 2009. Pág. 88

Figura 3.4. Aplicación del Índice de integridad ecológica en el año 2011 en la marisma Tubul-Raqui. Pág. 89

Figura 3.5. Aplicación del Índice de integridad ecológica en el año 2012 en la marisma Tubul-Raqui. Pág. 91

## Lista de Tablas

Tabla 1. Catastro de eventos sísmicos ocurridos en la cercanía del humedal Tubul-Raqui. Pág. 7

Tabla 2.1. Área total de las unidades morfológicas en el año 2009. Pág. 41

Tabla 2.2. Área total de las unidades morfológicas y los cambios exhibidos para los 3 períodos analizados: 2009-2011, 2011-2012, 2009-2012. Pág. 47

Tabla 3.1. Índice de Integridad Ecológica elaborado para la marisma Tubul-Raqui. Págs. 74-76.

Tablas 3.2a, 3.2b y 3.2c. Variables del IIAH. Págs. 77-78

Tabla 3.3. Puntajes finales IIAH. Pág. 78

Tabla 3.4. Especie clave de ave residente por cada zona de la marisma. Pág. 78

Tabla 3.5. Especie clave de ave migratoria por cada zona de la marisma. Pág. 83

Tabla 3.6. Rangos de variación natural establecidos para los 7 sitios de estudio, respecto a Salinidad, Rango de marea y lavado y Profundidad. Pág. 84

Tabla 3.7. Rango de puntajes finales del Índice de Integridad Ecológica aplicado a la marisma Tubul-Raqui. Pág. 87

Tabla 3.8. Ejemplo de hoja de puntuaciones para el IIE en condiciones ideales. Pág. 93

## Lista de Gráficos

Gráfico 3.1. Cambios por período SE 1. Pág. 92

Gráfico 3.2. Cambios por período SE 2. Pág. 92

Gráfico 3.3. Cambios por período SE 3. Pág. 92

Gráfico 3.4. Cambios por período SE 4. Pág. 92

Gráfico 3.5. Cambios por período SE 5. Pág. 92

Gráfico 3.6. Cambios por período SE 6. Pág. 92

Gráfico 3.7. Cambios por período SE 7. Pág. 92

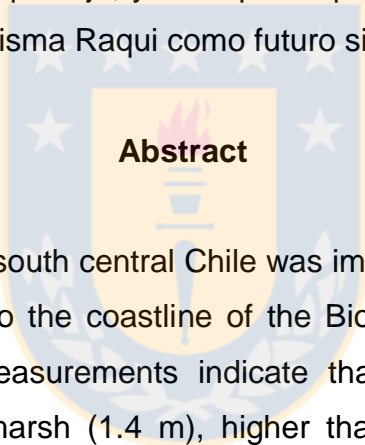


## Resumen

### **Efectos geomorfológicos y ambientales del terremoto Mw=8,8 del 27 de Febrero del 2010 sobre los humedales costeros de la región del Biobío: el caso de la marisma Tubul-Raqui**

Recientemente en el año 2010, la costa de Chile centro-sur fue afectada por un terremoto Mw=8,8 produciendo graves daños en el litoral de la región del Biobío, y en especial sobre sus ecosistemas costeros. Mediciones realizadas en terreno indican que la marisma Tubul-Raqui registró un alzamiento co-sísmico de 1,4 m, superior al alzamiento registrado en otros humedales costeros debido a su cercanía a la fosa. Esto constituyó una oportunidad única para evaluar los efectos de un alzamiento cosísmico de gran magnitud, en especial sobre los evidentes y escasamente documentados cambios geomorfológicos. A su vez, existe una necesidad crítica de evaluar el estado de salud del ecosistema para determinar el futuro curso de las acciones, destinadas a recuperar y/o fomentar las medidas de conservación. De acuerdo a ello, se seleccionaron siete sitios de estudio concordantes a los utilizados previamente en la literatura y tres escenarios temporales 2009, 2011 y 2012, para caracterizar geomorfológicamente a la marisma y comparar los cambios ocurridos pre y post-terremoto a corta escala temporal, a través del análisis de imágenes satelitales de alta resolución disponibles gratuitamente en Google Earth. El análisis e información resultante fue utilizada para la elaboración de un índice de integridad ecológica, junto a la integración de datos publicados en la literatura, para evaluar el estado de salud de la marisma en el escenario pre y post terremoto, en las dimensiones biótica, abiótica y de paisaje. Los resultados obtenidos indicaron que la marisma cambió su geomorfología en la totalidad de los sitios estudiados, lo cual va directamente relacionado a una pérdida de la superficie inundada, contribuyendo a la desconexión y pérdida de heterogeneidad del sistema. Unidades menores como canales de marea y pozas salinas exhibieron las mayores pérdidas, entre 90 a 100%, mientras canales mayores exhiben una leve recuperación entre 8,5 a 12%, lo cual es concordante a lo planteado en la primera hipótesis de esta investigación. Como respuesta inmediata a la

declinación de esta y otras variables relacionadas al componente abiótico y de paisaje, el estado de salud del ecosistema cambió de la categoría “Excelente” a “Bueno” o “Aceptable” de forma generalizada, evidenciando los fuertes cambios por efecto del alzamiento. Sin embargo, la componente biótica demostró una buena resiliencia ante perturbaciones naturales, observado en una alta resistencia de la flora dominante *Spartina densiflora* y a la presencia constante de densidades normales de aves residentes y migratorias, lo que comprobó la segunda hipótesis planteada. Finalmente se determinó que existe una respuesta diferenciada entre la marisma del río Tubul y del río Raqui, observándose únicamente una leve recuperación del estado de salud en los sitios ubicados en el río Raqui. Se espera que los resultados obtenidos en la presente investigación sean de utilidad para orientar las acciones y objetivos de conservación a largo plazo a escala local y de paisaje, y en especial para reactivar los esfuerzos para declarar la zona baja de la marisma Raqui como futuro sitio Ramsar.



### Abstract

Recently in 2010, the coast of south central Chile was impacted by an earthquake  $M_w = 8.8$  causing serious damage to the coastline of the Biobío region, especially on their coastal ecosystems. Field measurements indicate that the largest uplift of 1.4 m occurred in Tubul-Raqui saltmarsh (1.4 m), higher than the uplift recorded in other coastal wetlands, due of the proximity to the ocean trench. This was a unique opportunity to evaluate the effects of a largest coseismic uplift, especially on poorly documented and evident geomorphological changes. In turn, there is a critical need to assess the health of the ecosystem to determine the future course of action, designed to recover and/or encourage conservation actions. Accordingly, seven study sites, previously used in the literature, and three temporary scenarios 2009, 2011 and 2012 were established, to characterize geomorphological features of the saltmarsh and compare changes pre and post-earthquake a short time scale, by an analysis of high resolution satellite images freely available on Google Earth. The analysis and resulting information was used to develop an index of ecological integrity, together with the integration of data published in the literature to assess the health status of the saltmarsh

in pre and post-earthquake scenario, including biotic, abiotic and landscape dimensions. The results show large and widespread changes in morphological saltmarsh features, which is directly related to a loss of the flooded area, contributing to the disconnection and loss of heterogeneity of the system. Smaller morphological features as tidal channels and salt pans exhibited the greatest losses, between 90 to 100 percent, while tidal and stream channels exhibit a slight recovery between 8.5 to 12 percent, which is consistent to the first hypothesis of this research. As an immediate response to the decline of this and other variables related to abiotic component and landscape, ecosystem health status changed widely from "Excellent" to "Good" or "Fair" category, showing strong effect changes of the coseismic uplift. However, the biotic component showed good resilience to natural disturbances, observed in a high resistance of the dominant flora *Spartina densiflora* and the constant presence of normal densities of resident and migratory birds, which confirmed the second hypothesis. Finally it was determined a differential response between the marshes of Tubul and Raqui river systems, observed only a slight recovery of health at sites located in the Raqui river. We expected that the results will be useful to guide the actions and objectives of long-term conservation locally and landscape, and especially to revive efforts to declare the low marsh of Raqui river as future Ramsar site.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los humedales están asociados a una gran variedad de ambientes morfoclimáticos y condiciones de generación, pero es indudablemente la zona costera la que concentra mayor diversidad de humedales a nivel mundial. Esto se debe a que la zona costera, comprendida desde el margen continental hasta el borde de la plataforma continental, incluye una amplia gama de ecosistemas terrestres y propiamente costeros, intermareales y submareales. Estos ecosistemas se encuentran ampliamente determinados por la geomorfología y el clima, donde el ambiente terrestre influye sobre los ambientes marinos, estuarinos y lacustres y viceversa (Carter, 1989 en Stuardo *et al.*, 1993). La definición de humedal de la Convención Ramsar sobre humedales (<http://www.ramsar.org/>) engloba a los ecosistemas de humedales marinos, costeros y continentales. En lo que atañe a los humedales costeros y marinos, la definición de Ramsar comprende “extensiones de aguas estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (Artículo 1.1 de la Convención), entre los cuales están incluidas las marismas. Las marismas son un subconjunto de humedales estuarinos que se definen por la presencia de tipos de vegetación emergente, adaptadas especialmente a las zonas intermareales protegidas, situadas sobre las planicies costeras de latitudes templadas y subtropicales (Chapman 1960, Mitsch y Gosselink 1993). Se desarrollan en ambientes de baja energía, debido a que estos favorecen la deposición de los sedimentos suspendidos en la columna de agua, facilitando la formación de un sustrato adecuado para permitir la colonización de vegetación halófila, la cual termina por compactar y estabilizar el sedimento. Cada uno de estos dos procesos, la deposición de material sedimentario y la colonización de vegetación especializada, se refuerzan uno al otro, permitiendo la elevación de la marisma y entonces su expansión. Según la clasificación genética de Guilcher (1975) se reconocen 3 tipos de marismas: las que pueden formarse en la parte abrigada de un estuario, las que se generan detrás de flechas arenosas y las que se constituyen en la sección más interna de una bahía. Morfológicamente se individualizan en marisma baja o *slikke* y marisma media o *schorre* (Paskoff 1985), mientras otros autores definen un tercer elemento denominado



marisma alta o *salt marsh* (Guilcher 1975). La zona baja de la marisma es inundada cada marea alta e incluso por las mareas muertas. La pendiente es muy poco acusada, tapizada de materiales finos removidos continuamente por las mareas. Está surcada por canales de todos los tamaños, dibujando una red dendrítica y está desprovista de vegetación superior, a pesar de que son abundantes las diatomeas y en mareas muy bajas, pueden observarse algas verdes y otras especies. La zona media de la marisma es inundada sólo durante las mareas vivas, siendo igualmente de pendiente muy escasa. Es surcada por canales y pequeñas depresiones cerradas, pero presenta una cubierta vegetal de plantas halófitas, anuales y vivaces, resistentes a la salinidad y al movimiento de flujo y reflujo del agua.

Las marismas se encuentran ampliamente distribuidas a lo largo de la línea de costa de latitudes medias y altas (Mitsch y Gosselink 1993), llegando a ser tal su extensión, que sólo las marismas del hemisferio norte, Asia y Europa llegan a ocupar un total de 27.000.000 hectáreas (Aselmann y Crutzen 1989), mientras sólo en Norteamérica esta área es de 30.000.000 hectáreas, principalmente en Canadá y Alaska (Mitsch y Gosselink 2000). Para el área de Sudamérica no se encuentra disponible un inventario completo de marismas costeras; sin embargo, se ha registrado que en la costa atlántica comprendida entre el sur de Brasil y el norte de Patagonia Argentina (región atlántica suroeste), existen extensas marismas en estuarios con descarga importante, prevaleciendo en condiciones de salobridad, con un área total aproximada de 213.300 hectáreas (West 1977 en Isacch et al. 2006). Las marismas son consideradas como ecosistemas de transición o “ecotonos” ubicadas en la interfaz entre la tierra y el mar, y a menudo funcionan como importantes conductos de flujos de materia y energía (Ewel et al. 2001; Kneib et al. 2008). Estas contribuyen de manera significativa a los servicios proporcionados por los estuarios, valorados como los más importantes entre todos los biomas (Costanza et al. 1997). Una variedad de elementos diferentes del paisaje, tales como canales, arroyos, charcas y pozas, son características comunes que están incrustados en el mosaico de la zona intermareal, y ocupan un lugar destacado en muchas de las interacciones que se desarrollan a través de las interfaces de la marisma (Kneib et al. 2008). Estos elementos contribuyen a la heterogeneidad

espacial, y cumplen un rol importante para las múltiples funciones que desempeña la marisma a través de la acción de las mareas. Por ejemplo, los diversos tipos de canales son el sistema circulatorio a través del cual el agua, sedimentos, materia orgánica, nutrientes, así como también contaminantes son transportados dentro y fuera del humedal (Perillo 2009). Las marismas son reconocidas por su capacidad depuradora actuando como filtro de numerosos contaminantes (Rabenhorst 1995, Costanza et al. 1997, Weslawski et al. 2004, Zedler y Kercher 2005). Los numerosos canales proveen sitios de alimentación, protección y reproducción para la fauna local y migratoria, y finalmente un lugar de salida al océano abierto para muchas especies cuando alcanzan la maduración, actuando como corredores para el activo movimiento de la fauna a través del ecosistema (Rozas et al. 1988). Es particularmente importante el rol de las marismas como hábitats de especies de aves (Silvestri y Mariani 2004), constituyendo importante refugio para especies de aves acuáticas migratorias. Por esta razón, muchas marismas se encuentran protegidas o en vías de ser incorporadas a los sitios Ramsar, para la conservación y el uso racional de humedales (Ramsar, Irán, 1971). Estas funciones son también reconocidas como servicios ecosistémicos, proveyendo bienes y servicios para el bienestar de la sociedad. Por ejemplo, se estima que las marismas proveen servicios a la sociedad de cerca de US\$10.000·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> (en dólares de 1994; Costanza et al., 1997) en forma de funciones de hábitat (p. ej., diversidad), regulación (p. ej., desnitrificación y retención de nutrientes), y productividad (p. ej., biomasa). A su vez, las marismas proporcionan importantes beneficios estéticos, educacionales, culturales y espirituales, así como una amplia gama de oportunidades para la recreación y el turismo. En muchas áreas costeras, se encuentran en el centro de la vida cultural y local de las comunidades debido a la prestación de áreas para la extracción de recursos acuáticos, tales como mariscos, peces y cultivo de algas. Dentro de los servicios de regulación, estudios recientes demuestran que las marismas reducen la energía del oleaje durante tormentas y, posiblemente, mitigan las marejadas actuando como zonas de protección natural (Moller et al. 2014; Leonardi et al. 2016). Por otra parte, Shepard (2011) reconoce que la vegetación de las marismas tiene un significativo efecto positivo sobre la atenuación el oleaje y sobre la estabilización de la

línea de costa, lo que las hace un elemento valioso para la mitigación de peligros costeros y la adaptación al cambio climático.

Sin embargo, y a pesar de su reconocida importancia, el estado de las especies de humedales costeros y de agua dulce presenta un deterioro más rápido que el de aquellas presentes en otros ecosistemas (MEA 2005). Las características ecológicas singulares de estos humedales, sumadas a su vulnerabilidad y alto grado de amenaza por parte de actividades humanas, los ha puesto en el foco de esfuerzos de conservación para asegurar la sustentabilidad de los servicios que éstos proveen (Engle 2011). De entre ellos, las marismas se constituyen como uno de los ecosistemas que presenta mayores tasas de degradación a nivel mundial, y como tal están desapareciendo alrededor del mundo a una tasa alarmante (Fagherazzi 2013). Las alteraciones más recurrentes son de origen antrópico; sin embargo, las alteraciones de origen natural, aunque menos frecuentes, también pueden afectar su estructura y funcionamiento. Comúnmente las marismas suelen estar amenazadas por peligros naturales tales como tormentas, huracanes y tsunamis; los primeros pueden ser incrementados en magnitud y duración por los efectos del cambio climático (Shepard 2011). De tales efectos, el aumento del nivel del mar es a menudo visto como el principal responsable del deterioro de las marismas, y se encuentra ampliamente documentado en la literatura (Day et al. 1995; Donnelly y Bertness 2001; Reed 1995,2002; Craft et al. 2009; Raposa et al. 2016). En costas de colisión activa (Inman y Nordstrom 1971), los megaterremotos son agentes que conllevan a abruptos cambios en la geomorfología y funcionamiento de las marismas, a través del proceso cosísmico de subsidencia o alzamiento. Los impactos producidos por el alzamiento costero están escasamente documentados, incluso a nivel mundial, y principalmente referidos al delta del río Cooper en Alaska (e.g. Thilenius 1995; Christensen et al. 2000; Boggs 2000).

Las costas son altamente dinámicas y constituyen sistemas geomorfológicamente complejos, los cuales responden en una manera no-lineal a los eventos extremos (Pethick 2000). Por ello, entender los aspectos geomorfológicos espaciales y temporales de la respuesta de los sistemas costeros a las perturbaciones es una

necesidad relevante. En este aspecto, el emplazamiento geológico y la geomorfología son factores importantes a considerar en la formación y evolución de las marismas, especialmente en Chile.

La costa de Chile se trata de un margen activo, próximo y paralelo a la gran fosa submarina Chile, caracterizado por la frecuencia y la fuerte magnitud de los terremotos que originan movimientos tectónicos cosísmicos (Paskoff 2010). Debido a ello, los ecosistemas costeros deben ser capaces de resistir y reajustarse a los cambios verticales originados por este tipo de perturbaciones naturales, y a la dinámica cosísmica asociada, que bien puede expresarse en alzamiento o subsidencia dependiendo de la cercanía a la fosa (Quezada et al. 2012). El 27 de febrero de 2010 la costa de Chile central fue afectada por un terremoto de  $M_w=8,8$ , correspondiendo hasta hoy al séptimo terremoto más grande de la era instrumental (Rodríguez 2013). De este modo, Chile cuenta con dos de los cinco eventos sísmicos más grandes de la historia: 22 de mayo de 1960 (de magnitud  $M=9,5$ ) y 27 de febrero de 2010 (Martínez et al. 2011). La costa de la región ha sido afectada de manera recurrente por eventos sísmicos de magnitud superior a 8.0 (Tabla N°1), donde destacan los terremotos de 1960 y 2010, considerados entre los cinco más destructivos de la historia de la humanidad. Los eventos de magnitud sobre  $M_w=8,5$  son considerados los más destructivos, al producir efectos devastadores en la costa del país y tsunamis que generaron alturas de ola entre 3,0 m y 30 m, varios de los cuales afectaron el litoral de la región del Biobío. Las observaciones de alzamiento costero (e.g. Farías et al. 2010; Vargas et al. 2011; Quezada et al. 2010, 2012; Melnick et al. 2012) indican que el mayor alzamiento costero continental se alcanzó en la Península de Arauco, ubicada en el sur de la región del Biobío, y que dista a sólo 100 km de la fosa. Esto es de especial relevancia teniendo en consideración que la zona costera de esta zona no tan sólo concentra una alta densidad de población, sino que además exhibe una gran concentración de ecosistemas costeros, entre ellos las marismas.

En el caso particular de Chile, las metodologías para evaluar la salud de los ecosistemas de marisma son aún escasas y poco sistemáticas (CONAMA 2006), y el

conocimiento sobre su geomorfología se limita a descripciones generales de su área de emplazamiento. A pesar de que existen importantes aportes metodológicos de evaluación ecológica para humedales tipo marisma (e.g. Peña-Cortés et al. 2006), éstos constituyen estudios aislados que lamentablemente carecen de continuidad y replicación en otras zonas. En particular, esta falta de sistematización constituye una desventaja para la gestión sustentable de los recursos naturales, así como también para el manejo de las áreas costeras. Ello, teniendo en consideración que un gran porcentaje de la población se concentra actualmente en áreas costeras fuertemente urbanizadas, lugar donde también existe una gran cantidad de humedales en el país, y que además presenta un amplio registro histórico de megaterremotos (ver Lomnitz 1970; 2004). Existen relativamente pocos estudios orientados a evaluar las abruptas transformaciones originadas por fenómenos naturales de características catastróficas sobre los ecosistemas costeros. A raíz del pasado terremoto del 27 de Febrero de 2010, Valdovinos et al. (2010) y Marín et al. (2014) describen los efectos del terremoto en el humedal Tubul-Raqui desde el punto de vista biológico y social, mientras González et al. (2012) describen los efectos del tsunami generado por el terremoto del 2010 en el humedal del río Mataquito. Sin embargo, se destaca la ausencia de un enfoque holístico que permita integrar los distintos elementos del ecosistema y su paisaje. Sumado a ello se observa la ausencia de evaluación del estado del ecosistema respecto a sus características geomorfológicas clave, las cuales son responsables de mantener el flujo de nutrientes y energía, y por ende mantener algunas de las funciones ecosistémicas proporcionadas por los humedales costeros.

Tabla 1. Catastro de eventos sísmicos ocurridos en la cercanía del humedal Tubul-Raqui.

Eventos sísmicos con efecto en la costa de Chile centro-sur				
Año	Magnitud	Ciudad	Efectos	Descripción de efectos sobre el terreno
1570	8	Concepción <sup>(1)</sup>	Terremoto y tsunami	Grietas en el suelo, expelen agua subterránea negruzca y de olor sulfuroso, entrada reiterada de olas de gran fuerza y violencia <sup>(c)</sup>
1575	8 a 8.5	Valdivia	Tsunami en la costa sur de Chile hasta Concepción	Tsunami menor no causa daños <sup>(c)</sup>
1657	8	Concepción <sup>(1)</sup>	Terremoto y tsunami	Larga y destructiva ola de tsunami cubre la parte baja de la ciudad hasta la Plaza de armas <sup>(c)</sup>
1730	8.5 a 9	Valparaíso	Tsunami en Concepción	Concepción destruido por el tsunami <sup>(c)</sup>
1751	8.5	Concepción <sup>(1)</sup>	Terremoto y tsunami	3 largas olas destructivas. Tsunami deposita escombros en el litoral cercano, se registra alzamiento de las islas costa afuera <sup>(c)</sup>
1835	8 - 8.5	Concepción <sup>(1)</sup>	Terremoto y tsunami	3 olas destructivas, cráteres y fisuras en las áreas aluviales, grandes grietas abiertas en la base aluvial de los cerros, alzamiento costero en las islas y localidades cercanas *Alzamiento de 1,8 m registrado en Tubul. La mayor parte del alzamiento desapareció a través de una lenta recuperación dentro del periodo de réplicas <sup>(a)</sup>
1939	8.3	Chillán- Concepción	Terremoto	Levantamiento del batolito costero de 1,5 metros; sin embargo, no se registró alzamiento costero ni Tsunami <sup>(c)</sup>
1960	8.3 a 9.6	Valdivia	Tsunami en la costa sur de Chile hasta Concepción	Severos daños en Concepción, olas destructivas en la costa de Chile entre 36° - 44° S, alzamientos en la Península de Arauco: Caleta Yani 0,7 m; Lebu 1,2m; Punta Morhuilla 1,8 m y Arauco 0,4 m <sup>(b)</sup> ; alzamiento no registrado para Tubul, aunque se estiman unos 0,5 m
2010	8.8	Concepción <sup>(1)</sup>	Terremoto y tsunami	3 olas destructivas, la tercera fue la mayor y más dañina causando daños significativos en el borde sur del Golfo de Arauco devastando a Tubul y Llico con un run up mayor a 7 m, se registró alzamiento cosísmico de 1,4 m en Tubul <sup>(d)</sup>

\*Se detallan los eventos sísmicos que potencialmente pueden haber causado y han causado algún efecto sobre la Marisma Tubul-Raqui, utilizando como referencia: <sup>(a)</sup> Fitz-Roy (1939), <sup>(b)</sup> Veyl (1960), <sup>(c)</sup> Lomnitz (1970), <sup>(d)</sup> Quezada et al. (2010; 2012).

<sup>(1)</sup> Ocurridos en las cercanías de Tubul-Raqui.

Dado lo anteriormente expuesto, el objetivo principal de la presente investigación fue evaluar los cambios geomorfológicos y ambientales de los humedales costeros de la región del Biobío, originados por el alzamiento cosísmico asociado al terremoto del 27 de Febrero 2010, utilizando como caso de estudio a la marisma Tubul-Raqui. La investigación se realizó principalmente en esta marisma, debido a que fue la que registró un mayor alzamiento (1,4 m) de acuerdo a las mediciones y observaciones realizadas en terreno en diversas localidades del centro sur de Chile. Este trabajo en terreno ha dado como resultado la publicación del primer artículo y capítulo de la presente investigación denominada “Cambios en el relieve generados como consecuencia del terremoto  $M_w = 8,8$  del 27 de febrero de 2010 en el centro-sur de Chile”. Aquí se expusieron las primeras prospecciones del alzamiento costero en el humedal Tubul-Raqui y del área costera adyacente, así como también se entregaron los primeros atisbos para la comprensión del comportamiento de un ciclo sísmico completo y su posible influencia sobre los ecosistemas costeros. Ello entrega una completa visión de lo que significa estar localizado en una zona de alto dinamismo tectónico, y datos relevantes que se discutirán en los posteriores capítulos.

El segundo capítulo corresponde a la publicación titulada “Cambios geomorfológicos de la marisma Tubul-Raqui generados por el terremoto  $M_w = 8,8$  del 27 de febrero en la costa de Chile centro-sur”. Esta corresponde en primer lugar, a una caracterización geomorfológica de la marisma, respecto a sus zonas y unidades principales, para la posterior comprensión de los cambios. La caracterización fue secundada por la cuantificación y análisis de los cambios ocurridos en el paisaje de la marisma, como consecuencia del alzamiento cosísmico del 27/F, a través de la fotointerpretación de imágenes satelitales de alta resolución, utilizando las herramientas proporcionadas por los SIG. El análisis de la morfología fue un componente importante de registrar debido a que visualmente constituye el cambio físico más evidente.

Finalmente, y utilizando la información recopilada y generada precedentemente, la investigación culminó con el tercer capítulo denominado



“Una aproximación a la evaluación de la integridad ecológica de una marisma afectada por el megaterremoto del 2010 en Chile centro-sur: El caso de Tubul-Raqui”. En este capítulo se realiza la evaluación de los cambios ambientales originados por el alzamiento cosísmico, con la propuesta y aplicación de un índice multimétrico de integridad ecológica especialmente diseñado para incorporar las particularidades de la marisma Tubul-Raqui. El índice fue desarrollado como una herramienta capaz de sintetizar la variada información existente y generada por investigaciones previas en la marisma Tubul-Raqui, la cual fue complementada con información posible de generar a bajo costo y con un amplio registro temporal. Se considera que el uso de un índice de integridad ecológica, es de suma utilidad para la evaluación del estado de salud de un ecosistema afectado por una catástrofe natural, por permitir incorporar los diversos componentes del ecosistema, ya sean bióticos, abióticos y antrópicos, es decir, integrando las diferentes dimensiones del desastre. Los resultados obtenidos en esta investigación, indican que la marisma Tubul-Raqui fue el ecosistema costero más fuertemente afectado por el alzamiento cosísmico del 27/F, exhibiendo cambios morfológicos desde la parte alta hasta la desembocadura con el mismo nivel de intensidad. Estos cambios se expresan principalmente por una reducción en la superficie inundada de todas las unidades morfológicas, como resultado de una drástica disminución en la influencia del ciclo de las mareas. Así, un ecosistema saludable categorizado como “Excelente” se transformó rápidamente a la categoría de “Aceptable”, con bajas aunque no ausentes señales de recuperación, las que se concentran principalmente en la marisma del río Raqui. Este análisis corroboró los resultados obtenidos por otras investigaciones respecto a variables en específico, demostrando la alta fragilidad de este ecosistema costero. Sin embargo, también se demostró que efectivamente posee un grado de resiliencia que le permite al ecosistema continuar funcionando y proveyendo parte de sus funciones y servicios ecosistémicos. Se espera que los resultados obtenidos de esta investigación ayuden a visibilizar el enorme valor que una marisma o cualquier humedal costero aún conserva, a pesar de haber sido afectado por una perturbación natural de características tan catastróficas como lo es un megaterremoto. Así también, se espera contribuir significativamente a fortalecer las medidas de



gestión sobre este y otros humedales costeros, fomentando la evaluación sistemática de sus componentes ambientales.



## 1.1.- Hipótesis

H1: El alzamiento cosísmico del terremoto  $M_w=8,8$  del 27 de Febrero del 2010 afectó a los humedales costeros de la región del Biobío, siendo la marisma Tubul-Raqui el humedal que mayores cambios presenta como respuesta al alzamiento. Los cambios geomorfológicos son severos, y presentan muy bajas señales de recuperación durante el período inter-sísmico, a una corta escala temporal.

H2: La marisma Tubul-Raqui ha cambiado su extensión y morfología como respuesta al alzamiento cosísmico; sin embargo, esta aún mantiene propiedades que le permiten seguir proveyendo de hábitat y refugio para la vida silvestre, lo que le confiere una alta capacidad de resiliencia.

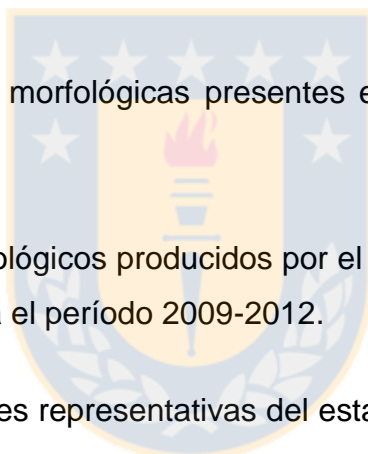


## **1.2.- Objetivo General**

Se propone como objetivo general de la presente investigación evaluar los cambios geomorfológicos y ambientales de los humedales costeros de la región del Biobío originados por el alzamiento cosísmico asociado al terremoto del 27 de Febrero 2010, utilizando como caso de estudio a la marisma Tubul-Raqui.

## **1.3.- Objetivos Específicos.**

1. Determinar el sollevamiento costero y efectos asociados al terremoto del 27/F del 2010 en la marisma Tubul-Raqui y otros ambientes similares en el litoral de la región del Biobío.
2. Caracterizar las unidades morfológicas presentes en la marisma Tubul-Raqui previas al terremoto.
3. Analizar los cambios morfológicos producidos por el alzamiento cosísmico en la marisma Tubul-Raqui para el período 2009-2012.
4. Identificar y validar variables representativas del estado de salud de la marisma Tubul-Raqui en el escenario previo y posterior al alzamiento cosísmico.



## **2.- RESULTADOS**

### **2.1.- Artículo científico publicado: Cambios en el relieve generados como consecuencia del terremoto Mw=8,8 del 27 de febrero de 2010 en el centro sur de Chile <sup>(1)</sup>**

#### **Relief changes generated by the 2010 Mw=8,8 February 27<sup>th</sup> earthquake in south-central Chile**

Jorge Quezada, Edilia Jaque, Alfonso Fernández, Arturo Belmonte,  
Carolina Martínez, Daniela Vásquez

#### **Resumen**

El 27 de febrero de 2010 ocurrió un terremoto Mw=8,8 en el centro-sur de Chile que provocó alzamientos y subsidencias co-sísmicas. El litoral de la región del Biobío tuvo alzamiento cosísmico que generó el ensanchamiento de playas, la emersión de la plataforma de abrasión marina, desecamiento de ríos y humedales y muerte de biota intermareal. El tsunami arrastró arenas litorales y vegetación hacia el interior. Las arenas del litoral que quedaron sueltas, fueron re-depositadas en 2010 y 2011 debido a las marejadas, ensanchando playas así como las barras litorales.

palabras claves: terremoto, alzamiento, subsidencia, cambio, relieve

#### **Abstract**

On February 27<sup>th</sup> 2010 a Mw=8,8 earthquake occurred in south-center Chile that caused coseismic uplift and subsidence. The littoral zone of the Biobío Region were uplifted causing widening of the beaches, the emersion of the marine abrasion platform, drying of rivers and wetlands and intertidal biota death. The coastal sands became with low compaction, were reworked in 2010 and 2011 due to the storm waves, widen beaches as well as the coastal bars.

keywords: earthquake, uplift, subsidence, change, relief

<sup>(1)</sup> Se presenta un extracto del artículo original, acotado a lo que ocurre específicamente en la región del Biobío. Para consultar artículo extendido, dirigirse a la sección Anexos, en Anexo 1.

Los terremotos de subducción se generan en el contacto interplaca donde una placa oceánica se hunde bajo una placa continental u otra oceánica provocando un alzamiento en la zona cercana a la fosa, el cual decrece en dirección al arco gradando a subsidencia. La zona de alzamiento se localiza principalmente en el piso oceánico trasladando grandes volúmenes de agua generando el tsunami. Durante el período intersísmico, ambas placas permanecen acopladas formando un arqueamiento o flexura antiforme de la placa continental que experimenta una compresión horizontal, donde la zona litoral se mueve hacia el arco y durante el período cosísmico, esta flexura se extiende hacia la fosa. Si el litoral se encuentra cerca de la fosa, experimenta un alzamiento cosísmico y si está más lejos, una subsidencia (Figura N° 1). La distancia de transición de alzamiento y subsidencia cosísmica depende de la inclinación del plano de subducción y de la profundidad de la zona de ruptura en la zona del contacto interplaca (Quezada, 2007, Farías *et al.*, 2010). De esta forma, si la ruptura es más superficial, la distancia normal a la fosa de transición entre alzamientos y subsidencias es menor. En Chile, existen terremotos de subducción debido a la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana donde las islas litorales como Quiriquina, Santa María, Mocha, Guafo y Guamblin así como las penínsulas de Mejillones, Tongoy, Coliumo, Hualpén y Arauco, han experimentado importantes alzamientos cosísmicos debido a su cercanía con la fosa. Estos cambios verticales del terreno generan cambios importantes en el relieve. Los cambios más documentados son para el terremoto de Concepción de 1835 donde Fitz-Roy (1839) y Darwin (1851) describen los alzamientos en el litoral de la Región del Biobío que se manifestaron principalmente mediante la emersión de la plataforma de abrasión marina y la muerte de la biota intermareal. Los terremotos del 21 y 22 de mayo de 1960 en el sur de Chile provocaron alzamientos métricos en la Península de Arauco e islas Mocha, Guamblin y Guafo provocando los mismos efectos que los de 1835. En el presente trabajo se indican los principales cambios del relieve generados como consecuencia del terremoto  $M_w=8,8$  del 27 de febrero de 2010 que afectó el centro-sur de Chile. En los años previos a la ocurrencia del terremoto (2007-2009), se recorrió el litoral de la Región del Biobío incluyendo las islas Santa María y Mocha con diferentes objetivos como la medición de la planicie holocena, y las

variaciones en el humedal de Tubul y desembocadura del río Itata. Luego del terremoto de 2010, se recorrió nuevamente el área entre marzo y mayo de 2010. Algunos lugares específicos se visitaron reiterativamente en 2010, 2011 y 2012. Las visitas sucesivas a diversas localidades antes y después del terremoto de 2010, permitieron determinar los cambios del relieve y procesos involucrados. Los principales efectos, se relacionan con las variaciones relativas del nivel del mar, ríos y lagos así como la sedimentación fluvial y litoral. En localidades no visitadas antes del terremoto de 2010, se utilizaron fotografías obtenidas de Panoramio o facilitadas por lugareños y se compararon imágenes satelitales antes y después del terremoto.

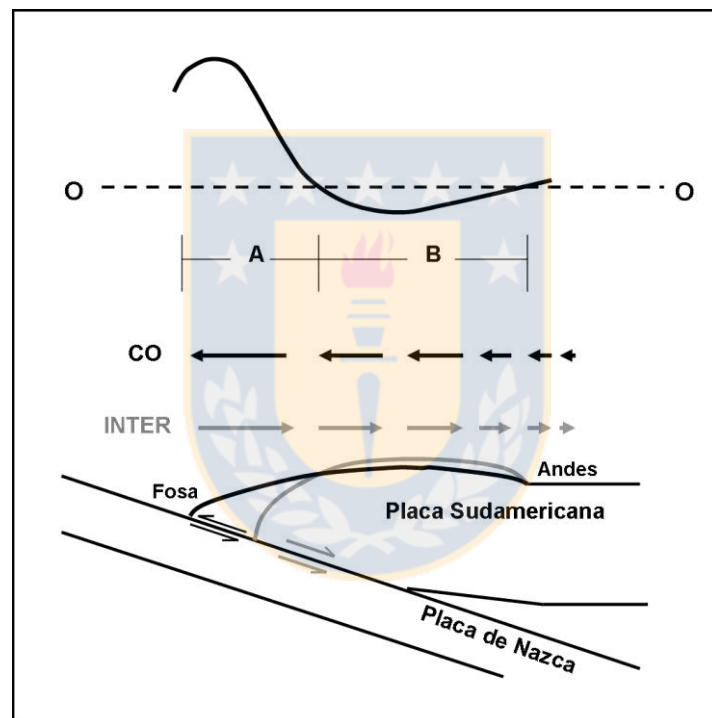


Figura 1. Patrón de movimientos cosísmicos verticales en un terremoto de subducción. La curva superior ilustra el alzamiento decreciente de fosa a arco gradando a subsidencia. Las flechas indican los movimientos horizontales CO: Cosísmico, INTER: Intersísmico, A: zona de alzamiento cosísmico, B: zona de subsidencia cosísmica. En el intersísmico, las placas están adheridas formándose una flexura antiformal en la Placa Sudamericana provocando un acortamiento aproximadamente normal al arco y fosa, y movimientos horizontales en dirección a la Cordillera de los Andes. Esta flexura se extiende hacia la fosa durante el terremoto generando el patrón de alzamientos verticales que se indica en la curva superior.

### **Características de la ruptura sísmica del terremoto del 27 de febrero de 2010**

El 27 de febrero de 2010 a las 3:34 hora local (6:34 UTC), se produjo un terremoto de magnitud momento  $M_w=8,8$  que afectó la zona centro-sur de

Chile. Según el NEIC (National Earthquake Information Center, dependiente del Servicio Geológico de Estados Unidos, USGS), el epicentro se localizó a los 36,12° S / 72,9°W y el hipocentro a 35 km de profundidad, mientras que el DGF (Servicio Sismológico de la Universidad de Chile dependiente del Departamento de Geofísica), localizó el epicentro los 36.29°S / 73.24°W y el hipocentro a 30 km de profundidad (Figura N° 2). El mecanismo focal determinado por el NEIC es inverso con plano de ruptura de orientación N14°E/19°E correspondiendo al plano de subducción. La longitud de ruptura es de 640 km entre 33°S-38,6°S (entre Valparaíso y el sur de la Isla Mocha), la cual es posible de determinar considerando la distribución de las réplicas y movimientos co-sísmicos verticales.

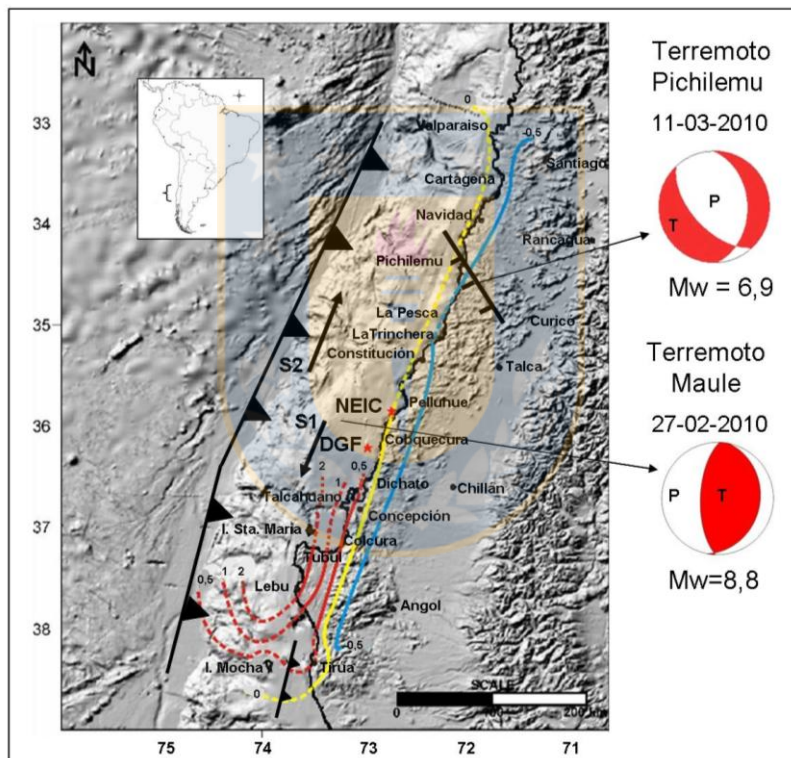


Figura 2. Área afectada por el terremoto del 27 de Febrero de 2010. La longitud de ruptura es equivalente al largo de las trazas de falla indicadas. Se indican las magnitudes en metros de los movimientos co-sísmicos verticales. Las flechas indican la propagación de las rupturas del 27/2/10: S1= Segmento sur, S2= Segmento norte. Las estrellas indican la localización del epicentro según el DGF (más cercano al real) y NEIC. Se indica la falla normal asociada al Terremoto de Pichilemu del 11 de Marzo de 2010 y la falla inversa (de atajo, splay fault) entre Tirúa y la Isla Mocha que habría acomodado la mayor parte del movimiento en el extremo sur del terremoto del 27 de febrero de 2010.

Debido al desplazamiento interplaca, ocurrieron movimientos horizontales en el borde occidental de la Placa Sudamericana en dirección al SW en sentido opuesto a la convergencia de placas que alcanzaron magnitudes de 3 m en

Concepción (36,8°S) según indicó el GPS del observatorio geodésico TIGO y ~ 5 m en Constitución (35,3°S) y en la parte NW de la Península de Arauco (37,2°S) (Vigny et al., 2011). Producto de la extensión co-sísmica, se generaron alzamientos de ~2m en la Península de Arauco e Isla Santa María (37°S-37,7°S), 1,4 m en Tubul (37,2°S) y ~0,5m en el litoral de la Región del Biobío entre 36,7°S-37°S (Figuras N° 3-9). Las réplicas en el área de ruptura se concentraron entre marzo y mayo de 2010 decayendo progresivamente.

## **Cambios en el relieve generados por los movimientos co-sísmicos verticales**

### **Alzamientos**

El litoral de la Región del Biobío presentó las principales evidencias de alzamiento cosísmico debido a que las penínsulas de Coliumo, Tumbes, Hualpén y Arauco, junto a las Islas Quiriquina, Mocha y Santa María, constituyen relieves emergidos cercanos a la fosa (Figuras N° 3-9). Las Península de Arauco e Isla Santa María (37° S-37,7°S) experimentaron alzamientos co-sísmicos que superaron los 2 m. En las campañas de terreno y sobrevuelos de esa zona antes del terremoto, se pudo constatar que el acantilado costero que se localiza en el borde occidental de la Isla Santa María y Península de Arauco, se encontraba activo (Figuras N° 3 y N° 5). El aumento del nivel del mar era notorio en estas localidades evidenciando la subsidencia inter-sísmica. Este efecto obligó a construir muros de protección en las localidades de Tubul, Llico, Punta Lavapié y la Costanera de Lebu (Figuras N° 7 y N° 8), ya que el mar estaba llegando hasta las viviendas y caminos más próximos al litoral, ocurriendo daños importantes durante las marejadas.

Luego del alzamiento cosísmico de 2010, se produjo una emersión de la plataforma de abrasión marina quedando fosilizado el acantilado costero y emergieron nuevos arrecifes en el borde occidental de la Península de Arauco e Isla Santa María, quedando expuesta la biota intermareal que pereció debido a la falta de agua (Figuras N° 3, N° 4 y N° 5). Destaca la microalga *Lithothamnium* que vive adherida a las rocas litorales suministrándole tonalidades rojizas, luego del terremoto, quedó de color blanco. Picorocos (*Balanus*), Choritos (*Perumytilus*), Estrellas de mar (*Stichaster striatus*), Huiros



(*Macrocystis pyrifera*) y Luche (*Ulva lactuca*) entre otras especies, quedaron desecados (Figuras N° 3, N° 4 y N° 5). En zonas con abundante Luche desecado, el olor es fétido debido a su descomposición. El espesor de la biota intermareal muerta sirve para determinar el alzamiento cosísmico. Las mediciones deben realizarse en zonas protegidas del oleaje ya que el impacto directo produce el efecto salpicadura (splash) y la amplitud vertical de la biota intermareal muerta es mayor. Las playas de esta zona fueron ensanchadas destacando aquellas situadas en Morhuilla, Lebu e Isla Santa María (Figura N° 5).



Figura 3. Punta Lavapié: Izquierda 2008, derecha 2010, se distingue la biota intermareal muerta en la roca de color claro. La emergencia de la plataforma de abrasión marina y formación de una nueva playa es evidente. Fuente: propia.



Figura 4. Emersión de la plataforma de abrasión marina en la base del acantilado costero del borde occidental de la Península de Arauco. Se distingue el *Lithothamnium* blanqueado y los bloques (boulders) de arenisca de la fotografía derecha, fueron depositados por el tsunami.



Figura 5. Isla Santa María. Arriba Caleta Hernández, abajo Puerto Sur. La emersión de la plataforma de abrasión marina y ensanchamiento de la playa es evidente. Fuente: foto superior izquierda: Carabineros Isla Santa María. Fotos restantes propias.



Figura 6. El desecamiento del Río Lebu impide la navegación. Fuente: propia.



Figura 7. Llico (37,19°S/73,56°W). Izquierda 2007, centro 17-3-2010, derecha: 6-5-2011. Antes del terremoto la subsidencia cosísmica obliga la construcción de un enrocado, luego del terremoto el alzamiento cosísmico de 2 m provoca un retroceso del litoral y el tsunami genera muchos escombros (centro) y posteriormente las marejadas de 2010 depositan un gran volumen de arenas formando una extensa playa. Fuente: izquierda, Panoramio, restantes, propias.

En Tubul, se produjo un retroceso de 200 m del mar debido a su baja pendiente quedando una playa de arena fina negra quedando fosilizado el rompeolas (Figura N° 8). En Llico y Punta Lavapié sucedió un proceso similar con nuevas playas de arenas amarillentas (Figuras N° 3 y N° 7). El alzamiento cosísmico produjo un nuevo desecamiento del río Lebu, similar al de 1960, quedando imposibilitada la navegación y las embarcaciones quedaron de costado (Figura N° 6). El humedal de Tubul-Raqui experimentó también un desecamiento importante quedando expuesto el lecho limoso y con un impacto importante en la flora y fauna (Figura N° 9).

Al norte y sur de la Península de Arauco, el alzamiento litoral en la Región del Biobío fue de 40-60 cm debido a su mayor lejanía con la fosa. El alzamiento fue notorio en el borde occidental de las bahías de Coliumo y Concepción. Debido a su baja pendiente y la presencia de los humedales de Coliumo y Rocuant, el retroceso horizontal del mar fue notorio y los humedales quedaron parcialmente desecados. Un efecto similar ocurrió en el humedal de Lengua en la Bahía de San Vicente que quedó con una playa un poco más ancha. Más al sur en la desembocadura del Río Biobío, también existe un pequeño humedal quedando la laguna litoral con menos agua y las totoras (*Typha*) secas. Las playas del borde oriental del Golfo de Arauco como Escuadrón, Coronel, Playa Blanca, Lota, Colcura, Chivilingo y Laraquete (36,8°S-37,1°S) quedaron ensanchadas y en las rocas litorales también pereció la biota intermareal. Al sur de la Península de Arauco, ocurrieron procesos similares, la playa de Quidico (38,2°S) fue ensanchada quedando expuesta la biota intermareal y el muro rompeolas seco y en Tirúa (38,3°S), se produjo un desecamiento del río homónimo que dificultó la navegación. Los lagos Lanalhue y Lleulleu (37,9°S-38,2°S) evidenciaron también los cambios verticales generándose una traslación hacia el E de las aguas que produjo un descenso del nivel del agua en la ribera occidental y un aumento en la oriental donde algunos muelles quedaron sumergidos (Figura N° 10). Ello se debe al alzamiento cosísmico decreciente de W a E que provoca un basculamiento del terreno hacia el E (Figura N° 1) en un proceso análogo al inclinar un vaso con agua.





Figura 8. Evolución del litoral de Tubul. Antes del terremoto la subsidencia litoral obligó a la construcción de un enrocado, luego del terremoto en 2010 el mar se retira 200m, luego se forma una laguna costera y posteriormente las marejadas depositaron más arenas de playa. Fuente: propia.

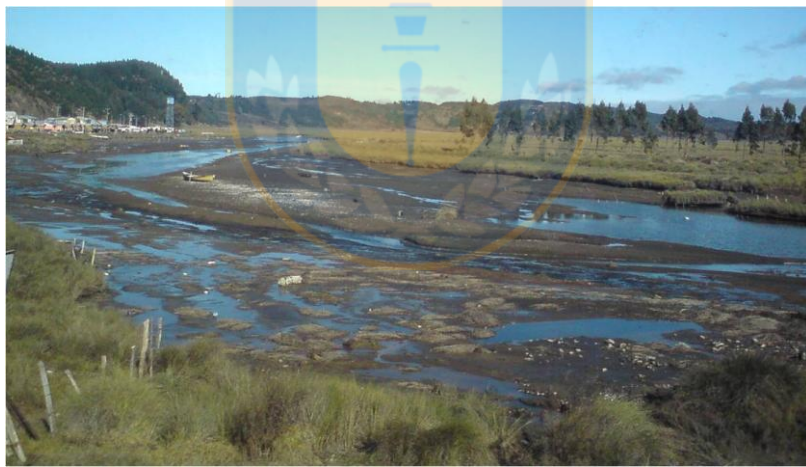


Figura 9. Desecamiento del humedal de Tubul-Raqui. Fuente: propia.



Figura 10. Inundación de un muelle y vegetación ribereña en la ribera oriental del lago Lleulleu (38,1°S/73,27°W) debido a la traslación del agua por el alzamiento cosísmico decreciente de W a E que provoca un basculamiento al E del terreno. Fuente: Propia.

### **Cambios en el relieve en los meses posteriores al terremoto**

Luego de la ocurrencia del terremoto del 27 de febrero de 2010, ocurrieron cambios importantes del relieve generados principalmente por las réplicas y el oleaje marino, especialmente durante marejadas. Durante el período de mayor frecuencia de réplicas que ocurrió entre marzo y abril de 2010, se observó una recuperación de parte del alzamiento cosísmico ~ 20-30 cm de subsidencia post-sísmica en la Isla Santa María y borde occidental de la Península de Arauco que se evidencia por un pequeño avance del mar y la inundación de la parte inferior de la zona de *Lithothamnium* blanqueado en la base de las rocas litorales. Desde mayo de 2010, se observó una estabilidad en el nivel relativo del mar. Las mayores réplicas del terremoto del 27 de febrero de 2010 tuvieron magnitud  $M_w=7,1$ .

Cambios importantes en el relieve litoral ocurrieron luego de las marejadas entre junio y septiembre de 2010. Las marejadas de junio de 2010 depositaron 1,5 m de arenas (silíceas amarillentas) en Llico (Golfo de Arauco, 37,19°S), formando una nueva playa de 20 m de ancho que casi cubrieron el muelle que había quedado seco debido al alzamiento cosísmico de 2010 (Figura N° 7). En Tubul, se había formado una laguna costera en la playa emergida y luego de las marejadas de 2010 y 2011, se depositaron más sedimentos en esta playa y la morfología de esa laguna litoral evoluciona constantemente (Figura N° 8).

## **La influencia de los terremotos de subducción en el relieve litoral**

Los cambios del relieve generados durante el terremoto del 27 de febrero de 2010 son similares a los que ocurren en otros terremotos de subducción en el circumpacífico. El litoral de la Región del Biobío tuvo un alzamiento co-sísmico debido a la existencia de penínsulas e islas litorales que acercan la línea del litoral hacia la fosa, zona donde se localiza el levantamiento cosísmico principal (Figura N° 1). Las zonas más cercanas a la fosa como la isla Santa María y península de Arauco tuvieron el mayor alzamiento co-sísmico: ~2 m. Este alzamiento fue decreciente de fosa a arco con magnitudes de ~0,5 m en las penínsulas de Hualpén, Tumbes e isla Quiriquina y borde oriental del golfo de Arauco. En litorales más alejados de la fosa, como el borde oriental de las bahías de Concepción y Coliumo, el alzamiento fue de 0-0,20 m y más al norte donde no hay penínsulas ni islas, el alzamiento co-sísmico fue nulo. Ello evidencia un patrón de alzamiento co-sísmico decreciente de fosa a arco, característico de los terremotos de subducción. Los cambios del relieve generados por el alzamiento co-sísmico litoral como emersión de la plataforma de abrasión marina, ensanchamiento de playas y desecamiento de humedales, tuvieron un impacto importante en la biota intermareal y las actividades antrópicas. Una de las principales actividades económicas de la península de Arauco e isla Santa María, es el cultivo de moluscos y algas, y el descenso relativo del nivel del mar afectó cultivos y su extracción. Además, la navegación fue dificultada por la disminución de la profundidad de los ríos Tirúa, Tubul y Lebu (Figuras N° 6, 8 y 9), y en este puerto así como en Llico (Figura N° 7), los muelles quedaron inutilizados debiendo permanecer las embarcaciones mar afuera. Como efectos positivos, destaca el ensanchamiento de las playas de Lebu y Llico con potencial turístico (Figura N° 7). Debido a que los terremotos son parte del ciclo sísmico de subducción (período co-sísmico), la mayor parte de los alzamientos/ subsidencias se van a recuperar durante el período inter-sísmico. Esto ocurrió luego de los alzamientos co-sísmicos de 1835 y 1960 que tuvieron efectos similares en el relieve litoral de la Región del Biobío (Fitz-Roy, 1839; Darwin 1851 y Veyl, 1960), los cuales desaparecieron en las décadas sucesivas debido a la subsidencia inter-sísmica. La subsidencia inter-sísmica no contrarrestará todo el alzamiento cosísmico, lo cual se evidencia en las

líneas de paleocostas que se observan en la planicie litoral holocena del litoral del golfo de Arauco, incluyendo a la isla Santa María, y más al sur de la península de Arauco, en la isla Mocha. La mayor cota de la planicie litoral holocena emergida en la isla Santa María: 8,3 m medida antes del terremoto, comparadas con los 4 m que tenía el litoral continental frente a ella en Escuadrón y Coronel, se corresponden con los alzamientos co-sísmicos de 2010 que tuvieron ambas localidades: 2 y 0,5 m, respectivamente. Ello es consistente con el patrón de alzamiento cosísmico decreciente de fosa a arco (desde W a E, Figura N° 1), evidenciando que el alzamiento y ensanchamiento de la planicie litoral holocena, es el resultado del alzamiento remanente durante sucesivos ciclos sísmicos de subducción (alzamiento co-sísmico menos subsidencia inter-sísmica). Debe tenerse presente que las playas ensanchadas por el alzamiento co-sísmico, se reducirán en las décadas sucesivas, y la extensión de los muelles que quedaron secos, como el de Llico (Figura N° 7) que se está construyendo, puede significar que quede sumergido en los años siguientes.

La remoción por el *tsunami* de las arenas litorales y su posterior retrabajo por las marejadas, contribuyó también al ensanchamiento de las playas de Tubul y Llico (Figuras N° 7 y N° 8), que ya habían crecido durante el alzamiento cosísmico de 2010.

## **Conclusión**

El terremoto  $M_w = 8,8$  del 27 de febrero de 2010, provocó alzamientos y subsidencias co-sísmicas que modificaron el relieve litoral. Los alzamientos fueron evidentes en el litoral de la Región del Biobío por tener su litoral más cercano a la fosa, debido a la existencia de penínsulas e islas litorales, así como por el hecho que la ruptura del segmento sur del terremoto fue más profunda que la del segmento norte, de tal modo que la distancia de transición entre alzamiento y subsidencia co-sísmica está más alejada de la fosa. Estos alzamientos provocaron la emersión de la plataforma de abrasión marina, ensanchamiento de playas, muerte de biota intermareal, desecamientos de ríos y humedales costeros, que afectaron negativamente las actividades económicas como la extracción de algas y moluscos, y la navegación. La

mayor parte de estos movimientos verticales (alzamientos/subsidencias), se recuperarán durante el período inter-sísmico y el relieve será similar al que existía antes del terremoto, y el mayor efecto a largo plazo, es el ensanchamiento de la planicie litoral holocena de la Región del Biobío, que se debe al alzamiento remanente en ciclos sísmicos de subducción sucesivos (alzamientos–subsidiencias). La elevada cota de la planicie litoral holocena de la isla Mocha (34 m.s.n.m. antes del terremoto, sumado a los 0,75 m posterior al terremoto de 2010 y réplica Mw = 7,1 de 2011), es mucho mayor a la que existe en la península de Arauco, isla Santa María y otras zonas del litoral de Chile, y crecerá más, debido al efecto adicional de la falla inversa cortical de Mocha-Tirúa. El *tsunami* removió las arenas litorales y sub-litorales, en algunas zonas fueron depositadas tierra adentro, constituyendo depósitos de *tsunami*; en otras zonas las arenas sueltas fueron re-depositadas durante las marejadas posteriores, reconstruyendo o ensanchando playas. De esta forma, los terremotos de subducción generan cambios dinámicos en el relieve litoral.

### Referencias bibliográficas

COMTE, D.& BECK, S. The 2010 Chile earthquake- variations in the rupture mode. En: Viña del Mar y Valdivia, *American Geophysical Union Chapman Conference on Giant Earthquakes and their tsunamis*, 16-24 Mayo 2010.

DARWIN, C. *Geological observations of South America, geological observations on coral reefs, volcanic islands and on South America—Being the voyage of the Beagle, under the Command of Captain Fitzroy, R.N., during the years 1832 to 1836*. Londres: Smith and Elder, 1851.

DELOUIS, B.; NOCQUET, J.& VALLEE, M. Slip distribution of the February 27, 2010 Mw = 8.8 Maule Earthquake, central Chile, from static and high rate GPS, InSAR, and broadband teleseismic data. *Geophysical Research. Letters* 2010, N°37, L17305, doi:10.1029/2010GL043899.

FARÍAS, M.; VARGAS, G.; TASSARA, A.; CARRETIER, S.; BAIZE, S.; MELNICK, D.; BATAILLE, K. Land-Level Changes Produced by the Mw 8.8 2010 Chilean Earthquake. *Science*, 2010, N° 329, p. 916.

FARÍAS, M.; COMTE, D.; ROECKER, S.; CARRIZO, D. & PARDO, M. Crustal extensional faulting triggered by the 2010 Chilean earthquake: The Pichilemu Seismic Sequence. *Tectonics*, 2011, N° 30, TC6010, 11 PP., 2011 doi:10.1029/2011TC002888.

FITZ-ROY, R. Proceedings of the second expedition, 1831–1836, under the command of Captain Robert FitzRoy. En: Colburn, H (ed.). *Narrative of the*



*surveying voyages of His Majesty's ships Adventure and Beagle between the years 1826 and 1836, describing their examination of the southern shores of South America, and the Beagle's circumnavigation of the globe.* Londres: 1839, p. 402-425.

LAY, T. A Chilean surprise. *Nature*, 2011, N°471, p.174-175.

LOMNITZ, C.,. Major earthquakes of Chile: A historical survey 1535-1960. *Seismological Research Letters*, 2004, vol.75 N°3, p. 368-378.

LORITO, S.; ROMANO, F.; ATZORI, S.; TONG, X.; AVALLONE, A.; MCCLOSKEY, J.; COCCO, M.; BOSCHI, E. & PIATANESI, A. Limited overlap between the seismic gap and coseismic slip of the great 2010 Chile earthquake. *Nature Geoscience*, 2011, N° 4, p. 173-176.

MADARIAGA, R.; VIGNY, C.; RUIZ, S.; BUFORN, E.; PRO, C.; LANCIERI, M.; RUEGG, J-C.; FUENZALIDA, A.; PEYRAT, S.; CAMPOS, J. & SOCQUET, A. The Maule Mw 8.8 earthquake: Modelling using 1 Hz cGPS and seismic data. En: Viña del Mar y Valdivia, *American Geophysical Union Chapman Conference on Giant Earthquakes and their tsunamis*, 16-24 Mayo 2010.

MORENO, M.; ROSENAU, M. & ONCKEN, O. Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature*, 2010, N°467, p. 198-202.

PLAFKER, G. & SAVAGE, J. Mechanism of the Chilean Earthquakes of May 21 and 22, 1960. *Geological Society of America Bulletin*, 1970, N° 81, p. 1001-1030.

POLLITZ, F.; BROOKS, B.; TONG, X.; BEVIS, M.; FOSTER, J.; BÜRGMANN, R.; SMALLEY, R.; VIGNY, C.; SOCQUET, A.; RUEGG, J.; CAMPOS, J.; BARRIENTOS, S.; PARRA, H.; BAEZ, J.; CIMBARO, S. & BLANCO, M. Coseismic slip distribution of the February 27, 2010 Mw 8.8 Maule, Chile earthquake. *Geophysical Research Letters*, 2011, N° 38, L09309, doi:10.1029/2011GL047065, 2011.

QUEZADA, J. Interacción entre procesos tectónicos y procesos erosivos en la configuración del relieve litoral del Norte de Chile. Tesis de grado de Doctor en Ciencias, mención Geología. Antofagasta: Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Chile, 2007.

RUEGG, J-C.; RUDLOFF, A.; VIGNY, C.; MADARIAGA, R.; DE CHABALIER, J.; CAMPOS, J.; KAUSEL, E.; BARRIENTOS, S. & DIMITROV, D. Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepción in Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, N° 175, p. 78–85.

RYDER, I.; RIETBROCK, A.; KELSON, K.; BÜRGMANN., FLOYD, M.; SOCQUET, A., VIGNY, C. & CARRIZO, D. Large extensional aftershocks in the

continental forearc triggered by the 2010 Maule earthquake, Chile. *Geophysical Journal International*, 2012, vol. 188 N°3, p. 879-890.

SLADEN, A.; MARK, S., BEVIS, M., BROOKS, B., FOSTER, J., SMALLEY, R., LIN, Y., FIELDING, E., ORTEGA, F., OWEN, S., HELMBERGER, D., WEI, S., PARRA, H., BAEZ, J. A coseismic distributed slip model for the 2010 Mw 8.8 Maule (Chile) earthquake. En: Viña del Mar y Valdivia, *American Geophysical Union Chapman Conference on Giant Earthquakes and their tsunamis*, 16-24 Mayo 2010.

TONG, X.; SANDWELL, D.; LUTTRELL, K.; BROOKS, B.; BEVIS, M.; SHIMADA, M.; FOSTER, J.; SMALLEY, R.; PARRA, H.; BÁEZ, J.; BLANCO M.; KENDRICK, M. & GENRICH, J. The 2010 Maule, Chile earthquake: downdip rupture limit revealed by space geodesy. *Geophysical Research Letters*, 2010, N° 37, L24311, doi:10.1029/2010GL045805, 2010.

VARGAS, G.; FARÍAS, M.; CARRETIER, S.; TASSARA, A.; BAIZE, S. & MELNICK, D. Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw 8.8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology*, 2011, vol. 38 N°1, p. 219-238.

VEYL, C. Los fenómenos volcánicos y sísmicos de fines de mayo de 1960 en el sur de Chile. Concepción: Universidad de Concepción, Instituto Central de Química, Departamento de Geología y Mineralogía, 1960.

VIGNY, C.; SOCQUET A.; PEYRAT, S.; RUEGG, JC.; MÉTOIS, M.; MADARIAGA, R.; MORVAN, S.; LANCIERI, M.; LACASSIN, R.; CAMPOS, J.; CARRIZO, D.; BEJAR-PIZARRO, M.; BARRIENTOS, S.; ARMIJO, R.; ARANDA, C.; VALDERAS-BERMEJO, MC.; ORTEGA, I.; BONDOUX, F.; BAIZE, S.; LYON-CAEN, H.; PAVEZ, A.; VILOTTE, JP.; BEVIS, M.; BROOKS, B.; SMALLEY, R.; PARRA, H.; BAEZ, JC.; BLANCO, M.; CIMBARO, S. & KENDRICK, E. The 2010 Mw 8.8 Maule Mega-Thrust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS. *Science*, 2011, N°332, p. 152-165.

**2.2.- Artículo científico sometido a publicación en el *Journal of Coastal Research*: Respuestas Morfológicas de los Humedales Costeros frente a un Alzamiento Co-sísmico en Chile Centro-Sur**

**Morphological Responses of Coastal Wetlands to Major Earthquake Uplifts in South-central Chile**

Daniela Vásquez C.<sup>†\*</sup>, Claudio Valdovinos Z.<sup>†</sup>, Natalia Sandoval N.<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Departamento de Sistemas Acuáticos, Facultad de Ciencias Ambientales y Centro EULA, Universidad de Concepción, Chile

[\\*danielavasquez@udec.cl](mailto:danielavasquez@udec.cl)

LHR: Vásquez, Valdovinos y Sandoval  
RRH: Coastal Morphological Changes

**RESUMEN**

El terremoto de subducción Mw=8.8 del 27 de Febrero del 2010 que afectó a la costa de Chile centro-sur (37°) originó un alzamiento cosísmico de ~ 1.4 m en el área del humedal costero Tubul-Raqui, con abruptos cambios morfológicos. En orden de determinar la magnitud de los cambios, las unidades morfológicas de la marisma fueron identificadas y cuantificadas antes y después de la perturbación tectónica. Se generaron imágenes satelitales rectificadas de siete sitios de estudio, para tres años de análisis (2009-2011-2012), utilizando imágenes Google Earth y procesadas en ArcGIS. Los resultados muestran una reducción total de 31.7% del área inundada de las unidades morfológicas, y la aparición de 1.25 km<sup>2</sup> de áreas desecadas; pozas salinas y canales de marea menores fueron severamente afectados, con más de 90% de pérdida. Por otro lado, se observó la leve recuperación del área inundada de los ríos Tubul y Raqui (12%) y canales mayores (8,5%) en el período 2011-2012. La marisma compuesta por *Spartina densiflora* sp. fue la unidad que menos varió en el período analizado (14,6%), demostrando una gran resiliencia frente a grandes perturbaciones. Los cambios y su posterior evolución pueden ser explicados a grandes rasgos por el accionar de dos importantes procesos ocurridos durante

el ciclo sísmico: alzamiento co-sísmico y subsidencia inter-sísmica. Seguir monitoreando el estado de recuperación de la marisma y de otros ambientes similares podría ayudar a aclarar cuál es el verdadero rol que ejerce el ciclo sísmico en la dinámica de los ecosistemas costeros, así como su incidencia en el proceso de recuperación.

Palabras Clave: Terremotos, Marisma, Resiliencia.

## **ABSTRACT**

The subduction earthquake  $M_w = 8.8$  on February 27<sup>th</sup>, 2010 which affected Chile's south-central coast ( $37^\circ\text{S}$ ) produced a co-seismic uplift of  $\sim 1.4$  m in coastal Tubul-Raqui wetland area, with abrupt morphological changes. In order to determine the magnitude of the changes, salt marsh morphological features were identified and quantified by mapping the changing extent of the coverage of morphological features before and after tectonic the disturbance. Rectified satellite images of seven study sites were created for three years (2009-2011-2012), using Google Earth images and processed in ArcGIS. The results indicate a total decline of 31.7% in the area of the morphological features and the emergence of  $1.25 \text{ km}^2$  of dried area; salt pans and tidal creeks were severely affected, with more than 90% loss. In contrast, there was a slight recovery of the Tubul and Raqui main river channel (12%) and the tidal channels (8.5%) between 2011 and 2012, mainly in the area near the river mouth. The salt marsh (*Spartina densiflora* sp.) showed slight variation after the co-seismic uplift (14.6%), demonstrating high resilience in the face of high-impact natural disturbances. The changes and later evolution may be explained mostly by the action of the seismic cycle in subduction zones. Continuing to monitor state of the recovery of the salt marsh and other similar environments may help to understand the true role that the seismic cycle plays in the dynamics of coastal ecosystems, as well as its incidence in the recovery process.

**ADICIONAL INDEX WORDS:** earthquakes, salt marsh, resilience.

## INTRODUCCION

En América del Sur, las marismas han sido descritas principalmente en la costa atlántica sobre Argentina, Uruguay y el sur de Brasil (Chapman, 1960; West, 1977; Costa and Davy, 1992; Cagnoni and Faggi, 1993; Isacch, 2001 en Isacch *et al.*, 2006); sin embargo, existe realmente escasa información acerca de las marismas de la costa pacífica sur, y más aún sobre sus características geomorfológicas. Entre los ecosistemas costeros, las marismas proveen un alto número de valiosos beneficios a los humanos, incluyendo materiales de forrajeo y comida, protección costera, control de la erosión, purificación del agua, mantenimiento de las pesquerías, secuestro de carbono, y turismo, recreación, educación, e investigación (Barbier *et al.*, 2011).

La costa oeste de América del sur, es un margen tectónicamente activo, influenciado por la dinámica impuesta por el ciclo sísmico de grandes terremotos de subducción, que históricamente han afectado esta zona durante los últimos siglos (Kelleher, 1972; Askew *et al.*, 1985; Silgado, 1985). Grandes terremotos causando trágicas pérdidas, devastación y destrucción económica durante los últimos años, enfatizan la alta vulnerabilidad de las costas fuertemente pobladas y ecológicamente críticas del mundo (Jaramillo *et al.*, 2012). Debido a ello, la neotectónica es un factor importante a considerar en la formación y evolución geomorfológica de las marismas, las que deben ser capaces de resistir y reajustarse a los cambios verticales originados por los terremotos, expresados en subsidencia o alzamiento cosísmico en función de la cercanía a la fosa (Quezada *et al.*, 2012). Los efectos causados por un alzamiento cosísmico sobre un ecosistema costero, son un aspecto aún menos conocido en la literatura, principalmente referidos a los humedales costeros del Delta del Río Cooper en Alaska (e.g. Thilenius, 1990, 1995; Boggs and Shephard, 1999; Christensen *et al.*, 2000; Van Duzor, 2011).

Recientemente, el 27 de Febrero del año 2010 (27/F), un terremoto de  $M_w=8.8$  afectó fuertemente al litoral de Chile centro-sur en la costa pacífica, originando un alzamiento de  $\sim 1.4$  m en Tubul (Farías *et al.*, 2010; Quezada *et al.*, 2010), lugar de emplazamiento de la marisma Tubul-Raqui. El alzamiento generó cambios en el nivel de base de los ríos principales, alterando el balance hidrológico, secando la mayoría de los canales, reduciendo las interacciones

del agua marina y fluvial, además de generar fuertes modificaciones en el componente acuático y sobre las comunidades de macroinvertebrados (Valdovinos *et al.*, 2010, 2011; Quezada *et al.*, 2012; Marín *et al.*, 2014; Martínez *et al.*, 2015). En este estudio, se tomó ventaja de la oportunidad única de documentar las respuestas morfológicas de un importante y extenso ecosistema costero, la marisma Tubul-Raqui, ante un gran terremoto.

Frente a perturbaciones naturales o antrópicas, el análisis geomorfológico puede ser aplicado para comprender la extensión y magnitud de los cambios, debido a que las formas del relieve son extremadamente sensibles a los movimientos tectónicos. Una completa comprensión de la morfología es requerida para proporcionar una base para la protección y restauración de marismas amenazadas frente al aumento del nivel del mar y otras amenazas (e.g. Zeff, 1999; Williams *et al.*, 2012; Fagherazzi *et al.*, 2004; Wallace *et al.*, 2005 en Goudie, 2013), en especial frente a efectos tan poco conocidos como los gatillados por un alzamiento cosísmico. Esto permitirá una mejor comprensión de rol que ejerce el ciclo cosísmico en los humedales costeros, en vías de su integración en el manejo de la zona costera, y para desarrollar herramientas integrativas de evaluación junto a datos previos publicados en el área (e.g. Sandoval, 2010; Valdovinos *et al.*, 2010; Marín *et al.*, 2014).

Dados estos antecedentes, el objetivo del presente estudio será analizar los cambios geomorfológicos de la marisma como respuesta al alzamiento cosísmico del 27/F, donde las siguientes preguntas de investigación han sido abordadas: 1. ¿Cómo se caracteriza geomorfológicamente la marisma Tubul-Raqui? 2. ¿Cuánto cambió la morfología de la marisma tras el alzamiento cosísmico y cómo ha sido la evolución de estos cambios? 3. ¿Existió una respuesta homogénea o diferenciada al alzamiento cosísmico al interior de la marisma?.

### **Área de estudio.**

La marisma Tubul-Raqui se localiza en el centro-sur de Chile ( $37^{\circ}14' S$ ;  $73^{\circ}26' O$ ), sobre la costa del Océano Pacífico sur (Figura 1). Según la clasificación genética de Guilcher (1957), corresponde a una marisma tipo estuario, y se



asocia al sistema estuarial originado en la desembocadura del sistema hidrográfico interconectado de los ríos Tubul y Raqui.

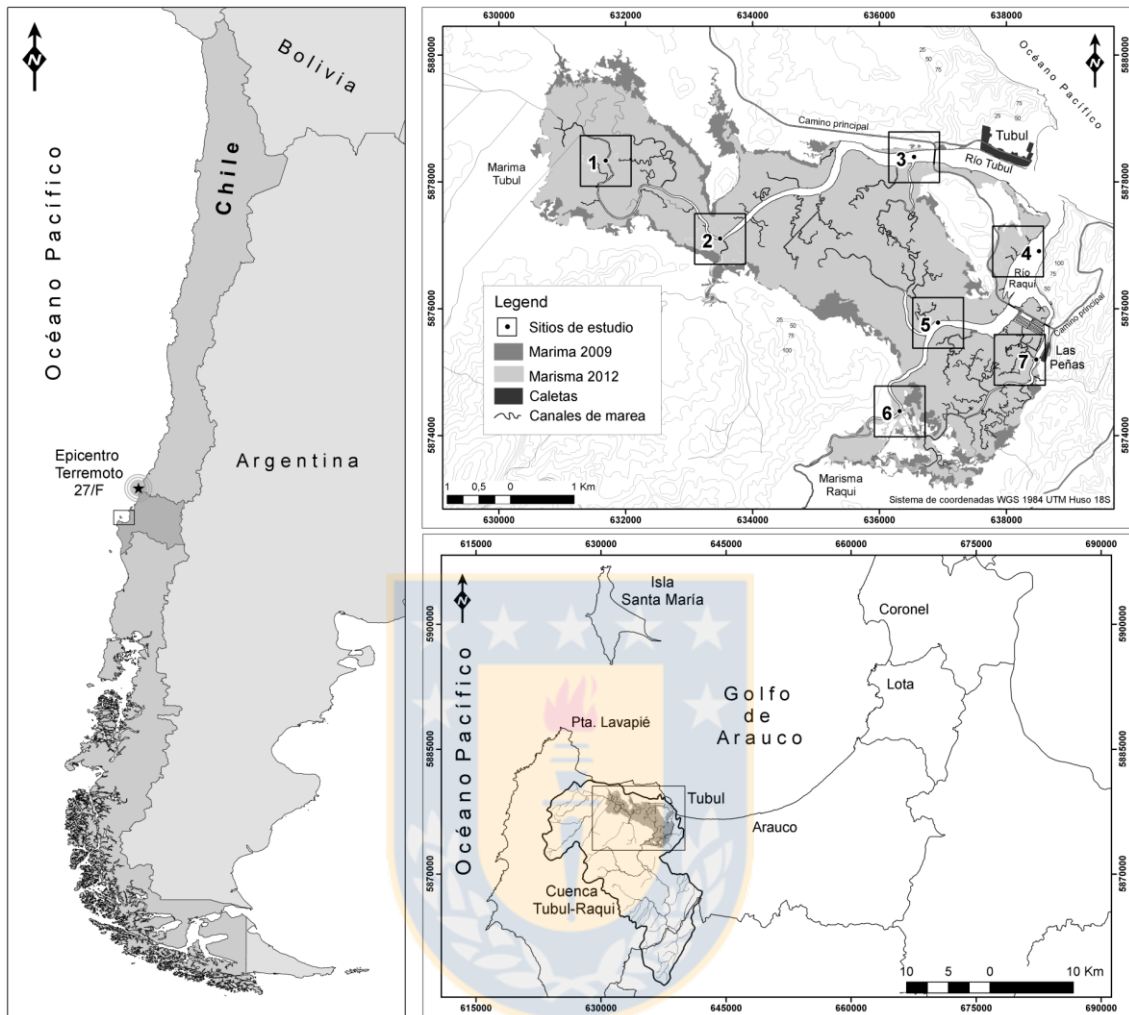


Figura 1. Área de estudio y diseño de muestreo. La figura de la izquierda muestra la ubicación de la marisma Tubul-Raqui en el contexto de la costa pacífica de América del Sur, mientras que en la derecha abajo el contexto regional, donde se delimita la cuenca Tubul-Raqui. La figura de la derecha arriba indica la ubicación de los sitios de estudio en ambas marismas: 1,2,3 (marisma del río Tubul) y 4,5,6 y 7 (marisma del río Raqui y estero Las Peñas). El área de extensión de la marisma en el año 2009 y 2012 fue obtenida del análisis de imágenes Google earth.

La zona estuarial es de poca profundidad (2-4 m) (Daniel, 2013), presentando un régimen micromareal, con aportes estacionales de agua dulce y con una marcada influencia marina en el río Tubul durante la época estival, como consecuencia de la disminución de las precipitaciones y la evapotranspiración (Constabel, 1993). Ambas cuencas costeras son de régimen pluvial y se originan al norte de la Península de Arauco, donde los ríos y esteros discurren en un trazado paralelo a las líneas de fractura y basculamiento orientadas hacia el NNE (Pineda, 1986). Esta unidad forma la mayor anomalía a lo largo

del margen Pacífico de Sur América, en términos de morfología de la línea costera y distancia de la costa a la fosa submarina (Melnick *et al.*, 2009). El área se caracteriza por una plataforma continental de baja pendiente y gran ancho, con una tendencia tectónica al sollevamiento (Araya-Vergara, 1985), registrando una alta tasa de alzamiento en el Cuaternario (Melnick *et al.*, 2009). Los registros sobre la tectónica cosísmica de la zona, indican que han ocurrido numerosos terremotos de subducción, destacándose por su magnitud e intensidad los de 1835, 1960 y el más reciente en el 2010 (Fitz-Roy, 1839; Veyl, 1960; Farías *et al.*, 2010). Durante los eventos de 1835 y 2010, la marisma tuvo un alzamiento cosísmico de ~1.8 y ~1.4 m respectivamente (Fitz-Roy, 1839; Farías *et al.*, 2010; Quezada *et al.*, 2012). Durante el período inter-sísmico se registra una tendencia a la subsidencia como parte de la dinámica del ciclo cosísmico (Kaizuka *et al.*, 1973; Quezada *et al.*, 2012; Wesson *et al.*, 2015).

La marisma cuenta con una superficie de 2.238 hectáreas aproximadamente, y es dominada por la halófita *Spartina densiflora*, especie de mayor importancia, tanto por su cobertura y biomasa (Valdovinos *et al.*, 2010). El área ha sido modelada por movimientos epirogenéticos registrados desde el Cretácico Superior al Plio-Pleistoceno en la Península de Arauco, configurando un complejo sedimentario cíclico con una alternancia de secuencias sedimentarias marinas y continentales (Pineda, 1986). La llanura donde hoy se aloja la marisma, corresponde a las tierras bajas del Holoceno de origen marino y aluvial (Kaizuka *et al.*, 1973), debiendo su génesis al paulatino relleno sedimentario durante los episodios de transgresiones y regresiones marinas que han afectado al litoral del Golfo de Arauco durante el Holoceno, como consecuencia del glacioeustatismo. El inicio de la estabilización de la costa, comenzó después de la transgresión flandrense, cuando el mar alcanzó su nivel más alto entre 8.000 a 6.400 AP, a menudo referido como el óptimo climático (Martínez, 1968; Galli, 1967). Utilizando el contenido fosilífero, Seguel y Campana (1970) reconocen una secuencia de cuatro transgresiones marinas holocénicas en el área de Tubul-Raqui, siendo la última regresión fechada para el  $810 \pm 100$  AP, lo cual es concordante con la regresión que tiene lugar entre el 1.000 y el 600 AP de acuerdo con los antecedentes flandrianos. La evolución de esta llanura se traduce finalmente en el establecimiento de la marisma



Tubul-Raqui (Seguel and Campana, 1970), cuya morfología actual se debe a la colonización de la *Spartina densiflora* originaria de la costa este de América del sur, y registrada por primera vez en Chile entre 1822 a 1825 por Brongniart (1829) en Concepción (Bortolus, 2006). Esta especie seguramente ocupó un nicho que estaba desocupado o desplazo especies de halófitos nativos poco agresivos (Ramírez *et al.*, 1988; 2002) y se caracteriza por ser un organismo bioingeniero (Bortolus, 2006) favoreciendo el desarrollo de tortuosos canales dentríticos.

## MÉTODOS

En total, se determinaron 7 sitios de estudio dentro de la marisma Tubul-Raqui. Los sitios fueron concordantes con las estaciones descritas en la literatura (Stuardo *et al.*, 1993; Valdovinos *et al.*, 2010), uniformemente distribuidas a lo largo del sistema estuarial Tubul-Raqui. En la marisma del río Tubul se localizaron los sitios 1, 2 y 3 desde la zona alta del *schorre* hasta la zona baja cercana a la desembocadura. En la marisma del río Raqui se localizaron los sitios 4, 5 y 6, ordenadas desde la desembocadura hasta la zona alta del *schorre*, en sentido inverso a las estaciones situadas en el río Tubul. El sitio 7 se localizó en el estero Las Peñas, afluente del río Raqui, y también localizado en la marisma del río Raqui. La ubicación de los sitios de estudio identificados para el análisis se muestra en la Figura 1.

### Área de Muestreo

Para identificar y cartografiar las unidades morfológicas de la marisma un cuadrante uniforme de muestreo fue creado para cada sitio de estudio. Cada cuadrante fue de 800 x 800 metros creado con la herramienta de ArcGIS 'Buffer/FeatureEnvelopetoPolygon'. Se utilizó este tamaño por ser un área suficientemente amplia y a la vez manejable para identificar y analizar las unidades morfológicas, facilitando el cálculo de áreas absolutas y porcentuales. El centro de origen de cada cuadrante coincide con la ubicación de las estaciones descritas en literatura. Se realizó la excepción con los cuadrantes para las estaciones 4 y 7, debido a que en este sector el río se encuentra

encajonado por terrazas marinas en la ribera Este. En este caso el centro de origen de ambos cuadrantes fue movido hacia la izquierda para abarcar una mayor área cubierta por marisma y sus elementos morfológicos.

## **Fuentes de Datos**

Información morfológica detallada de los siete sitios de estudio fue obtenida de Google Earth (Figura 2). Digital Globes (e.g. Google Earth) se ha convertido crecientemente en una importante herramienta en la investigación de las Ciencias de la Tierra (Tooth, 2006; Friess *et al.*, 2011; Yu and Gong, 2012 in Goudie, 2013) y ha sido exitosamente utilizada para investigar las características morfológicas clave de las marismas en el Reino Unido (Goudie, 2013). El archivo vectorial del cuadrante de muestreo fue convertido y exportado desde ArcGIS para ser visualizado en Google Earth, y utilizado posteriormente para alinear la vista antes de exportar las imágenes para cada sitio y en los 3 años seleccionados. Una imagen de 4800 x 3128 píxeles de resolución fue exportada con un factor de zoom de 1.24 km para cada sitio de estudio. La resolución de las imágenes (píxeles) fue comprobada a través de ArcGIS para asegurar que fuesen comparables entre sí.

Se utilizó el registro histórico de imágenes de alta resolución disponible en la plataforma Google Earth. Los años escogidos para el análisis fueron principalmente determinados por la disponibilidad de imágenes en Google Earth, especialmente para los años post-terremoto. Se seleccionaron 3 años de análisis, de acuerdo al registro temporal de imágenes satelitales disponibles, y en concordancia a los años de muestreo también descritos en la literatura:

1. 18 de , Octubre, 2009 – Pre-alzamiento, Primavera (Condición de referencia)
2. 19 de Agosto, 2011 – Post- alzamiento, Invierno
3. 24 de Enero, 2012 – Post-alzamiento, Verano

Se determinó que la imagen del 18 de octubre del 2009, representa la morfología típica de la marisma Tubul-Raqui hasta antes del terremoto, lo cual fue verificado a partir de registros históricos correspondientes a fotografías

aéreas pancromáticas de escala 1:10.000 del año 1990, facilitadas por el Laboratorio de Geomática del Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile.

### **Caracterización de las zonas y unidades morfológicas de la marisma.**

La geomorfología de la marisma fue caracterizada de acuerdo a la clasificación propuesta por Paskoff (1985), identificándose dos zonas morfológicas denominadas marisma baja o *slikke* y marisma media o *schorre*. Para delimitar la extensión del *schorre*, se utilizó el criterio florístico propuesto por Vásquez (2013), utilizando la presencia de la flora dominante *Spartina densiflora*. Dentro de estas zonas se identificaron dos unidades morfológicas: pozas salinas y canales de mareas, concordantes a lo descrito en la literatura sobre ambientes de marisma (e.g. Yapp *et al.*, 1917; Chapman, 1960; Pestrong, 1965; Pethick, 1974; Paskoff, 1985; Mitsch and Gosselink, 1993, 2000; Perillo 1996; Packham and Willis 1997; Goudie 2013). Para efectos del presente estudio, los canales de marea fueron divididos en canales de marea mayores y menores, diferenciados principalmente por su extensión y ancho de acuerdo a lo propuesto por Perillo (2009). Sin embargo, debido a la falta de datos batimétricos previos al terremoto, se utilizó únicamente el ancho. Canales mayores registran un ancho que puede oscilar entre 10 a 50 m, mientras canales menores registran un ancho que varía entre 0.5 a 10 m. El canal principal de ambos sistemas fluviales, Tubul y Raqui, más el estero Las Peñas, un afluente del río Raqui, también fue considerado como una unidad de análisis, debido a que es la arteria principal a través de la cual ingresa agua al resto del sistema, exhibiendo cambios considerables tras el alzamiento cosísmico del 27/F. La apariencia de las unidades morfológicas sobre las imágenes satelitales puede observarse en la Figura 2.A.

### **Procesamiento y análisis de imágenes satelitales.**

Las imágenes satelitales de los 3 años seleccionados fueron georreferenciadas y rectificadas en ArcGIS en base al Dátum WGS 84 Huso 18, utilizando puntos de control previamente geoposicionados en terreno mediante GPS TRIMBLE doble frecuencia, determinados previamente en las Cartas

topográficas escala 1:50.000 “Arauco” y “Curanilahue”, 2da edición 2007 y 2006, elaboradas por el Instituto Geográfico Militar de Chile. El error medio cuadrático (RMSE) fue calculado para minimizar errores en el proceso de georreferenciación, de acuerdo al criterio de Araujo et al. (2009), con valores inferiores a 1 m. El reconocimiento de unidades morfológicas fue definido mediante interpretación de las imágenes satelitales Google Earth (Figura 2.A), y fue apoyado con observaciones in situ. A excepción de las zonas morfológicas, cuyos límites fueron definidos por la presencia de la especie *Spartina densiflora*, el criterio para dibujar las unidades morfológicas fue la presencia o ausencia de agua. Por esta razón, después del año 2009 muchas unidades pasaron a denominarse zonas secas como consecuencia del desecamiento post-terremoto, lo que añadió una nueva unidad morfológica al análisis (Figura 2.D). Las unidades fueron vectorizadas mediante polígono, a excepción de los canales de marea secundarios, que fueron representados mediante líneas por ser unidades menores y muy finas (Figura 2.B). Para cuantificar la superficie de las unidades, se utilizó la herramienta de geoprocésamiento *Calculate Geometry* de ArcGIS. Para el cálculo de superficie de los canales secundarios, se realizó su conversión a formato *Raster* y luego a formato vector/polígono. Se cuantificó la pérdida y ganancia de superficie en valores porcentuales para el período 2009-2012 utilizando como área de referencia el área buffer de 800 m<sup>2</sup>. Un mapa de comparación fue elaborado en orden de analizar los cambios experimentados por la marisma como efecto del alzamiento cosísmico del 27/F.

### **Análisis estadísticos.**

Las estaciones fueron comparadas y agrupadas, empleando análisis estadísticos multivariados de ordenación, para definir áreas con similares condiciones utilizando el programa PRIMER 6.0 (Clarke y Gorley 2006). Para ello se aplicó un análisis de clasificación CLUSTER y un análisis de ordenación MDS, sobre una matriz de distancia euclidiana utilizando los datos de cambios morfológicos para el período estudiado. Estos datos fueron previamente transformados a raíz cuadrada y luego, normalizados.

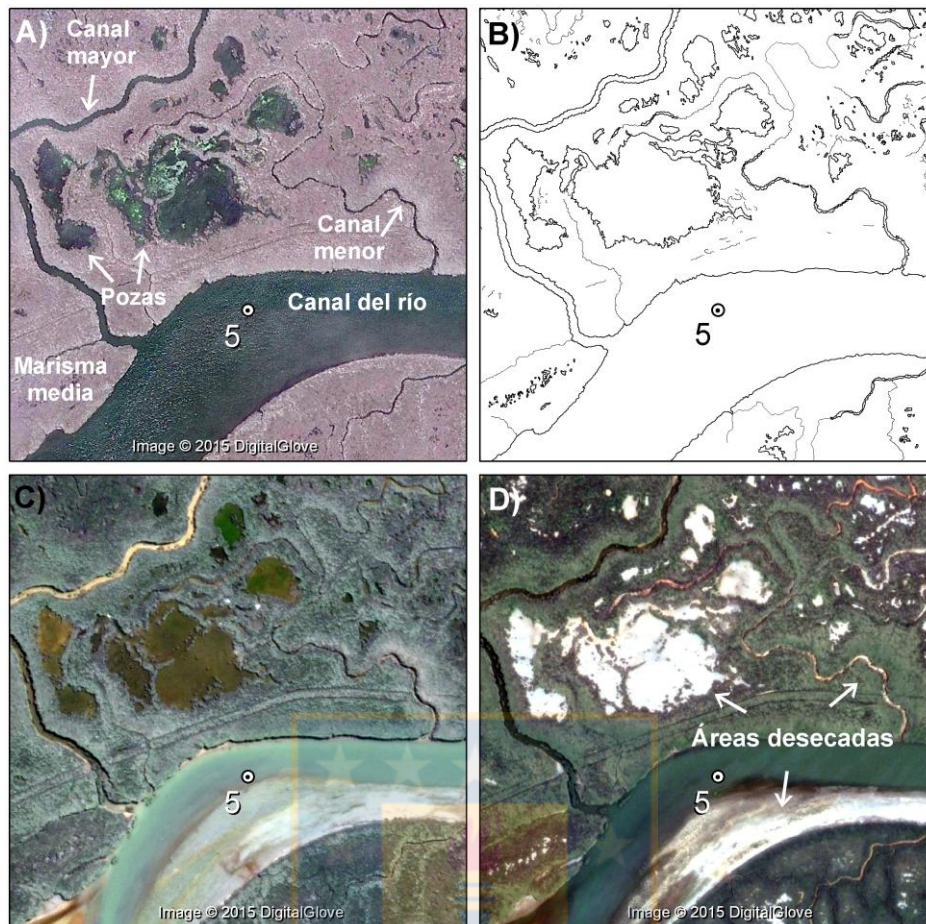


Figura 2. A) Apariencia de las unidades morfológicas el 18 de octubre, 2009, condición de referencia. B) Imagen del 2009 vectorizada mediante interpretación en ArcGIS. C) Apariencia de las unidades morfológicas el 19 de Agosto, 2011, se observa el aporte de las lluvias invernales. D) Apariencia de las unidades morfológicas el 24 de Enero, 2012, se observa el avanzado estado de desecamiento de las pozas salinas y los canales menores inactivos, mientras canales principales recuperan el nivel de agua. Cortesía de Google Earth ©Google Earth 2015.

## RESULTADOS

La interpretación de las imágenes satelitales del año 2009, en comparación con fotogramas aéreos a color del año 1990, dio como resultado la identificación de los siguientes elementos morfológicos según la terminología propuesta por Paskoff (1985). Las zonas y unidades morfológicas de la marisma se representan en la Figura 3, con el fin de facilitar su visualización y comprensión.

- a. **Marisma baja o Slikke.** De reducida extensión, registrando un área de  $0.0724 \text{ km}^2$ . Se observa en el sector central de la desembocadura,



estando protegida por dos flechas móviles. Se compone de materiales finos (Constabel, 1993), de escasas pendientes, quedando casi completamente sumergida durante la marea alta. Se encuentra desprovista de vegetación emergente, aunque es posible observar algas verdes en marea baja. Es surcada por algunos canales dendríticos. Se separa de la marisma media o *schorre* por la acumulación de una franja discontinua de depósitos de arena, también desprovistos de vegetación, y que no son inundados durante cada marea.

- b. **Marisma media o Schorre.** De gran extensión, registrando un área de 22.38 km<sup>2</sup>, colonizada por la asociación *Sacocornio-Spartinentum densiflorae* descrita por San Martín *et al.*, (1992). La marisma media del río Tubul tiene un notable desarrollo, pudiendo internarse hasta 10 km río arriba, principalmente por la morfología plana y amplia de esta zona, junto a una mayor influencia salina (Stuardo *et al.*, 1992). En el extremo occidental se observa una reducida comunidad de humedal dulceacuícola de 1.7 km<sup>2</sup>. La marisma del río Raquí se interna 6 km río arriba, siendo limitada por una mayor influencia fluvial (Constabel, 1993), y por la presencia de terrazas de abrasión marina que delimitan la marisma por el Este. La marisma como unidad, cumple el rol de matriz en el paisaje, pues en su interior se configura el resto de las unidades morfológicas identificadas.
- c. **Canal principal de los ríos Tubul, Raquí y estero Las Peñas.** Este corresponde al flujo de agua más prominente que conecta directamente al sistema con el océano al llegar a la desembocadura, poseyendo una dinámica particular. Es de ancho variable aunque generalmente sobre los 10 m de ancho, lo que supera siempre en extensión a los canales que da origen a su alrededor. Exhiben una morfología sinuosa en la parte alta; sin embargo, a medida que el río se acerca a la desembocadura y la pendiente disminuye, aumenta del ancho del canal y disminuye la sinuosidad. Los sitios cercanos a la desembocadura poseen un ancho sobre los 300 m, mientras los situados río arriba no superan los 40 m, por lo que exhiben diferencias en el porcentaje de área en cada sitio (Tabla 1). Hasta antes del terremoto, los canales eran utilizados intensivamente como área de cultivo de alga *Gracillaria chilensis*, actividad que otorgaba el mayor sustento

económico para la población local, además de facilitar la conexión fluvial entre las caletas cercanas Tubul y Las Peñas.

- d. **Canales de marea.** Corresponden a valles o hendiduras a través de los cuales el agua fluye principalmente por el accionar de las mareas, formando una compleja e intrincada red dendrítica. Estos constituyen la conexión entre el río Tubul y el río Raqui antes de llegar a la desembocadura. Los resultados obtenidos indican que la mayoría de los sitios de estudio registran una densidad representativa de estas unidades, en especial el sitio 5 (Tabla 1). Se contabilizan al menos 100 canales de marea por sitio, a excepción del sitio 6, que registra únicamente 70. Los canales mayores cercanos a la desembocadura, pueden llegar a recorrer 0.5 km sin presentar un desarrollo y sinuosidad tan elevados; sin embargo, río arriba estos canales pueden llegar a medir en longitud más de 3 km. Se observan algunas alteraciones de origen antrópico a la morfología de los canales, donde es posible observar su rectificación para regadío en el caso de la parte alta de la marisma cercano al sitio 1, y la creación de piscinas artificiales para uso acuícola (cultivo de pelillo) en la parte media, específicamente en el sitio 7.
- e. **Pozas salinas.** Estas depresiones o cubetas presentes en la marisma media, corresponden en su gran mayoría a pozas secundarias, según la tipología propuesta por Yapp *et al.*, (1977), debido a que exhiben una forma alargada, sinuosa y en varios casos se observan como ramificaciones de los canales de marea. Se observan en todos los sitios de estudios (Figuras 4 y 5 primera columna), están desprovistas de vegetación emergente, y registran un tamaño que varía desde los 0.0001 a 28.543 m<sup>2</sup>; sin embargo, más de un 90% posee una superficie inferior a 100 m<sup>2</sup> y únicamente el 1.5% supera los 1.000 m<sup>2</sup>. El tamaño y porcentaje de estas unidades aumenta a medida que la marisma se interna en el continente (Tabla 1). A simple vista es difícil discernir cuál es el proceso que ha dado origen a estas unidades en Tubul-Raqui, lo que requiere necesariamente de un estudio específico que aborde esta temática.

Tabla 1. Área total de las unidades morfológicas en el año 2009. Las áreas se indican en valor porcentual y por sitio de estudio, utilizando como referencia el cuadrante de 800 m<sup>2</sup>.

Study site	River	% Salt marsh schorre	% River channel	% Tidal channels	% Tidal creeks	% Salt pans
1	Tubul	79.4	3.2	1.7	1.3	16.6
2	Tubul	72.5	8.1	2.5	0.9	11.7
3	Tubul	34.2	24.4	3.3	0.6	1.5
4	Raqui	54.5	35.9	1.6	1.0	1.4
5	Raqui	75.9	12.4	5.0	2.7	6.9
6	Raqui	45.1	5.2	0.4	0.8	7.1
7	Las Peñas	67.7	8.5	3.6	1.5	12.7

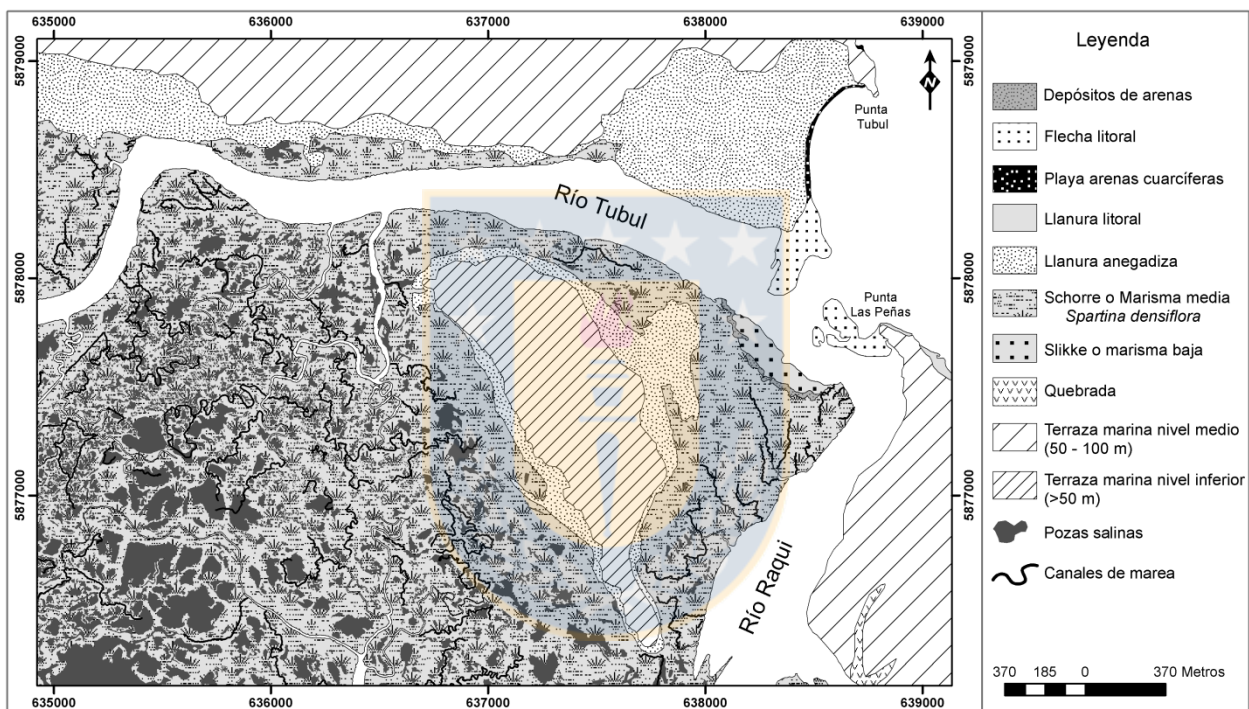


Figura 3. Carta geomorfológica de la zona baja de la marisma Tubul-Raqui. Se indican los diferentes elementos morfológicos identificados según la clasificación de Paskoff (1985) en la condición pre-alzamiento cosísmico.

### Cambios geomorfológicos período 2009-2011

El terremoto del 27 de Febrero del 2010 produjo un alzamiento cosísmico estimado entre 1 a 2 m (Farías *et al.*, 2010; Melnick *et al.*, 2012), generando el desecamiento de 23.8% del área inundada en las unidades morfológicas en el período 2009-2011. Los cambios de superficie registrados, para cada unidad morfológica y para cada año analizado, son detallados en la Tabla 2 y visualizados en las Figuras 4 y 5.



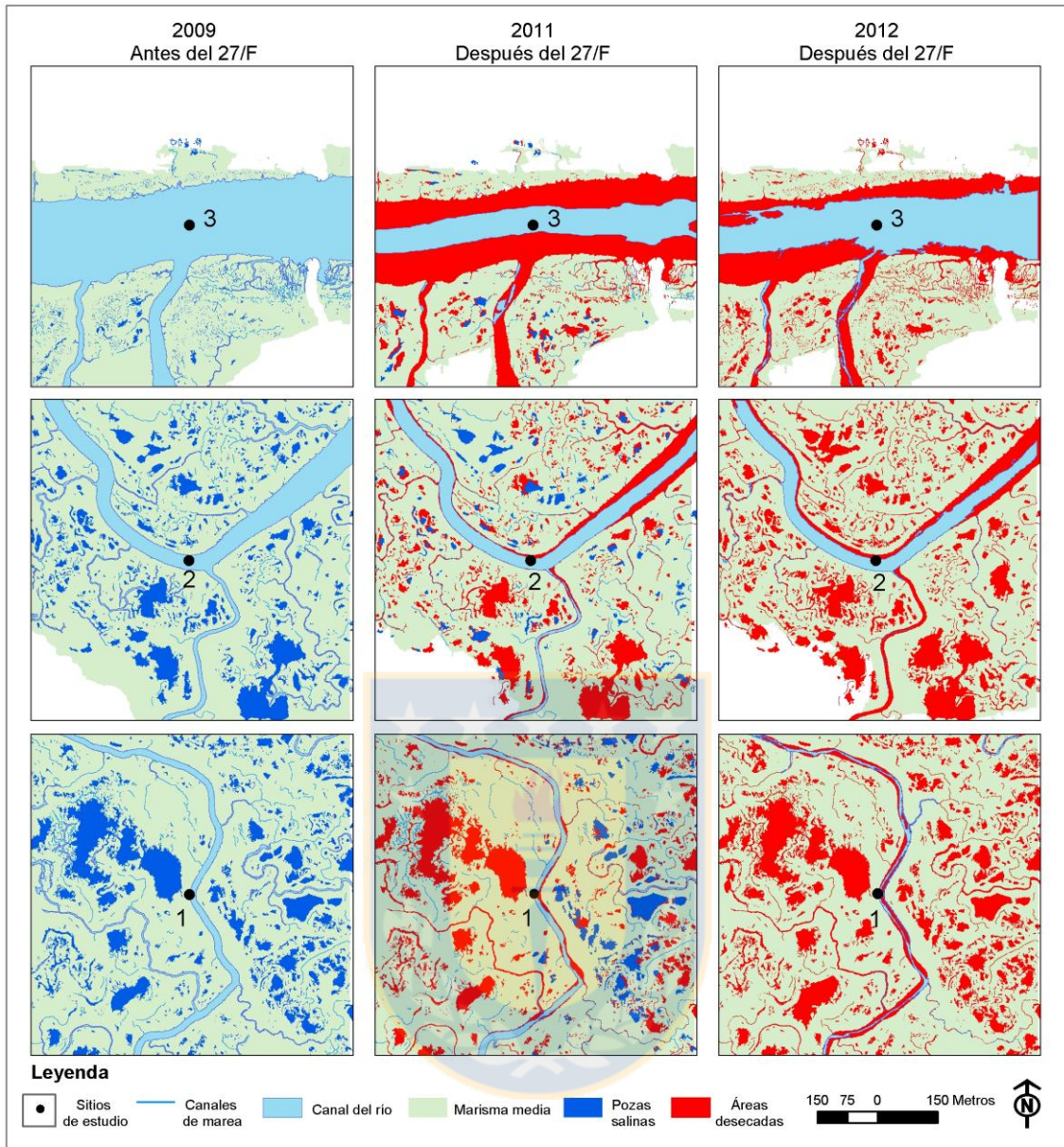


Figura 4. Cambios geomorfológicos, río Tubul. Cuadrantes de los sitios 1, 2 y 3 ordenados en orden de lejanía a la desembocadura del río Tubul. Los cuerpos de agua están representados en azul y las áreas desecadas en rojo. El área del espartal se representa en verde claro en el fondo, formando la matriz donde se inserta el resto de las unidades morfológicas. La primera columna muestra lo observado en las imágenes satelitales Google Earth en el año 2009, antes del alzamiento cosísmico y en el período de primavera. La segunda columna muestra lo observado 18 meses después del terremoto, en el período de invierno. La tercera columna muestra lo observado en el año 2012, 23 meses ocurrido el terremoto, en la época de verano. Se muestra un evidente desecamiento progresivo de canales y pozas salinas producto del alzamiento, mientras el cauce principal de los ríos tiene tendencia a la recuperación.



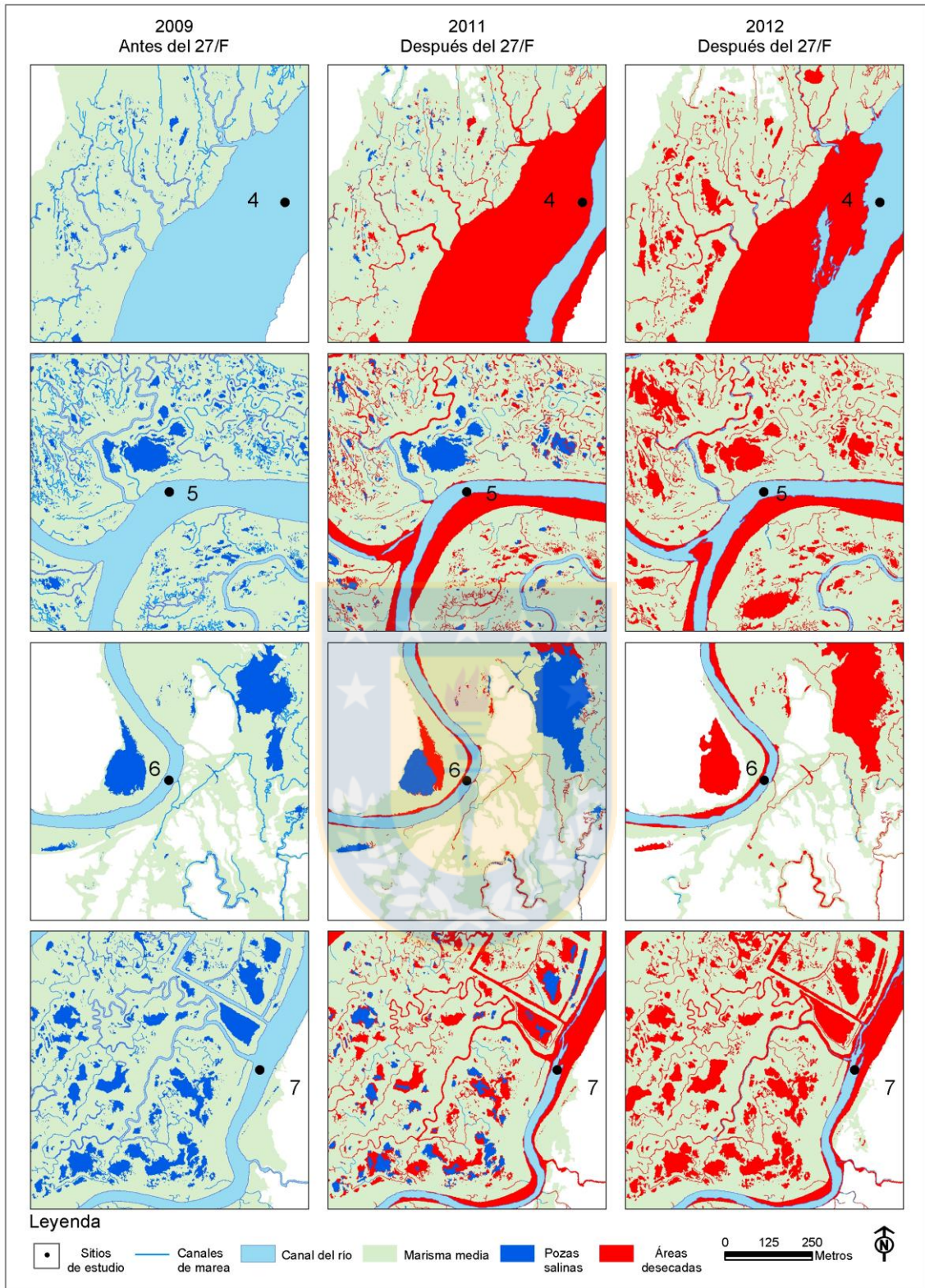


Figura 5. Cambios geomorfológicos, río Raquí y estero Las Peñas. Cuadrantes de los sitios 4, 5, 6 y 7 ordenadas en orden de lejanía a la desembocadura del río Raquí. Los cuerpos de agua están representados en azul y las áreas desecadas en rojo. El área del espartal se representa en verde claro en el fondo, formando la matriz donde se inserta el resto de las unidades morfológicas. El esquema sigue el mismo orden de representación que la figura anterior.

Para el período 2009-2011, se registró la pérdida del 65.4% del área inundada del canal principal de los ríos (Tabla 2), mientras el estero Las Peñas por sí solo presentó una declinación del 63% (Figura 7). El sitio 4 fue el más crítico de todos los sitios analizados, con un 85.4% de disminución, observándose la abrupta desecación del canal del río y canales de marea como consecuencia del alzamiento cosísmico y el consecuente cambio en el nivel de base del río (Figura 6.A, 4.B).

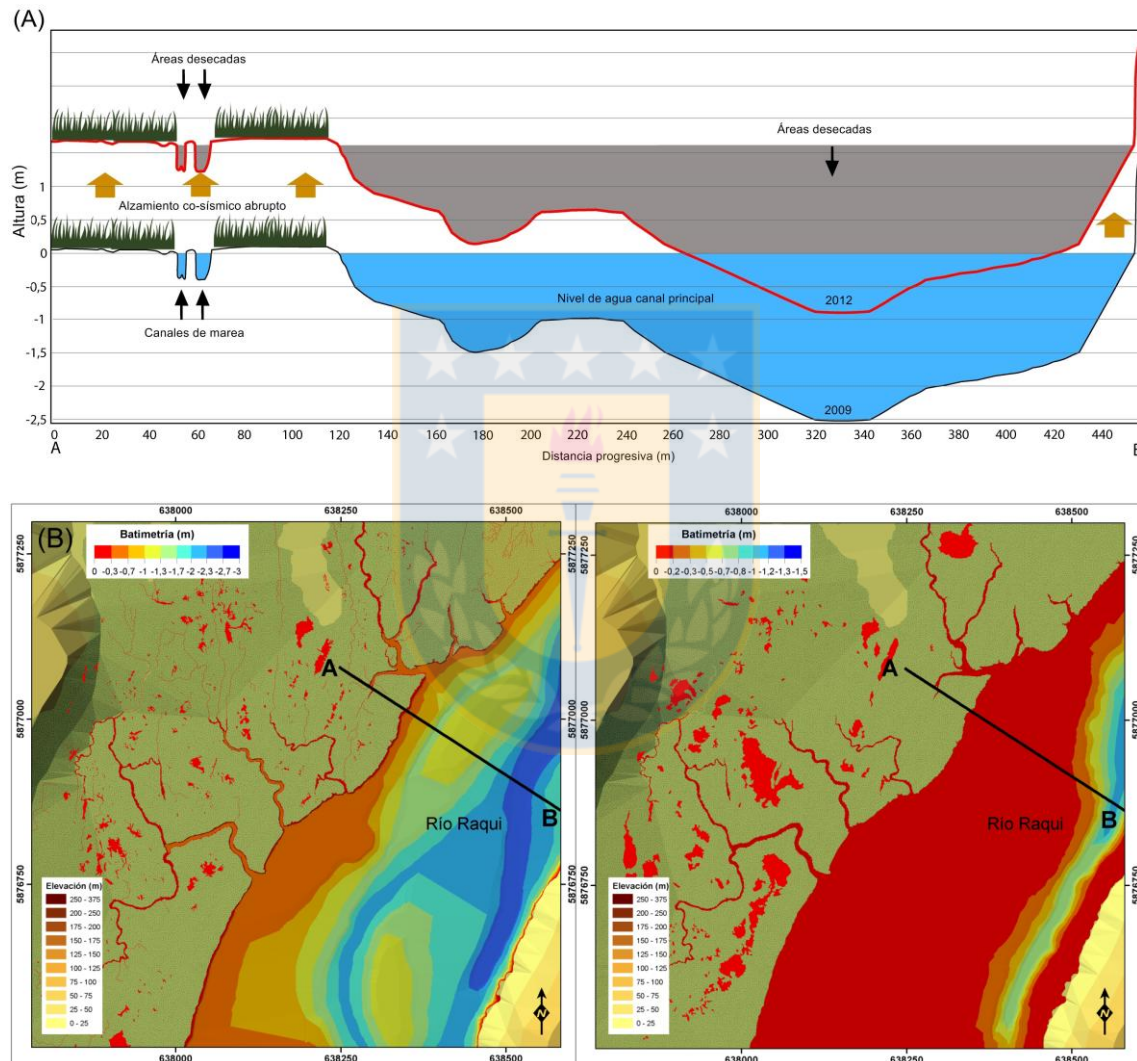


Figura 6. A) Perfil batimétrico del sitio de estudio 4, localizado en la desembocadura del río Raquí. Se compara y ejemplifica la situación pre (2009) y post (2012) alzamiento cosísmico. B) Modelo digital de elevaciones MDB representado la batimetría pre y post alzamiento. Los datos pre-terremoto, utilizados para la elaboración del MDB, se obtuvieron del estudio realizado por Constabel (1993) en condiciones de pleamar, los que fueron contrastados con las mediciones post-terremoto realizadas por Valdovinos et al. (2010), utilizando GPS con corrección diferencial ( $\pm 2$  cm), en todos los sitios de muestreo en condiciones de pleamar. El área gris corresponde al nivel de agua perdido por alzamiento. Se generó el MDB utilizando la herramienta Spline en ArcGIS<sup>®</sup> Spatial Analyst<sup>®</sup>.



Los canales mayores disminuyeron un 87.1%, siendo la unidad morfológica más alterada de este período (Tabla 2), observándose una disminución de más del 70% en todos los sitios (Figura 8). El sitio de estudio 6 registró pérdida total de esta unidad.

Los canales menores registraron un 56.4% de pérdida (Tabla 2), siendo el sitio 7 el que mayores cambios registró, con una disminución de 73.7% (Figura 9); sin embargo, el sitio 5 también exhibió cambios drásticos debido a la disminución de 0.0125 km<sup>2</sup>. La mayoría de los canales quedaron desconectados del cauce principal de los ríos, lo que a su vez anuló la conexión existente entre el río Tubul y el río Raqui en la zona central de la marisma.

Por su parte, las pozas salinas registraron una disminución del 55,3% (Tabla 2). La mayor disminución se observó el sitio 1 con un 76% de pérdida. Un comportamiento atípico se observó en el sitio de estudio 6, registrando un aumento de 10% del área inundada de las pozas salinas en relación a la superficie observada en el año 2009 (Figura 10). Por otro lado, el área total de la marisma media no fue severamente afectada, registrando una disminución de 6.7% promedio (Tabla 2); los sitios 6 y 3 registran la mayor pérdida de un 14 a 15% (Figura 11). La pérdida de agua retenida originalmente en estas unidades morfológicas produjo la aparición de 0.93 km<sup>2</sup> de áreas desecadas (Tabla 2). Esta nueva unidad corresponde a los fondos emergidos del río, canales de marea y pozas salinas que quedaron al descubierto con el alzamiento cosísmico del 27/F.

### **Cambios geomorfológicos período 2011-2012**

Durante el período 2011-2012 se acentuó el desecamiento, con un incremento de 7.9% en comparación al período 2009-2011. Este incremento es levemente contrarrestado por el aumento de un 12% del área inundada del canal principal de los ríos, sumado a un 8.5% de los canales de marea mayores (Tabla 2). El área de los canales menores disminuyó 36.1%, no observándose ninguna señal de recuperación en ninguno de los sitios de estudio (Figura 9). El cambio más abrupto registrado fue la pérdida total del área inundada de las pozas salinas (Figura 10), lo que contribuyó a incrementar en un 45% el área

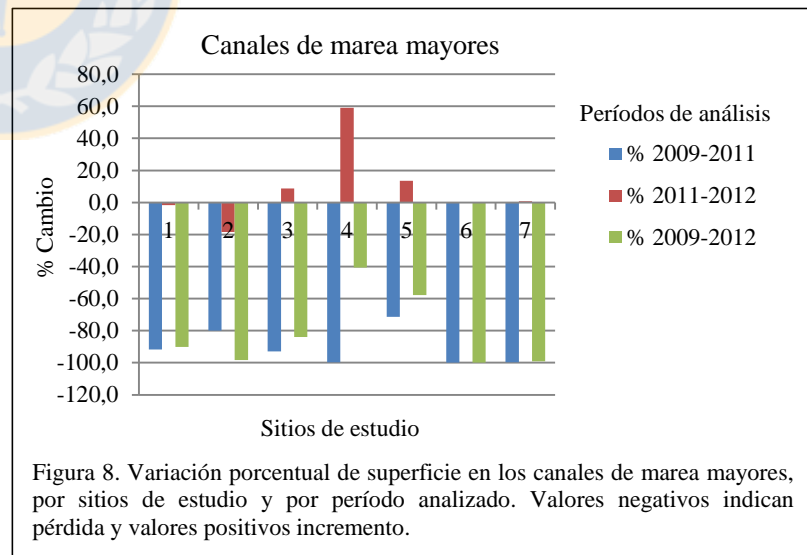
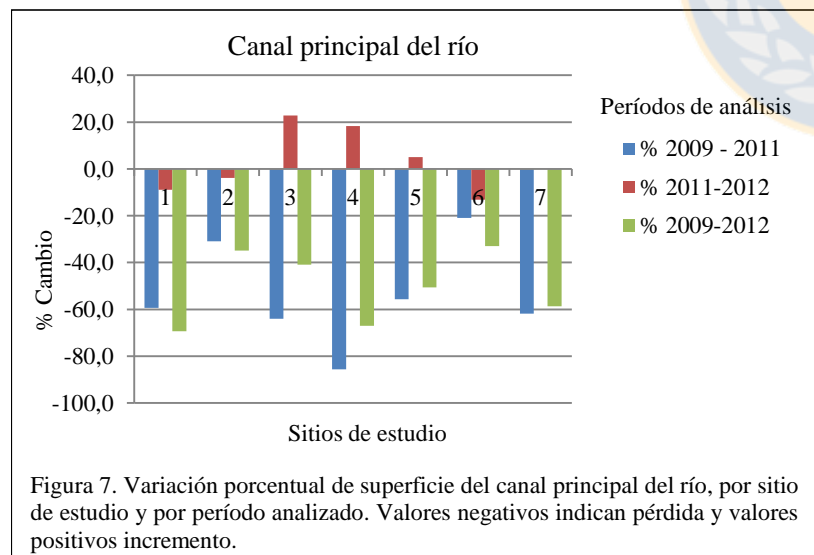
desechada y la consecuente pérdida funcional de esta unidad. El área de la marisma tiene una declinación del 7.9 %, algo más acentuada que el período anterior (Tabla 2); la estación 6 registró la mayor pérdida con un 17% de reducción (Figura 11). Las áreas desechedas registraron un aumento de 0.31 km<sup>2</sup>, lo que significa una contribución de 25.5% (Tabla 2).

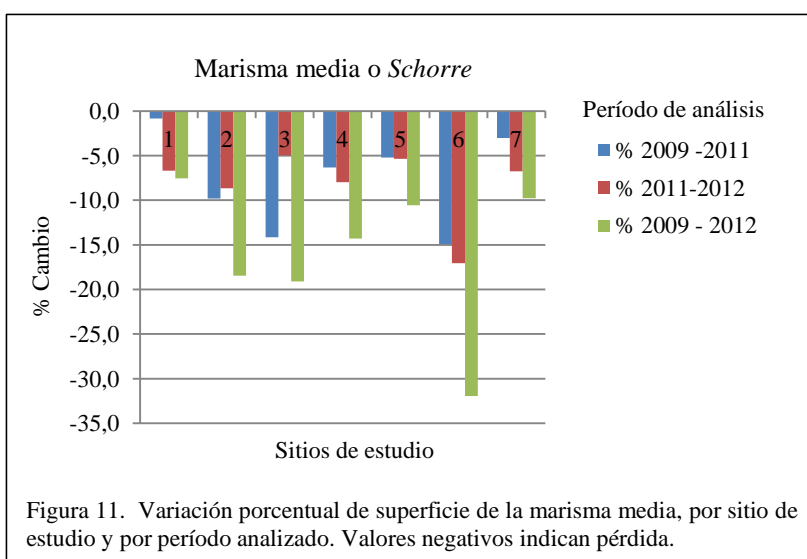
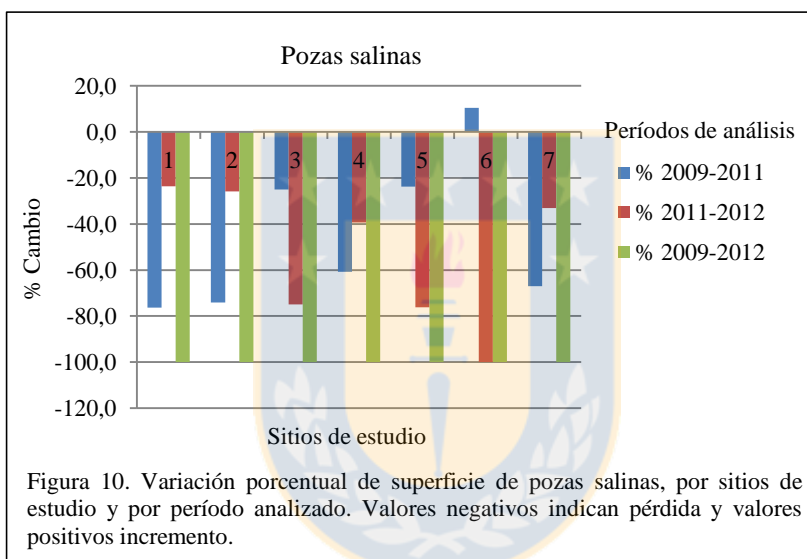
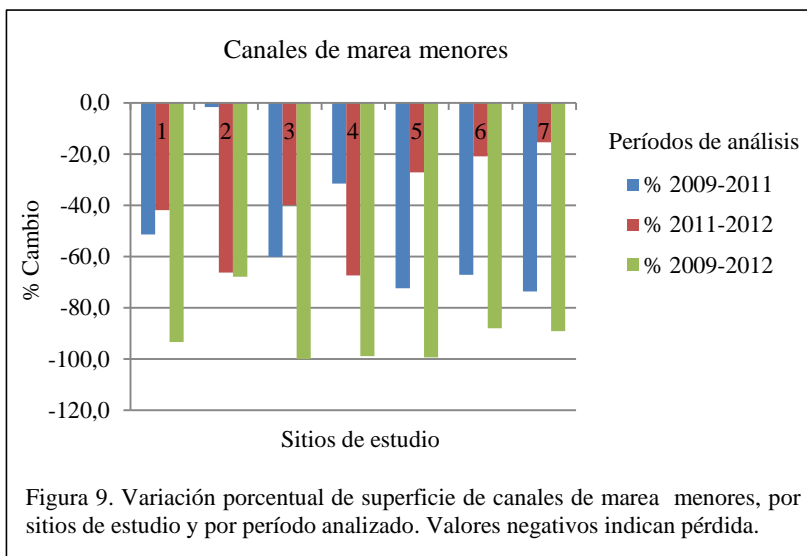
### **Cambios geomorfológicos período 2009-2012**

Para el total del período analizado, se registró la disminución de 31.7% del área inundada. Esto significó cambios en todas las unidades morfológicas de la marisma, sin excepción. La mayor variación se registró en las pozas salinas, con la pérdida del 100% del área inundada en todos los sitios de estudio (Tabla 2). Además los canales menores que disminuyeron en 92.4% (Figura 10); destaca el sitio de estudio 3 con una pérdida del 100% de esta unidad, mientras la mayoría de los sitios de estudio registraron una reducción superior al 80% (Figura 10). Los canales de marea mayores registraron una disminución del 78,6% para el período 2009-2012 (Tabla 2), donde se observó la total pérdida de esta unidad morfológica en el sitio 6, mientras los sitios 7 y 2 registraron más de un 90% de reducción (Figura 8). Los canales principales de ambos ríos y el estero Las Peñas registraron una disminución total del 53.4%, siendo el sitio 1 situado en la parte superior de la marisma Tubul la que registró la mayor reducción con 69.3% de pérdida total. Le sigue en reducción el sitio 4 localizado cercano a la desembocadura del río Raqui con un 67% de pérdida total. La superficie de la marisma media registró una reducción total de 14,6%, siendo la unidad que menos varió en el total del período analizado en esta investigación y demostrando una alta resistencia a la perturbación tectónica. El sitio de estudio 6 corresponde al único sitio que registró una declinación superior al 20% (31,9%), seguido por el sitio 3 con un 19,1% de pérdida y el sitio 2 con 18,5% de pérdida total. La pérdida de área inundada significó un incremento de las áreas desechedas al interior de la marisma, las que ocupan al menos un 7% del área total en todos los sitios de estudio, registrándose un área total de 1.248 km<sup>2</sup>.

Tabla 2. Área total de las unidades morfológicas y los cambios exhibidos para los 3 períodos analizados: 2009-2011, 2011-2012, 2009-2012. El valor porcentual utiliza como referencia el área del año 2009 obtenida del cuadrante de muestreo de 800 m<sup>2</sup>. Valores negativos indican disminución y valores positivos indican aumento.

Unidad morfológica	Área 2009 (km <sup>2</sup> )	Área 2011 (km <sup>2</sup> )	Área 2012 (km <sup>2</sup> )	Cambio 2009-2011 (km <sup>2</sup> )	Cambio 2011-2012 (km <sup>2</sup> )	Cambio 2009-2012 (km <sup>2</sup> )	Cambio 2009-2011 (%)	Cambio 2011-2012 (%)	Cambio 2009-2012 (%)
Canal principal del río	0.63	0.22	0.29	-0.41	0.08	-0.33	-65.4	12.0	-53.4
Canales de marea mayor	0.12	0.01	0.02	-0.10	0.01	-0.09	-87.1	8.5	-78.6
Canales de marea menor	0.06	0.02	0.004	-0.03	-0.02	-0.05	-56.4	-36.1	-92.4
Pozas salinas	0.37	0.17	0.00	-0.20	-0.17	-0.37	-55.3	-44.7	-100
Marisma media	2.75	2.56	2.35	-0.18	-0.22	-0.40	-6.7	-7.9	-14.6
Áreas desecadas	0.00	0.93	1.25	0.93	0.32	1.25	74.5	25.5	100





## **Análisis estadístico de los cambios cuantificados**

La ordenación de los siete sitios de estudio, considerando los datos de superficie  $m^2$  empleando MDS (Figura 12) agrupó claramente los datos en tres grupos diferenciados, primero por su condición previa o posterior al terremoto y segundo por su ubicación en relación a la desembocadura. Todas las mediciones posteriores al terremoto se agruparon en un solo grupo (G1), mientras las mediciones anteriores al terremoto se agruparon en dos grupos (G2 y G3) diferenciadas por un comportamiento morfológico distinto de las estaciones situadas en la desembocadura (sitios 3 y 4), en relación a las estaciones situadas en la parte intermedia y alta de la marisma media. Esta similitud estaría dada por el escaso desarrollo del área de las pozas salinas, los que no superan los  $100 m^2$  por área individual. Además se suma a esta diferenciación el potente desarrollo del ancho del canal del río exhibiendo una morfología típica de ambientes de desembocadura. Sólo el sitio 6, localizado en la parte alta de la marisma Raqui, no se ajusta al modelo observado, agrupándose dentro del grupo G1. Esta estación se encuentra situada en el río Raqui y en la parte terminal de la intrusión de la marisma en el continente, con un desarrollo de espantal muy restringido a los bordes del canal principal. Posee una escasa cobertura de *Spartina densiflora* y por consiguiente, con una escasa presencia de canales de marea y pozas salinas. A pesar de estas diferencias puntuales, los elementos del paisaje típicos en una marisma costera poseen una densidad bastante homogénea y uniformemente distribuida en toda el área estudiada. De este análisis se desprendió que no existen diferencias significativas entre las estaciones de los dos años posteriores al terremoto, donde los cambios parecen ser homogéneos desde la desembocadura hasta la parte alta de la marisma. Sin embargo, y de acuerdo a lo observado en el análisis anterior, sí existen sutiles diferencias en el comportamiento de las estaciones, las que son visualizadas realizando un análisis en detalle de cada unidad morfológica y por estación.



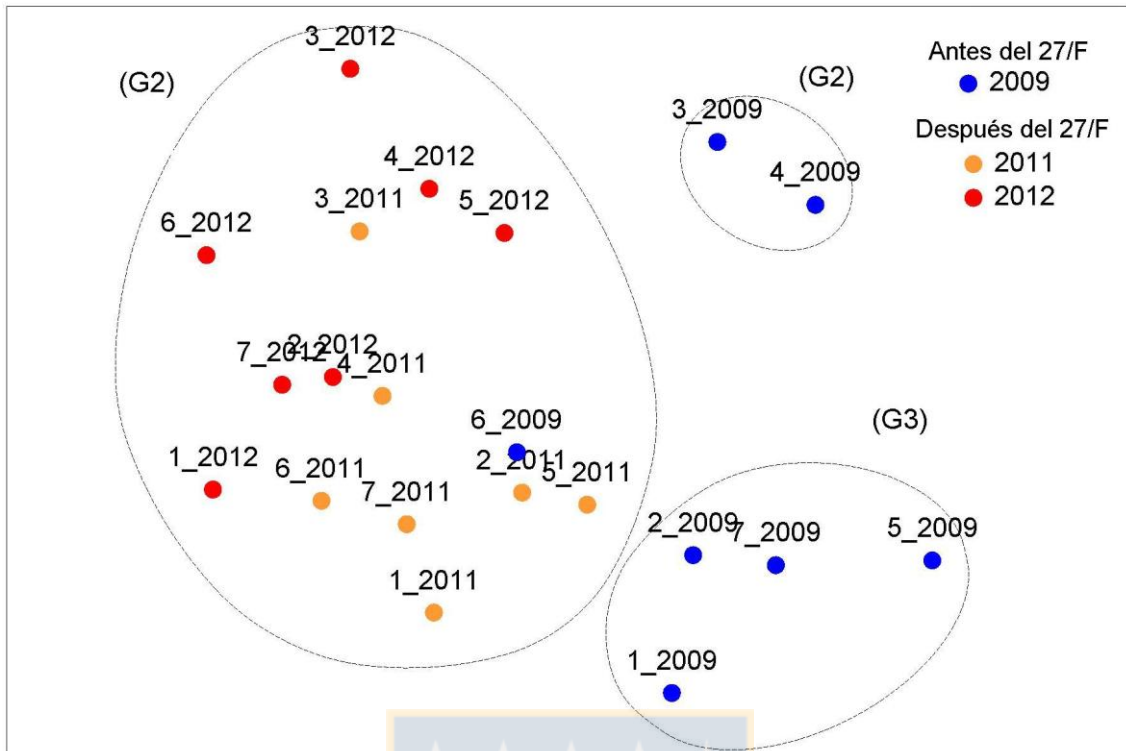


Figura 12. Ordenación de los 7 sitios de estudio, analizadas en 3 años (2009, 2011, 2012), considerando los datos de superficie de cada unidad morfológica. Realizada empleando Escalamiento Métrico Multidimensional (MDS). Las líneas punteadas delimitan a los grupos (G1, G2, G3) estadísticamente significativos ( $p < 0,05$ ), (Stress = 0,12).

## DISCUSIÓN

El análisis de los cambios geomorfológicos ocurridos tras el alzamiento vertical de ~ 1,4 m.s.n.m. (Quezada *et al.*, 2010; Farías *et al.*, 2010), reveló abruptas transformaciones experimentadas por las características morfológicas del paisaje de la marisma, las que fueron fuertemente afectadas por la magnitud de los cambios en el relieve. La zona de subducción de Chile se encuentra entre los márgenes convergentes más activos de la Tierra, produciendo terremotos de alta magnitud ( $M_w > 8.0$ ) cada 10-20 años (Moscoso *et al.*, 2011; Udías *et al.*, 2012). Los registros indican que al menos 9 terremotos con magnitud mayor que  $M_w = 8.0$  han afectado la costa de la región centro-sur de Chile desde 1562 (Lomnitz, 1970; Urrutia and Lanza, 1993; Cisternas *et al.*, 2005).

La Península de Arauco fue solevantada sobre 2.5 m en los terremotos de 1835, 1960 y 2010 (Jaramillo *et al.*, 2012; Quezada *et al.*, 2012). Las pioneras observaciones del alzamiento co-sísmico durante el terremoto 1835 en Chile

hechas por Fitz-Roy son consideradas la primera evidencia empírica de la influencia del alzamiento co-sísmico en la dinámica de la marisma (Fitz-Roy, 1839). El terremoto de 1960 en Valdivia generó un nuevo alzamiento alrededor de un metro en la Península de Arauco (Veyl, 1960; Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), 1961; Lomnitz, 1970 in Martínez *et al.*, 2015). A pesar de que los efectos sobre el área de Tubul no fueron descritos específicamente, la creación masiva de humedales producto de la subsidencia del Río Cruces después del terremoto Mw=9.5 de 1960 (Reinhardt *et al.*, 2010; Jaramillo *et al.*, 2012), corresponde a otro ejemplo de los efectos de un terremoto de subducción en los ecosistemas costeros chilenos, con resultados totalmente contrapuestos a lo observado en Tubul-Raqui. Recientemente, el terremoto del 27/F del 2010 causó efectos similares al terremoto de 1835, con un profundo cambio en el nivel base del sistema fluvial y ensanchamiento de la playa.

Estos registros demuestran el alto dinamismo de la zona, estableciendo una clara evidencia de que la marisma Tubul-Raqui es afectada por la perturbación de eventos co-sísmicos cíclicos en el área. De acuerdo a ello, los cambios morfológicos observados en la marisma Tubul-Raqui pueden ser explicados por la acción de dos importantes procesos durante el ciclo co-sísmico—alzamiento co-sísmico y subsidencia post-sísmica (e.g. Kaizuka, 1973; Quezada *et al.*, 2012; Wesson *et al.*, 2015). Por ejemplo, durante el período de mayor frecuencia de réplicas hubo una recuperación de parte del alzamiento co-sísmico de ~20-30 cm de subsidencia post-sísmica en la Isla Santa María, en el borde oeste de la Península de Arauco (Quezada *et al.*, 2012). Los resultados obtenidos indican que existe una lenta recuperación del área frecuentemente inundada de los ríos Tubul y Raqui, en los sitios cercanos a la desembocadura y en la parte intermedia de la marisma Raqui (sitios 3, 4 y 5), lo cual puede ser concordante con el proceso de subsidencia post-sísmica. Sin embargo, esas diferencias pueden ser también explicadas debido a la influencia de las precipitaciones estacionales en el régimen hidrológico de esta cuenca hidrográfica costera. Los registros históricos registran una alta influencia marina en el estuario del río Tubul (Constabel, 1993), debido a que las entradas de agua dulce en este sistema son altamente dependientes de las precipitaciones

estacionales. Después del alzamiento co-sísmico del 27/F, la entrada principal de agua en el sistema del río Tubul fue abruptamente impedida, lo cual podría explicar el por qué los sitios de estudio situados río arriba (sitios 1 y 2) mostraron una tendencia sostenida a la declinación, en contraste con el sitio localizado cercano a la desembocadura (sitio 3). La influencia de la estacionalidad también puede ser observada en el registro de área total de pozas salinas del año 2011, donde al menos un 40% del área inundada en estas unidades se conservó e incluso mostró un ligero incremento registrado en el sitio de estudio 6. La imagen Google Earth del año 2011 corresponde al mes de Agosto, la época de lluvias, donde al menos un 75% de las precipitaciones se concentra (Constabel, 1993), lo cual concuerda con los registros de la estación cercana del río Carampangue, con montos de 216 a 230 mm de precipitaciones entre los meses de Junio y Septiembre del año 2011 (DGA, 2016). Dado lo anterior, resulta importante considerar el efecto de la estacionalidad en la dinámica de las pozas salinas, las que probablemente se activan y desactivan en función de los aportes de precipitaciones.

Cuán duraderos serán los efectos del alzamiento co-sísmico va a depender del tipo de ecosistema afectado y de su dinámica inherente. Por ejemplo, el Delta del Río Cooper en Alaska, cuya morfología es influenciada por una dinámica co-sísmica de similares características, se ajustó rápidamente al alzamiento co-sísmico de 1.8 a 3.4 m de 1964. Dentro de 15 años, los canales desecados se inundaron nuevamente y el río volvió a inundar las islas de vegetación (Christensen *et al.*, 2000). Es importante considerar que las condiciones de drenaje en este delta fluctúan enormemente, debido a la influencia de rangos de marea amplios y estacionalmente variables, a fuertes lluvias de verano, y a la fusión estacional de nieve y glaciares en la sección superior de la cuenca. Los resultados obtenidos en la marisma Tubul-Raqui indican una recuperación gradual del canal principal de los ríos (12%) y de los canales de marea mayores (8.5%). Sin embargo, es muy probable que esta marisma responda mucho más lentamente al alzamiento co-sísmico, debido a las importantes diferencias en el régimen hidrológico de ambos sistemas. Además, mientras el alzamiento en el Delta del Río Cooper produjo la creación de nuevas charcas (Van Duzor, 2011), el alzamiento que afectó a la marisma Tubul-Raqui produjo

el desecamiento y total pérdida de las pozas salinas observadas en el 2012. Los impactos ecológicos de los alzamientos co-sísmicos sobre los ecosistemas costeros parecen variar fuertemente a través de los tipos de ecosistemas y en función del régimen hidrológico.

La vegetación dominante de la marisma media o *schorre* se mantuvo poco alterada, exhibiendo un bajo porcentaje de pérdida (14.6%) en comparación al resto de los elementos morfológicos. La alta resistencia exhibida por los pastizales salinos o “espartales” dominados por esta asociación vegetal concuerda con lo descrito por Nordby and Zedler (1991); Cagnoni (1999); Castillo *et al.* (2005); Maricle *et al.* (2007); Sandoval (2010); Valdovinos and Sandoval (2011) y Vásquez (2013), quienes han notado la gran tolerancia de este género a condiciones extremas. Esto es de gran importancia, tomando en consideración que es una especie de gran relevancia en el humedal por su cobertura y biomasa. Esta condición de alta resiliencia posibilita a la marisma seguir proveyendo servicios ecosistémicos, los que son de suma importancia para considerar a este humedal un sitio prioritario para la conservación (Marín *et al.*, 2014), especialmente por el servicio de soporte para la biodiversidad de avifauna, el cual se mantiene en el borde costero de la marisma (Matus *et al.*, 2010; Schmitt *et al.*, 2011). Las marismas son efímeras formas de relieve desde el punto de vista geológico, con un ciclo de vida muy corto (Fagherazzi, 2013), lo que explicaría que básicamente se desconozcan los efectos causados por alzamientos tectónicos anteriores al 2010 sobre la biota de la marisma Tubul-Raqui, a pesar de la frecuente recurrencia de este tipo de perturbaciones de naturaleza tectónica en la costa chilena. Además, hay una marcada juventud de la flora y vegetación de marismas chilenas, o en una generación de ellas, después de los recurrentes tsunamis que asolan las costas chilenas, cambiando periódicamente el paisaje litoral (Ramírez *et al.*, 2014).

## CONCLUSIONES

Esta investigación demostró que la neotectónica desempeña un papel importante en el control de la dinámica de las características morfológicas en la marisma de Tubul-Raqui. Los efectos de grandes perturbaciones naturales son

fuertes y severos, significando la disminución del 31,7% del área total de las unidades morfológicas después del alzamiento co-sísmico del 27/F del 2010. Los resultados mostraron la alta sensibilidad y fragilidad de dos unidades morfológicas, pozas salinas y canales de marea menores, con una pérdida superior al 90% y sin signos de recuperación. Únicamente el canal principal de los ríos y canales de marea mayores mostraron señales de recuperación (12% y 8.5%); sin embargo, las señales son leves y diferenciadas en el área de la marisma, principalmente concentradas en los sitios de estudio cercanos a la desembocadura y en la parte intermedia de la marisma Raqui. La relación de los resultados obtenido con las descripciones del ciclo co-sísmico en el área (Kaizuka, 1973, Quezada et al., 2012, Wesson et al., 2015) sugieren que estos cambios están altamente influenciados por el proceso de subsidencia post-sísmica. La marisma media o *schorre* fue la unidad morfológica que menos varió en el período analizado, con una reducción total de 14,6% en 2012, lo que demuestra una alta resiliencia ante perturbaciones naturales de características catastróficas. Continuar monitoreando el estado de recuperación de la marisma y otros ecosistemas similares podría ayudar a establecer el verdadero rol que desempeña el ciclo sísmico en la dinámica de los ecosistemas costeros chilenos, así como su incidencia en el proceso de recuperación. Incorporar estos efectos en las políticas y programas de planificación de la zona costera contribuirá a garantizar la conservación de sus recursos y el bienestar de las poblaciones que dependen de ellos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación forma parte de la tesis doctoral en ciencias ambientales de Daniela Vásquez C., supervisada por Claudio Valdovinos Z. y María Mardones F., y fue apoyada y financiada por el Programa de Formación de Capital Humano Avanzado (CONICYT, Chile). Los autores también agradecen a Gianfranco Guidotti M. y Jacqueline Salvo P. por el apoyo en la etapa de generación y análisis de datos y a Carolina Martínez R. por los comentarios y sugerencias para la elaboración del manuscrito.

## LITERATURA CITADA

Araujo, R.; Silva, G.; Freitas, D., and Klein, A., 2009. Georreferenciamiento de fotografías aéreas e análise da variação da linha de costa. *In: Alcántara-Carrió, J.; Correa, I.; Isla, F.; Alvarado, M.; Klein, A.; Cabrera, J., and Barlow, R. (eds.), Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el Litoral*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Manuales CYTED, pp. 123-138.

Araya-Vergara, J.F., 1985. Trend analysis of shoreline changes and coastal management in Central Chile (33-34.5°S) *Actes Excursion-Symposium No. 9: La Cote Atlantique. Union Géographique Internationale. Commission sur 1' Environnement Côtier* (Paris, France), pp. 99-110.

Askew, B.L. and Algermissen, S.T., 1895. *Catalog of earthquakes for South America: Hypocenter and intensity data*. Lima, Perú: Center of Regional Seismology for South America, Earthquake Mitigation Program in the Andean Region, Volumes 4, 6 and 7a, 7b and 7c.

Barbier, E.B.; Hacker, S.D.; Kennedy, C.; Koch, E.W.; Stier, A.C., and Silliman, R., 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169–193.

Boggs, K. and Shephard, M., 1999. Response of marine deltaic surfaces to major earthquake uplifts in southcentral Alaska. *Wetlands*, 19(1), 13-27.

Bortolus, A., 2006. The austral cordgrass *Spartina densiflora* Brong.: its taxonomy, biogeography and natural history. *Journal of Biogeography*, 33(1), 158-168.

Cagnoni, M., 1999. Espartillares de la costa bonaerense de la República Argentina. Un caso de humedales costeros. *In: Malvárez, A., (eds.), Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica*. Montevideo, Uruguay: ORCYT pp. 55-69.

Castillo, J.M.; Rubio-Casal, A.E.; Redondo, S.; Álvarez-López, A.A.; Luque, T.; Luque, C.; Nieva, F.J.; Castellanos, E.M., and Figueroa, M.E., 2005. Short-term responses to salinity of an invasive cordgrass. *In: Capdevila-Argüelles, L., and Zilletti, B. (eds.), Issues in Bioinvasion Science*. The Netherlands: Springer, pp. 29–35.

Chapman, V.J., 1960. *Salt marshes and salt deserts of the world*. New York: Interscience, 392p.

Christensen, H.H.; Mastrantonio, L.; Gordon, J.C., and Bormann, B.T., 2000. *Alaska's Copper River: humankind in a changing world*. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, *General Technical Report PNW-GTR-480*, 20p.



Cisternas, M.; Atwater, B.; Torrejón, F.; Sawai, Y.; Machuca, G.; Lagos, M.; Eipert, A.; Youlton, C.; Salgado, I.; Kamataki, T.; Shishikura, M.; Rajendran, C.; Malik, J.; Rizal, Y., and Husni, M., 2005. Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. *Nature*, 437, 404–407.

Clarke, K.R. and Gorley, R.N., 2006. *PRIMER v6: User Manual/Tutorial*. PRIMER-E, Plymouth, 192p.

Constabel, S., 1993. Ambientes sedimentarios de los estuarios Tubul y Raqui, VIII Región, Chile. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Ph.D. dissertation, 96p.

Daniel, I.; De Grandpre M., and Farías, L., 2013. Greenhouse gas emissions from the Tubul-Raqui estuary (central Chile 36°S). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 134, 31-44.

Dirección General de Aguas. *Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea* <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>.

Fagherazzi S., 2013. The ephemeral life of a salt marsh. *Geology*, 41(8), 943-944.

Farías, M.; Vargas, G.; Tassara, A.; Carretier, S.; Baize, S.; Melnick, D., and Bataille, K., 2010. Land-Level Changes Produced by the Mw 8.8 2010 Chilean Earthquake. *Science*, 329(5994), 916-916.

Fitz-Roy, R., 1839. Proceedings of the second expedition, 1831–1836, under the command of Captain Robert FitzRoy. In: Colburn, H. (ed.), *Narrative of the surveying voyages of His Majesty's ships Adventure and Beagle between the years 1826 and 1836, describing their examination of the southern shores of South America, and the Beagle's circumnavigation of the globe*. London, pp. 402- 425.

Goudie, A., 2013. Characterising the distribution and morphology of creeks and pans on salt marshes in England and Wales using Google Earth. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 129, 112-123

Guilcher, A., 1957. *Morfología litoral y submarina*. Barcelona: Omega S.A., 274p.

Isacch, J.P.; Costa, C.S.B.; Rodriguez-Gallego, L.; Conde, D.; Escapa, M.; Gagliardini, D.A., and Iribarne, O.O., 2006. Distribution of salt marsh plant communities associated with environmental factors along a latitudinal gradient on the south-west Atlantic coast. *Journal of Biogeography*, 33(5), 888-900.

Jaramillo, E.; Dugan, J.; Hubbard, D.M; Melnick, D; Manzano, M; Duarte, C.; Campos, C., and Sánchez, R., 2012. Ecological implications of extreme events: Footprints of the 2010 earthquake along the Chilean coast. *PLoS ONE*, 7(5), 1-8.

Kaizuka, S.; Matsuda, T.; Nogami, M., and Yonekura, N., 1973. *Quaternary tectonic and recent seismic crustal movements in the Arauco Peninsula and its environs, Central Chile*, Tokyo: Tokyo Metropolitan University, *Geographical Reports* 8, 49p.

Kelleher, J. A., 1972. Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions. *Journal of Geophysical Research*, 77(11), 2089–2103.

Maricle, B.R.; Cobos, D.R., and Campbell, C.S., 2007. Biophysical and morphological leaf adaptations to drought and salinity in salt marsh grasses. *Environmental and Experimental Botany*, 60(3), 458–467.

Marín, A.; Gelcich, S., and Castilla, J., 2014. Ecosystem services and abrupt transformations in a coastal wetland social-ecological system: Tubul-Raqui after the 2010 earthquake in Chile. *Ecology and Society*, 19(1), 22.

Martínez, R., 1968. Foraminíferos y evolución de la línea de costa holocénica en la zona de Concepción. In: Cecioni, G. (ed.), *El Terciario de Chile Zona Central*. Sociedad Geológica de Chile: Andrés Bello, pp. 211-257.

Martínez, C.; Rojas, O.; Jaque, E.; Quezada J.; Vásquez, D., and Belmonte, A., 2011. Efectos territoriales del tsunami del 27 de Febrero de 2010 en la costa de la región del Bío-Bío, Chile. *Revista Geográfica de América Central*, Número Especial 2011, pp. 1-16.

Martínez, C.; Rojas, O.; Aránguiz, R.; Belmonte, A.; Altamirano, A., and Flores, P., 2012. Riesgo de tsunami en caleta Tubul, Región del Biobío: escenarios extremos y transformaciones territoriales posterremoto. *Revista Geografía Norte Grande*, 53, 85-106.

Martínez, C.; Rojas, D.; Quezada, M.; Quezada, J., and Oliva, R., 2015. Post-earthquake coastal evolution and recovery of an embayed beach in central-southern Chile. *Geomorphology*, 250, 321-333.

Matus, R.; Díaz-Segovia, F., and Schmitt F., 2010. *Censos Neotropicales de Aves Acuáticas en Chile*, Santiago: Red de Observadores de Aves y Vida Silvestre de Chile, *Informe Resultados 2009*, 52p.

Melnick, D.; Bookhagen, B.; Strecker M.R., and Echtler, H.P., 2009. Segmentation of megathrust rupture zones from fore-arc deformation patterns over hundreds to millions of years, Arauco peninsula, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 114(B1).

Mitsch, W. and Gosselink, J., 1993. The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological Economics*, 35(1), 25-33.

Moscoso, E.; Grevemeyer, I.; Contreras-Reyes, E.; Flueh, E.R.; Dzierma, Y.; Rabbal, W., and Thorwart, M., 2011. Revealing the deep structure and rupture plane of the 2010 Maule, Chile earthquake (Mw = 8.8) using wide angle seismic data. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(1), 147-155.

Nordby, C.S. and Zedler, J.B., 1991. Responses of Fish and Macroinvertebrate Assemblages to Hydrologic Disturbances in Tijuana Estuary and Los Peñasquitos Lagoon, California. *Estuaries*, 14(1), 80-93.

Packham, J.R. and Willis, A.J., 1997. *Ecology of Dunes, Salt Marsh and Shingle*. London: Chapman & Hall, 333p.

Paskoff, R., 1985. *Les littoraux: impact des aménagements sur leur evolution*. Paris: Masson, 188p.

Perillo, G.; Ripley, M.; Piccolo, M.C., and Dyer, K.R., 1996. The formation of tidal creeks in a salt marsh: new evidence from the Loyola Bay salt marsh, Rio Gallegos Estuary, Argentina. *Mangroves and Salt marshes*, 1(1), 37–46.

Perillo, G., 2009. Tidal Courses: Classification, Origin and Functionality. In: Gerardo, M.; Perillo, E.; Wolanski, E.; Cahoon, D.R., and Brinson, M.M., (eds.), *Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach*. Amsterdam: Elsevier, pp. 185.

Pestrong, R., 1965. *The development of drainage patterns on tidal marshes*. Stanford University Publications, 10(2), 870 p.

Pethick, J., 1974. The distribution of salt pans on tidal marshes. *Journal of Biogeography*, 1, 57-62.

Pineda, V., 1986. Evolución paleográfica de la cuenca sedimentaria Cretácico-Terciaria de Arauco. In: Frutos J.; Oyarzún, R., and Pincheira, M., (eds.), *Geología y Recursos Minerales de Chile*, Concepción: Editorial de la Universidad de Concepción, pp. 375–390.

Quezada, J.; Jaque, E.; Belmonte, A.; Fernández, A.; Vásquez, D., and Martínez C., 2010. Movimientos cosísmicos verticales y cambios geomorfológicos generados durante el terremoto Mw=8,8 del 27 de Febrero de 2010 en el centro-sur de Chile. *Revista Geográfica del Sur*, 1(2), 11-45.

Quezada, J.; Jaque, E.; Fernández, A.; Belmonte, A.; Martínez, C., and Vásquez, D., 2012. Cambios en el relieve generados como consecuencia del terremoto Mw = 8,8 del 27 de Febrero de 2010 en el centro sur de Chile. *Revista Geografía Norte Grande*, 53: 35-55.

Ramírez, C.; Contreras, D.; Figueroa, H., and San Martín, C., 1988. Estudio vegetacional en una marisma del centro-sur de Chile. *Medio Ambiente* 9(2), 21-30.

Ramírez, C.; San Martín, C., and Rubilar, H., 2002. Una propuesta para la clasificación de los humedales chilenos. *Revista Geográfica de Valparaíso*, 33, 265-273.

Ramírez, C.; San Martín, C.; Fariña, J. M.; Camaño, A.; Álvarez, M.; Pérez, Y.; Solís, J. L., and Valdivia, O., 2014. Humedales costeros de la región del Biobío (Chile): Un gradiente de vegetación y una nueva asociación vegetal de marisma. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 30(3), 233-246.

Reinhardt, E.G.; Nairn, R.B., and Lopez, G., 2010. Recovery estimates for the Rio Cruces after the May 1960 Chilean earthquake. *Marine Geology*, 269, 18–33.

San Martín, C.; Contreras, D.; San Martín, J., and Ramírez, C., 1992. Vegetación de las marismas del centro-sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 65, 327-342.

Sandoval, N., 2010. Efectos del levantamiento cosísmico y tsunami sobre la comunidad macrobentónica del humedal Tubul-Raqui, producto de un terremoto 8,8 Richter (Chile central). Concepción: Universidad de Concepción, Tesis de pregrado, 73p.

Schmitt, F.; Matus, R.; Díaz, F., and Barros, R., 2011. *Censos Neotropicales de Aves Acuáticas en Chile*. Santiago: Red de Observadores de Aves y Vida Silvestre de Chile, *Informe Resultados 2010*, 62p.

Silgado, E., 1985. *Destructive earthquakes of South America 1530-1894*. Lima, Perú: Center of Regional Seismology for South America, Earthquake Mitigation Program in the Andean Region, 315 p.

Stuardo, J.; Valdovinos, C.; Figueroa, R., and Ochipinti, A., 1993. *Los ambientes costeros del Golfo de Arauco y área adyacente*. Concepción: Universidad de Concepción, Chile: Proyecto EULA-CHILE, *Serie Monografías Científicas*, (9), 1-157.

Thilenius, J.F., 1990. Woody plant succession on earthquake-uplifted coastal wetlands of the Copper River Delta, Alaska. *Forest Ecology and Management*, 33-34, 439-462.

Thilenius, J.F., 1995. *Phytosociology and succession on earthquake-uplifted coastal wetlands, Copper River Delta, Alaska*. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, *General Technical Report PNW-GTR-346*, 58p.

Udías, A.; Madariaga, R.; Buforn, E.; Muñoz, D., and Ros, M., 2012. The large Chilean historical earthquakes of 1647, 1657, 1730 and 1751 from contemporary documents. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(4), 1639–1653.

Urrutia, R. and Lanza, C., 1993. *Catástrofes en Chile 1541 –1992*. Santiago: Editorial La Noria, 257p.

Valdovinos, C.; Muñoz, M.D.; Sandoval, N.; Vásquez, D., and Olmos, V., 2010. Natural disasters and biodiversity: the case of Tubul-Raqui coastal wetland. *Sociedad Hoy*, 19:33-51.

Valdovinos, C. and Sandoval, N., 2011. *Cambios ambientales del humedal Tubul-Raqui derivado del alzamiento cosísmico y tsunami, asociado al terremoto Mw 8,8*. Concepción, Chile: Centro de Ciencias Ambientales EULA-CHILE, *Informe técnico*, 60p.

Van Duzor, R. G., 2011. Community structure and secondary production of aquatic macroinvertebrates in coastal wetland ponds of the West Copper River Delta, Alaska, following tectonic uplift. Chicago: Loyola University Chicago, *Master's Thesis*, 64p.

Vásquez, D., 2013. Metodología para la delimitación y zonificación de humedales costeros de tipo mediterráneo. *Revista Geográfica del Sur*, 4(6), 13-32.

Veyl, C., 1960. *Los fenómenos volcánicos y sísmicos de fines de mayo de 1960 en el sur de Chile*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Instituto Central de Química, Departamento de Geología y Mineralogía, 60p.

Wesson, R.L.; Melnick, D.; Cisternas, M.; Moreno, M., and Ely, L., 2015. Vertical deformation through a complete seismic cycle at Isla Santa Maria, Chile. *Nature Geoscience*, 8(7), 547-551.

Yapp, R.; John, D., and Jones, O., 1917. The Dovey Salt marshes. *Journal of Ecology*, 5, 65-103.

### **2.3.- Artículo científico en preparación: Una aproximación a la evaluación de la integridad ecológica de una marisma afectada por el megaterremoto del 2010 en Chile centro-sur: El caso de Tubul-Raqui**

<sup>1</sup>Daniela Vásquez C., <sup>1</sup>Natalia Sandoval N. y <sup>1</sup>Claudio Valdovinos Z.

<sup>1</sup>Unidad de Sistemas Acuáticos, Facultad de Ciencias Ambientales EULA,  
Universidad de Concepción, Concepción

Victoria s/n Barrio Universitario, Concepción, Chile. Casilla 169-C

E-mail: [danielavasquez@udec.cl](mailto:danielavasquez@udec.cl)  
[nataliasandoval@udec.cl](mailto:nataliasandoval@udec.cl)  
[cvaldovi@udec.cl](mailto:cvaldovi@udec.cl)

#### **Resumen**

Las marismas son componentes de importancia ecológica del paisaje costero, ya que proporcionan variadas funciones ecosistémicas esenciales, así como un alto número de valiosos beneficios para los seres humanos. Su fragilidad se encuentra condicionada por diversas causas, tanto antrópicas como naturales, donde desastres naturales como los megaterremotos pueden provocar grandes alteraciones en la integridad ecológica. La marisma Tubul-Raqui fue recientemente afectada por el terremoto Mw=8,8 del 27 de febrero de 2010 que ocurrió en Chile centro-sur, provocando un alzamiento cosísmico de 1,4 m. Ello constituye una oportunidad única para evaluar los efectos de un alzamiento cosísmico sobre el estado de salud de un humedal costero. A través de la revisión de distintas metodologías aplicadas a la evaluación de la integridad ecológica de humedales: (1) se elaboró un modelo conceptual de la estructura y funcionamiento de la marisma, identificándose los principales estresores y efectos (2) se identificaron variables explicativas del estado de salud bióticas, abióticas y de paisaje (3) se seleccionaron índices y métricas a distintas escalas espaciales utilizando como estado de referencia registros históricos (4) se elaboró una propuesta de índice de integridad ecológica, a escala de paisaje (5) se aplicó el índice en los años 2009 (pre-terremoto), 2011 y 2012 (post-terremoto). Los resultados indican que anterior al terremoto, la marisma presentaba un “Excelente” estado de salud, siendo la zona intermedia de la



marisma del río Raqui el sector mejor conservado. Posterior al terremoto, todos los sitios pasaron a las categorías de “Bueno” o “Aceptable” siendo los sitios localizados en la marisma del río Tubul (3 y 2) los más perturbados. El deterioro del estado de salud se explica por la declinación sostenida de la condición abiótica y de paisaje. Por el contrario, la condición biótica aunque igualmente afectada, no demostró severas señales de perturbación, en especial la flora dominante *Spartina densiflora*. Además se observaron respuestas diferenciadas, pues mientras la marisma del río Raqui exhibe leves señales de recuperación, el río Tubul evidencia una tendencia hacia el deterioro. El análisis demuestra que a pesar de la gran perturbación, la marisma posee un estado de salud “Bueno” en general, lo que le permite seguir siendo considerada entre las marismas más importantes del centro-sur de Chile, lo que justificaría retomar los esfuerzos orientados hacia su conservación.

## 1. Introducción

Las marismas son componentes de importancia ecológica del paisaje costero, ya que proporcionan muchas funciones ecosistémicas esenciales, como la producción de materia orgánica y reciclaje de nutrientes (Weinstein y Kreeger 2000 en Fagherazzi *et al.*, 2012). Son ecosistemas únicos y productivos con un alto valor intrínseco como hábitat para la vida silvestre, zonas de cría para peces, y fuente de alimentación para la biota y las poblaciones humanas cercanas a la costa (Neckles *et al.*, 2013). Entre los ecosistemas costeros, las marismas proporcionan un alto número de valiosos beneficios para los seres humanos, incluidas materias primas y alimentos, protección costera, control de la erosión, purificación del agua, mantenimiento de la pesca, captura de carbono, turismo, recreación, educación e investigación (Barbier *et al.*, 2011). Sin embargo, se estima que alrededor del 50% de los ecosistemas de marisma se han perdido o degradado (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Debido a su importancia, y a las características sumamente particulares de estos ecosistemas, múltiples indicadores para medir la condición de los humedales se han adaptado a los diferentes sistemas en todo el mundo. Los índices de integridad biológica IBI o índices multimétricos, han proliferado como

una eficaz herramienta de monitoreo ambiental (McCormick, 2001; Oberdorff *et al.*, 2002; Pont *et al.*, 2006; Casatti *et al.*, 2009), desde que James Karr en el año 1981 propuso la primera aplicación del concepto “multimétrico” para evaluar la condición biológica en sistemas acuáticos (Ruaro y Gubiani, 2013). El enfoque más comúnmente utilizado es aquel basado en comunidades biológicas “blanco”, donde comunidades de peces y bentos han sido predominantemente usados para calcular índices de integridad biótica (Pinto *et al.*, 2009; Pont *et al.*, 2006 en Vačkář *et al.*, 2012). Sin embargo, el análisis de las comunidades biológicas por si solos pueden no tener en cuenta las funciones del ecosistema (Ondiviela *et al.*, 2015). Si a ello se suma el hecho de que las marismas son la manifestación de complejas interacciones ecológicas y físicas, que requieren de un enfoque interdisciplinario para discernir los mecanismos por los cuales funcionan (Fagherazzi *et al.*, 2004; Kirwan and Murray 2007; Marani *et al.*, 2007; Townend *et al.*, 2010 en Fagherazzi *et al.*, 2012), se hace necesario un enfoque más amplio que incluya múltiples componentes del ecosistema. De acuerdo a ello, la “integridad ecológica”, un concepto que por sí solo denota unidad, totalidad y valor (Westra, 1995), se ha convertido en un popular enfoque de planificación para la conservación en muchas partes del mundo (Westra *et al.*, 2000; Manuel-Navarrete *et al.*, 2004; Borja *et al.*, 2009 en Reza y Abdullah, 2011). Así también ha sido utilizado para la evaluación de las marismas, en especial en Estados Unidos (e.g. Wigand *et al.* 1999; Young y Sanzone 2002; Faber-Langendoen *et al.*, 2006; Schroeder *et al.*, 2013; Neckles *et al.*, 2013). La integridad ecológica se puede definir como la capacidad para apoyar y mantener un ecosistema equilibrado e integrado en una región particular (Karr y Dudley 1981; Karr 1996; Parrish *et al.*, 2003) y es enfocado a englobar el análisis de la integridad física, química y biológica de los sistemas ecológicos. Si además dentro de su evaluación se considera la influencia humana, debido al carácter incluyente del concepto, la integridad puede servir como fundamento para orientar con base científica las acciones de conservación de la naturaleza y de planificación de los usos del suelo (Vélez y Gómez, 2008).

Actualmente la gran mayoría de las acciones destinadas a proteger los múltiples valores y beneficios de las marismas, están fundadas en el creciente

deterioro por perturbaciones de origen antrópico y natural, siendo el acelerado aumento del nivel del mar por efecto del cambio climático, uno de los más documentados en la literatura (Day *et al.*, 1995; Donnelly y Bertness, 2001; Reed, 2002; Craft *et al.*, 2009; Raposa *et al.*, 2016). Sin embargo, se debe considerar que las diferencias geográficas que dan lugar a una disponibilidad diferencial de energía, agua y nutrientes (Woodley, 2010), también pueden hacer variar los peligros y amenazas que afectan a estos ecosistemas. Ejemplo de ello pueden ser los efectos producidos por un alzamiento cosísmico, cuyos efectos son totalmente contrapuestos a los procesos de rápida erosión y/o ahogamiento originados por el aumento del nivel del mar (Reed, 1995; Morris *et al.*, 2002), y que pueden igualmente afectar de manera negativa a las marismas y otros ecosistemas costeros. Si bien esto no es comúnmente documentado en la literatura, existiendo pocos estudios que han evaluado tales efectos (ver Thilenius, 1995), un alzamiento cosísmico se constituye como un peligro natural que puede alterar y transformar abruptamente el paisaje costero, tal como lo demostró el pasado terremoto Mw=8,8 del 27 de Febrero del 2010 (27/F), ocurrido en la costa de Chile centro-sur. Como consecuencia de ello la marisma Tubul-Raqui, descrita como uno de los humedales más grandes de Chile y de la costa Oeste de América del Sur (CONAMA, 2003; Valdovinos *et al.*, 2010; Marín *et al.*, 2014), experimentó una serie de abruptos cambios morfológicos, ecológicos y ambientales como consecuencia de un alzamiento cosísmico de ~ 1,4 m (Quezada *et al.*, 2010; Farías *et al.*, 2010). Algunos servicios, tales como cultivo de algas y la navegación a través del humedal fueron totalmente perdidos, después del terremoto del 27/F (Marín *et al.*, 2014). A pesar de ello, abruptos cambios ambientales gatillados por desastres naturales pueden representar oportunidades de aprendizaje únicas sobre las respuestas morfológicas y ecológicas de estos ecosistemas. En este contexto, esta contribución presenta un método para evaluar la integridad ecológica de una marisma afectada por un alzamiento cosísmico, basado en la identificación de los atributos ecológicos clave, a nivel de paisaje, condición biótica y condición abiótica, los cuales son finalmente integrados en el Índice de Integridad Ecológica (IIE). De acuerdo a lo observado en Tubul-Raqui, y para abordar más específicamente la complejidad y particularidades de este tipo de

ecosistema, se desarrollaron los siguientes objetivos: a) elaborar un modelo conceptual sobre la estructura y funcionamiento de la marisma Tubul-Raqui y los efectos producidos por los estresores naturales y antrópicos b) identificar los atributos ecológicos clave de la marisma y sus indicadores asociados c) definir un conjunto de métricas multi-escala y basado en 3 niveles de aproximación diferentes (nivel 1, sensoramiento remoto; nivel 2, rápido o extensivo en terreno; nivel 3, intensivo en terreno) d) determinar puntajes y umbrales para cada métrica basados en los rangos de variaciones naturales de la marisma, en base a registros históricos e) elaborar una matriz de puntuación para clasificar e integrar las métricas, en una evaluación general de la integridad ecológica f) aplicar el índice de integridad ecológica, para el escenario pre-terremoto y post-terremoto 27/F. Un índice de integridad ecológica permitirá ayudar a visualizar la magnitud y la dimensión de los cambios a escala ecológica, lo cual se hace urgentemente necesario para determinar y fundamentar, las prioridades de conservación en el sistema Tubul-Raqui. Así también se espera que esta contribución permita orientar las decisiones sobre cuáles atributos ecológicos es importante seguir monitoreando, para evaluar la salud del ecosistema, proveyendo una herramienta de fácil aplicación para interpretar los datos de un monitoreo sistemático.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Área de estudio**

El humedal Tubul-Raqui es una marisma ubicada en el borde costero del extremo sur del Golfo de Arauco ( $37^{\circ}13' S$  y  $73^{\circ}26' O$ ), en el centro-sur de Chile (Figura 1). Se desarrolla sobre una extensa llanura de sedimentación fluvio-marina con depósitos del cuaternario reciente y se encuentra asociada al estuario del sistema hidrográfico homónimo de los ríos Tubul y Raqui, cuyas cuencas confluyen en la desembocadura. El humedal se encuentra ubicado en una zona climática de transición entre un clima templado mediterráneo cálido y un clima templado húmedo o lluvioso, que se desarrolla inmediatamente al sur del río Biobío (Inzunza, 2004 *sensu* Carrasco-Lagos, 2004). En esta zona

existen desde dos a cinco meses fríos y húmedos, en los cuales se concentra aproximadamente el 75% de las precipitaciones, las cuales alcanzan los 1.300 mm anuales entre otoño y primavera (Constabel, 1993). La marisma fue severamente afectada por el terremoto ocurrido el 27 de febrero del 2010, porque gran parte del humedal tuvo un alzamiento vertical de 1,4 m (Quezada *et al.*, 2010; Farías *et al.*, 2010).

Esto generó importantes modificaciones en el componente acuático del humedal, especialmente en la zona de pantanos intermareales que quedaron parcialmente desecados (Valdovinos *et al.*, 2010), y la desconexión de su compleja e intrincada red de drenaje, además de otras unidades de importancia como las pozas salinas (Vásquez *et al.*, 2017 *en preparación*). Hasta antes del terremoto, su superficie alcanzaba 2.238 hectáreas aproximadamente, entre zona de marisma y humedales dulceacuícolas. El sistema estuarino, de régimen micromareal, recibe sus principales aportes de agua dulce a través del río Raqui, aún en la estación de verano, mientras que en el río Tubul se constata una mayor influencia marina (Stuardo *et al.* 1992). Esta condición no ha cambiado posterior al terremoto, aunque con mucha menos influencia de las mareas y una disminución de las profundidades de los canales principales de los ríos, lo que ha generado la desconexión y pérdida de la superficie inundada de la red de canales de marea (Vásquez *et al.*, 2017 *en preparación*). La flora dominante es la gramínea *Spartina densiflora* conocida comúnmente como Llinto, de origen sudamericano (Mobberley, 1956; Bortolus, 2006 en Naranjo, 2008). Esta especie halófila suele encontrarse bajo la asociación vegetacional *Sacocornio-Spartinentum densiflorae* (San Martín *et al.*, 1992), ocupando más de un 90% de la cobertura en el sector de la marisma, no mostrando grandes señales de haber sido afectada por el terremoto (Valdovinos *et al.*, 2010; Vásquez *et al.*, 2017 *en preparación*). Los “espartales” son un elemento clave para la conservación del humedal, por tratarse de una especie ingeniera que modela fuertemente la estructura de los hábitats acuáticos (Valdovinos *et al.*, 2010). También se destaca su rol como productor, el cual es especialmente importante durante el invierno, donde los espartales mueren y se descomponen para convertirse en detrito que alimentará a los consumidores del medio acuático, como lo son los micro y macroinvertebrados.



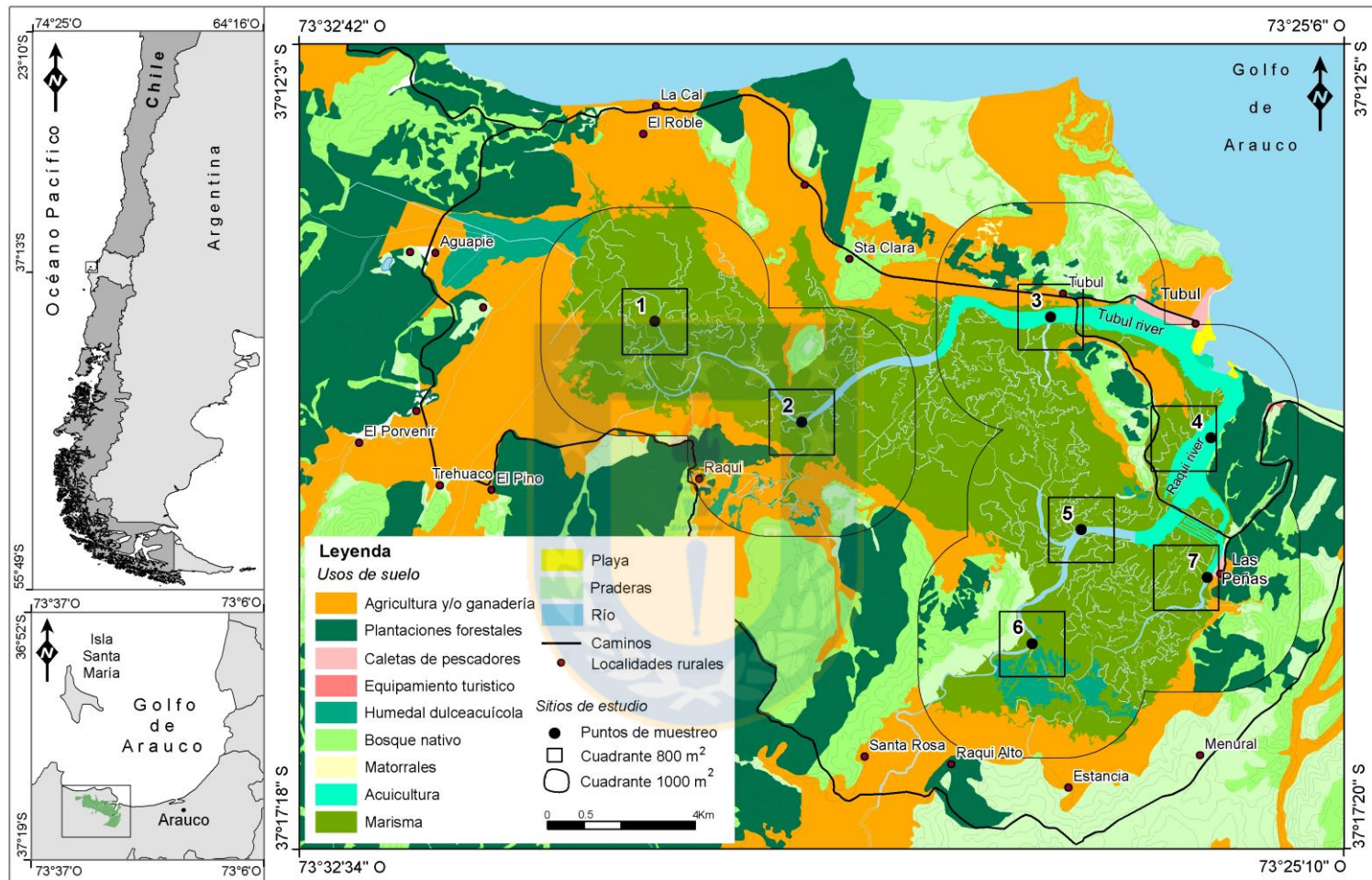


Figura 1. Localización de la marisma Tubul-Raqui. El paisaje de la marisma antes del terremoto del 27/F visualizado a través de los usos del suelo del año 2009. Los puntos rojos alrededor de la marisma simbolizan los caseríos dispersos a lo largo del eje correspondiente a la red vial. Se visualizan los 3 tipos de sitios de estudio utilizados: puntos de muestreo para mediciones de parámetros físico-químicos y de biota acuática; buffer 800<sup>2</sup> para análisis de estructura del paisaje y unidades morfológicas; buffer 1000<sup>2</sup> aplicado al buffer 800<sup>2</sup> para análisis de usos del suelo e influencia antrópica en el área.



La macrofauna bentónica de la marisma está compuesta principalmente por poliquetos de las familias Spionidae y Nereidae, los cuales alcanzaban elevadas biomásas, especialmente dominada por *Prionospio (Minuspio) patagonica* y *Perinereis gualpensis* (Sandoval, 2010; Díaz-Jaramillo *et al.*, 2015). Previo al alzamiento cosísmico también se registraba el Bryozoa incrustante estuarino *Conopeum sp.*, el Amphipoda *Paracorophium hartmannorum*, el crustáceo Decapoda *Hemigrapsus crenulatus* y el Cirripedia *Elminius kingii* (Valdovinos *et al.*, 2010). Las especiales condiciones geográficas y ecológicas de este humedal han permitido la presencia de un número fluctuante de especies de aves migratorias y residentes, entre las que destacan 31 familias y 84 especies de aves (Carrasco-Lagos, 2003, 2004; CEA, 2006; Vergara *et al.*, 2008, Carrasco-Lagos y Jiménez, 2009). Las familias de aves más representativas son Anatidae, Laridae y Ardeidae (Carrasco-Lagos, 2003, 2004). Además desde el año 2010 corresponde a uno de los 114 sitios IBAs (Área importante para la conservación de las aves, por sus siglas en inglés), por registrar la presencia de cuatro especies de aves acuáticas de importancia: *Numenius phaeopus* (Zarapito), *Larus pipixcan* (Gaviota de Franklin), *Rynchops niger* (Rayador), *Thalasseus elegans* (Gaviotín elegante) (BirdLife International, 2016), esta última considerada en la categoría de casi amenazada (IUCN, 2016). La importancia como zona de refugio y hábitat para numerosas especies de aves, es ampliamente valorada y reconocida como un servicio ecosistémico clave del humedal Tubul-Raqui (Marín *et al.*, 2014), razón por la que antes del terremoto del 27/F se proyectaba como futuro sitio RAMSAR (Martínez *et al.*, 2012) y estaba incluido entre los seis sitios prioritarios, a nivel nacional y regional, para la conservación como parte de la Estrategia Nacional de Biodiversidad (CONAMA, 2003). Además, desde el año 2006 se estableció un período de veda o prohibición de 30 años para la caza o captura de anfibios, reptiles, aves y mamíferos silvestres en el Humedal Tubul-Raqui, a través del decreto N°265 exento, de 2006 del Ministerio de Agricultura. En general, la marisma se encuentra poco intervenida, con excepción de las áreas que colindan con predios forestales y agrícolas (Carrasco-Lagos, 2003), mientras que Vásquez (2013) señala que el humedal Tubul-Raqui aún permanece con un bajo nivel de antropización

debido al carácter rural de esta zona, a pesar del extensivo desarrollo de la actividad forestal sobre las terrazas de abrasión marinas circundantes. Estas terrazas de abrasión marina, compartimentadas por tectónica de falla (Pineda, 1983), exhiben una alta tasa de reemplazo del bosque nativo por plantaciones exóticas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*. Esta es una actividad que ha tomado impulso desde principios de 1990 (Valdovinos et al. 2010) y a la par con el explosivo desarrollo forestal de la región, causando que aproximadamente un 50% de la superficie de la cuenca de los ríos Tubul y Raqui, se emplee para esta actividad (CONAMA, 2008). La actividad agrícola-ganadera presente en la parte alta de la marisma sobre las llanuras anegadizas, es desarrollada por la población dispersa en pequeños caseríos rurales (ver Figura 1), y es orientada mayormente al auto-consumo, para el mercado local y más recientemente, a la producción de quesos (Marín et al. 2014). Las únicas actividades económicas desarrolladas al interior de la marisma, se encuentran relacionadas al aprovechamiento de sus recursos por la comunidad local concentrada principalmente en la Caleta Tubul y Las Peñas (Figura 1). Estas dos caletas de pescadores constituyen los únicos asentamientos con características más urbanas (respecto a servicios y equipamiento básicos como luz, agua potable, alcantarillado, accesibilidad etc.) y con mayor densidad poblacional, registrando 2.461 habitantes (INE, 2002) de los cuales un 85% se concentra en Tubul. Las principales especies cultivadas y extraídas por la pesquería artesanal fueron el Pelillo (*Gracillaria chilensis*), el cual se cultivaba al interior de los canales estuariales, y el bivalvo Navajuela (*Ensis macha*) especie que era recolectada en esta misma zona y en el litoral cercano. El cultivo de Pelillo ha sido desarrollado desde 1960, alcanzando su máximo esplendor en la década de los 80' donde Chile se constituyó como el principal exportador a escala mundial (SERNAP, 1985). A raíz de ello, y para evitar la sobreexplotación del recurso, se creó la Asociación Gremial de Productores de Pelillo, una red organizada de la cual dependían alrededor de 1.500 personas, a través de una concesión marítima de 320 hectáreas regulada por la Subsecretaría de marina del ministerio de Defensa (Valdovinos et al., 2010). Tras el alzamiento cosísmico y tsunami del 27/F, los cambios en la profundidad y salinidad del sistema estuarial, ocasionaron la pérdida de las

áreas de cultivo de las principales especies cultivadas, siendo la más impactada la extracción de algas. Debido a las características antes descritas, se considera que la marisma Tubul-Raqui, hasta antes del alzamiento cosísmico, puede ser considerada como un área de referencia, para otorgar los rangos de variación natural, al poseer bajo nivel de intervención antropogénica, en comparación al resto de las marismas de la región. Los estuarios de Tubul y Raqui se han utilizado previamente como sitios de referencia en estudios de biomarcador con expresión en peces (Gavilán *et al.*, 2001), poliquetos (Díaz-Jaramillo *et al.*, 2011, 2015) y crustáceos (Díaz-Jaramillo *et al.*, 2013). Para determinar los rangos de referencia fueron fundamentales las investigaciones realizadas por Stuardo *et al.*, (1993) y Constabel (1993) sobre batimetría, parámetros físico-químicos y biológicos, y más actualmente Carrasco-Lagos (2003,2004) y los estudios realizados por el CEA (2006) donde se suman otros parámetros como la presencia y densidad de aves (Matus *et al.*, 2010; Schmitt *et al.*, 2011). Posterior al terremoto, las acciones y objetivos de conservación en torno a la marisma han sido temporalmente suspendidas (Marín *et al.*, 2014), razón por la que conocer el estado de salud del ecosistema es una necesidad crítica que ayudará a reactivar y orientar las medidas de recuperación y/o conservación.

## 2.2. Selección de indicadores

La selección de indicadores para evaluar la integridad ecológica fue basada principalmente en comprender cómo es la estructura, composición y funcionamiento del sistema marisma Tubul-Raqui. Esto fue logrado a través de la elaboración de un modelo conceptual basado en lo descrito en la literatura para ambientes de marisma (Odum, 1961,1988; Adam, 1990; Allen y Pye, 1992; Mitsch y Gosselink, 2000; Fagherazzi *et al.*, 2004), y de acuerdo a las investigaciones realizadas, en relación a la marisma Tubul-Raqui en particular (Alveal, 1988; Stuardo *et al.*, 1993; Constabel, 1993; Carrasco-Lagos, 2003, 2004; CEA, 2006; EULA, 2008; Vergara *et al.*, 2008; Carrasco-Lagos y Jiménez, 2009; Vásquez, 2009; Sandoval, 2010; Valdovinos *et al.*, 2010; Valdovinos y Sandoval, 2011; Díaz-Jaramillo *et al.*, 2011; Valdovinos *et al.*, 2012; Vásquez, 2013; Marín *et al.*, 2014). Lo anterior, fue complementado con

datos y observaciones no publicados de trabajo de campo realizado desde el año 2008 hasta la fecha, de colección personal de los autores. Para ello se elaboró un diagrama de flujo de energía de la marisma Tubul-Raqui (Figura 2.) según la simbología propuesta por Odum (1971), a lo cual se adicionó un compartimento más general, correspondiente al paisaje donde se desarrolla la marisma. En este gran compartimento se incluyen los factores de estrés identificados en el sistema, los cuales según Ondiviela *et al.* (2015) pueden ser definidos como agentes capaces de producir una cierta perturbación en el ecosistema y sus componentes. Los factores de estrés se encuentran relacionados a la influencia directa e indirecta del medio humano, así como también a la influencia del medio físico-natural, estando ampliamente representado por el alzamiento cosísmico. Para cada factor de estrés se determinó los posibles efectos sobre el ecosistema, basado en observaciones de campo y de acuerdo a lo documentado en literatura. El principal resultado de este modelo fue reconocer los componentes clave de la estructura, composición y funcionamiento del ecosistema, en relación a los principales factores de estrés que se producen en la marisma, con el fin de reconocer el conjunto más apropiado de indicadores para evaluar la integridad ecológica. También fueron examinadas las características de un conjunto de métricas, basadas en Andreasen *et al.* (2001) y consideradas también por Reza y Abdullah (2011), lo que contempla que sean multi-escala, fundamentadas en la historia natural, relevantes y útiles, flexibles, medibles y comprensivas. Los indicadores fueron divididos en tres niveles de intensidad de muestreo según lo desarrollado por Rocchio y Crawford (2009), con el objetivo de otorgar mayor flexibilidad a aquellos sitios que no han sido intensivamente estudiados y reconociendo que no todas las decisiones de conservación y de gestión necesitan los mismos niveles de precisión. Los niveles corresponden a: nivel 1, métricas que se pueden evaluar usando imágenes de sensores remotos, como satelitales o fotografías aéreas; nivel 2, métricas que requieren un muestreo en terreno, pero pueden utilizar datos cualitativos o semi-cuantitativos y nivel 3; métricas que requieren un enfoque de muestreo intensivo en terreno. Los elementos viables fueron divididos en tres grupos de evaluación (integridad a nivel de paisaje, biológica y física) e incluyen: uso del suelo, influencia de

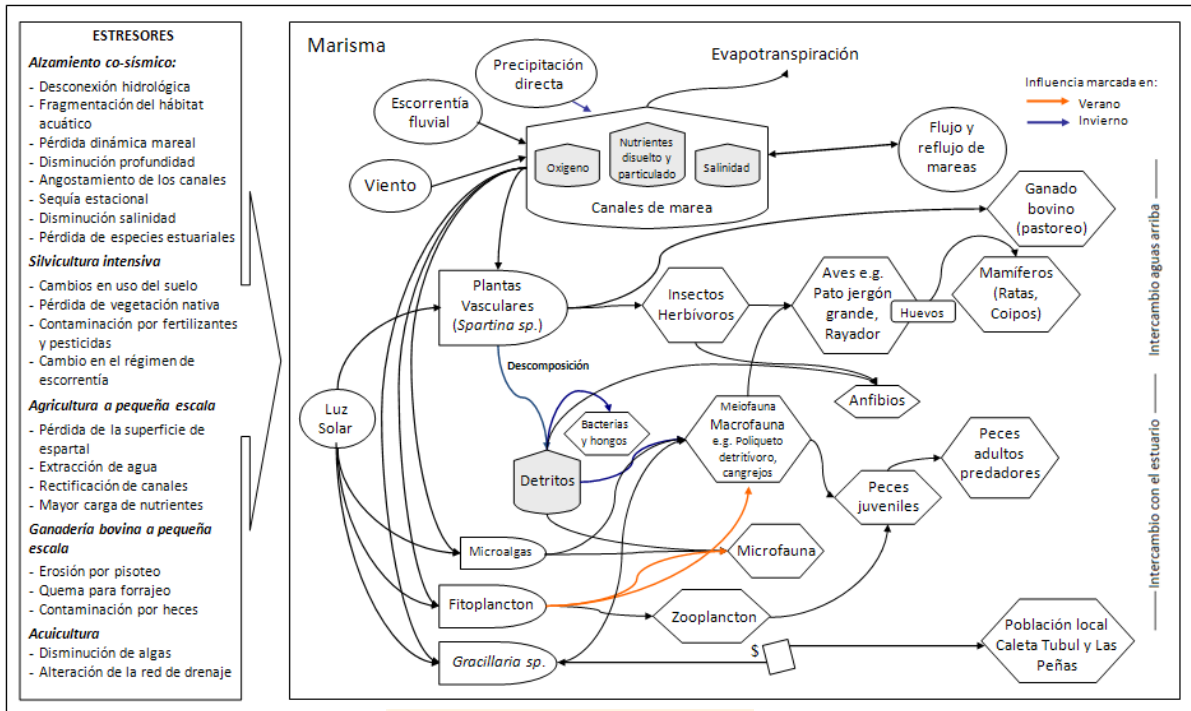


Figura 2. Modelo ecológico conceptual de la marisma Tubul-Raqui. Diagrama de flujo de energía (derecha) y estresores a nivel de paisaje relacionados a sus posibles efectos sobre la marisma (izquierda). Elaboración propia.

asentamientos humanos, caminos, superficie impermeable, conectividad, heterogeneidad, dominancia de la vegetación natural, alimento, agua dulce, bosque nativo, estética, biodiversidad, biodiversidad, cobertura de *Spartina densiflora*, presencia de flora invasiva u oportunista, abundancia de especie clave de macroinvertebrado, riqueza de taxa de macroinvertebrados, presencia de especie clave de ave residente, abundancia de aves migratorias, salinidad, rango de marea y lavado, profundidad canal principal, ancho canal principal, nivel de agua en unidades hidrológicas menores, alteraciones hidrológicas y presencia de fuentes cercanas de contaminación.

### 2.3. Evaluación de Integridad Ecológica

#### 2.3.1. Indicadores de integridad a nivel de paisaje

Diversos autores señalan la importancia del paisaje como contexto para estimar la integridad de los ecosistemas (Kay, 1993; Vélez y Gómez, 2008; Li y Tian, 2012). La integridad en este caso supone no solamente considerar los componentes naturales bióticos y abióticos del ecosistema, sino también

reconocer su conexión con el sistema socioeconómico. Basados en la interrelación del sistema humano, cultural y económico con el sistema físico-natural otorgado por la marisma y su paisaje adyacente. Se consideraron los indicadores de paisaje como un sistema de parámetros estructurales y funcionales que se pueden utilizar para evaluar las presiones, los estados y las respuestas del paisaje (ver Wascher 2000; Mander y Koduvere 2003; Mander et al. 2005). Basado en ello, la integridad a nivel de paisaje fue evaluada a través de métricas de composición (usos del suelo, asentamientos humanos, caminos y superficie impermeable), estructura (conectividad, heterogeneidad, naturalidad) y funcionamiento del paisaje (servicios ecosistémicos) (Tabla 1).

#### 2.3.1.1. Composición del paisaje

a) Usos del suelo: La intensidad de las actividades humanas en el humedal a menudo tiene un impacto proporcional en los procesos ecológicos que ocurren en el lugar (Rocchio y Crawford, 2009). A su vez, los usos de suelo antropogénicos pueden influenciar fuertemente el suministro de nutrientes y sedimentos a los ríos (Hauer y Lamberti, 2006), los cuales pueden expresarse en alteraciones sobre los humedales que de ellos se alimentan. Esta métrica fue medida utilizando como base los usos de suelo elaborados por Vásquez (2009) a partir de la clasificación propuesta por CONAMA-CONAF (1997). Para cada estación de trabajo se determinó un área de influencia de 1000 m<sup>2</sup> sobre el cuadrante de 800 m<sup>2</sup> utilizado por Vásquez *et al.* (2017 *en preparación*) para cuantificar los cambios morfológicos de la marisma post-terremoto. Las coberturas fueron actualizadas mediante fotointerpretación para el año 2009 y se elaboraron las coberturas para los años 2011 y 2012, utilizando como fuente de información las imágenes satelitales de alta resolución disponibles en Google Earth, por cortesía de Digital Globe. Las coberturas de información con referencia espacial, así como todo lo referente a información realizada en el nivel 3, fueron elaboradas utilizando el software ArcGIS versión 9.2, utilizando el sistema de referencia mundial WGS-84 en el Huso 18 Sur. Una vez generadas las coberturas correspondientes a los años 2009, 2011 y 2012 fueron clasificadas en usos de suelo con influencia/manejo antrópico (uso



Tabla 1. Índice de Integridad Ecológica elaborado para la marisma Tubul-Raqui. Se detallan las métricas seleccionadas y sus rangos para cada una de las tres categorías: Condición de Paisaje (naranja). Condición Biótica (verde) v Condición Abiótica (celeste).

Categoría	Atributo Ecológico Clave	Indicador y Métrica	Nivel	Definición	Rango de puntajes por criterio			
					Excelente ( A )	Bueno ( B )	Aceptable ( C )	Pobre ( D )
Condición del Paisaje	Composición del paisaje	Usos de suelo	1	% de área del uso de suelo adyacente que es empleado para actividades que pueden ejercer un grado de impacto en la marisma en (buffer 1000 m <sup>2</sup> )	0-15%	15,1-25%	25,1-40%	> 40%
		Influencia asentamientos humanos	1	Puntaje obtenido del Índice Influencia Asentamientos Humanos IIAH	12-9,1	9-7,1	7-5,1	5-2,5
		Caminos	1	Presencia de huellas, caminos de ripio o pavimentados (buffer 800 m <sup>2</sup> )	No registra	Huella de tránsito peatonal	Camino de ripio	Camino pavimentado
		Superficie impermeable	1	% de superficie impermeable (buffer 800 m <sup>2</sup> )	0%	1 a 2,5%	2,6-5%	>5%
	Estructura del paisaje	Conectividad	1	% de la red de canales de marea que mantiene contacto físico y transferencia de agua, medido en la cantidad de conexiones activas (buffer 800 m <sup>2</sup> )	100-90%	89,9-70%	70-50,1%	>50%
		Heterogeneidad	1	Cantidad de unidades morfológicas que se encuentran presentes (buffer 800 m <sup>2</sup> )	5	4	3-2	1-0
		Dominancia de la vegetación natural en el paisaje		% del área dominado por vegetación natural (buffer 800 m <sup>2</sup> )	100-80%	79,9-50%	49,9-30%	29,9-0%
	Funciones del paisaje (Servicios y bienestar humano)	Alimento	3	Producción de pescado, algas e invertebrados	Abundante	Normal	Escasa	Nula
		Agua Dulce	3	Almacenamiento y retención de agua; provisión de agua para irrigación y uso doméstico	Abundante	Normal	Escasa	Nula
		Bosque Nativo	3	Producción de troncos, leña, turba, forraje, combustible aglomerados	Abundante	Normal	Escasa	Nula
		Estética	3	Belleza del paisaje y potencial para el turismo	Alto valor, bien conservado	Con potencial	Escaso potencial, posible de recuperar	Paisaje altamente degradado y/o modificado
		Biodiversidad	3	Hábitat para especies residentes o transitorias de aves	> a 30 especies	30 a 25 especies	24 a 10 especies	< a 10 especies

Condición Biótica	Estructura de la comunidad	Cobertura <i>Spartina densiflora</i>	1, 2	% de cobertura de la asociación vegetal Sacocornio-Spartinentum densiflorae en el área de muestreo respecto al año de referencia (2009) (buffer 800 m <sup>2</sup> )	100-80%	80,1-65%	65,1-45%	< 45%
		Presencia/ausencia de flora invasiva u oportunista	1, 2	Se registra la presencia de especies invasivas u oportunistas, es decir, aquellas que comúnmente no se encuentran censadas en este sector (buffer 800 m <sup>2</sup> )	No registra	En muy baja a baja densidad, forma clusters aislados	En baja a media densidad, forma corredores	En media u alta densidad, forma corredores
	Composición de la comunidad	Abundancia de la especie clave macroinvertebrados: Polychaeta: Nereidae <i>Perinereis gualpensis</i>	3	Abundancia expresada en N/m <sup>2</sup> de la especie clave <i>Perinereis gualpensis</i>	> 100	99-50	49-5	< 4
		Riqueza de taxa de macroinvertebrados	3	Número de taxa de macroinvertebrados registrados	> 8	7 - 6	5 - 4	< 4
		Abundancia de especie clave de ave residente	3	Número de individuos de la especie clave de aves característica de la zona alta, media o alta de la marisma	> 300	200 - 100	100 - 1	No registra
		Abundancia de especie clave de aves migratorias	3	Número de individuos de aves migratorias en época invernal (Sólo zona intermedia y baja de la marisma)	> 400	400 - 100	100- 1	No registra
	Condición Abiótica	Hidrología y Geomorfología	Salinidad	3	Valores de salinidad en profundidad normales para condiciones estuariales	Valor normal	Hasta 5 unidades menor a lo registrado en normalidad	10 o más unidades menor a lo registrado en normalidad
Rango de marea y lavado			2	Estado de la intrusión de la marea hacia el interior del estuario	Ondas de marea son normales, sin obstáculos	Alguna modificación a la fluctuación natural, producto de control natural o artificial	Controlada por modificaciones en la línea de costa u alzamiento tectónico	Marisma impedida de la fluctuación normal de la marea
Profundidad del canal principal			3	Disminución del valor de batimetría promedio para la sección del canal principal respecto al año de referencia	Sin disminución	0,3 – 0,5 m	0,5 - 1 m	> 1 m

		Ancho del canal principal	3	% Disminución del ancho promedio para la sección del canal principal respecto al año de referencia (buffer 800m <sup>2</sup> )	1 - 5 %	5,1 - 15 %	15,1 - 45 %	> 45 %
		Nivel de agua en unidades hidrológicas menores	1	% de disminución del área del espejo de agua superando a las variaciones normales esperadas (mareas, precipitaciones) (buffer 800 m <sup>2</sup> )	0 - 5%	5,1-10%	10,1-25%	> 25%
		Alteraciones hidrológicas	1 2	Se registra la presencia o desarrollo de alteraciones hidrológicas como dragado, construcción de obras civiles o extracción de agua (buffer 1000 m <sup>2</sup> )	No se registra alteración	Alteraciones menores Ej. Agricultura de subsistencia	Alteraciones medianas Ej. Agricultura a mediana escala	Alteraciones grandes Ej. Dragado, Uso silvícola
		Presencia de fuentes de contaminación cercanas	1	Presencia de fuentes cercanas de contaminación (buffer 1000m <sup>2</sup> )	Fuente no detectada	Una o más fuentes difusas de bajo impacto	Una o más fuentes difusas de alto impacto	Fuente puntual (industrial, comercial, urbana etc.)

forestal, uso agrícola-ganadero, uso acuícola, asentamientos humanos, red vial, reconstrucción etc.) y usos del suelo que conservan naturalidad (bosque nativo, marisma, praderas, matorrales, áreas desecadas). De acuerdo a lo obtenido anteriormente, se calculó el porcentaje total del área que es empleada para actividades económicas o humanas que pueden ejercer un grado de impacto en la marisma.

b) Asentamientos humanos: La influencia de los asentamientos humanos dispersos en el área circundante a la marisma fue determinada a partir de la elaboración de un Índice de influencia de asentamientos humanos (IIAH) aplicado para cada estación. El índice considera 3 variables a las cuales asigna un determinado puntaje de acuerdo a los rangos establecidos (Tablas 2a, 2b y 2c). La distancia (Tabla 2a) se midió utilizando la herramienta regla de Google Earth, desde el centro de la estación hasta el centro de cada asentamiento. Para ello fue necesario en primer lugar, convertir y exportar el archivo con la localización georreferenciada de cada estación desde ArcGIS al formato compatible para ser visualizado en Google Earth. La posición hace referencia a la ubicación de la estación respecto a cada asentamiento, para lo cual se analizaron las imágenes Google Earth. Para definir el tipo de asentamiento (Tabla 2c), se utilizaron los datos sobre cantidad de habitantes y criterios establecidos por el Censo del año 2002 (INE, 2002), dividiendo los asentamientos en Pueblos, Aldeas y Caseríos. Para la categoría de caseríos, se elaboró una subdivisión según el número de viviendas observadas en las imágenes satelitales, y en concordancia a los criterios utilizados en la definición de los conceptos geográfico-censales del INE.

Tablas 2a, 2b y 2c. Variables del IIAH.

a)

Distancia (km)	Puntaje
< 3	5
2.9 - 2	4
1.9 - 1	3
> 1	1

b)

Posición	Puntaje
Río arriba	1
Mismo nivel	1
Canal vecino conectado	3
Río abajo	2

c)

Tipo de Asentamiento	Puntaje
Caserío de muy baja densidad (1 vivienda)	4,5
Caserío de baja densidad (4 a 2 viviendas)	4
Caserío de mediana densidad (9 a 5 viviendas)	3
Caserío de alta densidad (10 o más viviendas)	2
Aldea (301 y 1.000 habitantes)	1
Pueblo (1.001 y 5.000 habitantes)	0,5

Los puntajes obtenidos en cada variable finalmente son agregados en una sumatoria simple otorgando un puntaje final:

$$\text{IIAH} = (\text{Distancia} + \text{Posición} + \text{Tipo de Asentamiento})$$

El puntaje final se asocia a los siguientes rangos:

Tabla 3. Puntajes finales IIAH

Rango Puntajes	Categoría IIAH
2,5 a 5	Pobre
5,1 a 7	Aceptable
7,1 a 9	Bueno
9,1 a 12	Muy bueno

c) Superficie Impermeable: Los usos del suelo dentro o cerca de un humedal puede reducir la permeabilidad del suelo, afectando los flujos de agua superficial, impidiendo el flujo sub-superficial, y a las capas freáticas más bajas (Mack, 2001). Esta métrica se define como la superficie que no permite el drenaje natural del agua, debido a que se encuentra pavimentada o utilizada para construcción. La superficie total de Poblados, Camino pavimentado y Puentes, fue calculada utilizando la cobertura de Usos de Suelo descrita anteriormente, en base al cuadrante de 800 m<sup>2</sup>. La superficie total fue expresada en porcentaje (%) y separada en rangos (Tabla 1), los que fueron establecidos en función de lo observado en promedio para todos los sitios de estudio.

#### 2.3.1.2. Estructura del paisaje

a) Conectividad: El concepto de conectividad utilizado es el propuesto por Jain y Tandon (2010) quienes consideran que en un sistema geomorfológico, la

conectividad entre dos compartimentos estará definida por el contacto físico y por la transferencia de materiales. De acuerdo a ello, la conectividad fue evaluada para la red hidrográfica de la marisma, compuesta por el canal principal de los ríos y los canales de marea mayores y menores. Para ello se utilizaron los datos generados por Vásquez et al (2017 en preparación), correspondientes a coberturas digitales del canal principal del río y canales de mareas para los años 2009, 2011 y 2012. A partir de esta información se cuantificó la cantidad de conexiones posibles (nodos) entre los diferentes canales según lo propuesto por Adamus (2006), utilizando el año 2009 como referencia, y se cuantificó el número de conexiones activas en los dos años post-terremoto, definida por la presencia de agua (transferencia de materiales).

b) Heterogeneidad: Esta es una métrica desarrollada por Collins et al. (2006) y adaptada de Faber-Langendoen (2009), que considera que los sitios intactos, tienen una diversidad de ambientes físicos. Para la presente investigación, la heterogeneidad fue considerada como la cantidad relativa de unidades morfológicas presentes en el interior de la marisma, considerada como un mosaico heterogéneo de hábitat físico. Las unidades identificadas y presentes en todas las estaciones según el año de referencia (Vásquez *et al.*, 2017 en preparación), corresponden a: canal principal del río, canales de marea principales, canales de marea secundarios, pozas salinas y marisma (cobertura de *spartina densiflora*).

c) Dominancia de la vegetación natural en el paisaje: Esta métrica es una adaptación de lo propuesto por Neckles *et al.* (2013). Para su evaluación se utilizaron las coberturas de uso del suelo y clasificación elaboradas precedentemente, las que fueron acotadas para el área buffer de 800 m<sup>2</sup>. Se consideraron así, los usos del suelo que conservan vegetación no alterada por actividades económicas, correspondientes a: bosque nativo, marisma, praderas y matorrales.



### 2.3.1.3. Funcionamiento del paisaje

Los servicios ecosistémicos fueron evaluados por Marín et al. (2014) en relación a los cambios originados por el terremoto según la visión de la población local del humedal y sus alrededores. Estos corresponden a los 4 tipos definidos por la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (2005). En la presente investigación, se decidió trabajar con los que fueron considerados por la población local como elementos clave del ecosistema, representado tanto servicios culturales como de apoyo (Tabla 1). Según los mismos autores, estos corresponderían a indicadores de la salud del ecosistema debido a la capacidad de sostener biodiversidad y bienestar humano en un largo plazo.

### 2.3.2. Indicadores de la integridad biótica

Basado en la definición de integridad biológica primero propuesta por Karr y Dudley (1981) y Joergensen (2000), la integridad biológica, fue medida a través de la evaluación de los componentes biológicos considerados de importancia para la cadena trófica del sistema Tubul-Raqui. Así fue evaluada la flora principalmente representada por la especie *Spartina densiflora* como organismo productor primario y que a su vez, es importante para el hábitat físico por su rol de ingeniera de ecosistemas. En los organismos consumidores, se evaluó a los macroinvertebrados como consumidor primario, destacando la presencia de los Poliquetos de la familia *Nereididae* como especie de importancia en los estuarios (Díaz-Jaramillo et al., 2015), y a las aves como consumidor secundario, por encontrarse un amplio registro de su presencia y constituir una especie clave para la consideración de la marisma Tubul-Raqui como área de importancia internacional según los criterios de la Convención Ramsar (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013).

#### 2.3.2.1. Estructura de la comunidad

a) Cobertura de *Spartina densiflora*: La superficie total de espartal, compuesta por la asociación vegetacional *Sacocornio-Spartinentum densiflorae* (San Martín et al. 1992) fue determinada utilizando la cobertura de uso de suelo

generada anteriormente. Se utilizó el año 2009 como superficie de referencia para determinar los posibles cambios.

b) Presencia/ausencia de flora invasiva u oportunista: Las plantas invasoras pueden infligir un conjunto de daños ecológicos a las especies nativas, incluyendo la pérdida de hábitat, pérdida de biodiversidad, el agotamiento de recursos, la alteración de la biomasa, la productividad y el ciclo de nutrientes (Dukes y Mooney 1999). En especial fue considerada esta métrica, debido a que por efecto del alzamiento cosísmico quedó expuesta una extensa área de fondos emergidos disponibles para ser colonizados por vegetación invasiva u oportunista. Ello sumado a un descenso en las condiciones de salinidad del agua, ha generado las condiciones para la colonización de especies que anteriormente estaban impedidas de sobrevivir en este ambiente, tal como lo indican los registros de Sandoval (2010) y Valdovinos et al. (2010) y observaciones en terreno. Para el análisis de la vegetación se utilizó principalmente la observación mediante sensoramiento remoto, determinando la densidad de la colonización a través de la morfología de los parches emergentes, formando clusters aislados o corredores consolidados de baja a alta densidad.

#### 2.3.2.2. Composición de la comunidad

a) Abundancia de la especie clave de macroinvertebrados: De acuerdo a lo registrado en literatura (Sandoval 2010; Valdovinos et al. 2010; Díaz-Jaramillo et al. 2015) se determinó que el gusano Poliqueto de la familia Nereididae *Perinereis gualpensis*, será utilizado como especie clave en el sistema Tubul-Raqui. Ellos son clasificados como especie clave, debido a su importante rol como fuente de alimento y en los procesos biogeoquímicos (Banta & Andersen, 2003; Amiard-Triquet & Rainbows, 2009 en Díaz-Jaramillo et al. 2015). Se utilizaron los muestreos realizados por Sandoval (2010) y Valdovinos et al. (2011, 2012), antes y posterior al terremoto, donde los valores de abundancia son expresados en N/m<sup>2</sup>.

b) Riqueza de taxa de macroinvertebrados: Se utilizó la riqueza expresada como número de especies encontradas en los muestreos realizados por Sandoval (2010) y Valdovinos et al. (2011-2012). De acuerdo a lo descrito en estas investigaciones, se determinó que 8 es el número óptimo de especies presentes en la marisma entre las clases Amphipoda, Bivalvia, Decapoda, Gastropoda, Insecta, Oligochaeta y Polychaeta.

c) Aves: Las aves son sensibles a alteraciones en su hábitat (Wiest 2010), debido a ello, los cambios registrados en las poblaciones de aves, han mostrado ser buenos indicadores de cambios ambientales (Verner 1984, Morrison 1986). DeLuca et al. (2004) señala que los ensambles de aves, han sido utilizados como efectivos indicadores de la integridad biológica en ecosistemas de humedales. De acuerdo a ello, se determinó una especie de ave residente (Tabla 4) y ave migratoria (Tabla 5) representativa o clave, de acuerdo a la zona donde se ubica cada estación.

Tabla 4. Especie clave de ave residente por cada zona de la marisma.

Zona de la marisma	Sitios de estudio	Especie clave de ave residente	IUCN (2015)	Criterios de Protección y Estado de conservación (SAG 2006)	Fuente
Baja, cercana a desembocadura	E3, E4	Cormorán o Yeco ( <i>Phalacrocorax brasilianus</i> )	LC Menor riesgo	Sin Información	Estudios de Línea Base del humedal Tubul-Raqui (CEA, 2006, Octubre - Noviembre) y CNAA 2012 (Febrero)
Intermedia	E2, E5, E7	Pato jergón grande ( <i>Anas georgica</i> )	LC Menor riesgo	Sin Información	
Alta	E1, E6	Queltehue ( <i>Vanellus chilensis</i> )	LC Menor riesgo	E, B	

Tabla 5. Especie clave de ave migratoria por cada zona de la marisma.

Zona de la marisma	Sitios de estudio	Especie clave de ave migratoria (verano)	IUCN (2014)	Criterios de Protección y Estado de conservación (SAG 2006)	Fuente
Baja, cercana a desembocadura	E3, E4	Rayador ( <i>Rynchops niger</i> )	LC Menor riesgo	S	Censos Neotropicales de Aves Acuáticas (CNAA) Julio 2009 y 2011 y Febrero 2012
Intermedia	E2, E5, E7	Pitotoy chico ( <i>Tringa flavipes</i> )	LC Menor riesgo	B, S	
Alta	E1, E6	Sin datos			

\* Abreviaturas de criterios de protección: E = Benéfica para la Mantenición del Equilibrio de los Ecosistemas Naturales, B = Beneficiosa para la Actividad Silvoagropecuaria, S = con densidades poblacionales reducidas (SAG, 2006).

Para el caso de las aves migratorias, sólo fueron consideradas las estaciones de la zona intermedia y cercanas a la desembocadura, y en el período de verano, debido a que la principal fuente de información (CNAA 2009, 2011, 2012) realiza los muestreos únicamente en estas zonas.

### 2.3.3. Indicadores de la integridad abiótica

El último de set de métricas, corresponde a la componente abiótica, reflejando principalmente la dinámica entre el flujo de agua y las formas del relieve, las que fueron altamente afectadas por el alzamiento cosísmico del 27/F. Así la integridad física se abordó principalmente a través de la evaluación de los cambios hidrológicos y morfológicos, según lo propuesto por Rabeni (2000). A su vez, se debe considerar que los cambios en la hidrología y geomorfología, proporcionan información importante sobre el futuro estado biótico y la condición del paisaje (Young y Sanzone, 2002).

#### 2.3.3.1. Hidrología y geomorfología

a) Salinidad: En los sistemas de agua salobre como los estuarios y marismas, los patrones de salinidad están determinadas por las corrientes de agua y las características de mezcla (subproductos de la hidrodinámica y la geomorfología), los que a su vez determinan la idoneidad del hábitat para las

comunidades bióticas (Young y Sanzone, 2002). De acuerdo a ello, y debido al impacto del alzamiento cosísmico sobre esta variable, fue considerada como una métrica de importancia para medir el estado de las características físico-químicas del agua. Para ello, fueron utilizados los datos de los muestreos realizados por Sandoval (2010) y Valdovinos et al. (2011,2012), quienes realizaron mediciones in situ de salinidad, durante pleamar en los canales principales de los ríos. Esta información, fue contrastada con los muestreos realizados por Stuardo et al. (1993) y Constabel (1993), para establecer una condición de referencia, la que fue determinada según la ubicación del sitio de muestreo en las diferentes zonas de la marisma (Tabla 7). El valor de salinidad para los canales de marea, no fue considerado debido a que ningún estudio hasta la fecha, ha realizado la medición de este parámetro en estas unidades.

b) Rango de marea y lavado: Esta métrica, se relaciona con la dinámica de mareas natural de los sistemas estuarinos, y es evaluada también por Carlisle (1998) y Neckles et al. (2013) para determinar la integridad ecológica de marismas. Básicamente determina si la intrusión de la marea aguas arriba, dominado por un régimen micromareal en el caso de Tubul-Raqui, se realiza de manera normal o encuentra algún impedimento, tal como lo propone Carlisle (1998). En este caso, también se consideran las perturbaciones naturales como causantes de impedimento para el régimen de mareas. Los rangos naturales para cada estación, se encuentran definidos en la Tabla 6 según lo documentado por Stuardo et al. (1993).

Tabla 6. Rangos de variación natural establecidos para los 7 sitios de estudio, respecto a Salinidad, Rango de marea y lavado y Profundidad.

Sitio de estudio	Zona de la marisma media o <i>Schorre</i>	Salinidad (UPS)	Máx. Profundidad (Marea alta)	Rango de marea y lavado
E3, E4	Marisma baja	Polihalino > 28	3 - 2 m	Micromareal 2 veces al día
E2 (sólo invierno), E5, E7	Marisma intermedia	Mesohalino < 28 - 5	2 - 2,5 m	Micromareal 2 veces al día
E1 (sólo invierno) E6	Marisma alta	Mesohalino - Oligohalino < 20 - 0,5	2 - 1,5 m	Micromareal Sólo en pleamar

c) Profundidad del canal principal: considerada como una métrica de expresión directa del impacto del alzamiento cosísmico, y como indicador importante de la disponibilidad de hábitat para los organismos acuáticos. Se utilizaron las mediciones realizadas por Sandoval (2010) y Valdovinos et al. (2011,2012), contrastados con la referencia entregada por los muestreos realizados por Stuardo et al. (1993). A partir de estas fuentes de información, se determinaron los valores contenidos en la Tabla 6.

d) Ancho del canal principal: del mismo modo de la métrica anterior, el ancho del canal principal, se relaciona a la disponibilidad de hábitat para los organismos acuáticos y su disminución, se traduce en la desconexión con unidades hidrológicas menores. El ancho del canal principal fue medido sobre las imágenes satelitales obtenidas de Google Earth, utilizando la herramienta de medición de ArcGIS 9.2, sobre el punto central de los sitios de estudio.

e) Nivel de agua en unidades hidrológicas menores: las unidades hidrológicas menores, constituyen la complejidad que a menudo confiere la importante diversidad biótica en un sistema fluvial. Se utilizaron las mediciones realizadas por Vásquez et al. (2017 en preparación), respecto a la pérdida de las unidades hidrológicas menores, debido a la disminución de la superficie de agua. Teniendo el año 2009 como referencia, se calculó el porcentaje de pérdida para cada área buffer de 800 m<sup>2</sup>.

d) Alteraciones hidrológicas: Los cambios en la cantidad de agua, calidad del agua y estructura física del canal, llevan casi sin falta a cambios en la composición de la comunidad biótica, por lo general con una reducción de la diversidad biológica del ecosistema acuático (Boon 1992 en Maddock 1999). Las alteraciones hidrológicas son consideradas como alteraciones antropogénicas, que van desde alteraciones menores como la rectificación y canalización de aguas para la agricultura de pequeña escala, a grandes alteraciones como relleno de canales para la construcción, medido en un radio de distancia de 500 m.



e) Presencia de fuentes cercanas de contaminación: Análogo a lo propuesto por Carlisle (1998) sobre principales fuentes posibles de contaminación, fueron consideradas fuentes de contaminación todas aquellas actividades antrópicas que rodean al humedal, en especial la agricultura, silvicultura, ganadería y presencia de asentamientos humanos rurales. Esto es importante a considerar, debido a que los humedales a menudo se encuentran en las zonas bajas del paisaje, actuando como puntos de recepción para las fuentes de sedimentos, nutrientes y otros contaminantes situados en las zonas altas (Nixon, 1986). La presencia de fuentes cercanas fue determinada a través de la cobertura de usos de suelo y analizando las imágenes satelitales Google Earth, en un radio de 1,5 km desde el centro de la estación, utilizando un área buffer de 1500 m generada en ArcGIS 9.3.

#### 2.4. Aplicación del IIE

Se determinaron 7 sitios de estudio (Figura 1) los que son concordantes con las estaciones descritas en la literatura (Stuardo et al. 1993; Sandoval, 2010; Valdovinos y Sandoval, 2011). Los sitios están uniformemente distribuidos a lo largo del cauce principal de los ríos Tubul, Raquí y estero Las Peñas, abarcando desde la zona baja hasta la zona alta de la marisma. La aplicación del índice fue realizada sobre un área de 1000 m<sup>2</sup>, teniendo en consideración las múltiples escalas utilizadas para cada métrica, por lo que se seleccionó esta área como zona representativa e intermedia de los distintos niveles. Para medir los efectos originados por el alzamiento cosísmico del 27/F, se aplicó el IIE en un año anterior al terremoto, correspondiente al año 2009, y a los dos años posteriores, correspondientes a los años 2011 y 2012. Los años seleccionados corresponden al registro temporal de imágenes satelitales disponibles para descargar de Google Earth. Para aplicación del IIE fue elaborada una hoja de puntuaciones para cada estación (Tabla 7), donde se determinó un puntaje individual para el contexto de paisaje, condición biótica y condición abiótica, los cuales fueron agregados en una sumatoria simple para obtener el puntaje final del IIE (Tabla 1). El puntaje final fue categorizado en los siguientes rangos indicativos del estado de salud:

Tabla 7. Rango de puntajes finales del Índice de Integridad Ecológica aplicado a la marisma Tubul-Raqui.

Índice de Integridad Ecológica	
Rango de Puntajes	Estado de salud
19,75 - 15,9	Excelente
15,8 - 11,86	Bueno
11,85 - 8,0	Aceptable
7,9 - 3,95	Pobre

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos de la aplicación del Índice de Integridad Ecológica (Tabla 1), elaborado para evaluar la salud de la marisma Tubul-Raqui afectada por el alzamiento cosísmico del 27/F, son visualizados en las Figuras 3, 4 y 5 y en los Gráficos 1 a 7. Para el año 2009, pre-terremoto, la marisma poseía una integridad ecológica en la categoría de “Excelente” en todos los sitios de estudio (Figura 3). El valor más alto obtenido en la aplicación del IIE en este año corresponde al sitio 5 (IIE = 19,10) ubicado en la zona intermedia de la marisma del río Raqui. Esta zona recibe muy poca influencia antrópica, tanto por la casi nula presencia de asentamientos humanos y caminos, como por el bajo porcentaje de superficie empleada en actividades económicas, que ejercen algún un grado de impacto en la marisma, inferior al 10% del área total. Este valor, es seguido por el sitio de estudio 2 (IIE = 18,55) localizado igualmente en la zona intermedia de la marisma, pero del río Tubul, el cual se encuentra algo más influenciado por la presencia antrópica, principalmente dada por la actividad agrícola-ganadera desarrollada en las llanuras circundantes, con una superficie total de 16,7% empleada para esta actividad. Los valores más bajos obtenidos para el año 2009, se registran en los sitios ubicados en la cercanía de la desembocadura de ambos ríos, correspondientes a los sitios 3 (IIE = 16,45) y 4 (IIE = 16,80), más el sitio 7 (IIE = 16,65) localizado en el estero Las Peñas, en la parte intermedia de la marisma. Esto, es concordante con la presencia de los asentamientos humanos de mayor densidad en el área de estudio, según los datos censales del INE (2002), correspondientes a la Caleta Tubul con 2.200 habitantes, situado 1 km río abajo del sitio 3, y a la Caleta Las Peñas con 261 habitantes, ubicada junto al sitio 7 y 1,4 km río arriba del sitio 4 (Figura 1).

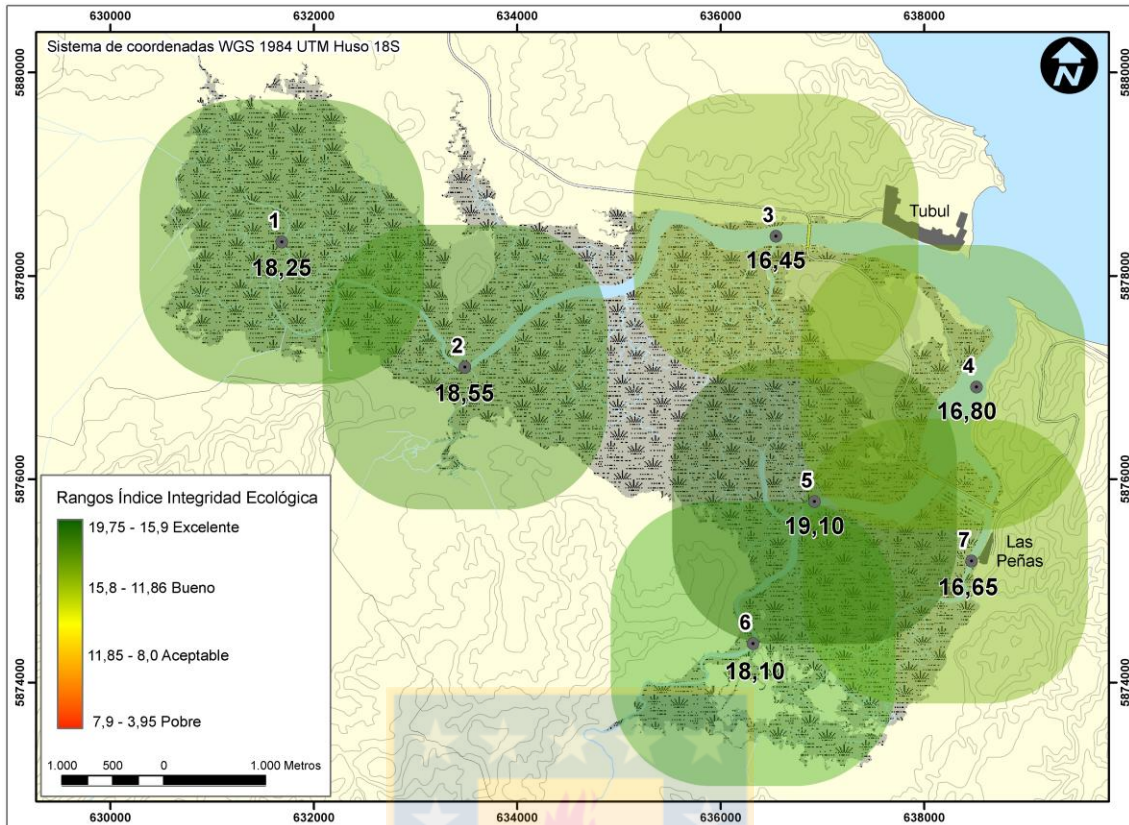


Figura 3. Aplicación del Índice de integridad ecológica en la marisma Tubul-Raqui en el año 2009. El año 2009 constituye la condición de referencia y es anterior al alzamiento cosísmico del 27/F

Para el año 2011, posterior al alzamiento cosísmico del 27/F, el estado de salud de la marisma disminuyó notablemente en todos los sitios de estudio (Figura 4). Los valores obtenidos de la aplicación del IIE van desde la categoría de “Bueno” para los sitios 1, 2, 4, 5 y 6 hasta la categoría de “Aceptable” como se observa en los sitios 3 y 7. La principal variable explicativa de esta generalizada disminución en el período 2009-2011 es la condición abiótica, la cual descendió -2,3 puntos en promedio, lo cual es bastante, teniendo en consideración que el máximo puntaje obtenido para esta variable en condiciones ideales, es de 5 puntos (ver Tabla 8). El sitio de estudio que mayor declinación registró en esta variable, fue el sitio 3 con -3,4 puntos (Gráfico 3). Esta disminución es seguida por la condición de paisaje, que en algunos casos registró una disminución similar como se observa en los sitios 5 y 7 (Gráficos 5 y 7), con una declinación promedio de -1,8 puntos. El sitio 7 fue el que mayor disminución registró con -2,35 puntos (Gráfico 7). La condición biótica, a pesar de disminuir en todos los sitios de estudio, fue el atributo que menos varió,

siendo los sitios 2 y 5 (Gráficos 2 y 5), los que mayor declinación presentaron (-1,15 puntos para ambas), con una declinación promedio de -0,8 puntos.

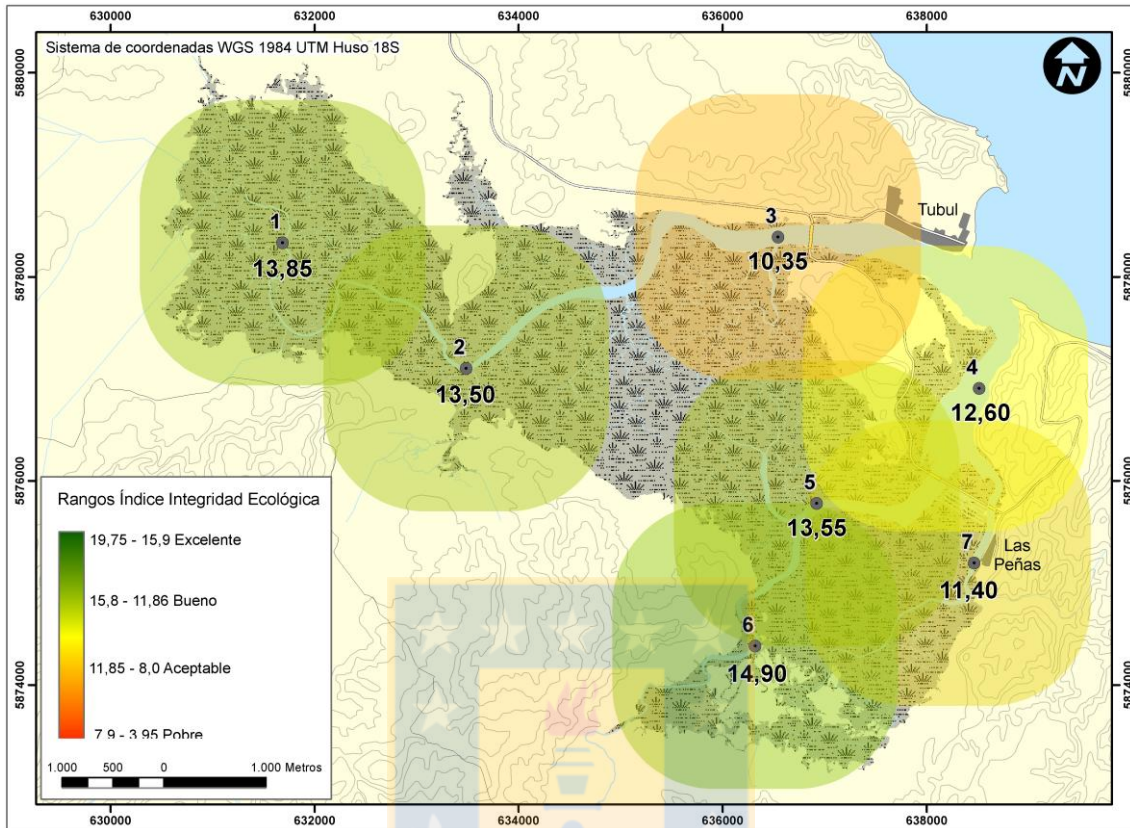


Figura 4. Aplicación del Índice de integridad ecológica en el año 2011 en la marisma Tubul-Raqui. El 2011 corresponde al escenario 18 meses después del terremoto del 27/F.

La estación que menor declinación registra respecto al puntaje final del IIE es la estación 6 (-3,2 puntos, gráfico 6), también correspondiendo al sitio con el valor más alto del año 2011 (IIE = 14,90). Por otro lado, se destaca la acentuada declinación del sitio 3 con -6,1 puntos, siendo el que mayor variación registró respecto al valor del IIE del año 2009. Además, los valores más bajos del IIE nuevamente se concentran en el mismo eje, determinado por la cercanía a los asentamientos humanos de mayor densidad del área, y cercano a la desembocadura del sistema Tubul-Raqui, sitios 3,4 y 7.

Para el año 2012, la marisma mantiene su estado de salud entre las categorías “Bueno” y “Aceptable” (Figura 5), donde la mayoría de los sitios continuaron declinando los valores del IIE. Sin embargo, esto fue de manera mucho menos acentuada que en el período 2009-2011, con una declinación promedio de -0,5 puntos, muy inferior a la declinación promedio del período anterior (-4,8



puntos). Entre el período 2011-2012, la variable que más contribuyó a la baja en el valor del IIE fue la condición de paisaje, con una declinación promedio de -0,5 puntos para el total de los sitios de estudio, siendo la mayor disminución registrada en el sitio 1 (-1,25 puntos, gráfico 1), seguido por el sitio 2 (-1 puntos, gráfico 2) en comparación al año 2011. La condición abiótica registró una declinación total promedio de -0,2 puntos; sin embargo, esta tendencia no fue observada en toda la marisma debido a que los sitios 5 y 7 exhiben una tendencia, aunque leve, a la recuperación (Gráficos 5 y 7). Ambos sitios registran un alza de 0,15 puntos, mientras por el contrario el sitio 6, registra una declinación de -0,95 puntos, siendo la máxima baja observada para el total de los sitios (Gráfico 6). La condición biótica por su parte, registra una leve alza de 0,2 puntos en el promedio total de los sitios, con un incremento del valor observado para el año 2011, en los sitios 5 (1 punto), 6 (0,25 puntos) y 7 (0,95 puntos). La recuperación de estos sitios se encuentra dada por un incremento en el registro de aves tanto residentes como migratorias, así como también por un incremento en el nivel de agua de los canales principales de los ríos. El sitio 5, a pesar de la alarmante declinación del estado de salud registrado en el período anterior, fue el que más aumentó el valor del puntaje final del IIE, junto con el sitio 7 (0,65 puntos en promedio), convirtiéndose nuevamente en el sitio mejor conservado de los 7 sitios estudiados después del alzamiento cosísmico del 27/F, con un valor final de 14,2 puntos (Gráficos 5 y 7). Las estimaciones para el período 2009-2012 indican que el valor del IIE tuvo una declinación total promedio de -5,4 puntos, siendo la condición abiótica la que mayor contribución da a esta tendencia, con una declinación promedio de -2,5 puntos, seguida por la condición de paisaje con -2,3 puntos y en último lugar, la condición biótica con -0,6 puntos de declinación promedio. De acuerdo a ello, la condición biótica fue la variable del IIE que menos varió en el total promedio del período analizado, siendo la principal contribución a mantener el estado de salud del sistema, los años posteriores al 27/F.

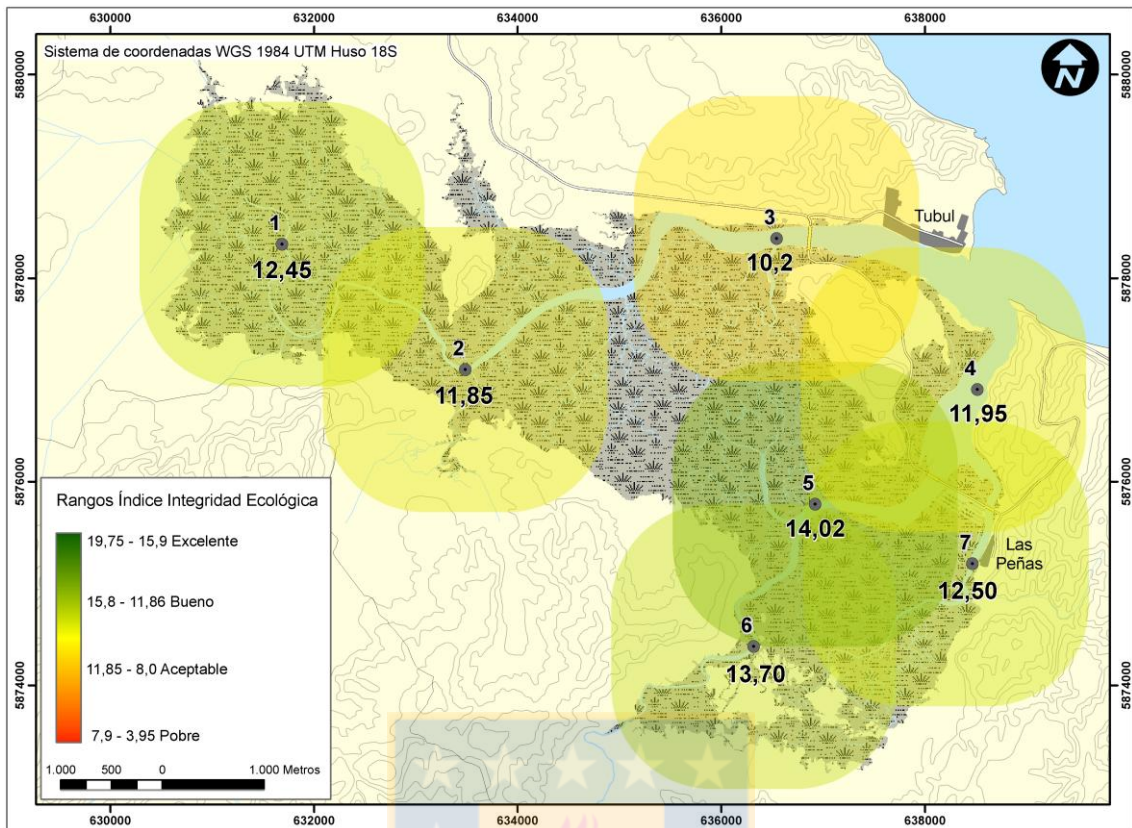


Figura 5. Aplicación del Índice de integridad ecológica en el año 2012 en la marisma Tubul-Raqui. El año 2012 corresponde al escenario 23 meses después del terremoto del 27/F.



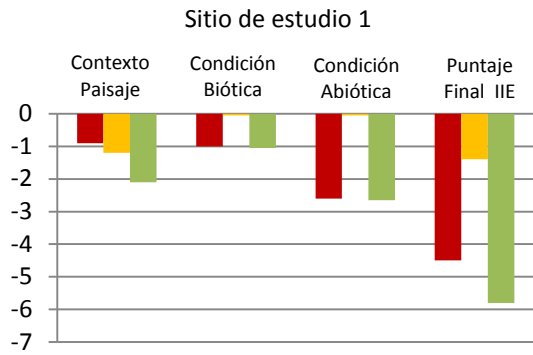


Gráfico 1. Cambios por período SE 1.

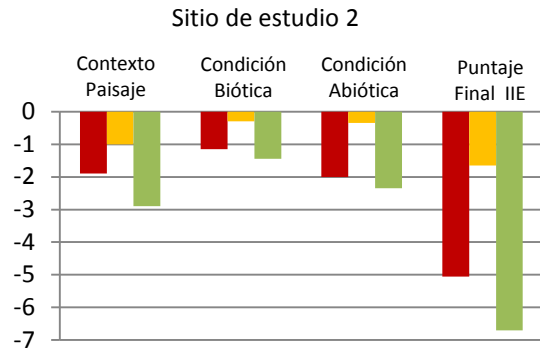


Gráfico 2. Cambios por período SE 2.

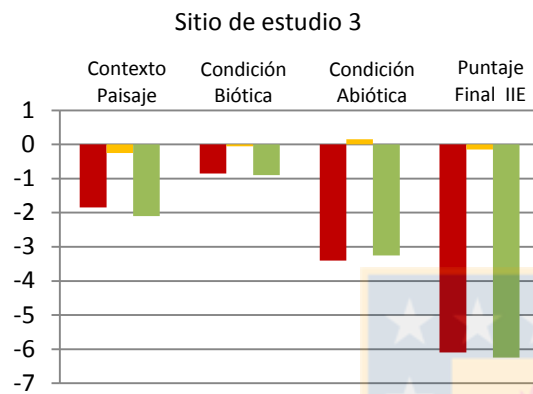


Gráfico 3. Cambios por período SE 3.

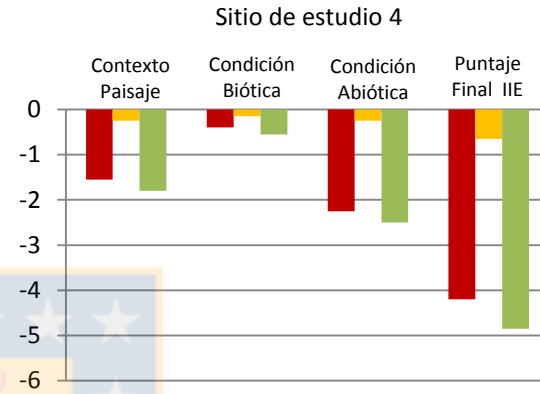


Gráfico 4. Cambios por período SE 4.

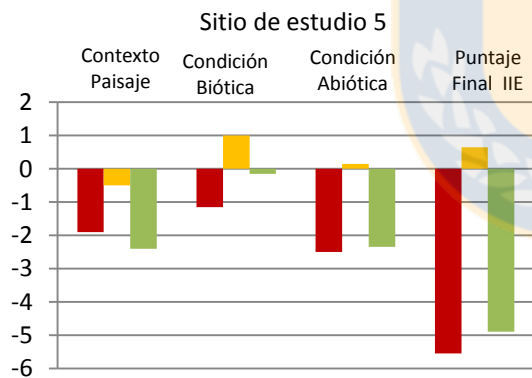


Gráfico 5. Cambios por período SE 5.

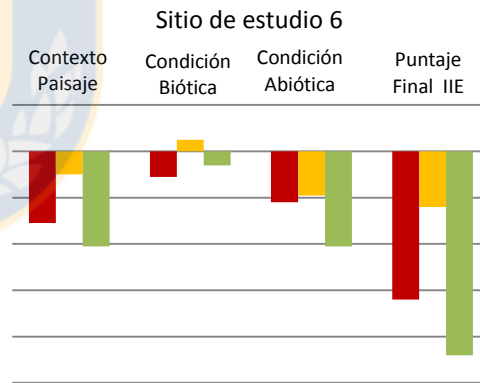


Gráfico 6. Cambios por período SE 6.

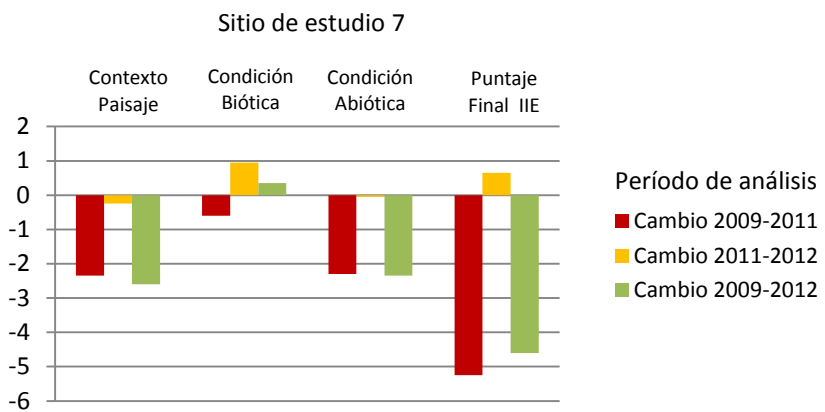


Gráfico 7. Cambios por período SE 7.

Tabla 8. Ejemplo de hoja de puntuaciones para el IIE en condiciones ideales. Se asigna un determinado peso a cada métrica, respecto a su nivel de importancia como componente del ecosistema.

Indicador y Métrica	Nivel	Rango de puntajes				Peso	Puntuación	Puntaje ponderado
		A	B	C	D			
Usos de suelo	1	5	4	3	1	0,15	5	0,75
Influencia asentamientos humanos	1	5	4	3	1	0,15	5	0,75
Caminos	1	5	4	3	1	0,1	5	0,5
Superficie impermeable	1	5	4	3	1	0,1	5	0,5
Conectividad	1	5	4	3	1	0,2	5	1
Heterogeneidad	1	5	4	3	1	0,25	5	1,25
Dominancia de la vegetación natural en el paisaje	1	5	4	3	1	0,2	5	1
Alimento	3	5	4	3	1	0,2	5	1
Agua Dulce	3	5	4	3	1	0,1	5	0,5
Bosque Nativo	3	5	4	3	1	0,1	5	0,5
Estética	3	5	4	3	1	0,1	5	0,5
Biodiversidad	3	5	4	3	1	0,2	5	1
Puntajes de Contexto de Paisaje	Puntaje Total =							9,25
Cobertura Spartina densiflora	1, 2	5	4	3	1	0,25	5	1,25
Presencia/ausencia de especies de vegetación invasivas (oportunistas)	1, 2	5	4	3	1	0,1	5	0,5
Abundancia de la especie clave macroinvertebrados: Polychaeta: Nereididae Perinereis gualpensis	3	5	4	3	1	0,2	5	1
Riqueza de taxa de macroinvertebrados	3	5	4	3	1	0,15	5	0,75
Presencia/ausencia de especie clave de ave residente	3	5	4	3	1	0,2	5	1
Abundancia de aves migratorias	3	5	4	3	1	0,2	5	1
Puntajes de Condición biótica	Puntaje Total =							5,5
Salinidad	3	5	4	3	1	0,2	5	1
Rango de marea y lavado	3	5	4	3	1	0,15	5	0,75
Profundidad del canal principal	2	5	4	3	1	0,1	5	0,5
Ancho del canal principal	1	5	4	3	1	0,1	5	0,5
Nivel de agua en unidades hidrológicas menores	1	5	4	3	1	0,15	5	0,75
Alteraciones hidrológicas	1 2	5	4	3	1	0,15	5	0,75
Presencia de fuentes de contaminación cercanas	1	5	4	3	1	0,15	5	0,75
Puntajes de Condición abiótica	Puntaje Total =							5
Puntaje Final (9,25 + 5,5 + 5) =								19,75

#### 4. Discusión

La presente contribución propone un método para evaluar la integridad ecológica de una marisma recientemente perturbada por un alzamiento cosísmico de 1,4 m (Quezada et al. 2010; Farías et al. 2010) a meso escala o escala de paisaje. Sobre la base de un método que sistemáticamente establece cómo es la estructura y funcionamiento de la marisma, para luego determinar los factores de estrés, donde el principal agente detonante lo constituye un terremoto, el método permite la evaluación y proporciona una estimación del efecto producido por el impacto del alzamiento cosísmico, sobre la integridad ecológica, sin dejar de lado los efectos que la influencia antrópica puede generar sobre el estado de salud del sistema. Elaborar un método para evaluar los efectos de una catástrofe natural, sobre un tipo de ecosistema que normalmente justifica las acciones de conservación debido a los impactos humanos o por el acelerado aumento del nivel del mar, constituye sin lugar a dudas todo un desafío. Incluir los efectos de las perturbaciones naturales, es de importancia para el mantenimiento de la integridad ecológica (Stockdale et al. 2016), pues en su inclusión se reconoce la naturaleza dinámica de los sistemas ecológicos. Las perturbaciones son ecológicamente importantes, cuando la huella que dejan en el sistema ecológico es grande en el área o persiste por un tiempo muy largo, o cuando la perturbación es una parte integrante del sistema ecológico (Young y Sanzone 2002). En el caso de Tubul-Raqui, la perturbación natural originada por el terremoto es importante en ambos sentidos.

Los resultados obtenidos de la aplicación del IIE indican que la marisma fue severamente afectada por el alzamiento cosísmico, en una extensa área que va desde la parte baja hasta la parte alta del humedal, tanto en su dimensión de paisaje, biótica y abiótica, siendo la dimensión abiótica la más impactada. Respecto a ello, se observa que la marisma desarrollada en torno al río Raqui, exhibe una leve tendencia hacia una paulatina recuperación, mientras la marisma del río Tubul acentúa los cambios hacia una declinación de la integridad ecológica, lo que podría sostenerse en el tiempo. De las variables que contribuyen a una recuperación del sistema, se encuentran principalmente aquellas relacionadas a la dimensión biótica, tal como lo reportado por Valdovinos et al. (2010) en el caso de los macroinvertebrados bentónicos.

También a ello se suma, el importante rol que juegan las aves como especies que dependen críticamente de las marismas, cuyas densidades no han ido en disminución (Matus *et al.*, 2010; Schmitt *et al.*, 2011), a pesar de los grandes efectos que el alzamiento cosísmico significó para la disponibilidad de alimento y áreas de refugio y descanso. Creemos que incluir a las aves como variable a considerar dentro del índice, tanto para esta marisma como para otros ecosistemas de marisma similares, es un elemento clave que ayudará a respaldar que se reactiven los esfuerzos de conservación para el área. Ejemplo de ello, es que la misma marisma Tubul-Raqui se proyectaba como futuro sitio Ramsar hasta antes del terremoto del 27/F (CONAMA, 2008); sin embargo, posterior a ello no se ha realizado ningún avance en cuanto a su incorporación entre los sitios Ramsar nacionales. Los resultados obtenidos con la aplicación del IIE, indican que el área proyectada como sitio Ramsar, localizada entre el estero Las Peñas y el río Raqui (ver Marín *et al.*, 2014), es justamente el área que mejor se conserva después del alzamiento co-sísmico del 27/F.

Por otra parte, se debe considerar que los terremotos de subducción que afectan periódicamente la costa de Chile, y que en el área de emplazamiento de Tubul-Raqui, tienen expresión a través de grandes alzamientos co-sísmicos, son parte integrante de la dinámica natural de este ambiente costero. Pese a esta condición natural, generalizada en casi toda la costa del país, existen relativamente pocos estudios orientados a evaluar las abruptas transformaciones originadas por fenómenos naturales de características catastróficas sobre los ecosistemas costeros en Chile (*e.g.* Valdovinos *et al.* 2010; González *et al.*, 2012; Marín *et al.* 2014). De acuerdo a ello, el método aquí propuesto constituye la primera aproximación para comenzar a incorporar eventos naturales de baja frecuencia y duración, pero de una alta intensidad y extensión, en metodologías para evaluar el estado de salud de ecosistemas costeros, con un alto potencial para ser utilizado en la gestión sustentable de los recursos naturales de la zona costera.

Respecto a la planificación y gestión territorial en Chile, dos instrumentos cobran especial relevancia para la aplicación del IIE, debido a que la mayoría de las zonas de humedales en el país se encuentran en la zona rural. Estos instrumentos corresponden al Plan Regional de Ordenamiento Territorial

(PROT) y a la Zonificación del Borde Costero (ZBC), los que recientemente han comenzado a ser sometidos a la Evaluación Ambiental Estratégica, según las disposiciones de la Ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente y el reglamento de la Evaluación Ambiental Estratégica. De este modo, incluir los resultados aquí obtenidos en la evaluación ambiental de los instrumentos para la planificación y gestión territorial, contribuiría a reforzar los alcances y acciones de este tipo de instrumentos sobre los ecosistemas costeros y facilitar la toma de decisiones para el manejo sustentable. Debido a ello, es muy importante que los estudios con base científica, como el desarrollado en esta investigación, complementen a los instrumentos de planificación que actualmente pueden normar en estos espacios y que a futuro tendrán un carácter más vinculante a grandes proyectos de inversión.

Si bien es importante considerar estos aspectos hoy, también se hace necesario que las medidas adoptadas se vayan continuamente re-formulando, conforme a la evolución de la zona costera y en consideración de los diversos factores que interactúan en este proceso. Hasta antes del terremoto del 27/F, la marisma Tubul-Raqui había sido identificada como una zona de vulnerabilidad frente al aumento del mar en zonas de costa (PANCC 2008-2012), e incluso se había construido muros de protección en la localidad de Tubul, ya que el mar estaba llegando hasta las viviendas y caminos más próximos al litoral, ocurriendo daños importantes durante las marejadas (Quezada *et al.*, 2012). Sin embargo, lo observado actualmente en Tubul-Raqui debido a un emplazamiento geológico particular, contrasta enormemente a lo observado respecto a las variaciones del nivel medio del mar a escala global. En este sentido, la mayor amenaza que el cambio climático puede generar en el sistema hoy, es la disminución estadísticamente significativa de las precipitaciones (Quintana y Aceituno, 2012), restringiendo aún más el ingreso de agua en el sistema que actualmente se observa debido al alzamiento cósmico.

El índice desarrollado en esta investigación, es concordante con lo desarrollado en otras metodologías para evaluar la integridad ecológica de las marismas, donde las metodologías desarrolladas en Estados Unidos son preponderantes (e.g. Carlisle 1998; Wigand *et al.*, 1999; Faber-Langendoen *et al.* 2006; Neckles

et al., 2013; Schroeder et al. 2013). Dada la complejidad del funcionamiento de las marismas y la disparidad de tipos de presión a las están sometidos, la utilización de indicadores a nivel de paisaje, morfológicos, fisicoquímicos y biológicos, resulta complementaria y tiene el potencial de recoger abundante información para evaluar el estado del humedal. Sin embargo, se debe considerar también que muchas de las variables propuestas en estos métodos no fueron posibles de incluir a cabalidad en nuestro IIE, en especial en la condición biótica. Razón de ello, es que el uso efectivo de índices multimétricos requiere un sólido conocimiento ecológico de variadas especies (Norris y Hawkins, 2000; Ruaro y Gubiani, 2013), pero este tipo de información es frecuentemente escasa y poco sistemática en los países en vías de desarrollo como Chile. Igualmente, en los países menos desarrollados la financiación suele ser insuficiente para apoyar estudios a largo plazo (Bozzetti y Schulz, 2004; Ruaro y Gubiani, 2013), o simplemente no existe una suficiente sistematización de los estudios, lo que crea un gran vacío de información, hasta que su evaluación vuelve a cobrar relevancia para las agendas nacionales. Estos son algunos de los problemas que enfrentamos durante el desarrollo de esta investigación, y que sin lugar a dudas constituyen el principal desafío para generalizar este modelo para otros ambientes similares en la región. El uso de la teledetección y de los sistemas de información geográfica (SIG), combinado con la inspección rápida sobre el terreno se constituyen como grandes ventajas hoy en día, sobre todo en el análisis de las marismas (e.g. Baily 2007; Higinbotham et al. 2004; Marani et al. 2006; Smith 2009; Goudie 2013) de las cuales hemos sacado el máximo provecho posible. Al utilizar estas herramientas, hemos enfocado el desarrollo de nuestro índice a generar una herramienta simple y costo-efectiva para el monitoreo de un sistema ecológico que necesita urgentemente el establecimiento de un sistema de monitoreo y evaluación constante.

## **5. Conclusiones**

- (1) En este estudio, se propuso un método para evaluar la integridad ecológica de una marisma recientemente perturbada por un alzamiento cosísmico,



basado en un modelo conceptual para comprender la estructura y funcionamiento de la marisma Tubul-Raqui, a escala de paisaje. Para ello se identificaron los impactos del alzamiento cosísmico sobre los elementos clave de este ecosistema, y se determinaron índices y/o métricas que relatan el estado de salud de la componente biótica, abiótica, así como también antrópica, a través de la condición de paisaje. Los índices y/o métricas de cada componente fueron integrados en una propuesta de índice de integridad ecológica, siendo el IIE aplicado para tres escenarios temporales: 2009, pre-terremoto, 2011 y 2012 post-terremoto.

- (2) La aplicación del IIE para el año 2009 permitió caracterizar el estado de salud de la marisma, con un rango de integridad en la categoría de “Excelente”, para todos los sitios de estudio. Esto reafirmó la idea de que la marisma Tubul-Raqui, hasta antes del año 2010, puede ser utilizada como sitio de referencia, tanto para el mismo sistema basado en registros históricos, como para otros ecosistemas similares de la región.
- (3) Los resultados obtenidos en la aplicación de IIE en los años 2011 y 2012 indicaron que existe una respuesta generalizada a la declinación de la integridad ecológica post-terremoto, donde los indicadores abióticos mostraron ser los principales limitantes de la integridad ecológica ante una perturbación inducida por un alzamiento cosísmico, seguidos por los indicadores a nivel de paisaje. Por el contrario, la condición biótica aunque igualmente afectada, no demostró severas señales de perturbación, en especial la flora dominante *Spartina densiflora* y los registros de avifauna, siendo la principal contribución a mantener el estado de salud del sistema los años posteriores al 27/F.
- (4) A pesar de la generalizada declinación, se observaron respuestas diferenciadas entre ambas marismas. La marisma del río Raqui muestra una leve tendencia hacia una paulatina recuperación, mientras que la marisma del río Tubul acentúa los cambios hacia una declinación de la integridad ecológica, lo que podría sostenerse en el tiempo.
- (5) Finalmente, pese a los efectos causados por el alzamiento cosísmico, los resultados obtenidos indicaron que la marisma posee un buen estado de salud, en la categoría de “Bueno” a “Aceptable”, lo que le confiere al

sistema una buena capacidad de resiliencia. No obstante, para evaluar apropiadamente la respuesta de la marisma a los cambios introducidos por el terremoto, se requiere de un período de estudio más largo, lo que deja abierta la posibilidad a futuras investigaciones.

## BIBLIOGRAFIA

Adam, P (1990) *Saltmarsh Ecology*. Cambridge University Press

Adamus, P.R. 2006. Hydrogeomorphic (HGM) assessment guidebook for tidal wetlands of the Oregon coast, Part 1: rapid assessment method. Report to Coos Watershed Association, US Environmental Protection Agency, and Oregon Department of State Lands, Salem, OR. 85 pp.

Allen, J R L and Pye, K (1992) Coastal saltmarshes: their nature and importance. In *Saltmarshes: Morphodynamics, Conservation and Engineering Significance* (eds J R L Allen and K Pye), pp.1–18. Cambridge University Press

Alveal, K., 1988. Gracilaria de Tubul: Historia y significado de un recurso marino. *Revista Gayana, Bot.* 45 (1-4): 119-140.

Andreasen, J.K., O'Neill, R.V., Noss, R., Slosser, N.C., 2001. Considerations for the development of a terrestrial index of ecological integrity. *Ecological Indicators* 1: 21–35.

Baily, B., Pearson A.W., 2007. Change detection mapping and analysis of salt marsh areas of central southern England from Hurst Castle spit to Pagham Harbour. *Journal of Coastal Research* 23:1549–1564.

Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., & Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological monographs*, 81(2), 169-193.

BirdLife International, 2016. Important Bird and Biodiversity Area factsheet: Humedal-Estuario Tubul-Raqui. Downloaded from <http://www.birdlife.org>

Bozzetti, M., Schulz, U.H., 2004. An index of biotic integrity based on fish assemblages for subtropical streams in southern Brazil. *Hydrobiologia* 529, 133–144.

Carlisle, B. K., J. P. Smith, A. L. Hicks, B. G. Largay, Garcia, S.R., 1998. Wetland Ecological Integrity: An Assessment Approach. Massachusetts Coastal Zone Management, Barnstable.

Carrasco-Lagos, P., Jiménez M.C., 2009. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR): Humedal Tubul-Raqui. Propuesta Unidad de Biodiversidad, Departamento Protección de Recursos Naturales, CONAMA Región del Biobío. 39 pp.

Carrasco-Lagos, P. 2003. Variaciones de la estructura de ensamble de aves a lo largo de un gradiente ambiental en el humedal Tubul-Raqui, VIII Región, Chile. Seminario de Investigación para optar al Grado de Licenciado en Biología, Facultad de Ciencias naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción. 56 pp.

Carrasco-Lagos, P. 2004. Propuesta de manejo para la conservación del humedal TubulRaqui, VIII Región, Chile. Tesis para optar al título profesional de Biólogo. Universidad de Concepción, Chile. 76 pp.

Casatti, L., Ferreira, C.P., Langeani, F., 2009. A fish-based biotic integrity index for assessment of lowland streams in southeastern Brazil. *Hydrobiologia* 623, 173–189, <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-008-9656-x>.

Wigand, C., Comeleo, R., McKinney, R., Thursby, G., Chintala, M., Charpentier M., 1999. Outline of A New Approach to Evaluate Ecological Integrity of Salt Marshes, *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 5:7, 1541-1554, DOI: 10.1080/20018091095177

Centro de Ciencias Ambientales EULA. 2008. *Guía de Manejo para Terreno Fiscal con Alto Valor en Biodiversidad en la Región del Bío-Bío: Humedal Tubul-Raqui*. Centro de Ciencias Ambientales EULA, Concepción, Chile.

Centro de Ecología Aplicada (CEA)-CONAMA. 2006. Estudios de línea de base humedal Tubul-Raqui. Informe final. 103 pp.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 2003. Estrategia Regional y Plan de Acción para la Biodiversidad, Región del Bío Bío. Unidad de Biodiversidad, Departamento de Protección de Recursos Naturales, CONAMA Región del Biobío, Chile.

Collins, J.N., Stein, E.D., Sutula, M., Clark, R., Fetscher, A.E., Grenier, L., Grosso, C., Wiskind, A., 2006. California Rapid Assessment Method (CRAM) for Wetlands and Riparian Areas. Version 4.2.3. 136 pp.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 2008. *Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar*. Unidad de Biodiversidad, Departamento de Protección de Recursos Naturales, CONAMA Región del Bío-bío, Chile.

CONAMA-CONAF- BIRF. 1997. Catastro y Evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile. Informe Nacional con Variables Ambientales. Universidad Austral de Chile- Pontificia Universidad Católica de Chile- Universidad Católica de Temuco. 49 p.

Constabel, S., 1993. Ambientes sedimentarios de los estuarios Tubul y Raqui, VIII Región, Chile. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción p. 96.

Craft C, Clough J, Ehman J, Joye S, Park R, Pennings S, Guo H, Machmuller M., 2009. Forecasting the effects of accelerating sea-level rise on tidal marsh ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7:73–38

Day, J.W., Pont, D., Hensel, P., Ibanez C., 1995. Impacts of sea level rise on deltas in the Gulf of Mexico and the Mediterranean: the importance of pulsing events to sustainability *Estuaries*, 18 (1995), pp. 636–647

DeLuca, W. V., C. E. Studds, L. L. Rockwood, and P. P. Marra. 2004. Influence of land use on the integrity of marsh bird communities of Chesapeake Bay, USA. *Wetlands* 24:837-847.

Díaz-Jaramillo, M., Martins da Rocha, A., Gomes, V., Bianchini, A., Monserrat, J.M., Sáez, K., Barra, R., 2011. Multibiomarker approach at different organization levels in the estuarine *Perinereis gualpensis* (Polychaeta; Nereididae) under chronic and acute pollution conditions *Sci. Total Environ.*, 410 (2011), pp. 126–135

Díaz-Jaramillo, M., Muñoz, C., Rudolph, I., Servos, M., Barra, R., 2013. Seasonal mercury concentrations and  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  values of benthic macroinvertebrates and sediments from a historically polluted estuary in south central Chile. *Science of the Total Environment*, 442, 198-206.

Díaz-Jaramillo, M., Sandoval, N., Barra, R., Gillet, P., Valdovinos, C., 2015. Spatio-temporal population and reproductive responses in *Perinereis gualpensis* (Polychaeta: Nereididae) from estuaries under different anthropogenic influences. *Chemistry and Ecology*, 31(4), 308-319.

Donnelly, J.P., Bertness, M.D., 2001. Rapid encroachment of salt marsh cordgrass in response to accelerated sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98:14218–14223

Dukes, J. S., Mooney, H. A., 1999. Does global change increase the success of biological invaders?. *Trends in Ecology & Evolution*, 14(4), 135-139.

Faber-Langendoen, D., G. Kudray, C. Nordman, L. Sneddon, L. Vance, E. Byers, J. Rocchio, S. Gawler, G. Kittel, S. Menard, P. Comer, E. Muldavin, M. Schafale, T. Foti, C. Josse, J. Christy., 2009 (draft). Assessing the condition of ecosystems to guide conservation and management: an overview of NatureServe's ecological integrity assessment methods. NatureServe, Arlington, VA. + Appendices

Faber-Langendoen, D., J. Rocchio, M. Schafale, C. Nordman, M. Pyne, J. Teague, T. Foti, and P. Comer. 2006. Ecological Integrity Assessment and Performance Measures for Wetland Mitigation. NatureServe, Arlington, Virginia.

Fagherazzi, S., Kirwan, M. L., Mudd, S. M., Guntenspergen, G. R., Temmerman, S., D'Alpaos, A., ... Clough, J., 2012. Numerical models of salt marsh evolution: Ecological, geomorphic, and climatic factors. *Reviews of Geophysics*, 50(1).

Fagherazzi, S., Marani, M., Blum, L., 2004. Ecogeomorphology of Tidal Marshes. American Geophysical Union, Coastal and Estuarine Monograph Series, Washington (Ed.).

Farías, M., Vargas, G., Tassara, A., Carretier, S., Baize, S., Melnick, D., Bataille, K., 2010. "Land-Level Changes Produced by the Mw 8.8 2010 Chilean Earthquake". *Science* I:10.1126/science.1192094

Fontolan, G., Pillon, S., Bezzi, A., Villalta, R., Lipizer, M., Triches, A., D'Aiotti, A., 2012. Human impact and the historical transformation of saltmarshes in the Marano and Grado Lagoon, northern Adriatic Sea, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 113, 41-56, ISSN 0272-7714, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2012.02.007>.

Gavilán JF, Barra R, Fossi MC, Casini S, Salinas G, Parra O, 2001. Biochemical biomarkers in fish from different river systems reflect exposure to a variety of anthropogenic stressors. *Bull Environ Contam Toxicol* 2001;66:476–83.

González, P., Ortiz, P., Jerez, R., Pavés, M., Arcos, D., 2012. Efectos del Tsunami 2010 en el Humedal del Río Mataquito. Capítulo 9. *Humedales Costeros de Chile. Ediciones Universidad Católica, Santiago. Chile.*

Goudie, A., 2013. Characterising the distribution and morphology of creeks and pans on salt marshes in England and Wales using Google Earth, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 129, 112-123, ISSN 0272-7714, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2013.05.015>.

Hauer, F. R., Lamberti, G.A., 2006. eds. *Methods in stream ecology*.-2nd edition. Elsevier Inc.

Higinbotham, C.B., Alber, M., Chalmers. A.G., 2004. Analysis of Tidal Marsh Vegetation Patterns in Two Georgia Estuaries Using Aerial Photography and GIS. *Estuaries* 27:670-683.

Instituto Nacional de Estadísticas (INE) 2002. Censo 2002: Síntesis de resultados, Santiago de Chile, Marzo de 2003. <http://www.ine.cl/cd2002/sintesis censal.pdf>

IUCN 2016. *The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2016-2*. <<http://www.iucnredlist.org>>. Downloaded on 04 September 2016.

Jain, V., Tandon, S. K. 2010. Conceptual assessment of (dis) connectivity and its application to the Ganga River dispersal system. *Geomorphology*, 118(3), 349-358.



Joergensen, S.E., 2000. The tentative fourth law of thermodynamics. In: Joergensen, S.E., Müller, F. (Eds.), *Handbook of Ecosystem Theories and Management*. CRC Press LLC, Boca Raton, pp. 161–176.

Karr, J.R., 1996. Ecological integrity and ecological health are not the same. *Engineering within ecological constraints*, 97, 109.

Karr, J.R., Dudley, D.R., 1981. Ecological perspective on water quality goals. *Environ. Manage.* 5, 55–68.

Kay, J. J., 1993. On the nature of ecological integrity: some closing comments. En: Woodley, S.; Kay, J. and Francis, G. (1993): *Ecological integrity and management of ecosystems*, ST. Lucie Press, USA. 220 pp.

Li, X., Tian, W., 2012. Dynamic evaluation of ecological integrity based on landscape pattern index. *Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, 29(6), 780-5.

Mack, J.J., 2001. Ohio rapid assessment method for wetlands v. 5.0, user's Manual and scoring forms. Ohio EPA Technical Report WET/2001-1. Ohio Environmental Protection Agency, Division of Surface Water, Wetland Ecology Group, Columbus, Ohio.

Maddock, I., 1999. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health. *Freshwater biology*, 41(2), 373-391.

Mander, Ü., Müller, F., Wrška, T., 2005. Functional and structural landscape indicators: upscaling and downscaling problems. *Ecological Indicators*, 5(4), 267-272.

Mander, Ü., Koduvere, E., 2003. Pressure, state and response indicators in landscape assessment: An attempt on nitrogen fluxes. In: Helming, K., Wiggering, H. (Eds.), *Sustainable Development of Multifunctional Landscapes*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 157–175.

Marani, M., Belluco, E., Ferrari, S., Silvestri, S., Alpaos, A., Lanzoni, S., Feola, A., Rinaldo, A., 2006. Analysis, synthesis and modelling of high-resolution observations of salt-marsh eco-geomorphological patterns in the Venice lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 69, 414e426.

Marín, A., Gelcich, S., Castilla, J., 2014. Ecosystem services and abrupt transformations in a coastal wetland social-ecological system: Tubul-Raqui after the 2010 earthquake in Chile. *Ecology and Society* 19(1): 22. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-05633-190122>.

Martínez, C., Rojas, O., Aránguiz, R., Belmonte, A., Altamirano, A., Flores, P., 2012. Riesgo de tsunami en caleta Tubul, Región del Biobío: escenarios



extremos y transformaciones territoriales posterremoto. *Revista de geografía Norte Grande* 53, 85-106. DOI: 10.4067/S0718-34022012000300006.

Matus, R.; Díaz-Segovia, F., and Schmitt F., 2010. *Censos Neotropicales de Aves Acuáticas en Chile*, Santiago: Red de Observadores de Aves y Vida Silvestre de Chile, *Informe Resultados 2009*, 52p.

McCormick, F.H., Hughes, R.M., Kaufmann, P.R., Peck, D.V., Stoddard, J.L., Herlihy, A.T., 2001. Development of an Index of Biotic Integrity for the mid-Atlantic highlands region. *Trans. Am. Fish. Soc.* 130, 857–877.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment), 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.

Mitsch, W.J., Gosselink, J.G., 2000. *Wetlands*. John Wiley & Sons: New York.

Morris, J. T., Sundareshwar, P. V., Nietch, C. T., Kjerfve, B., & Cahoon, D. R. (2002). Responses of coastal wetlands to rising sea level. *Ecology*, 83(10), 2869-2877.

Morrison, M. L., 1986. Bird populations as indicators of environmental change. *Current Ornithology* 5:429-451.

Naranjo, E., 2008. Hacia una metodología de gestión de la especie invasora *Spartina densiflora* Brongn: Estado de invasión, avances ecofisiológicos y control. Tesis para optar al grado de Doctor. Universidad de Sevilla. 179 pp.

Neckles, H. A., G. R. Guntenspergen, W. G. Shriver, N. P. Danz, W. A. Wiest, J. L. Nagel, and J. H. Olker. 2013. Identification of Metrics to Monitor Salt Marsh Integrity on National Wildlife Refuges In Relation to Conservation and Management Objectives. Final Report to U.S. Fish and Wildlife Service, Northeast Region. USGS Patuxent Wildlife Research Center, Laurel, MD. 226 pp.

Nixon, S.W., 1986. *Wetlands and Water Quality: a Regional Review of Recent Research in the United States on the Role of Freshwater and Saltwater Wetlands as Sources, Sinks, and Transformers of Nitrogen, Phosphorous, and Various Heavy Metals*. Vicksburg, MI: US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station. #Y-86-2.

Norris, R.H., Hawkins, C.P., 2000. Monitoring river health. *Hydrobiologia* 435, 5–17. Oberdorff, T., Pont, D., Hugueny, B., Porcher, J.P., 2002. Development and validation of a fish-based index for the assessment of 'river health' in France. *Freshw. Biol.* 47, 1720–1734

Oberdorff, T., Pont, D., Hugueny, B., Porcher, J.P., 2002. Development and validation of a fish-based index for the assessment of 'river health' in France. *Freshw. Biol.* 47, 1720–1734.

Odum, W.E., 1988. Comparative ecology of tidal freshwater and salt marshes. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 19: 147-176.

Odum, E. P., Barrett, G. W., 1971. *Fundamentals of ecology* (Vol. 3). Philadelphia: Saunders.

Odum, E.P., 1961. The role of tidal marshes in estuarine production. *New York State Conservation*, 16, 12–15

Ondiviela, B., M. Recio and J. Juanes, 2015. A management approach for the ecological integrity of NE Atlantic estuaries. *Ecological Indicators.*, 52: 105-115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.003>.

Parrish, J.D., Braun, D.P., Unnasch, R.S., 2003. Are we conserving what we say we are? Measuring ecological integrity within protected areas. *BioScience* 53: 851–60.

Pepper, M. A., 2008. Salt marsh bird community responses to open marsh water management. University of Delaware, Newark, DE.

Pineda, V., 1983 Evolución paleogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico Superior-terciario. Concepción: Memoria de Título para optar al Título de Geólogo, Universidad de Concepción, Chile, 1983 (Inédito).

Pont, D., Hugueny, B., Beier, U., Goffaux, D., Melcher, A., Noble, R., Rogers, C., Roset, N., Schmutz, S., 2006. Assessing river biotic condition at a continental scale: a European approach using functional metrics and fish assemblages. *J. Appl. Ecol.* 43, 70–80.

Quezada, J., Jaque, E., Belmonte, A., Fernández, A., Vásquez, D., Martínez C., 2010. Movimientos cosísmicos verticales y cambios geomorfológicos generados durante el terremoto Mw=8,8 del 27 de Febrero de 2010 en el centro-sur de Chile. *Revista Geográfica del Sur* 1 (2) 11-45.

Quintana, J., Aceituno, P., 2012. Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 3043°S. *Atmósfera* 25 (3450):1-22.

Raposa, K.B., Weber, R.L.J., Ekberg, M.C., Ferguson, W., 2016. Vegetation Dynamics in Rhode Island Salt Marshes During a Period of Accelerating Sea Level Rise and Extreme Sea Level Events. *Estuaries and Coasts* (2016) <http://dx.doi.org/10.1007/s12237-015-0018-4> (in press)

Rabeni, C. F., 2000. Evaluating physical habitat integrity in relation to the biological potential of streams. In *Assessing the Ecological Integrity of Running Waters* (pp. 245-256). Springer Netherlands.

Reed, D.J., 2002. Sea-level rise and coastal marsh sustainability: geological and ecological factors in the Mississippi delta plain. *Geomorphology* 48:233–243

Reed, D.J., 1995. The response of coastal marshes to sea-level rise: Survival or submergence?. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20(1), 39-48.

Reza, M.I.H., Abdullah, S.A., 2011. Regional index of ecological integrity: a need for sustainable management of natural resources. *Ecol. Ind.* 11, 220–229, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.08.010>.

Rocchio, F. J., Crawford, R. C., 2009. Monitoring desired ecological conditions on Washington State wildlife areas using an ecological integrity assessment framework. *Washington Natural Heritage Program, Washington Department of Natural Resources, Olympia, WA*.

Ruaro, R., Gubiani, E.A., 2013. A scientometric assessment of 30 years of the Index of Biotic Integrity in aquatic ecosystems: applications and main flaws. *Ecol. Indic.* 29, 105–110, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.12.016>.

San Martín, C., Contreras, D., San Martín, J., Ramírez, C., 1992. Vegetación de las marismas del centro-sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 65: 327-342 pp.

Sandoval, N., 2010. Efectos del levantamiento cosísmico y tsunami sobre la comunidad macrobentónica del humedal Tubul-Raqui, producto de un terremoto 8,8 Richter (Chile central): Seminario para optar al Título de Biólogo, Universidad de Concepción, Chile, 2010 (Inédito).

Schmitt, F.; Matus, R.; Díaz, F., and Barros, R., 2011. *Censos Neotropicales de Aves Acuáticas en Chile*. Santiago: Red de Observadores de Aves y Vida Silvestre de Chile, *Informe Resultados 2010*, 62p.

Schroeder, M. A., Gorrell, J., Vander Haegen, M., Anthony, J., Duff, A., Foisy, J., Gibilisco, C., Cosentino, B., 2013. Ecological Integrity Monitoring of Wildlife Areas in Washington State: Pilot Study for the 2011-2013 Biennium. Lands Division, Wildlife Program. Washington Department of Fish and Wildlife, Olympia. 33 pp.

Secretaría de la Convención de Ramsar. 2013. Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 6a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza.

Servicio Nacional de Pesca (SERNAP) 1985. Anuario Estadístico de Pesca. Servicio Nacional de Pesca. Santiago. 180 pp.

Smith, S. M. 2009. Multi-decadal changes in salt marshes of Cape Cod, MA: Photographic analyses of vegetation loss, species shifts, and geomorphic change. *Northeast. Nat.* 16, 183–208.

Stockdale, C., Flannigan, M., Macdonald, E., 2016. Is the END (emulation of natural disturbance) a new beginning? A critical analysis of the use of fire regimes as the basis of forest ecosystem management with examples from the Canadian western Cordillera. *Environmental Reviews*, 24(999), 1-11.

Stuardo, J., C. Valdovinos, R. Figueroa, and A. Ochipinti. 1993. Los ambientes costeros del Golfo de Arauco y área adyacente. Serie Monografías Científicas, Centro EULA, Concepción, Chile. 9:1-157.

Thilenius, J. F., 1995. Phytosociology and succession on earthquake-uplifted coastal wetlands, Copper River Delta, Alaska. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-346. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 58 p.

Titus, J.G., Richman, C., 2001. Maps of lands vulnerable to sea level rise: Modeled elevations along the U.S. Atlantic and Gulf coasts. *Climatic Research* 18:205–228.

Unnasch, R.S., D. P. Braun, P. J. Comer, G. E. Eckert. 2008. The Ecological Integrity Assessment Framework: A Framework for Assessing the Ecological Integrity of Biological and Ecological Resources of the National Park System. Report to the National Park Service.

Vackar, D., ten Brink, B., Loh, J., Baillie, J.E.M., Reyers, B., 2012. Review of multispecies indices for monitoring human impacts on biodiversity. *Ecological Indicators* 17 (2012), pp. 58–67

Valdovinos, C., Sandoval, N., Vásquez, D., Olmos, V., 2012. El Humedal Tubul-Raqui un Ecosistema Chileno de Alto Valor de Conservación Severamente Perturbado por el Terremoto del 2010. Capítulo 10. *Humedales Costeros de Chile. Ediciones Universidad Católica, Santiago. Chile.*

Valdovinos, C., Sandoval, N., 2011. Cambios ambientales del humedal Tubul-Raqui derivado del alzamiento cosísmico y tsunami, asociado al terremoto Mw 8,8. Informe técnico de la Unidad de Sistemas Acuáticos, Centro de Ciencias Ambientales EULA, Universidad de Concepción, Chile

Valdovinos, C., Muñoz, M.D., Sandoval, N., Vásquez, D., Olmos, V., 2010. Natural disasters and biodiversity: the case of Tubul-Raqui coastal wetland. *Sociedad Hoy* 19:33-51.

Vásquez, D., Sandoval, N., Valdovinos, C., 2017 (*En revisión*). Morphological Responses of Coastal Wetlands to Major Earthquake Uplifts in South-central Chile. *Journal of Coastal Research* (2017).

Vásquez, D., 2013. Metodología para la delimitación y zonificación de humedales costeros de tipo mediterráneo. *Revista Geográfica del Sur* 4 (6), 13-32.

Vásquez, D. Delimitación y Zonificación de los Humedales Costeros de Lengua y Tubul Raqui: Orientaciones para la Planificación Territorial de la Región del Bío-Bío. Concepción: Memoria para optar al Título de Geógrafo, Universidad de Concepción, Chile, 2009 (Inédito).

Vélez Restrepo, L. A., Gómez Sal, A. 2008. Un marco conceptual y analítico para estimar la integridad ecológica a escala de paisaje. *Arbor*, 184 (729), 31-44.

Vergara, O., Carrasco-Lagos, P., Saavedra, M.F., Ortiz, J.C. 2008. Fauna del humedal Tubul-Raqui, Provincia de Arauco. Sitio Prioritario para la Conservación de la Biodiversidad, CONAMA Región del Biobío. Ed. Impresos del Sur, Concepción Chile. 72 pp.

Verner, J., 1984. The guild concept applied to management of bird populations. *Environmental Management* 8:1-13.

Wascher, D.M. (Ed.), 2000. Agri-environmental Indicators for Sustainable Agriculture in Europe. ECNC Technical Report Series. European Centre for Nature Conservation, Tilburg, 240 p.

Westra, L. 1995. Ecosystem integrity and sustainability: The foundational value of the wild”, en: Westra, L., John, L. (Eds.), *Perspectives on ecological integrity. Environmental science and technology library*, Kluwer academic publishers, Netherlands, pp. 12-33.

Wiest, W. A., 2010. Development of avian metrics to monitor salt marsh integrity (Doctoral dissertation, University of Delaware).

Woodley SJ. 2010. Ecological integrity and Canada's national parks. *George Wright Forum* 27: 151–160

Young, T.F. and S. Sanzone (editors). 2002. A framework for assessing and reporting on ecological condition. Prepared by the Ecological Reporting Panel, Ecological Processes and Effects Committee. EPA Science Advisory Board. Washington, DC. 142 p.

### 3.- CONCLUSIONES

- El terremoto Mw= 8,8 del 27 de febrero de 2010, provocó alzamientos y subsidencias cosísmicas que modificaron el relieve litoral. Por su localización cercana a la fosa submarina, la marisma Tubul-Raqui fue el humedal costero más afectado con 1,4 m de alzamiento cosísmico, en relación al resto de los humedales de esta zona.
- Los impactos geomorfológicos como consecuencia de este alzamiento cosísmico significaron una disminución del 72,5% de las áreas inundadas y de un 14,6% de la superficie de la marisma media o *schorre* cubierta por la asociación vegetacional *Sacocornio-Spartinentum densiflorae*. Los canales principales de ambos ríos y canales de marea mayores exhibieron un ligero incremento del área inundada del 12% y 8,5%, lo que se atribuye a la subsidencia intersísmica, mientras pozas salinas y canales menores acentuaron la declinación con una pérdida total del 100% y 92,4% de la superficie inundada.
- Se acepta la hipótesis planteada en esta investigación, siendo la marisma Tubul-Raqui el humedal que mayores cambios presentó como respuesta al alzamiento. Así también, pozas salinas y canales menores son las unidades morfológicas que presentaron menores tasas de recuperación durante el período inter-sísmico y a una corta escala temporal.
- Los resultados obtenidos en la aplicación de IIE en el período 2009-2012 indicaron que existe una respuesta generalizada a la declinación de la integridad ecológica post-terremoto, donde los indicadores abióticos mostraron ser los principales limitantes de la integridad ecológica ante una perturbación inducida por un alzamiento cosísmico, seguidos por los indicadores a nivel de paisaje. Por el contrario, la condición biótica aunque igualmente afectada, no demostró severas señales de perturbación, en especial la flora dominante *Spartina densiflora* y los registros de avifauna, siendo la principal contribución a mantener el estado de salud del sistema los años posteriores al 27/F.



- Pese a los efectos causados por el alzamiento cosísmico, los resultados obtenidos indicaron que la marisma posee un buen estado de salud, en la categoría de “Bueno” a “Aceptable”, con una tendencia leve a la recuperación observada en la marisma del río Raqui y una tendencia a la declinación en la marisma del río Tubul.
- Se acepta parcialmente la hipótesis planteada, determinándose que efectivamente la marisma Tubul-Raqui ha cambiado su extensión y morfología como respuesta al alzamiento cosísmico; sin embargo, es únicamente la marisma del río Raqui la que aún mantiene propiedades que le permiten ser soporte para hábitat y refugio de vida silvestre, lo que le confiere una alta capacidad de resiliencia.



#### 4.- REFERENCIAS

Aselmann, I., Crutzen, P.J., 1989. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, and their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions. *Journal of Atmospheric Chemistry* 8, 307-358.

Boggs, K., 2000. Classification of community types, successional sequences, and landscapes of the Copper River Delta, Alaska. Gen.Tech. Rep. PNW-GTR-469. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, p. 244.

Chapman, V.J., 1960. Sal marshes and salt deserts of the world. Interscience Publishers, Inc., New York.

Christensen, H.H., Mastrantonio, L., Gordon, J.C., Bormann, B.T., 2000. Alaska's Copper River: humankind in a changing world. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-480. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, p. 20.

Comisión Nacional del Medioambiente CONAMA (2006). Protección y manejo sustentable de humedales integrados a la cuenca hidrográfica, Centro de Ecología Aplicada Ltda., Informe final, Diciembre 2006.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., *et al.* 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253-60

Craft C, Clough J, Ehman J, Joye S, Park R, Pennings S, Guo H, Machmuller M., 2009. Forecasting the effects of accelerating sea-level rise on tidal marsh ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7:73–38

Day, J.W., Pont, D., Hensel, P., Ibanez C., 1995. Impacts of sea level rise on deltas in the Gulf of Mexico and the Mediterranean: the importance of pulsing events to sustainability *Estuaries*, 18 (1995), pp. 636–647

Donnelly, J.P., Bertness, M.D., 2001. Rapid encroachment of salt marsh cordgrass in response to accelerated sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98:14218–14223

Engle, V.D., 2011. Estimating the provision of ecosystem services by Gulf of Mexico coastal wetlands. *Wetlands*, 31(1), 179-193.

Ewel, K.C., Cressa, C., Kneib, R.T., Lake, P.S., Levin, L.A., Palmer, M.A., Snelgrove, P., Wall, D.H., 2001. Managing critical transition zones. *Ecosystems* 4:452-460.

Fagherazzi S., 2013. The ephemeral life of a salt marsh, *Geology*, 41 943-944, doi: 10.1130/focus082013.1

Fariás, M., Vargas, G., Tassara, A., Carretier, S., Baize, S., Melnick, D., Bataille, K., 2010. "Land-Level Changes Produced by the Mw 8.8 2010 Chilean Earthquake". *Science* I:10.1126/science.1192094

González, P., Ortiz, P., Jerez, R., Pavés, M., Arcos, D., 2012. Efectos del Tsunami 2010 en el Humedal del Río Mataquito. Capítulo 9. *Humedales Costeros de Chile. Ediciones Universidad Católica, Santiago, Chile.*

Guilcher, A., 1957. Morfología litoral y submarina, Ed. Omega S.A., 274, Barcelona.

Isacch, J., Costa, C., Rodriguez-Gallego, L., Conde, D., Escapa, M., Gagliardini, D., Iribarne, O., 2006. Distribution of salt marsh plant communities associated with environmental factors along a latitudinal gradient on the south-west Atlantic coast. *J. Biogeogr.*, v. 33, n.5, p. 888-900.

Kneib, R., Simenstad, C., Nobriga, M., Talley, D., 2008. Tidal marsh conceptual model. Sacramento (CA): Delta Regional Ecosystem Restoration Implementation Plan.

Leonardi, N., Ganju, N.K., Fagherazzi, S., 2016. A linear relationship between wave power and erosion determines salt-marsh resilience to violent storms and hurricanes. *Proceedings of The National Academy of Sciences*, 113(1), 64-68.

Lomnitz, C., 2004. Major earthquakes of Chile: A historical survey 1535-1960. *Seismological Research Letters*, 2004, vol.75 N°3, p. 368-378.

Lomnitz, C., 1970. Major earthquakes and tsunamis in Chile during the period 1535 to 1955. *Soderdruck aus der Geologischen Rundschau Band 59 (938 –690).*

Marín, A., Gelcich, S., Castilla, J., 2014. Ecosystem services and abrupt transformations in a coastal wetland social-ecological system: Tubul-Raqui after the 2010 earthquake in Chile. *Ecology and Society* 19(1): 22. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-05633-190122>.

Martínez, C., Rojas, O., Jaque, E., Quezada J., Vásquez, D., Belmonte, A., 2011. Efectos territoriales del tsunami del 27 de Febrero de 2010 en la costa de la región del Bío-Bío, Chile. *Revista Geográfica de América Central Número Especial EGAL*, 2011 – Costa Rica, II Semestre 2011 p. 1-16.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment), 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.

Melnick, D., Moreno, M., Cisternas, M., Tassara, A., 2012. Darwin seismic gap closed by the 2010 Maule earthquake.

Mitsch, W.J. and J.G. Gosselink. 1993. *Wetlands*. Second edition. Van Nostrand Reinhold; New York, New York.

Mitsch, W. J. y Gosselink, J.G., 2000. *Wetlands*. 3era ed. New York (US): Wiley. 920 p. ISBN 0-471-29232-X.

Moller I, et al. 2014. Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions. *Nat Geosci* 7(10):727–731.

Paskoff, R., 2010. Geomorfología costera en: Díaz-Naveas, J., Frutos, J., (eds). Geología Marina de Chile. Comité Oceanográfico Nacional de Chile - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. p.115.

Paskoff, R., 1985. Les littoraux: impact des aménagements sur leur évolution, Paris, Masson, 188 p.

Peña-Cortés F., Gutiérrez P., Rebolledo G., Escalona M., Hauenstein E., E., Bertrán C., Tapia J., 2006. Determinación del nivel de antropización de humedales como criterio para la planificación ecológica de la cuenca del lago Budi, IX región de la Araucanía, Chile, Revista de Geografía Norte Grande, diciembre, número 036, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago Chile, p. 75-91.

Perillo, G., 2009. Tidal Courses: Classification, Origin and Functionality. En: Gerardo, M., Perillo, E., Wolanski, E., Cahoon. D.R., Brinson, M.M., editors, Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach. Elsevier, 2009, p. 185. ISBN: 978-0-444-53103-2.

Pethick, J., Crooks, S., 2000. Development of a coastal vulnerability index: a geomorphological perspective. *Environmental Conservation* 27 (4): 359–367.

Quezada, J., Jaque, E., Fernández, A., Belmonte, A., Martínez, C., Vásquez, D., 2012. Cambios en el relieve generados como consecuencia del terremoto Mw = 8,8 del 27 de Febrero de 2010 en el centro sur de Chile, Revista Geografía Norte Grande, 53: 35-55. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022012000300003>.

Quezada, J., Jaque, E., Belmonte, A., Fernández, A., Vásquez, D., Martínez C., 2010. Movimientos cosísmicos verticales y cambios geomorfológicos generados durante el terremoto Mw=8,8 del 27 de Febrero de 2010 en el centro-sur de Chile. *Revista Geográfica del Sur* 1 (2) 11-45.

Rabenhorst, M.C., 1995. Carbon storage in tidal marsh soils. Pp. 93-104 in R Lal, JM Kimble, E Levine, and BA Stewart (eds.), Soils and Climate Change. Advance in Soil Science, CRC Press, Boca Raton, Florida.

Raposa, K.B., Weber, R.L.J., Ekberg, M.C., Ferguson, W., 2016. Vegetation Dynamics in Rhode Island Salt Marshes During a Period of Accelerating Sea Level Rise and Extreme Sea Level Events. *Estuaries and Coasts* (2016) <http://dx.doi.org/10.1007/s12237-015-0018-4> (in press)

Reed, D.J., 2002. Sea-level rise and coastal marsh sustainability: geological and ecological factors in the Mississippi delta plain. *Geomorphology* 48:233–243

Reed, D.J., 1995. The response of coastal marshes to sea-level rise: Survival or submergence?. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20(1), 39-48.

Rodríguez, P., 2013. Plataformas de abrasión marinas como marcadores del ciclo sísmico de subducción en la península de Arauco, región del Biobío, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Concepción 2013.

Rozas, L.P., McIvor, C.C., Odum, W.E., 1988. Intertidal rivulets and creek banks: corridors between tidal creeks and marshes. *Marine Ecology Progress Series* 47:303-307.

Secretaría de la Convención de Ramsar (2007) *Uso racional de los humedales: Marco conceptual para el uso racional de los humedales*. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 3ª edición, vol. 1. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).

Shepard, C.C., Crain, C.M., Beck, M.W., 2011. The Protective Role of Coastal Marshes: A Systematic Review and Meta-analysis. *PLoS ONE* 6(11): e27374. doi:10.1371/journal.pone.0027374

Silvestri, S., Mariani, M., 2004. Salt-marsh Vegetation and Morphology: Basic Physiology, Modelling and Remote Sensing Observations En: *Ecogeomorphology of Tidal Marshes*, Eds.: S. Fagherazzi, L. Blum, M. Marani, American Geophysical Union, *Coastal and Estuarine Monograph Series*, 2004.

Stuardo, J., Valdovinos, C., Figueroa, R., Ochipinti, A., 1993. Los ambientes costeros del Golfo de Arauco y área adyacente. Serie Monografías Científicas, Centro EULA, Concepción, Chile. 9:1-157.

Thilenius, J. F., 1995. Phytosociology and succession on earthquake-uplifted coastal wetlands, Copper River Delta, Alaska. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-346. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 58 p.

Urutia R., y Lanza, C., 1993. *Catástrofes en Chile 1541-1992*. Santiago de Chile: Editorial La Noria, 1993.

Valdovinos C., M. D. Muñoz, N. Sandoval, D. Vásquez & V. Olmos. 2010. Desastres naturales y biodiversidad: El caso del humedal costero Tubul-Raqui. *Sociedad Hoy*, 19:33-51, 2do Sem. 2010 ISSN 0717-3512

Vargas, G., Farías, M., Carretier, S., Tassara, A., Baize, S., Melnick, D., 2011. Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw8.8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology*, 2011, N° 38, p. 219 -238.

Veyl, C., 1960. Los fenómenos volcánicos y sísmicos de fines de mayo de 1960 en el sur de Chile. Concepción: Instituto Central de Química, Departamento de Geología y Mineralogía, Universidad de Concepción, 60.

Weslawski, J.M., Snelgrove, P.V.R., Levin, L.A., Austen, M.C., Kneib, R.T., Illife, T.M., Garey, J.R., Hawkins, S.J., Whitlatch, R.B., 2004. Marine

sedimentary biota as providers of ecosystem goods and services, pp. 73- 98 In: Wall DH (ed), Sustaining biodiversity and ecosystem services in soils and sediments. Island Press, Washington, DC.

Zedler, J.B., Kercher, S., 2005. Wetland resources: Status, trends, ecosystem services, and restorability. Annual Review of Environmental Resources 30: 39-74.





## **5.- ANEXOS**

**Artículo científico publicado: Cambios en el relieve generados como consecuencia del terremoto Mw=8,8 del 27 de febrero de 2010 en el centro sur de Chile**

**Relief changes generated by the 2010 Mw=8,8 February 27<sup>th</sup> earthquake in south-central Chile**

Jorge Quezada, Edilia Jaque, Alfonso Fernández, Arturo Belmonte,  
Carolina Martínez, Daniela Vásquez

### **Resumen**

El 27 de febrero de 2010 ocurrió un terremoto Mw=8,8 en el centro-sur de Chile que provocó alzamientos y subsidencias cosísmicas. El litoral de la región del Biobío tuvo alzamiento cosísmico que generó el ensanchamiento de playas, la emersión de la plataforma de abrasión marina, desecamiento de ríos y humedales y muerte de biota intermareal. Por el contrario, el litoral entre las regiones de Valparaíso y O' Higgins experimentó subsidencia cosísmica que provocó una disminución del ancho de las playas, profundización de ríos, sumergencia de barras litorales e inundación de vegetación y su desecación. El tsunami arrastró arenas litorales y vegetación hacia el interior. Las arenas del litoral que quedaron sueltas, fueron redepositadas en 2010 y 2011 debido a las marejadas, ensanchando playas, reconstruyendo aquellas que habían disminuido por la subsidencia cosísmica así como las barras litorales.

### **Abstract**

On February 27<sup>th</sup> 2010 a Mw=8,8 earthquake occurred in south-center Chile that caused coseismic uplift and subsidence. The littoral zone of the Biobío Region were uplifted causing widening of the beaches, the emersion of the marine abrasion platform, drying of rivers and wetlands and intertidal biota death. The coast between Valparaíso and O'Higgins regions experienced subsidence that caused reduction of the width of the beaches, deepening of rivers, submergence of coastal bars, vegetation flooding and drying. The

tsunami drags coastal sands and vegetation into the interior. The coastal sands became with low compaction, were reworked in 2010 and 2011 due to the storm waves, widen beaches, reconstructing what had decreased by coseismic subsidence, as well as the coastal bars.

palabras claves: terremoto, alzamiento, subsidencia, cambio, relieve

keywords: earthquake, uplift, subsidence, change, relief

Los terremotos de subducción se generan en el contacto interplaca donde una placa oceánica se hunde bajo una placa continental u otra oceánica provocando un alzamiento en la zona cercana a la fosa, el cual decrece en dirección al arco gradando a subsidencia. La zona de alzamiento se localiza principalmente en el piso oceánico trasladando grandes volúmenes de agua generando el tsunami. Durante el período intersísmico, ambas placas permanecen acopladas formando un arqueamiento o flexura antiforme de la placa continental que experimenta una compresión horizontal, donde la zona litoral se mueve hacia el arco y durante el período cosísmico, esta flexura se extiende hacia la fosa. Si el litoral se encuentra cerca de la fosa, experimenta un alzamiento cosísmico y si está más lejos, una subsidencia (Figura N° 1). La distancia de transición de alzamiento y subsidencia cosísmica depende de la inclinación del plano de subducción y de la profundidad de la zona de ruptura en la zona del contacto interplaca (Quezada, 2007, Farías *et al.*, 2010). De esta forma, si la ruptura es más superficial, la distancia normal a la fosa de transición entre alzamientos y subsidencias es menor. En Chile, existen terremotos de subducción debido a la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana donde las islas litorales como Quiriquina, Santa María, Mocha, Guafo y Guambelin así como las penínsulas de Mejillones, Tongoy, Coliumo, Hualpén y Arauco, han experimentado importantes alzamientos cosísmicos debido a su cercanía con la fosa. Por el contrario, el litoral entre Arica e Iquique (18,5°S-20°S) así como entre Puerto Saavedra y Chiloé (38,7°S-43,4°S) y la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa y Depresión Intermedia, han experimentado una subsidencia cosísmica debido a su lejanía con la fosa. Estos cambios verticales del terreno generan cambios importantes

en el relieve. Los cambios más documentados son para el terremoto de Concepción de 1835 donde Fitz-Roy (1839) y Darwin (1851) describen los alzamientos en el litoral de la Región del Biobío que se manifestaron principalmente mediante la emersión de la plataforma de abrasión marina y la muerte de la biota intermareal. Los terremotos del 21 y 22 de mayo de 1960 en el sur de Chile provocaron alzamientos métricos en la Península de Arauco e islas Mocha, Guamblin y Guafo provocando los mismos efectos que los de 1835, así como una subsidencia generalizada entre Tirúa y Chiloé que provocó el avance del mar, disminución del ancho de playas y el aumento de las cuencas hidrográficas de ríos, inundándose varias zonas como las cercanas a los ríos Callecalle e Imperial (Veyl, 1960; Plafker y Savaje, 1970). En el presente trabajo se indican los principales cambios del relieve generados como consecuencia del terremoto Mw=8,8 del 27 de febrero de 2010 que afectó el centro-sur de Chile. En los años previos a la ocurrencia del terremoto (2007-2009), se recorrió el litoral de la Región del Biobío incluyendo las islas Santa María y Mocha con diferentes objetivos como la medición de la planicie holocena, y las variaciones en el humedal de Tubul y desembocadura del río Itata. Luego del terremoto de 2010, se recorrió el área entre Cartagena y la Isla Mocha (33,5°S-38,6°S) entre marzo y mayo de 2010. Algunos lugares específicos se visitaron reiterativamente en 2010, 2011 y 2012. Las visitas sucesivas a diversas localidades antes y después del terremoto de 2010, permitieron determinar los cambios del relieve y procesos involucrados. Los principales efectos, se relacionan con las variaciones relativas del nivel del mar, ríos y lagos así como la sedimentación fluvial y litoral. En localidades no visitadas antes del terremoto de 2010, se utilizaron fotografías obtenidas de Panoramio o facilitadas por lugareños y se compararon imágenes satelitales antes y después del terremoto.

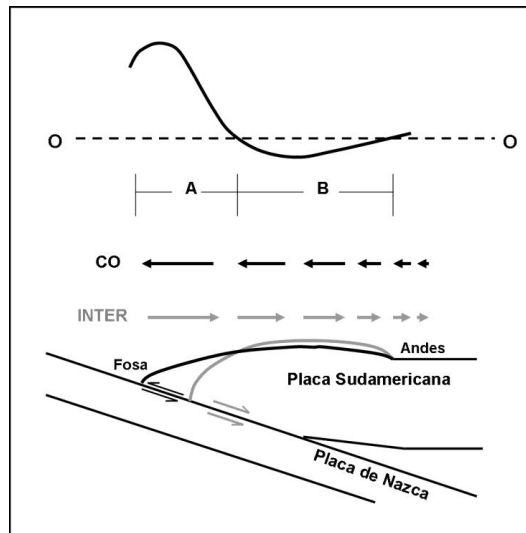


Figura N°1. Patrón de movimientos cosísmicos verticales en un terremoto de subducción. La curva superior ilustra el alzamiento decreciente de fosa a arco gradando a subsidencia. Las flechas indican los movimientos horizontales CO: Cosísmico, INTER: Intersísmico, A: zona de alzamiento cosísmico, B: zona de subsidencia cosísmica. En el intersísmico, las placas están adheridas formándose una flexura antiformal en la Placa Sudamericana provocando un acortamiento aproximadamente normal al arco y fosa, y movimientos horizontales en dirección a la Cordillera de los Andes. Esta flexura se extiende hacia la fosa durante el terremoto generando el patrón de alzamientos verticales que se indica en la curva superior.

### **Características de la ruptura sísmica del terremoto del 27 de febrero de 2010**

El 27 de febrero de 2010 a las 3:34 hora local (6:34 UTC), se produjo un terremoto de magnitud momento  $M_w=8,8$  que afectó la zona centro-sur de Chile. Según el NEIC (National Earthquake Information Center, dependiente del Servicio Geológico de Estados Unidos, USGS), el epicentro se localizó a los  $36,12^\circ S / 72,9^\circ W$  y el hipocentro a 35 km de profundidad, mientras que el DGF (Servicio Sismológico de la Universidad de Chile dependiente del Departamento de Geofísica), localizó el epicentro los  $36.29^\circ S / 73.24^\circ W$  y el hipocentro a 30 km de profundidad (Figura N° 2). El mecanismo focal determinado por el NEIC es inverso con plano de ruptura de orientación  $N14^\circ E/19^\circ E$  correspondiendo al plano de subducción. La longitud de ruptura es de 640 km entre  $33^\circ S-38,6^\circ S$  (entre Valparaíso y el sur de la Isla Mocha), la cual es posible de determinar considerando la distribución de las réplicas y movimientos cosísmicos verticales. El terremoto del 27 de Febrero de 2010 tuvo dos segmentos de ruptura (segmento norte y segmento sur indicados en la Fig. 2), como evidencian análisis y modelados de las ondas sísmicas del terremoto (Sladen et al., 2010; Comte y Beck, 2010; Madariaga et al., 2010,

Delouis et al., 2010; Lay et al., 2010 y Lorito et al., 2011). Estos segmentos están ligados a dos asperezas, la aspereza situada al sur fue el inicio de la ruptura sísmica del segmento sur que se propagó hacia el sur, aproximadamente desde los 36°S (Fig. 2). En la segunda aspereza en el plano de subducción, aproximadamente a los 35,4°S, se inició la ruptura del segmento norte que se propagó hacia el norte, la cual comenzó en un lapso de tiempo cercano a un minuto respecto a la primera ruptura (Vigny et al., 2011). Para el segmento norte se determinó un deslizamiento máximo de 16-21m (Lay et al., 2010; Delouis et al., 2010; Tong et al., 2010; Lorito et al., 2011; Pollitz et al., 2011). Para el segmento sur, se determinó un deslizamiento máximo de 9-13m (Lay et al., 2010; Delouis et al., 2010; Pollitz et al., 2011; Lorito et al., 2011). Por su parte, Vigny et al. (2011) realizando modelados con mediciones GPS, determinaron 15 m de deslizamiento máximo en ambas asperezas. En la zona epicentral ocurrió poco deslizamiento cosísmico (Delouis et al., 2010; Moreno et al., 2010; Lorito et al., 2011; Vigny et al., 2011). Debido al desplazamiento interplaca, ocurrieron movimientos horizontales en el borde occidental de la Placa Sudamericana en dirección al SW en sentido opuesto a la convergencia de placas que alcanzaron magnitudes de 3 m en Concepción (36,8°S) según indicó el GPS del observatorio geodésico TIGO y ~ 5 m en Constitución (35,3°S) y en la parte NW de la Península de Arauco (37,2°S) (Vigny et al., 2011).

Producto de la extensión cosísmica, se generaron alzamientos de ~2m en la Península de Arauco e Isla Santa María (37°S-37,7°S), 1,4 m en Tubul (37,2°S) y ~0,5m en el litoral de la Región del Biobío entre 36,7°S-37°S (Figs. 3-9). Por el contrario, el litoral de las regiones de Valparaíso, O' Higgins y Maule, experimentaron una subsidencia, siendo mayor en la Región del Maule de magnitud cercana a un metro. La distancia normal a la fosa de transición entre alzamientos y subsidencias es de ~135 km en el segmento sur de la ruptura y ~120 km en el segmento norte de la ruptura, lo cual evidencia que la ruptura en el segmento sur se localizó en una posición más superficial del plano de subducción. El área de Tirúa-Isla Mocha (38,3-38,4°S) experimentó un alzamiento anómalo ya que la Isla Mocha se alzó 25 cm y Tirúa 60 cm. Las

réplicas en el área de ruptura se concentraron entre marzo y mayo de 2010 decayendo progresivamente. El 11 de marzo de 2011, se produjo un nuevo evento sísmico  $M_w=6,9$  en el área de Pichilemu ( $34,4^\circ S$ ) que reactivó una falla normal cortical de orientación NW-SE descendiendo el bloque sur (Fariás *et al.*, 2011; Ryder *et al.*, 2012) provocando una subsidencia mayor al alzamiento cosísmico del 27 de febrero de 2010. Esta falla se reactivó como consecuencia del cambio de esfuerzos en la Placa Sudamericana luego de la ruptura del 27 de febrero de 2010. El 2 de enero de 2011 se produjo una réplica  $M_w=7,1$  en el área de Tirúa-Isla Mocha ( $38,3^\circ S$ ) que produjo un alzamiento de 50 cm en la Isla Mocha y una subsidencia de 15 cm en Tirúa.

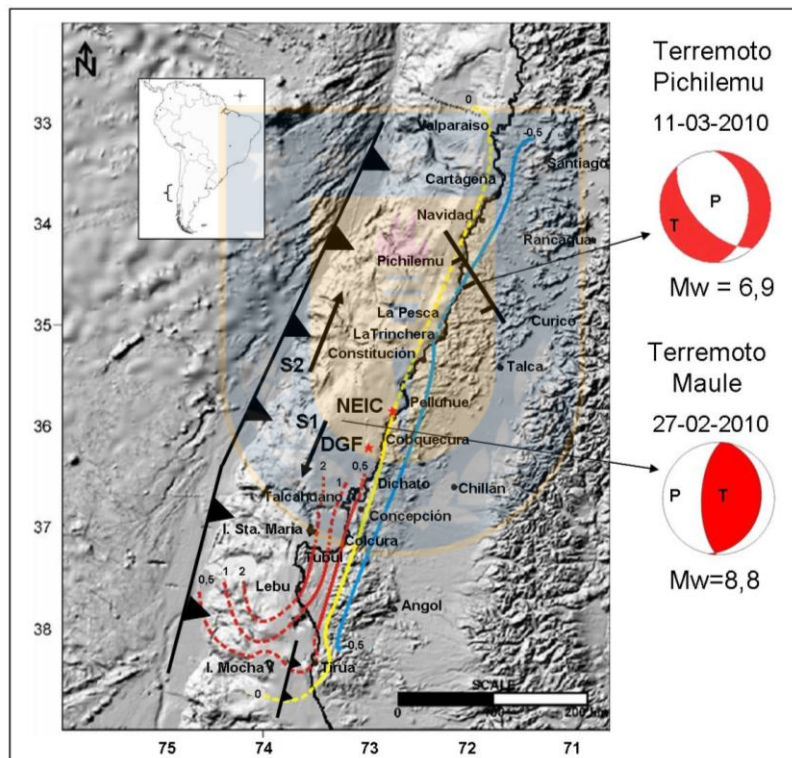


Figura 2. Área afectada por el terremoto del 27 de Febrero de 2010. La longitud de ruptura es equivalente al largo de las trazas de falla indicadas. Se indican las magnitudes en metros de los movimientos cosísmicos verticales. Las flechas indican la propagación de las rupturas del 27/2/10: S1= Segmento sur, S2= Segmento norte. Las estrellas indican la localización del epicentro según el DGF (más cercano al real) y NEIC. Se indica la falla normal asociada al Terremoto de Pichilemu del 11 de Marzo de 2010 y la falla inversa (de atajo, splay fault) entre Tirúa y la Isla Mocha que habría acomodado la mayor parte del movimiento en el extremo sur del terremoto del 27 de febrero de 2010.



## **Cambios en el relieve generados por los movimientos cosísmicos verticales**

### **Alzamientos**

El litoral de la Región del Biobío presentó las principales evidencias de alzamiento cosísmico debido a que las penínsulas de Coliumo, Tumbes, Hualpén y Arauco, junto a las Islas Quiriquina, Mocha y Santa María, constituyen relieves emergidos cercanos a la fosa (Figuras N° 3-9). La Península de Arauco e Isla Santa María (37° S-37,7°S) experimentaron alzamientos cosísmicos que superaron los 2 m. En las campañas de terreno y sobrevuelos de esa zona antes del terremoto, se pudo constatar que el acantilado costero que se localiza en el borde occidental de la Isla Santa María y Península de Arauco, se encontraba activo (Figuras N° 3 y N° 5). El aumento del nivel del mar era notorio en estas localidades evidenciando la subsidencia intersísmica. Este efecto obligó a construir muros de protección en las localidades de Tubul, Llico, Punta Lavapié y la Costanera de Lebu (Figuras N° 7 y N° 8), ya que el mar estaba llegando hasta las viviendas y caminos más próximos al litoral, ocurriendo daños importantes durante las marejadas. Durante el terremoto del 21 de mayo de 1960, Lebu experimentó un alzamiento de 1,2-1,3m (Veyl, 1969; Plafker & Savaje, 1970), provocando la emersión de la plataforma de abrasión marina y el desecamiento del río Lebu, el cual quedó no apto para la navegación. En las décadas previas al terremoto de 2010, la subsidencia intersísmica provocó que el río Lebu fuera nuevamente navegable. Por el contrario, el alzamiento cosísmico de 1960 en la Isla Mocha, no se recuperó como pudo constatarse en la visita efectuada el 6 y 7 de noviembre de 2009 evidenciado por la permanencia del segmento de plataforma de abrasión marina emergida en esa ocasión, que permitió la construcción de un camino que bordea la isla.

Luego del alzamiento cosísmico de 2010, se produjo una emersión de la plataforma de abrasión marina quedando fosilizado el acantilado costero y emergieron nuevos arrecifes en el borde occidental de la Península de Arauco e Isla Santa María, quedando expuesta la biota intermareal que pereció debido a la falta de agua (Figuras N° 3, N° 4 y N° 5). Destaca la microalga

*Lithothamnium* que vive adherida a las rocas litorales suministrándole tonalidades rojizas, luego del terremoto, quedó de color blanco. Picorocos (*Balanus*), Choritos (*Perumytilus*), Estrellas de mar (*Stichaster striatus*), Huiros (*Macrocystis pyrifera*) y Luche (*Ulva lactuca*) entre otras especies, quedaron desecados (Figuras N° 3, N° 4 y N° 5). En zonas con abundante Luche desecado, el olor es fétido debido a su descomposición. El espesor de la biota intermareal muerta sirve para determinar el alzamiento cosísmico. Las mediciones deben realizarse en zonas protegidas del oleaje ya que el impacto directo produce el efecto salpicadura (splash) y la amplitud vertical de la biota intermareal muerta es mayor. Las playas de esta zona fueron ensanchadas destacando aquellas situadas en Morhuilla, Lebu e Isla Santa María (Figura N° 5). En Tubul, se produjo un retroceso de 200 m del mar debido a su baja pendiente quedando una playa de arena fina negra quedando fosilizado el rompeolas (Figura N° 8). En Llico y Punta Lavapié sucedió un proceso similar con nuevas playas de arenas amarillentas (Figuras N° 3 y N° 7). El alzamiento cosísmico produjo un nuevo desecamiento del río Lebu, similar al de 1960, quedando imposibilitada la navegación y las embarcaciones quedaron de costado (Figura N° 6). El humedal de Tubul-Raqui experimentó también un desecamiento importante quedando expuesto el lecho limoso y con un impacto importante en la flora y fauna (Figura N° 9).



Figura 3. Punta Lavapié: Izquierda 2008, derecha 2010, se distingue la biota intermareal muerta en la roca de color claro. La emersión de la plataforma de abrasión marina y formación de una nueva playa es evidente. Fuente: propia.



Figura 4. Emersión de la plataforma de abrasión marina en la base del acantilado costero del borde occidental de la Península de Arauco. Se distingue el *Lithothamnium* blanqueado y los bloques (boulders) de arenisca de la fotografía derecha, fueron depositados por el tsunami.

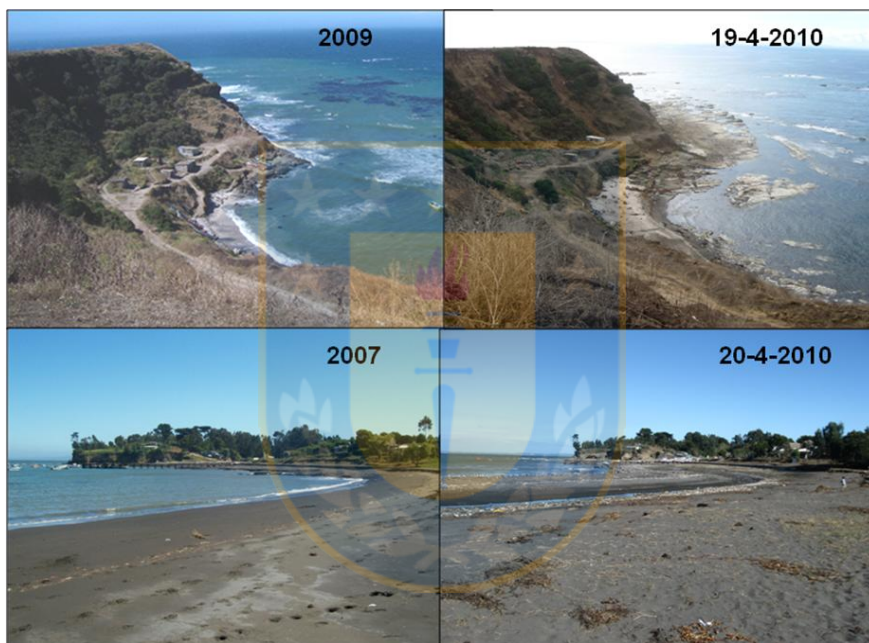


Figura 5. Isla Santa María. Arriba Caleta Hernández, abajo Puerto Sur. La emersión de la plataforma de abrasión marina y ensanchamiento de la playa es evidente. Fuente: foto superior izquierda: Carabineros Isla Santa María. Fotos restantes propias.



Figura 6. El desecamiento del Río Lebu impide la navegación. Fuente: propia.





Figura 7. Llico (37,19°S/73,56°W). Izquierda 2007, centro 17-3-2010, derecha: 6-5-2011. Antes del terremoto la subsidencia cosísmica obliga la construcción de un enrocado, luego del terremoto el alzamiento cosísmico de 2 m provoca un retroceso del litoral y el tsunami genera muchos escombros (centro) y posteriormente las marejadas de 2010 depositan un gran volumen de arenas formando una extensa playa. Fuente: izquierda, Panoramio, restantes, propias.



Figura 8. Evolución del litoral de Tubul. Antes del terremoto la subsidencia litoral obligó a la construcción de un enrocado, luego del terremoto en 2010 el mar se retira 200m, luego se forma una laguna costera y posteriormente las marejadas depositaron más arenas de playa. Fuente: propia.



Figura 9. Desecamiento del humedal de Tubul-Raqui. Fuente: propia.

Al norte y sur de la Península de Arauco, el alzamiento litoral en la Región del Biobío fue de 40-60 cm debido a su mayor lejanía con la fosa. El alzamiento fue notorio en el borde occidental de las bahías de Coliumo y Concepción. Debido a su baja pendiente y la presencia de los humedales de Coliumo y Rocuant, el retroceso horizontal del mar fue notorio y los humedales quedaron parcialmente desecados. Un efecto similar ocurrió en el humedal de Lengua en la Bahía de San Vicente que quedó con una playa un poco más ancha. Más al sur en la desembocadura del Río Biobío, también existe un pequeño humedal quedando la laguna litoral con menos agua y las totoras (*Typha*) secas. Las playas del borde oriental del Golfo de Arauco como Escuadrón, Coronel, Playa Blanca, Lota, Colcura, Chivilingo y Laraquete (36,8°S-37,1°S) quedaron ensanchadas y en las rocas litorales también pereció la biota intermareal. Al sur de la Península de Arauco, ocurrieron procesos similares, la playa de Quidico (38,2°S) fue ensanchada quedando expuesta la biota intermareal y el muro rompeolas seco y en Tirúa (38,3°S), se produjo un desecamiento del río homónimo que dificultó la navegación. Los lagos Lanalhue y Lleulleu (37,9°S-38,2°S) evidenciaron también los cambios verticales generándose una traslación hacia el E de las aguas que produjo un descenso del nivel del agua en la ribera occidental y un aumento en la oriental donde algunos muelles quedaron sumergidos (Figura N° 10). Ello se debe al alzamiento cosísmico decreciente de W a E que provoca un basculamiento del terreno hacia el E (Figura N° 1) en un proceso análogo al inclinar un vaso con agua. En la zona epicentral del terremoto de 2010 entre Pelluhue y la desembocadura del río

Itata ( $35,65^{\circ}\text{S}$ - $36,4^{\circ}\text{S}$ ), no se reconocieron cambios en el relieve ni existen evidencias de cambios del nivel del mar. En la playa de Locanco ( $35,5^{\circ}\text{S}$ ) existen evidencias de alzamiento cosísmico de  $\sim 30$  cm con biota intermareal muerta y nuevos arrecifes emergidos ya que el litoral se acerca localmente a la fosa. En la Región del Maule no se reconocieron otras zonas de alzamiento cosísmico. En la Región de O´Higgins tampoco se reconocieron evidencias de alzamientos cosísmicos aunque Farías *et al.* (2010) y Vargas *et al.* (2011) reconocen evidencias de alzamiento  $\sim 20$  cm en Pichilemu ( $34,4^{\circ}\text{S}$ ) y Topocalma ( $34,1^{\circ}\text{S}$ ) con biota intermareal muerta. Estas zonas también constituyen prolongaciones locales del litoral hacia la fosa.



Figura 10. Inundación de un muelle y vegetación ribereña en la ribera oriental del lago Lleulleu ( $38,1^{\circ}\text{S}/73,27^{\circ}\text{W}$ ) debido a la traslación del agua por el alzamiento cosísmico decreciente de W a E que provoca un basculamiento al E del terreno. Fuente: Propia.

## **Subsidencias**

La subsidencia cosísmica litoral es marcada entre la parte sur de la Región de O´ Higgins y la mayor parte de la Región del Maule ( $34,5^{\circ}\text{S}$ - $35,4^{\circ}\text{S}$ ) con magnitudes entre 0,4-0,8 m. El cambio del relieve más notorio es la disminución del ancho de las playas. En Bucalemu, un arco que une dos rocas con arena de playa debajo antes del terremoto quedó con agua de mar y el retroceso de la playa fue superior a 10 m (Figura N° 18). Más al sur, la playa de Duao ( $34,9^{\circ}\text{S}$ ) desapareció por completo en algunas partes llegando el mar



hasta los muros protectores. Uno de los cambios más notables es la desaparición de la barra del río Mataquito (35°S). Esta barra se extendía 8 km hacia el norte por el litoral desde el eje del río, el cual desemboca en la localidad de La Pesca (34,97°S/72,19°W). Esta barra en su extremo sur tenía dunas de alturas mayores a 4 m. Debido a la subsidencia litoral y la remoción de las arenas por el tsunami, la barra fue sumergida, permaneciendo sólo donde había dunas más altas y todo el litoral donde estaba la barra quedó expuesto al oleaje marino (Figura N° 11, N° 12 y N° 19). La vegetación herbácea de la ribera del Río Mataquito quedó cubierta por el mar, secándose y pereciendo. Un efecto similar ocurrió en la desembocadura del río Huenschulami donde formaba un humedal en La Trinchera (35,1°S). Luego del terremoto, la barra litoral desapareció, el humedal se ensanchó y el agua salada cubrió bosques de pinos y eucaliptus que perecieron. En Constitución (35,3°S), la subsidencia cosísmica de 40 cm provocó una disminución del ancho de la playa Los Gringos y el aumento de la profundidad en la zona de la desembocadura del Río Maule, favoreciendo la navegación, cubriendo el agua salobre las raíces y base de los troncos de los Eucalyptus más ribereños de la Isla Orrego que perecieron, quedando sin follaje (Figuras N° 13 y N° 16). En la playa chica de Cartagena (33,6°S) se pudo observar el 14 de abril de 2010 una nueva capa de Luche nuevo de color verde muy claro en la parte superior de las rocas litorales de 30-40 cm de espesor, que evidencia una subsidencia cosísmica al llegar el nivel del mar a mayor cota, esta alga colonizó la parte superior de las rocas. Testimonios de pescadores del vecino puerto de San Antonio también indican un aumento de la altura de la marea alta, lo cual evidencia una subsidencia cosísmica, que fue corroborada con GPS en la localidad de Rocas de Santo Domingo (7 N° km al sur de Cartagena), el cual indicó un hundimiento de 16 cm (Vigny *et al.*, 2011). Capas de luce nuevo también fueron observadas en la zona de Iloca, Duao y Pichilemu.

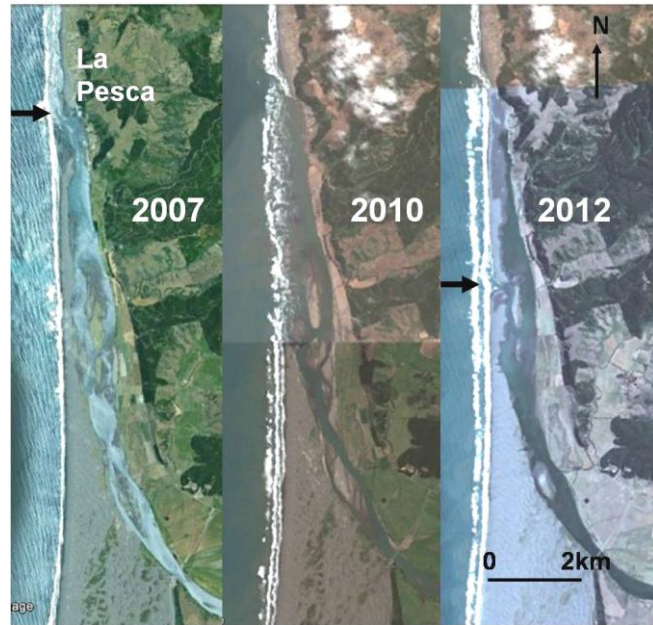


Figura 11. Imágenes Google Earth donde puede observarse la evolución de la barra del río Mataquito. La flecha indica la desembocadura.



Figura 12. Orilla del río Mataquito 500 m al sur de La Pesca. Izquierda. Abril 2010, se distingue la vegetación terrestre seca al ser cubierta por agua salada. Derecha: mismo lugar en abril 2012, la vegetación fue reemplazada por otras especies acuáticas y se depositaron arenas durante marejadas. Fuente: propia.



Figura 13. Eucalyptus sumergidos y desecados en la Isla Orrego del Río Maule en Constitución debido al ser cubiertos por agua salobre. Abril 2011. Fuente: propia

Otros efectos de la subsidencia cosísmica fueron notorios en ríos y lagos. Las salinas de Boyeruca ( $34,7^{\circ}\text{S}$ ) quedaron con más agua, la cota del agua del lago Vichuquén ( $34,8^{\circ}\text{S}$ ) aumentó en 40 cm y el agua inundó algunas zonas ribereñas de baja pendiente, especialmente hacia el NW y el río que desagua este lago al mar en su trayecto hacia Llico ( $34,75^{\circ}\text{S}/72,08^{\circ}\text{W}$ ), cubrió algunos árboles ribereños (El tsunami penetró hasta el lago Vichuquén). En el Río Itata ( $36,4^{\circ}\text{S}$ ), la laguna litoral quedó con mayor superficie; en Trehuaco (a 20 km de la desembocadura) y Ñipas (a 33 km de la desembocadura), el Río Itata aumentó su caudal ocurriendo un flujo contracorriente inundando zonas ribereñas. En Ñipas, la inundación permaneció al menos tres días desde el terremoto inundando un metro algunas tiendas de campamento instaladas en las arenas del río. Ello se debe a la modificación del perfil de thalweg, estando esa zona cercana a la máxima subsidencia cosísmica (Figura N° 1), lo que favorece la acumulación de agua. Un fenómeno similar ocurrió en el Río Biobío. En la localidad de Santa Juana ( $37,2^{\circ}\text{S}$  a 50 km de la desembocadura), se produjo un seiche con un avance del río en sentido contracorriente que inundó 1,2m en la vertical y 70 m en la horizontal sin provocar daños al no existir viviendas ribereñas y luego se produjo un retroceso. Aguas arriba en la zona de Laja-San Rosendo donde se produce la confluencia de los ríos Biobío y Laja,

se produjo un aumento de la altura del agua de 50 cm que cubrió una amplia extensión de la vegetación ribereña. Este efecto fue observado el 4 de abril de 2010 y no habían ocurrido precipitaciones de importancia ni deshielos luego del terremoto (Figura N° 14). Un GPS en esa zona registró 50 cm de subsidencia cosísmica (Vigny *et al.*, 2011) y esta zona corresponde a la de mayor magnitud en dirección normal a la fosa, de modo que también favoreció la acumulación de agua.



Figura 14. Inundación de vegetación en el Río Laja el 4 de abril de 2010 en la zona de confluencia con el Río Biobío (Laja-San Rosendo) debido a que está en la zona de mayor subsidencia cosísmica. Notar el follaje de los árboles que permite distinguir esta inundación de las que ocurren en invierno. Fuente: propia.

### **Efectos de las ondas sísmicas**

Las ondas sísmicas tuvieron amplitudes métricas como evidencian algunas zonas con suelos blandos como el Puente Maule en la ciudad de Coronel, quedando el suelo ondulado (Figura N° 15). Procesos de licuefacción y agrietamientos del suelo fueron comunes. Los agrietamientos fueron mayores en riberas de ríos y lagos donde existía una fuerte pendiente o talud, al crearse un efecto de borde por la existencia de una superficie libre, se favorece una extensión horizontal que provocó el deslizamiento de bloques de suelo con árboles incluidos varios metros hacia los cuerpos de agua y en algunos casos,



quedaron sumergidos. El hecho que los árboles permanecieran horizontales, evidencian una remoción en masa translacional. Zonas donde se observó este proceso: ríos Mataquito, Itata, Biobío, Laguna Grande de San Pedro, Lago Lleulleu y Laguna Redonda de Concepción. En esta última alguna grieta importante en su fondo, provocó una evacuación importante de agua que provocó un descenso de un metro del nivel del agua, quedando expuestas las raíces de los sauces ribereños. El Radal Siete Tasas al interior de Curicó así como una laguna en la Isla Mocha, fueron desecadas posiblemente debido a un proceso similar. Otro efecto de las ondas sísmicas fueron grandes remociones en masa tipo desprendimientos en la Isla Quiriquina, Isla Santa María y borde norte y este de la Península de Arauco. Estos desprendimientos ocurrieron en el acantilado costero, conformado por un talud de gran pendiente y roca arenisca fracturada. En el área de Tubul, se produjeron varios cortes del camino y la altura del material removido superó los 10 m.



Figura 15. Ondulación del terreno debido a las ondas Love en el Puente Maule de la ciudad de Coronel (37°S). Fuente: propia.

### **Cambios en el relieve en los meses posteriores al terremoto**

Luego de la ocurrencia del terremoto del 27 de febrero de 2010, ocurrieron cambios importantes del relieve generados principalmente por las réplicas y el oleaje marino, especialmente durante marejadas. Durante el período de mayor frecuencia de réplicas que ocurrió entre marzo y abril de 2010, se observó una

recuperación de parte del alzamiento cosísmico ~ 20-30 cm de subsidencia postsísmica en la Isla Santa María y borde occidental de la Península de Arauco que se evidencia por un pequeño avance del mar y la inundación de la parte inferior de la zona de *Lithothamnium* blanqueado en la base de las rocas litorales. Desde mayo de 2010, se observó una estabilidad en el nivel relativo del mar. Las mayores réplicas del terremoto del 27 de febrero de 2010 tuvieron magnitud  $M_w=7,1$ . La primera de ellas ocurrió el 2 de enero de 2011 en el área de Tirúa-Isla Mocha. Un recorrido en ambas localidades efectuado el 20 de enero de 2011, permitió determinar un alzamiento de 50 cm en la Isla Mocha y una subsidencia de 15 cm en Tirúa. Este nuevo alzamiento cosísmico en la Isla Mocha provocó una mayor emersión de la plataforma de abrasión marina que la de 2010 y una nueva capa de *Lithothamnium* blanqueado recientemente con 50 cm de espesor, que se distingue de un remanente de *Lithothamnium* blanqueado el año anterior. Se produjo una nueva mortandad de biota intermareal como choritos y luche y otra especie de alga intermareal, adquirió tonalidades amarillas. El descenso del nivel del mar es notorio en el muro situado a un costado del muelle nuevo en la costa oriental de la isla, donde el oleaje es protegido y es posible medir el espesor de la biota intermareal muerta. El aumento del nivel de río Tirúa es notorio al comparar el paisaje en las visitas efectuadas el 27-4-2010 y 20-1-2011 y esta variación puede determinarse en la base de los pilotes del puente. Testimonios de lugareños indican que ocurrió un nuevo tsunami penetrando un flujo contracorriente en el río Tirúa. En la Isla Mocha no se manifestó ningún tsunami y ese flujo puede ser explicado por la subsidencia cosísmica. La otra réplica  $M_w=7,1$  ocurrió el 25 de marzo de 2012 cerca de Constitución. Dos visitas se realizaron en esa zona, la primera el 10 de abril de 2012 y la segunda el 15 de mayo de 2012. Testimonios de pescadores de Constitución indicaron una mayor dificultad en la navegación por el río Maule y los troncos ribereños de la Isla Orrego ya no estaban tan sumergidos, lo que puede indicar un pequeño alzamiento cosísmico (Figura N° 16). El río Mataquito, no tuvo variaciones importantes, pero en la visita efectuada el 15 de mayo, se pudo notar una amplia inundación del humedal de la Trinchera, incluso en hora de marea baja, lo cual podría evidenciar una nueva subsidencia cosísmica en esa zona (Figura N° 17).





Figura 16. Inundación de un árbol en el borde W de la Isla Orrego, Constitución. Izquierda abril 2011, derecha, mayo 2012 y la inundación es menor emergiendo parte de la isla. Fotografías tomadas en transición entre mareas. Fuente: propia.



Figura 17. Inundación de pinos en La Trinchera (35,1°S). Izquierda abril 2011; derecha, mayo 2011. Tomadas en transición entre mareas. Los pinos murieron al ser cubiertos por agua salada. Se distingue la mayor inundación en la fotografía derecha. No hubo precipitaciones importantes entre abril y mayo de 2012. Fuente: propia.

Cambios importantes en el relieve litoral ocurrieron luego de las marejadas entre junio y septiembre de 2010. Bucalemu fue visitado el 13 de abril de 2010 y 16 de octubre de 2010 donde pudo observarse en la última visita, que la playa se había reconstruido y bajo el arco se había depositado nuevamente arena con más de un metro de potencia (Figura N° 18). En esa fecha, la barra del río Mataquito se estaba reconstruyendo y para abril de 2011, se había formado nuevamente y se acrecionó al litoral formando una playa con ancho de 200 m en La Pesca (Figura N° 11 y N° 19). El río Mataquito desemboca atravesando la barra más al sur que antes. Algunas arenas de playa cubrieron nuevamente los relictos de vegetación terrestre ribereña sumergida por la subsidencia cosísmica. La barra del río Huenchulami se había vuelto a formar y

algunas arenas cubrieron parte del humedal ensanchado después del terremoto. Un año después del terremoto los pinos de La Trinchera y Eucalyptus de la Isla Orrego estaban totalmente secos y dos años después del terremoto los Eucalyptus situados más al interior de la Isla Orrego tenían un nuevo crecimiento de hojas (Figura N° 13, N° 16 y N° 17). Las marejadas de junio de 2010 depositaron 1,5 m de arenas (silíceas amarillentas) en Llico (Golfo de Arauco, 37,19°S), formando una nueva playa de 20 m de ancho que casi cubrieron el muelle que había quedado seco debido al alzamiento cosísmico de 2010 (Figura N° 7). En Tubul, se había formado una laguna costera en la playa emergida y luego de las marejadas de 2010 y 2011, se depositaron más sedimentos en esta playa y la morfología de esa laguna litoral evoluciona constantemente (Figura N° 8).

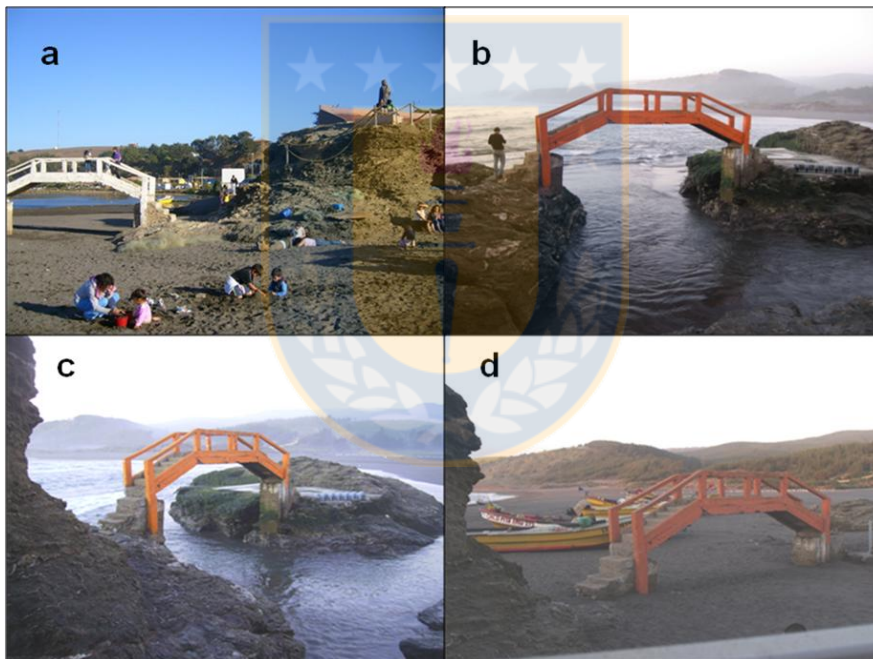


Figura 18. Bucalemu: a) 2007: no hay agua en la base del arco. b) y c) 14-4-2010, marea baja. d) 16-10-2010. La arena cubre casi en su totalidad la roca de las fotos b y c. Fuente: superior izquierda: Panorámico, fotos restantes, propias.



Fig. 19 Cambios del paisaje en La Pesca. Izquierda: 13-4-2010, derecha. 10-4-2012, superior: vista al sur, inferior, vista al W. Para 2010 la barra litoral del Río Mataquito se había sumergido y para 2011 se había reconstituido, acreciónándose al litoral de La Pesca permaneciendo así en 2012. Fuente: Propia.

### La influencia de los terremotos de subducción en el relieve litoral

Los cambios del relieve generados durante el terremoto del 27 de febrero de 2010 son similares a los que ocurren en otros terremotos de subducción en el circumpacífico. El litoral de la Región del Biobío tuvo un alzamiento cosísmico debido a la existencia de penínsulas e islas litorales que acercan la línea del litoral hacia la fosa, zona donde se localiza el levantamiento cosísmico principal (Figura N° 1). Las zonas más cercanas a la fosa como la isla Santa María y península de Arauco tuvieron el mayor alzamiento cosísmico: ~2 m. Este alzamiento fue decreciente de fosa a arco con magnitudes de ~0,5 m en las penínsulas de Hualpén, Tumbes e isla Quiriquina y borde oriental del golfo de Arauco. En litorales más alejados de la fosa, como el borde oriental de las bahías de Concepción y Coliumo, el alzamiento fue de 0-0,20 m y más al norte donde no hay penínsulas ni islas, el alzamiento cosísmico fue nulo. Ello evidencia un patrón de alzamiento cosísmico decreciente de fosa a arco, característico de los terremotos de subducción. En cambio, la mayor parte del litoral de las regiones de Valparaíso, O'Higgins y Maule, tuvieron una subsidencia cosísmica ya que la ruptura del segmento norte del terremoto de

2010 fue más superficial. De este modo, la transición entre alzamiento y subsidencia está más cerca de la fosa y el litoral de esas regiones está más al E de esta transición y toda la zona de alzamiento principal está bajo fondo marino. Esto explica también el mayor *tsunami* generado en el segmento norte de la ruptura, comparado con el que se generó en el segmento sur al desplazar un mayor volumen de agua, mientras que en el segmento sur, el relieve cercano a la fosa de las penínsulas e islas litorales de la Región del Biobío, le quitan superficie al mar que pueda desplazar agua. La vertiente oriental de la cordillera de la Costa y la zona de la Depresión Intermedia de toda el área de ruptura, tuvieron una subsidencia cosísmica. Los cambios del relieve generados por el alzamiento cosísmico litoral como emersión de la plataforma de abrasión marina, ensanchamiento de playas y desecamiento de humedales, tuvieron un impacto importante en la biota intermareal y las actividades antrópicas. Una de las principales actividades económicas de la península de Arauco e isla Santa María, es el cultivo de moluscos y algas, y el descenso relativo del nivel del mar afectó cultivos y su extracción. Además, la navegación fue dificultada por la disminución de la profundidad de los ríos Tirúa, Tubul y Lebu (Figuras N° 6, 8 y 9), y en este puerto así como en Llico (Figura N° 7), los muelles quedaron inutilizados debiendo permanecer las embarcaciones mar afuera. Como efectos positivos, destaca el ensanchamiento de las playas de Lebu y Llico con potencial turístico (Figura N° 7). Las zonas de subsidencia litoral no tuvieron gran impacto en las actividades antrópicas, en Constitución la navegación fue facilitada por la mayor profundidad del río Maule, en Duao la reducción del ancho de la playa disminuyó el espacio para guardar los botes de los pescadores, y su desaparición por completo en algunas zonas, quitó un elemento de esparcimiento. Debido a que los terremotos son parte del ciclo sísmico de subducción (período cosísmico), la mayor parte de los alzamientos/subsidencias se van a recuperar durante el período intersísmico. Esto ocurrió luego de los alzamientos cosísmicos de 1835 y 1960 que tuvieron efectos similares en el relieve litoral de la Región del Biobío (Fitz-Roy, 1839; Darwin 1851 y Veyl, 1960), los cuales desaparecieron en las décadas sucesivas debido a la subsidencia intersísmica. La subsidencia intersísmica no contrarrestará todo el alzamiento cosísmico, lo cual se evidencia en las líneas



de paleocostas que se observan en la planicie litoral holocena del litoral del golfo de Arauco, incluyendo a la isla Santa María, y más al sur de la península de Arauco, en la isla Mocha. La mayor cota de la planicie litoral holocena emergida en la isla Santa María: 8,3 m medida antes del terremoto, comparadas con los 4 m que tenía el litoral continental frente a ella en Escuadrón y Coronel, se corresponden con los alzamientos cosísmicos de 2010 que tuvieron ambas localidades: 2 y 0,5 m, respectivamente. Ello es consistente con el patrón de alzamiento cosísmico decreciente de fosa a arco (desde W a E, Figura N° 1), evidenciando que el alzamiento y ensanchamiento de la planicie litoral holocena, es el resultado del alzamiento remanente durante sucesivos ciclos sísmicos de subducción (alzamiento cosísmico menos subsidencia intersísmica). Debe tenerse presente que las playas ensanchadas por el alzamiento cosísmico, se reducirán en las décadas sucesivas, y la extensión de los muelles que quedaron secos, como el de Llico (Figura N° 7) que se está construyendo, puede significar que quede sumergido en los años siguientes. Las zonas de subsidencia cosísmica en las regiones del Maule y O'Higgins van a experimentar un alzamiento intersísmico, como el que indicó Ruegg *et al.* (2009), y en el largo plazo, el relieve permanecerá con pocas variaciones. La mortandad de árboles en Constitución y La Trinchera (Figuras N° 13 y N° 17), quedará como testimonio de la subsidencia cosísmica y efectos similares ocurrieron en la costa de Valdivia y Chiloé donde todavía quedan esqueletos de troncos de árboles muertos, al ser cubiertos por el agua salada debido a la subsidencia cosísmica de 1960.

Una zona anómala de movimientos cosísmicos e intersísmicos es la zona de isla Mocha-Tirúa (38,3° S) ya que el alzamiento cosísmico de 1960 en la isla Mocha, no se recuperó (a diferencia del que experimentó Lebu y la parte sur de la península de Arauco, afectadas también por este terremoto, permaneciendo el alzamiento de 1960 en la isla Mocha, hasta la ocurrencia del terremoto de 2010. El alzamiento cosísmico de 2010 en la isla Mocha: 25 cm, fue de muy baja magnitud a pesar de su cercanía a la fosa, y además fue menor a los 60 cm de Tirúa situado en el litoral continental, donde se esperaría un alzamiento menor como ocurrió en 1960. En esa zona ocurrió además una de las réplicas

de mayor magnitud del terremoto,  $M_w = 7,1$  el 2 de enero de 2011, que provocó un alzamiento mayor en la isla Mocha: 50 cm, que duplicó al del terremoto de 2010. Estos procesos se pueden explicar por la existencia y actividad de una falla inversa cortical tipo *splay fault* que acomodó el deslizamiento cosísmico de 2010 en esa zona (Figura N° 2). Esta falla se localiza en el fondo marino entre Tirúa e isla Mocha, por lo que se denomina falla Mocha-Tirúa y provoca el cabalgamiento cosísmico del bloque de Tirúa por sobre el de la isla Mocha, y la permanencia del alzamiento cosísmico de 1960 en esta isla. El alzamiento adicional de esta falla, tiene además un impacto en el relieve ya que la planicie holocena de la isla Mocha tiene una cota de 34 m.s.n.m. (antes del terremoto), que contrasta con los 8,3 m que tenía la isla Santa María, que experimenta subsidencia intersísmica donde se recupera gran parte del alzamiento cosísmico. La remoción de las arenas litorales por el *tsunami* y su posterior retrabajo, generan cambios muy dinámicos en la morfología litoral. La desaparición de las barras litorales de los ríos Huenchulami y Mataquito, así como la erosión de la playa de Bucalemu debido a la subsidencia litoral y el *tsunami*, y la rápida reconstrucción de estos rasgos morfológicos en un año (Figuras N° 11, N° 12, N° 17, N° 18 y N° 19), se explican por el hecho que las arenas removidas por el *tsunami* quedaron sueltas con poca compactación, de modo que el oleaje sucesivo, especialmente luego de marejadas, volvió a redepositarlas. La corriente fluvial de los ríos Mataquito, Huenchulami y Bucalemu, también ayudó a la reconstrucción de las playas y barras litorales. La reconstrucción de la barra del río Mataquito de 8 km de longitud (Figuras N° 11, N° 12 y N° 19), se explica además por el aporte sedimentario de la duna situada en su extremo sur. La falta de sedimentos arenosos en la playa de Duao, donde antes del terremoto existía una playa más bien angosta con rocas, ha impedido su reconstrucción, permaneciendo con menor extensión. La remoción por el *tsunami* de las arenas litorales y su posterior retrabajo por las marejadas, contribuyó también al ensanchamiento de las playas de Tubul y Llico (Figuras N° 7 y N° 8), que ya habían crecido durante el alzamiento cosísmico de 2010.



## Conclusión

El terremoto Mw= 8,8 del 27 de febrero de 2010, provocó alzamientos y subsidencias cosísmicas que modificaron el relieve litoral. Los alzamientos fueron evidentes en el litoral de la Región del Biobío por tener su litoral más cercano a la fosa, debido a la existencia de penínsulas e islas litorales, así como por el hecho que la ruptura del segmento sur del terremoto fue más profunda que la del segmento norte, de tal modo que la distancia de transición entre alzamiento y subsidencia cosísmica está más alejada de la fosa. Estos alzamientos provocaron la emersión de la plataforma de abrasión marina, ensanchamiento de playas, muerte de biota intermareal, desecamientos de ríos y humedales costeros, que afectaron negativamente las actividades económicas como la extracción de algas y moluscos, y la navegación. La subsidencia cosísmica se manifestó en la vertiente oriental de la cordillera de la Costa y Depresión Intermedia, donde ocurrieron pocas modificaciones del relieve. También se manifestó en el litoral de las regiones de Valparaíso, O'Higgins y Maule, debido a la ruptura más superficial del segmento norte del terremoto de 2010, donde la transición entre alzamiento y subsidencia está más cercana a la fosa y, por lo tanto, al W del litoral de estas regiones. Esta subsidencia provocó la disminución del ancho de playas, desaparición de barras litorales y aumento de profundidad en las desembocaduras de los ríos, pereciendo la vegetación ribereña por aumento de la salinidad y favoreciendo la navegación. La mayor parte de estos movimientos verticales (alzamientos/subsidencias), se recuperarán durante el período intersísmico y el relieve será similar al que existía antes del terremoto, y el mayor efecto a largo plazo, es el ensanchamiento de la planicie litoral holocena de la Región del Biobío, que se debe al alzamiento remanente en ciclos sísmicos de subducción sucesivos (alzamientos–subsidencias). La elevada cota de la planicie litoral holocena de la isla Mocha (34 m.s.n.m. antes del terremoto, sumado a los 0,75 m posterior al terremoto de 2010 y réplica Mw = 7,1 de 2011), es mucho mayor a la que existe en la península de Arauco, isla Santa María y otras zonas del litoral de Chile, y crecerá más, debido al efecto adicional de la falla inversa cortical de Mocha-Tirúa. El *tsunami* removió las arenas litorales y sub litorales, en algunas zonas fueron depositadas tierra adentro, constituyendo depósitos

de *tsunami*; en otras zonas las arenas sueltas fueron redepositadas durante las marejadas posteriores, reconstruyendo o ensanchando playas. De esta forma, los terremotos de subducción generan cambios dinámicos en el relieve litoral.

### Referencias bibliográficas

COMTE, D.& BECK, S. The 2010 Chile earthquake- variations in the rupture mode. En: Viña del Mar y Valdivia, *American Geophysical Union Chapman Conference on Giant Earthquakes and their tsunamis*, 16-24 Mayo 2010.

DARWIN, C. *Geological observations of South America, geological observations on coral reefs, volcanic islands and on South America—Being the voyage of the Beagle, under the Command of Captain Fitzroy, R.N., during the years 1832 to 1836*. Londres: Smith and Elder, 1851.

DELOUIS, B.; NOCQUET, J.& VALLEE, M. Slip distribution of the February 27, 2010 Mw = 8.8 Maule Earthquake, central Chile, from static and high rate GPS, InSAR, and broadband teleseismic data. *Geophysical Research Letters* 2010, N°37, L17305, doi:10.1029/2010GL043899.

FARÍAS, M.; VARGAS, G.; TASSARA, A.; CARRETIER, S.; BAIZE, S.; MELNICK, D.; BATAILLE, K. Land-Level Changes Produced by the Mw 8.8 2010 Chilean Earthquake. *Science*, 2010, N° 329, p. 916.

FARÍAS, M.; COMTE, D.; ROECKER, S.; CARRIZO, D. & PARDO, M. Crustal extensional faulting triggered by the 2010 Chilean earthquake: The Pichilemu Seismic Sequence. *Tectonics*, 2011, N° 30, TC6010, 11 PP., 2011 doi:10.1029/2011TC002888.

FITZ-ROY, R. Proceedings of the second expedition, 1831–1836, under the command of Captain Robert FitzRoy. En: Colburn, H (ed.). *Narrative of the surveying voyages of His Majesty's ships Adventure and Beagle between the years 1826 and 1836, describing their examination of the southern shores of South America, and the Beagle's circumnavigation of the globe*. Londres: 1839, p. 402-425.

LAY, T. A Chilean surprise. *Nature*, 2011, N°471, p.174-175.

LOMNITZ, C.,. Major earthquakes of Chile: A historical survey 1535-1960. *Seismological Research Letters*, 2004, vol.75 N°3, p. 368-378.

LORITO, S.; ROMANO, F.; ATZORI, S.; TONG, X.; AVALLONE, A.; MCCLOSKEY, J.; COCCO, M.; BOSCHI, E. & PIATANESI, A. Limited overlap between the seismic gap and coseismic slip of the great 2010 Chile earthquake. *Nature Geoscience*, 2011, N° 4, p. 173-176.

MADARIAGA, R.; VIGNY, C.; RUIZ, S.; BUFORN, E.; PRO, C.; LANCIERI, M.; RUEGG, J-C.; FUENZALIDA, A.; PEYRAT, S.; CAMPOS, J. & SOCQUET, A.

The Maule Mw 8.8 earthquake: Modelling using 1 Hz cGPS and seismic data. En: Viña del Mar y Valdivia, *American Geophysical Union Chapman Conference on Giant Earthquakes and their tsunamis*, 16-24 Mayo 2010.

MORENO, M.; ROSENAU, M. & ONCKEN, O. Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature*, 2010, N°467, p. 198-202.

PLAFKER, G. & SAVAGE, J. Mechanism of the Chilean Earthquakes of May 21 and 22, 1960. *Geological Society of America Bulletin*, 1970, N° 81, p. 1001-1030.

POLLITZ, F.; BROOKS, B.; TONG, X.; BEVIS, M.; FOSTER, J.; BÜRGMANN, R.; SMALLEY, R.; VIGNY, C.; SOCQUET, A.; RUEGG, J.; CAMPOS, J.; BARRIENTOS, S.; PARRA, H.; BAEZ, J.; CIMBARO, S. & BLANCO, M. Coseismic slip distribution of the February 27, 2010 Mw 8.8 Maule, Chile earthquake. *Geophysical Research Letters*, 2011, N° 38, L09309, doi:10.1029/2011GL047065, 2011.

QUEZADA, J. Interacción entre procesos tectónicos y procesos erosivos en la configuración del relieve litoral del Norte de Chile. Tesis de grado de Doctor en Ciencias, mención Geología. Antofagasta: Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Chile, 2007.

RUEGG, J-C.; RUDLOFF, A.; VIGNY, C.; MADARIAGA, R.; DE CHABALIER, J.; CAMPOS, J.; KAUSEL, E.; BARRIENTOS, S. & DIMITROV, D. Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepción in Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, N° 175, p. 78–85.

RYDER, I.; RIETBROCK, A.; KELSON, K.; BÜRGMANN., FLOYD, M.; SOCQUET, A., VIGNY, C. & CARRIZO, D. Large extensional aftershocks in the continental forearc triggered by the 2010 Maule earthquake, Chile. *Geophysical Journal International*, 2012, vol. 188 N°3, p. 879-890.

SLADEN, A.; MARK, S., BEVIS, M., BROOKS, B., FOSTER, J., SMALLEY, R., LIN, Y., FIELDING, E., ORTEGA, F., OWEN, S., HELMBERGER, D., WEI, S., PARRA, H., BAEZ, J. A coseismic distributed slip model for the 2010 Mw 8.8 Maule (Chile) earthquake. En: Viña del Mar y Valdivia, *American Geophysical Union Chapman Conference on Giant Earthquakes and their tsunamis*, 16-24 Mayo 2010.

TONG, X.; SANDWELL, D.; LUTTRELL, K.; BROOKS, B.; BEVIS, M.; SHIMADA, M.; FOSTER, J.; SMALLEY, R.; PARRA, H.; BÁEZ, J.; BLANCO M.; KENDRICK, M. & GENRICH, J. The 2010 Maule, Chile earthquake: downdip rupture limit revealed by space geodesy. *Geophysical Research Letters*, 2010, N° 37, L24311, doi:10.1029/2010GL045805, 2010.

VARGAS, G.; FARÍAS, M.; CARRETIER, S.; TASSARA, A.;BAIZE, S. & MELNICK, D. Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw 8.8

Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology*, 2011, vol. 38 N°1, p. 219-238.

VEYL, C. Los fenómenos volcánicos y sísmicos de fines de mayo de 1960 en el sur de Chile. Concepción: Universidad de Concepción, Instituto Central de Química, Departamento de Geología y Mineralogía, 1960.

VIGNY, C.; SOCQUET A.; PEYRAT, S.; RUEGG, JC.; MÉTOIS, M.; MADARIAGA, R.; MORVAN, S.; LANCIERI, M.; LACASSIN, R.; CAMPOS, J.; CARRIZO, D.; BEJAR-PIZARRO, M.; BARRIENTOS, S.; ARMIJO, R.; ARANDA, C.; VALDERAS-BERMEJO, MC.; ORTEGA, I.; BONDOUX, F.; BAIZE, S.; LYON-CAEN, H.; PAVEZ, A.; VILOTTE, JP.; BEVIS, M.; BROOKS, B.; SMALLEY, R.; PARRA, H.; BAEZ, JC.; BLANCO, M.; CIMBARO, S. & KENDRICK, E. The 2010 Mw 8.8 Maule Mega-Thrust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS. *Science*, 2011, N°332, p. 152-165.

