

# Determinación del **RIESGO** de los **IMPACTOS** del **CAMBIO CLIMÁTICO** en las costas de Chile

Volumen 8: Vulnerabilidad en Rapa Nui y  
Archipiélago Juan Fernández  
Ministerio del Medio Ambiente  
22 de octubre de 2019

### **Equipo consultor del estudio**

- Andrés Pica (PUC)
- Carolina Martínez (PUC)
- Catalina Marinkovic (PUC)
- César Esparza (UV)
- Cristián Larraguibel (PUCV)
- David Morales (PUC)
- Iván Torres (PUC)
- Javierra Mora (UV)
- José Miguel Fariña (PUC)
- Julio Salcedo (UPLA)
- Luis Flores (PUC)
- Macarena Pérez
- Manuel Contreras-López (UPLA)
- Nickolas Bassi (UPLA)
- Nicolás Bambach (PUC)
- Oscar Melo (PUC)
- Patricio Winckler (UV)
- Roberto Agredano (UCM)
- Sebastián Vicuña (PUC)
- Stefan Gelcich (PUC)

### **Equipo consultor volumen 8: Vulnerabilidad en Rapa Nui y archipiélago Juan Fernández**

- Patricio Winckler (UV)
- Manuel Contreras-López (UPLA)
- Cristián Larraguibel (PUCV)
- César Esparza (UV)

### **Contraparte técnica del Ministerio del Medio Ambiente**

- Maritza Jadrijevic
- Nico Kohlhas
- Gladys Santis
- Priscilla Ulloa

### **Cómo citar este informe**

Ministerio del Medio Ambiente, 2019. Volumen 8: Vulnerabilidad en Rapa Nui y Archipiélago Juan Fernández, en “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”, Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.

## Resumen del estudio

El estudio **Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile**, busca generar información de proyecciones de la amenaza, exposición, vulnerabilidad y riesgo de los sistemas humanos y naturales de la zona costera ubicados en 104 comunas de Chile continental, además de Rapa Nui y el Archipiélago Juan Fernández. El objetivo de este estudio es sentar las bases para el diseño de políticas e implementación de medidas de adaptación. El estudio se desarrolló entre octubre de 2018 y octubre de 2019 y se presenta mediante un resumen ejecutivo, 8 volúmenes temáticos y un Sistema de Información Geográfica (SIG). El estudio, financiado y desarrollado por el Ministerio del Medio Ambiente, contó con la participación de 21 investigadores de 5 universidades (PUC, UV, UPLA, PUCV y UCM) y 3 centros de investigación (CCG-UC, CIGIDEN y COSTAR-UV).

El **estudio de amenaza** se basa en el análisis histórico del oleaje y del nivel medio del mar (NMM), además de una proyección para el período 2026-2045 de estas variables y de la cota de inundación. En primer lugar, se analiza el comportamiento histórico del oleaje obtenido a partir un modelo numérico (WWIII) cada 2° de latitud (1980-2015). El análisis de clima medio del oleaje concluye que ha habido un incremento leve en la altura y el período, además de un giro al sur del oleaje, probablemente asociados a la migración al sur del Anticiclón Permanente del Pacífico Sur. El análisis de clima extremo demuestra en todo Chile se ha registrado un aumento en la cantidad de marejadas de 0.1 a 0.3 eventos más por año, dependiendo de la latitud. El estudio de NMM, basado en el análisis de 11 mareógrafos con más de 30 años de data, muestra que no existe una tendencia clara de aumento en Chile, lo que puede atribuirse a las deformaciones de la corteza producto del ciclo sísmico. En particular, en el norte existe un descenso del NMM probablemente asociado al acoplamiento de las placas tectónicas luego del terremoto de 1877.

En segundo lugar, el estudio busca evaluar los cambios del oleaje (marejadas), NMM y cota de inundación entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) correspondiente al escenario de emisiones RCP 8.5 del IPCC. El estudio de oleaje basa en el forzamiento del modelo WWIII mediante 6 modelos de viento en toda la cuenca del Pacífico. El modelo es calibrado y validado con registros de boyas direccionales y altimetría satelital entre 1980 y 2015. El estudio de clima medio concluye que la altura de ola y el período seguirán incrementándose levemente y el oleaje girará más al sur, también en forma moderada. Los eventos extremos, no obstante, serán más frecuentes e intensos, sobre todo en la zona central de Chile, lo que seguramente aumentará los daños en la infraestructura costera. El estudio de NMM, por su parte, se basa en 21 modelos disponibles en el CMIP5 los cuales se analizan cada 5 [km] en forma latitudinal. El estudio concluye que, en todo Chile, incluidas Rapa Nui y Juan Fernández, se espera un ascenso de 0.15 a 0.18 [m], con un rango de incertidumbre del orden de  $\pm 0.1$  [m] para la proyección. A fines de siglo, no obstante, el incremento sería del orden de  $0.65 \pm 0.3$  [m]. La cota de inundación, calculada a partir del oleaje, el NMM, la marea astronómica y la marea meteorológica, presenta valores de 2.5 [m] NRS en el extremo norte a 3.5 [m] NRS en el Canal Chacao para el escenario histórico y de entre 2.8 a 3.8 [m] NRS para ambos extremos. El aumento de la cota de inundación abarca desde +0.23 a +0.29 [m] en los extremos sur y norte, respectivamente.

El **estudio de exposición** consiste en elaborar un modelo de elevación digital (DEM) en 106 comunas a partir de tres fuentes satelitales (ASTER GDEM-2, ALOS WORLD 3D y ALOS PALSAR). A partir del DEM se elabora un inventario de exposición de los sistemas humanos y naturales ubicados bajo los 10 metros sobre el nivel del mar (msnm). El inventario es generado a partir de información disponible en los servicios públicos, levantamientos en terreno y talleres efectuados en Antofagasta, Valparaíso y Concepción. Luego de un proceso de limpieza de 174.746 registros identificados inicialmente, se llega a un inventario con 18.376 entradas, separadas en 6 categorías (población, infraestructura, equipamiento, economía, sistemas naturales y otros), subdivididas a su vez en 76 tipos de entidades. La información más relevante del inventario es presentada a nivel nacional, regional y comunal. En síntesis, el inventario identifica un total de 972.623 personas habitando en los primeros 10 msnm y que en dicha área se ubican 546 caletas de pescadores, 1692 humedales, 256 campos dunares, 1172 playas, 156 lugares de interés para la biodiversidad, 1198 equipamientos (colegios, jardines infantiles, carabineros, entre otros), 171 terminales marítimos, 475 elementos de infraestructura costera y 477 asentamientos, entre otros elementos (Tabla 22, Volumen 1). A partir inventario y mediante el juicio experto, se definen 12 comunas críticas en las que se utilizan planos de borde costero del SHOA para refinar el cálculo de la vulnerabilidad. Las comunas críticas son Antofagasta, Coquimbo, Viña del Mar, Valparaíso, Pichilemu, Talcahuano, Coronel, Arauco, Puerto Saavedra, Valdivia, Rapa Nui y el Archipiélago Juan Fernández; ambas últimas que se detallan en el volumen de **vulnerabilidad y riesgo en islas oceánicas**.

El **estudio de vulnerabilidad** se orienta a los sistemas humanos y naturales identificados en el estudio de exposición. Dada la gran cantidad y complejidad de categorías (6) y entidades existentes (76), el análisis se reduce a evaluar si cada objeto del inventario de exposición será o no inundado durante la proyección (2026-2045) bajo el escenario RCP 8.5. Las líneas de inundación para el período histórico y la proyección se presentan en el SIG. El estudio concluye que 589 manzanas censales, 46357 personas y 18338 viviendas pasarían a ubicarse en zonas de inundación. Lo mismo ocurriría 17 puentes, 4245 puntos de la red vial, 8 centros de distribución de energía por hidrocarburos, 1 central termoeléctrica, 2 subestaciones y 53 elementos de infraestructura sanitaria. Con respecto al equipamiento comunal, 10 edificaciones de bomberos, 7 establecimientos de salud, 49 de educación y 5 de policía se ubicarían en zonas inundables. Por último, se identifican 358 elementos asociados al turismo en dichas zonas. Adicionalmente, y en volúmenes separados, se caracteriza la vulnerabilidad (y cuando es posible el riesgo) de playas, caletas, puertos y humedales, proponiendo también medidas de adaptación específicas para estos sistemas.

En el estudio de **vulnerabilidad en playas** se determinan los cambios en la posición de la línea litoral para 35 playas en las regiones de Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso, O'Higgins y Biobío. Para ello se usa el software DSAS, fotografías aéreas, imágenes satelitales y levantamientos topográficos. El análisis cubre desde 39 años (La Serena) a sólo 3 años (Lebu-Tirúa), pero en 33 playas exceden los 20 años. Los resultados integrados en el SIG indican que el 9% de estas playas presenta erosión alta (mayor a 1.5 m anuales), el 71% erosión, el 11% un estado estable y solo un 9% acreción. Los casos de mayor erosión corresponden a extensos litorales arenosos, asociados a campos dunares y humedales. El estudio histórico no establece las causas que explican la erosión generalizadas, que pueden ser de origen oceanográfico, geofísico, antrópico o hidrológico. En el estudio de **riesgo en playas** se estima, en forma general, que aquellas playas



ubicadas entre Arica y el Canal Chacao experimentarán retrocesos medios de entre 3 y 23 [m] por efecto de cambios en oleaje y nivel del mar en el escenario RCP 8.5 en el período 2026-2045. La tendencia es que playas largas experimenten erosión en sus extremos sur y acreción en sus extremos norte debido a un leve cambio en la dirección del oleaje. La estimación del daño económico calculado en forma específica para 6 playas en la Región de Valparaíso permite estimar una pérdida cercana a los 500 mil dólares anuales producto del riesgo de erosión causada por cambio climático.

En el estudio de **vulnerabilidad en puertos** se analiza el impacto histórico asociado a la pérdida de disponibilidad de sitios de atraque debido a oleaje (*downtime*). A partir de los certificados de cierre de puerto (2015 a 2017) y una base de datos de SERVIMET (2007 a 2014) se concluye que, entre 2008 y 2017, se registraron 9097 cierres de puerto en 19 capitanías expuestas al Océano Pacífico de las cuales se contó con información. Los puertos con mayor cantidad de cierres son Arica (850), Tocopilla (802) y Quintero (761). El estudio de **riesgo en puertos** se evalúa el *downtime* operacional en 9 puertos en Chile (Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente). El oleaje en aguas profundas se transfiere a cada puerto utilizando un modelo numérico (SWAN). Luego, el *downtime*, expresado en horas de cierre por año, se calcula comparando el clima del oleaje local con límites operacionales definidos en la ROM 3.1-99 (PPEE, 2000) para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045). Se concluye que algunos puertos mejorarán y otros empeorarán su operatividad y que el clima extremo será más severo a mediados de siglo. La mejora operativa puede explicarse por el giro al sur del oleaje que mejoraría las condiciones de abrigo de puertos ubicados en el extremo sur de las bahías. En términos económicos, el análisis a nivel agregado para los 9 puertos se traduce en pérdidas de US\$ 4,12 millones anuales y ganancias por US\$ 6,34 millones anuales, dando como resultado unas ganancias netas de US\$ 2,22 millones anuales como efecto del cambio climático. El aumento del NMM, sumado al incremento en la frecuencia e intensidad de las marejadas, no obstante, significará un aumento significativo del sobrepaso y del daño estructural de obras portuarias. Se proponen medidas de adaptación para mejorar las condiciones operacionales y para la gestión de la infraestructura en un contexto de clima futuro más severo que el actual.

Dada su similitud operacional, el estudio de **vulnerabilidad en caletas** equivale al de puertos y busca mostrar que estas han experimentado numerosos cierres debido a marejadas en la última década. En el estudio de **riesgo en caletas** de pescadores se evalúa el *downtime* operacional de las 546 caletas agrupadas cada 2° de latitud para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045), considerando los límites operacionales definidos en base a *focus groups* y encuestas para diferentes actividades (buzos, recolectores, embarcaciones de eslora inferior y superior a 12 m). El oleaje en aguas profundas se transfiere a la costa utilizando una metodología simplificada que rescata la física fundamental de la zona de aproximación a la costa, pero no las condiciones locales de cada caleta. El análisis concluye que un 23% de los registros pesqueros artesanales se encuentran en zonas con predicciones de aumento en *downtime* de pesca (19°S a 34°S). Hacia el sur, las condiciones operacionales asociadas al oleaje mejorarían en la proyección. Considerando los valores de desembarque y de precios en playa del año 2017, se estima una pérdida a nivel agregado que podría fluctuar entre los US\$ 1,3 y 7,6 millones anuales para las caletas ubicadas entre los 19°S y 34°S, dependiendo del escenario. Las pérdidas en desembarque representan alrededor de un 2-5% de capturas actuales.

El estudio de **vulnerabilidad de humedales** presenta la distribución comunal de 1692 humedales costeros. A nivel específico y dependiendo de la disponibilidad de información y levantamientos en terreno, se identifica una tendencia general a la reducción del área de los espejos de agua (18 de 21 casos analizados) que podría explicarse por la reducción de los caudales (100% de 30 ríos analizados). Debido al incremento histórico de la frecuencia e intensidad de las marejadas extremas, los episodios de sobrepaso que aportan agua salada a los humedales podrían generar cambios en el patrón de dominancia de las especies vegetales levantadas en los humedales costeros. No obstante, los cambios identificados en los humedales podrían deberse a otros factores no estudiados como la influencia de perturbaciones naturales provenientes de la cuenca (aluviones), al efecto del pastoreo ejercido por vacas y caballos, al pisoteo de turistas y al efecto combinado de dichos factores, tsunamis y tormentas marinas.

# Contenidos

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
1.1 OBJETIVOS	9
1.2 ESTRUCTURA DEL INFORME	10
1.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO	10
1.4 EQUIPO DE TRABAJO	12
1.5 AGRADECIMIENTOS	13
1.6 GLOSARIO	14
<b>2 MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>16</b>
2.1 RAPA NUI	16
2.2 ISLA ROBINSON CRUSOE, ARCHIPIÉLAGO JUAN FERNÁNDEZ	17
2.3 ANTECEDENTES	18
<b>3 AMENAZAS</b>	<b>20</b>
3.1 NIVEL DEL MAR	20
3.1.1 Análisis histórico	20
3.1.2 Proyección	21
3.2 OLEAJE	23
3.2.1 Análisis histórico	23
3.2.2 Proyección al período 2026-2045	28
<b>4 EXPOSICIÓN</b>	<b>33</b>
4.1 RAPA NUI	33
4.2 ARCHIPIÉLAGO JUAN FERNÁNDEZ	36
<b>5 VULNERABILIDAD</b>	<b>38</b>
5.1 RAPA NUI	38
5.1.1 Vulnerabilidad inestabilidad de los acantilados de Rano Kau	38
5.1.2 Vulnerabilidad en playas	39
5.1.3 Vulnerabilidad de ahus y moais	43
5.1.4 Vulnerabilidad en puertos	44
5.2 ISLA ROBINSON CRUSOE	46
<b>6 MEDIDAS DE ADAPTACIÓN</b>	<b>46</b>
6.1 RECOMENDACIONES	46
6.1.1 Riesgo de tsunamis	46
6.1.2 Otros riesgos asociados al cambio climático en Rapa Nui	46
<b>7 REFERENCIAS</b>	<b>48</b>
<b>8 ANEXOS</b>	<b>49</b>
8.1 PROYECCIONES DE OLEAJE EN RAPA NUI Y ROBINSON CRUSOE	49



# 1. INTRODUCCIÓN

Muchos de los cambios observados en el sistema climático desde la década de 1950 no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios (IPCC, 2014). Este fenómeno ha forzado la adopción de medidas y acuerdos a nivel internacional para atenuar, en la medida de lo posible, las consecuencias de este fenómeno. En una primera instancia, los acuerdos se enfocaron en mitigación de gases efecto invernadero, pero los impactos del calentamiento global se han visto de manera más recurrente, teniendo que enfocarse esfuerzos en adaptación. Los impactos asociados a los efectos agudos y crónicos del cambio climático son cada vez más evidentes en el caso de Chile. Para avanzar en el desafío de la adaptación es necesario entender los riesgos en distintos componentes del sistema productivo, ambiental y social del país.

Atendiendo a la escasez de información sobre los efectos de este fenómeno en el litoral de nuestro país, se presenta el primer informe de la consultoría "Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile", cuyas bases administrativas y técnicas corresponden a la R.E. N° 0568, del 11 de julio de 2018, del Ministerio del Medio Ambiente. El estudio es desarrollado por una alianza entre el Centro de Cambio Global UC (CCG), el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), la Universidad de Valparaíso, la Universidad de Playa Ancha, la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y la Universidad Católica del Maule.

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto es "Generar información de proyecciones respecto de la amenaza del cambio climático en las costas de Chile y sus impactos, a escala regional, y determinar el riesgo asociado a este fenómeno, para el diseño de políticas e implementación de medidas de adaptación".

A partir de este objetivo general, se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- a) Generar proyecciones de la amenaza del cambio climático en el borde costero de Chile continental e insular, considerando el escenario de emisiones RCP 8.5 del IPCC.
- b) Elaborar información sobre la exposición de sistemas humanos y naturales del borde costero de Chile continental e insular según los resultados del objetivo específico a).
- c) Realizar una evaluación de la vulnerabilidad frente a la amenaza del cambio climático, para el borde costero de Chile continental e insular
- d) Determinar el riesgo humano y físico frente a esta amenaza según los resultados de los objetivos específicos a) y b).

## 1.2 ESTRUCTURA DEL INFORME

Dado el gran volumen de información generada en esta consultoría, se presentan los resultados en los siguientes volúmenes:

- Resumen Ejecutivo
- Volumen 1: Amenazas (oleaje, nivel del mar y cota de inundación)
- Volumen 2: Exposición de zonas costeras
- Volumen 3: Vulnerabilidad de sistemas humanos y naturales
- Volumen 4: Vulnerabilidad y riesgo en playas
- Volumen 5: Vulnerabilidad y riesgo en puertos
- Volumen 6: Vulnerabilidad en humedales costeros
- Volumen 7: Vulnerabilidad y riesgo en caletas pesqueras
- Volumen 8: Vulnerabilidad en Rapa Nui y Archipiélago Juan Fernández

El presente Volumen 8 cubre vulnerabilidad en Rapa Nui y Archipiélago Juan Fernández.

## 1.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO

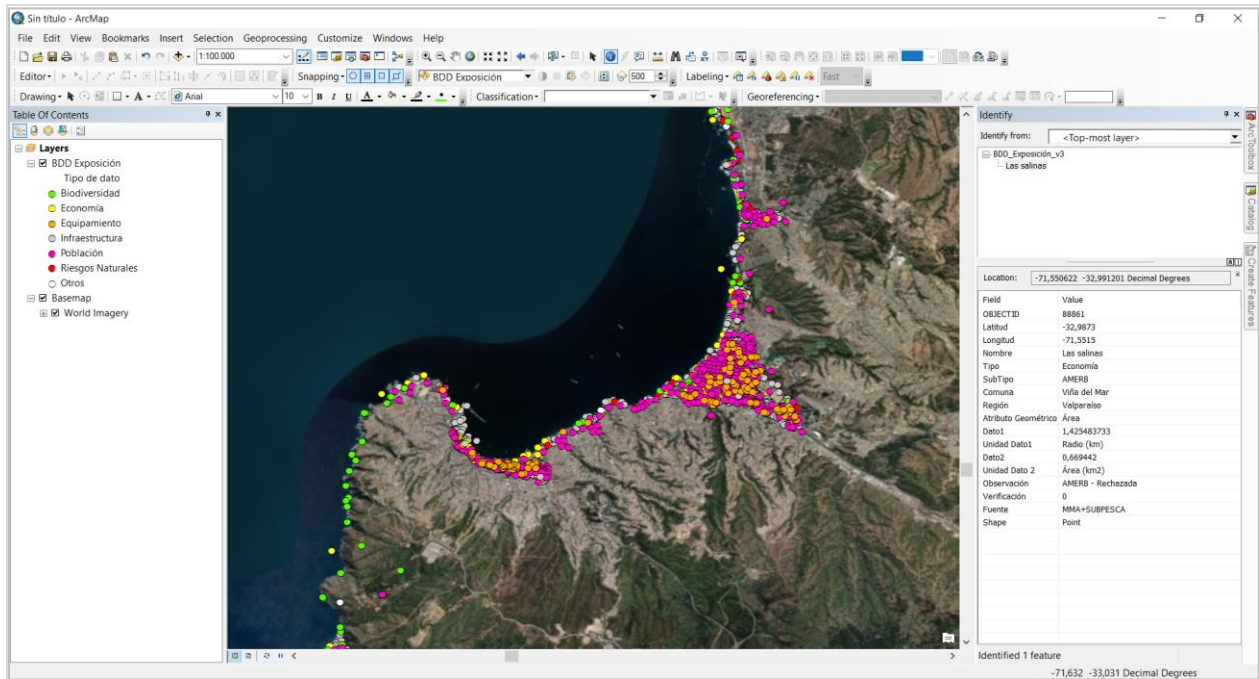
La información generada en el estudio fue proporcionada al Ministerio de Medio Ambiente en forma de un Sistema de Información Geográfica (SIG) mediante la elaboración de una Geodatabase<sup>1</sup> (GDB). Esta base de datos, compatible con el software ArcGis 10 o superior, se utilizó para elaborar sets planimétricos de exposición, vulnerabilidad y erosión costera, los cuales fueron entregados en formato PNG y como archivo editable propio del software (MXD).

La GDB contiene archivos vectoriales (puntos, líneas o polígonos) y ráster (matriz de datos compuesta por píxeles). Los primeros poseen una tabla de atributos con información detallada de cada elemento que conforma la base de datos. En los archivos ráster cada pixel tiene un valor asociado al dato observado. La base de datos SIG del proyecto tiene un aspecto como el ilustrado en la Figura 1.

---

<sup>1</sup> Información geoespacial contenida en una carpeta de archivos que comparten un origen común.

Figura 1: Ejemplo de visualización de la base de datos de Exposición en el SIG.



El SIG se estructuró de la siguiente manera:

- **Área expuesta:** contiene planos (PNG) y archivos editables (MXD) del área expuesta correspondiente a la franja de borde costero que se encuentra entre los 0 y 10 [m] sobre el nivel del mar (Volumen 2).
- **Área vulnerable:** contiene planos (PNG) y archivos editables (MXD) del área vulnerable correspondiente a la franja de borde costero afecta a la cota de inundación actual y futura (Volúmenes 1 y 2).
- **GDB CCCostas (.gdb):** contiene la base de datos de exposición y vulnerabilidad (Volúmenes 1 y 2). En su interior posee la siguiente información:
  - Área expuesta definida mediante un polígono del área expuesta nacional además de polígonos y curva de exposición para las comunas críticas<sup>2</sup>.
  - Área vulnerable definida mediante un polígono y curvas de vulnerabilidad identificadas a partir de las proyecciones de las cotas de inundación actual y futura, entre Arica y Canal Chacao.
  - Inventario de exposición separado en 7 categorías (biodiversidad, economía, equipamiento, infraestructura, población, riesgos naturales, otros) para 106

<sup>2</sup> El estudio de exposición (Volumen 2) identifica las siguientes comunas críticas: Antofagasta, Arauco, Coquimbo, Coronel, La Serena, Pichilemu, Saavedra, Talcahuano, Valdivia, Valparaíso y Viña del Mar.

comunas.

- Línea de costa del INE, modificada en algunos sectores y utilizada para calcular las longitudes costeras del territorio nacional.
  - Archivo vectorial de puntos con las características principales de las playas analizadas.
  - Modelos de elevación digital elaborados a partir de información topográfica detallada entregada por el SHOA para las comunas críticas.
  - Ortomosaicos de humedales generados en base a imágenes de drone de algunos de los humedales visitados en este estudio<sup>3</sup>.
- **Líneas de playa:** contiene los planos (PNG), archivos editables (MXD) y GDB de las playas analizadas en el estudio de erosión costera (Volumen 4).

## 1.4 EQUIPO DE TRABAJO

El equipo de trabajo está conformado por 21 académicos y profesionales de apoyo de la Pontificia Universidad Católica de Chile, de la Universidad de Valparaíso, de la Universidad de Playa Ancha, de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y la Universidad Católica del Maule (Figura 2). El trabajo se desarrolla bajo la coordinación del Centro UC de Cambio Global (CCG-UC<sup>4</sup>), centro de investigación interdisciplinario cuya misión es promover la colaboración académica (nacional e internacional) para investigar los fenómenos relacionados al cambio global, abordando integralmente las dimensiones biofísicas y humanas. Miembros del equipo de trabajo son también parte del Centro Integrado de Gestión de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN<sup>5</sup>), centro de investigación de excelencia que tiene como misión desarrollar, integrar y transferir conocimiento científico, y formar capital humano avanzado que contribuya a reducir las consecuencias sociales de los eventos naturales extremos. Se cuenta también con el apoyo del Centro de Observación Marino para estudios de Riesgos del Ambiente Costero de la Universidad de Valparaíso (COSTAR-UV<sup>6</sup>).

---

<sup>3</sup> Los humedales son: Carampangue, Cartagena, Cebada, Chaihuín, Conchalí, Cucao, El Culebrón, Tongoy, Huasco, Huentelauquén, La Boca (los Choros), Limarí, Mantagua, Merquinche, Pachingo, Pucotrihue, Punta Teatinos, Quilimarí, Salinas Chica, Salinas Grande, Salinas de Copiapó (Norte y Sur), San Alfonso, Vegas de Coliumo y Vegas del Itata.

<sup>4</sup> <https://cambioglobal.uc.cl/>

<sup>5</sup> <http://cigiden.cl/en/>

<sup>6</sup> <https://costar.uv.cl/>

Figura 2: Organigrama del equipo de trabajo e instituciones desarrolladoras.



## 1.5 AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a todas las instituciones que proporcionaron información en forma desinteresada o mediante la Ley de Transparencia y, en particular a aquellas personas en dichas instituciones que levantaron la información utilizada en este estudio. En particular, a las diferentes unidades del Ministerio del Medio Ambiente, a la Dirección de Obras Portuarias y a la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, al Ministerio de Bienes Nacionales y al Ministerio de Vivienda y Urbanismo, a la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas del Ministerio de Defensa, a SUBPESCA, SERNAPESCA, ONEMI, DIRECTEMAR, SHOA, IGM, Servicio Sismológico de la Universidad de Chile, SISS, INE, SERNATUR, Subsecretaría de Transporte (MTT). Finalmente, queremos agradecer a Gladys Santis, Maritza Jadrijevic, Nico Kohlhas y Priscila Ulloa, quienes ofician de contraparte técnica del proyecto.

## 1.6 GLOSARIO

En esta sección se presentan términos esenciales para comprender el texto. El glosario incluido en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014b) ofrece una definición mucho más detallada de términos que pueden complementar a los incluidos en esta lista. Adicionalmente, en los 8 volúmenes se incluyen otros términos (e.g. marejadas, marea meteorológica, nivel del mar) que son definidos en el marco teórico correspondiente a cada tópico.

- **Adaptación:** Proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos (IPCC, 2014).
- **Amenaza:** Es un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.
- **AR:** Assessment Report (Informe de Evaluación). Son documentos elaborados por centenares de expertos del IPCC, que dan cuenta del estado del arte de la ciencia del cambio climático. Se han elaborado cinco AR desde el primero en 1990. El último fue publicado entre los años 2013 y 2014.
- **Cambio climático:** El IPCC (2014b) define al cambio climático como la variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo (decenios o períodos más largos). El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. La CMNUCC define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad atribuible a causas naturales.
- **CMNUCC:** La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático ofrece una estructura para canalizar los esfuerzos intergubernamentales dirigidos a resolver el desafío del cambio climático.
- **Exposición:** La presencia de personas, medios de subsistencia, especies, ecosistemas, funciones, servicios y recursos ambientales, infraestructura, activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente (IPCC, 2014).
- **IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). Está compuesto por centenares de científicos y expertos que contribuyen de manera voluntaria, escribiendo informes para dar cuenta

del estado del arte de la ciencia del cambio climático y generando la mejor información técnica posible, para apoyar la toma de decisiones de los países.

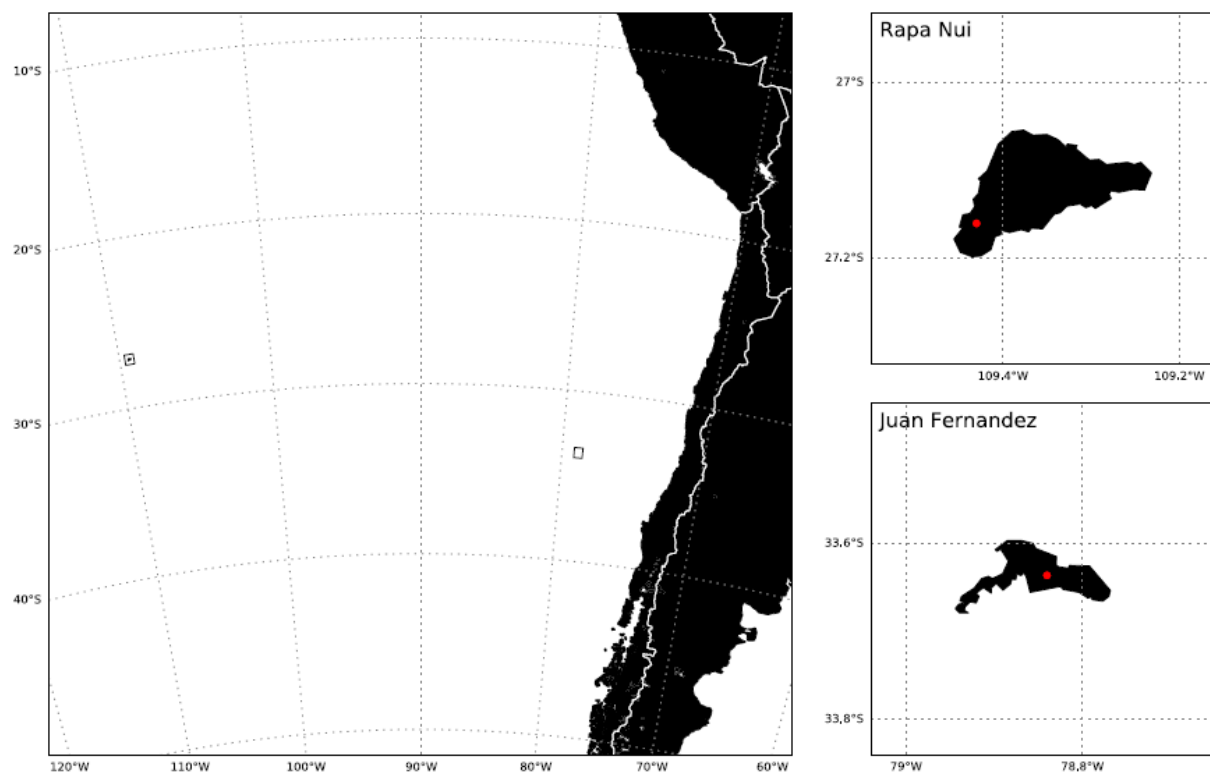
- **Impactos:** Efectos sobre los sistemas naturales y humanos de episodios meteorológicos y climáticos extremos y del cambio climático. Los impactos generalmente se refieren a efectos en las vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructuras debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren en un lapso de tiempo específico y a la vulnerabilidad de las sociedades o los sistemas expuestos a ellos. Los impactos también se denominan consecuencias y resultados. Los impactos del cambio climático sobre los sistemas geofísicos,
- **Mitigación:** es una intervención humana que busca disminuir las fuentes (y/o las emisiones de las mismas) o mejorar los sumideros de Gases Efecto Invernadero (GEI).
- **Riesgo:** Consecuencias eventuales en situaciones en que algo de valor está en peligro y el desenlace es incierto, reconociendo la diversidad de valores. A menudo el riesgo se representa como la probabilidad de ocurrencia de fenómenos o tendencias peligrosos multiplicada por los impactos en caso de que ocurran tales fenómenos o tendencias.
- **RCPs:** Las Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways) son escenarios que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de gases de efecto invernadero y aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre (IPCC, 2014b). Las RCPs, que hacen referencia a la parte de la trayectoria de concentración hasta el año 2100, son:
  - RCP2.6: Trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo a aproximadamente 3 [W/m<sup>2</sup>] antes de 2100 y posteriormente disminuye.
  - RCP4.5 y RCP6.0: Trayectorias intermedias en las cuales el forzamiento radiativo se estabiliza a aproximadamente 4.5 [W/m<sup>2</sup>] y 6.0 [W/m<sup>2</sup>] después de 2100.
  - RCP8.5: Trayectoria alta para la cual el forzamiento radiativo alcanza valores mayores a 8.5 [W/m<sup>2</sup>] en 2100 y sigue aumentando durante un lapso de tiempo.
- **SRES:** Special Report on Emissions Scenarios (Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones), usados para el AR4. Estos escenarios hacen supuestos ("historias") respecto al crecimiento de la población global futura, el desarrollo tecnológico, la globalización y los valores sociales. El escenario A1 ('una familia global') asume un futuro de globalización y rápido crecimiento económico y tecnológico, con uso intensivo de combustibles fósiles (A1FI), no intensivo en combustibles fósiles (A1T) y versiones equilibradas (A1B). El escenario A2 ('un mundo dividido') asume un mayor énfasis en las identidades nacionales. Los escenarios B1 y B2 asumen prácticas más sostenibles ('utopía'), con un enfoque más global y regional, respectivamente.
- **Vulnerabilidad:** Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación (IPCC, 2014b).



## 2 MARCO CONCEPTUAL

De acuerdo a los términos de referencia del estudio, se debe poner énfasis en las islas oceánicas de Rapa Nui y el Archipiélago Juan Fernández (Figura 3). Dada la condición insular de ambos territorios, durante el proyecto no se pudo efectuar un levantamiento en terreno detallado a objeto de corroborar la existencia y ubicación de las unidades identificadas por otros medios y las vulnerabilidades inherentes de dichos sistemas costeros. Por esta razón, los estudios de exposición y vulnerabilidad deben considerarse como preliminar y debiera ser complementado por levantamientos en terreno.

**Figura 3: Ubicación de Isla Rapa Nui y del archipiélago Juan Fernández en el sector del Pacífico Sur. En rojo se muestra las estaciones meteorológicas operadas por la DMC en cada isla (Bozkurt et al., 2018).**



### 2.1 RAPA NUI

La isla polinésica de Rapa Nui ( $27^{\circ}07'S$ ,  $109^{\circ}21'O$ ) se ubica a 3580 km al Este de Sudamérica, lo que le confiere características únicas para la evaluación del cambio climático oceánico en el hemisferio sur (Bozkurt et al., 2018). Es una isla volcánica de tipo oceánico y edad reciente, estructurada por un complejo ciclo efusivo que culminó con el desarrollo de varios centros eruptivos, los que asociados a los procesos erosivos del mar le dan hoy los rasgos morfológicos de una isla triangular con una superficie aproximada de 176 [km<sup>2</sup>] y una altitud máxima de 560 [m] sobre el nivel del mar.

Rapa Nui, la isla habitada más aislada del planeta<sup>7</sup> con 7.750 habitantes según el Censo 2017. A pesar de relieves altos, es vulnerable al cambio climático debido a su aislamiento, tamaño, la ubicación de su poblado Hanga Roa y el patrimonio cultural ubicado en zonas bajas (Quilliam et al., 2011). De hecho, su cultura “Rapa Nui” fue declarada “Patrimonio de la Humanidad” por la UNESCO en 1995.

Quilliam et al. (2011) evalúan el impacto del cambio climático en la inundación costera en Rapa Nui, basándose en las proyecciones del cuarto informe del IPCC (2007) y reuniones con partes interesadas<sup>8</sup>. Las proyecciones del aumento del nivel del mar de 0.26 a 0.59 [cm] para 2100 en combinación con movimientos corticales despreciables (Willis et al., 2010), indican que algunos sitios importantes y toda la infraestructura portuaria estará en riesgo de una inundación persistente ante tormentas. Quilliam et al. (2011) y Campbell et al. (2014) identifican los siguientes impactos costeros asociados al cambio climático en Rapa Nui:

- Erosión costera e inundación en las playas de Anakena y Ovahe
- Riesgo de inundación y daños en ahus<sup>9</sup> y moais<sup>10</sup> (Tahai, Hanga Roa y Tongariki)
- Inestabilidad de los acantilados de Rano Kau
- Efectos sobre la infraestructura portuaria de Hanga Piko y 4 puertos menores
- Riesgos de inundación por tsunamis
- Reducción de la disponibilidad de aguas subterráneas
- Impactos en el turismo

Existen estudios que especulan que el cambio climático podría haber sido responsable de la declinación de su población hacia 1600 (McCall 1979; Nunn 2000), pero esta hipótesis ha sido cuestionada por la limitación de data que permita corroborarla (Mann et al. 2003; Stenseth & Voje 2009).

## 2.2 ISLA ROBINSON CRUSOE, ARCHIPIÉLAGO JUAN FERNÁNDEZ

El archipiélago Juan Fernández se ubica a 670 [km] de las costas de Valparaíso y cuenta con una población de 926 habitantes según el Censo 2017. El archipiélago se conforma de las islas Robinson Crusoe (48 km<sup>2</sup>), Alejandro Selkirk (49 km<sup>2</sup>) y Santa Clara (2 km<sup>2</sup>). El Parque Nacional Archipiélago de Juan Fernández cuenta con una superficie de 9.570,55 hectáreas y fue declarado Reserva Mundial De La Biósfera por la UNESCO en 1935 con el objetivo de realizar estudios y conservar la naturaleza. Al cierre de este informe no se han encontrado estudios específicos evaluando los impactos del cambio climático en las costas del Archipiélago Juan Fernández.

---

<sup>7</sup> De acuerdo al United Nations Environmental Program, Rapa Nui tiene un índice de aislamiento (Isolation Index) de 149, el máximo posible en la escala. <http://islands.unep.ch/IXE.htm#271>.

<sup>8</sup> Gobernador, Alcalde, funcionarios de gobierno, oficiales de la Armada, Fuerza Aérea, funcionarios de la autoridad portuaria, de parques nacionales, de servicios de abastecimiento agua, electricidad y otros servicios, organizaciones no gubernamentales, pescadores y ancianos.

<sup>9</sup> Ahu: plataformas ceremoniales.

<sup>10</sup> Moai: Estatuas esculpidas en piedra que representan antepasados.

## 2.3 ANTECEDENTES

### Estudio consultora IDOM para Rapa Nui

El estudio "Desarrollo de agenda de inversiones para el desarrollo sostenible y sistema de monitoreo para Rapa Nui", desarrollado por la consultora IDOM y el Banco Interamericano del Desarrollo BID, busca proponer una cartera de inversiones para Rapa Nui y hacer sinergias entre las diferentes iniciativas y estudios vigentes o aquellos que se han desarrollado recientemente. El proceso lo lidera SUBDERE. El estudio busca asimismo coordinar actividades de participación ciudadana con el objetivo de evitar una sobrecarga de actividades en la agenda local.

En el marco de este proyecto, el 2 de abril de 2019 se sostuvo una reunión con Waldo Urquiza (IDOM), James Robinson (BID) y Alejandra Estay (BID) donde se informó de diversas iniciativas que han evaluado los riesgos en la isla, entre las que destaca el PRC (Plan Regulador Comunal) y el Plan Regional de Ordenamiento Territorial (PROT) y se acordó prospectar estudios sobre riesgos costeros en adelante. Dicho estudio se encuentra en desarrollo bajo la dirección de Manuel Contreras-López, miembro de este equipo consultor, pero aún no arroja resultados.

### Reunión con autoridades en Rapa Nui

Como parte de una delegación de la Oficina de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente, el Director del Proyecto, Patricio Winckler, visitó Rapa Nui entre el 19 y el 21 de Julio de 2019. Las actividades de la visita incluyeron:

- Reunión con la Comisión de Desarrollo de Isla de Pascua CODEIPA<sup>11</sup>, donde se presentó el anteproyecto de la Ley Marco de Cambio Climático y el Plan de Adaptación al Cambio Climático para Isla de Pascua, que se elabora en el marco del Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022 (Figura 4).
- Reunión con el Alcalde, Sr. Pedro Edmunds Paoa.
- Asistencia a taller de consulta ciudadana sobre el Ley Marco de Cambio Climático.
- Recorrido por la red perimetral de la isla, identificando sistemas vulnerables, como Playa Anakena, Ovahe (Figura 27) y las cuatro instalaciones portuarias de la isla (Figura 32). El recorrido duró medio día y no fue suficiente para efectuar una caracterización acabada de la exposición y vulnerabilidad de los sistemas costeros de la Isla.

---

<sup>11</sup> Según la "Ley Indígena" (N°19.253), la CODEIPA se compone por un representante del Ministerio de Desarrollo Social, Ministerio de Educación, Ministerio de Bienes Nacionales, Ministerio de Defensa Nacional, Corporación de Fomento de la Producción, CONAF, Corporación Nacional de Desarrollo Indígena, la Gobernadora, el Alcalde y seis miembros electos de la comunidad rapanui, uno de los cuales debe ser el Presidente del Consejo de Ancianos.

**Figura 4: Plan de Adaptación al Cambio Climático para Isla de Pascua, extraído del Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022**

Objetivo:	Elaborar un plan de adaptación al cambio climático para la Isla de Pascua que oriente las políticas de planificación y desarrollo, preparando a sus habitantes e instituciones a enfrentar los cambios climáticos de manera resiliente y sustentable.
Descripción:	<p>El Plan será preparado participativamente por la comunidad de Isla de Pascua, CODEIPA y CONADI, con la colaboración del Ministerio de Medio Ambiente y otros Ministerios o Servicios competentes, con financiamiento de fondos concursables internacionales y públicos. Se elaborará en varias etapas, parte de las cuales requerirán de la contratación de estudios y consultorías.</p> <p>El trabajo de elaboración del Plan consistirá en:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar el análisis de los cambios registrados en las últimas décadas de las principales variables climáticas y cambios proyectados a futuro bajo los diferentes escenarios climáticos.</li> <li>• Estudios de Vulnerabilidad biofísica y social que incluya la Identificación y priorización participativa de componentes vulnerables y amenazas climáticas en base a información previamente recopilada (demográfica, socioeconómica, geográfica, geológica, ambiental, y territorial y a una base de información SIG)</li> <li>• Identificación participativa de las posibles medidas de adaptación al cambio climático en base a revisión de planes de adaptación nacionales e internacionales y otras iniciativas y políticas relacionadas (por ejemplo Comité de aguas), a prácticas tradicionales locales, y a la identificación de brechas de información a largo plazo, costos y factibilidad de las medidas.</li> <li>• Elaboración participativa del plan de adaptación considerando sinergias con otras políticas y con la mitigación del cambio climático.</li> <li>• Las medidas deberán definirse en fichas que indiquen responsables, plazos, indicadores de seguimiento y de resultado,</li> </ul>
Cobertura:	Isla de Pascua.
Período de Implementación:	2017-2019
Meta, resultados o producto:	Plan de Adaptación al cambio climático para la isla de Pascua
Indicador seguimiento:	Plan elaborado de acuerdo a especificaciones.
Responsable:	CODEIPA
Corresponsable:	CONADI, Municipio de Isla de Pascua, Ministerio del Medio Ambiente, CORECC V Región.

### 3 AMENAZAS

En este capítulo se presentan los resultados de los estudios de nivel del mar y oleaje en Rapa Nui y la Isla Robinson Crusoe, en el Archipiélago de Juan Fernández. El detalle metodológico y los resultados a gran escala de estos estudios se presenta en el Volumen I: Amenazas. Se recomienda al lector consultar dicho documento en caso de requerir mayores antecedentes.

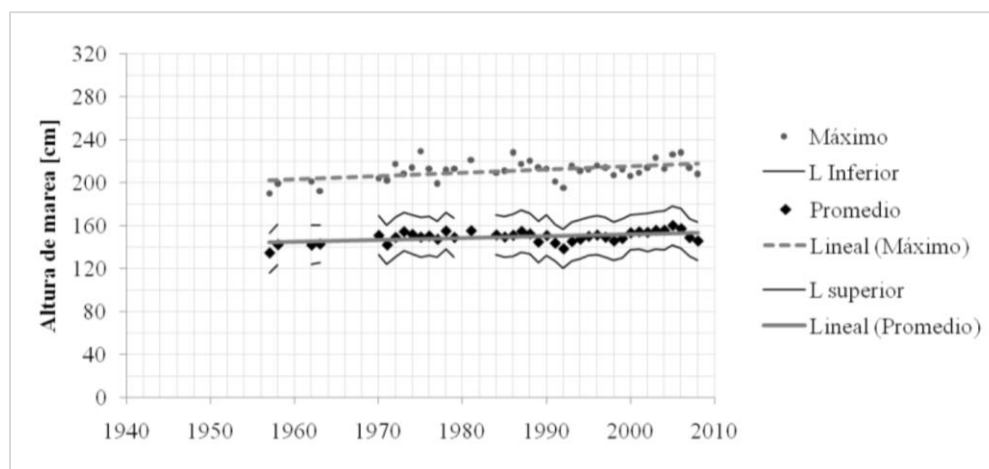
#### 3.1 NIVEL DEL MAR

El estudio del nivel del mar se basa en el análisis histórico de mareógrafos de larga data, que miden el nivel medio del mar relativo NMMR al terreno (sección 3.1.1) y en la modelación del nivel medio del mar absoluto NMMA para los períodos histórico (1985-2004) y la proyección a medio siglo (2026-2045) que se incluye en la sección 3.1.2. Cabe notar que Robinson Crusoe no cuenta con un mareógrafo de larga data, por lo que no es posible efectuar un análisis histórico en esta isla.

##### 3.1.1 Análisis histórico

Contreras et al. (2012) determinó que en Rapa Nui el nivel del mar relativo al terreno ha aumentado 162 [mm] en 51 años (1957–2008), lo que equivale a una tasa de incremento de 3,2 [mm/año]. Esta es la estación de registro con mayores tasas de incremento a nivel nacional, comparada con las estaciones continentales. Se debe considerar que la serie presenta datos faltantes por intervalos de algunos años, lo que dificulta su interpretación. En la Figura 5 se muestra que las pendientes del ajuste a los datos de nivel medio mensual. El ajuste lineal de eventos máximos revela que son pocos los años donde estos eventos se alejan 60 [cm] del NMM. Sin embargo, se observa que la pendiente del ajuste lineal es mayor que la del NMM, por lo que se debiera esperar un incremento en estas distancias en el futuro.

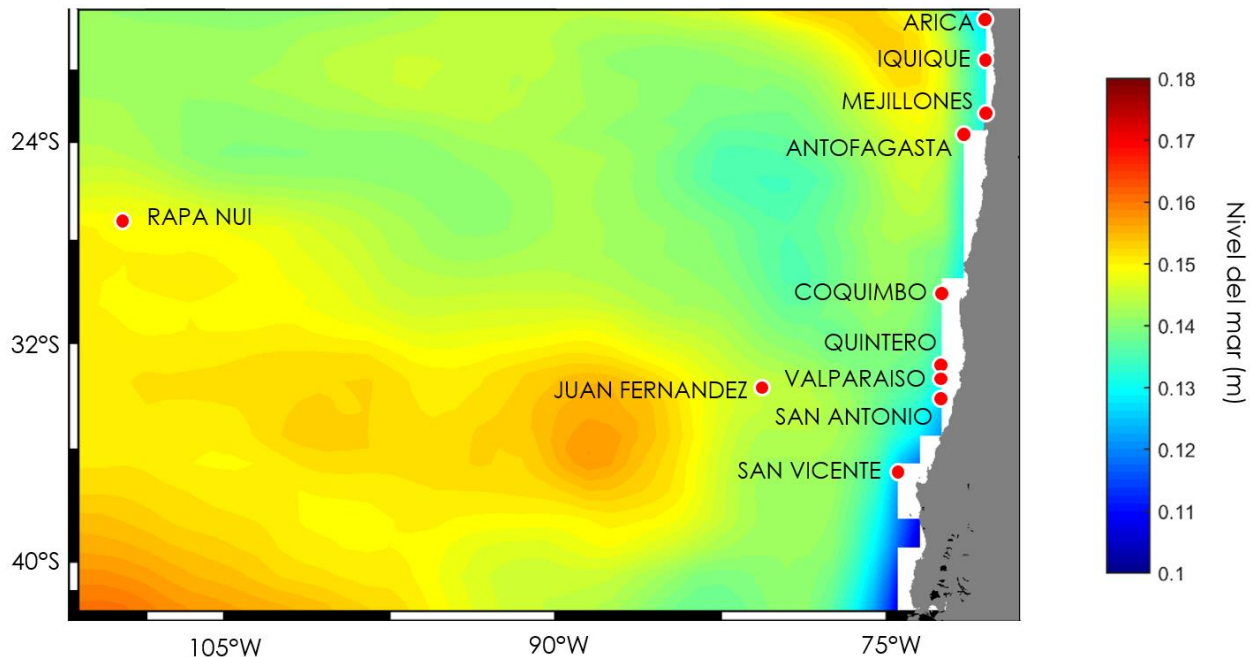
Figura 5: Evolución del nivel del mar relativo al continente en Isla de Pascua.



### 3.1.2 Proyección

La Figura 6 muestra el Incremento del nivel del mar respecto entre la mediana de la proyección (2026-2045) obtenida a partir de los 21 modelos del AR5, respecto de la mediana del período histórico (1986-2005). Se observa un gradiente latitudinal moderado en el continente, con valores en la mediana que van de 0.14 [m] en la zona norte, a 0.10 [m], hacia el sur de los 36°S, lo cual estaría asociado al efecto isostático de la región glaciaria en el sur de Chile. En Rapa Nui se observa un incremento de 0.15 [m] y en el Archipiélago Juan Fernández de 0.145 [m] para los 40 años considerados entre ambos períodos de tiempo.

**Figura 6: Incremento del nivel del mar respecto entre la mediana de la proyección (2026-2045) respecto de la mediana del período histórico (1986-2005). Los puntos rojos corresponden a los nodos más cercanos a los puertos en los cuales se efectúa la proyección.**



En la Figura 7 y en la Figura 8 se muestran las proyecciones para Rapa Nui e Isla Robinson Crusoe desde 2015 y 2045, que corresponde este último al último año de la proyección. El valor 0 corresponde a la mediana del período histórico (1986-2005). Se observa que, para ambas ubicaciones, el aumento para 2045 será de 0.19 [m] respecto del valor de referencia.

Figura 7: Proyecciones de elevación del nivel del mar respecto al promedio 1986-2005 en [m], a partir de 21 modelos del CMIP5 (AR5). Las líneas corresponden al Archipiélago Juan Fernández, junto con sus respectivas bandas de error.

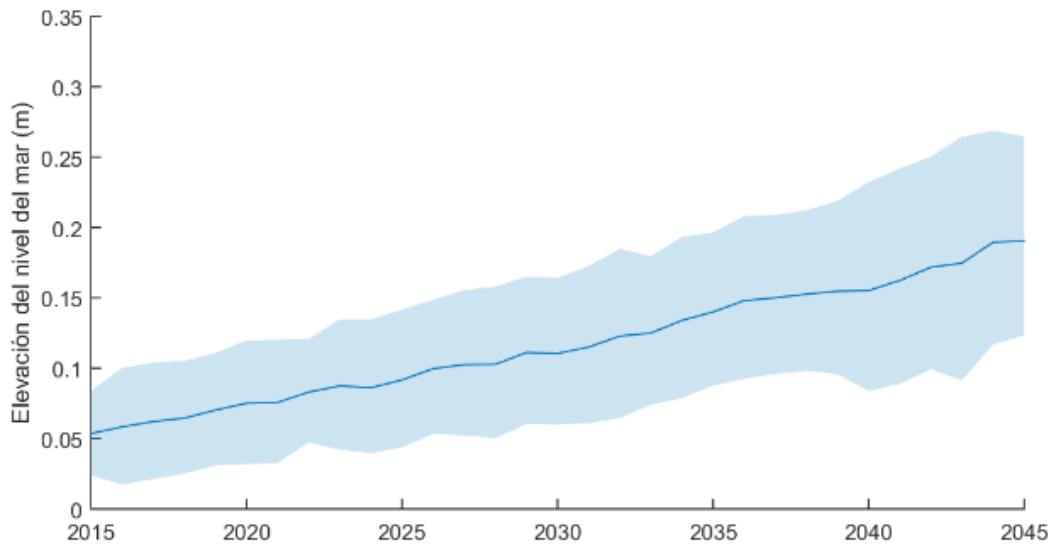
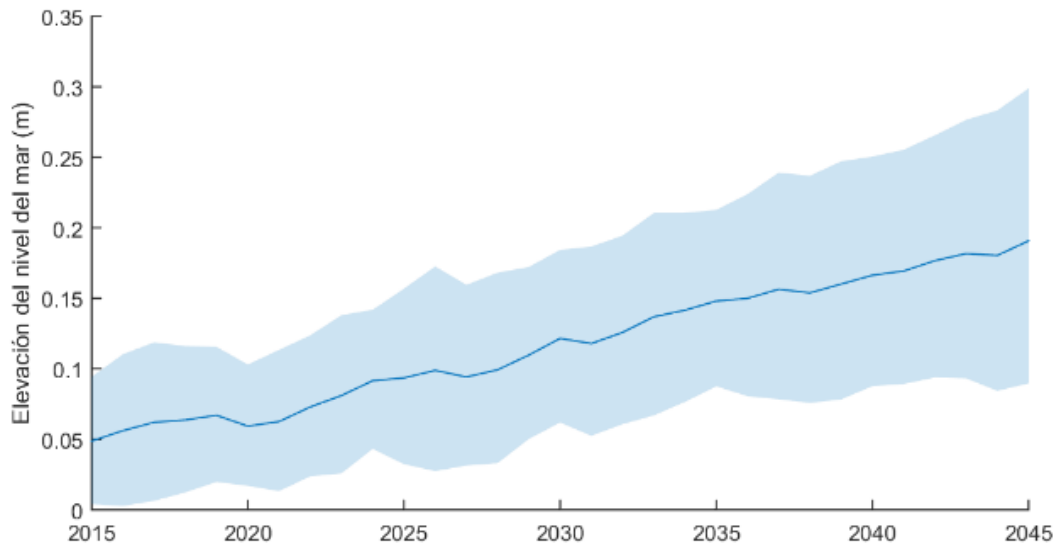


Figura 8: Proyecciones de elevación del nivel del mar respecto al promedio 1986-2005 en [m], a partir de 21 modelos del CMIP5 (AR5). Las líneas corresponden a Rapa Nui, junto con sus respectivas bandas de error.





## 3.2 OLAJE

Según el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016), el oleaje en las islas oceánicas del archipiélago Juan Fernández y Rapa Nui es generado en las mismas zonas donde se genera el oleaje que afecta a la costa abierta de Chile. Las alturas significativas y períodos peak promedio en aguas profundas presentan una baja variabilidad espacial, con valores promedio entre 2.4 [m] y 2.8 [m], y entre 13.1 [s] y 13.5 [s] respectivamente. El promedio de la dirección media presenta una mayor variabilidad espacial con valores entre 206° y 226°.

Dada la exposición a todo el rango de direcciones y a diferencia del oleaje frente a la costa continental, aparecen componentes del primer y segundo cuadrante. La incidencia de oleaje multimodal es mucho mayor, presentando en Rapa Nui, un 42% del tiempo oleaje con más de tres componentes modales. La alta multimodalidad insular, tanto en períodos como en direcciones, es también revelada por la energía del espectro promedio de direcciones, que presenta máximos en los cuatro cuadrantes de las direcciones, y una presencia relativamente importante de energía espectral de alta frecuencia.

### 3.2.1 Análisis histórico

A la fecha, no existe en la literatura un análisis detallado de los cambios históricos y futuros del clima de oleaje en Rapa Nui ni del Archipiélago Juan Fernández. Los estudios descritos en el Volumen 1 comprenden zonas geográficas a escala oceánica y no permiten caracterizar el clima de oleaje en forma detallada en estas islas. Por ende, esta caracterización se efectúa a partir del Atlas de Oleaje de Chile<sup>12</sup> (Beyá et al., 2016), el cual presenta nodos en aguas profundas para ambos territorios, y del estudio Evaluación del recurso energético asociado a oleaje en Isla de Pascua (o Rapa Nui) e isla Robinson Crusoe, Chile (GICO, 2016). Cabe mencionar que el Atlas de Oleaje de Chile abarca desde 1980 a 2015 y fue calibrado en todos los nodos de análisis, incluidos los de Juan Fernández e Isla de Pascua, mediante altimetría satelital y boyas ubicadas en el continente (Beyá et al., 2017).

#### 3.2.1.1 Rapa Nui

Las condiciones de oleaje en aguas profundas inciden predominantemente desde el SO (Figura 9). Salvo muy pocas excepciones, las alturas de ola tienen valores inferiores a de  $H_{m0} = 4.2$  [m]. Los períodos medios predominan entre  $T_m = 8$  y 12 [s]. En el caso de los eventos extremos (

Figura 10), presentan un valor máximo de 8.2 [m] y direcciones comprendidas entre el S y el NO.

---

<sup>12</sup> <https://oleaje.uv.cl/>

Figura 9: Clima medio de oleaje en aguas profundas frente a Rapa Nui. Se presenta una rosa de oleaje de altura significativa (izquierda) y periodo energético (derecha). La información está disponible en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016).

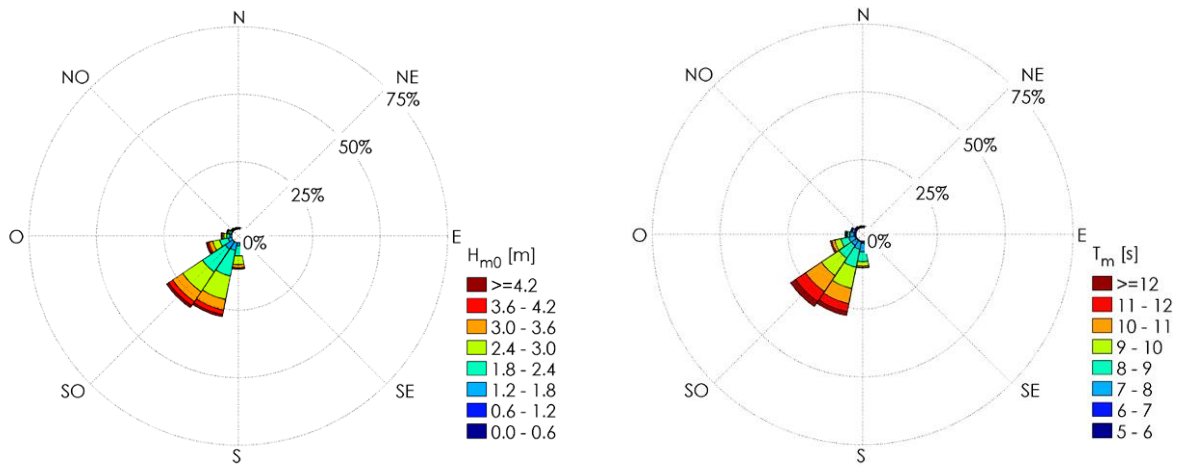
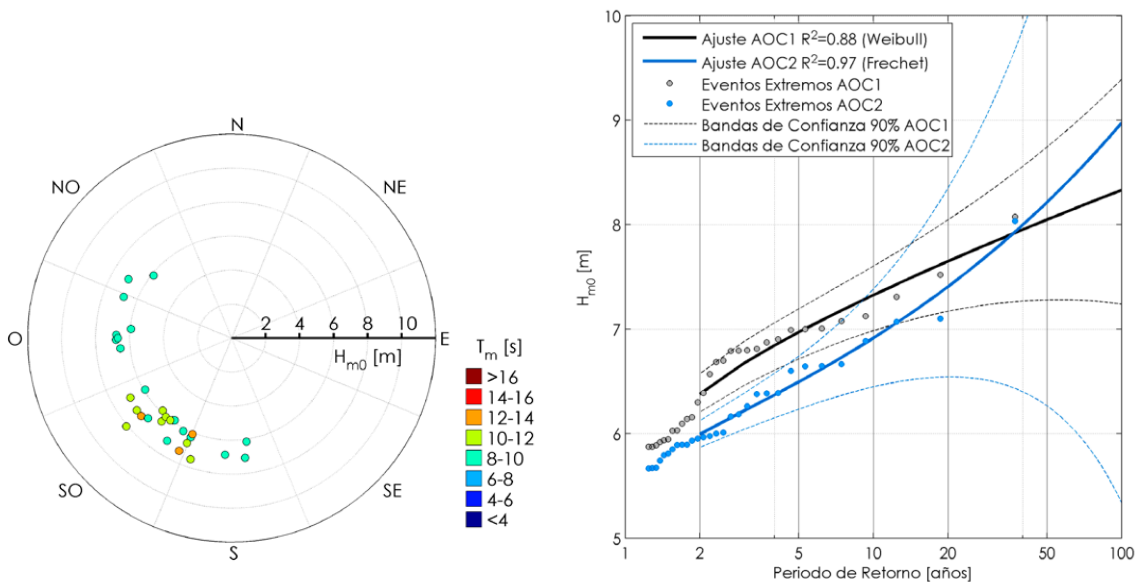


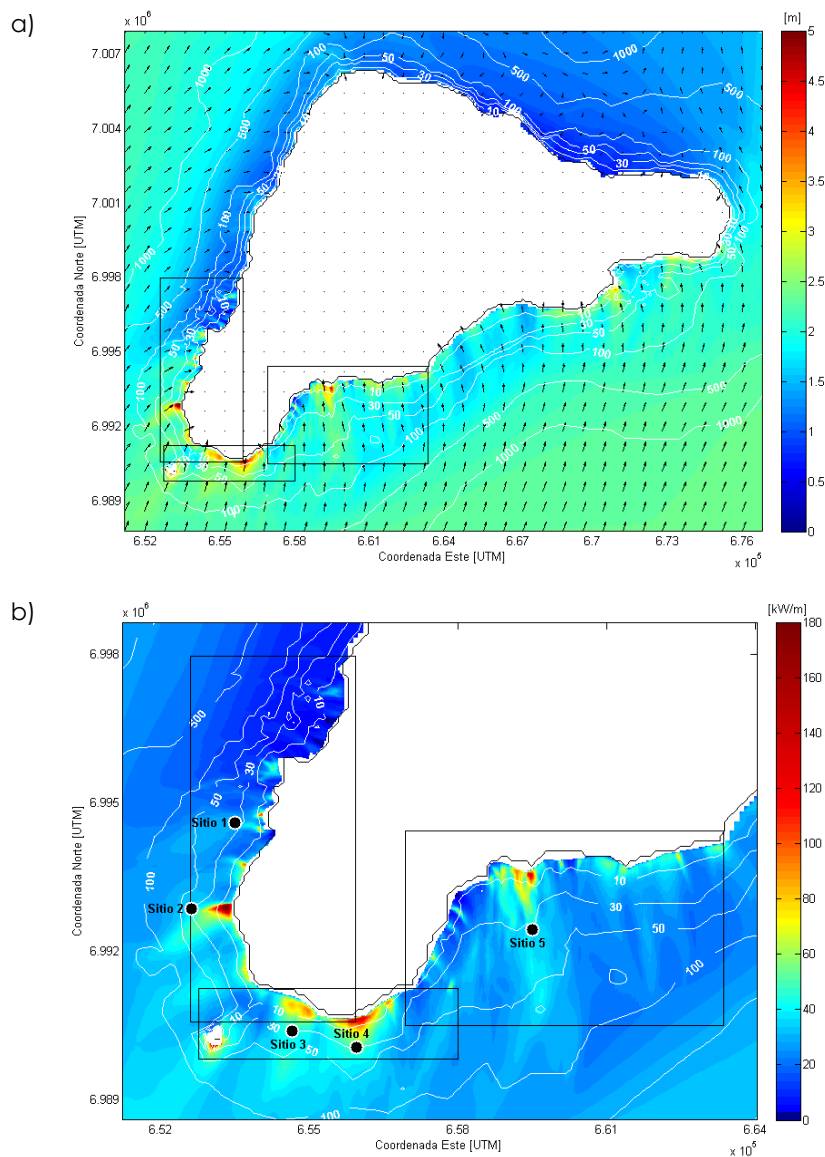
Figura 10: Clima medio de extremos en aguas profundas frente a Rapa Nui. Se presenta una serie de tiempo de altura significativa, incluyendo los extremos en rojo (izquierda), una rosa con los eventos extremos (abajo izquierda) y un ajuste de valores extremos. La información está disponible en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016).



La Figura 9a presenta la condición media de la altura significativa y dirección de oleaje, donde se observa que las mayores alturas ocurren en la costa suroeste, en el entorno del volcán Rano Kau, entre Hanga Roa por el oeste y Hanga Vinapu por el sur. Se presentan también concentraciones en torno a Hanga Hotuiti hacia el este de la isla. Estas concentraciones son consistentes con la dirección suroeste, reinante en la zona. La costa norte, en contraste, es bastante más calma por la protección misma de la isla.

Por otro lado, las grandes profundidades que se alcanzan a pocos kilómetros de la costa y la proyección hacia el suroeste de la costa sur y la costa oeste permiten explicar que el oleaje se encuentra altamente afectado por refracción, siendo este fenómeno más notorio en la costa oeste. La costa norte se encuentra protegida de la condición reinante, por lo que la difracción induce una disminución mayor de la altura del oleaje, con alturas en general menores a 0.5 [m]. Si bien, en la zona se presenta oleaje noreste, el mapa de valor medio indica que por lo general posee alturas inferiores a 1.5 [m]. La Figura 9b presenta un detalle de las zonas más energéticas de la isla. Los sitios 3 y 4 corresponden al cono del volcán Rano Kau (Figura 25), que evidencia problemas de erosión hidráulica.

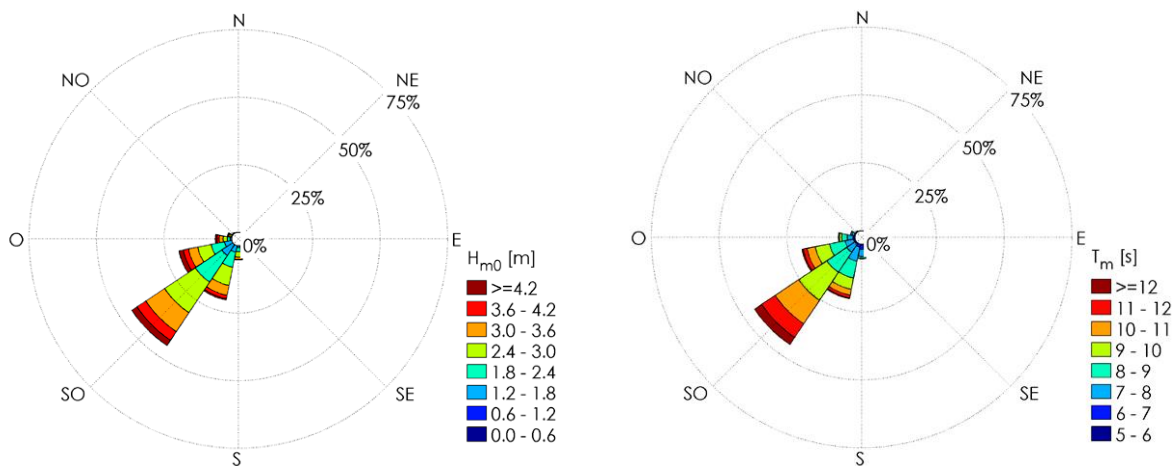
**Figura 11: a) Altura significativa y dirección promedio en Isla de Pascua. b) Detalle de la altura significativa en el extremo SW de la isla.**



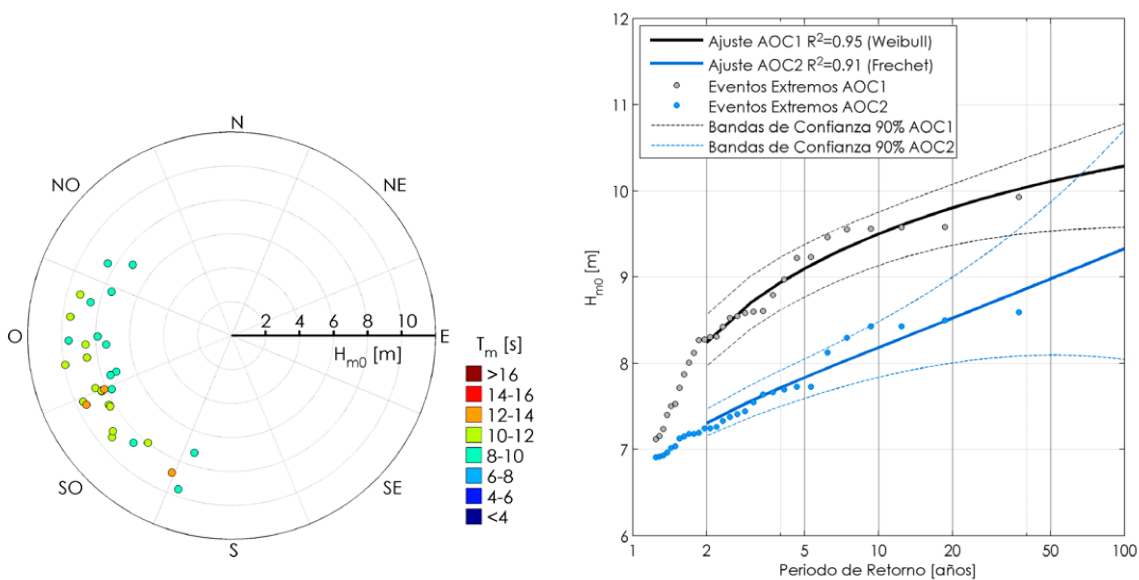
### 3.2.1.2 Isla Robinson Crusoe

Las condiciones de oleaje en aguas profundas inciden predominantemente desde el SO (Figura 12). Salvo muy pocas excepciones, las alturas de ola tienen valores inferiores a de  $H_{m0} = 4.2$  [m]. Los periodos medios predominan entre  $T_m = 8$  y  $12$  [s]. En el caso de los eventos extremos (Figura 13), presentan un valor máximo de  $10$  [m] y direcciones comprendidas entre el SSO y el NO.

**Figura 12: Clima medio de oleaje en aguas profundas frente a Robinson Crusoe. Se presenta una rosa de oleaje de altura significativa (izquierda) y periodo energético (derecha). La información está disponible en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016).**

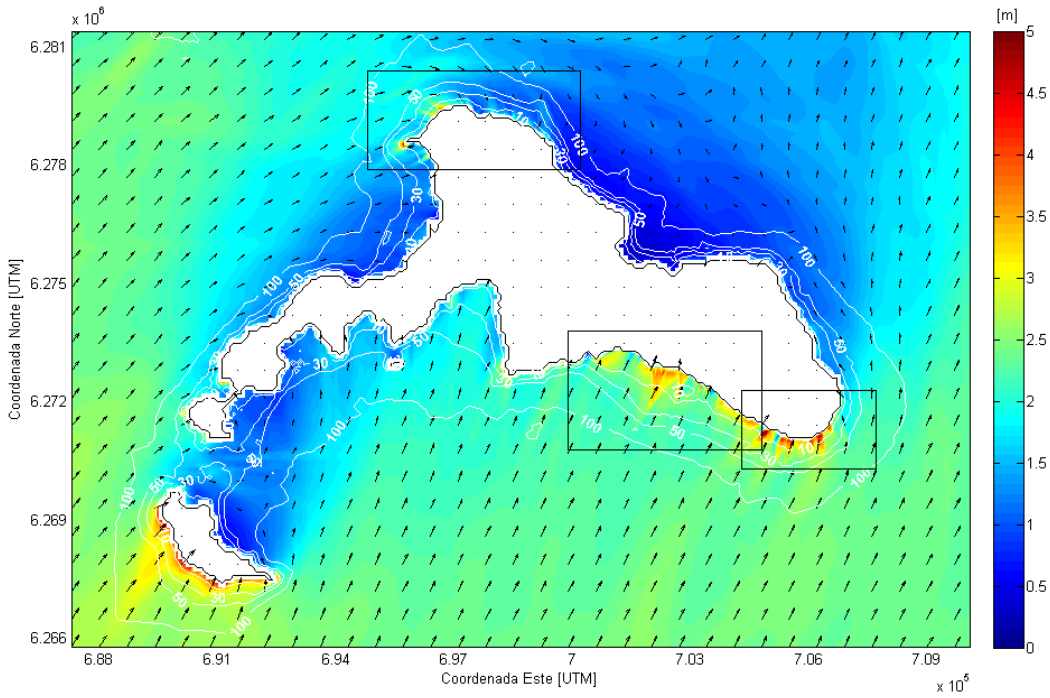


**Figura 13: Clima medio de extremos en aguas profundas frente a Rapa Nui. Se presenta una serie de tiempo de altura significativa, incluyendo los extremos en rojo (izquierda), una rosa con los eventos extremos (abajo izquierda) y un ajuste de valores extremos. La información está disponible en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016).**



La Figura 14 presenta la condición media de la altura significativa y dirección de oleaje, donde se observa que las mayores alturas ocurren en la costa suroeste, en el entorno de Isla Santa Clara. La costa norte, donde se ubica el poblado de San Juan Bautista, en contraste, es bastante más calma por la protección misma de la isla.

**Figura 14: a) Altura significativa, en [m] y dirección promedio en Isla Robinson Crusoe, Archipiélago de Juan Fernández. b) Detalle de la altura significativa en el extremo SW de la isla.**



### 3.2.2 Proyección al período 2026-2045

El análisis del clima de oleaje para el período histórico (1985-2004) y para la proyección (2026-2045) se describen en detalle en el Volumen 1. En esta sección se presentan resultados relevantes para las islas oceánicas.

Los campos bidimensionales de viento a 10 [m] sobre el nivel del mar y los parámetros de altura significativa, período medio y dirección media se presentan en la Figura 15 a la Figura 21 para el período histórico (1985-2004), la proyección (2026-2045) y para la diferencia entre ambos. Se muestra el percentil 50% y 99% como ejemplo del clima medio y el percentil 99% como un ejemplo de un oleaje más intenso (pero no necesariamente extremo). La Tabla 1 presenta un resumen de las tendencias identificadas en cada una de estas variables.

**Tabla 1: Resumen de diferencias de parámetros de viento y oleaje entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) frente a Chile.**

Parámetro	Percentil	Rapa Nui	Robinson Crusoe
Viento	50 %	Disminución	-
	90 %	Disminución	Disminución
Altura significativa	50 %	-	-
	90 %	-	-
Período medio	50 %	Aumento	Aumento
	90 %	Aumento	Aumento
Dirección media	50 %	-	-

Se observa que, en general, los cambios para estas condiciones de oleaje (percentiles 50% y 90%) son menores para la proyección. No obstante, el análisis no considera los valores extremos, que en el análisis de puertos aparecen como significativas para la costa continental de Chile. Las implicancias que ello tiene se discuten en el Volumen 5.

Figura 15: Campos de magnitud de viento a 10 metros sobre el nivel del mar para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 50% frente a Chile.

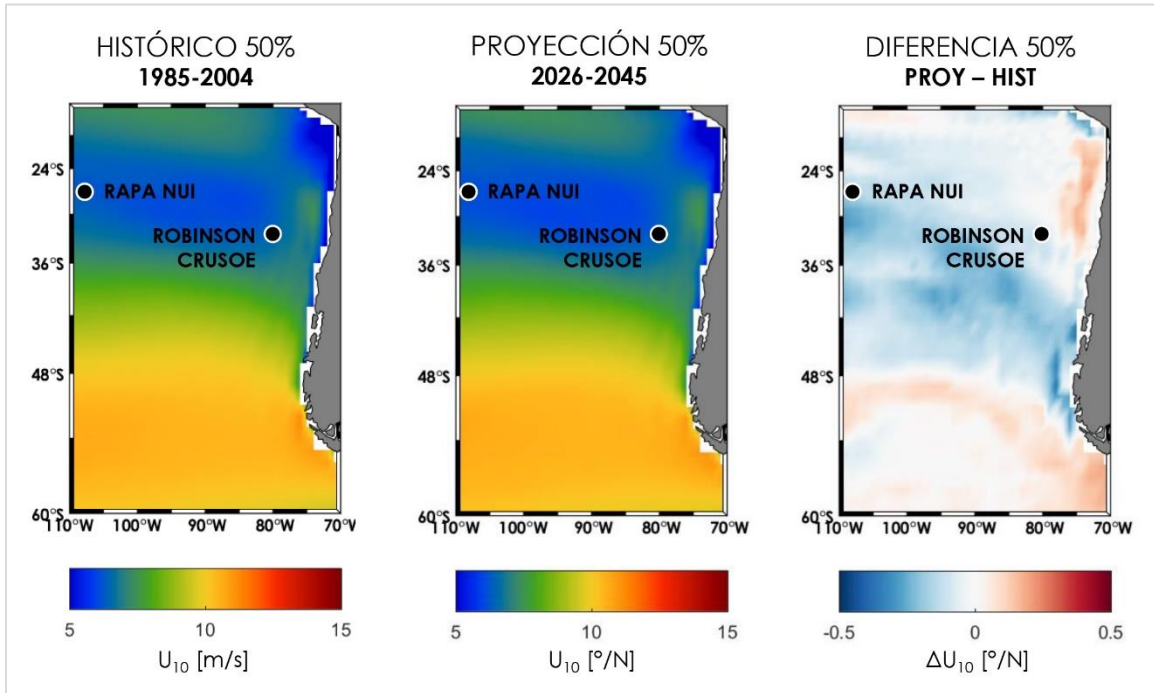


Figura 16: Campos de magnitud de viento a 10 metros sobre el nivel del mar para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 99% frente a Chile.

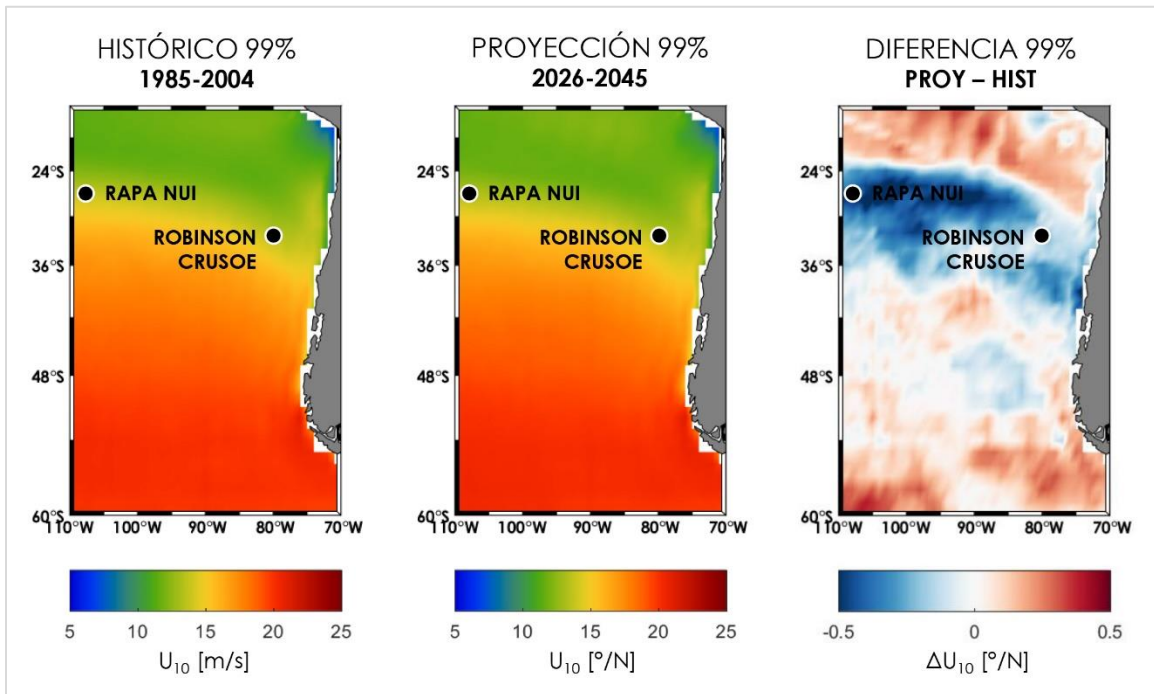




Figura 17: Campos de altura significativa de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 50% frente a Chile.

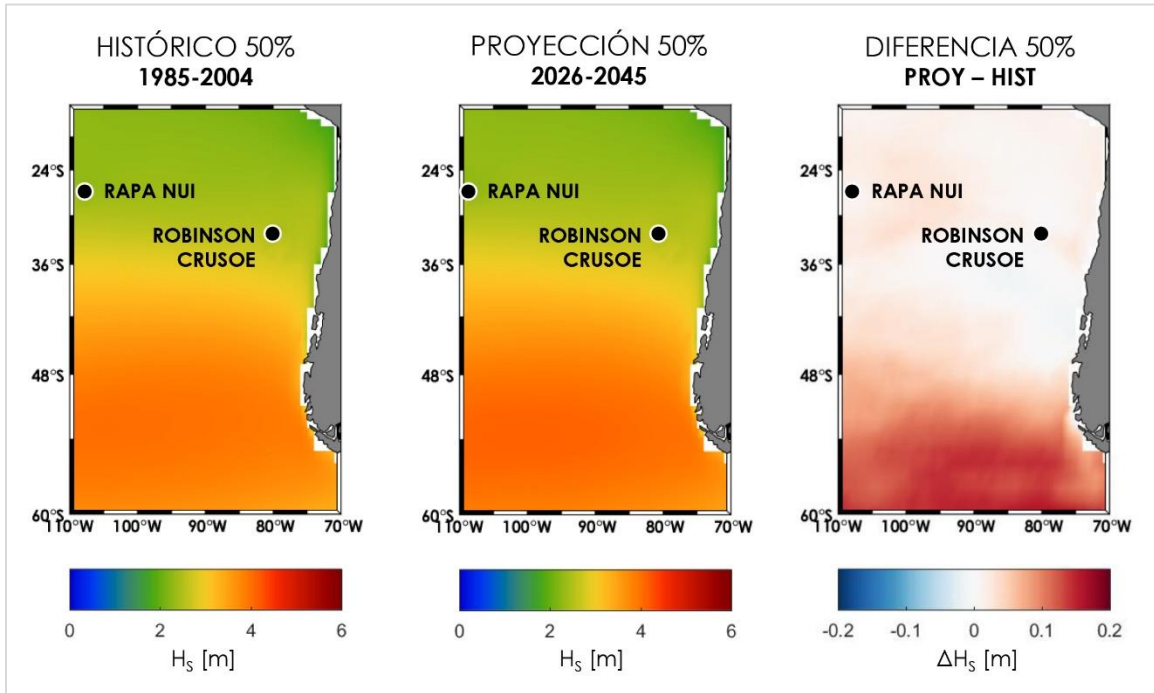


Figura 18: Campos de altura significativa de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 99% frente a Chile.

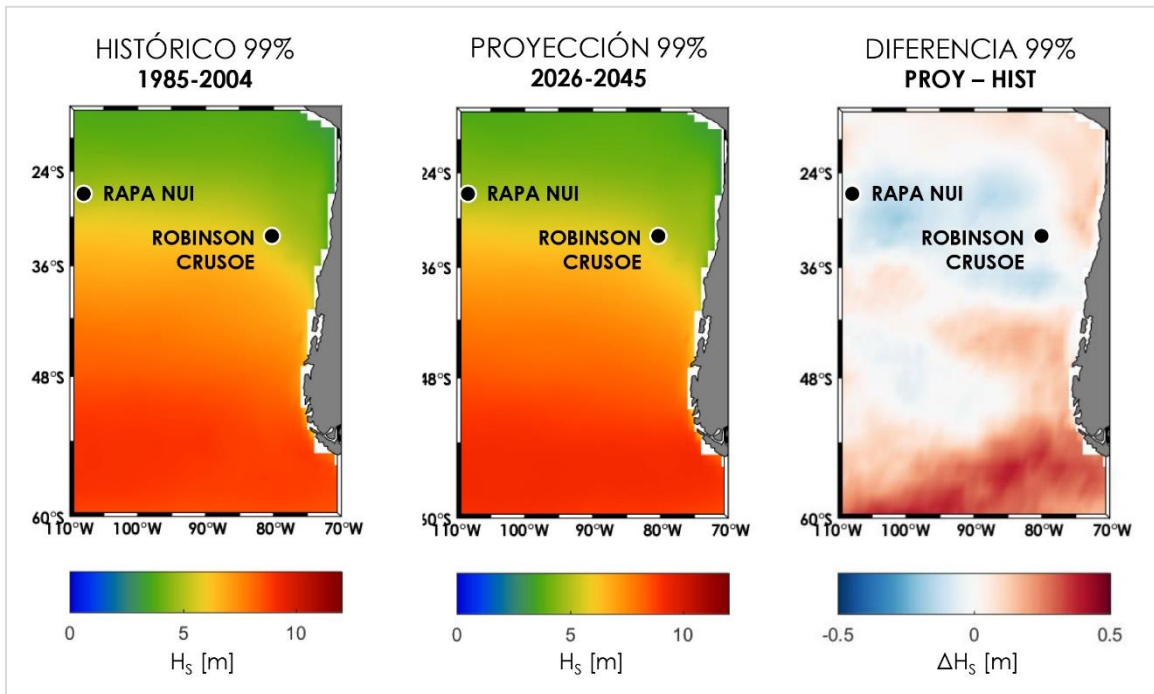


Figura 19: Campos de período medio de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 50% frente a Chile.

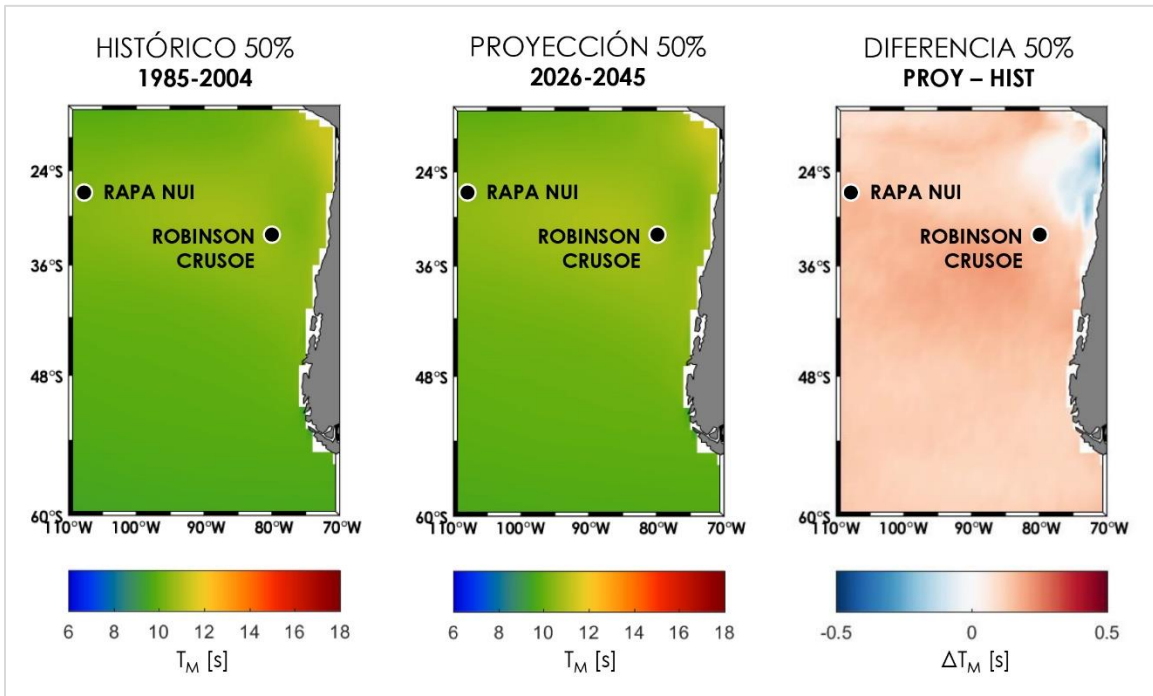


Figura 20: Campos de período medio de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 99% frente a Chile.

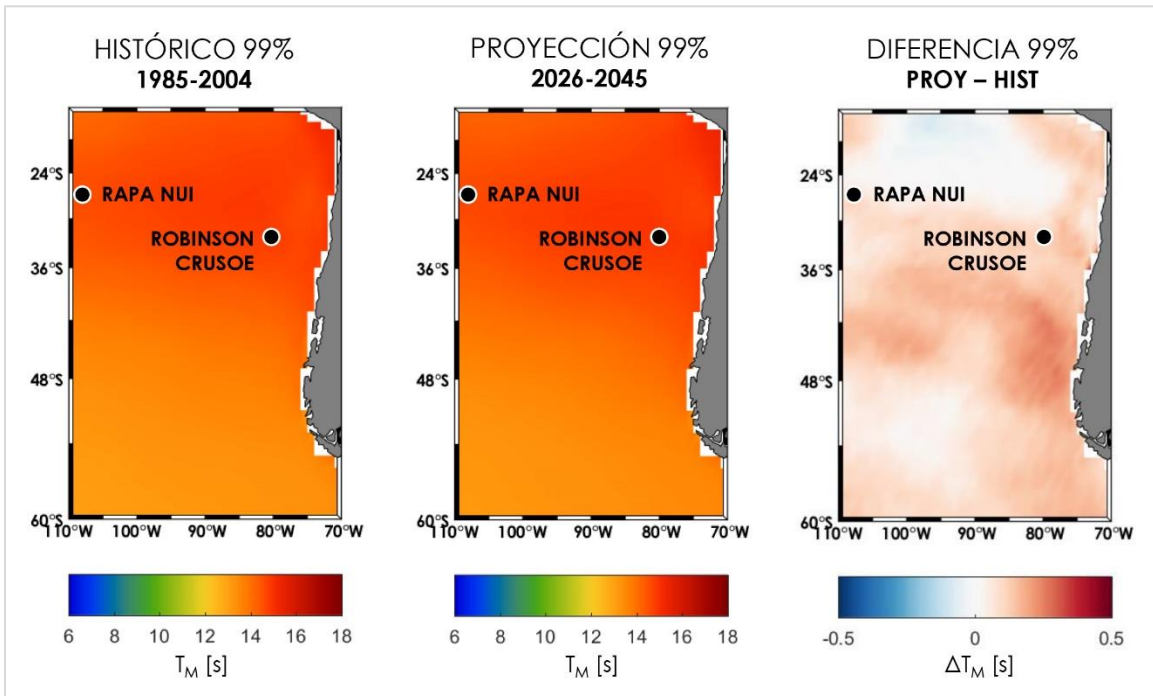
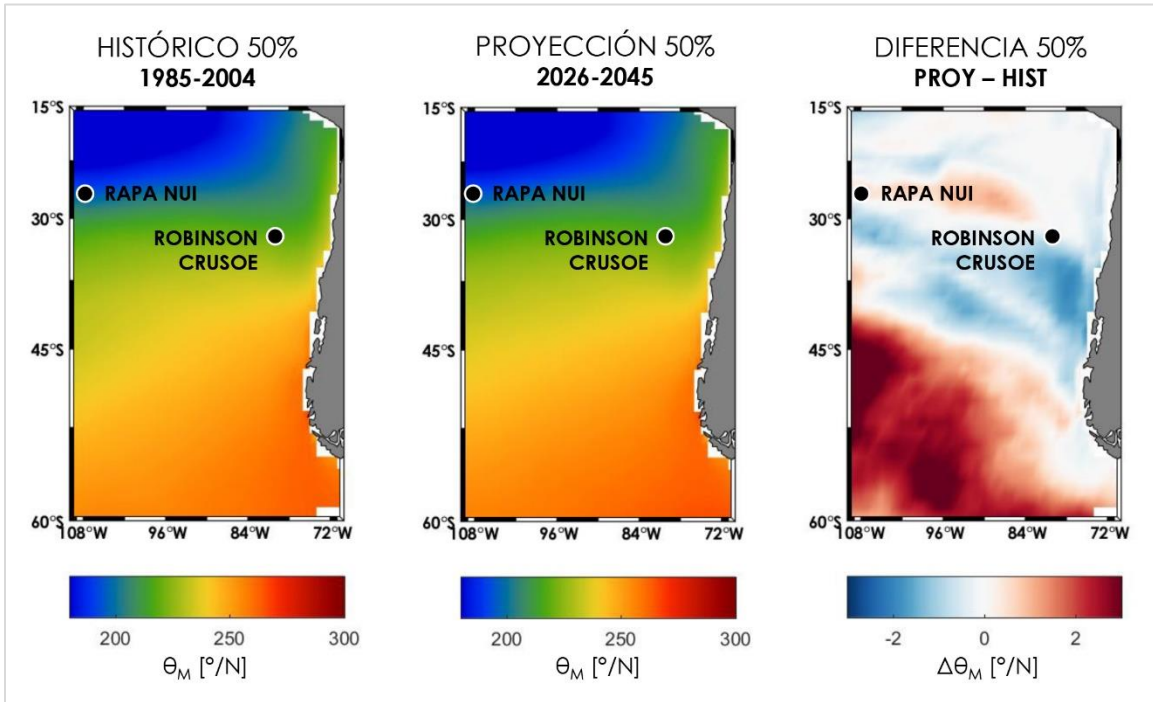


Figura 21: Campos de dirección media de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 50% frente a Chile.



## 4 EXPOSICIÓN

El análisis de exposición se efectuó siguiendo la metodología presentada en el Volumen 2: Exposición. No obstante, durante el proyecto no se pudo efectuar un levantamiento en terreno a objeto de corroborar la existencia y ubicación de las unidades identificadas por otros medios. Por esta razón, este inventario de exposición debe considerarse como preliminar y debiera ser complementado por levantamientos en terreno.

### 4.1 RAPA NUI

Para el estudio de exposición de Rapa Nui se delimitó el área expuesta correspondiente a la zona costera que se encuentra entre los 0 y 10 [msnm]. Esta área abarca un total de 3.5 [km<sup>2</sup>] y en ella se identificaron los siguientes elementos:

- **Áreas Protegidas:** Se identificaron 7 áreas protegidas expuestas distribuidas de la siguiente manera: 4 Áreas Marinas Protegidas (Rapa Nui, Hanga Oteo, Motu Tautara y Coral Nui Nui), 2 Parques Marinos (Motu Motiro Hiva y Rapa Nui) y 1 Santuario de la Naturaleza (Isla de Sala y Gómez e islotes adyacentes a Isla de Pascua); los cuales abarcan un total de 731.990 [km<sup>2</sup>] de territorio marítimo y continental expuesto.
- **Atractivos turísticos y patrimoniales:** Se identificaron 6 atractivos turísticos expuestos, correspondientes a la playa principal de Rapa Nui (playa Anakena) y 5 AHU: Ahu Tongariki, Ahu Ko Te Riku, Ahu Vai Uri, Ahu Akahanga y Ahu A Hono Paenga. Además, la ruta patrimonial Te Ara Rapa Nui presenta 3 de sus 11.9 [km] totales de afectación por exposición.
- **Caletas de Pescadores:** Se identificaron 5 caletas de pescadores expuestas: Laperouse (Hanga Hoonu), Hotu Iti, Hanga Roa, Hanga Piko y Vaihu. Estas caletas representan la afectación directa de 297 pescadores y 79 embarcaciones.
- **Instrumentos de medición e infraestructura costera:** Sólo se identificó 1 estación de medición del nivel del mar expuesta. También se identificaron 4 terminales marítimos expuestos: puntos de atraque 1, 3 y 4 del Sitio Lirquén y punto de atraque 1 del Sitio Talcahuano.
- **Biodiversidad:** A través de interpretación visual de la isla, se identificaron dentro del área expuesta 5 humedales, lagunas o charcas estacionales costeras presentes en la isla, asociados principalmente a las depresiones que forman los cráteres de los volcanes que dieron origen a Rapa Nui. Además, se identificaron 14 playas mediante revisión bibliográfica, interpretación visual y conocimiento previo: Anakena, Ahu Te Peu, Ana Kakenga, Ahu Tongariki, Hanga Kioe, Tahai, Ura Uranga, Playa Pea, Vate Ote, Oroí, Hanga Piko, Ana Kai, Rano Kau y Orongo.
- **Límite Urbano y Red Vial:** Se identificó un área de 0.4 [km<sup>2</sup>] expuestos del área urbana

establecida en el Plan Regulador Vigente, cuyo límite urbano es de 7 [km<sup>2</sup>], lo que representa un 5.7% del área urbana oficial. Además, se identificaron 8.9 [km] de red vial expuesta concentrada mayoritariamente en el área urbana, la cual se divide en calles, caminos y pasajes.

- **Población:** A partir de los datos censales del año 2017 liberados por el INE, se identificaron 19 manzanas censales expuestas, en las cuales viven 2.123 personas y donde se emplazan 842 viviendas. Del total de manzanas expuestas, 12 se encuentran en el área urbana de Rapa Nui, mientras que las 7 restantes corresponden al área rural de la isla.

En la Figura 22 se muestra la cartografía que incluye el área expuesta y algunos de los elementos en Rapa Nui y la Figura 23 muestra el sector de Hanga Roa en detalle.

**Figura 22: Cartografía que incluye el área expuesta y algunos de los elementos en Rapa Nui.**

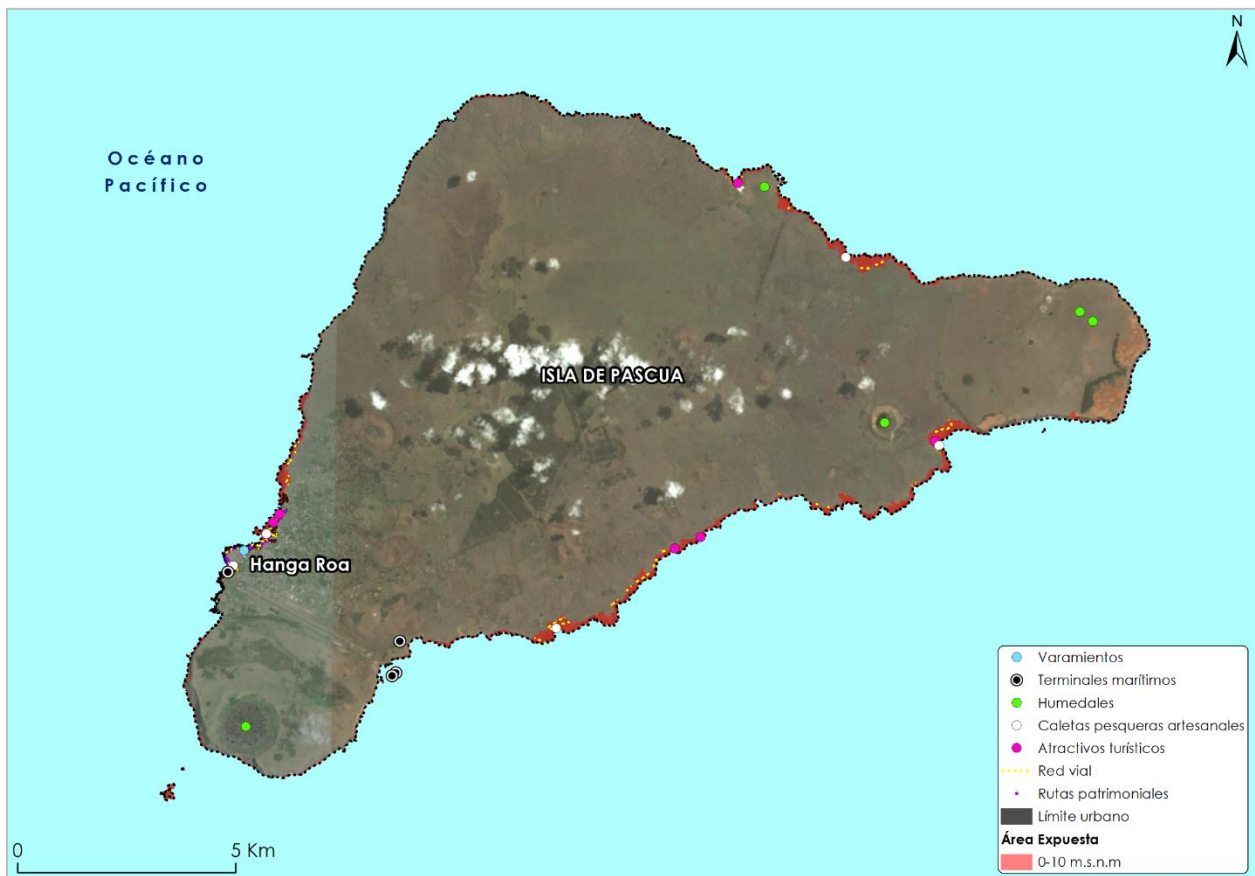
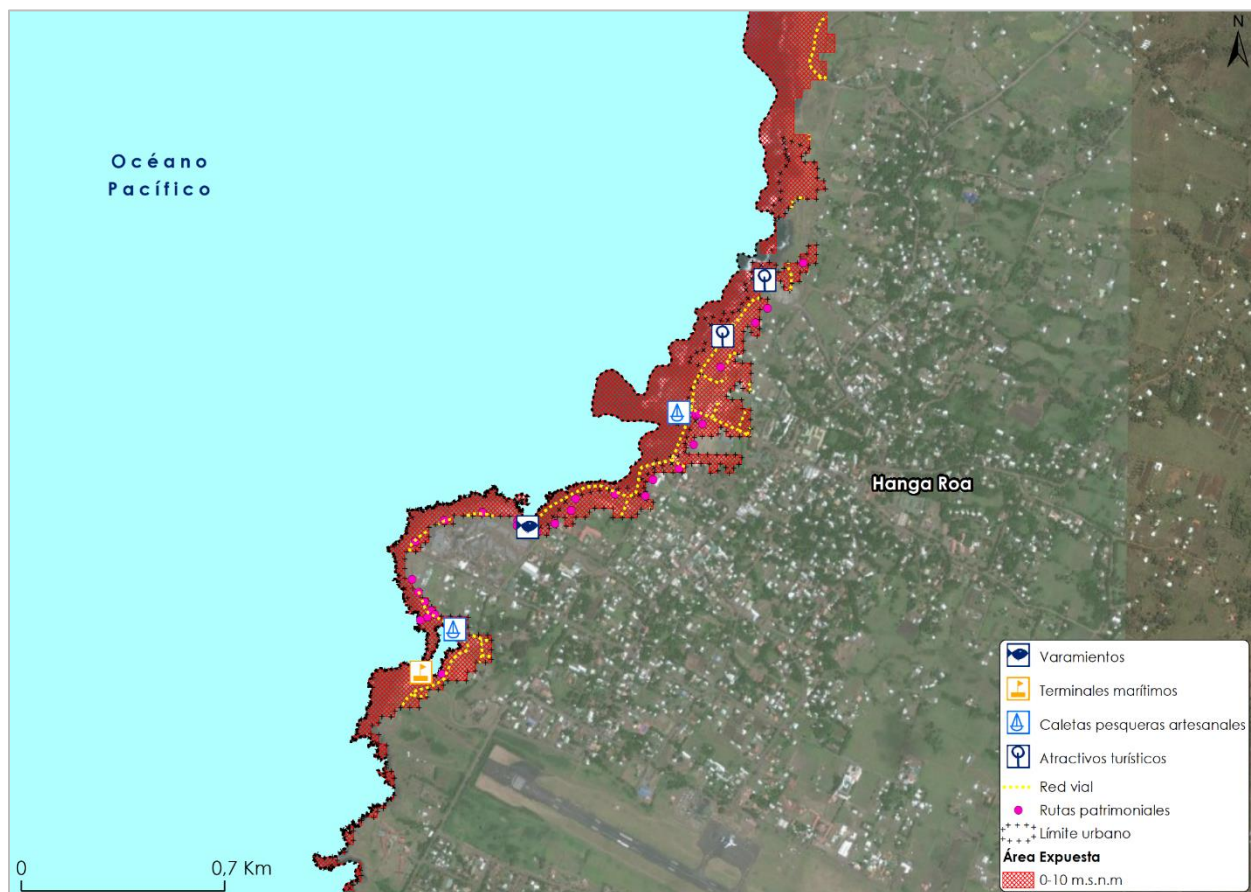




Figura 23: Cartografía que incluye el área expuesta y algunos de los elementos en Hanga Roa, Rapa Nui.



## 4.2 ARCHIPIÉLAGO JUAN FERNÁNDEZ

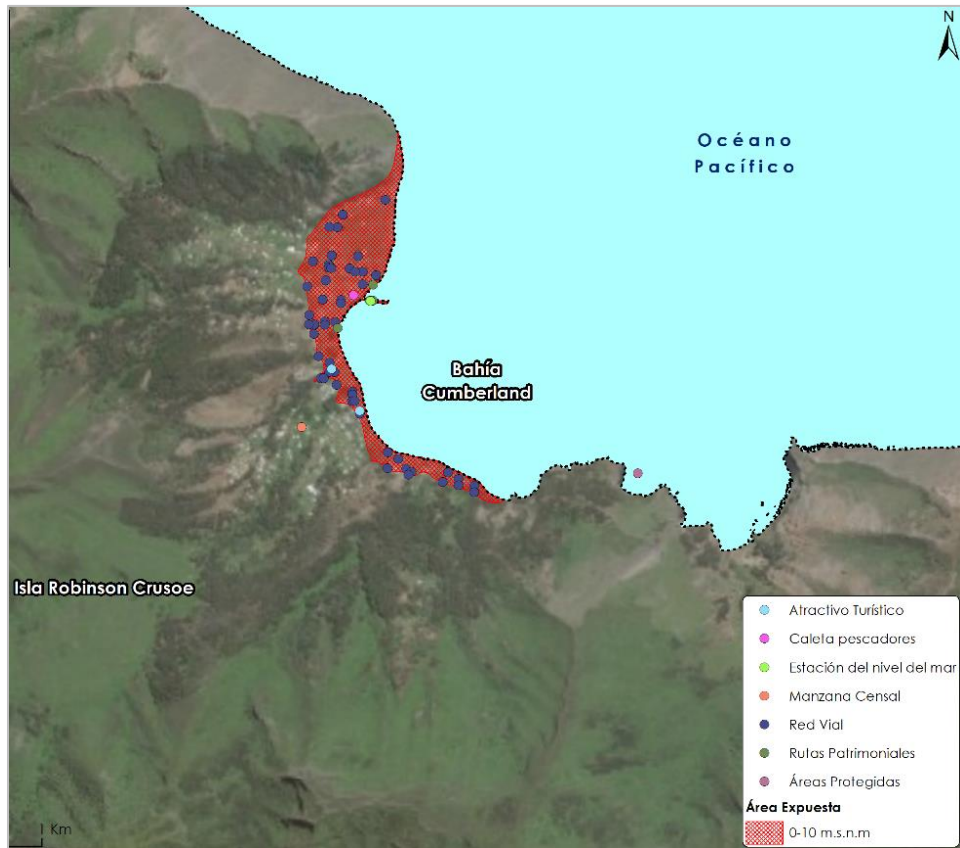
Para el estudio de exposición del Archipiélago Juan Fernández, se delimitó el área expuesta correspondiente a la zona costera que se encuentra entre los 0 y 10 [msnm]. Esta área abarca un total de 55 [km<sup>2</sup>] y considera las tres islas del Archipiélago (Isla Robinson Crusoe, Santa Clara y Alejandro Selkirk). Se identificaron los siguientes elementos expuestos:

- **Áreas Protegidas:** Corresponde a una franja costera del Parque Nacional Archipiélago Juan Fernández y a las Áreas Marinas Costeras Protegidas El Palillo, Juan Fernández, Mar de Juan Fernández, Montes Submarinos JF5-JF6 y Lobería de Selkirk. En su conjunto, el área expuesta de estos elementos corresponde a 275.338 km<sup>2</sup>.
- **Atractivos Turísticos:** Se encontraron dos atractivos turísticos expuestos en el Archipiélago, correspondiente al sendero de Chile en la Isla Robinson Crusoe y a un punto de venta de Artesanía en Coral Negro y Plata. Además, la Zona de Interés Turístico "Robinson Crusoe" se encuentra expuesta.
- **Caletas de Pescadores:** Se encontraron dos caletas de pescadores en el Archipiélago que se encuentran expuestas a los efectos del cambio climático: Caleta Bahía Cumberland en la Isla Robinson Crusoe y Caleta Alejandro Selkirk en la isla del mismo nombre.
- **Límite Urbano:** A partir del área expuesta, se determinó que 0.166 km<sup>2</sup> del área urbana de Juan Fernández, específicamente Bahía Cumberland en la Isla Robinson Crusoe, se encuentra bajo los 10 msnm.
- **Infraestructura de medición costera:** En cuanto a equipamiento científico presente en la isla, sólo se encontró 1 estación de medición del nivel del mar que se encuentra expuesto.
- **Equipamiento:** Respecto al equipamiento público presente en el Archipiélago, sólo se encontró 1 cuartel de carabineros presente en el área expuesta.
- **Infraestructura, Red Vial:** De la totalidad de la red vial presente en el Archipiélago, 4.6 km de vialidad se encuentran expuestos, mayoritariamente parte de la trama urbana puesto que la conectividad en la isla se realiza mayoritariamente vía marítima (entre islas).
- **Población:** A partir del análisis del Censo 2017 se encontraron 3 Manzanas Censales que se encuentran expuestas, en las cuales viven 907 personas y donde se emplazan 442 viviendas. Esta área se concentra mayoritariamente el Bahía Cumberland al ser esta el área urbana principal del Archipiélago.

En la Figura 24 se muestra la cartografía que incluye el área expuesta y algunos de los elementos en Rapa Nui y el sector de San Juan Bautista en detalle.



Figura 24: Cartografía que incluye el área expuesta y algunos de los elementos en San Juan Bautista, Isla Robinson Crusoe, Archipiélago Juan Fernández.



## 5 VULNERABILIDAD

Dada la imposibilidad de efectuar un levantamiento detallado de Rapa Nui, el análisis de vulnerabilidad se basa principalmente en los estudios de Quilliam et al. (2011). En el caso de Robinson Crusoe, no se cuenta con elementos para efectuar un análisis de vulnerabilidad.

### 5.1 RAPA NUI

#### 5.1.1 Vulnerabilidad inestabilidad de los acantilados de Rano Kau

La inestabilidad de los acantilados costeros ubicados en Rano Kau (Figura 25) constituye una amenaza al sitio arqueológico de Orongo, uno de los sitios turísticos y ceremoniales más importantes de la isla. Este sitio se ubica a 400 (m) de la zona donde en 2008 hubo un derrumbe de 100 (m) de ancho por 300 (m) de alto. El colapso puede deberse a la erosión que genera el oleaje al pie del acantilado, en combinación con una geología potencialmente inestable. El informe de Quilliam et al. (2011) no abunda en una caracterización geológica ni en las características del oleaje en este sitio. El estudio del Grupo de Ingeniería Civil Oceánica (GICO, 2016) caracteriza el patrón de oleaje en esta zona, evidenciando la gran concentración de energía al pie del talud del Rano Kau (Figura 25). Lamentablemente, dicho estudio sólo toma una ventana histórica entre 1980 y 2015, sin aventurarse en una proyección.

Figura 25: Pared sur-oeste Volcán Rano Kau, en Rapa Nui<sup>13</sup>.



<sup>13</sup> [www.andbeyond.com/experiences/south-america/chile/easter-island/rano-kau-orongo-ceremonial-village-tour/](http://www.andbeyond.com/experiences/south-america/chile/easter-island/rano-kau-orongo-ceremonial-village-tour/)

Figura 26: Desprendimientos de la Pared sur-oeste Volcán Rano Kau, en Rapa Nui. Adaptado de Quilliam et al. (2011).



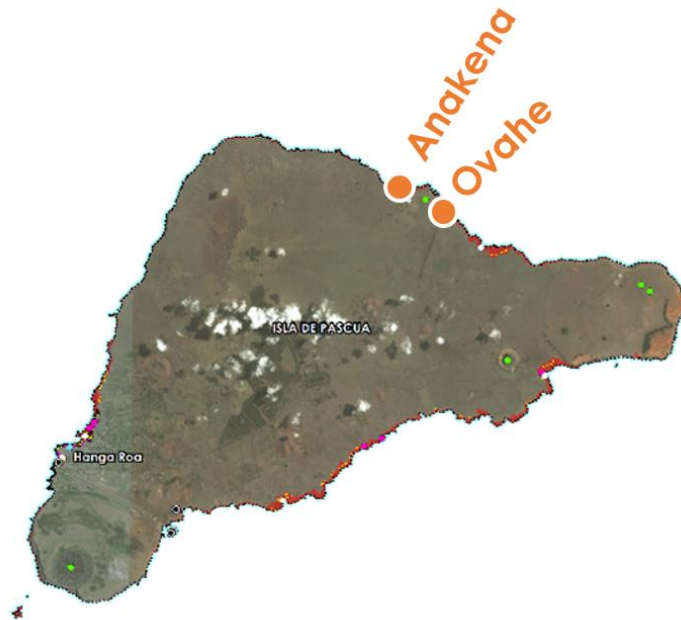
### 5.1.2 Vulnerabilidad en playas

Rapa Nui se caracteriza por costas rocosas y escasas playas entre las que destacan las de Anakena y Ovahe, ambas ubicadas al norte de la Isla (Figura 27). Anakena es una playa encajada abierta el NNW con mucha afluencia turística. La vegetación dunar que la corona ha retrocedido en casi 200 (m) desde 1980. El transporte eólico de arenas hace migrar las arenas hasta el ahu (b), el que es removido dos veces al año por CONAF (~40 m<sup>3</sup>). Durante la consulta pública desarrollada en dicho estudio, se reportó que no hay memoria de que la playa haya experimentado erosión sustantiva. Utilizando una la regla de Bruun para evaluar el retroceso de la línea de costa asociada al aumento del nivel del mar (Bruun, 1962) y el modelo numérico SBEACH para evaluar la erosión de corto plazo durante una tormenta, Quilliam et al. (2011) estimaron un retroceso en torno a los 34 (m) para fin de siglo, 30 (m) de los cuales se debe al aumento del nivel del mar y 4 (m) al efecto de una tormenta.

Mediante un análisis histórico de la evolución de la línea de playa detallado en el Volumen 4 Vulnerabilidad y riesgos en playas, se estudió playa Anakena. En dicho estudio se determinó que la playa ha experimentado una tasa de cambio de -0,51 [m/año] para el periodo 1996-2017 (21 años), clasificándose como “erosión” (-0,2 y -1,5 [m/año]). De acuerdo a la Figura 28, la erosión predomina en el sector E mientras que en la zona W predomina la acreción. A pesar de ser una playa encajada de 241 [m] de largo, desarrolla un campo de dunas transgresivo de gran superficie, sobre los acantilados costeros.



Figura 27: Playa de Anakena y Ovahe.



La playa de Ovahe, ubicada 1 (km) al este de Anakena, se caracteriza por ser una playa dinámica presentando perfil de acreción en verano y erosión en las épocas de invierno. Esta dinámica, no obstante, se ha interrumpido por una severa erosión generada en los últimos años (Figura 29) debido a grandes marejadas provenientes del noreste que removieron las contenciones naturales submarinas que amortiguaban el oleaje.

Figura 28: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Anakena (1996-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.





Figura 29: Fotografía desde el acceso de playa de Ovahe en a) 2007 y b) 2019. Foto satelital de Playa Ovahe en c) 2003 y d) 2017. Fuente: a) [www.summitpost.org/ovahe-beach-easter-island/312065](http://www.summitpost.org/ovahe-beach-easter-island/312065). b) Patricio Winckler. c) y d) Google Earth.

a)



b)



c)



d)

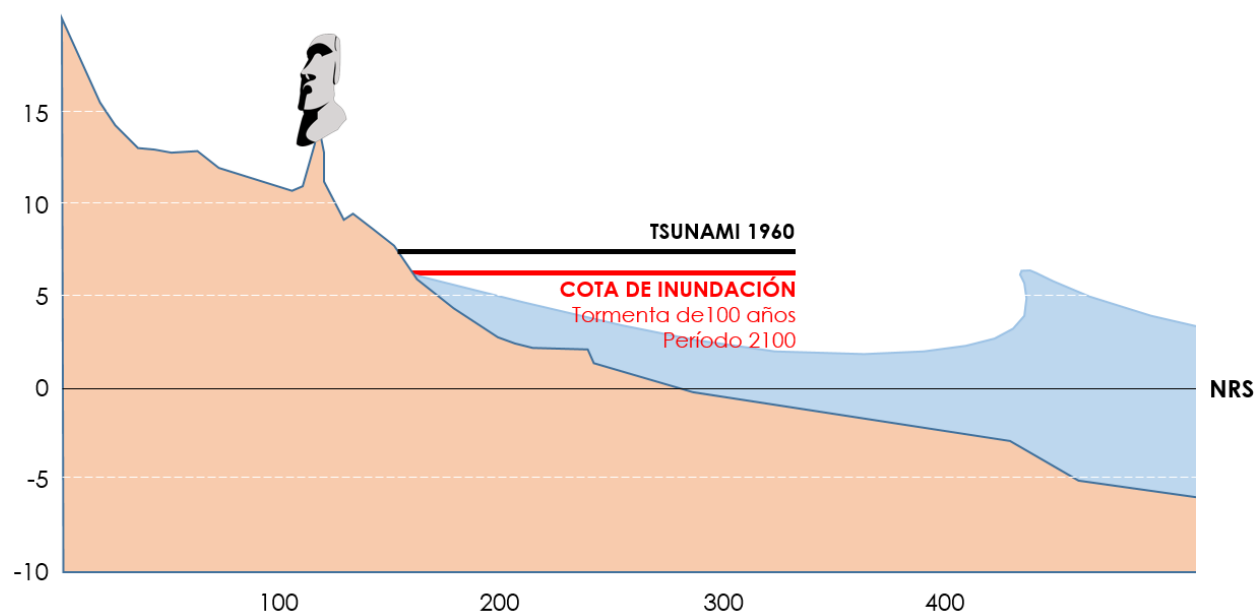


En este estudio no se efectuó un análisis detallado de los cambios esperados en ambas playas para la proyección. Para ello, sería necesario contar con una topo-batimetría de detalle en las cercanías de las playas, efectuar un análisis de propagación de oleaje detallado a las cercanías y contar con información granulométrica, entre otros requerimientos para un eventual estudio. Con todo, Quilliam et al. (2011) indican que Anakena presenta serios riesgos de estar permanentemente inundada a fin de siglo en un escenario de aumento de 0.8 (m) en el nivel del mar.





Figura 31: Esquema conceptual de inundación en el ahu de Anakena. Adaptado de Quilliam et al. (2011).



#### 5.1.4 Vulnerabilidad en puertos

En lo relativo a infraestructura portuaria, la isla cuenta con las siguientes facilidades portuarias, ilustradas en la Figura 32:

- Puerto de Hanga Piko
- Caleta Hanga Roa
- Caleta Vaihu
- Caleta ubicada a un costado del Ahu Tongariki.

Cabe mencionar que la isla no tiene sitios de atraque en zonas abrigadas. En el puerto de Hanga Piko, la carga se transfiere mediante una embarcación menor a tierra. Según Quilliam et al. (2011), todos los puertos tienen un riesgo de inundación ante tormentas con 100 años de período de retorno. Por otra parte, estos investigadores indican que si el aumento del nivel del mar para fin de siglo es de 0.8 [m], los puertos serán sometidos a inundación durante las pleamares. Asimismo, las tormentas podrían generar daño en rompeolas y defensas costeras.

Figura 32: D arriba hacia abajo: Puerto de Hanga Piko, Caleta Hanga Roa, Caleta Vaihu y Caleta ubicada a un costado del Ahu Tongariki.



## 5.2 ISLA ROBINSON CRUSOE

Dada la imposibilidad de visitar la isla durante la ejecución del estudio, no se efectúa un análisis de vulnerabilidad.

# 6 MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

## 6.1 RECOMENDACIONES

### 6.1.1 Riesgo de tsunamis

Quilliam et al. (2011) identificaron que la inundación por tsunami será un riesgo mayor que aquella provocada por las marejadas en Rapa Nui. De hecho, la consulta a pescadores evidenció que no tienen memoria de tormentas importantes y que las existentes habrían disminuido en la primera década del siglo XXI. Las marejadas en la costa oeste generan niveles de inundación en torno a 1 [m] en condición de mareas astronómica normal. Esta observación es consistente con las observaciones de Fritz et al. (2011), quienes reportan que el runup generado por el tsunami del 22 de abril de 1960 alcanzó 6 [m] respecto del nivel del mar, volteando algunos moais, en Tongariki. El tsunami de generado en la Islas Aleutianas en 1946, por su parte, habría generado un runup de 8.6 (m), según reporta Okal et al. (2002).

Desde la llegada de los españoles a Chile (1562), se han registrado 28 tsunamis magnitud significativa y que pueden haber impactado en forma directa Bahía Cumberland, en la Isla Robinson Crusoe, lo que sugiere una recurrencia de un tsunami cada 16 años. De ellos, los tsunamis más destructivos fueron generados por terremotos de 1730, 1835, 1868, 1877, 1922, 1960 y 2010, es decir con una recurrencia cercana a los 50 años, si se considera el borde costero nacional en su integridad (Lomnitz, 2004).

Dada la fuerte evidencia histórica de impactos de tsunamis en ambas islas, es que se recomienda efectuar estudios de riesgo de inundación por tsunami, como complemento a los asociados a los efectos del cambio climático en las costas.

### 6.1.2 Otros riesgos asociados al cambio climático en Rapa Nui

Campbell et al. (2014) identifican los siguientes sectores que debieran abordarse mediante medidas de adaptación ante el cambio climático en Rapa Nui:

- Abastecimiento de agua
- Seguridad alimentarios
- Preservación de sitios de interés patrimonial en la costa sur de la isla
- Mantener un manejo sustentable para soportar adecuadamente la población
- Mejorar la infraestructura y equipamiento turístico

- Riesgo de erosión (no costera al interior de la isla)<sup>14</sup>

El suministro de agua potable se vería afectado en la isla por los cambios en la precipitación, evaporación y elevación del nivel del mar. Quilliam et al (2011) indican que los volúmenes de recarga de aguas subterráneas declinarán en torno a un 50% con el aumento en la evaporación y sugieren estudiar en detalle el impacto que el aumento del nivel del mar tendrá en los acuíferos<sup>15</sup>. Campbell et al. (2014) indican que el eventual aumento del nivel del mar afectaría en mayor medida los acuíferos ubicados en la zona sur de la isla debido a su menor elevación. La fachada norte de la isla es más elevada, está escasamente poblada y no presenta terrenos de cultivo.

Los impactos del cambio climático en el turismo y en el patrimonio cultural de Rapa Nui son analizados en detalle por Campbell et al. (2014). El estudio explora el rol determinante de emblemáticos moai en el sector turístico y en la economía local, además de aspectos relacionados con la seguridad marítima y el abastecimiento de productos del mar. Se proponen medidas de adaptación para garantizar la seguridad en el abastecimiento del agua, en la protección costera, en la pesca y acuicultura, en temas relacionados con la gobernanza, y en acciones específicas para el sector turístico, como que los operadores del turismo local asuman una acción coordinada con otros sitios similares en Oceanía y otras islas. La cantidad de turistas que llegan a Rapa Nui alcanzaba, hacia 2014, del orden de 100,000 personas (Campbell et al., 2014), cifra que a contar de 2018 se vio reducida por las restricciones de acceso. Dada la deforestación histórica y la reducción del stock de pesquerías han hecho a la isla muy dependiente del turismo (Campbell et al., 2014). La gran cantidad de visitantes puede tener, entre otros, impactos sobre la disponibilidad de agua, la que se verá agudizada por la significativa reducción de precipitaciones explicitada en el Cuarto Informe del IPCC.

Se recomienda abordar las problemáticas asociadas a los impactos del cambio climático al interior de la isla, como complemento a estudios más detallados en la zona costera que profundicen los resultados de carácter preliminar presentados en este informe.

---

<sup>14</sup> Este riesgo ha sido analizado el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), pero no aborda la erosión costera. [rapanui.ciren.cl/index.php?option=com\\_k2&view=item&layout=item&id=78&Itemid=679](http://rapanui.ciren.cl/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=78&Itemid=679)

<sup>15</sup> El estudio "Simulaciones climáticas regionales para el continente Antártico y territorio insular Chileno" (Bozkurt et al., 2018), propone realizar un escalamiento estadístico de la precipitación y temperatura simulada en modelos de clima, usando, como referencia, las observaciones de estas variables registradas en el Aeropuerto Mataverí, ambas de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Una vez terminado, este estudio aportará a la cuantificación del impacto del cambio climático en la Rapa Nui.



## 7 REFERENCIAS

- Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Méndez, L., Contreras, C., Winckler, P. Y Molina, M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.
- Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H. Y Winckler, P. (2017). Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling*, N° 116, p 16–32.
- Bozkurt et al. (2018). Simulaciones climáticas regionales para el continente Antártico y territorio insular Chileno. Desarrollo por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) de la Universidad de Chile para el Ministerio del Medio Ambiente,
- Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors division*, 88(1), 117-132.
- Campbell, P., McCall, G., & Easton, A. (2014). Impacts to tourism and loss of cultural heritage from climate change and adaptation recommendations. *Rapa Nui Journal*, 28, 2.
- Contreras, M., Winckler, P. y Molina, M. (2012) Implicancias de la variación del nivel medio del mar por cambio climático en obras de ingeniería costera de Chile. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*. Volumen 124, Número 2, pp. 53-66. (Incluido en Revista Chilena de Ingeniería N°466).
- Fritz, H. M., Petroff, C. M., Catalán, P. A., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., ... & Ebeling, C. (2011). Field survey of the 27 February 2010 Chile tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 168(11), 1989-2010.
- GICO (2016). Evaluación del recurso energético asociado a oleaje en Isla de Pascua e Isla Robinson Crusoe, Chile. Grupo de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso.
- Lomnitz, C. (2004). Major earthquakes of Chile: A historical survey. *Seismological Research Letters*, Vol. N° 75(3): 368 – 378.
- Mann, D., J. Chase, J. Edwards, W. Beck, R. Reanier & M. Mass. (2003). Prehistoric Destruction of the Primeval Soils and Vegetation of Rapa Nui (Isla de Pascua, Easter Island). In *Easter Island: Scientific Exploration into the World's Environmental Problems in Microcosm*. J. Loreñ, & J. Tanacredi (eds.):133-153. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- McCall, G. (1979). Kinship and environment on Easter Island. Some observations and speculations. *Mankind* 12:119-137.
- Nunn, P.D. 2000. Environmental Catastrophe in the Pacific Islands around A.D. 1300. *Geoarchaeology* 15:715-740.
- Okal, E.A., Synolakis, C.E., Fryer, G.J., Heinrich, P., Borrero, J.C., Ruscher, C., Arcas, D., Guille, G. and Rousseau, D. (2002). A field survey of the 1946 Aleutian tsunami in the far field, *Seismol. Res. Letts.*, 73, 490–503.
- Quilliam, L., Cox, R., Campbell, P., & Wright, M. (2011). Coastal climate change impacts for Easter Island in 2100. In *Coasts and Ports 2011: Diverse and Developing: Proceedings of the 20th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 13th Australasian Port and Harbour Conference* (p. 617). Engineers Australia.
- Stenseth, N.C. & K.L. Voje (2009) Easter Island: climate change might have contributed to past cultural and societal changes. *Climate Research* 39:111-114.

## 8 ANEXOS

### 8.1 PROYECCIONES DE OLEAJE EN RAPA NUI Y ROBINSON CRUSOE

Se presenta la evolución interanual de los parámetros de oleaje en aguas profundas frente a Rapa Nui y la variación porcentual del cambio en la altura significativa y periodo medio por percentil en aguas profundas. Se concluye lo siguiente:

- Para las alturas significativas se observa que el percentil 50 permanece estable en todos los modelos analizados. Sin embargo, la altura significativa asociada al percentil 99 presenta una leve tendencia a la disminución en tres modelos (MIROC5, MRI-CGM y CCMC), mientras que en los restantes modelos permanece constante en el tiempo.
- En cuanto a los periodos medios, se observan percentiles 50 constantes en el tiempo y leves aumentos en el percentil 99 en todos los modelos, con excepción del CCMC. Este modelo presenta una tendencia a la baja en el periodo histórico, la cual tiende a permanecer constante en la proyección.
- En cuanto a las direcciones medias, se observan giros hacia el sur en la totalidad de modelos con excepción de los modelos MIROC5 y HADGEM. En el primero, la dirección media tiende a permanecer constante y en el segundo el oleaje tiende a girar levemente hacia el norte.

Figura 33. Variación porcentual del cambio en la altura significativa y periodo medio por percentil. Sector aguas profundas frente a Isla de Pascua.

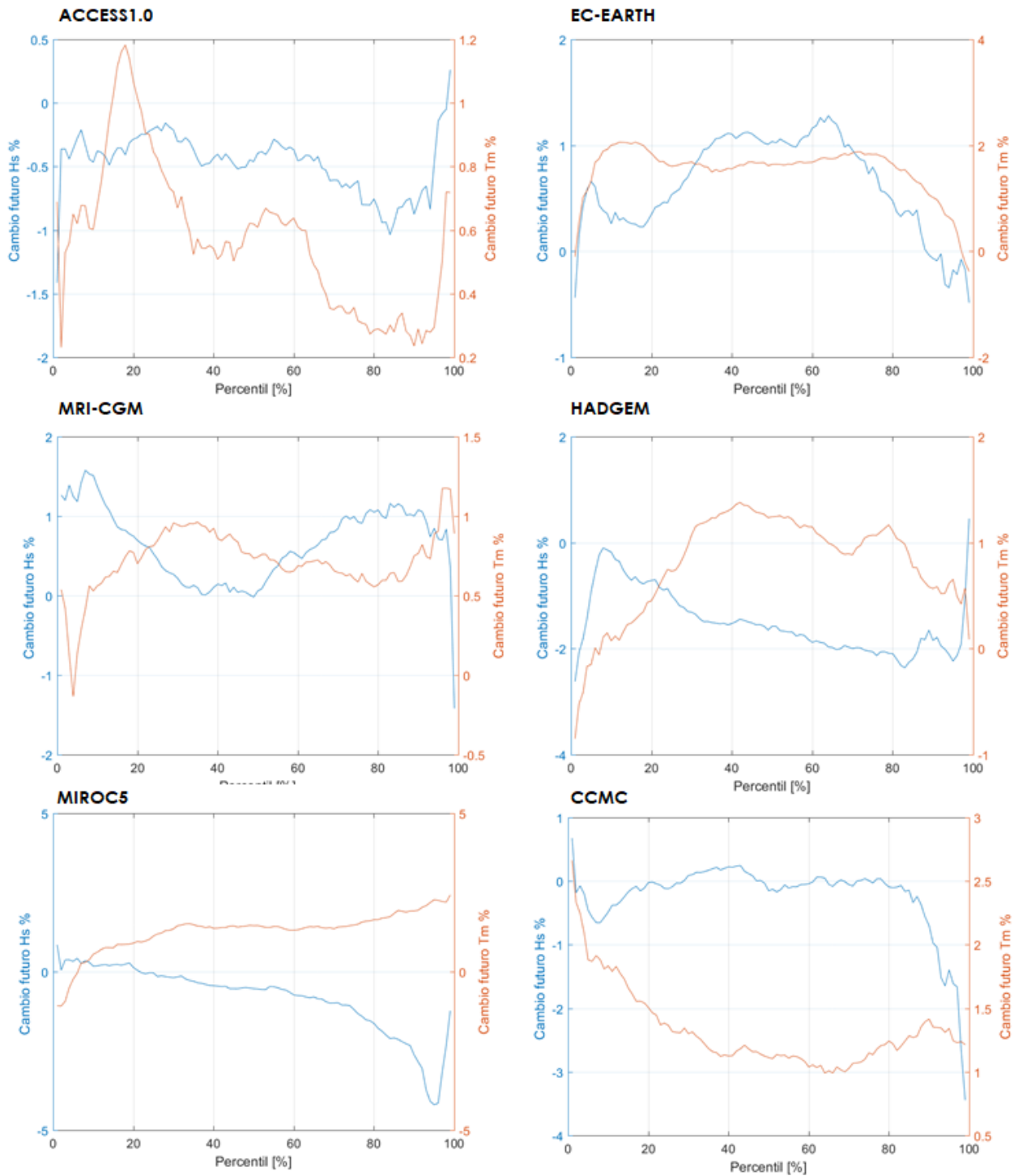




Figura 34. Evolución interanual de la altura significativa para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Isla de Pascua.

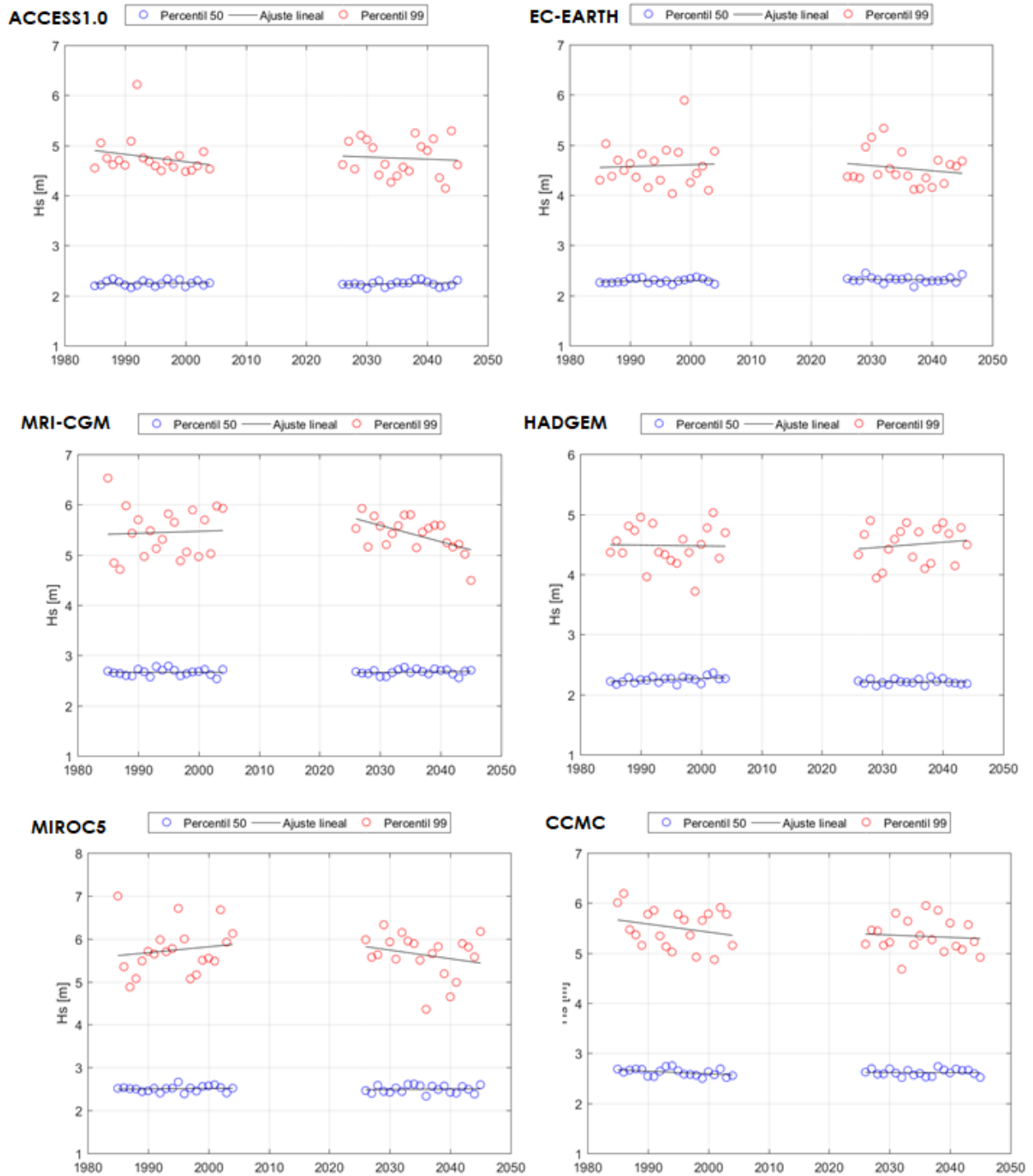


Figura 35. Evolución interanual del periodo medio para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Isla de Pascua.

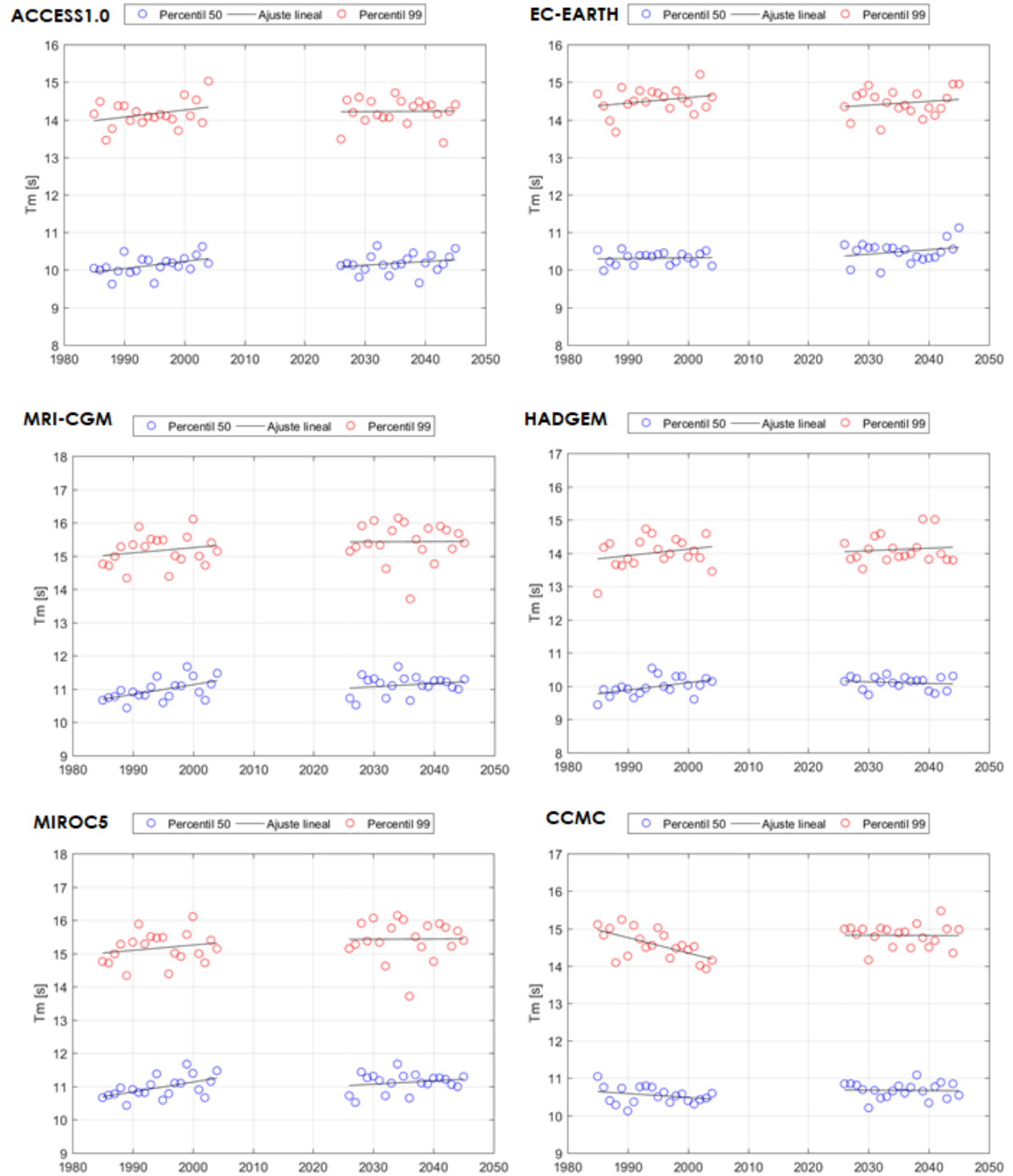
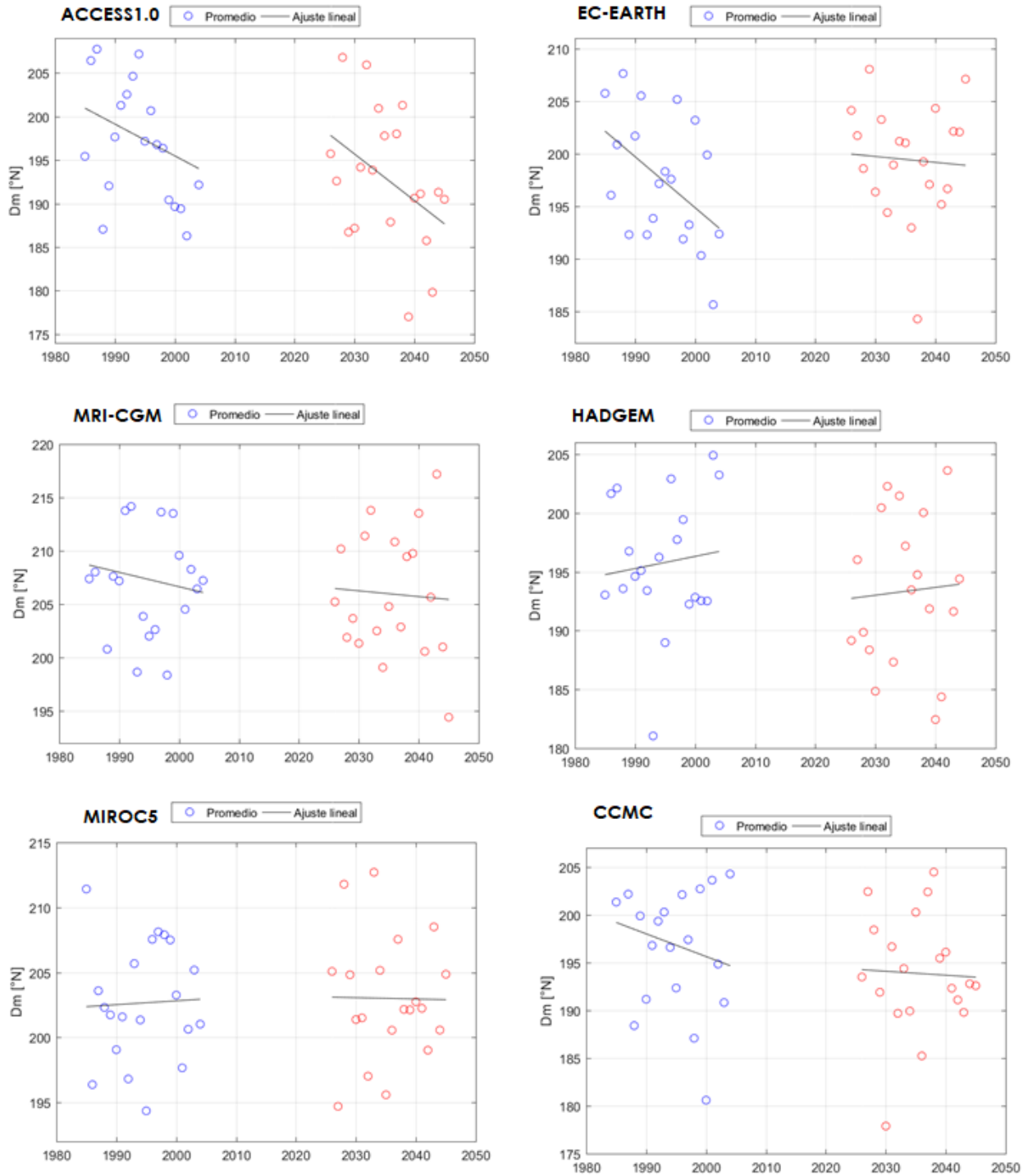


Figura 36. Evolución interanual de la dirección media para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Isla de Pascua.



Se presenta la evolución interanual de los parámetros de oleaje en aguas profundas frente a Isla Robinson Crusoe y la variación porcentual del cambio en la altura significativa y periodo medio por percentil en aguas profundas. Se concluye lo siguiente:

- En la altura significativa se observa que los percentiles 50 permanecen constantes en el tiempo, sin presentar variaciones significativas en el periodo proyectado. Por otra parte, el percentil 99 solo exhibe alzas en el modelo ACCESS 1.0. En los modelos EC-EARTH y MRI-CGM se evidencian alturas con tendencias a la baja en la proyección, no obstante, en los restantes modelos la situación futura permanece constante.
- Los periodos medios tienden a permanecer estables y sin grandes variaciones en el tiempo para ambos percentiles.
- El análisis direccional indica un giro hacia el sur en todos los modelos, con la excepción del CCMC, el cual presenta un leve giro hacia el norte.

Figura 37. Variación porcentual del cambio en la altura significativa y periodo medio por percentil. Sector aguas profundas frente a Isla Robinson Crusoe, Archipiélago Juan Fernández.

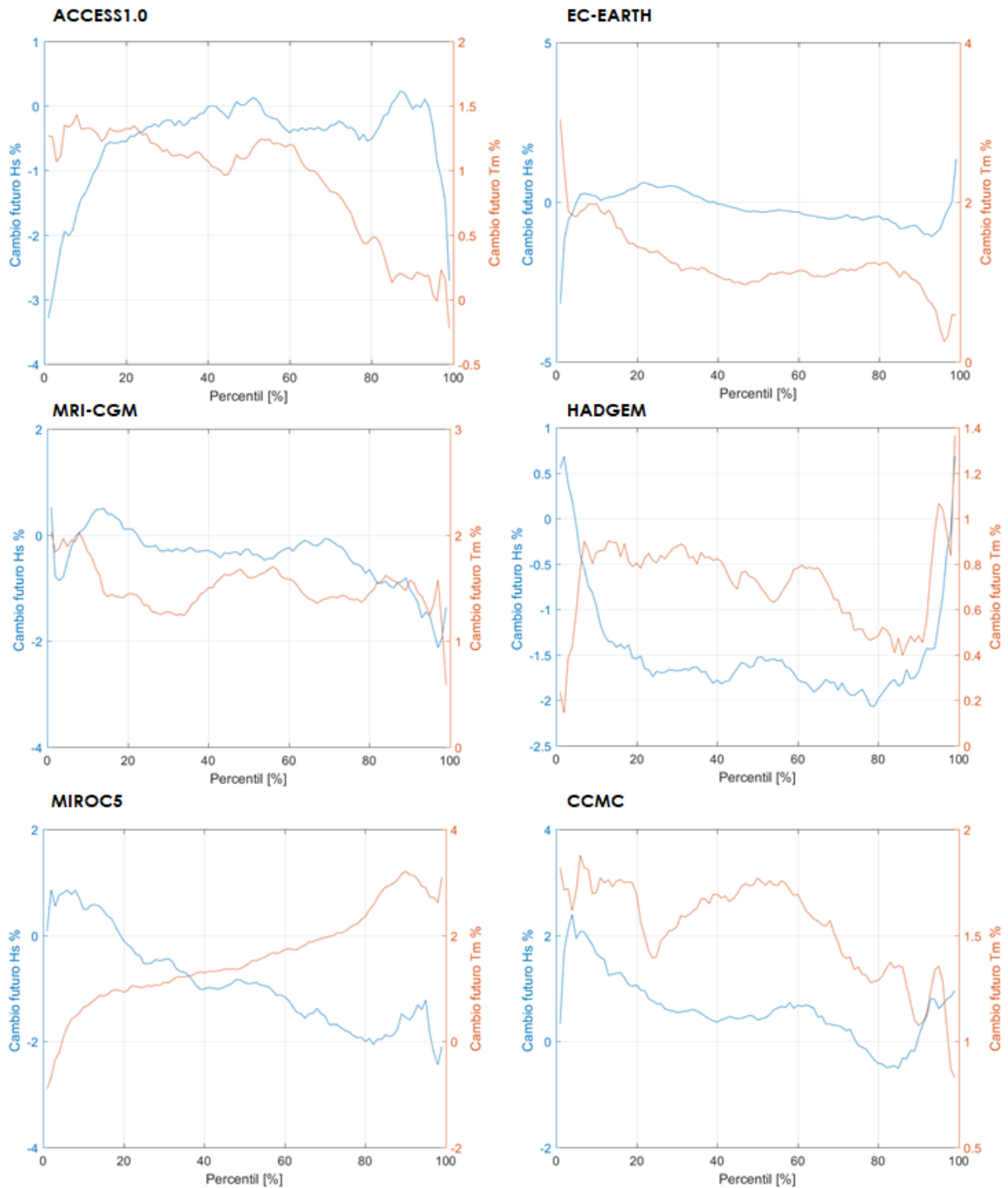


Figura 38. Evolución interanual de la altura significativa para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Isla Robinson Crusoe, Archipiélago Juan Fernández.

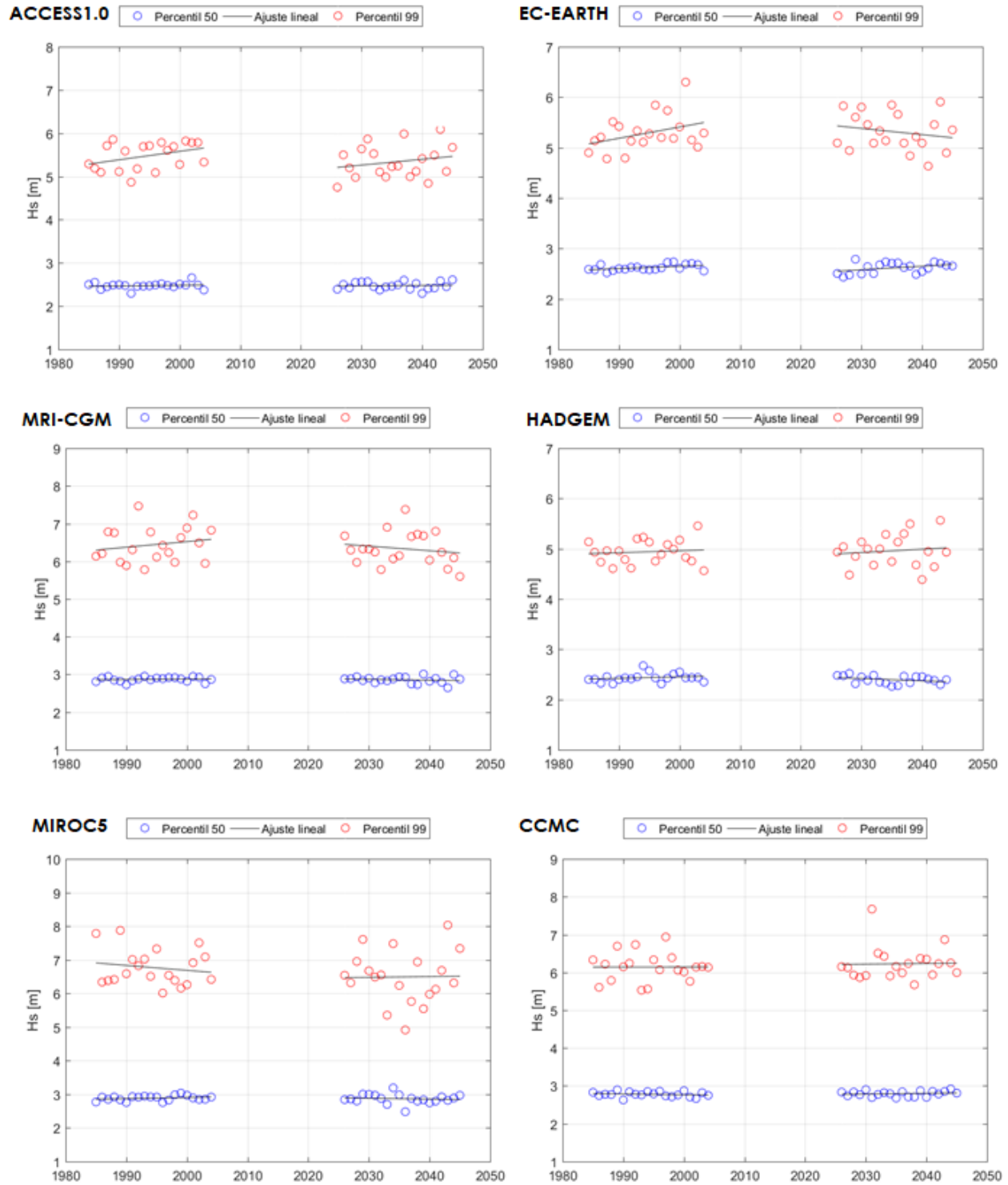


Figura 39. Evolución interanual del periodo medio para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Isla Robinson Crusoe, Archipiélago Juan Fernández.

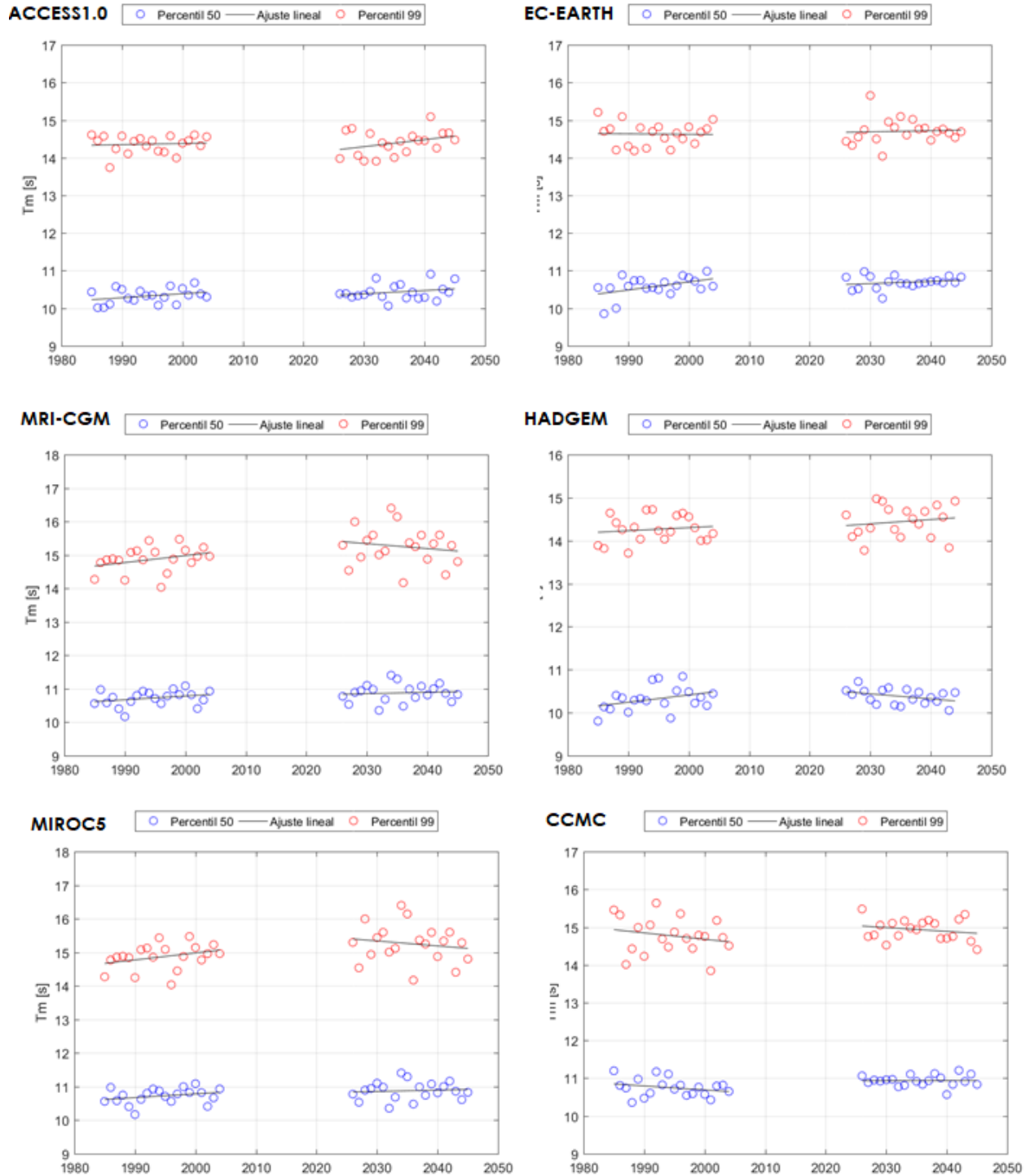




Figura 40. Evolución interanual de la dirección media para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Isla Robinson Crusoe, Archipiélago Juan Fernández.

