

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

Volumen 3: Vulnerabilidad de sistemas humanos y naturales
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)
- Javiera 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 3: Vulnerabilidad de sistemas humanos y naturales

- Sebastián Vicuña (PUC)
- Manuel Contreras-López (UPLA)
- Cristián Larraguibel (PUCV)
- Patricio Winckler (UV)
- Carolina Martínez (PUC)

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 3: Vulnerabilidad de sistemas humanos y naturales, 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 ± 0.1 [m] para la proyección. A fines de siglo, no obstante, el incremento sería del orden de 0.65 ± 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

1. INTRODUCCIÓN	9
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
2 MARCO TEÓRICO	16
2.1 MARCO CONCEPTUAL DEL IPCC	16
2.2 VULNERABILIDAD DE ASENTAMIENTOS COSTEROS	18
3 METODOLOGÍA	25
4 RESULTADOS	30
4.1 CARTAS DE INUNDACIÓN	30
4.2 RESULTADOS A NIVEL NACIONAL	30
4.3 RESULTADOS A NIVEL REGIONAL	34
4.4 RESULTADOS A NIVEL COMUNAL	39
5 CONCLUSIONES	41
5.1 CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO	41
5.2 ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS	41
5.2.1 Índice vulnerabilidad costera	41
5.2.2 Rueda de Peligro Costero	43
6 REFERENCIAS	46
7 ANEXOS	48
7.1 CARTOGRAFÍA COMUNAL DEL ÁREA VULNERABLE	48

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 del 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 3 cubre la vulnerabilidad y riesgo de sistemas humanos y naturales.

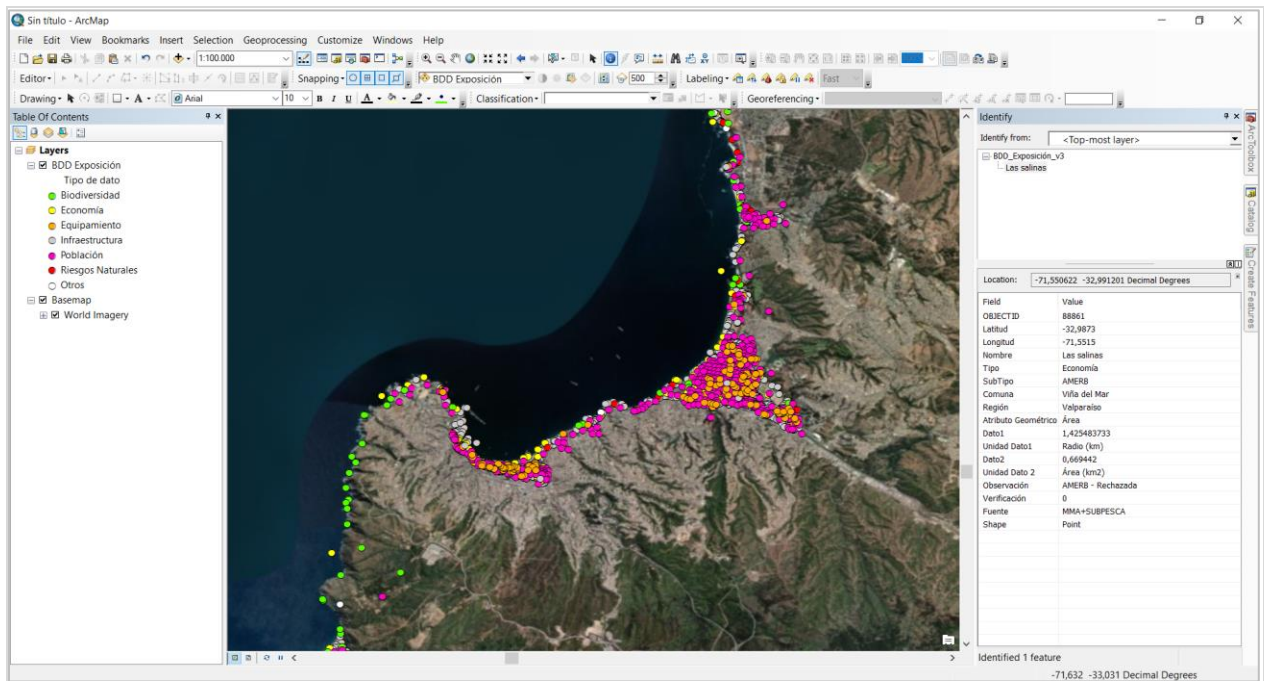
1.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO

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 Geodatabase¹ (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.

¹ 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 críticas².
 - 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

² 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 estudio³.
- **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-UC⁴), 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 (CIGIDEN⁵), 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-UV⁶).

³ Los humedales son: Carampangue, Cartagena, Cebada, Chaihuín, Conchalí, Cuccao, 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.

⁴ <https://cambioglobal.uc.cl/>

⁵ <http://cigiden.cl/en/>

⁶ <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/m²] 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/m²] y 6.0 [W/m²] después de 2100.
 - RCP8.5: Trayectoria alta para la cual el forzamiento radiativo alcanza valores mayores a 8.5 [W/m²] 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 TEÓRICO

En este capítulo se analiza la vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales identificados en el inventario de exposición incluido en el Volumen I de este informe. Los sistemas humanos y naturales analizados incluyen

- Población
- Infraestructura costera
- Equipamiento comunal
- Sistemas naturales
- Actividades económicas locales
- Educación
- Emergencia y seguridad
- Energía
- Patrimonio
- Medio ambiente y conservación
- Turismo

El estudio se basa en calcular el cambio en la vulnerabilidad entre el período histórico y la proyección, en forma simplificada, a partir del cambio en la cota de inundación para ambos períodos. La simplificación radica en el hecho de que se considera vulnerable cualquier unidad que sea inundada, independiente de su capacidad intrínseca de resistir dicha inundación⁷. Una vez determinado el incremento en la inundación horizontal entre ambos períodos, se identifican todos aquellos sistemas ubicados en la franja comprendida entre la inundación histórica y futura.

2.1 MARCO CONCEPTUAL DEL IPCC

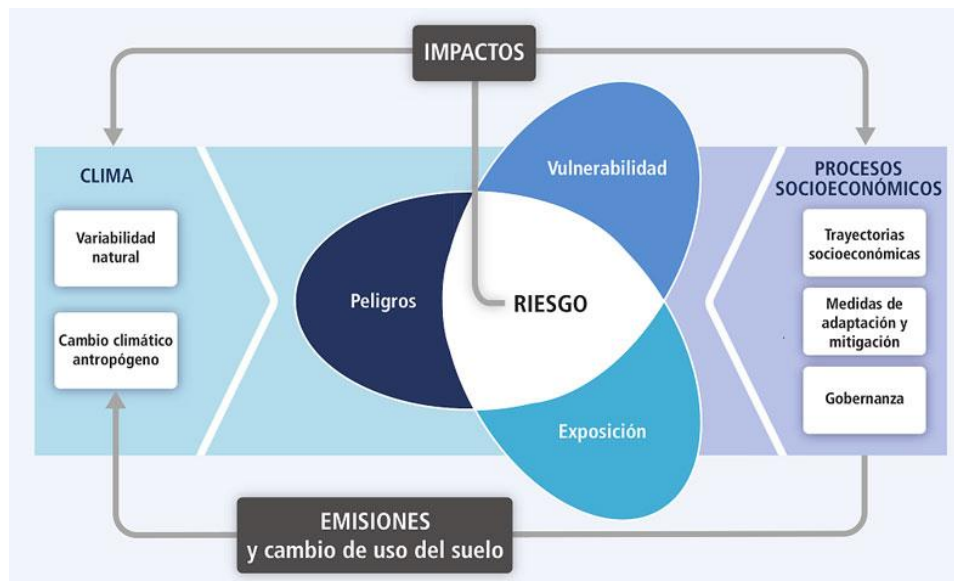
El marco conceptual que permite caracterizar los riesgos asociados al cambio climático fue el desarrollado en el Informe Especial de Cambio Climático y Eventos Extremos (SREX por sus siglas en inglés) y el quinto informe del IPCC (2012, IPCC, 2014). En este marco conceptual se establecen las relaciones básicas existentes entre la vulnerabilidad, exposición y amenazas climáticas (Figura 3).

De acuerdo a este marco conceptual, la ocurrencia de un riesgo ocurre cuando existe i) una amenaza de tipo climático, ii) un sistema natural o humano que se ve expuesto a dicha amenaza y iii) que a la vez es vulnerable a la misma. Si no ocurren estos tres factores no existe el riesgo, ni su manifestación (que corresponde al desastre). La amenaza de origen climático se asocia a una variabilidad natural intrínseca al sistema climático, pero ésta puede verse exacerbada o

⁷ La capacidad intrínseca que define la vulnerabilidad de un sistema se puede ilustrar mediante el siguiente ejemplo. Una vivienda de madera con fundaciones superficiales y una de hormigón con fundaciones profundas responden de manera muy diferente a la misma inundación, esto es, a la misma amenaza.

disminuida producto del cambio climático de origen antropogénico.

Figura 3: Marco conceptual del análisis de amenaza, exposición, vulnerabilidad y riesgo. El riesgo de los impactos conexos al clima se deriva de la interacción de los peligros (o amenaza) conexos al clima con la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas humanos y naturales. Los cambios en el sistema climático (izquierda) y los procesos socioeconómicos, incluidas la adaptación y mitigación (derecha), son impulsores de peligros, exposición y vulnerabilidad. (IPCC, 2014a).



En este estudio se analizan en forma separada las siguientes componentes del análisis en la zona costera de Chile continental e insular

- Amenaza de marejadas y cambios en el nivel del mar considerando el escenario de emisiones RCP 8.5 (Volumen 1).
- Exposición de sistemas humanos y naturales en los primeros 10 m sobre el nivel medio del mar (Volumen 2).
- Vulnerabilidad de los sistemas identificados en el estudio de exposición, con énfasis en sistemas humanos y naturales playas, puertos, caletas de pescadores, humedales e islas oceánicas (Volúmenes 3 a 8).
- Riesgos de los sistemas identificados en el estudio de exposición, con énfasis en playas, puertos y caletas de pescadores.
- Finalmente se entregan recomendaciones considerando el diseño de un plan de adaptación a los riesgos que se caracterizan en zonas costeras de Chile.

En este informe se analiza la vulnerabilidad de todos los sistemas humanos y naturales⁸ ubicados en zonas costeras bajo los 10 [msnm]. Cabe mencionar que, dada la gran cantidad y complejidad de subsistemas existentes, 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, esto es, si su cota estará bajo la cota de inundación proyectada.

Adicionalmente, y en volúmenes separados, se dan cuenta de los esfuerzos para caracterizar la vulnerabilidad de los siguientes componentes claves presentes en las costas en Chile:

- Playas
- Caletas
- Puertos
- Humedales

Estos componentes representan una fracción de los sistemas costeros de interés, pero han sido seleccionados por su relevancia en el desarrollo de los territorios expuestos. La Tabla 1 presenta las amenazas, vulnerabilidades y riesgos de los sistemas analizados en este estudio. En las amenazas se incluyen aquellas que no son de origen climático pero que juegan un rol muy relevante en los eventuales impactos sobre los sistemas analizados.

2.2 VULNERABILIDAD DE ASENTAMIENTOS COSTEROS

El cambio climático supone importantes aumentos en el sobrepaso de obras marítimas e inundación en los paseos marítimos de las ciudades costeras. En la Figura 4 y Figura 5 se muestra un ejemplo del sobrepaso ocurrido durante el temporal del 8 de agosto de 2015 en Valparaíso, que causó el corte del metro costero durante una semana (Winckler et al., 2017). El sobrepaso puede significar un riesgo a la seguridad de las personas y vehículos, como es frecuente observar en las avenidas costeras de Viña del Mar, La Serena, Antofagasta y Arica durante los temporales de invierno. Finalmente, el cambio climático puede acarrear importantes consecuencias en la estabilidad de los rompeolas y defensas costeras.

Uno de los factores que elevan la vulnerabilidad física y social en la costa ante eventos extremos es la localización de asentamientos precarios, campamentos y loteos irregulares, a veces agrupados como "asentamientos irregulares". Este fenómeno ha tenido un mayor auge en el norte de Chile pero que se encuentra actualmente bien desarrollado en el centro del país. Los asentamientos irregulares se definen como asentamientos residenciales de desarrollo progresivo, construidos a partir de invasiones de terrenos que no pertenecen a sus residentes y sin un plan, o más específicamente, un proyecto, que cubra los requerimientos a satisfacer por toda urbanización producida reguladamente en la misma ciudad y época (Tapia, 2005).

⁸ En este estudio se entiende por sistemas humanos y naturales a todos aquellos sistemas inventariados en el Volumen 2 de este informe. En concreto, estos sistemas incluyen población, infraestructura costera, equipamiento comunal, sistemas naturales, actividades económicas locales, educación, emergencia y seguridad, energía, patrimonio, medio ambiente y conservación y turismo. También se incluyen playas, caletas, puertos y humedales, los que son analizados con mayor profundidad en volúmenes independientes.

Tabla 1: Amenazas, vulnerabilidades y riesgos de los sistemas analizados en este estudio. Se incluyen amenazas no climáticas solo para constatar que los impactos pueden tener otros orígenes (no se utilizaron para evaluar vulnerabilidad ni riesgo).

Sistema	Amenazas		Vulnerabilidad		Riesgo	Impacto
	No climáticas	Climática	Tipo	Indicador	Indicador	
Sistemas humanos y naturales	Geológicos ¹ Cambios uso de suelo Contaminación	Marejadas Nivel del mar	Operacional Estructural	Ubicación respecto de superficie inundada	No se analiza por la gran cantidad y complejidad de entidades (76) del inventario de exposición	Inundación genera trastornos operacionales y daño estructural
Humedales	Geológicos ¹ Cambios uso de suelo Especies invasoras Contaminación	Marejadas Nivel del mar Caudales	Funcional Ecológica	Cambios históricos en área del espejo de agua	No se analiza por falta de información	Cambios en salinidad generan impactos en la biología del humedal
Playas	Geológicos ¹ Cambios uso de suelo	Marejadas Nivel del mar	Estructural	Cambios históricos en superficie de playas	Cambios en superficie e impacto económico	Pérdida de playas genera impacto económico
Puertos	Geológicos ¹	Marejadas	Operacional	Cierres de puerto históricos	Downtime ² e impacto económico	Cierres de puertos genera impacto económico en la cadena logística
Caletas	Geológicos ¹ Sobre explotación	Marejadas	Operacional	Cierres de puerto históricos	Downtime ² e impacto económico	Cierres de puertos genera impacto económico por merma en desembarques

1: Las amenazas no climáticas de interés son los terremotos y los tsunamis

2: El downtime operacional, corresponde al porcentaje de tiempo en que un sitio de atraque no está disponible para una determinada nave debido a la acción de agentes ambientales, como el viento, el oleaje, la marea, la corriente y la neblina, entre otros.

Figura 4: Arriba: Sobrepaso en Av. España, Valparaíso, debido al temporal del 8 de agosto de 2015 (Winckler et al., 2017). Producto de las olas, se destruyó la defensa y se cortó la línea del metro entre Valparaíso y Limache. El flujo llegó incluso a la avenida, lo que se evidencia en el desplazamiento de las barreras tipo New Jersey en la esquina inferior derecha de la foto.



Figura 5 Socavación de las bases y destrucción de la superestructura de la sede del Club Caleuche, ubicado inmediatamente abajo del faro en la foto de la Figura 4.



Por su parte, el “Catastro de campamentos y asentamientos irregulares” realizado por el Instituto de la Vivienda (MINVU-U. de Chile, 1997) define las siguientes categorías:

- **Campamento:** conjunto de familias instaladas con o sin autorización en terrenos de terceros, o en terreno de su propiedad y cuyas viviendas en ambos casos son provisorias y carecen de servicios básicos de agua potable, alcantarillado y electricidad dentro del sitio.
- **Loteo irregular:** solución habitacional de origen particular, con problemas de saneamiento legal y/o de servicios básicos. En esta categoría se consideran las poblaciones informales instaladas al interior de terrenos fiscales o municipales, con problemas de saneamiento legal y las poblaciones que teniendo título de dominio a favor de los residentes, carecen del conjunto de servicios básicos y son calificadas por los organismos regionales (Intendencias, SEREMIS) como casos de extrema marginalidad habitacional.
- **Asentamiento precario:** todo tipo de agrupación de 10 o más viviendas contiguas y los conjuntos de 60 y más viviendas dispersas en ciudades de 100.000 y más habitantes, que presentan en conjunto problemas de saneamiento legal referido al título de dominio de la propiedad donde se emplaza el asentamiento y/o problemas de habitabilidad por carencia del total o parte de los servicios básicos. Se reconocen 3 categorías: conjuntos de 10 a 19 viviendas agrupadas y contiguas; conjuntos de 20 y más viviendas agrupadas y contiguas; conjuntos de 60 o más viviendas dispersas dentro de asentamientos consolidados en centros metropolitanos y en las ciudades de 100.000 y más habitantes, según censo de 1992.

De acuerdo con dicho informe hacia 1997 se reconocían un total de 972 asentamientos precarios a nivel nacional (104.808 familias), de los cuales 423 son rurales. La mayoría de estos se localizaban en las VIII y X Regiones, hoy Biobío y Los Lagos. Respecto a los campamentos, cifras recientes indicadas por MINVU (2018), establecieron que a nivel nacional estos aumentaron en un 25% respecto a cifras de 2011, es decir de 657 campamentos se tienen hoy 822⁹. De estos, 489 corresponden a nuevos campamentos. Estas cifras corresponden al catastro más reciente elaborado por MINVU, sin embargo se está levantando información de la segunda etapa¹⁰. Según Techo-Chile (2017), la región de Valparaíso concentra la mayor cantidad de campamentos (159), seguida de Biobío (130). Destaca también la Región de Antofagasta, que pese a tener menor número de campamentos, concentra un alto número de familias (Figura 6).

Por otro lado, se observa que, si bien entre 2011 y 2016 el número de campamentos tendió a bajar, en 2017 las cifras volvieron a aumentar (Figura 7). Destaca que entre 2011 y 2017 ha aumentado considerablemente el número de familias en campamentos, por lo que se infiere altas tasas de hacinamiento, que asociadas a otras variables socioeconómicas, elevan la vulnerabilidad a eventos extremos en campamentos localizados en áreas costeras. En este

⁹<https://www.latercera.com/nacional/noticia/catastro-del-minvu-73-822-campamentos-nivel-nacional-estan-gestion-cierre/516202/>

¹⁰<https://www.facebook.com/MinvuChile/posts/hoy-anunciamos-el-plan-nacional-de-campamentos-para-agilizar-cierre-de-asentamie/1769871163104963/>

estudio se identificaron varios núcleos de manzanas rurales de la zona norte ubicadas en áreas de exposición a amenazas, los cuales por su alta densidad poblacional y concentración de viviendas, corresponderían a alguna de estas categorías de asentamientos precarios, en especial tomas. En lo sucesivo, parece recomendable analizar con detalle esto núcleos debido a que son zonas donde la vulnerabilidad global se concentra y expone un mayor número de personas a ser afectadas por amenazas naturales. Se destaca que este factor fue discutido en el Taller realizado en Antofagasta en el marco de este estudio, siendo algunos casos Puerto Viejo y Carrizalillo (Figura 8).

Figura 6: Cantidad de campamentos en Chile y número de familias¹¹.

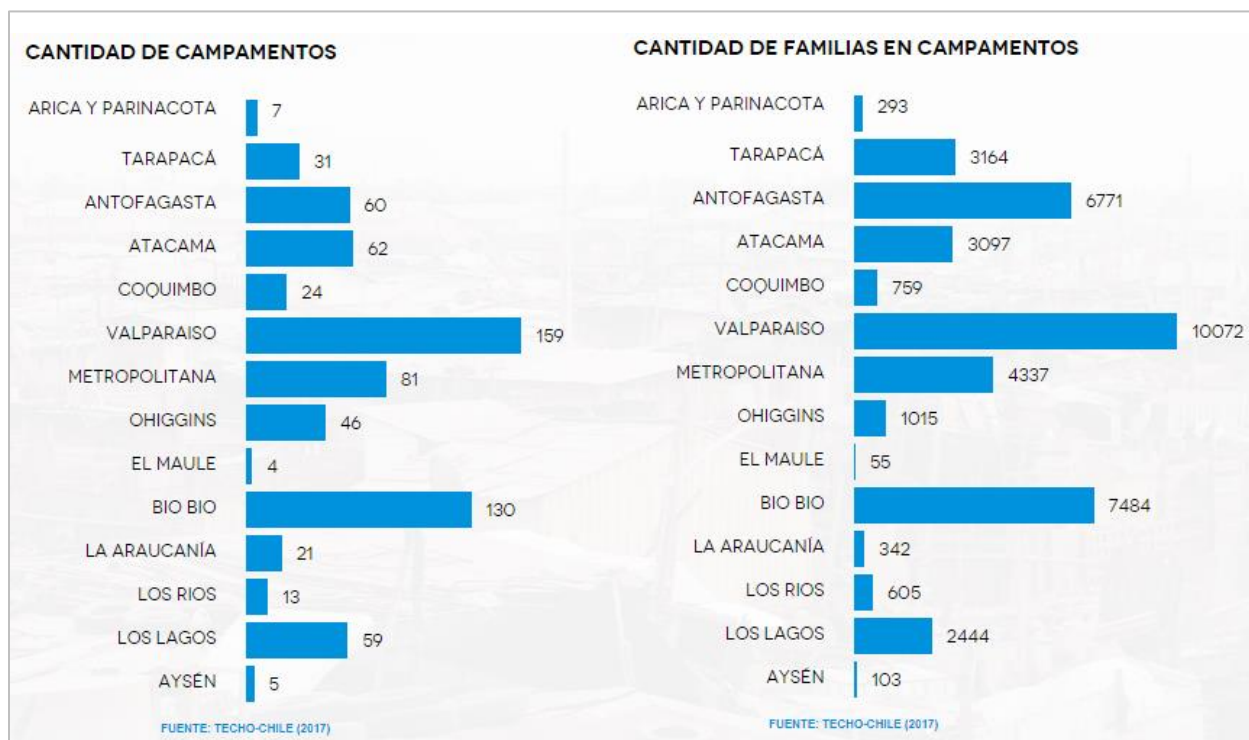


Figura 7: Evolución del número de campamentos en Chile (2011-2017)⁸.



¹¹ <http://chile.techo.org/cis/monitor/monitor.php#>

Figura 8: Asentamientos precarios en Antofagasta. a) Carrizalillo. b) Puerto Viejo.



a) Carrizalillo

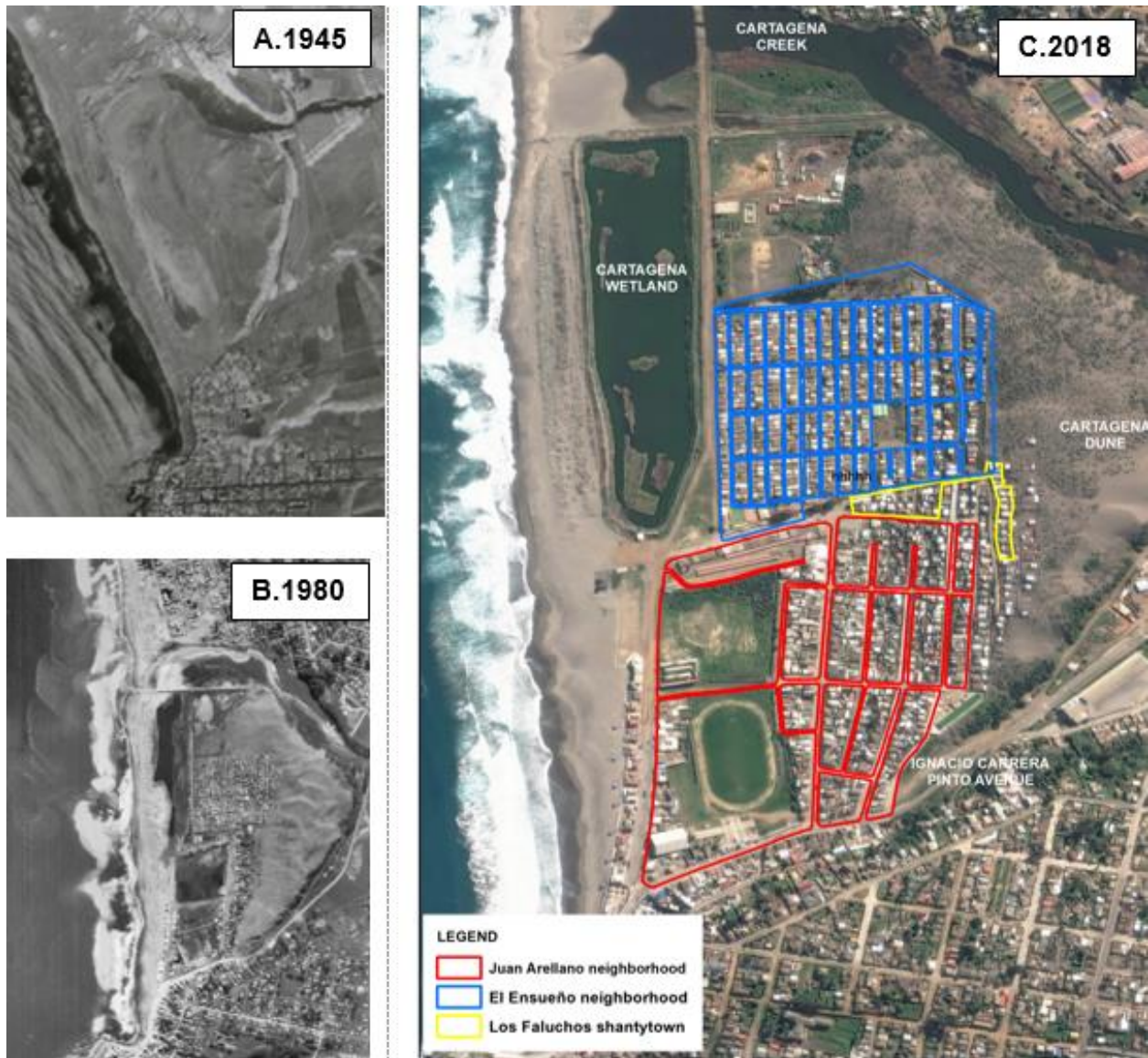


b) palafitos en Puerto Viejo

En la región de Valparaíso, algunos campamentos que surgen en los años '70 han sido consolidados a través de distintas iniciativas de urbanización, donde destaca la Villa El Ensueño y la población José Arellano. Como se observa en la Figura 9, estos se emplazan en la gran duna parabólica de Cartagena, que colinda el humedal del mismo nombre y que de acuerdo a investigaciones recientes (Ugalde, 2017; Martínez et al., 2019) se localizan en un área de riesgo alto de inundación por tsunami. Entre ambos ex campamentos, se localiza un nuevo campamento (Los Faluchos) el cual está aumentado la población expuesta a amenazas naturales. En estas investigaciones se ha establecido que dicha duna, debido a su altura, es el único lugar que puede ser utilizado como zona segura en el caso de ser afectada por inundación por tsunami considerando un peor escenario. Ello puede verse agravado por la condición de alta erosión costera que, según el presente estudio, ha experimentado bahía de Cartagena.

Estos efectos podrían replicarse en numerosas localidades costeras del país, tanto urbanas como rurales, donde campos dunares, humedales y playas, han sido poblados por asentamientos irregulares que luego se consolidan con apoyo de planes reguladores, que por las características de la vivienda (materiales precarios) y las condiciones socioeconómicas (bajos ingresos, falta de acceso de servicios básicos, bajo nivel educativo, pobreza, marginalidad), exponen a un gran número de familias a los efectos de eventos extremos.

Figura 9: Formas de ocupación (asentamientos regulares e irregulares) emplazados en la gran duna parabólica de Cartagena.



Fuente: Martínez et al. (2019).

3 METODOLOGÍA

Para elaborar el inventario de elementos vulnerables, se cruzó el inventario de exposición (Volumen 2), con las cotas de inundación históricas (1985-2004) y proyectadas (2026-2045) para el escenario RCP 8.5 (Volumen 1).

En primera instancia se elaboraron modelos de elevación digital (DEM's) de las 71 comunas costeras comprendidas entre Arica y Fresia, utilizando la información disponible en plataformas geoespaciales e información oficial del IGM e INE (Volumen 2). Además, se incorporaron los planos de borde costero del SHOA en aquellas comunas críticas para el desarrollo del estudio, con objeto de mejorar la resolución del DEM. Los planos de borde costero fueron transformados y georeferenciados desde archivos CAD a archivos vectoriales en formato *shapefile* y la información altimétrica en cada curva de nivel fue ingresada de forma manual. De esta manera, los DEM se trabajaron en Sistema de Coordenadas UTM, Datum WGS 84, Zona 19 y 18 según corresponda.

Cabe destacar que el inventario de elementos vulnerables sólo se realizó en 71 de las 106 comunas analizadas en el estudio como parte del inventario de exposición, puesto que a partir de la comuna de Fresia (~41°S) no se cuenta con información detallada para elaborar los DEM necesarios para el análisis de vulnerabilidad.

Tabla 2: Planos de Borde Costero usados en el estudio. Fuente: elaboración propia en base a SHOA (2019).

Plano de Borde Costero	Comuna (s)	Región
li-28_Península De Mejillones A Playa Los Metales	Antofagasta	Antofagasta
li-29_Costa Norte De Bahía Moreno	Antofagasta	Antofagasta
li-30_Costa Noreste De Bahía Moreno	Antofagasta	Antofagasta
li-31_Costa Norte Rada De Antofagasta	Antofagasta	Antofagasta
li-32_Costa Sur Rada De Antofagasta	Antofagasta	Antofagasta
li-33_Playa El Huáscar A Norte De Caleta Bolfín	Antofagasta	Antofagasta
Iv-019_Norte Bahía Coquimbo	La Serena - Coquimbo	Coquimbo
Iv-020_Centro Bahía Coquimbo	La Serena - Coquimbo	Coquimbo
Iv-021_Sur Bahía Coquimbo	La Serena - Coquimbo	Coquimbo
Iv-022_Peñuelas Bahía Coquimbo	La Serena - Coquimbo	Coquimbo
Iv-023_Pto. Coquimbo A Pta. Tinaja	La Serena - Coquimbo	Coquimbo
Iv-024_Bahía Herradura De Guayacán	La Serena - Coquimbo	Coquimbo
V-10_Concón - Reñaca	Viña del Mar	Valparaíso
V-11_Bahía Valparaíso	Valparaíso	Valparaíso
V-12_Playa Ancha A Quebrada Verde	Valparaíso	Valparaíso

Plano de Borde Costero	Comuna (s)	Región
V-13_Bahía Laguna Verde - Caleta Las Docas	Valparaíso	Valparaíso
Vi-12_Sur De Playa San Antonio A Punta Pichilemu	Pichilemu	O'higgins
Vi-13_Playa Infiernillo A Punta Lobos	Pichilemu	O'higgins
Viii-11_Península Tumbes	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-12_Isla De Los Reyes A Río Andalién	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-13_Talcahuano A Isla De Los Reyes	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-14_Caleta Costa Larga A Punta Pardo	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-15_Bahía San Vicente	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-16_Punta Gualpén	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-17_Ensenada Reque A Caleta Las Escaleras	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-18_Caleta Lengua	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-19_Desembocadura Del Río Bio-Bío	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-20_Michahue A Loma Colorada	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-21_El Escuadrón	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-22_Bahía Coronel (Schwager Y Coronel)	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-23_Bahía Lota A Norte De Caleta Laraquete	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-24_Playa Laraquete	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-25_Norte De Isla Santa María	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-26_Sur De Isla Santa María	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-27_Arauco	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-28_Playa Tubul	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-29_Tubul	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-30_Playa El Fraile	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-31_Playa Del Cuco	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-32_Caleta Trauco A Caleta Llico	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-33_Cabo Rumena	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Viii-34_Punta Rumena A Punta Palanca	Talcahuano-Coronel-Arauco	Biobío
Ix-03_Morro Cautén A Río Moncul	Saavedra	La Araucanía
Ix-04_Río Imperial	Saavedra	La Araucanía
Ix-05_Río Budi A Punta Puancho	Saavedra	La Araucanía
Ix-06_Estero Puancho A Playa Peleco	Saavedra	La Araucanía
Xiv-01_Río Cruces Y Río Calle Calle	Valdivia	Los Ríos
Xiv-02_Río Calle Calle (Noreste De Valdivia)	Valdivia	Los Ríos
Xiv-03_Bahía Corral (Puerto Corral - Niebla)	Valdivia	Los Ríos

Plano de Borde Costero	Comuna (s)	Región
Xiv-04_Río Valdivia	Valdivia	Los Ríos
Xiv-05_Ensenada San Juan	Valdivia	Los Ríos
Xiv-06_Río Torna Galeones (Sur Isla Del Rey)	Valdivia	Los Ríos

Una vez obtenidos los DEM para las 71 comunas consideradas en el análisis de vulnerabilidad, se calcularon las cotas de inundación histórica y las cotas de inundación proyectada a escala comunal con el escenario RCP 8.5 para mediados de siglo. De esta manera, los valores utilizados para el cálculo de las cotas de inundación se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Cotas de inundación histórica y proyectada utilizadas en el cálculo del área vulnerable.

N°	Comuna	Cota de inundación [m]		N°	Comuna	Cota de inundación [m]	
		Histórica	Proyectada			Histórica	Proyectada
1	Arica	2,4	2,7	36	Litueche	2,9	3,2
2	Camarones	2,4	2,7	37	Pichilemu	3,0	3,2
3	Huara	2,5	2,7	38	Paredones	3,0	3,2
4	Iquique	2,5	2,8	39	Vichuquén	3,0	3,2
5	Tocopilla	2,7	3,0	40	Licantén	3,0	3,2
6	Mejillones	2,9	3,1	41	Curepto	3,0	3,3
7	Antofagasta	2,8	3,1	42	Constitución	3,1	3,3
8	Taltal	2,7	2,9	43	Chanco	3,1	3,3
9	Chañaral	2,6	2,9	44	Pelluhue	3,1	3,4
10	Caldera	2,6	2,8	45	Cobquecura	3,1	3,4
11	Copiapó	2,6	2,8	46	Treguaco	3,1	3,4
12	Huasco	2,6	2,8	47	Coelemu	3,1	3,4
13	Freirina	2,6	2,9	48	Tomé	3,2	3,4
14	La Higuera	2,6	2,9	49	Penco	3,2	3,4
15	La Serena	2,7	2,9	50	Talcahuano	3,2	3,4
16	Coquimbo	2,7	3,0	51	Hualpén	3,2	3,4
17	Ovalle	2,8	3,1	52	San Pedro de La Paz	3,2	3,4
18	Canela	2,8	3,1	53	Coronel	3,2	3,4
19	Los Vilos	2,8	3,1	54	Lota	3,2	3,4
20	La Ligua	2,9	3,1	55	Arauco	3,2	3,5
21	Papudo	2,9	3,1	56	Lebu	3,3	3,5

N°	Comuna	Cota de inundación [m]	
		Histórica	Proyectada
22	Zapallar	2,9	3,1
23	Puchuncaví	2,9	3,1
24	Quintero	2,9	3,1
25	Concón	2,9	3,1
26	Viña del Mar	2,9	3,1
27	Valparaíso	2,9	3,1
28	Casablanca	2,9	3,1
29	Algarrobo	2,9	3,1
30	El Quisco	2,9	3,1
31	El Tabo	2,9	3,1
32	Cartagena	2,9	3,1
33	San Antonio	2,9	3,1
34	Santo Domingo	2,9	3,1
35	Navidad	2,9	3,2

N°	Comuna	Cota de inundación [m]	
		Histórica	Proyectada
57	Álamos	3,3	3,5
58	Cañete	3,3	3,5
59	Tirúa	3,3	3,5
60	Carahue	3,3	3,6
61	Saavedra	3,4	3,6
62	Teodoro Schmidt	3,4	3,6
63	Toltén	3,4	3,6
64	Mariquina	3,4	3,7
65	Valdivia	3,4	3,7
66	Corral	3,4	3,7
67	La Unión	3,4	3,7
68	San Juan de la Costa	3,4	3,7
69	Río Negro	3,5	3,7
70	Purranque	3,5	3,7
71	Fresia	3,5	3,7

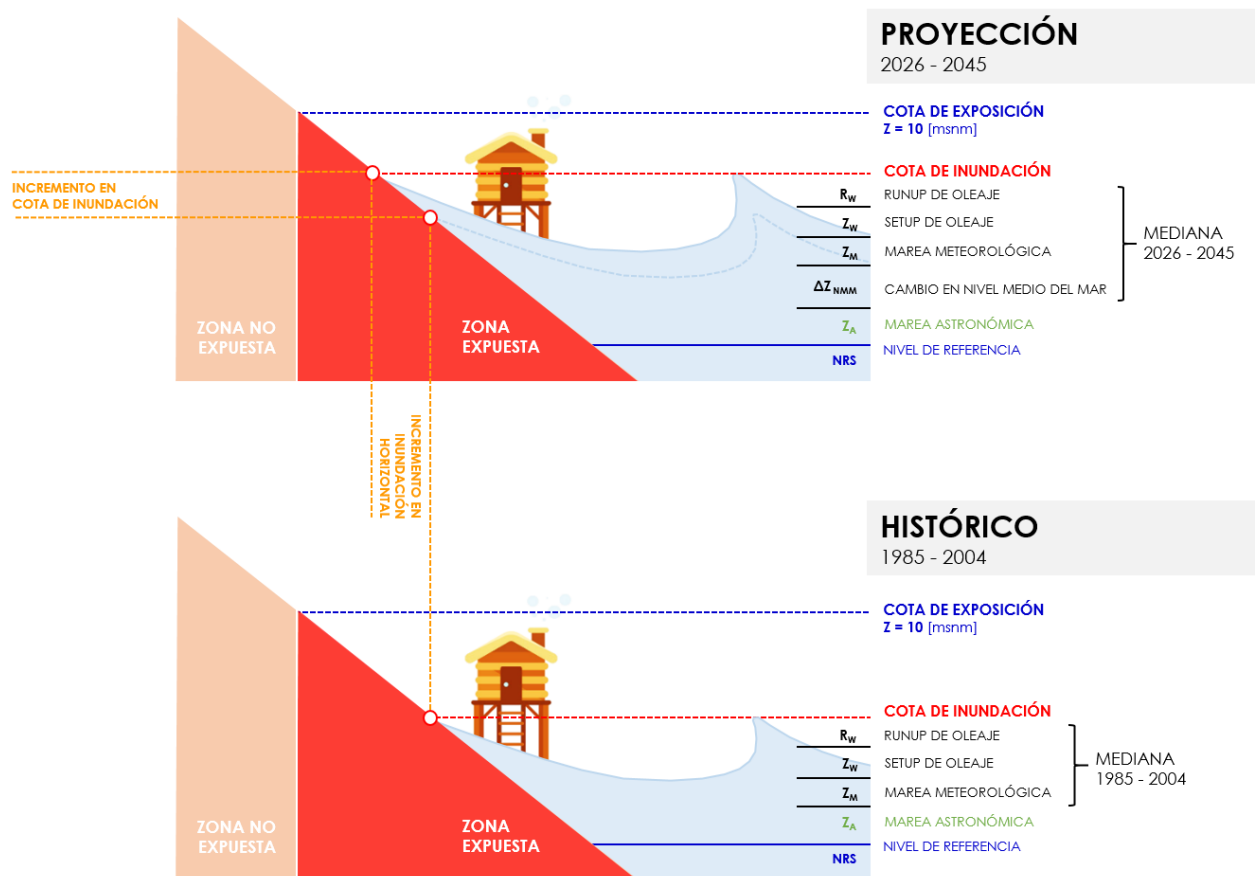
Una vez obtenidas las cotas de inundación, se elaboró un polígono de vulnerabilidad de la zona costera, el cual comprende desde la línea de costa hasta la cota de inundación proyectada con el escenario RCP 8.5 (Figura 10 y Figura 11). El área vulnerable para cada una de las 71 comunas consideradas en este análisis se re proyectó al sistema de coordenadas geográficas, datum WGS84, con objeto de unificar las áreas obtenidas en un solo polígono de vulnerabilidad entre las comunas de Arica y Fresia.

Cabe destacar que el área vulnerable obtenida es considerablemente menor que el área expuesta, puesto que la segunda abarca desde la línea de costa hasta los 10 [msnm], mientras que el área vulnerable abarca desde la línea de costa hasta los 3,7 [msnm], como máximo, en la comuna de Fresia (Tabla 3).

Figura 10: Ejemplo de la construcción del área vulnerable a partir de la curva de inundación proyectada con el escenario RCP 8.5 en Caleta Portales, Valparaíso.



Figura 11: Definición de componentes utilizadas para el cálculo de la cota de inundación.



4 RESULTADOS

4.1 CARTAS DE INUNDACIÓN

La Figura 12 muestra un ejemplo del área considerada en el inventario de exposición y las áreas utilizadas para el inventario de vulnerabilidad histórica y futura en la Bahía de Quintero. En el Anexo 7.1 se incluye la cartografía comunal del área vulnerable por comunas tanto para el período histórico (1985-2004) como para la proyección (2026-2045) en 71 comunas que se ubican al norte del Canal Chacao. Como se mencionara en el Volumen 2, dada la baja calidad de los modelos de elevación digital y líneas de costa disponibles (cuyo error es mucho mayor a los cambios esperados en la cota de inundación), no tiene sentido evaluar aquellas comunas ubicadas en la zona de fiordos y canales.

Cabe notar que la diferencia horizontal en la línea de inundación para el período histórico y la proyección presentada en la Figura 13 no es tan significativa pues se asocia a aumentos en la cota de inundación del orden de 20 a 30 [cm] a nivel nacional entre el período histórico y la proyección¹² (Figura 13). Estas diferencias en cota de inundación, no obstante, pueden ser significativamente superiores para eventos más extremos a los utilizados en este estudio¹³ pues, como se deduce del análisis de clima extremo de oleaje (Volumen 1), para probabilidades de excedencia de más de 5 años, las diferencias entre el período histórico y la proyección son mucho mayores que para el percentil 99%.

4.2 RESULTADOS A NIVEL NACIONAL

Una vez obtenida el área vulnerable, ésta se cruzó con el inventario de exposición con objeto de obtener aquellos elementos que se encuentran vulnerables respecto a las proyecciones de la cota de inundación RCP 8.5. En este contexto, aquellos elementos que se encuentran en el mar (como concesiones marinas o AMERB's) se incorporaron de forma automática al catastro de elementos vulnerables, mientras que el resto de los elementos se cruzó con el área vulnerable.

Así, se obtuvo un catastro de 47.720 elementos vulnerables para el territorio nacional continental entre Arica y Fresia, como se ilustra en la Tabla 4. Cabe notar que la tabla excluye los elementos que se encuentran en el agua (e.g. concesiones marítimas) y algunos elementos naturales esencialmente marinos (e.g. áreas marinas protegidas) que distorsionan el resultado del ranking comunal presentado en la Tabla 5 (si se incluyen las comunas que encabezan el ranking se ubican mayoritariamente al sur de Puerto Montt).

¹² Para mayores antecedentes sobre el cálculo de la cota de inundación se recomienda revisar el Volumen 1 de este estudio.

¹³ En este estudio se usó una altura significativa asociada al percentil 99%, la que es excedida en promedio 4 días al año.

Figura 12: : Ejemplo de la zona bajo los 10 [msnm] considerada en el inventario de exposición (izquierda) y la zona entre la línea de costa y cota de inundación histórica y futura donde se cuantifica la vulnerabilidad en la Bahía de Quintero (derecha). Abajo se muestra un detalle de la diferencia de cotas de inundación histórica (azul) y futura (rojo)

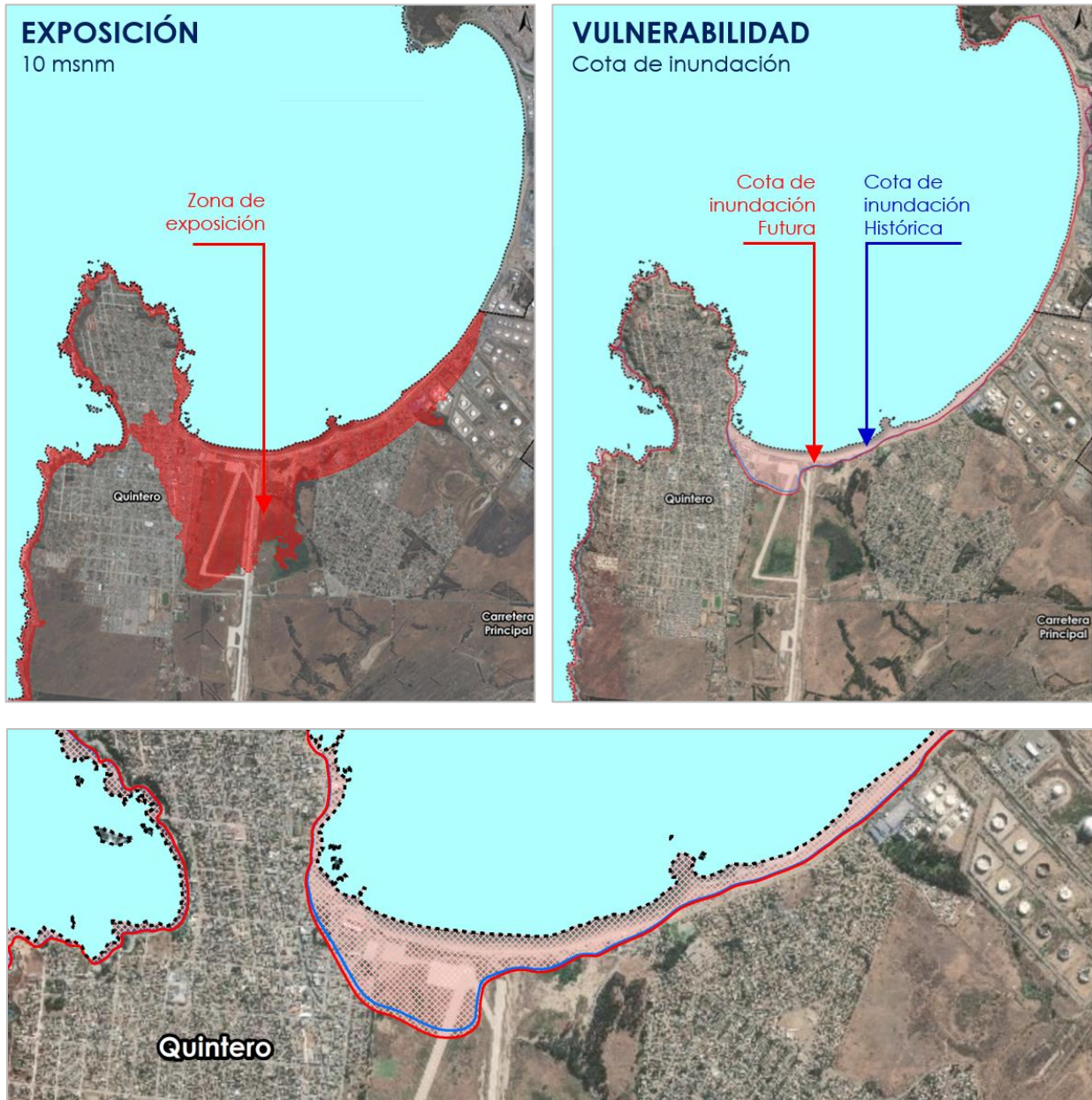


Figura 13: Cota de inundación entre Arica y el Canal Chacao para el período histórico (arriba) y para la proyección (abajo). En el panel de abajo se muestra también la cota de inundación histórica para facilitar la comparación entre ambos períodos.

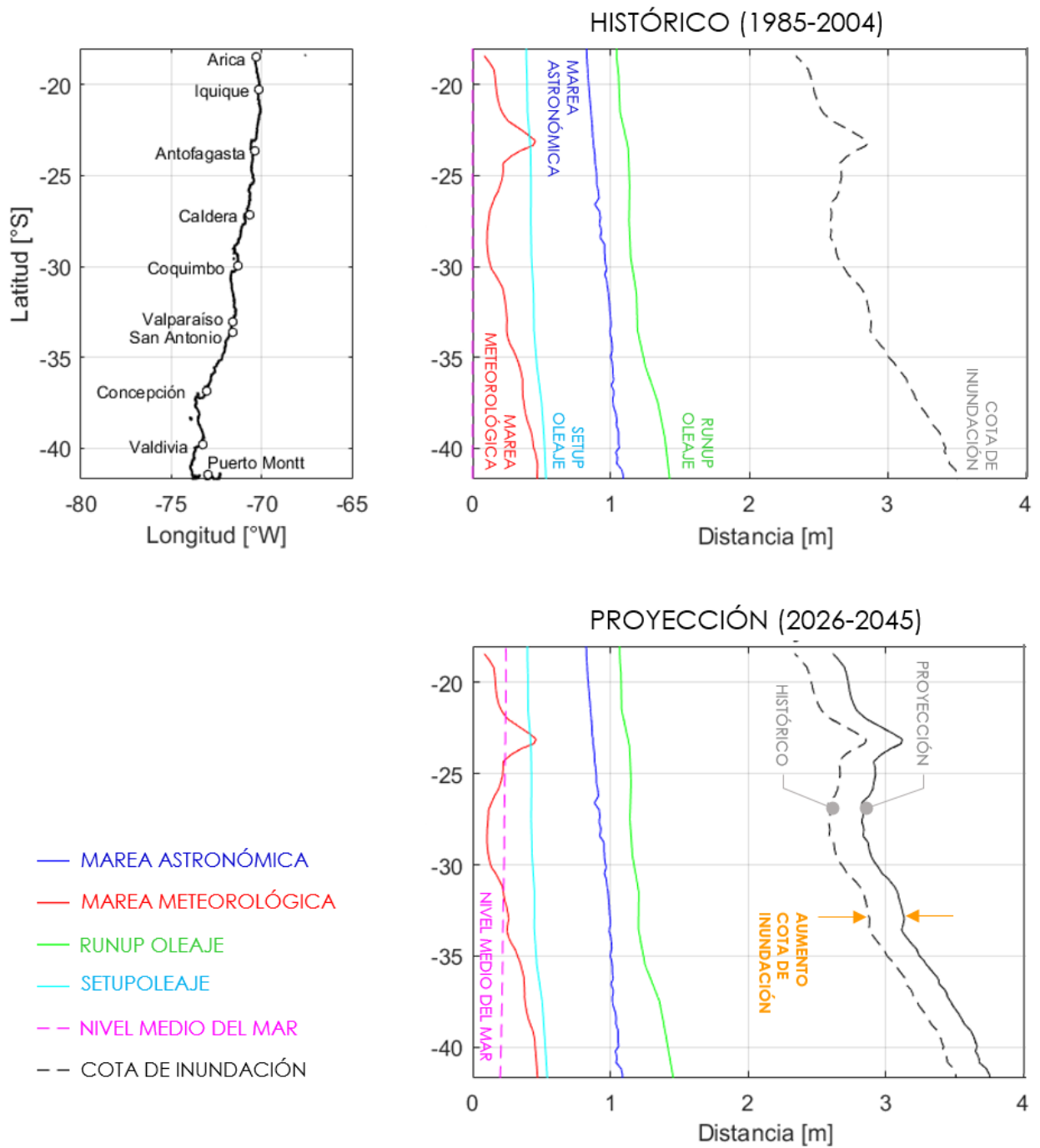


Tabla 4: Inventario de elementos vulnerables. Cabe notar que esta tabla no incluye los elementos que se encuentran en el agua y algunos elementos naturales que distorsionan el resultado.

Tipo	Entidad	Elementos
Biodiversidad	Áreas Protegidas	79
	Dunas	256
	Humedal costero	1693
	Listado de Especies	11
	Otras Categorías de Conservación	302
	Playa	1172
	Sitio Prioritario para la Conservación	128
Economía	Atractivo Turístico	199
	Caleta pescadores	545
	ECMPO	129
	Inmueble de Conservación Histórica	27
	Monumento Histórico	6
	Rutas Patrimoniales	121
	Zona de Conservación Histórica	2
	Zona de Interés Turístico (ZOIT)	1
	Zona Típica o Pintoresca	2
Equipamiento	Bomberos	10
	Educación	49
	Policia	5
	Salud	7
Infraestructura	Astilleros	13
	Cables Submarinos	20
	Club Marino	21
	Establecimiento de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC)	116
	Establecimiento Industrial Químico	2
	Estación del nivel del mar	43
	Faro	2
	Hidrocarburos	8
	Infraestructura Sanitaria (SISS)	53
	Instrumentos de Medición Costeros	27
	Marina	1
Obras de borde costero	362	

Tipo	Entidad	Elementos
	Obras de protección costera	113
	Puente	17
	Puerto	26
	Red Vial	4245
	Subestación	2
	Terminales Marítimos	171
	Termoeléctricas	1
Población	Área Urbana Consolidada	28
	Límite Urbano	112
	Manzana Censal	589
	Poblado	65
Otros	Hito	20
Total elementos vulnerables		10880

4.3 RESULTADOS A NIVEL REGIONAL

A partir del inventario de elementos vulnerables, se evaluaron los diferentes subsistemas que caracterizan los sistemas humanos y naturales, entre los que se destacan:

- Número de manzanas censales
- Población (número de personas)
- Número de viviendas
- Número de puentes
- Puntos de la red vial
- Hidrocarburos
- Infraestructura Sanitaria
- Establecimientos de Bomberos
- Establecimientos de Salud
- Establecimientos de Educación
- Establecimientos de Policía
- Elementos de Turismo

Algunos resultados relevantes se presentan a continuación:

- Del total de población y vivienda en el área vulnerable, se encuentran

- 589 manzanas censales vulnerables (Figura 14)
- 46357 personas (Figura 15)
- 18338 viviendas (Figura 16)
- Del total de elementos de infraestructura, se encuentran
 - 17 puentes (Figura 17)
 - 4245 puntos de la red vial que totalizan 493 [km] (Figura 18)
 - 8 centros de distribución de energía por hidrocarburos (Figura 19)
 - 1 central termoeléctrica y 2 subestaciones
 - 53 elementos de infraestructura sanitaria (Figura 20)
- Con respecto al equipamiento comunal, se encuentran
 - 10 establecimientos de bomberos (Figura 21)
 - 7 establecimientos de salud (Figura 22)
 - 49 establecimientos de educación (Figura 23)
 - 5 establecimientos de policía (Figura 24)
- Por último, se localizaron 358 elementos asociados al turismo (Figura 25), concentrados en la zona centro-norte (Antofagasta – Valparaíso), Maule y Sur (Biobío – Los Ríos).

Figura 14: Número de manzanas censales por región.

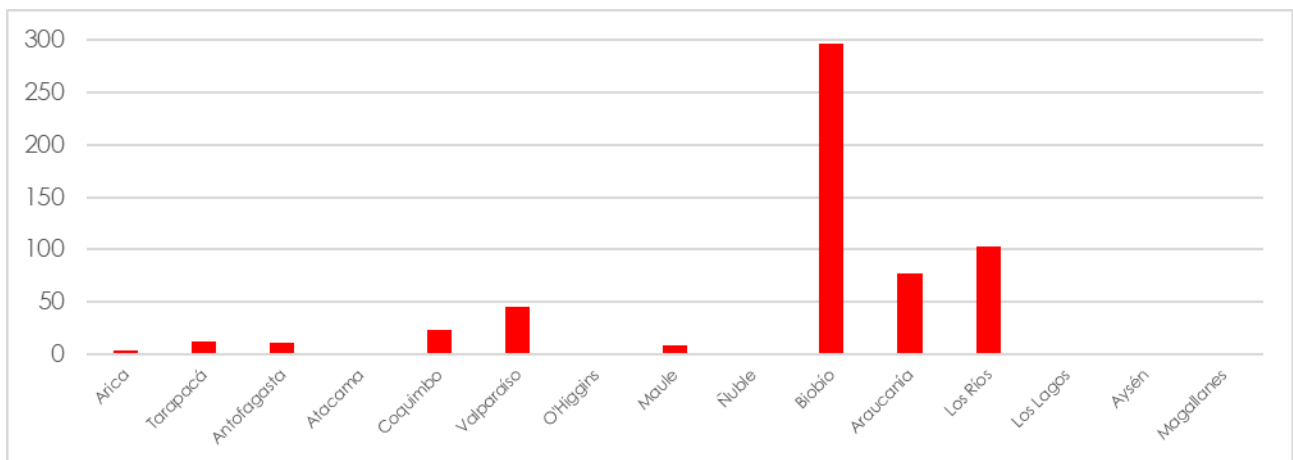


Figura 15: Población (número de personas) por región.

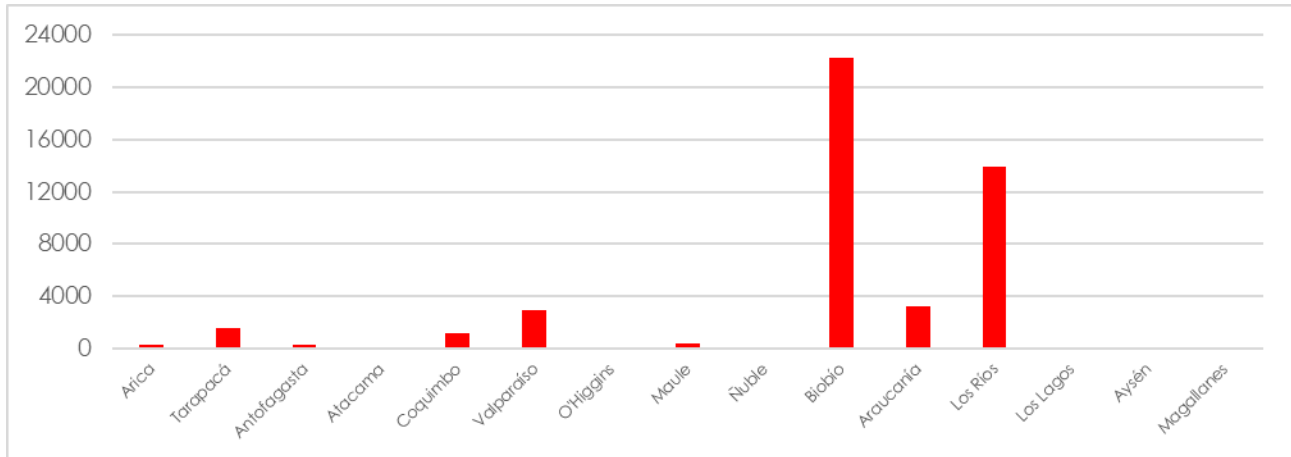


Figura 16: Número de viviendas por región.

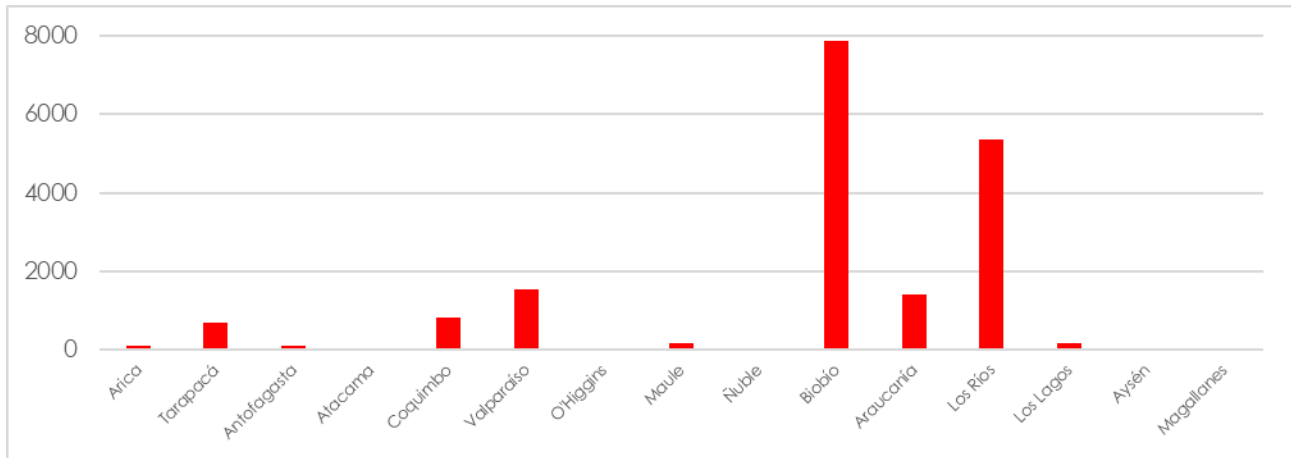


Figura 17: Número de Puentes por región.

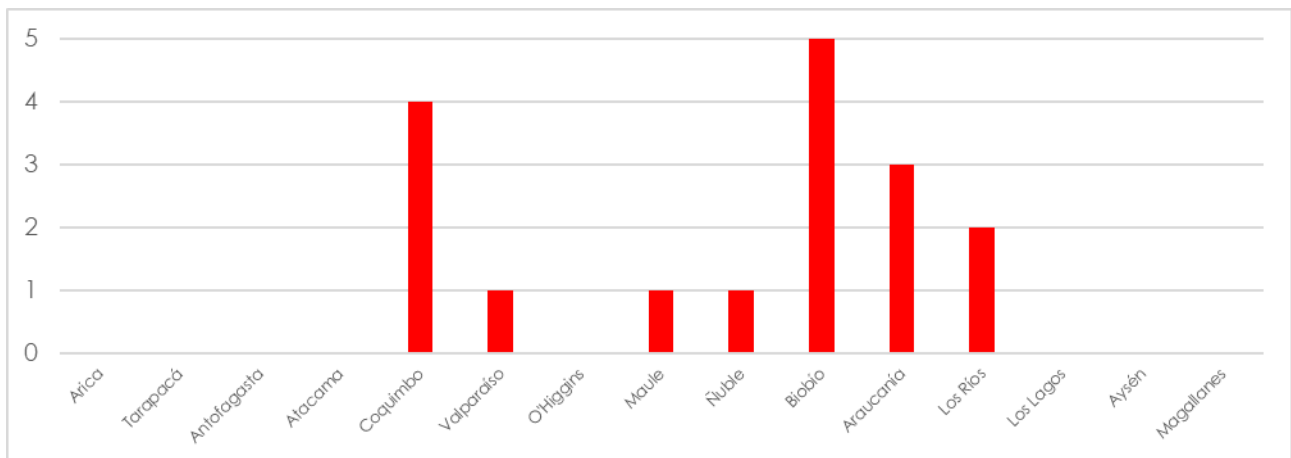


Figura 18: Puntos de la red vial por región.

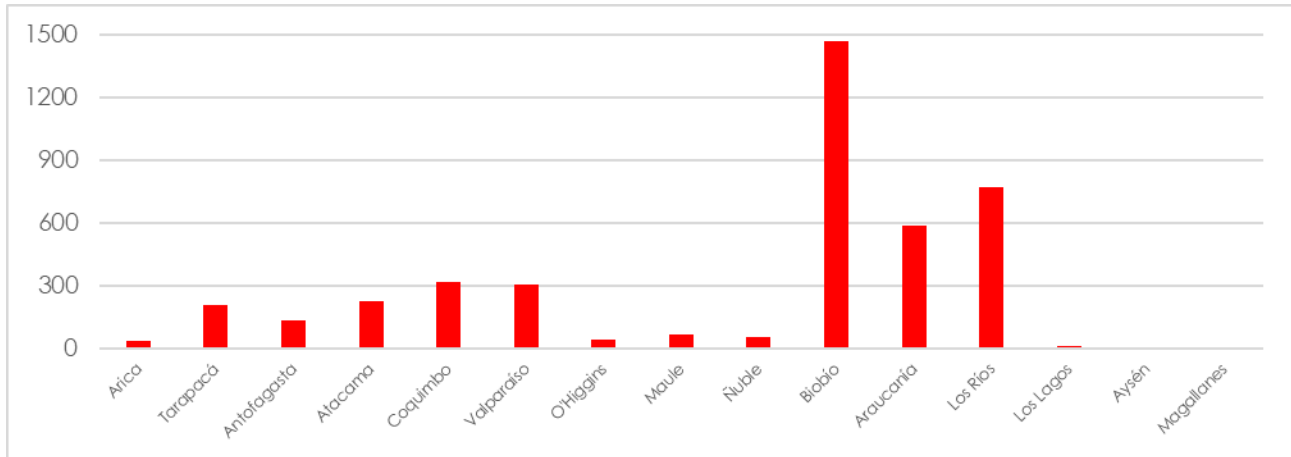


Figura 19: Hidrocarburos por región.

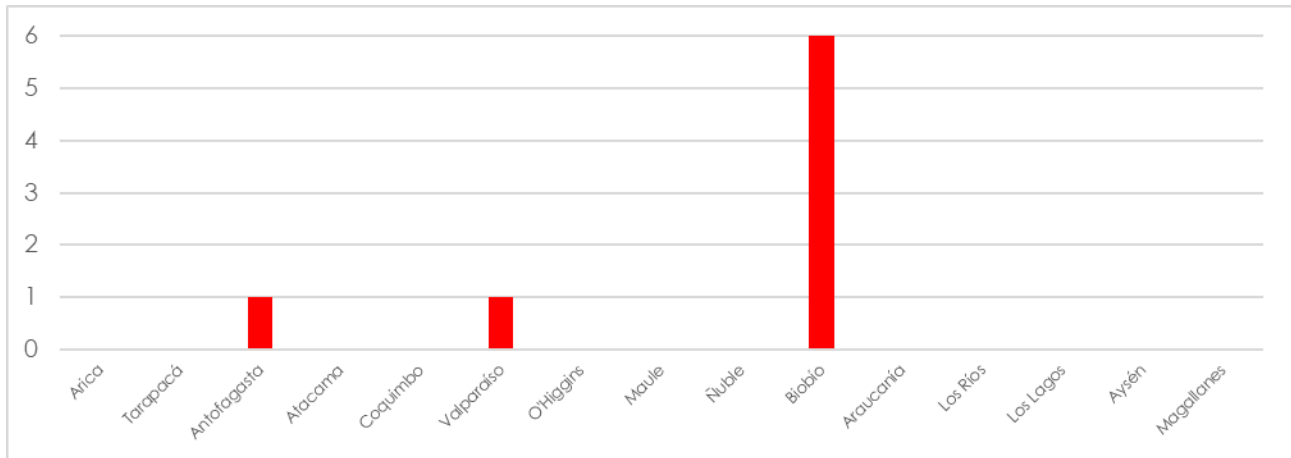


Figura 20: Infraestructura Sanitaria por región.

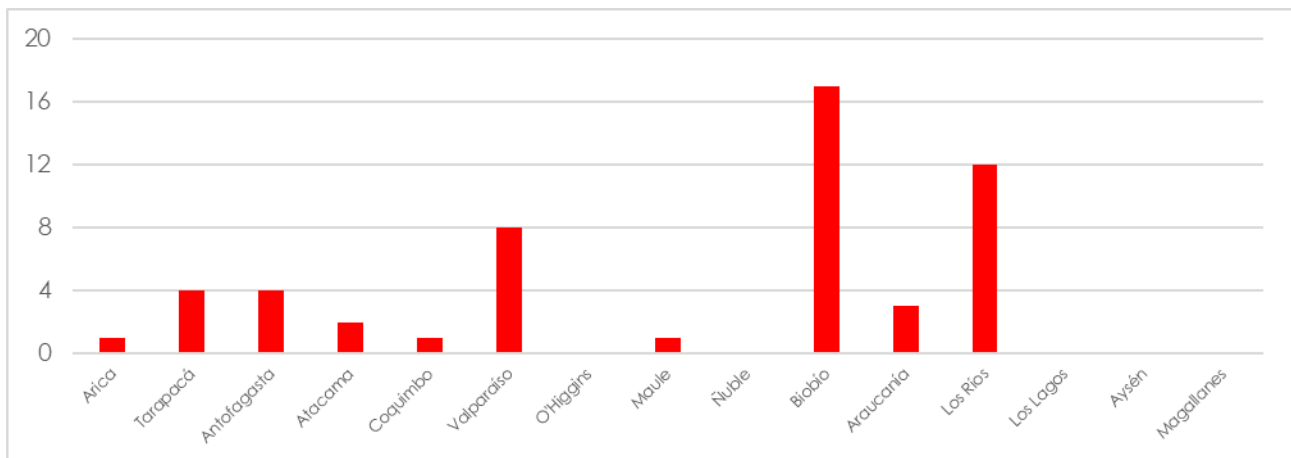


Figura 21: Establecimientos de Bomberos por región.

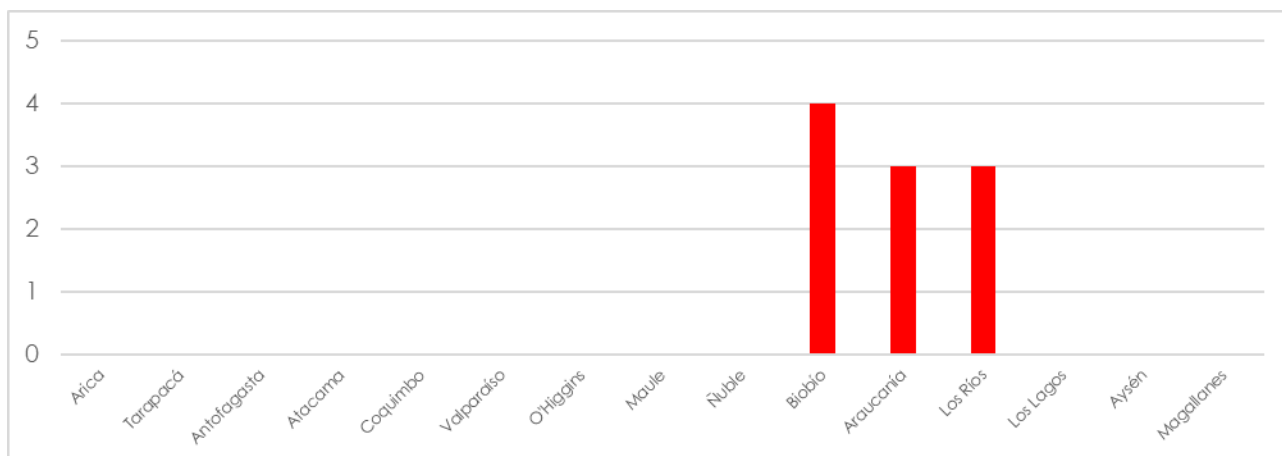


Figura 22: Establecimientos de Salud por región.

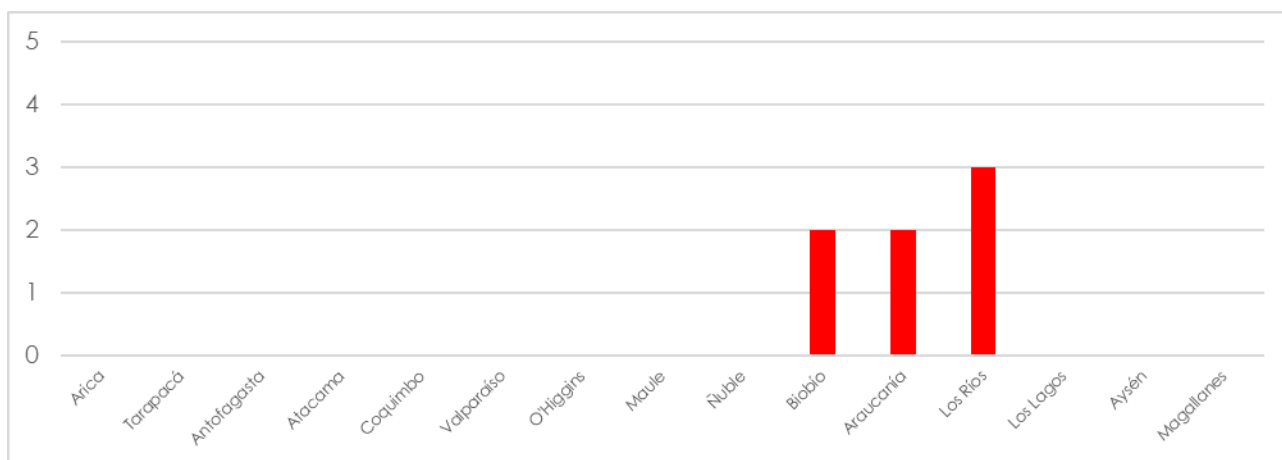


Figura 23: Establecimientos de Educación por región.

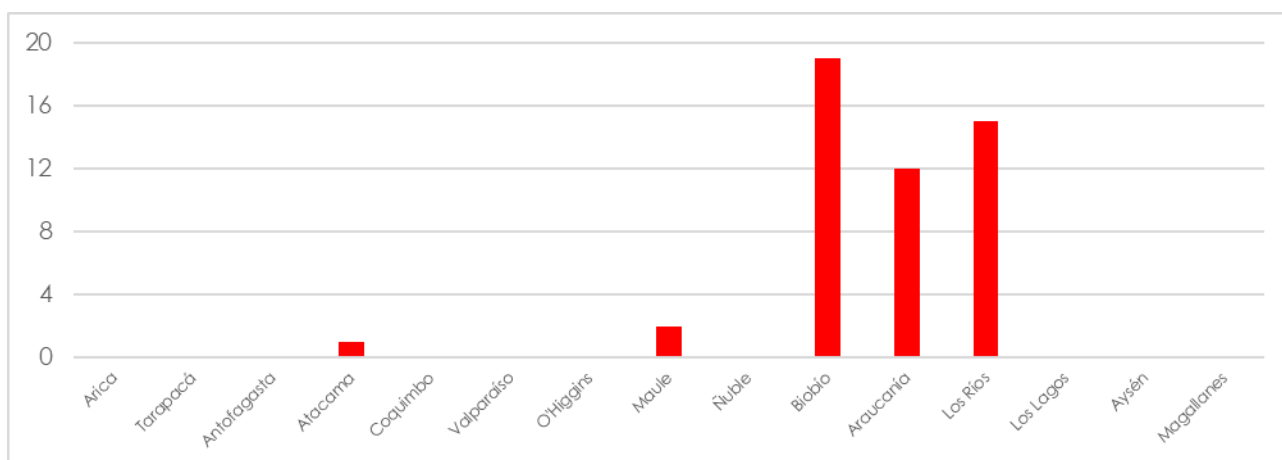


Figura 24: Establecimientos de Policía por región.

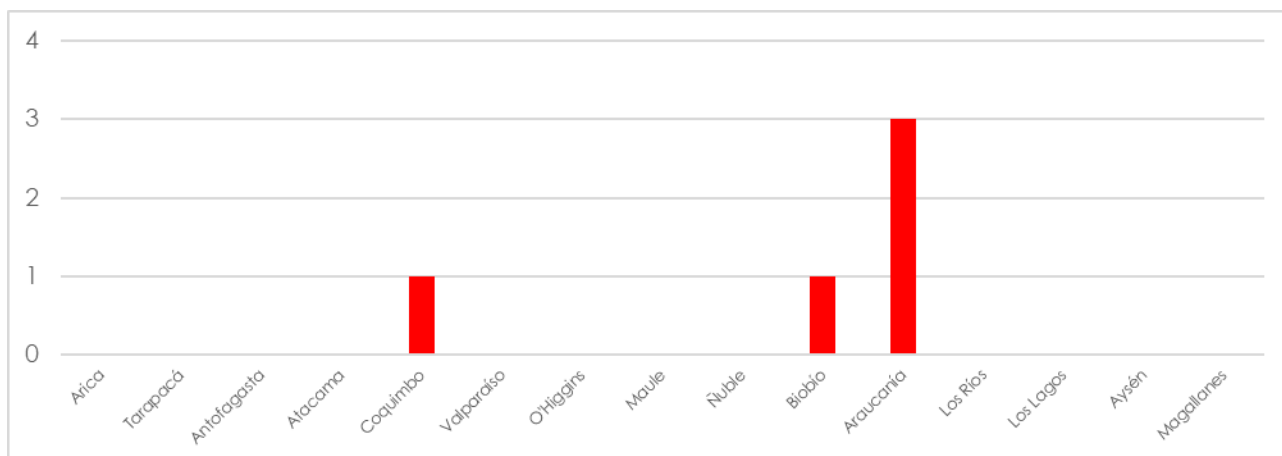
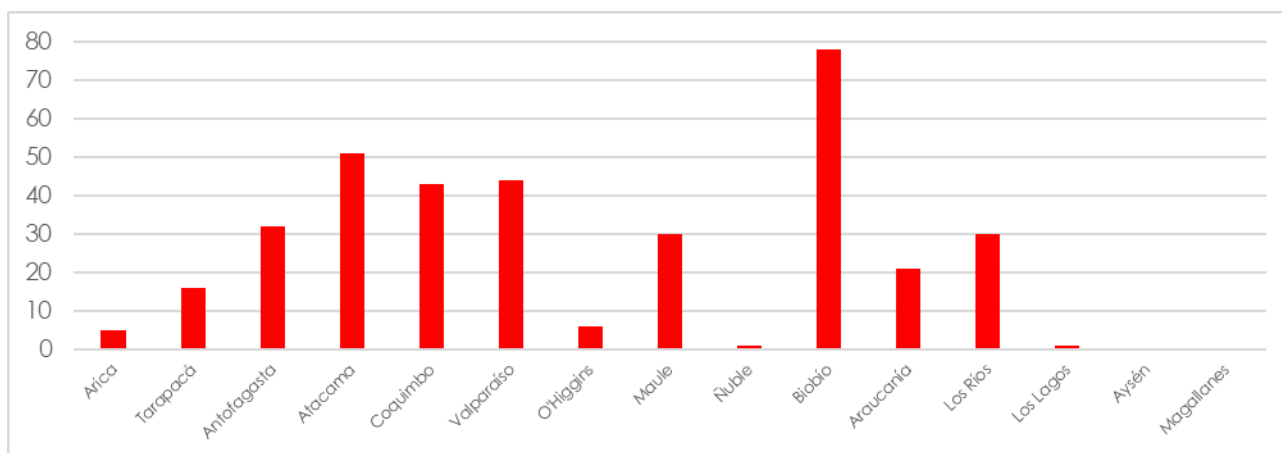


Figura 25: Elementos de Turismo Vulnerables por región.



4.4 RESULTADOS A NIVEL COMUNAL

El número de elementos vulnerables en la proyección (que no son vulnerables en el período histórico) se presentan en la Tabla 5. La información de elementos vulnerables está disponible en el Sistema de información Geográfico (SIG).

Tabla 5: Número de elementos vulnerables en la proyección que no son vulnerables en el período histórico.

Orden	Comuna	Elementos
1	Valdivia	862
2	San Pedro de la Paz	683
3	Coronel	428
4	Talcahuano	422
5	Iquique	360
6	Toltén	352
7	Arauco	322
8	Coquimbo	318
9	Constitución	279
10	Saavedra	250
11	Caldera	243
12	Ancud	238
13	Quellón	227
14	Tomé	224
15	Mariquina	222
16	Los Vilos	221
17	Teodoro Schmidt	216
18	San Antonio	190
19	Lota	184
20	Antofagasta	183
21	Aysén	178
22	Hualpén	173
23	Puerto Montt	120
24	Calbuco	119
25	Pichilemu	116
26	Chaitén	110
27	Mejillones	110
28	Arica	105
29	Quintero	102
30	Castro	99
31	Huasco	98
32	Pelluhue	96
33	Mauñín	92
34	Valparaíso	92
35	Canela	91
36	Cobquecura	90
37	Tirúa	89
38	Ovalle	87
39	Corral	85
40	Chañaral	80
41	Lebu	79
42	Algarrobo	75
43	Queilén	74
44	San Juan de la Costa	74

Orden	Comuna	Elementos
45	Carahue	67
46	Los Muermos	67
47	Navidad	66
48	La Higuera	64
49	Quemchi	64
50	Hualaihué	61
51	Tocopilla	58
52	Taltal	57
53	Santo Domingo	55
54	Tortel	55
55	La Ligua	54
56	Zapallar	51
57	Cartagena	48
58	Coelemu	48
59	Concón	48
60	La Unión	48
61	Freirina	47
62	Vichuquén	47
63	Penca	45
64	Puchuncaví	45
65	Punta Arenas	45
66	Chonchi	43
67	Purranque	43
68	Isla de Pascua	40
69	Paredones	39
70	Papudo	38
71	Casablanca	37
72	El Tabo	36
73	Natales	34
74	Fresia	33
75	Cisnes	31
76	Chanco	30
77	Puqueldón	29
78	Cabo de Hornos	27
79	Dalcahue	27
80	El quisco	27
81	Viña del Mar	26
82	La Serena	25
83	Cañete	24
84	Licantén	24
85	Cochamó	23
86	San Gregorio	22
87	Calbuco	21
88	Huara	21

5 CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO

La diferencia en la línea de inundación entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) calculada en este informe no es tan significativa pues se asocia a aumentos en la cota de inundación del 20 a 30 [cm] a nivel nacional, que están asociados a alturas cuya probabilidad de excedencia es de 99%. Estas diferencias en cota de inundación, no obstante, pueden ser significativamente superiores pues para marejadas extremas, las diferencias entre el período histórico y la proyección son mucho mayores (Volumen 1). A partir de esta conclusión y desde el punto de vista de la gestión de la infraestructura costera, se recomienda evaluar la cota de inundación para eventos extremos, cuyo período de retorno esté asociado al utilizado en el diseño de este tipo de obras.

5.2 ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS

Una sentida falencia en los estudios de vulnerabilidad costera en nuestro país es la falta de aplicación de índices como el de Vulnerabilidad Costera (CVI). Este índice se aplicó en varios países a fines del siglo XX y hoy en día existen diversas variaciones del índice (Ishtiaque et al., 2019; Mullick et al., 2019). Para subsanar esta falencia, se propone para futuros estudios llenar los listados de verificación propuestos por Gornitz (1991) o la Rueda del Peligro Costero (Rosendahl-Appelquist et al., 2016) a una resolución de 1 [km] para el litoral de Chile entre Arica y Puerto Montt. Estos listados de verificación permitirán confeccionar mapas para el litoral con una escala de colores señalando la vulnerabilidad costera.

5.2.1 Índice vulnerabilidad costera

La vulnerabilidad costera a los procesos marinos producto, entre otros, al aumento del nivel del mar debido al cambio climático, es latente en todo el mundo debido al gran daño económico potencial, la pérdida del patrimonio cultural e histórico, de hábitats naturales y su biodiversidad asociada (McLaughlin y Cooper, 2010). En la evaluación de la vulnerabilidad costera intervienen numerosos factores, tanto naturales como humanos. Diferentes autores han desarrollado metodologías para clasificar y mapear áreas de acuerdo con criterios de peligro (De Pippo et al., 2008; Rangel-Buitrago et al., 2015). Se puede encontrar una extensa revisión de la literatura sobre los procedimientos de clasificación para evaluar el peligro costero en Cooper y McLaughlin (1998), Rangel-Buitrago et al. (2015) y Nguyen et al. (2016).

Los diferentes enfoques de riesgo se centran principalmente en:

- La distribución de las condiciones de erosión,
- La ocupación humana dentro de áreas vulnerables (Muler y Bonetti, 2014),
- El grado de pérdida (Cutter, 1996) y

- Las malas prácticas de adaptación (Cooper y Pilkey, 2012).

Es así como la evaluación de la vulnerabilidad y riesgos en la zona costera ha sido abordada a través de aproximaciones cuantitativas como el coastal vulnerability index (CVI), incluida en la Tabla 6 (Gornitz, 1991). El CVI consiste en la combinación de siete variables que reflejan el grado de riesgo frente a los principales procesos que amenazan la zona costera, a saber, inundación, erosión e intrusión de agua de mar en estuarios y acuíferos. Este índice ha cobrado un amplio uso en diferentes partes del mundo y ha sido el punto de partida para adaptaciones (Mujabar y Chandrasekar, 2013).

Tabla 6: Índice de Vulnerabilidad Costera (Gornitz, 1991)

Variables	Rango				
	Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto Riesgo
	1	2	3	4	5
Acantilados (m)	≥ 30.1	20.1 – 30.0	10.1 – 20.0	5.1 – 10.0	0 – 5.0
Tipo de roca (relativo a la resistencia a la erosión)	Plutónica Volcánica Metamórfica (alto – medio grado)	Metamórfica (bajo grado), Areniscas y Conglomerados (bien cementadas)	La mayoría sedimentaria	Coercitivas y o pobremente clasificadas, sedimentos mal consolidados	Sedimentos no consolidados finos Ceniza volcánica
Forma de Relieve	Plataformas rocosas, Acantilados Costeros Fiordos	Acantilado medio Costas dentadas	Acantilados bajos Deriva glacial Marismas saladas Arrecifes de coral Manglar	Playas (guijarros) Estuarios Lagunas Llanuras aluviales	Playas de barrera Playas (arena) Llanuras de marea Deltas
Movimiento vertical (cambio nivel medio del mar) (mm/año)	≤ -1.1 Alzamiento de la costa	-1.0 – 0.99	1.0 – 2.0 dentro del rango de levantamiento eustático	2.1 – 4.0	≥ 4.1
Desplazamiento del litoral (m / año)	≥ 2.1 Acreción	1.0 – 2.0	- 1.0 - +1.0 Estabilidad	- 1.1 – -2.0	≤ - 2.0 Erosión
Rango de marea m (media)	≤ 0.99 Micromareal	1.0 – 1.9	2.0 – 4.0 Mesomareal	4.1 – 6.0	≥ 6.1 Macromareal
Altura de la ola, m (máximo)	0 – 2.9	3.0 – 4.9	5.0 – 5.9	6.0 – 6.9	≥ 7.0

Otro ejemplo de metodología para estimación de vulnerabilidad costera fue desarrollado por Li y Li (2011), para marejadas asociadas a tormentas, la cual consiste en la elaboración de cinco indicadores de vulnerabilidad: índice social-económico, índice de uso de tierra, índice eco-ambiental, índice de construcción costera e índice de capacidad de tolerancia a desastres. Estos cinco índices son combinados para determinar la vulnerabilidad de la zona costera respecto al paso de tormentas, generando una zonificación mediante el uso de ArcGIS.

En una revisión de las propuestas para la evaluación de la vulnerabilidad costera, Mukhopadhyay et al. (2012) comparan metodologías como

- CM (Common Methodology)
- SURVAS (Synthesis and Upscaling of Sea Level Rise Vulnerability Assessment Studies)
- DIVA (Dynamic Interactive Vulnerability Assessment)
- CVI (Coastal Vulnerability Index)
- CCHZ (Coastal Change Hazard Zone)

Entre sus conclusiones, estos autores señalan que es imprescindible que cualquier método incluya también el componente humano, en una visión más holística. Paralelamente, Balica et al. (2012) desarrollaron el Coastal City Flood Vulnerability Index (CCFVI), basado en exposición, susceptibilidad y resiliencia frente a las inundaciones costeras, como una forma de vincular la evaluación de la vulnerabilidad con la toma de decisiones.

5.2.2 Rueda de Peligro Costero

La Rueda de Peligro Costero o Coastal Hazard Wheel (CHW) es un sistema de clasificación costera respaldado por el PNUMA (Rosendahl, y Halsnaes, 2015), que incorpora seis variables biogeofísicas para clasificar los peligros costeros, incluida la erosión. Así, CHW es un sistema de información y de apoyo a la toma de decisiones en las zonas costeras con tres funciones principales:

- la realización de evaluaciones de riesgos múltiples,
- la identificación de las opciones de gestión en una zona costera concreta y
- la utilización de un lenguaje uniforme para comunicar la información en materia de costas.

La herramienta CHW se basa en un sistema universal de clasificación de las costas que puede utilizarse en zonas con una disponibilidad limitada de datos, como es el caso de Rapa Nui. El sistema incorpora los efectos del cambio climático en los perfiles de riesgo y, por ende, resulta especialmente útil de cara a la adaptación a este fenómeno.

En total, el CHW distingue entre 131 ambientes costeros genéricos que representan una combinación única de las seis variables biogeofísicas (Figura 26). Como las variables pueden

cambiar significativamente en distancias espaciales cortas, se debe aplicar con una resolución entre 200 a 300 [m] de litoral. Las 6 variables contempladas son:

- Diseño geológico: Se distinguen ocho clases que requieren estimaciones de la pendiente para secciones transversales de la costa entre el nivel medio del mar y 1000 [m] tierra adentro.
- Oleaje: Se distinguen 3 clases significativas de altura de ola significativa (H_s) para un período de retorno de 1 año.
- Mareas: Se incluyen tres clases de rango de mareas.
- Vegetación: hace una distinción en cinco clases de vegetación.
- Balance de sedimentos: Se distinguen las clases: deficiencia / equilibrio de sedimentos y excedente.
- Clima de tormenta: Se deben determinar la frecuencia de aparición de tormentas extremas.

Así, cada ambiente costero está asociado con un cierto nivel de peligro de erosión, que va desde bajo (1), moderado (2), alto (3), hasta una muy alta erosión (4). Los riesgos de erosión inherente de alto a muy alto están asociados con 58 de los 131 ambientes costeros reconocidos en el CHW.

6 REFERENCIAS

- Appelquist, L. R., Balstrøm, T., & Halsnæs, K. (2016). Managing climate change hazards in coastal areas: The Coastal Hazard Wheel decision-support system.
- Appelquist, L. R., & Halsnæs, K. (2015). The Coastal Hazard Wheel system for coastal multi-hazard assessment & management in a changing climate. *Journal of coastal conservation*, 19(2), 157-179.
- Balica, S. F., Wright, N. G., & van der Meulen, F. (2012). A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. *Natural hazards*, 64(1), 73-105.
- Camus, P., I. J., Losada, C., Izaguirre, A., Espejo, M., Menéndez, and J., Pérez (2017). Statistical wave climate projections for coastal impact assessments, *Earth's Future*, 5, 918–933, doi:10.1002/2017EF000609.
- Cooper, J. A. G., & McLaughlin, S. (1998). Contemporary multidisciplinary approaches to coastal classification and environmental risk analysis. *Journal of Coastal Research*, 512-524.
- Cutter, S. (1996). Vulnerability to environmental hazards. *Prog Human Geography* 20(4):529 –539
- De Pippo, T., Donadio, C., Pennetta, M., Petrosino, C., Terlizzi, F., & Valente, A. (2008). Coastal hazard assessment and mapping in Northern Campania, Italy. *Geomorphology*, 97(3-4), 451-466.
- Gornitz, V., White, T. W., & Cushman, R. M. (1991). Vulnerability of the US to future sea level rise (No. CONF-910780-1). Oak Ridge National Lab., TN (USA).
- IPCC (2012). IPCC special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX).
- IPCC (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs. IPCC. (2018). GLOBAL WARMING OF 1.5 °C an IPCC special report on the impacts of global.
- IPCC (2014a): Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs. (en árabe, chino, español, francés, inglés y ruso).
- Ishtiaque, A., Eakin, H., Chhetri, N., Myint, S. W., Dewan, A., & Kamruzzaman, M. (2019). Examination of coastal vulnerability framings at multiple levels of governance using spatial MCDA approach. *Ocean & coastal management*, 171, 66-79.
- Martínez, C., Cienfuegos, R., Inzunza, S., Urrutia, A., Guerrero, N. (2019). Tsunami Risk and Worst-case Scenario on Cartagena Bay, Central Chile: Challenges for Coastal Risk Management. *Ocean & Coastal Management, Special Issue: Vulnerability Assessments as a Tool for Coastal and Marine Hazard Management* (en revisión).
- McLaughlin, S., & Cooper, J. A. G. (2010). A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers?. *Environmental Hazards*, 9(3), 233-248.
- MINVU-U. De Chile. (1997). Catastro de campamentos y asentamientos irregulares. Instituto de la Vivienda, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Chile. Informe final. En: <http://www.libros.uchile.cl/495>
- Mujabar, P. S., & Chandrasekar, N. (2013). Shoreline change analysis along the coast between Kanyakumari and Tuticorin of India using remote sensing and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(3), 647-664.

Mukhopadhyay, A., Dasgupta, R., Hazra, S., & Mitra, D. (2012). Coastal hazards and vulnerability: a review. *International journal of geology, earth and environmental sciences*, 2(1), 57-69.

Muler, M., & Bonetti, J. (2014). An integrated approach to assess wave exposure in coastal areas for vulnerability analysis. *Marine Geodesy*, 37(2), 220-237.

Mullick, M. R. A., Tanim, A. H., & Islam, S. S. (2019). Coastal vulnerability analysis of Bangladesh coast using fuzzy logic based geospatial techniques. *Ocean & Coastal Management*, 174, 154-169.

Nguyen, T. T., Bonetti, J., Rogers, K., & Woodroffe, C. D. (2016). Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean & Coastal Management*, 123, 18-43.

Rangel-Buitrago, N. G., Anfuso, G., & Williams, A. T. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management*, 114, 129-144.

Svendsen, I. A. (2006). *Introduction to nearshore hydrodynamics (Vol. 24)*. Advanced Series on Ocean Engineering. World Scientific.

Tapia, R. (2000). Medición de la precariedad en asentamientos urbanos irregulares. Estudio comparativo entre Venezuela, Chile y Argentina. *Boletín del Instituto de la Vivienda*. 15(40): 39-58.

Ugalde, D. (2017). Efecto de la expansión urbana sobre el estado de morfoconservación de las dunas costeras de la bahía de Cartagena, región de Valparaíso. *Seminario de Grado, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile*.

7 ANEXOS

7.1 CARTOGRAFÍA COMUNAL DEL ÁREA VULNERABLE

CARTOGRAFÍA COMUNAL DEL ÁREA VULNERABLE PARA 44 COMUNAS

En este Anexo se presenta una comparación entre la cota de inundación histórica y proyectada para las siguientes comunas.

N°	Comuna	Cota de inundación [m]	
		Histórica	Proyectada
1	Arica	2,4	2,7
2	Camarones	2,4	2,7
3	Huara	2,5	2,7
4	Iquique	2,5	2,8
5	Tocopilla	2,7	3,0
6	Mejillones	2,9	3,1
7	Antofagasta	2,8	3,1
8	Taltal	2,7	2,9
9	Chañaral	2,6	2,9
10	Caldera	2,6	2,8
11	Copiapó	2,6	2,8
12	Huasco	2,6	2,8
13	Freirina	2,6	2,9
14	La Higuera	2,6	2,9
15	La Serena	2,7	2,9
16	Coquimbo	2,7	3,0
17	Ovalle	2,8	3,1
18	Canela	2,8	3,1
19	Los Vilos	2,8	3,1
20	La Ligua	2,9	3,1
21	Papudo	2,9	3,1
22	Zapallar	2,9	3,1
23	Puchuncaví	2,9	3,1
24	Quintero	2,9	3,1
25	Concón	2,9	3,1
26	Viña del Mar	2,9	3,1
27	Valparaíso	2,9	3,1
28	Casablanca	2,9	3,1
29	Algarrobo	2,9	3,1
30	El Quisco	2,9	3,1
31	El Tabo	2,9	3,1
32	Cartagena	2,9	3,1
33	San Antonio	2,9	3,1
34	Santo Domingo	2,9	3,1
35	Navidad	2,9	3,2

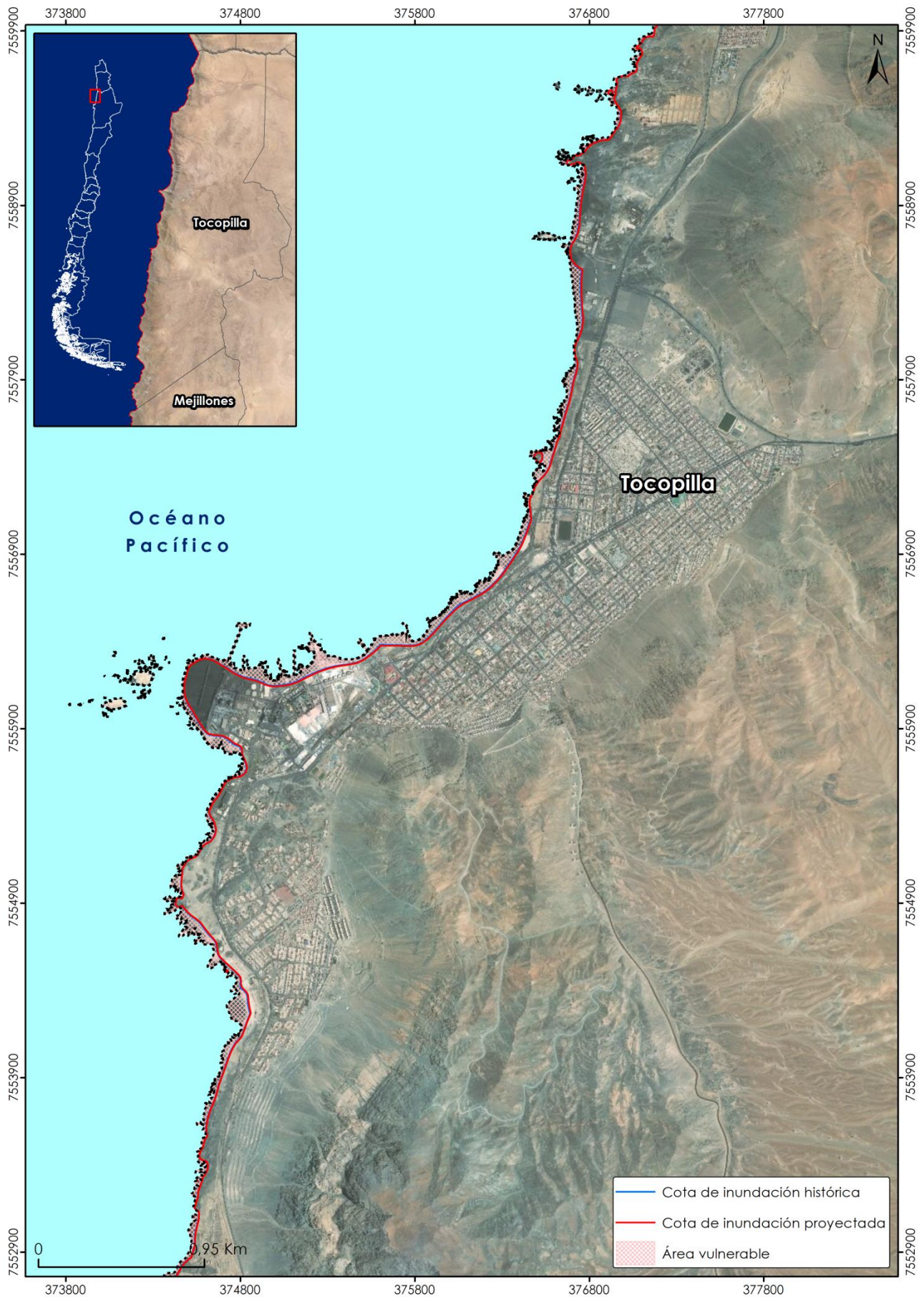
N°	Comuna	Cota de inundación [m]	
		Histórica	Proyectada
36	Litueche	2,9	3,2
37	Pichilemu	3,0	3,2
38	Paredones	3,0	3,2
39	Vichuquén	3,0	3,2
40	Licantén	3,0	3,2
41	Curepto	3,0	3,3
42	Constitución	3,1	3,3
43	Chanco	3,1	3,3
44	Pelluhue	3,1	3,4
45	Cobquecura	3,1	3,4
46	Treguaco	3,1	3,4
47	Coelemu	3,1	3,4
48	Tomé	3,2	3,4
49	Penco	3,2	3,4
50	Talcahuano	3,2	3,4
51	Hualpén	3,2	3,4
52	San Pedro de La Paz	3,2	3,4
53	Coronel	3,2	3,4
54	Lota	3,2	3,4
55	Arauco	3,2	3,5
56	Lebu	3,3	3,5
57	Álamos	3,3	3,5
58	Cañete	3,3	3,5
59	Tirúa	3,3	3,5
60	Carahue	3,3	3,6
61	Saavedra	3,4	3,6
62	Teodoro Schmidt	3,4	3,6
63	Toltén	3,4	3,6
64	Mariquina	3,4	3,7
65	Valdivia	3,4	3,7
66	Corral	3,4	3,7
67	La Unión	3,4	3,7
68	San Juan de la Costa	3,4	3,7
69	Río Negro	3,5	3,7
70	Purranque	3,5	3,7
71	Fresia	3,5	3,7

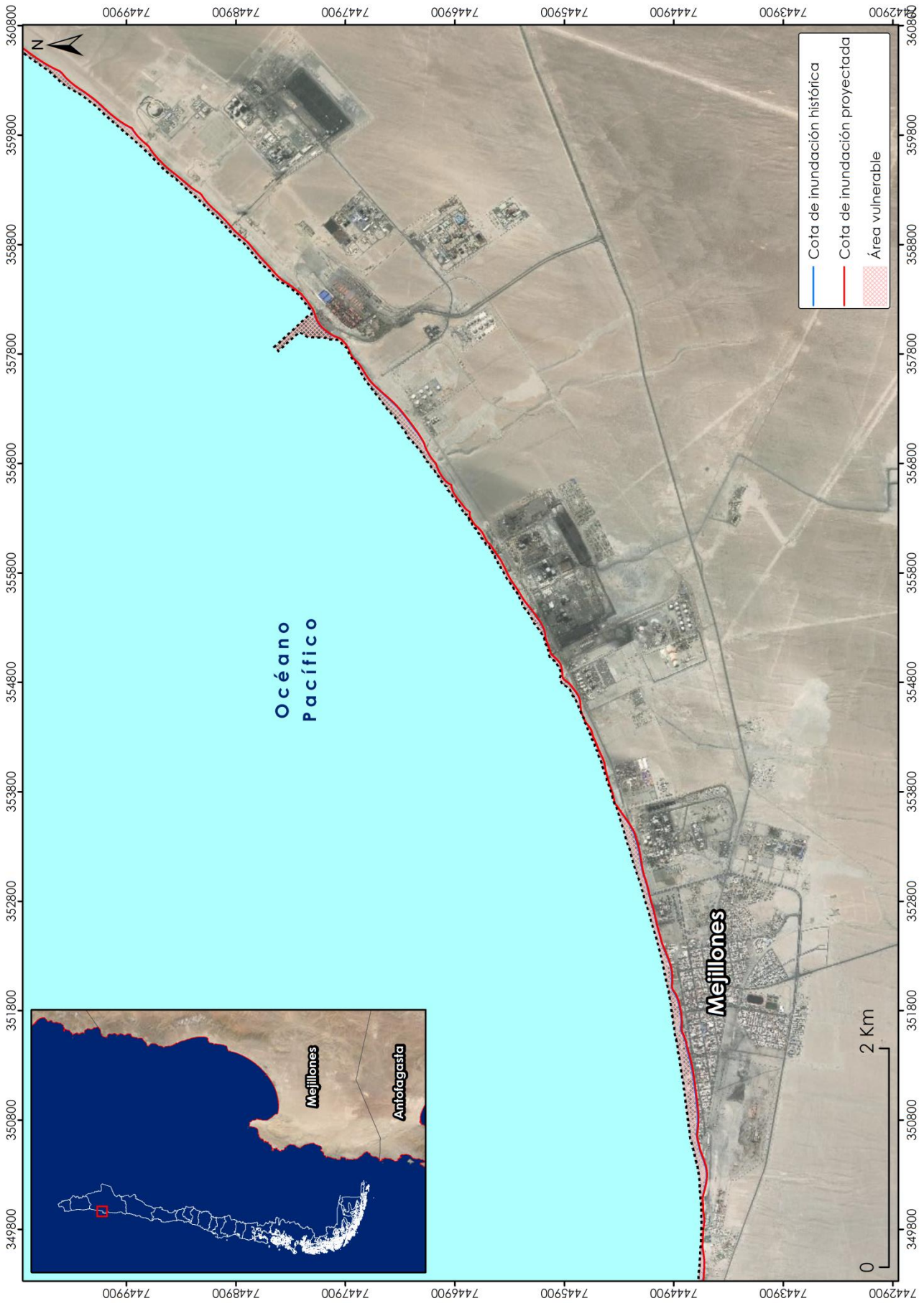


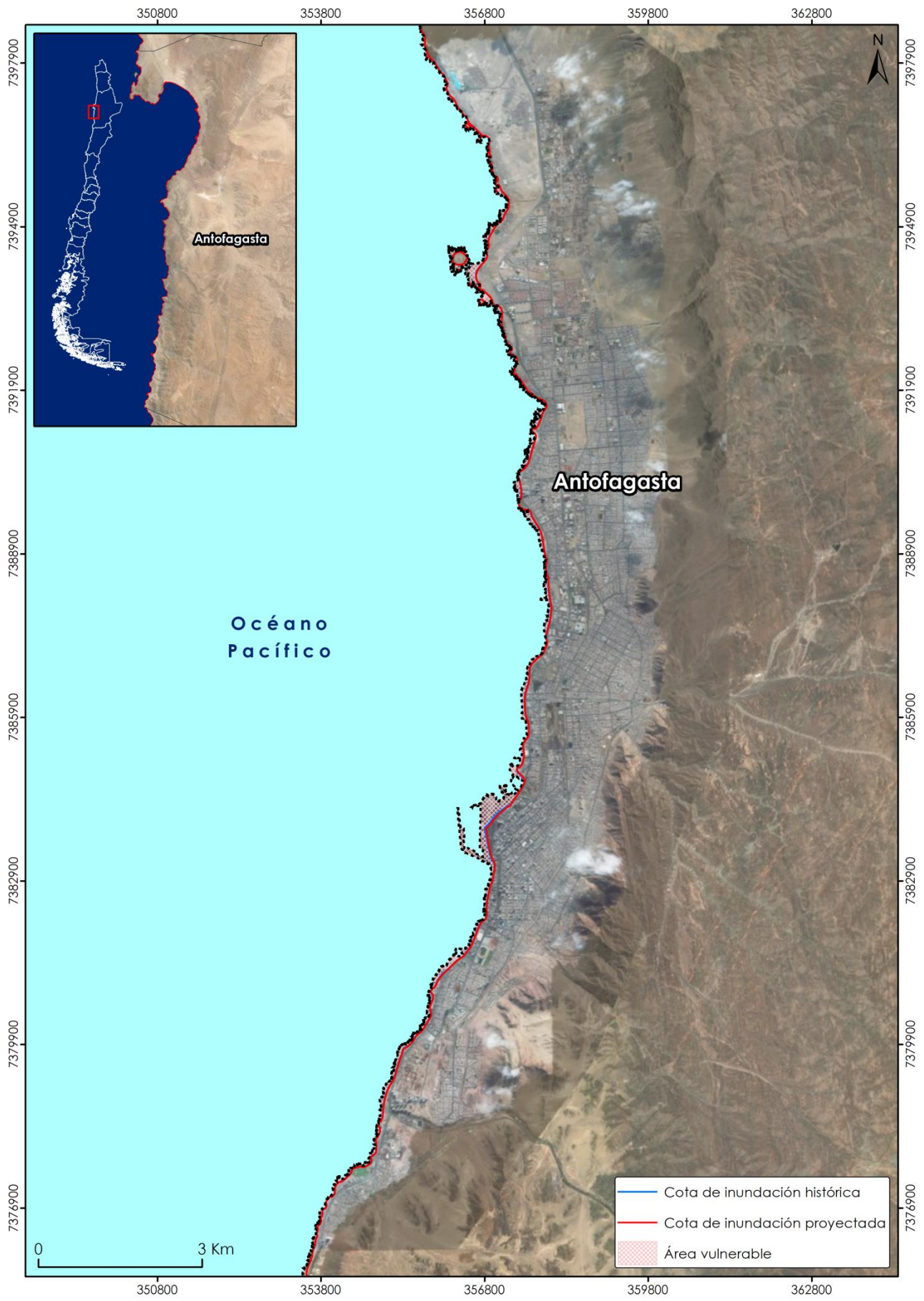




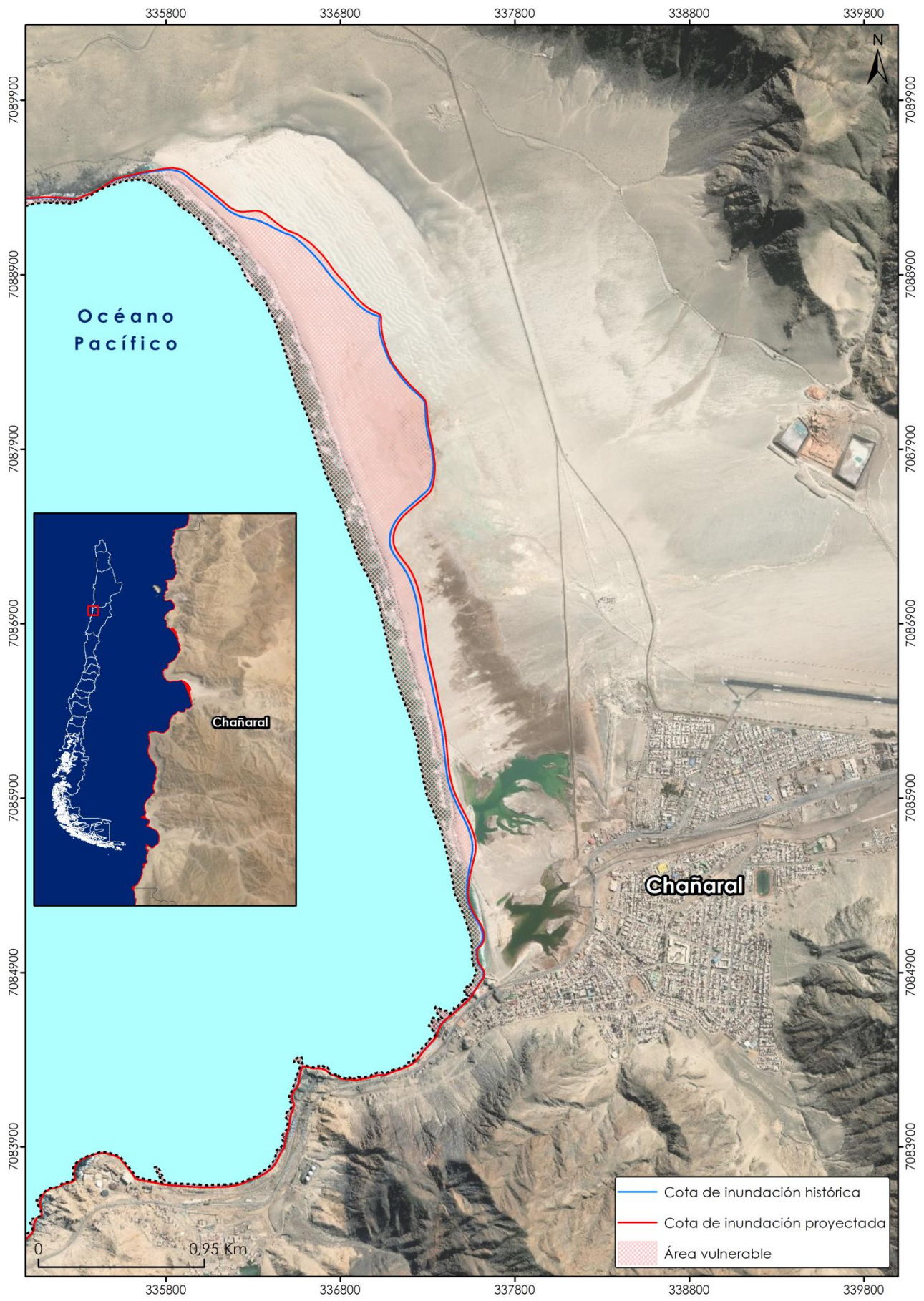




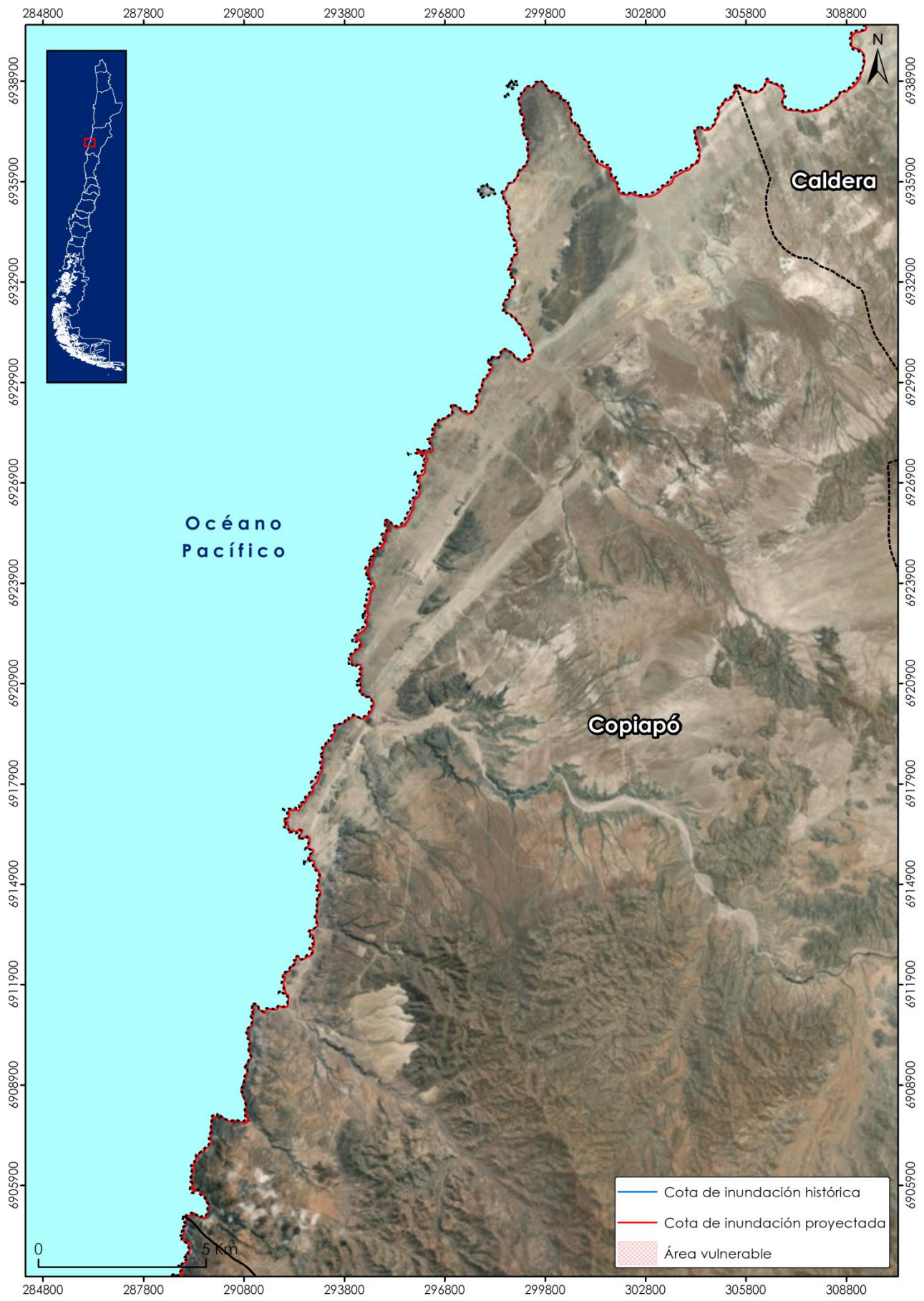


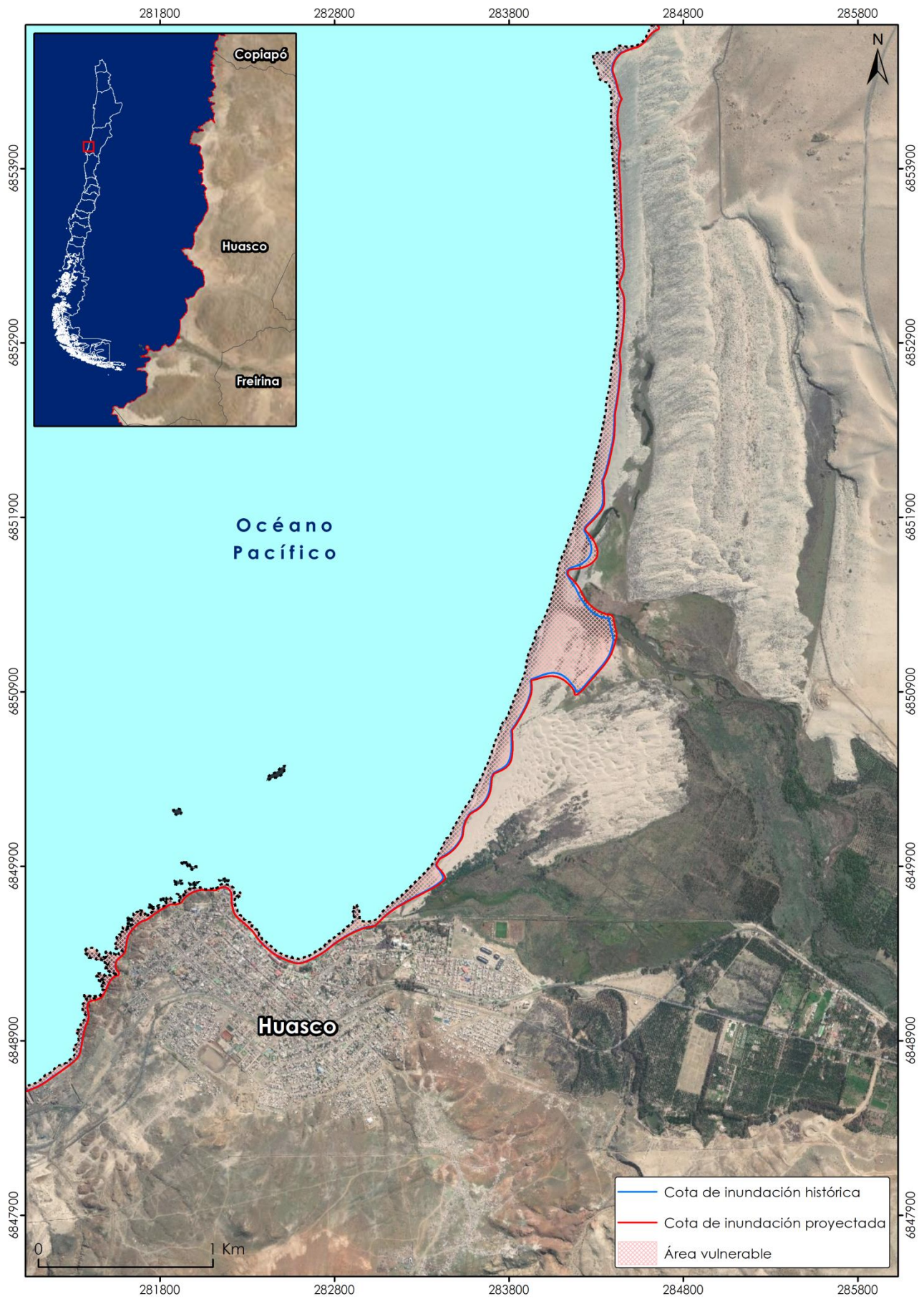




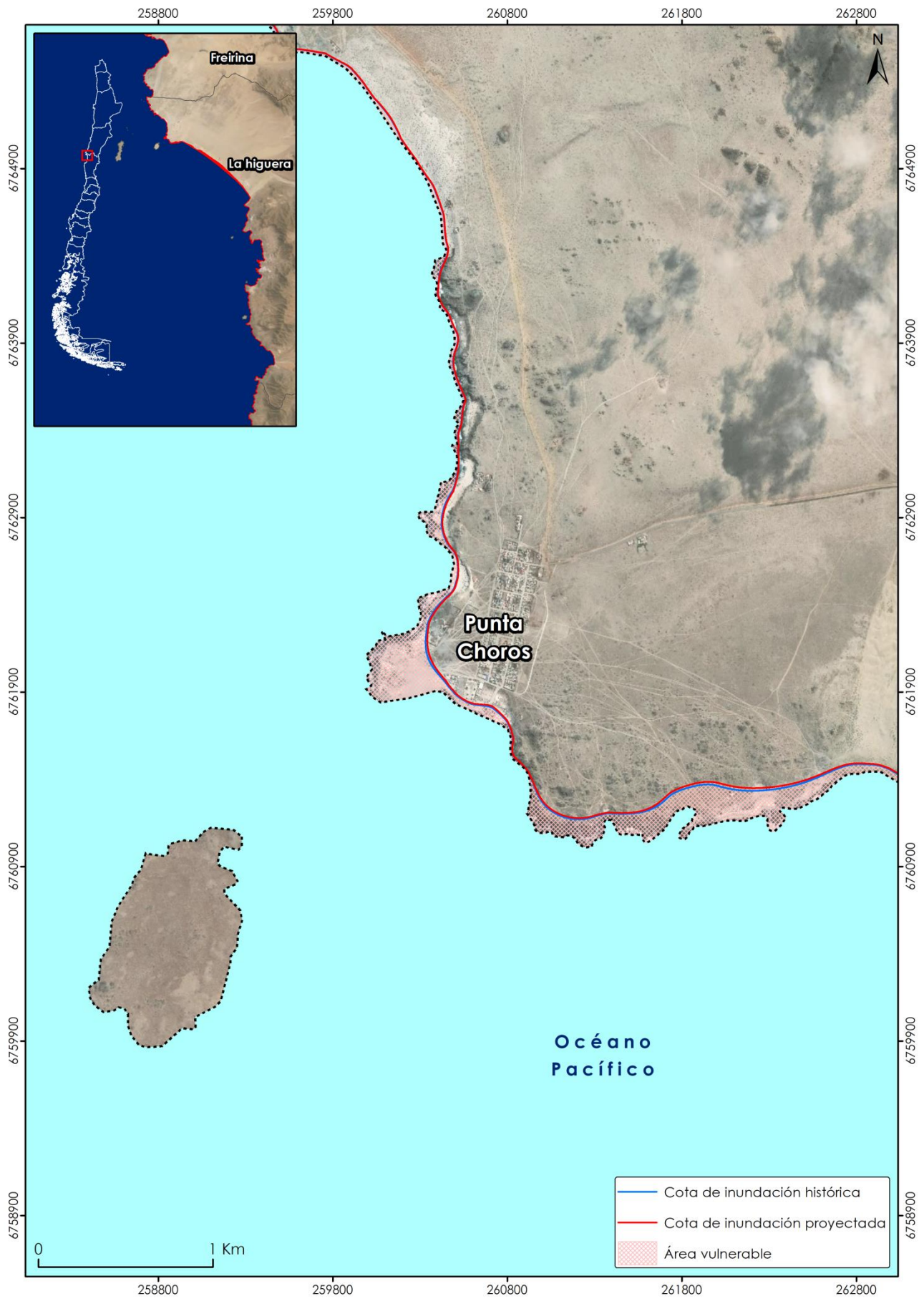


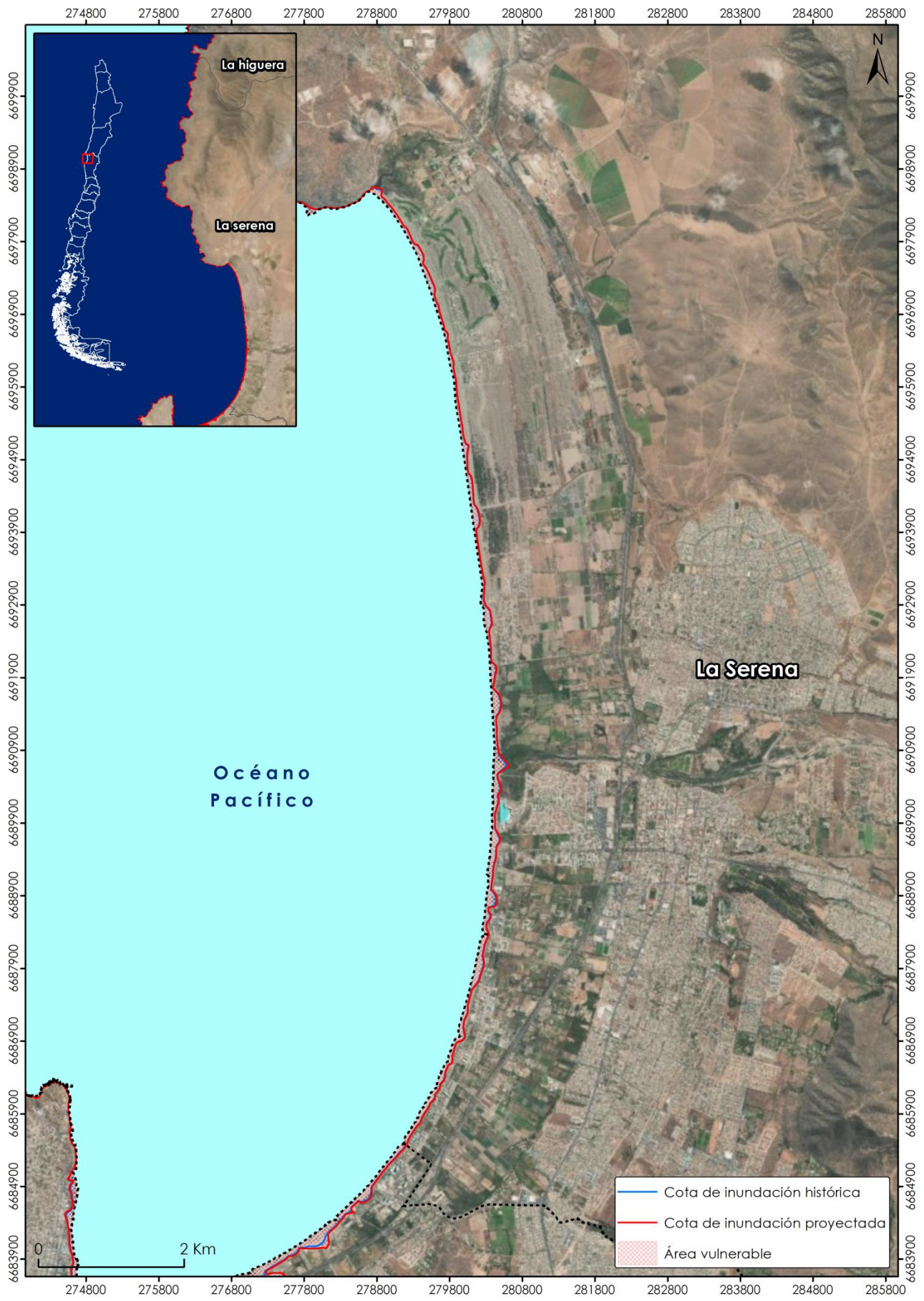


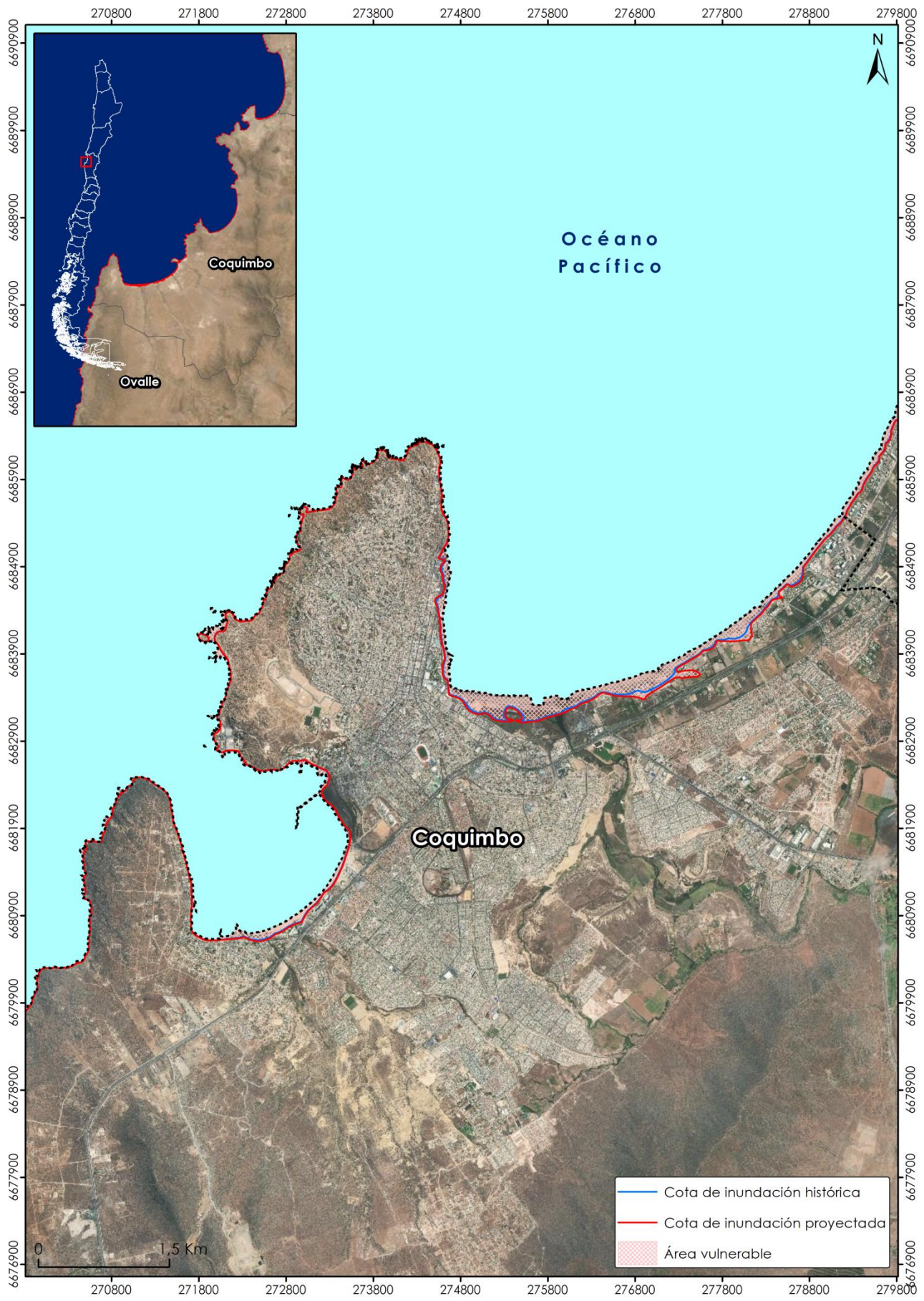


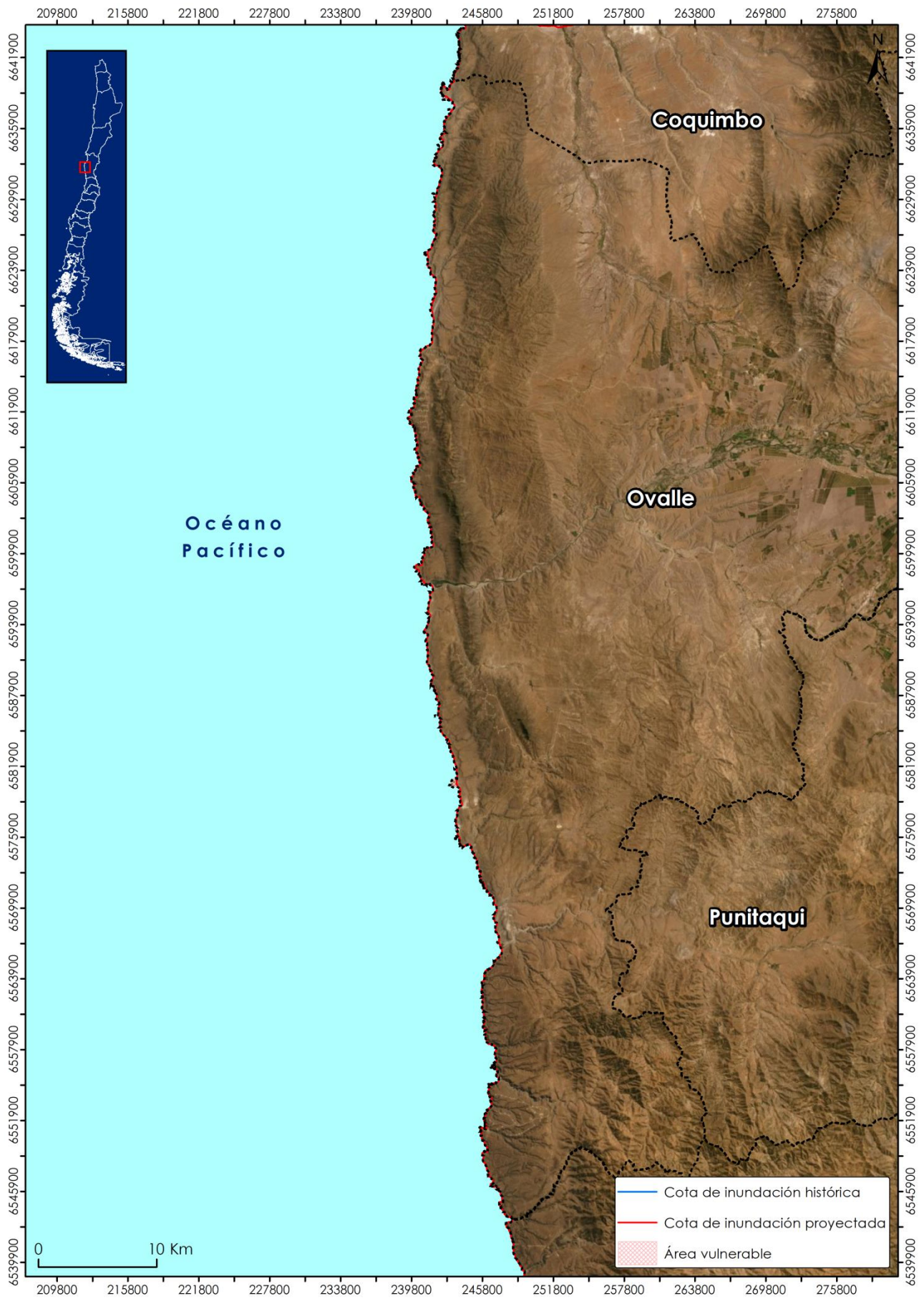


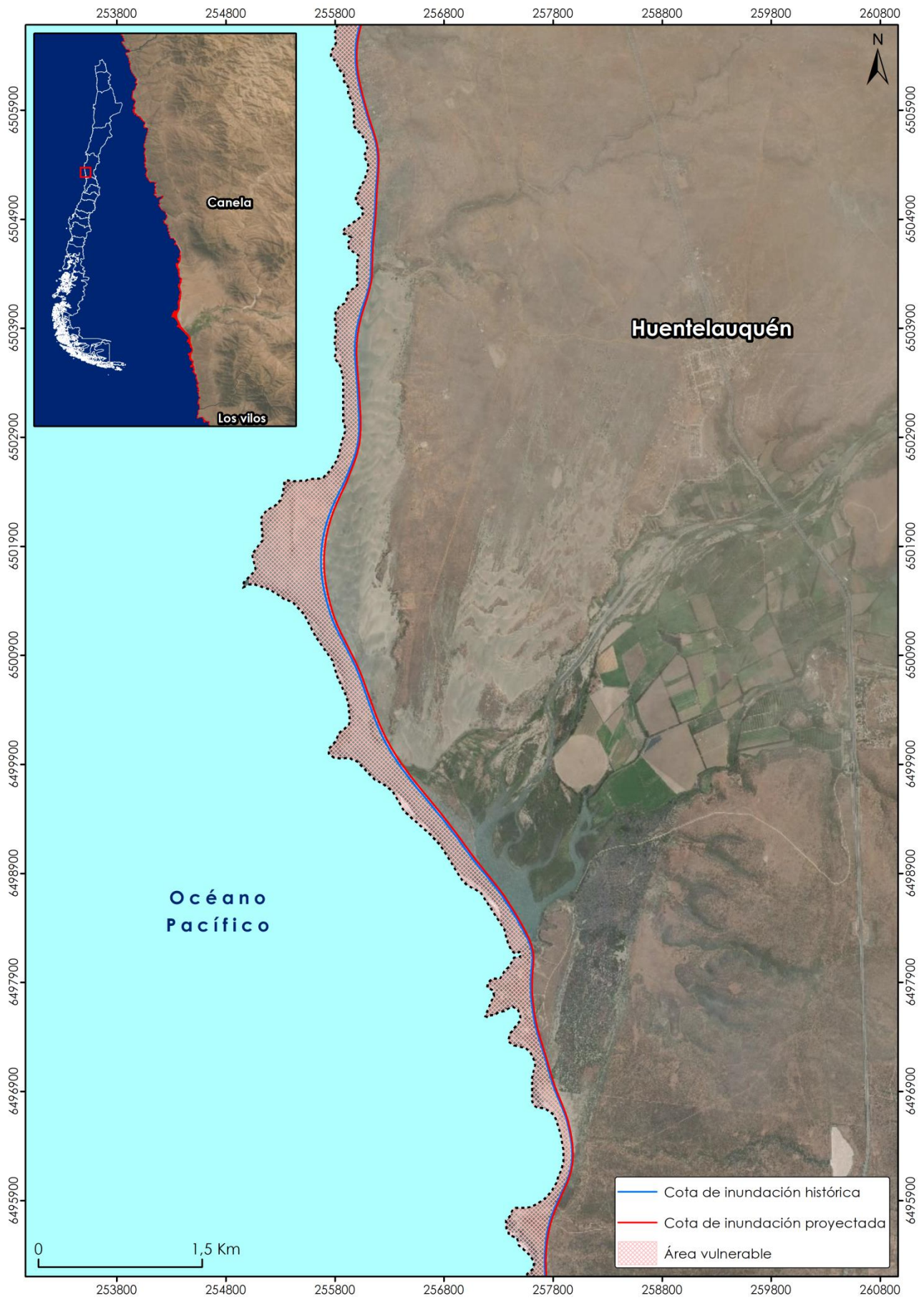


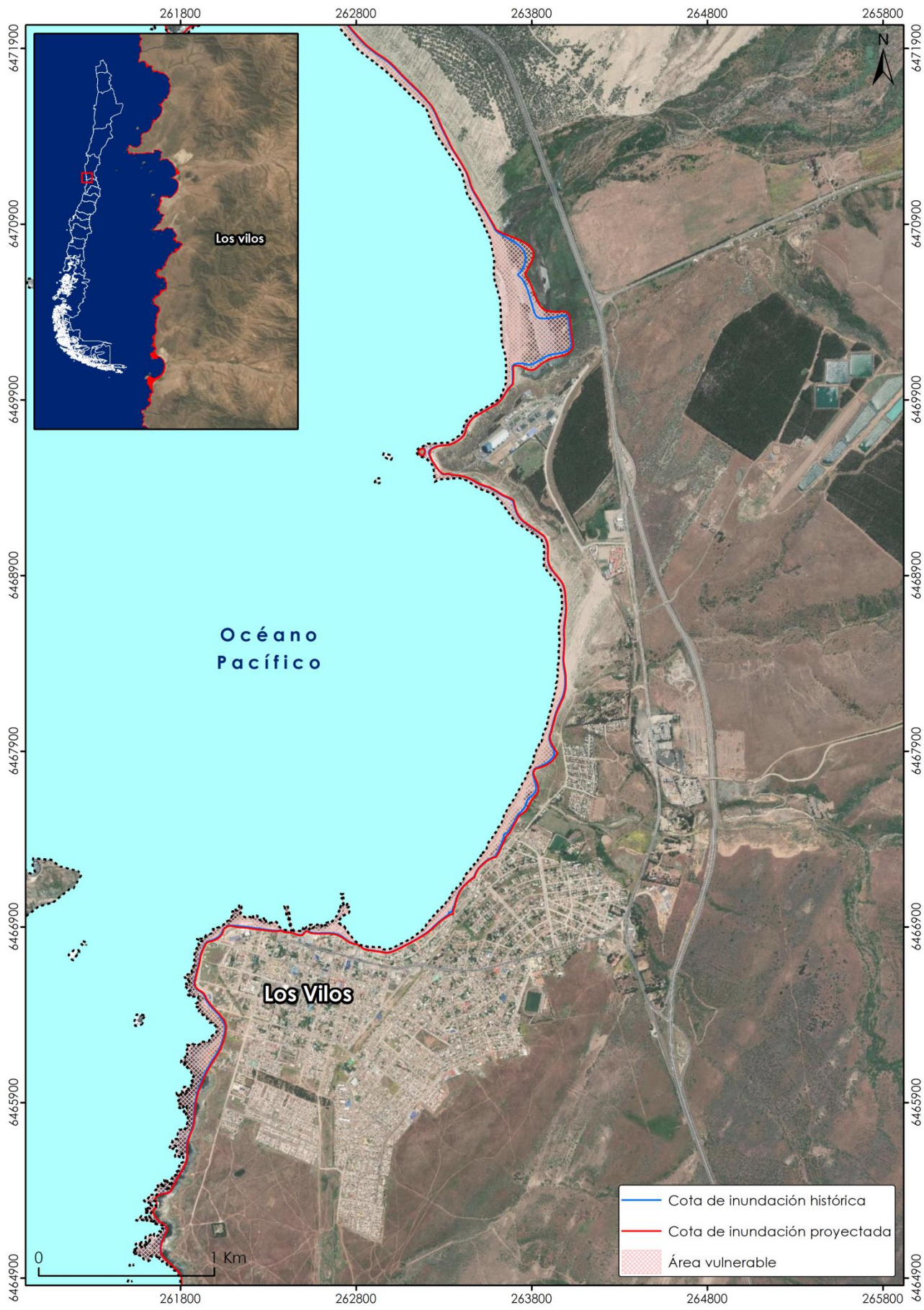


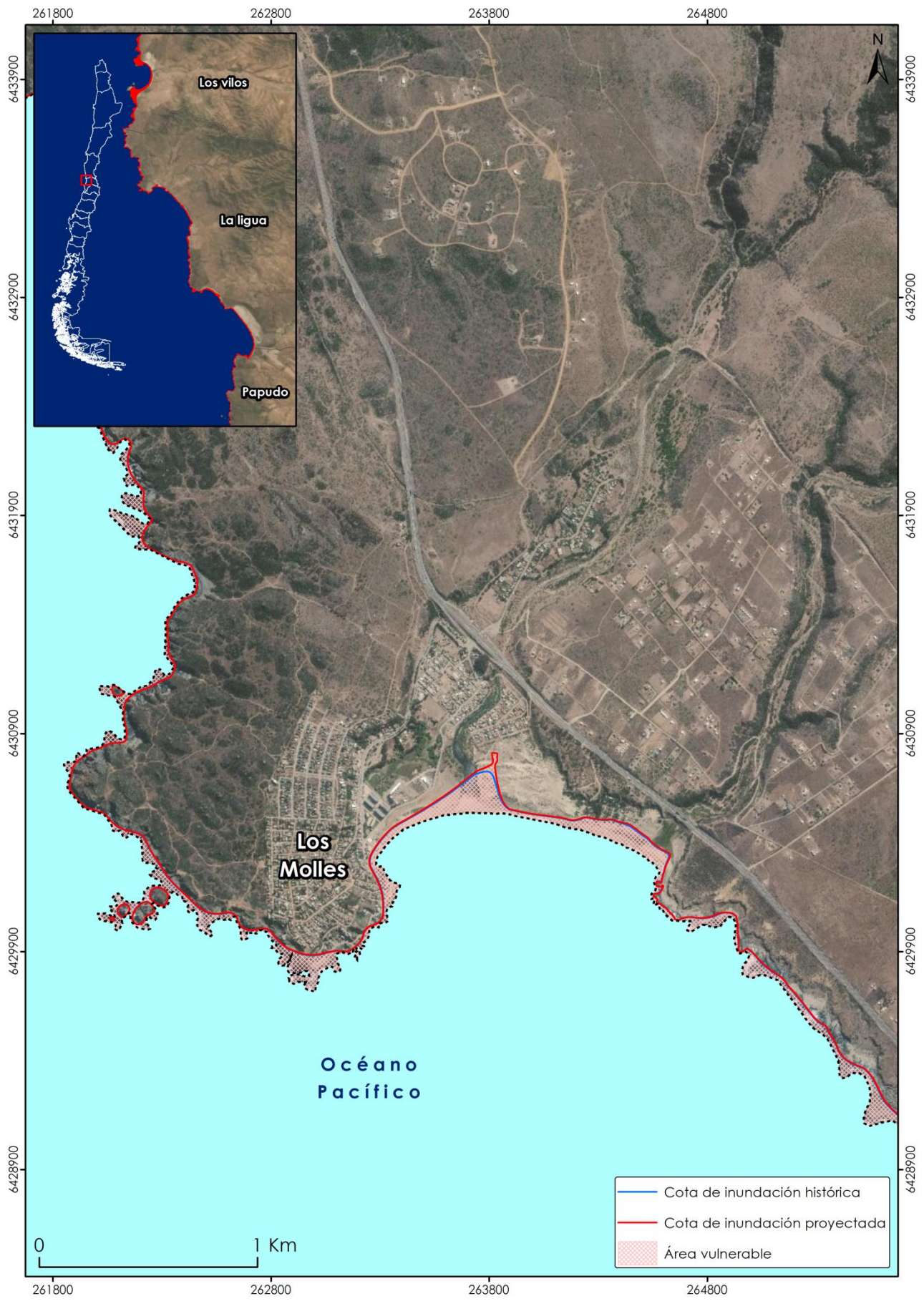












261800

262800

263800

264800

6433900

6433900

6432900

6432900

6431900

6431900

6430900

6430900

6429900

6429900

6428900

6428900

Los vilos

La Iguia

Papudo

Los Molles

Océano Pacífico

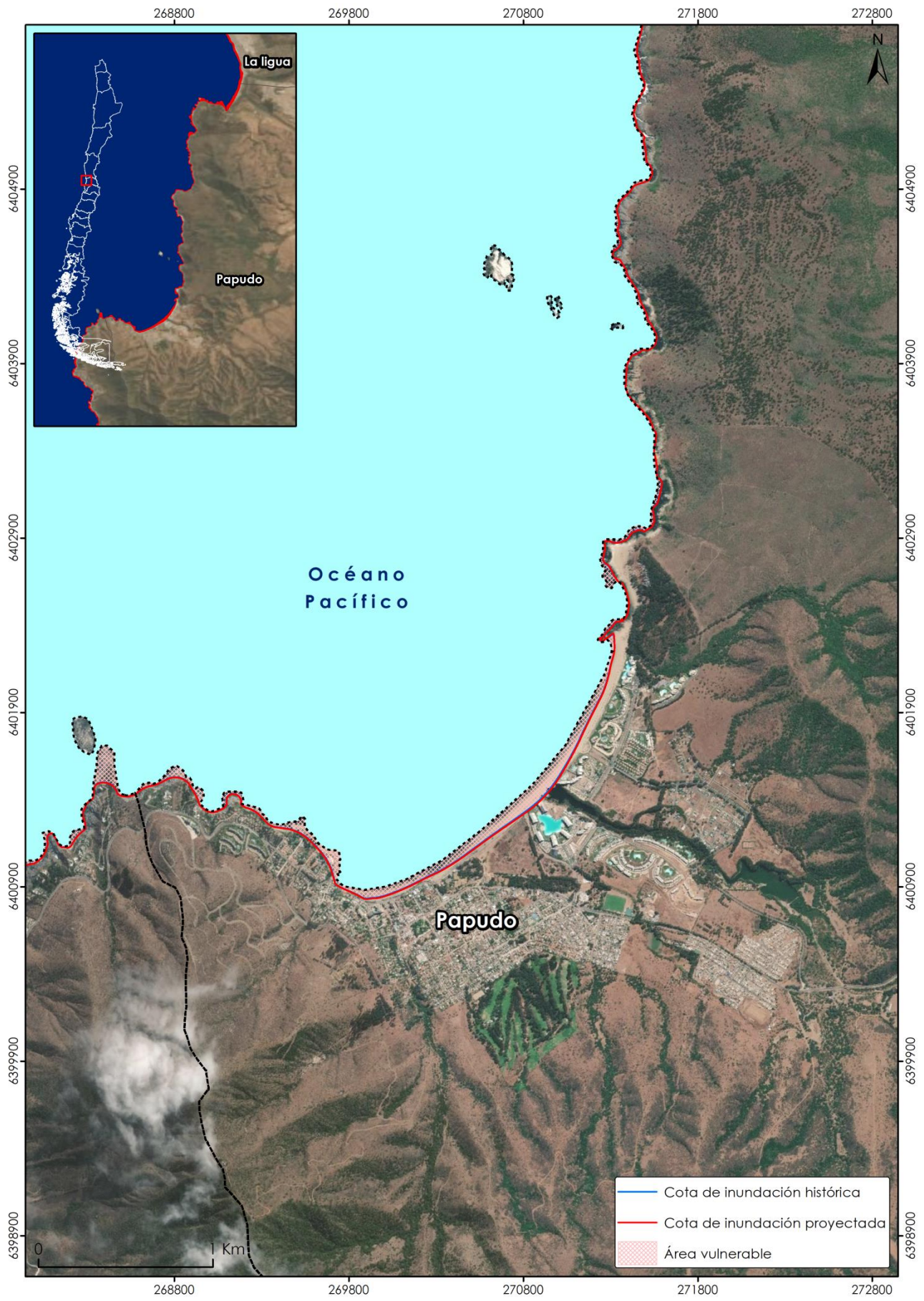
0

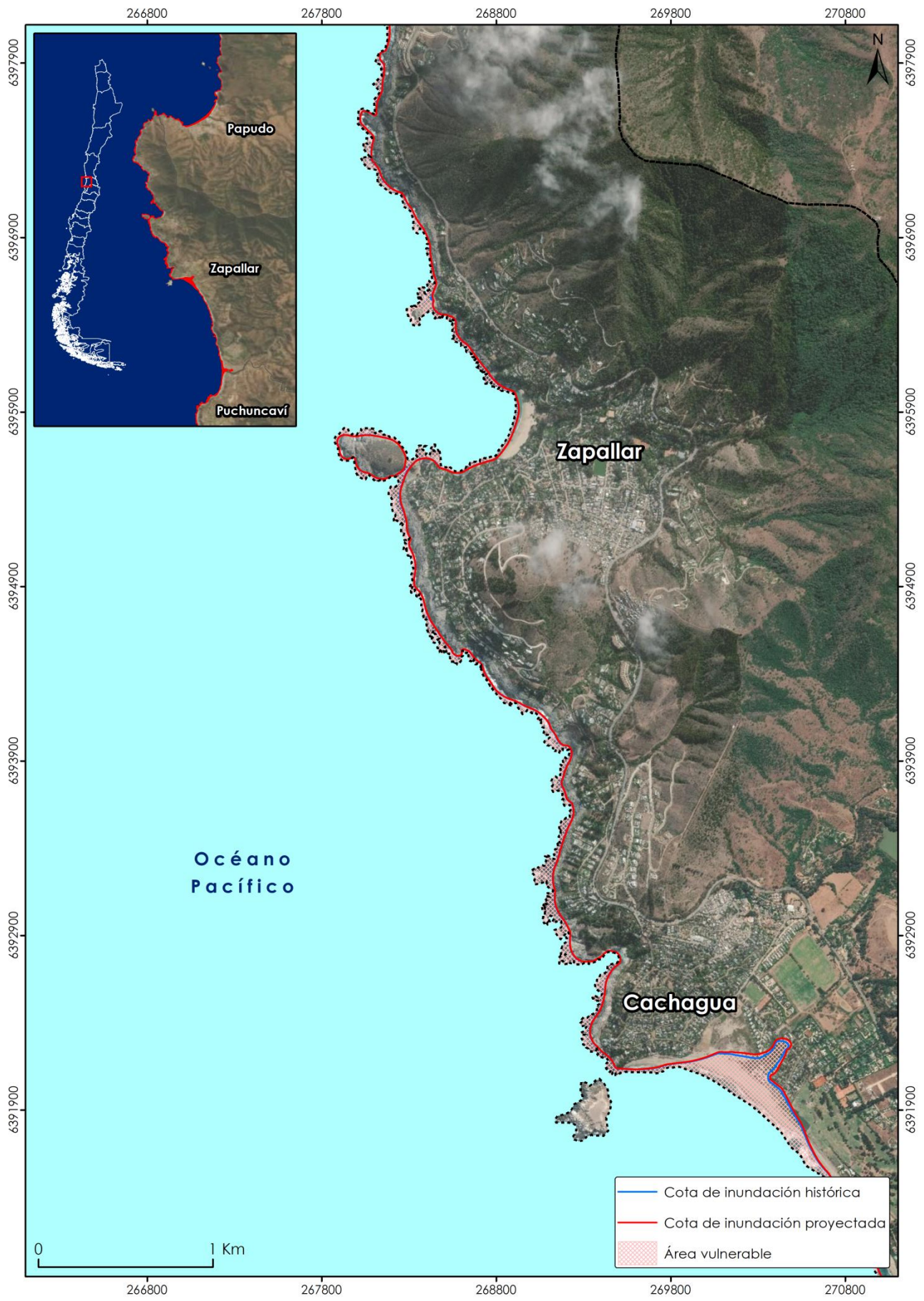
1 Km

Cota de inundación histórica

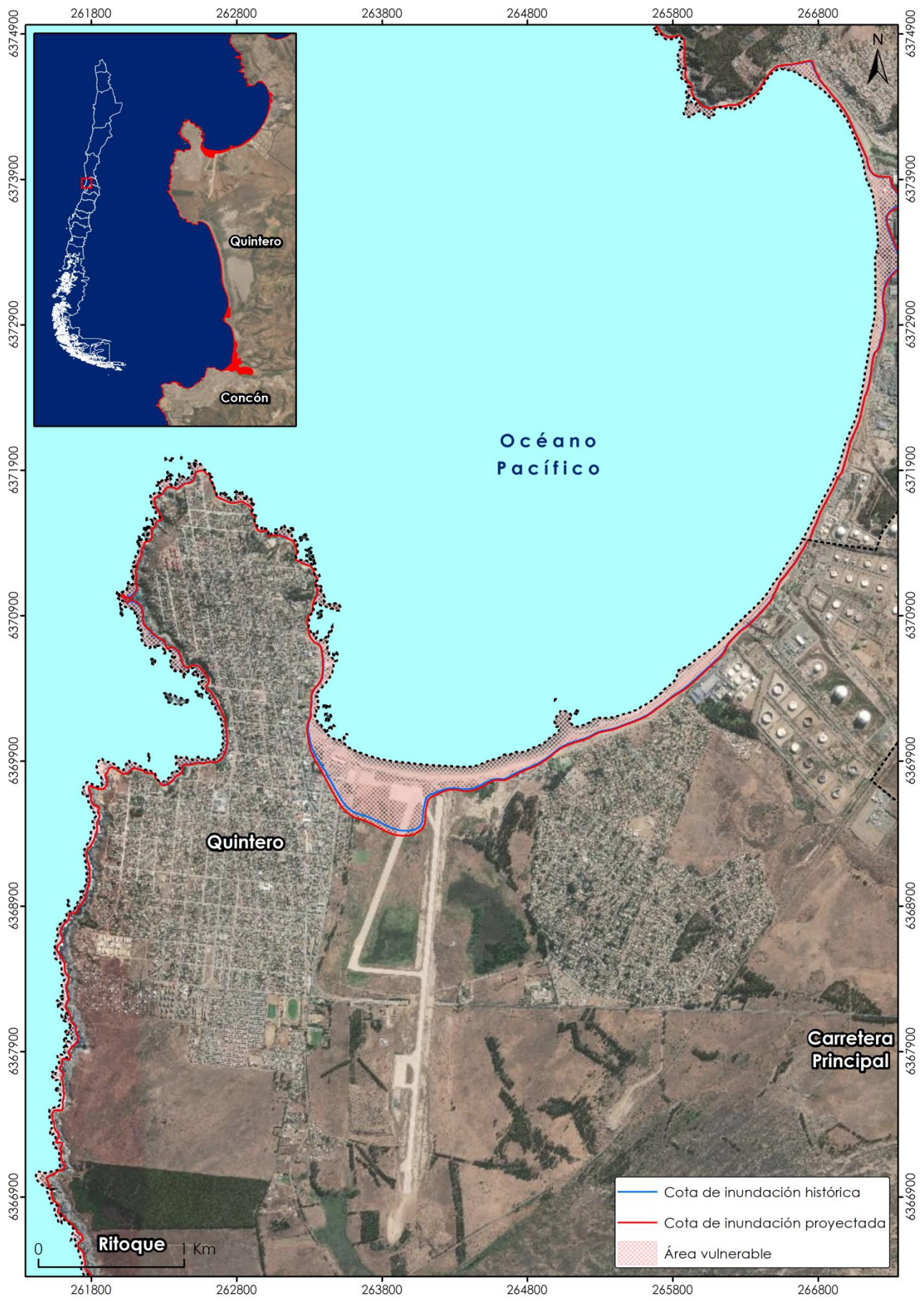
Cota de inundación proyectada

Área vulnerable

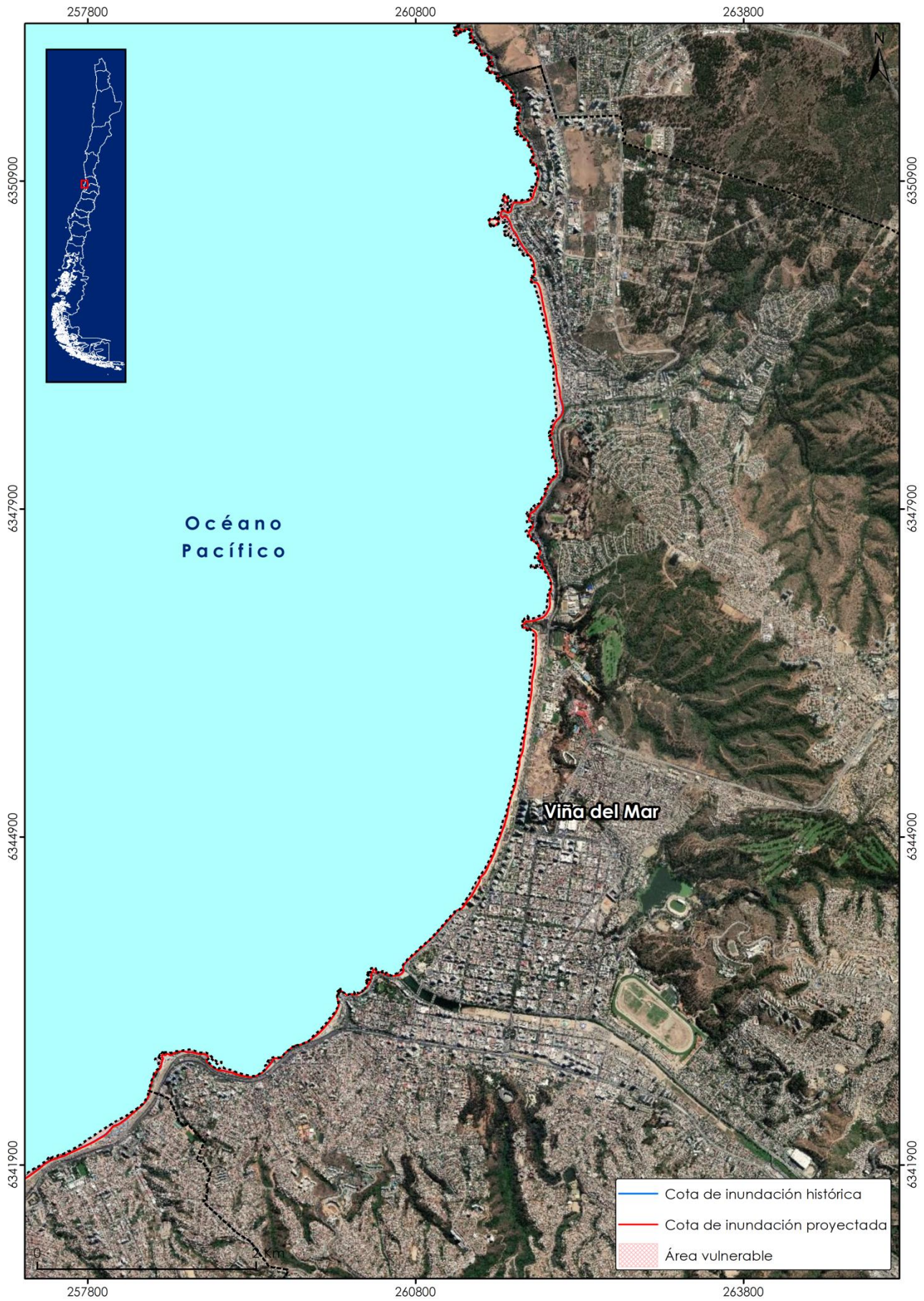


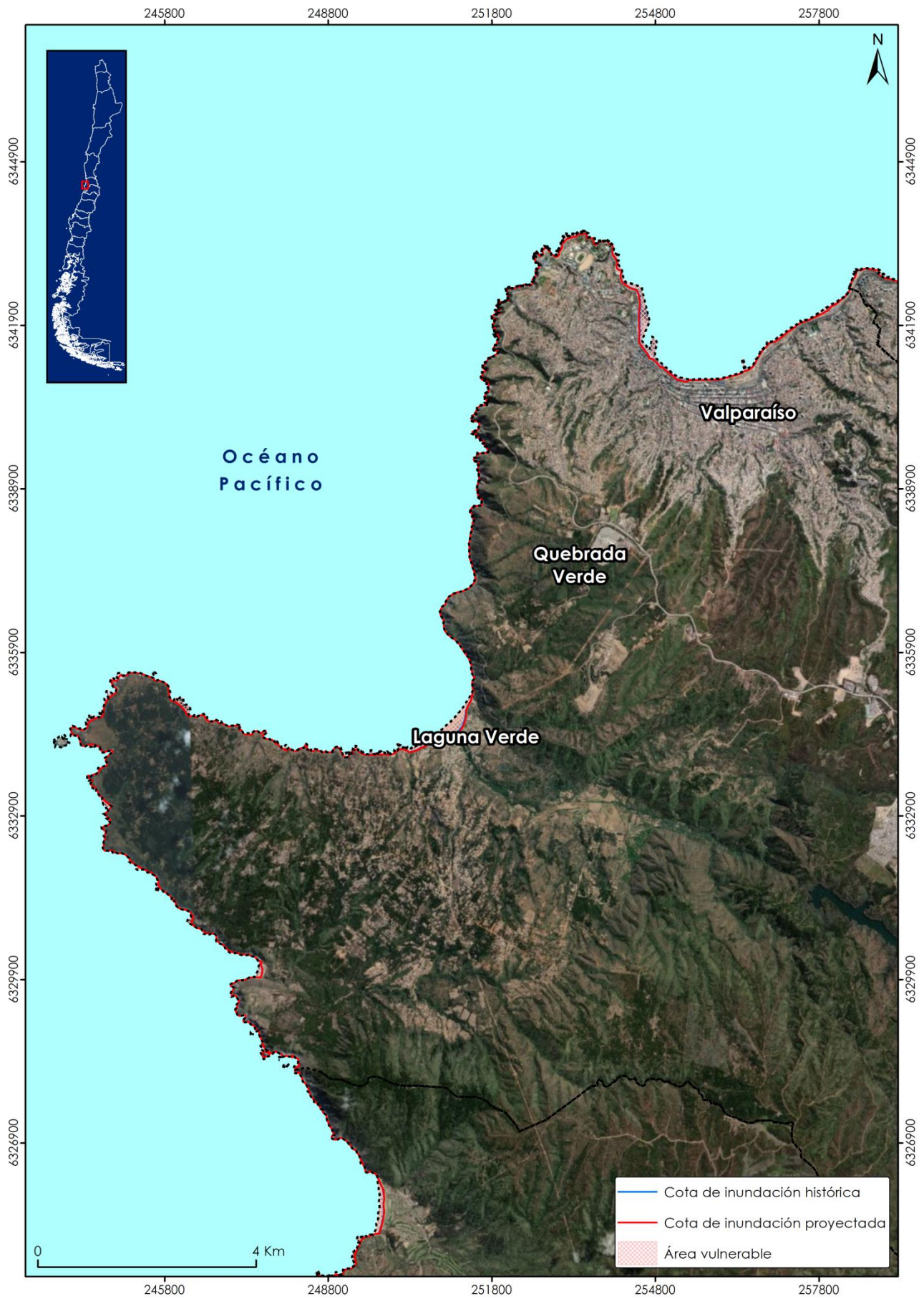


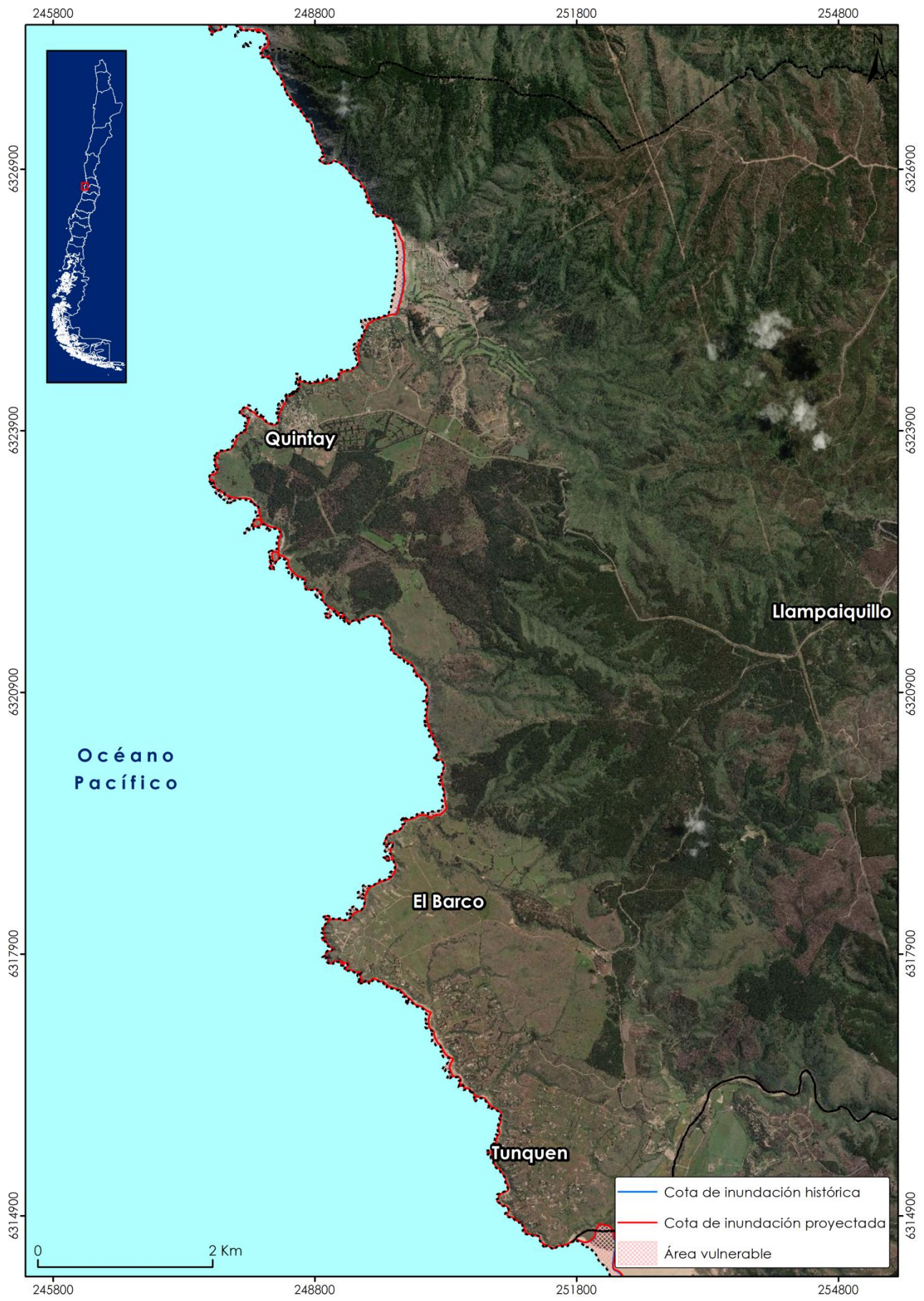


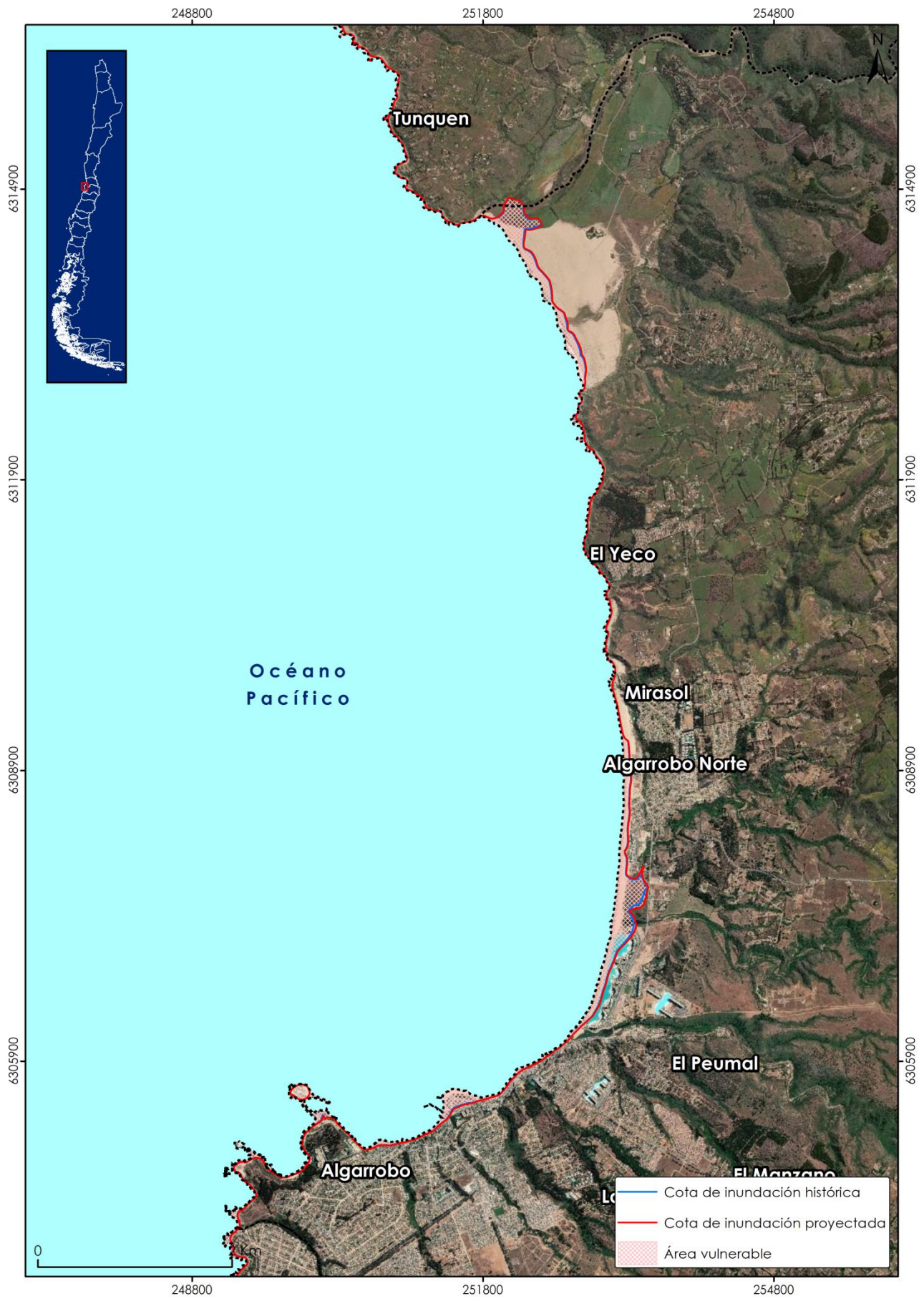




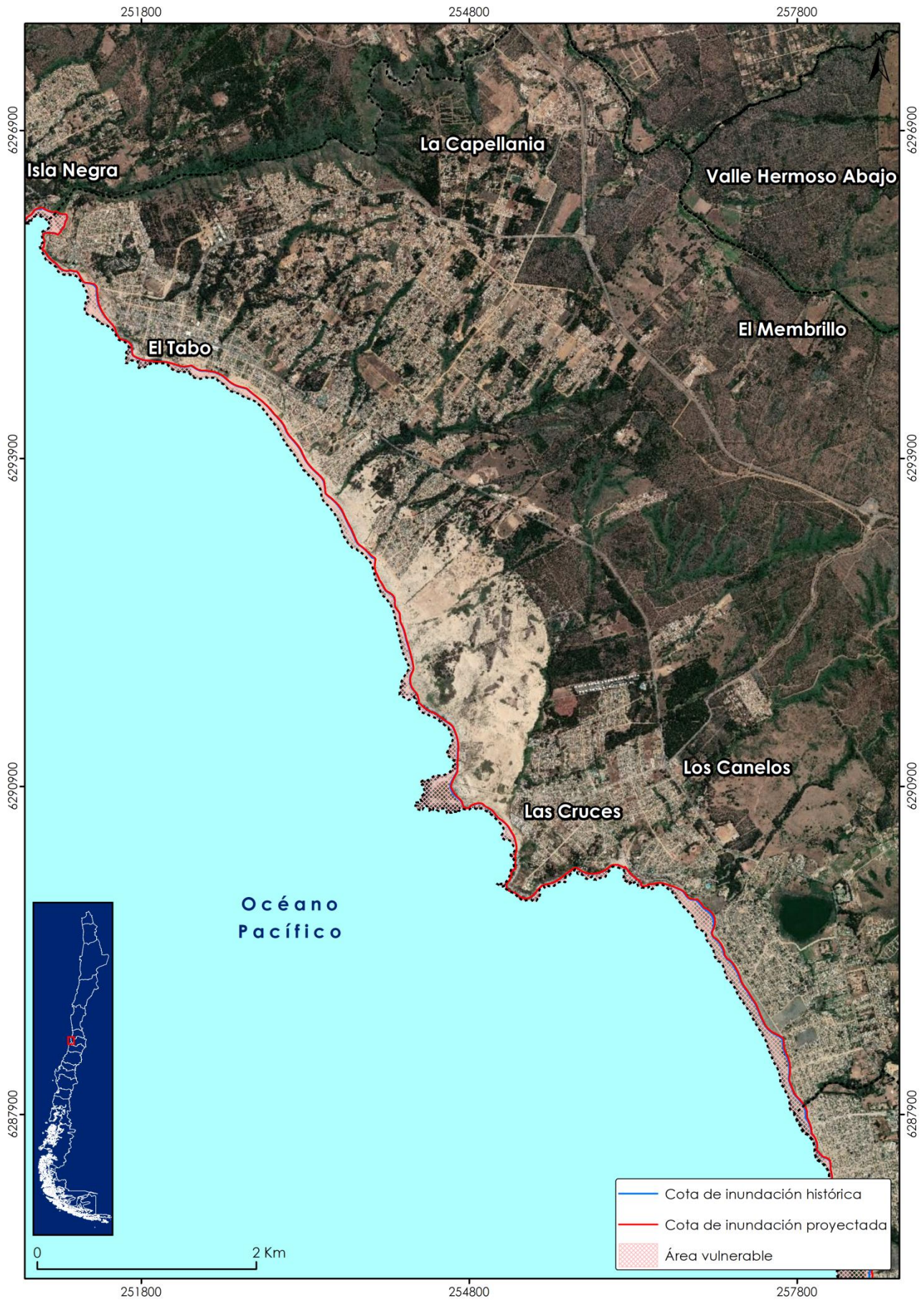


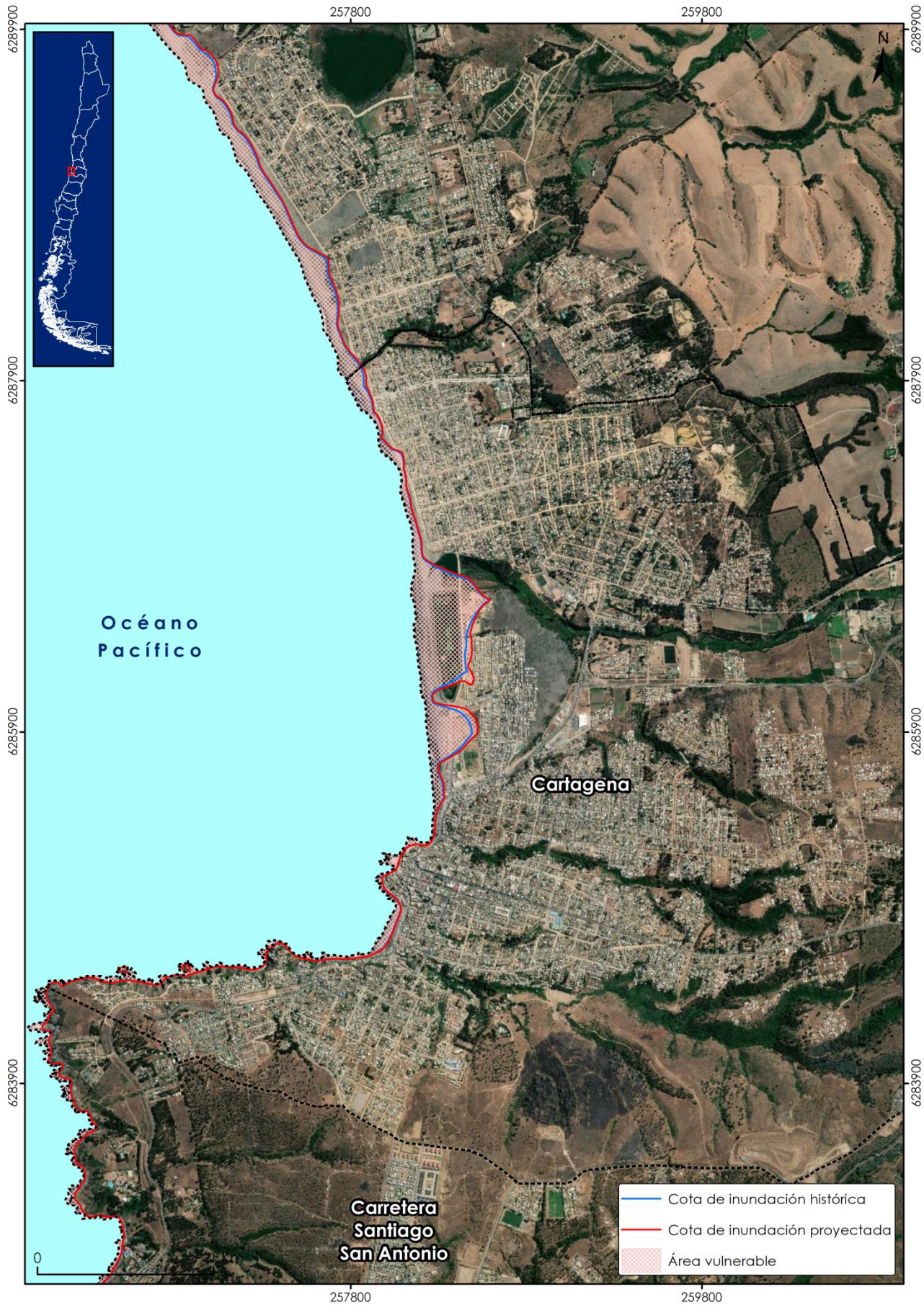


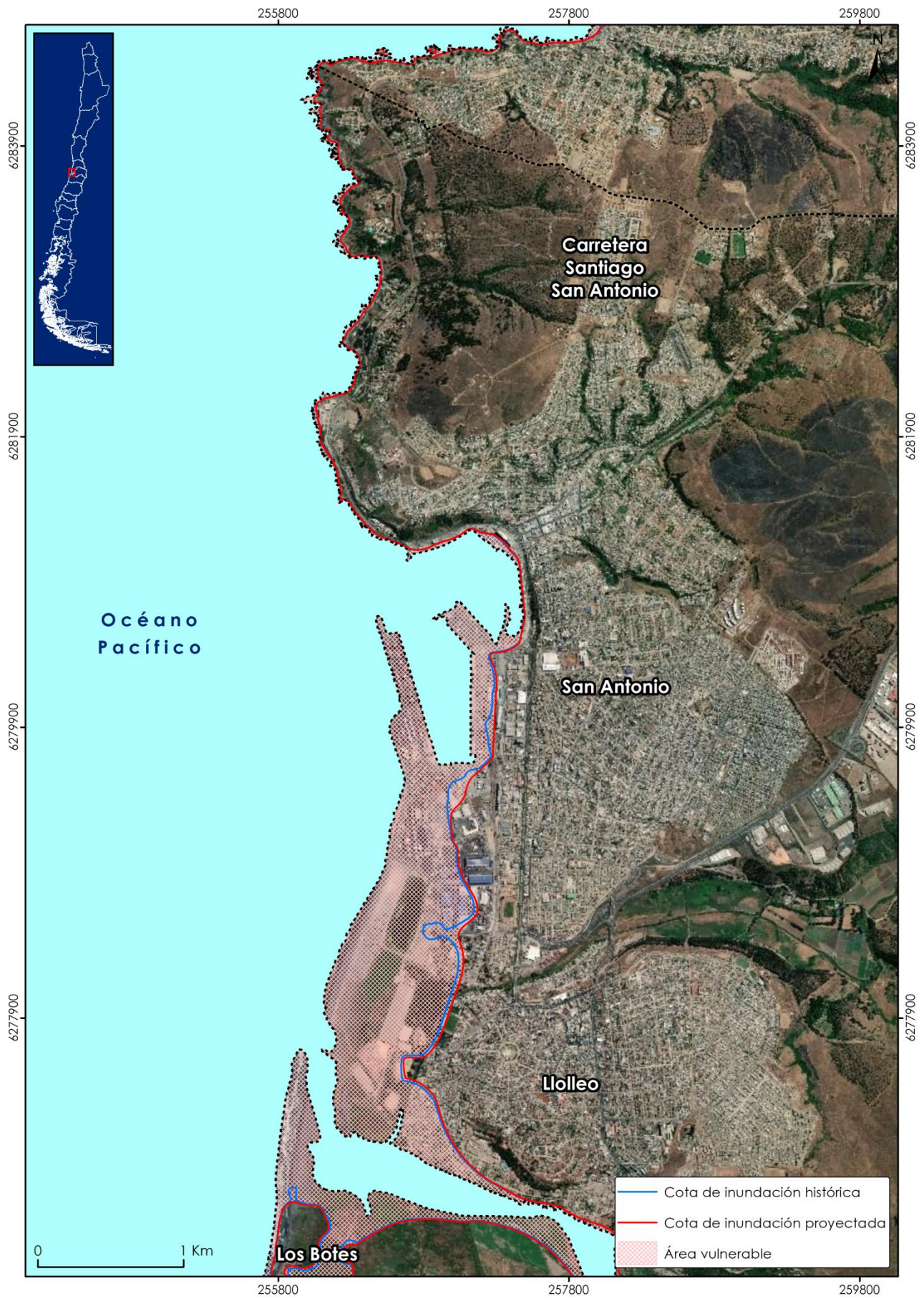












255800

257800

259800

6283900

6283900

6281900

6281900

Océano
Pacífico

6279900

6279900

6277900

6277900

Carretera
Santiago
San Antonio

San Antonio

Lolleo

Los Botes

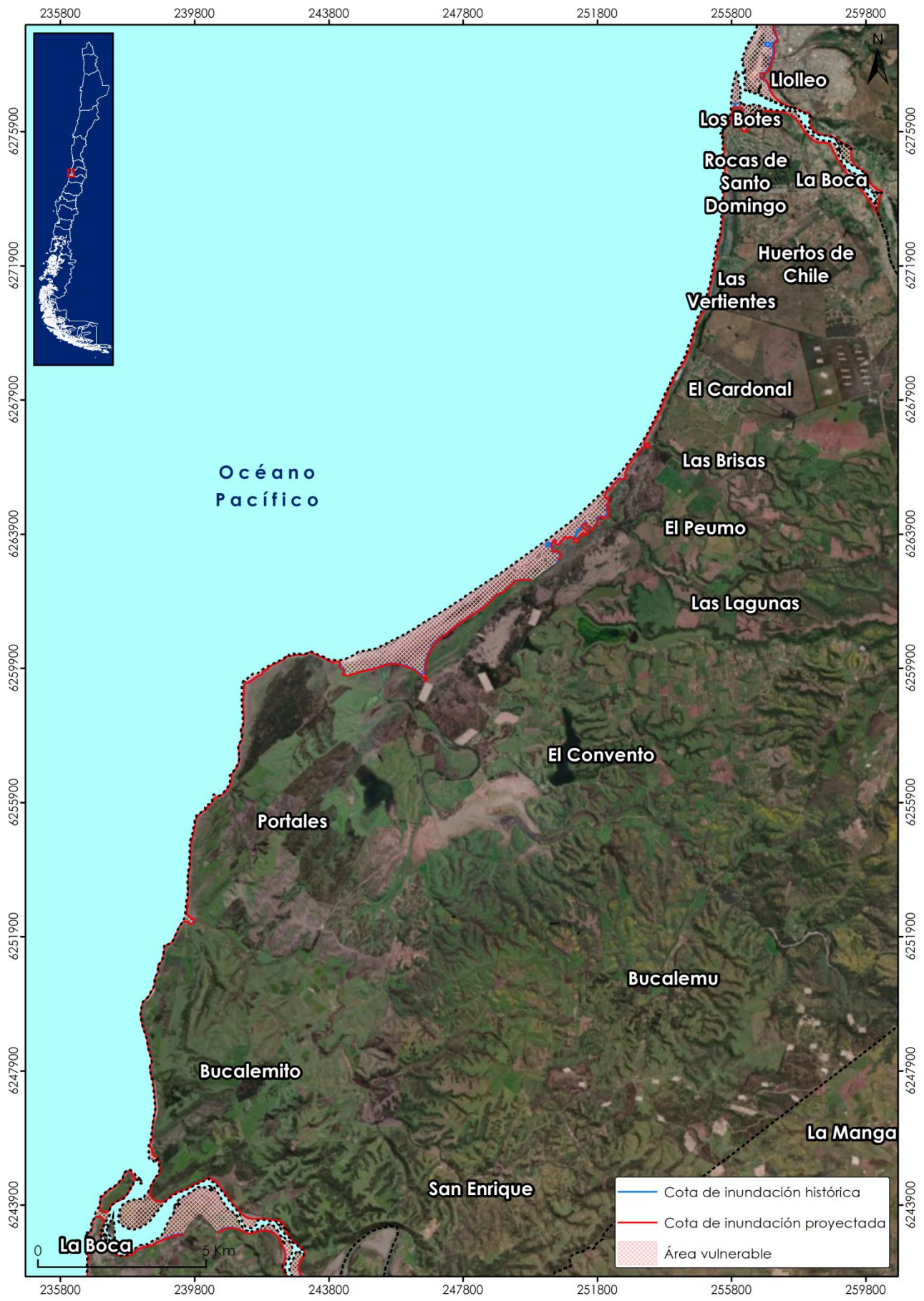
- Cota de inundación histórica
- Cota de inundación proyectada
- ▨ Área vulnerable

0 1 Km

255800

257800

259800



235800 239800 243800 247800 251800 255800 259800

6275900
6271900
6267900
6263900
6259900
6255900
6251900
6247900
6243900

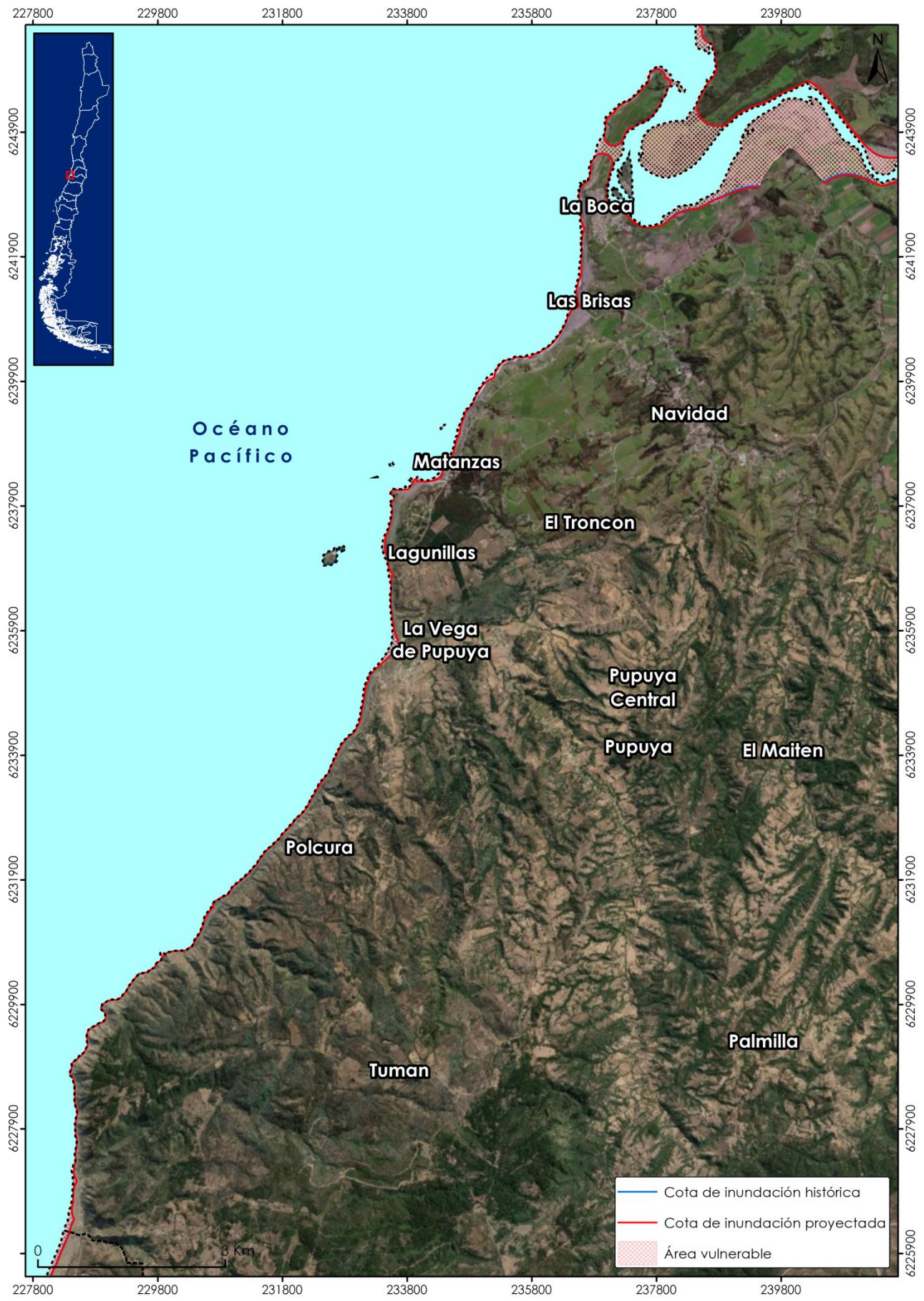
6275900
6271900
6267900
6263900
6259900
6255900
6251900
6247900
6243900

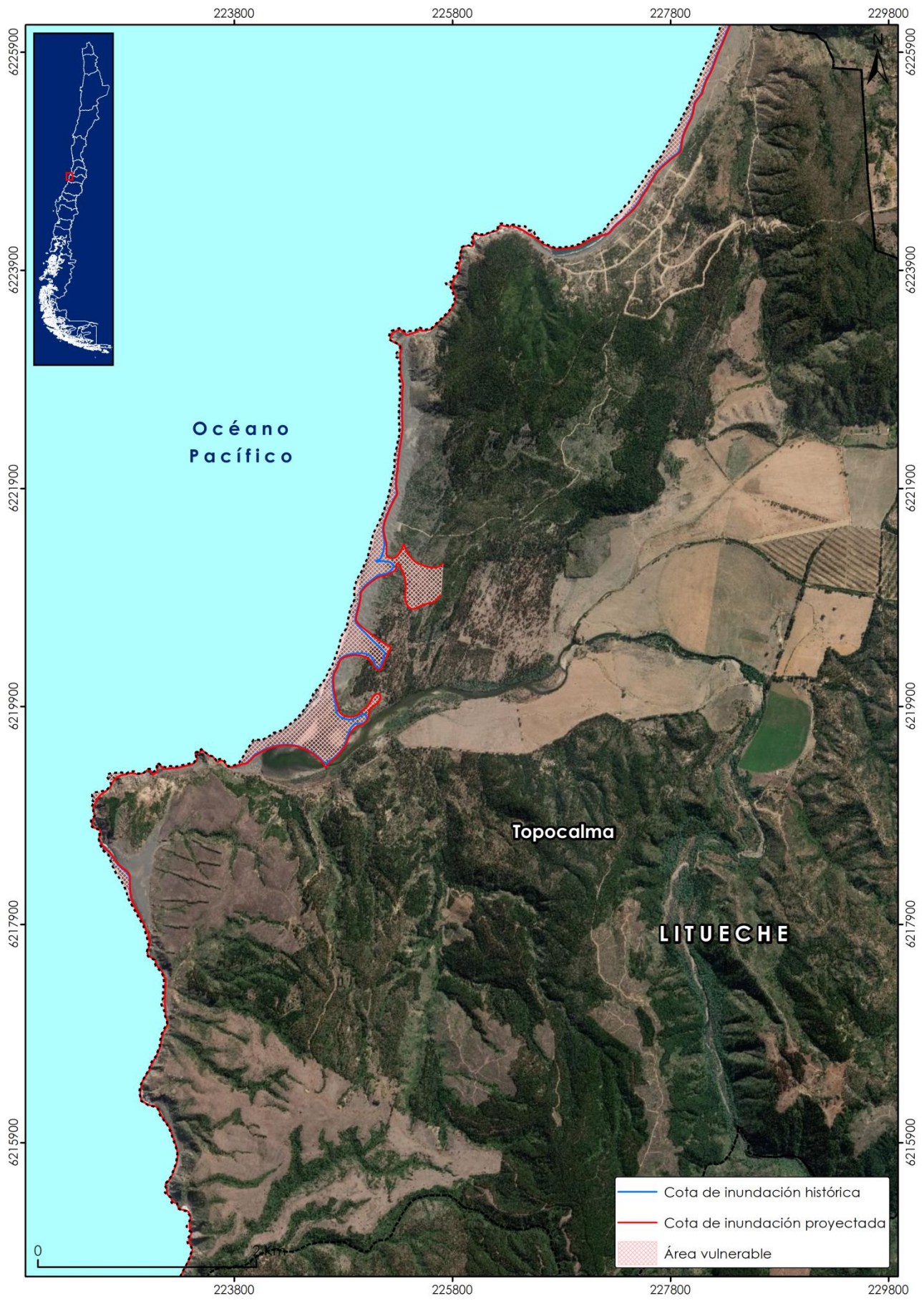
Océano
Pacífico

0 5 Km

- Cota de inundación histórica
- - - Cota de inundación proyectada
- Área vulnerable

235800 239800 243800 247800 251800 255800 259800



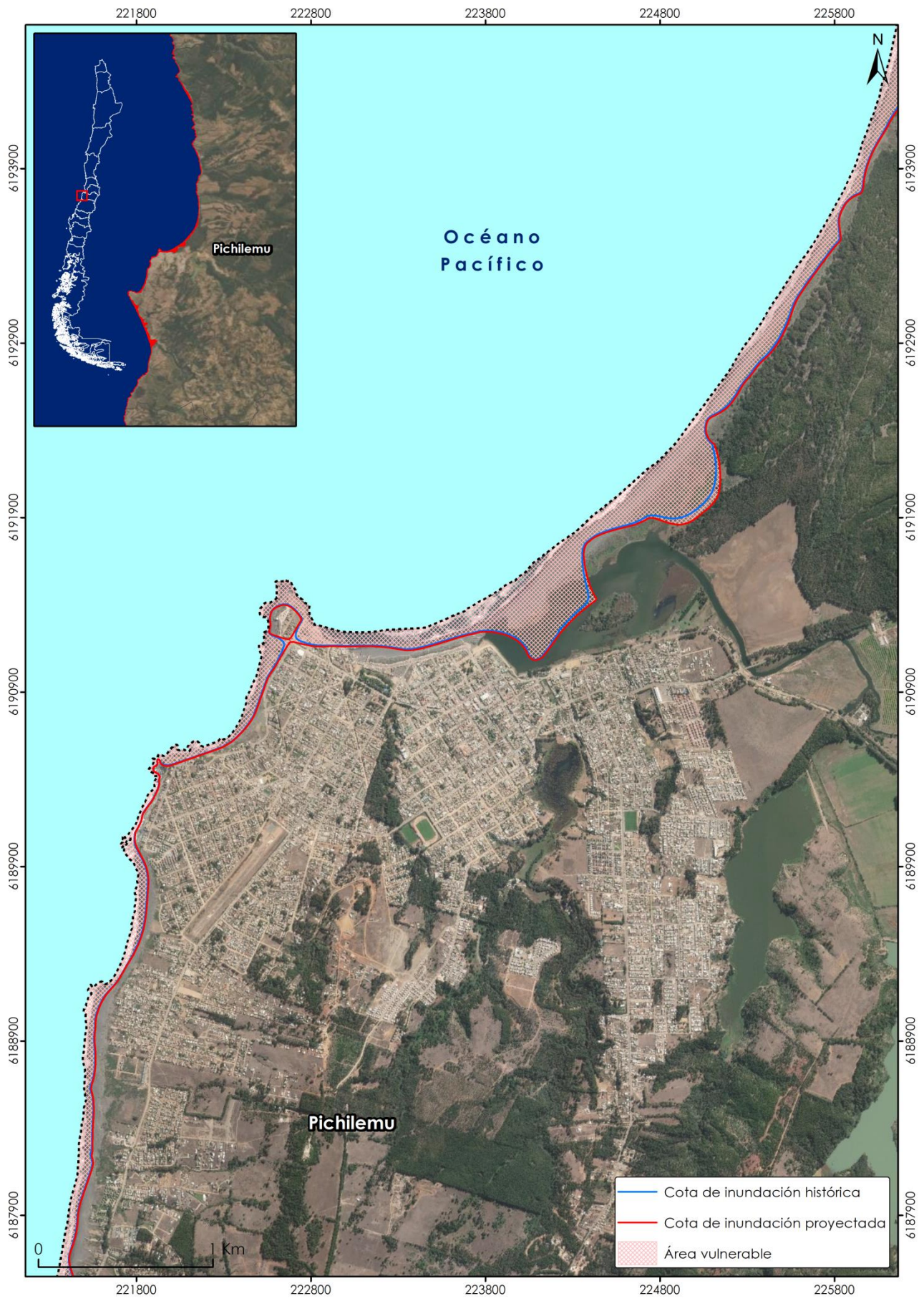


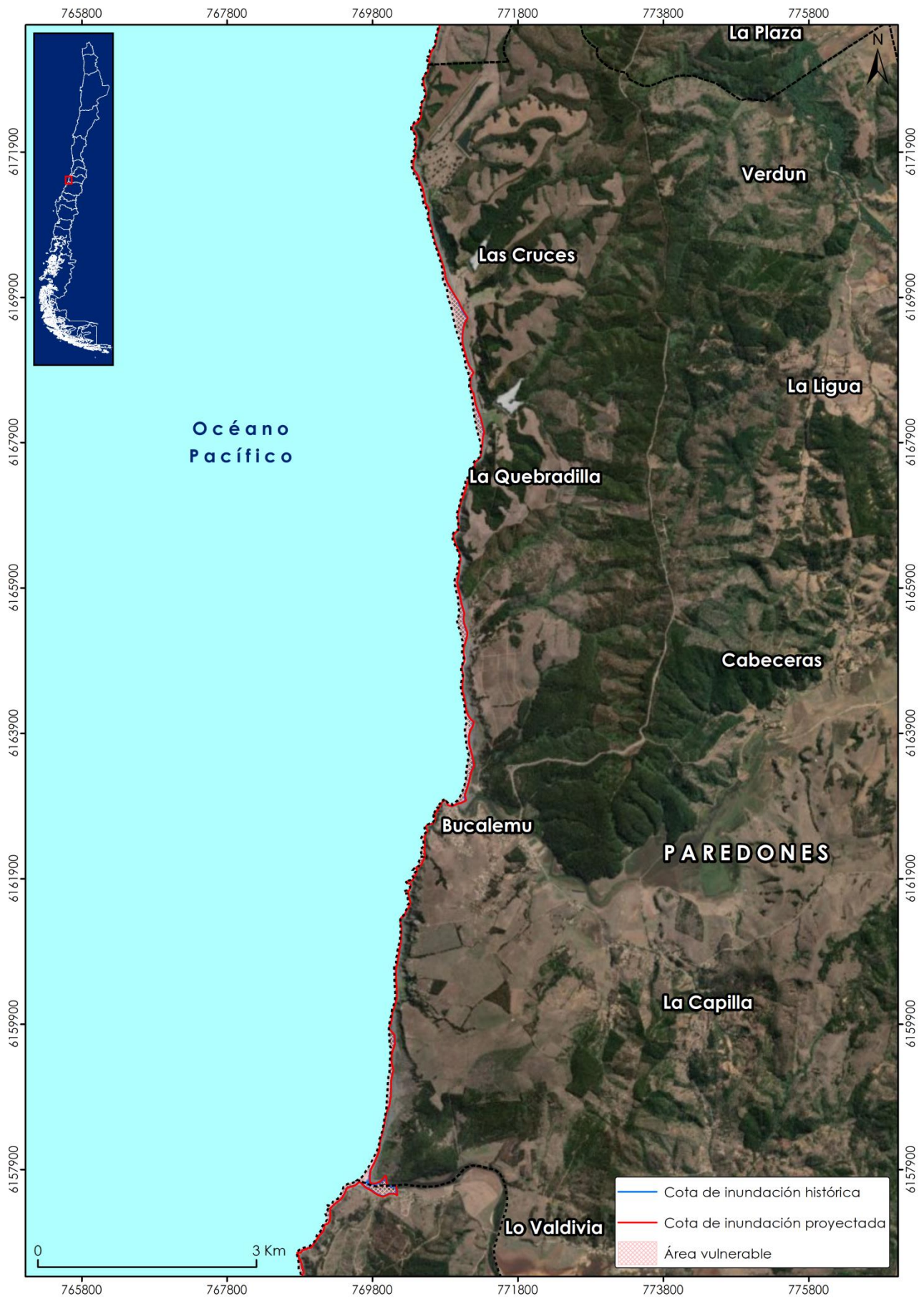
Océano
Pacífico

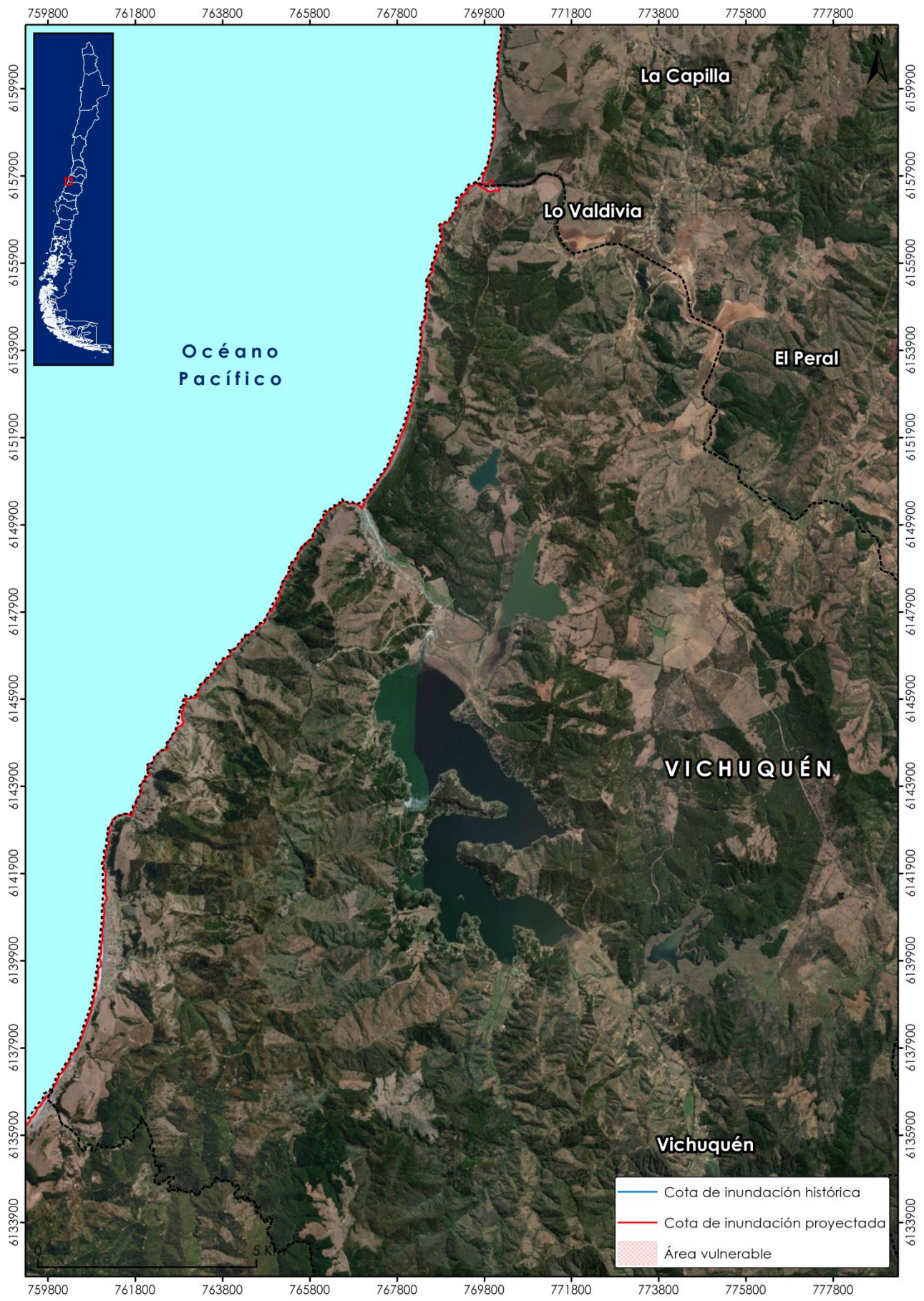
Topocalma

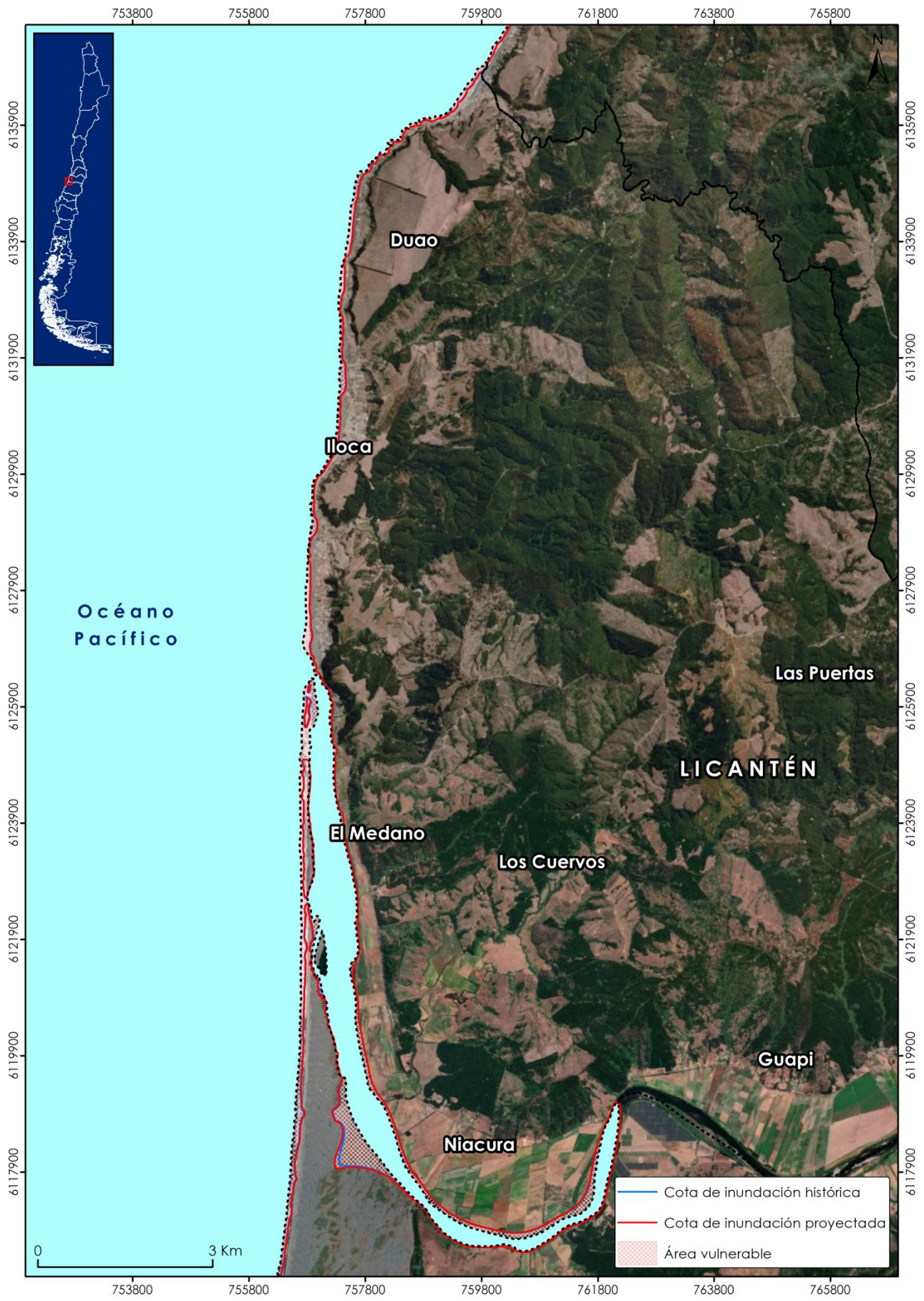
LITUECHE

- Cota de inundación histórica
- Cota de inundación proyectada
- Área vulnerable









0 3 Km

- Cota de inundación histórica
- Cota de inundación proyectada
- ▨ Área vulnerable

Océano
Pacífico

Duao

Iloca

El Medano

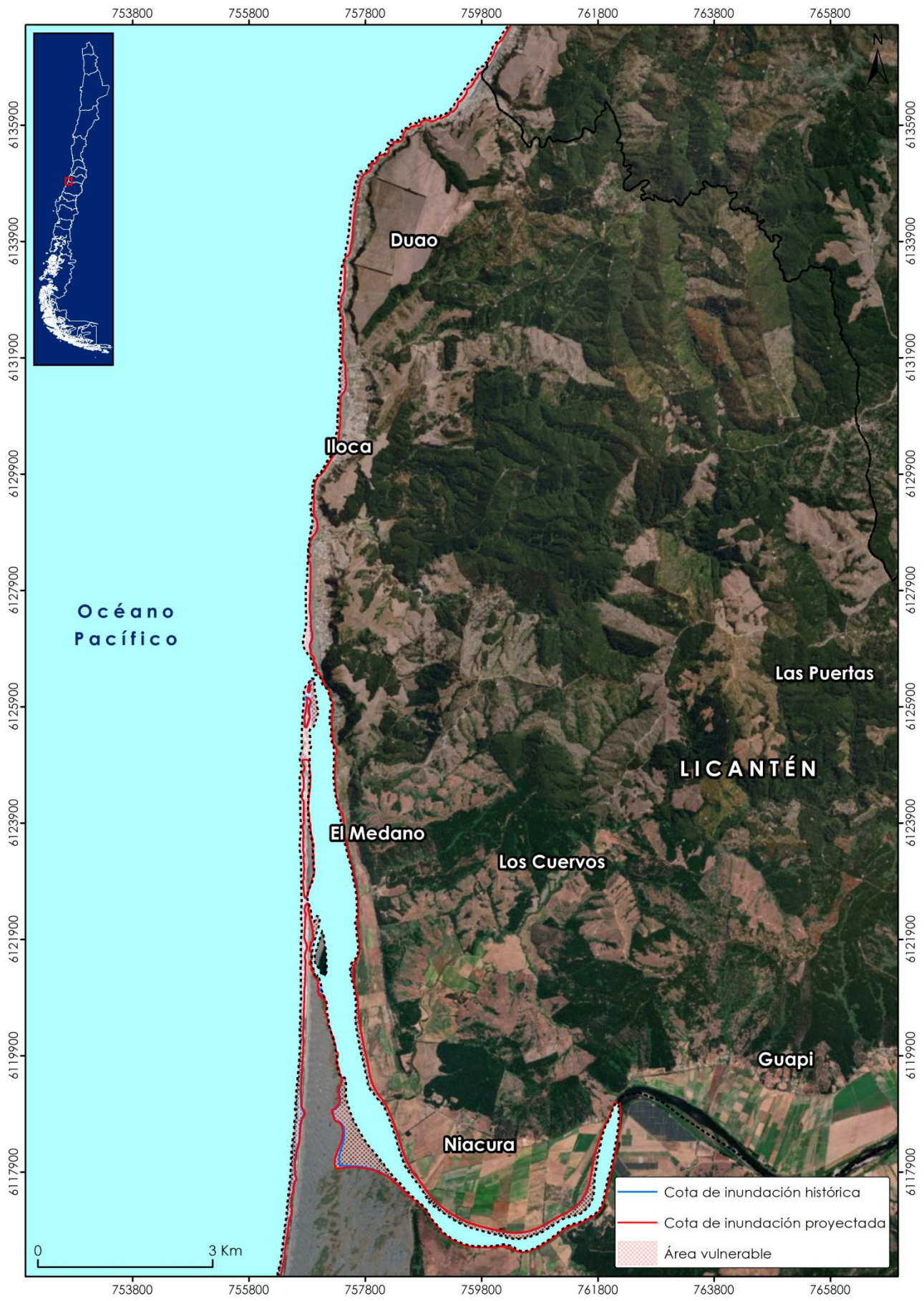
Los Cuervos

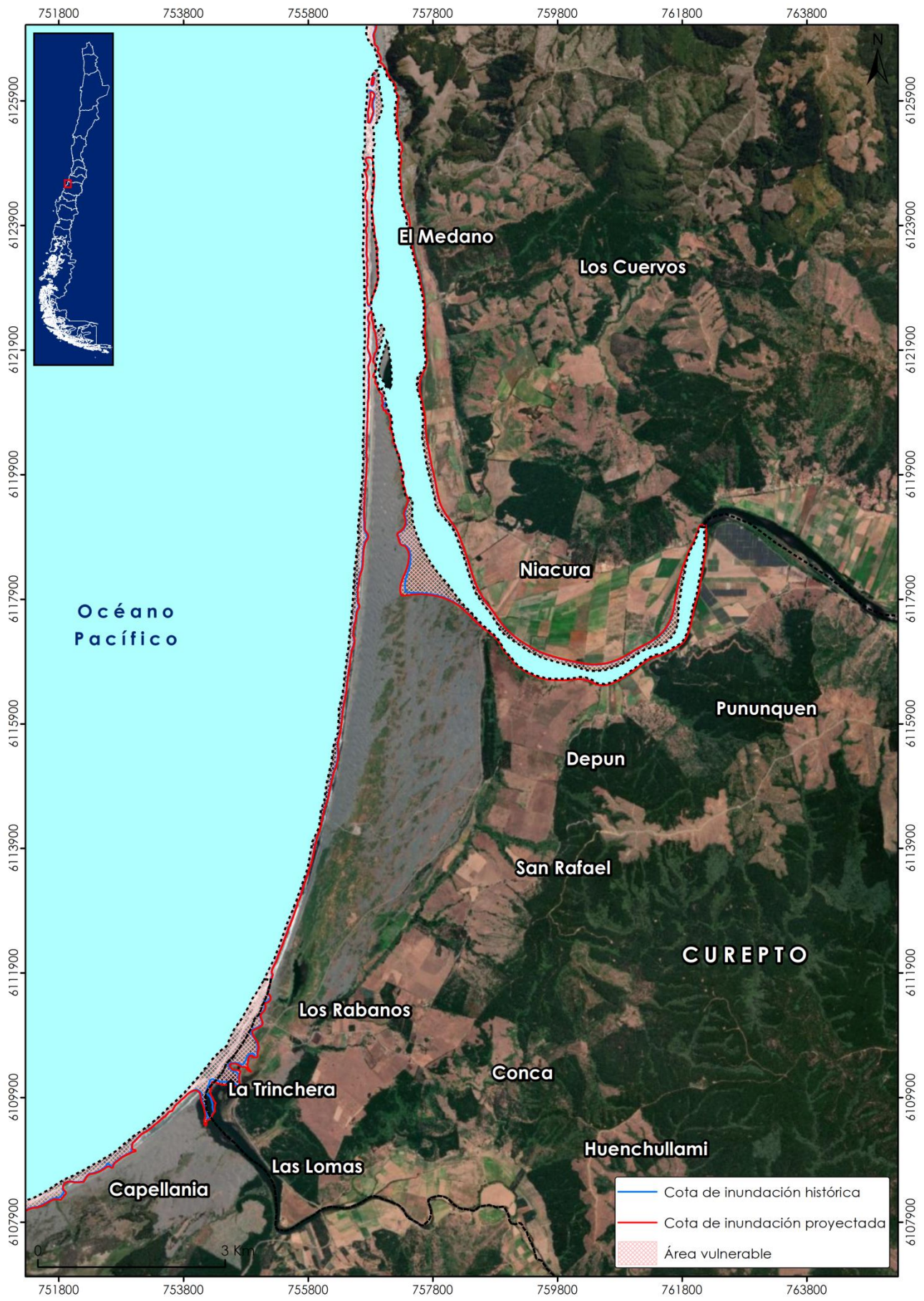
Niacura

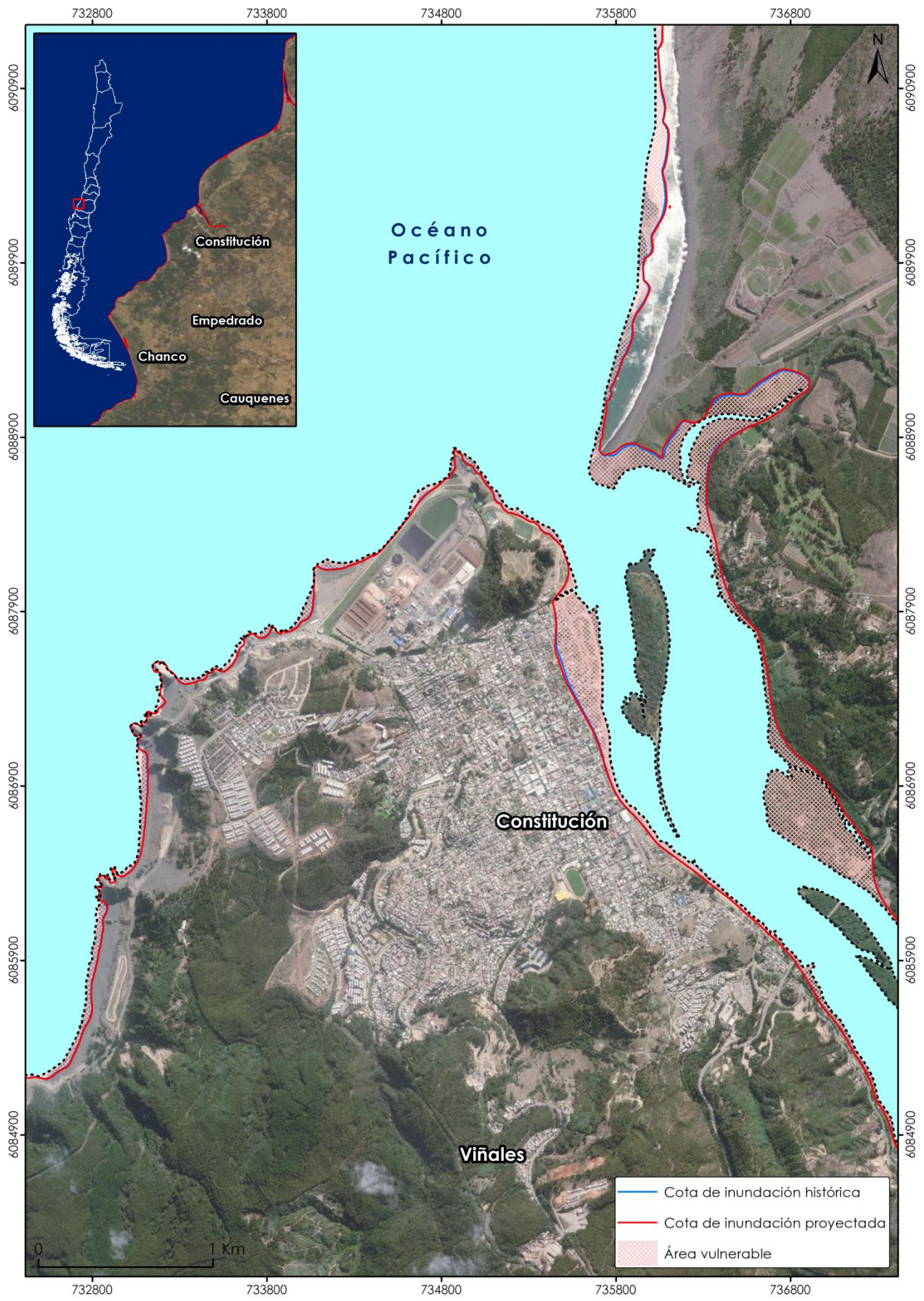
Guapi

Las Puertas

LICANTÉN





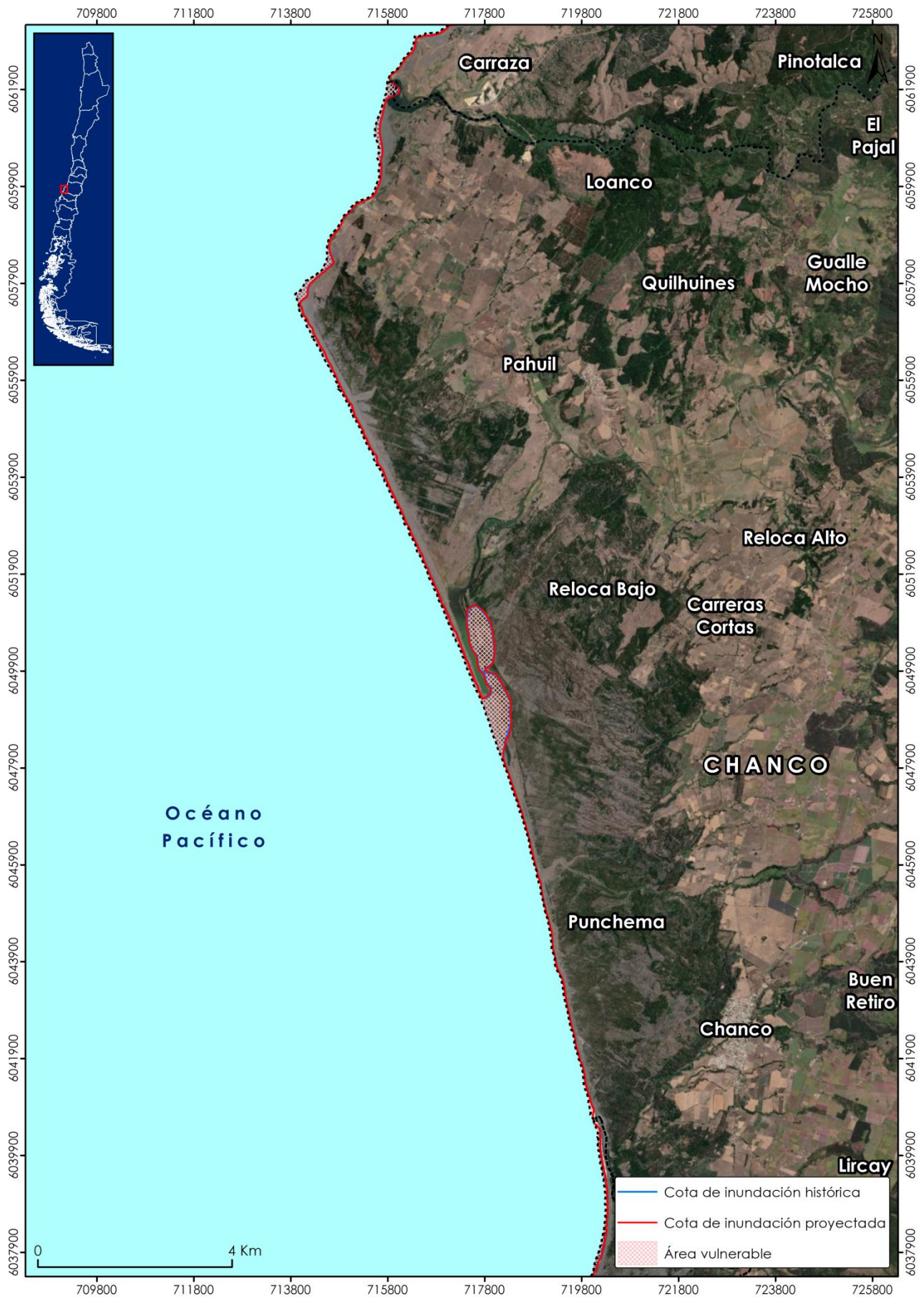


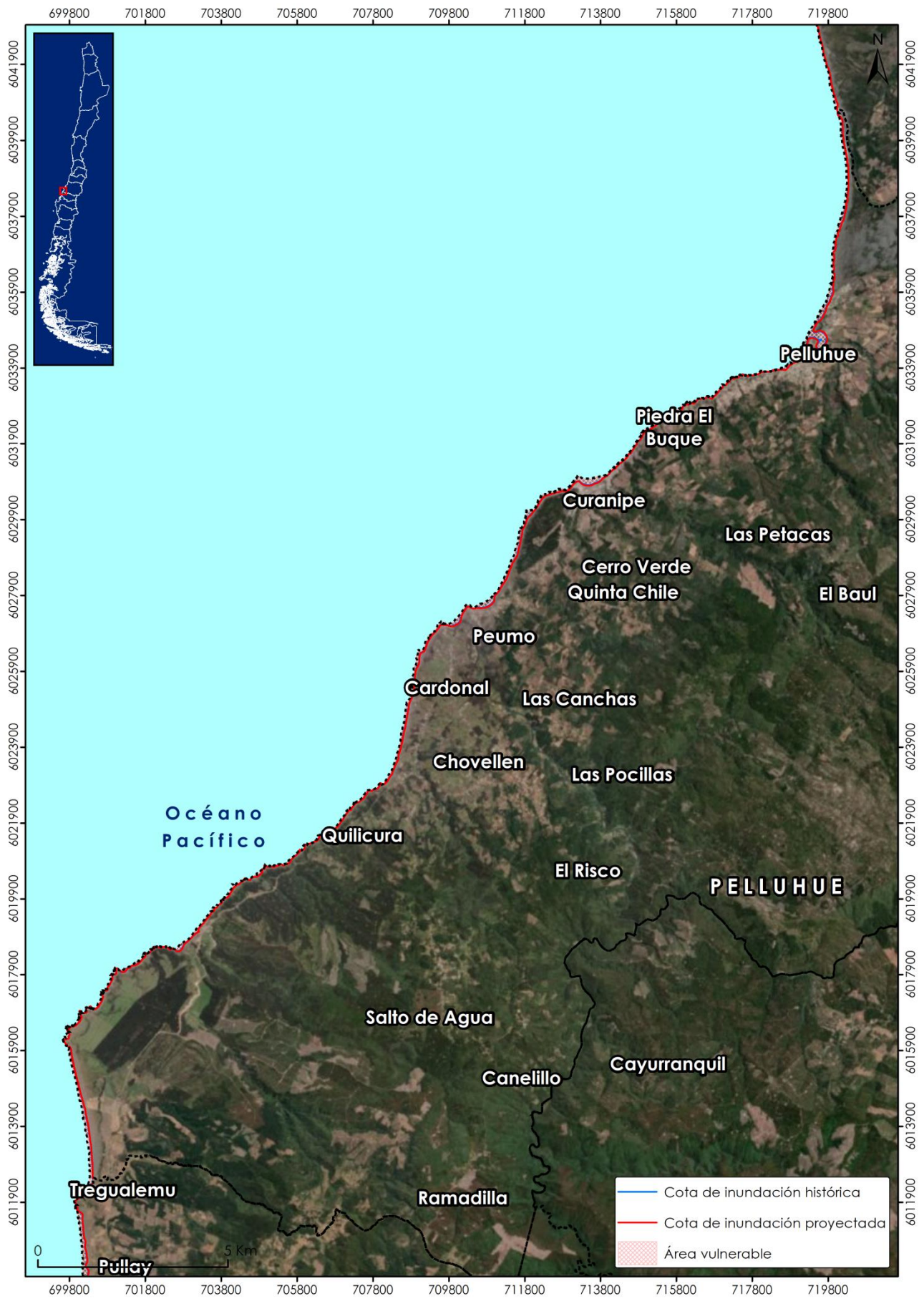
Océano
Pacífico

Constitución

Viñales

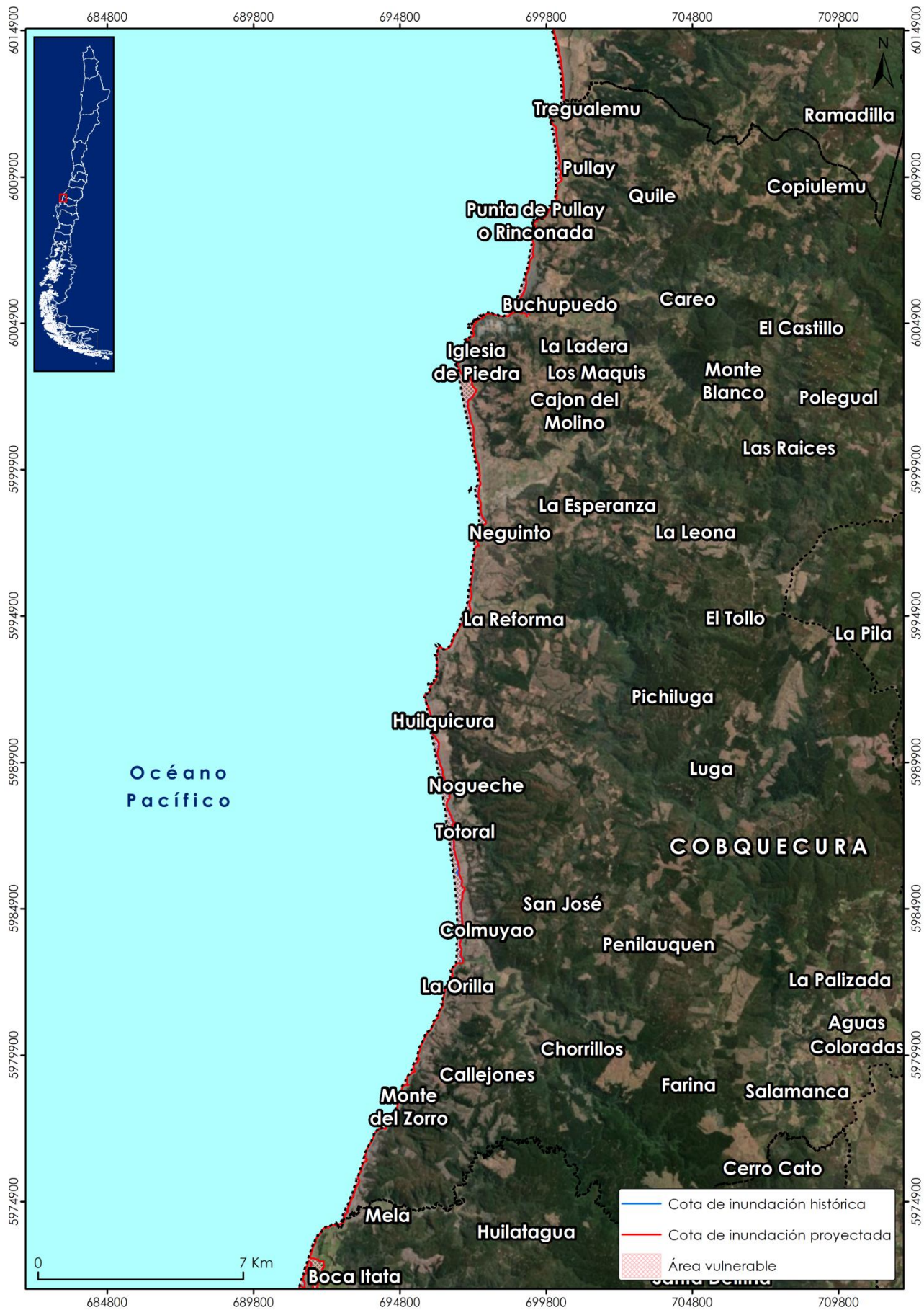
- Cota de inundación histórica
- Cota de inundación proyectada
- Área vulnerable





Océano
Pacífico

- Cota de inundación histórica
- Cota de inundación proyectada
- Área vulnerable





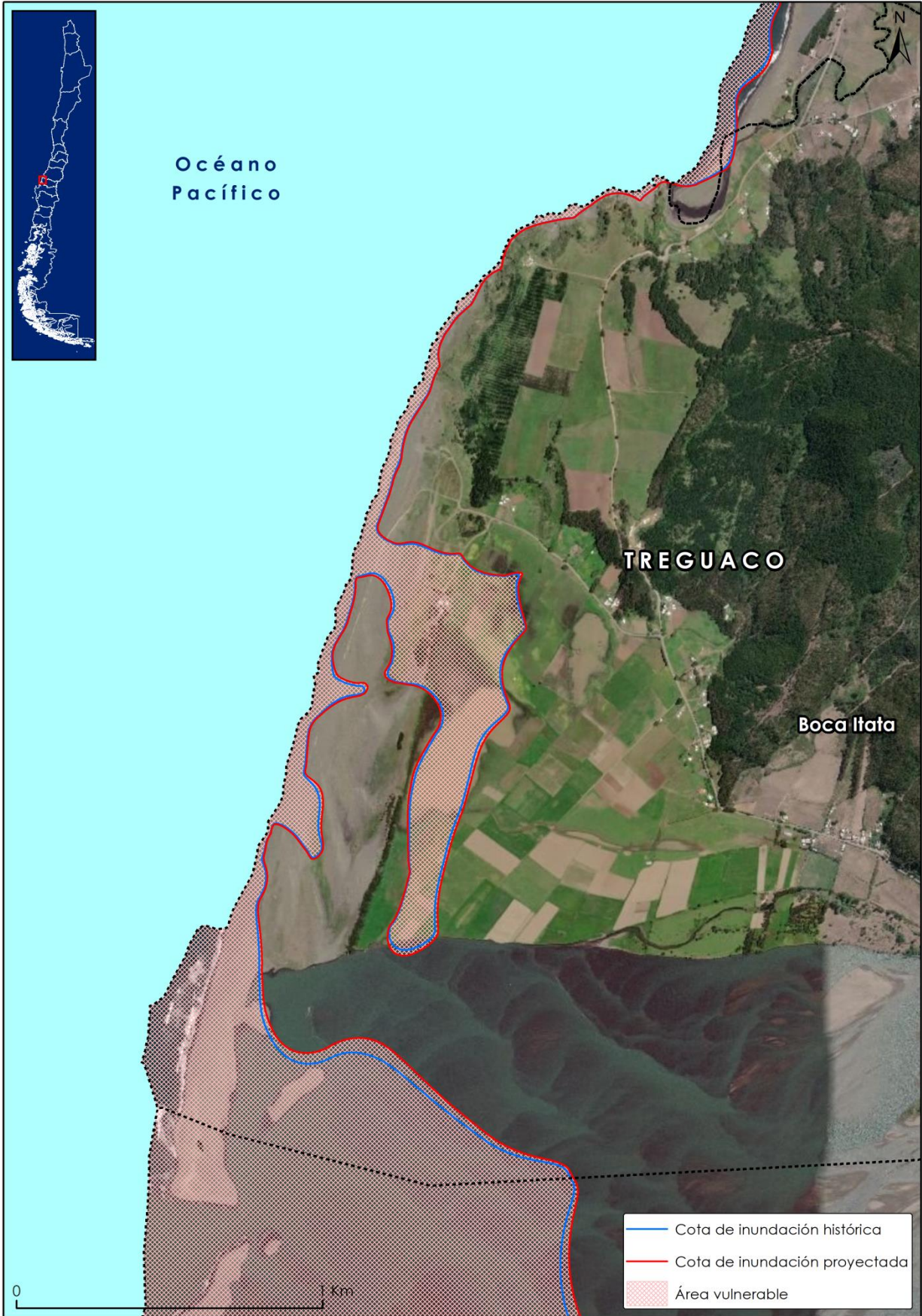
Océano
Pacífico

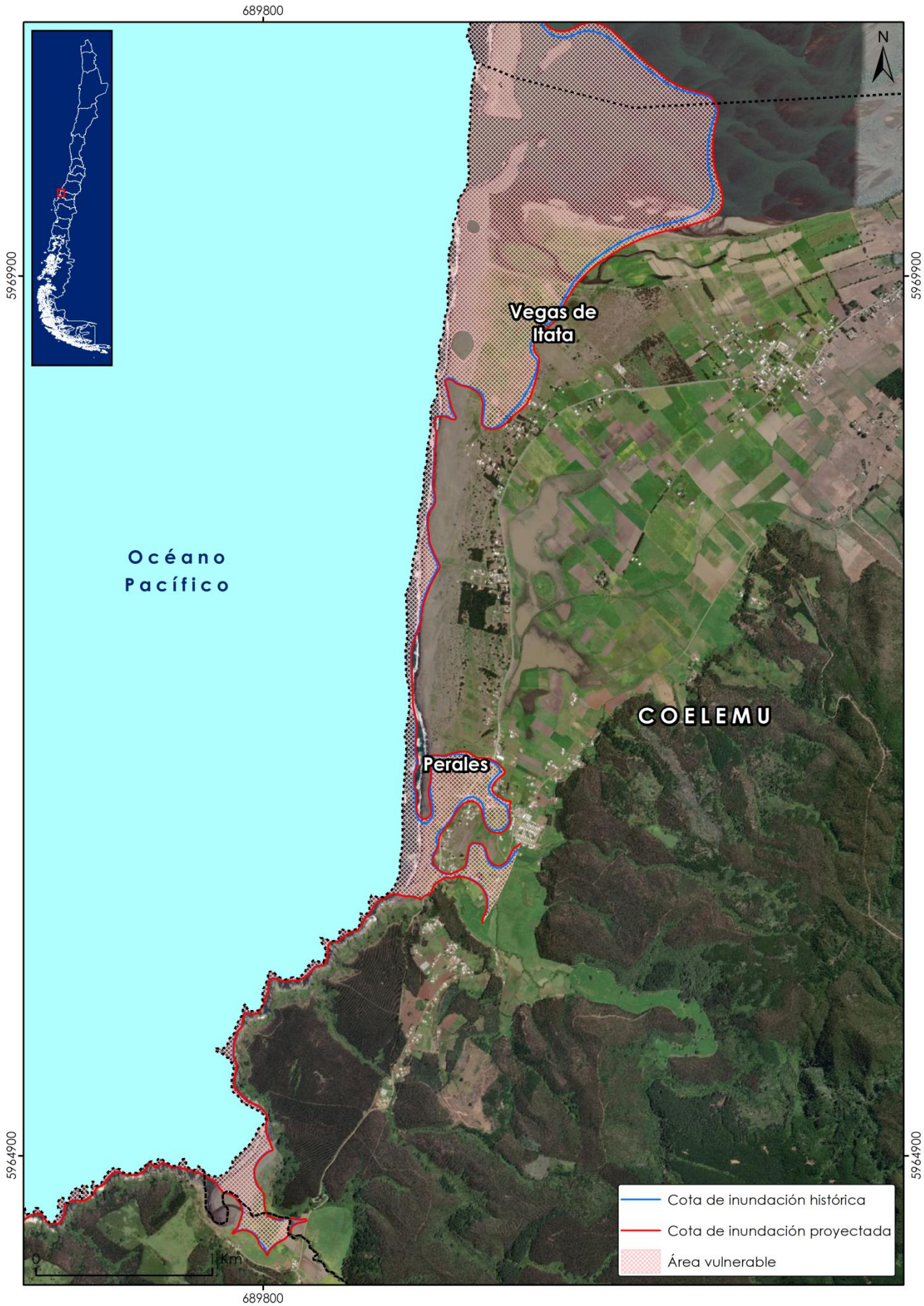
TREGUACO

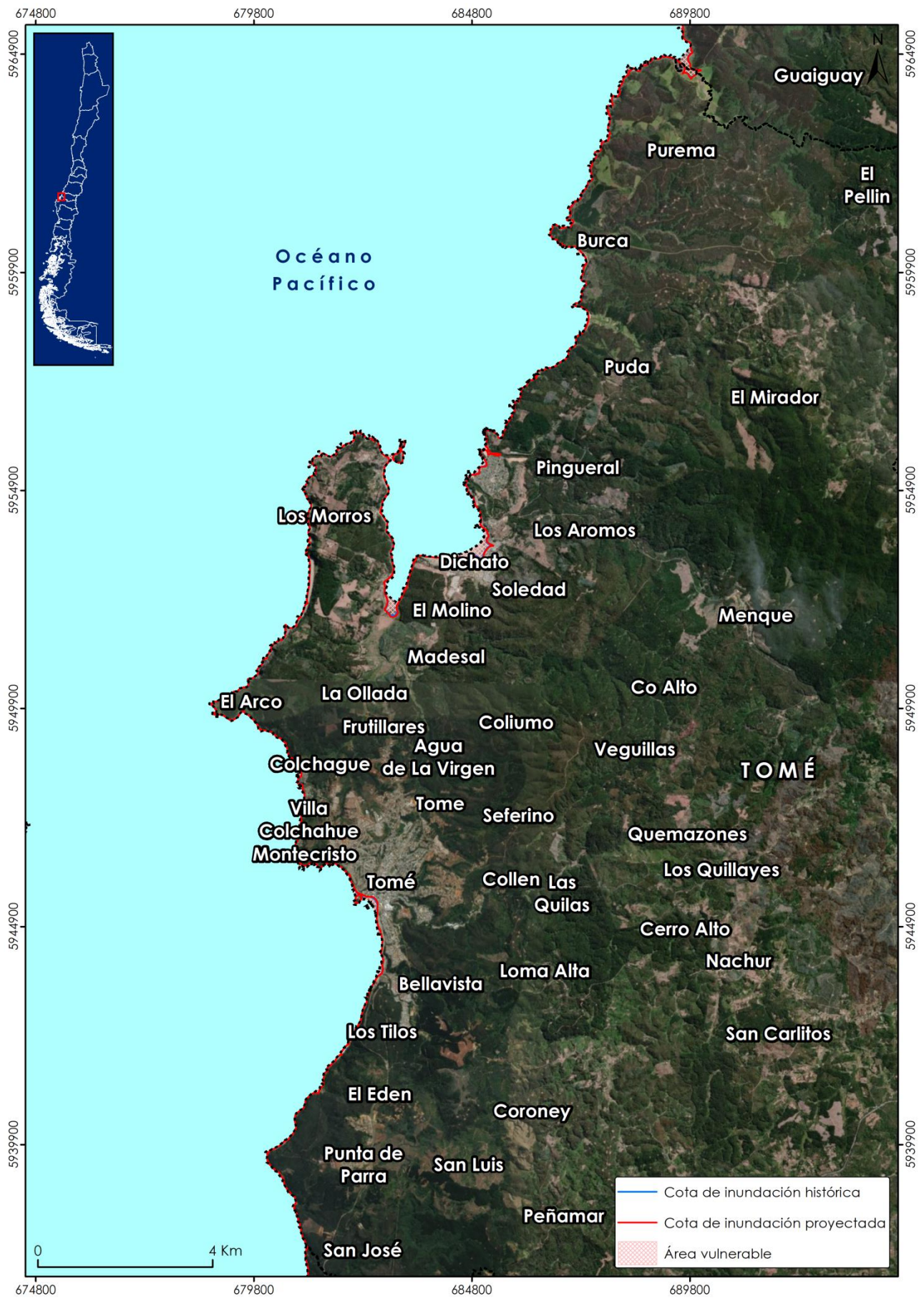
Boca Itata

0 Km

- Cota de inundación histórica
- Cota de inundación proyectada
- Área vulnerable







- Cota de inundación histórica
- Cota de inundación proyectada
- Área vulnerable

0 4 Km

674800
5964900
5959900
5954900
5949900
5944900
5939900

679800
684800
689800

5964900
5959900
5954900
5949900
5944900
5939900

Océano
Pacífico

Guaiquay

Purema

El
Pellin

Burca

Puda

El Mirador

Pingual

Los Aromos

Dichato

Soledad

El Molino

Menque

Madesal

Co Alto

El Arco

La Ollada

Frutillares

Coliumo

Veguillas

Colchague

de La Virgen

TOMÉ

Villa
Colchahue

Tome

Seferino

Quemazones

Montecristo

Tomé

Collen Las
Quilas

Los Quillayes

Cerro Alto

Nachur

Bellavista

Loma Alta

San Carlitos

Los Tilos

El Eden

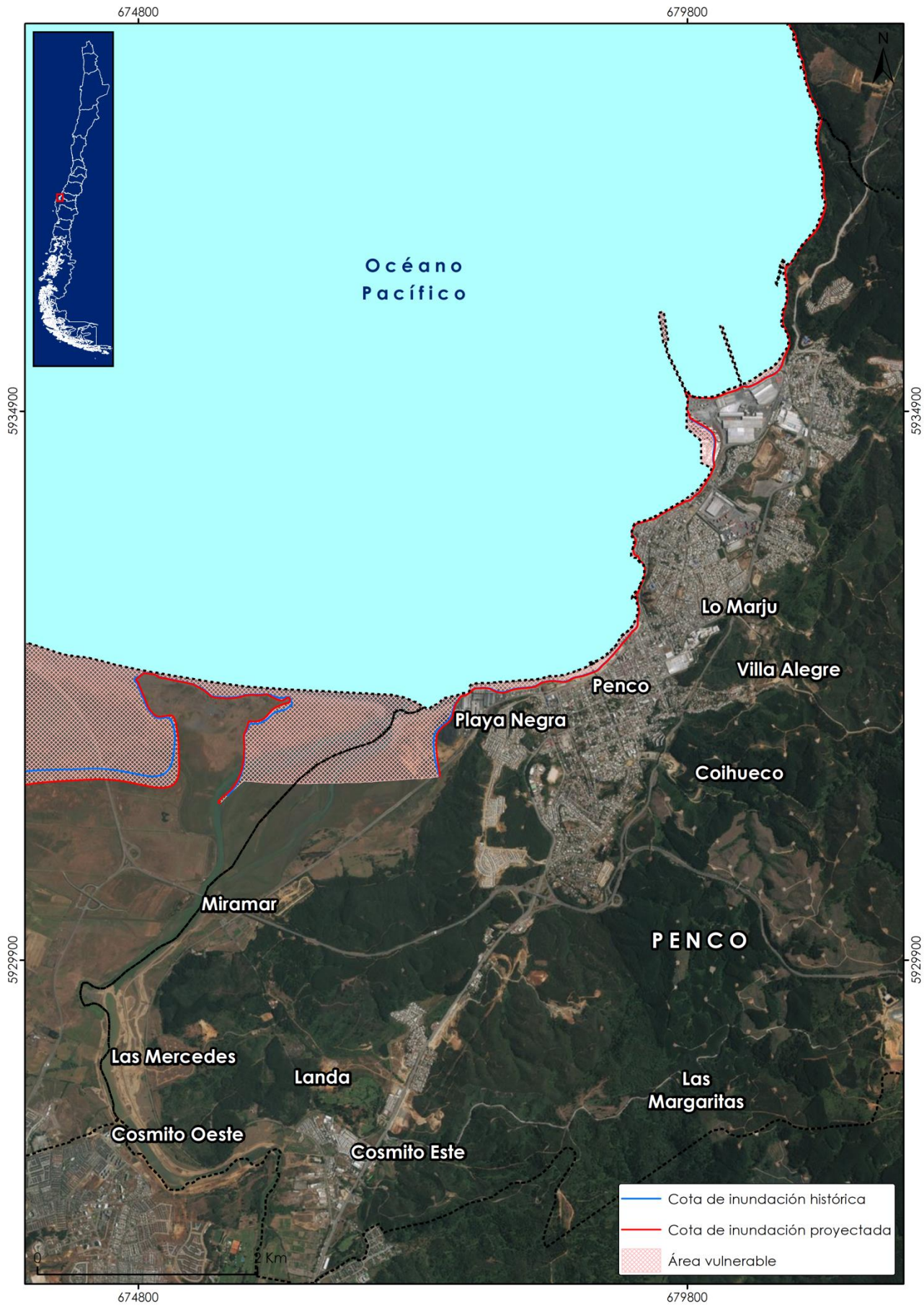
Coroney

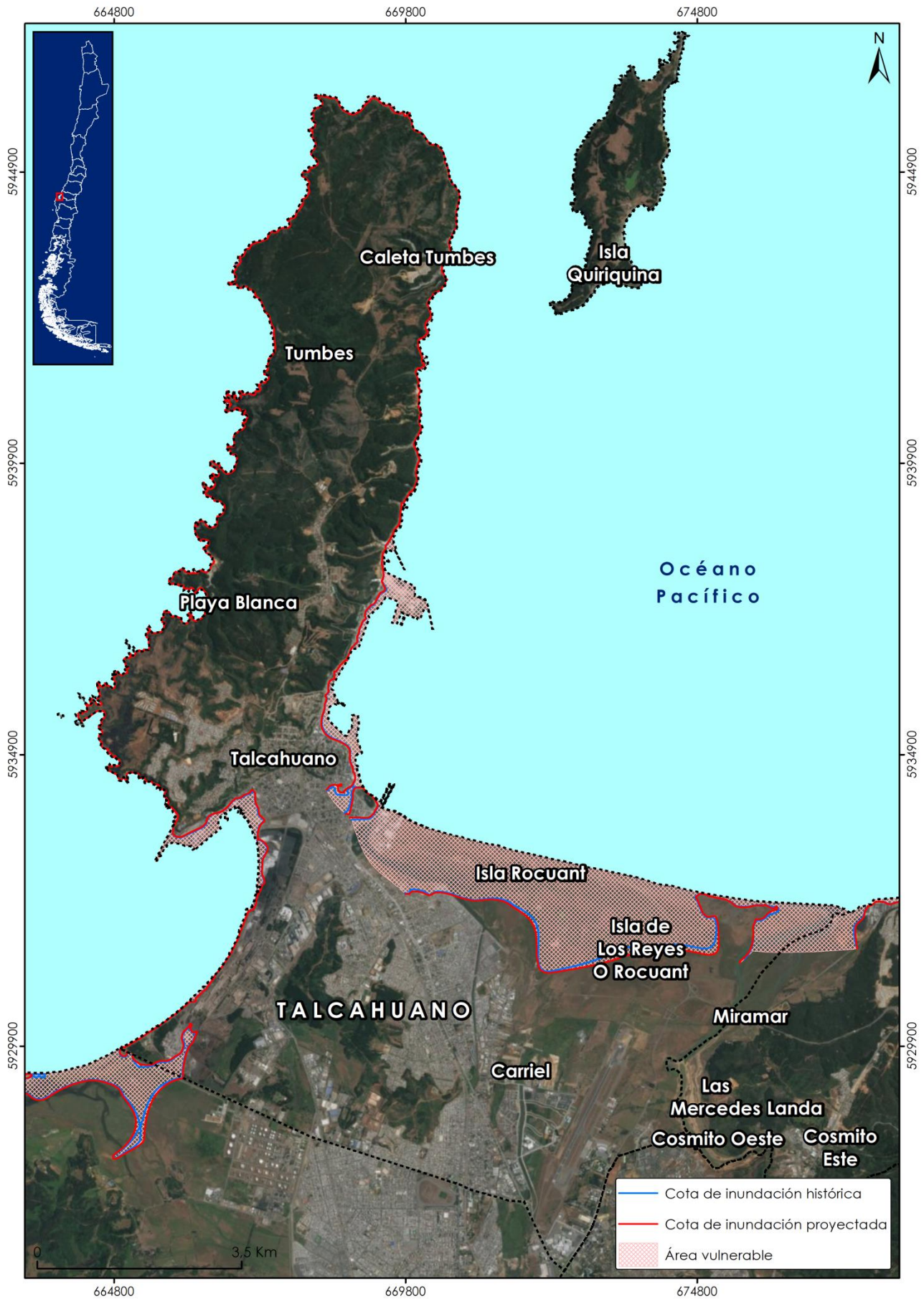
Punta de
Parra

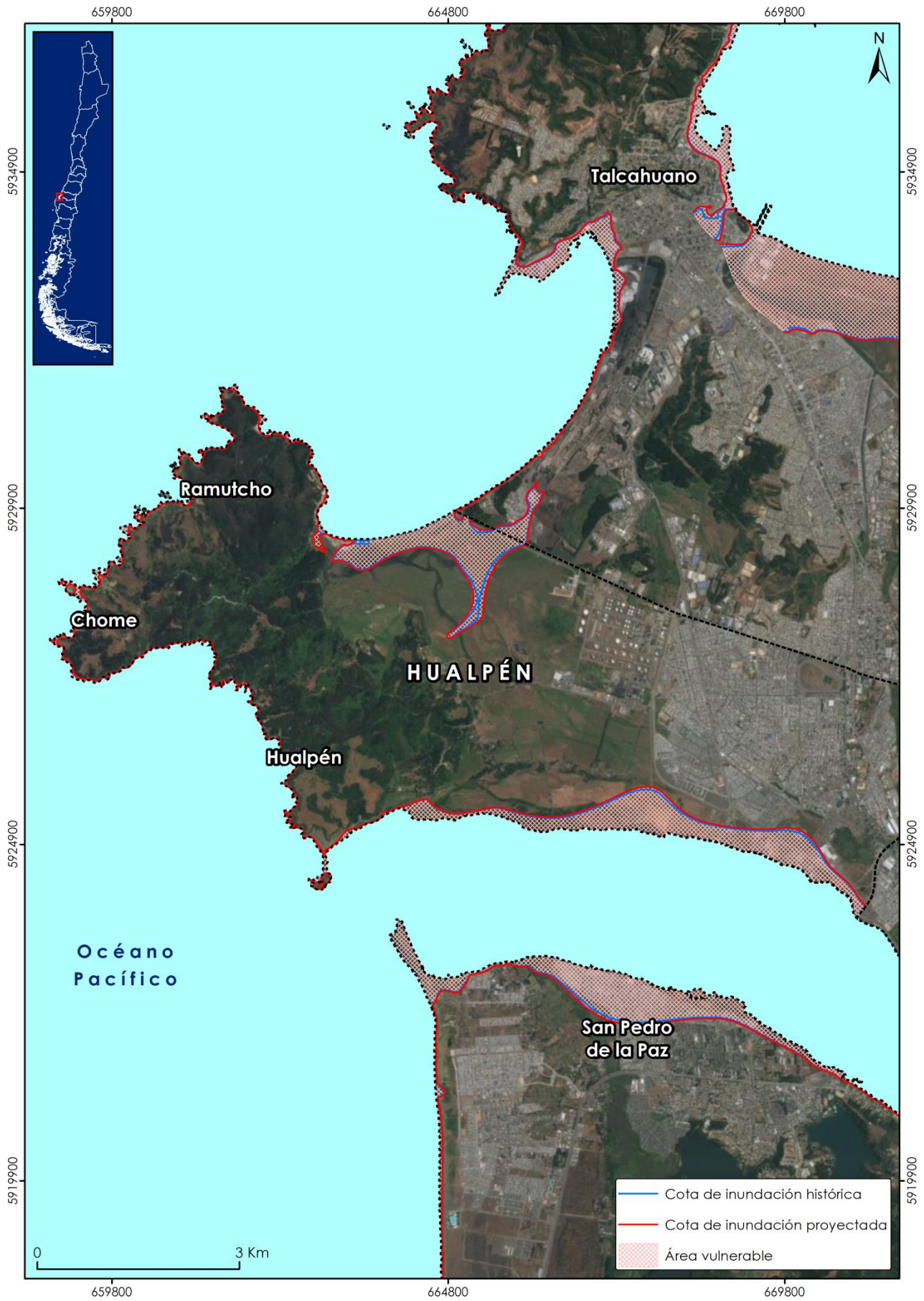
San Luis

Peñamar

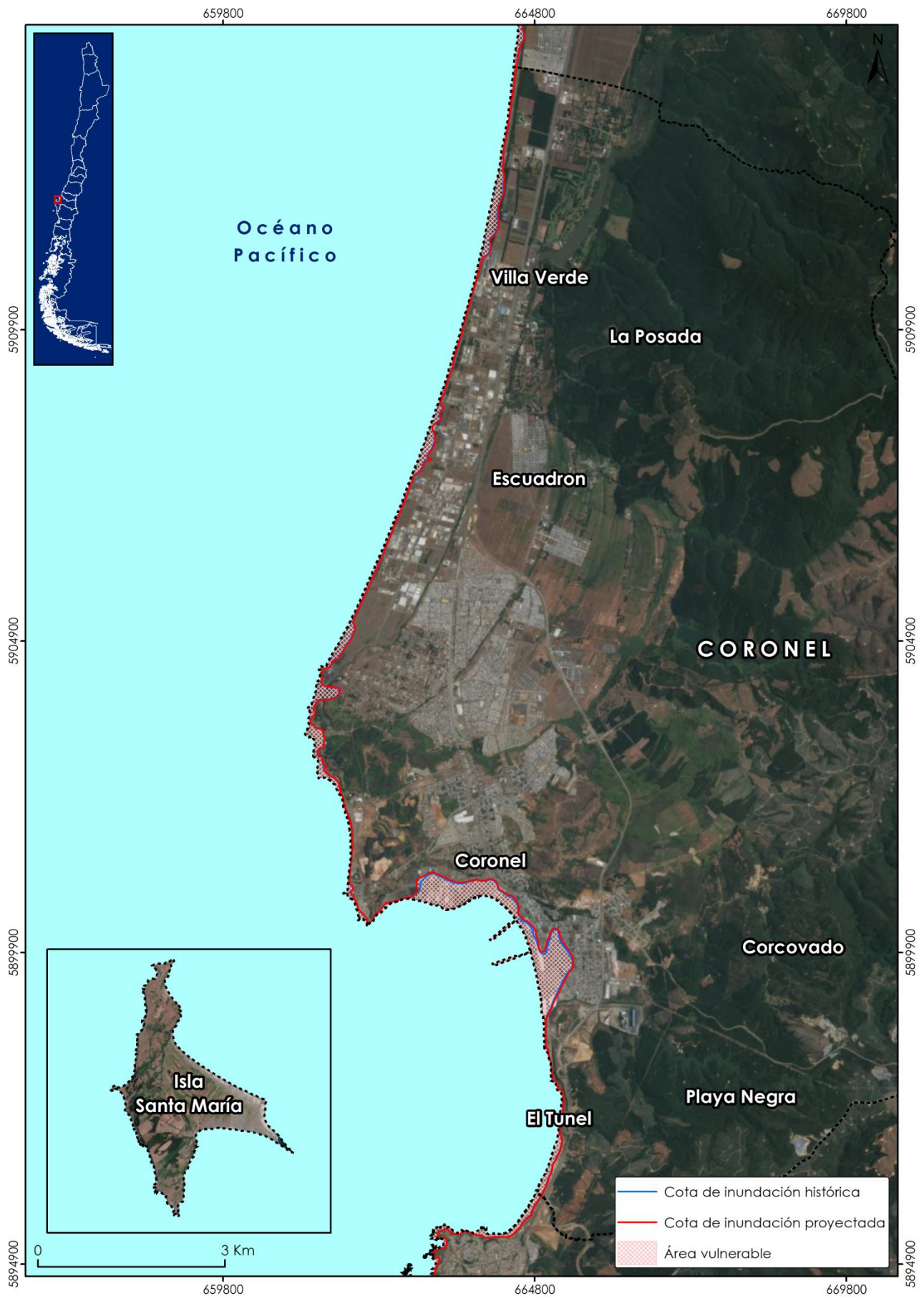
San José

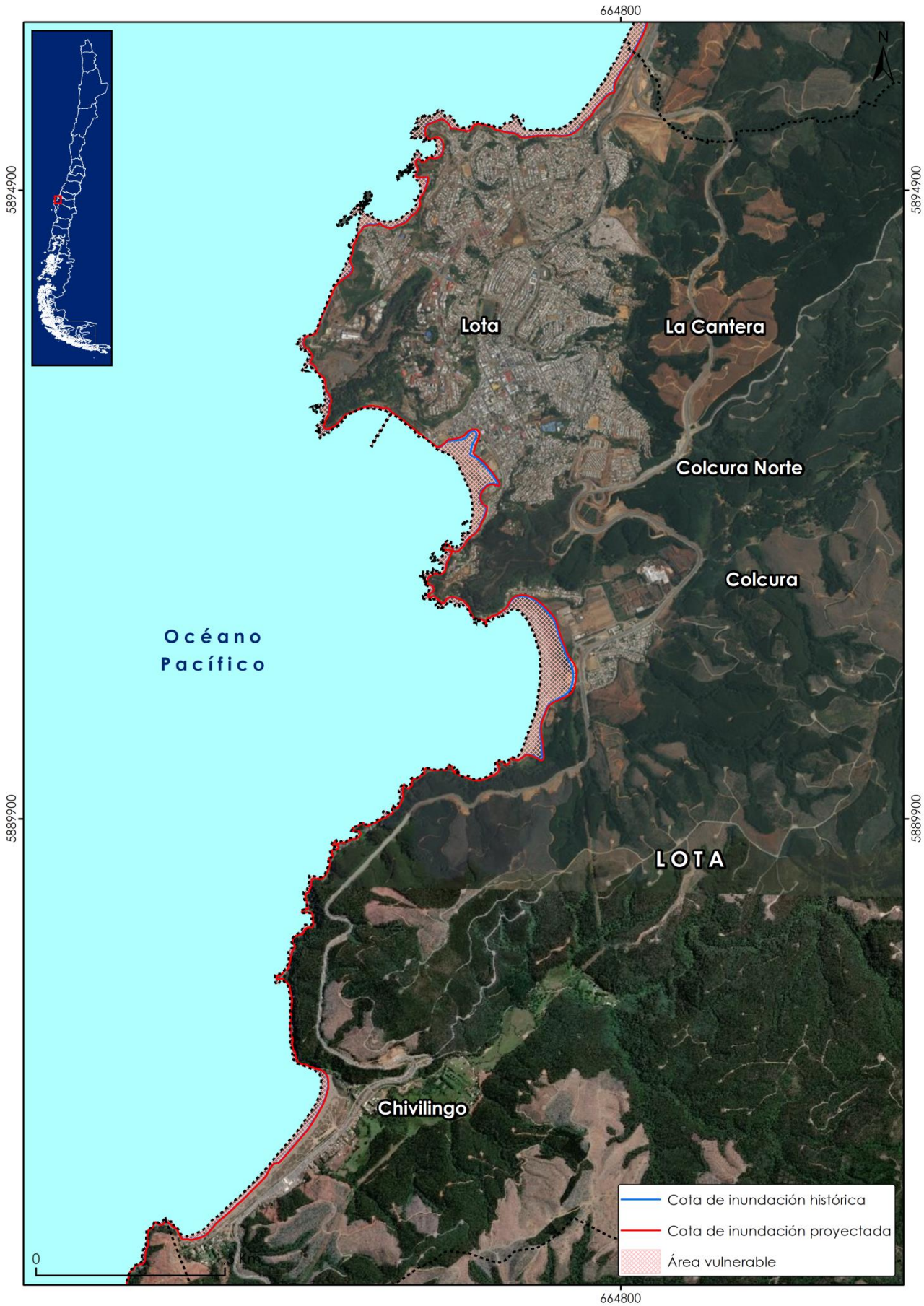


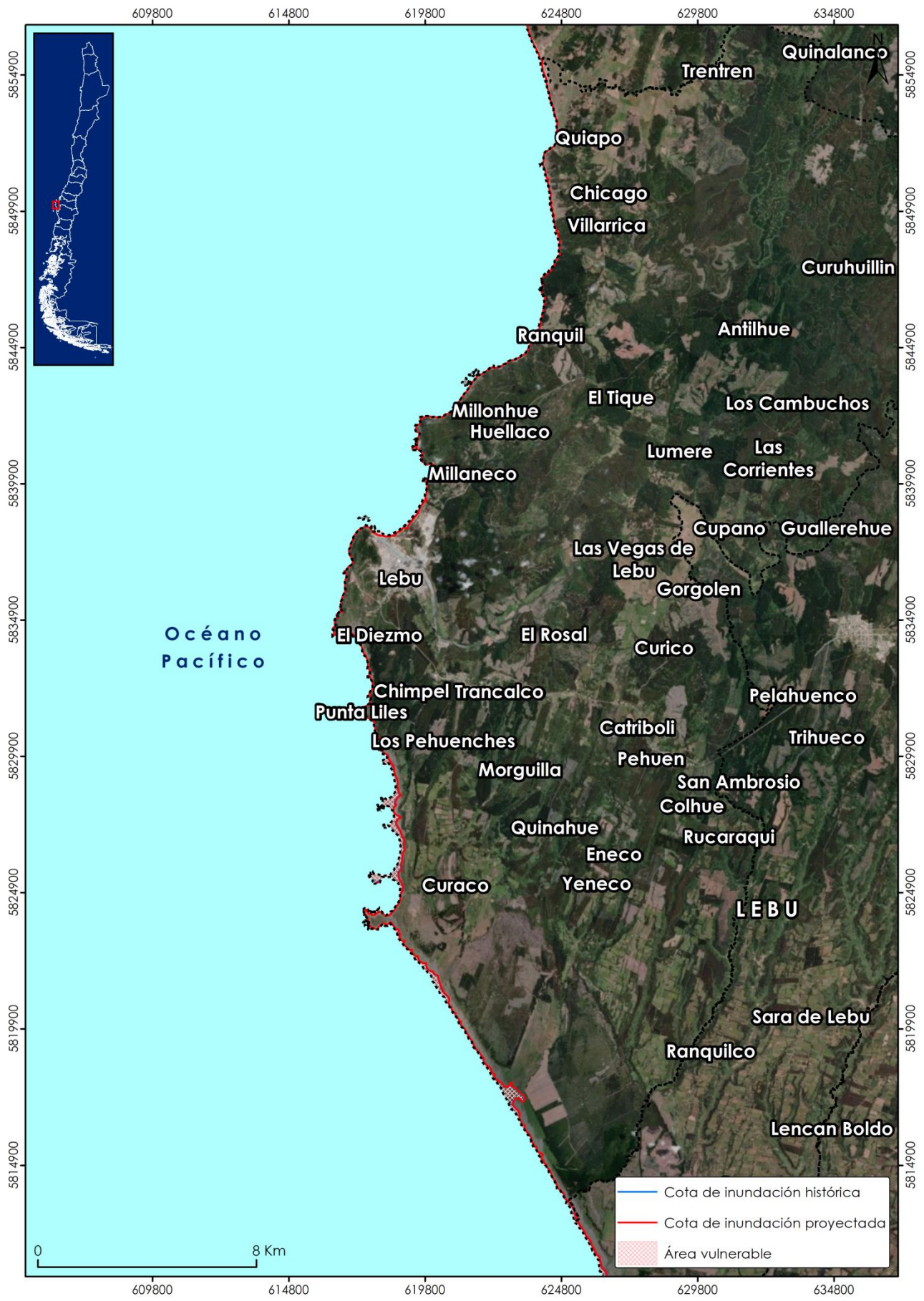


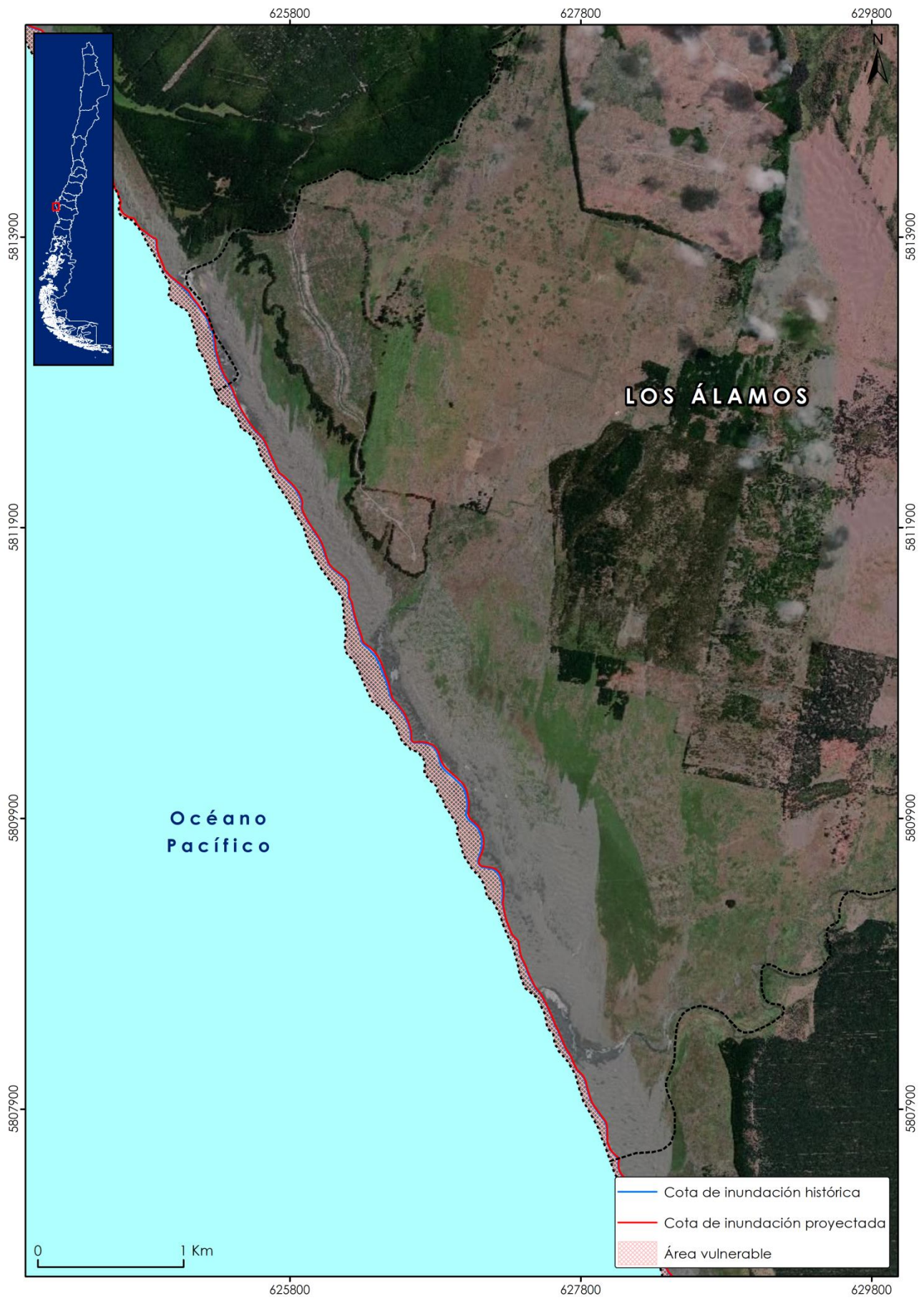












625800

627800

629800

5813900

5813900

5811900

5811900

5809900

5809900

5807900

5807900

Océano
Pacífico

LOS ÁLAMOS

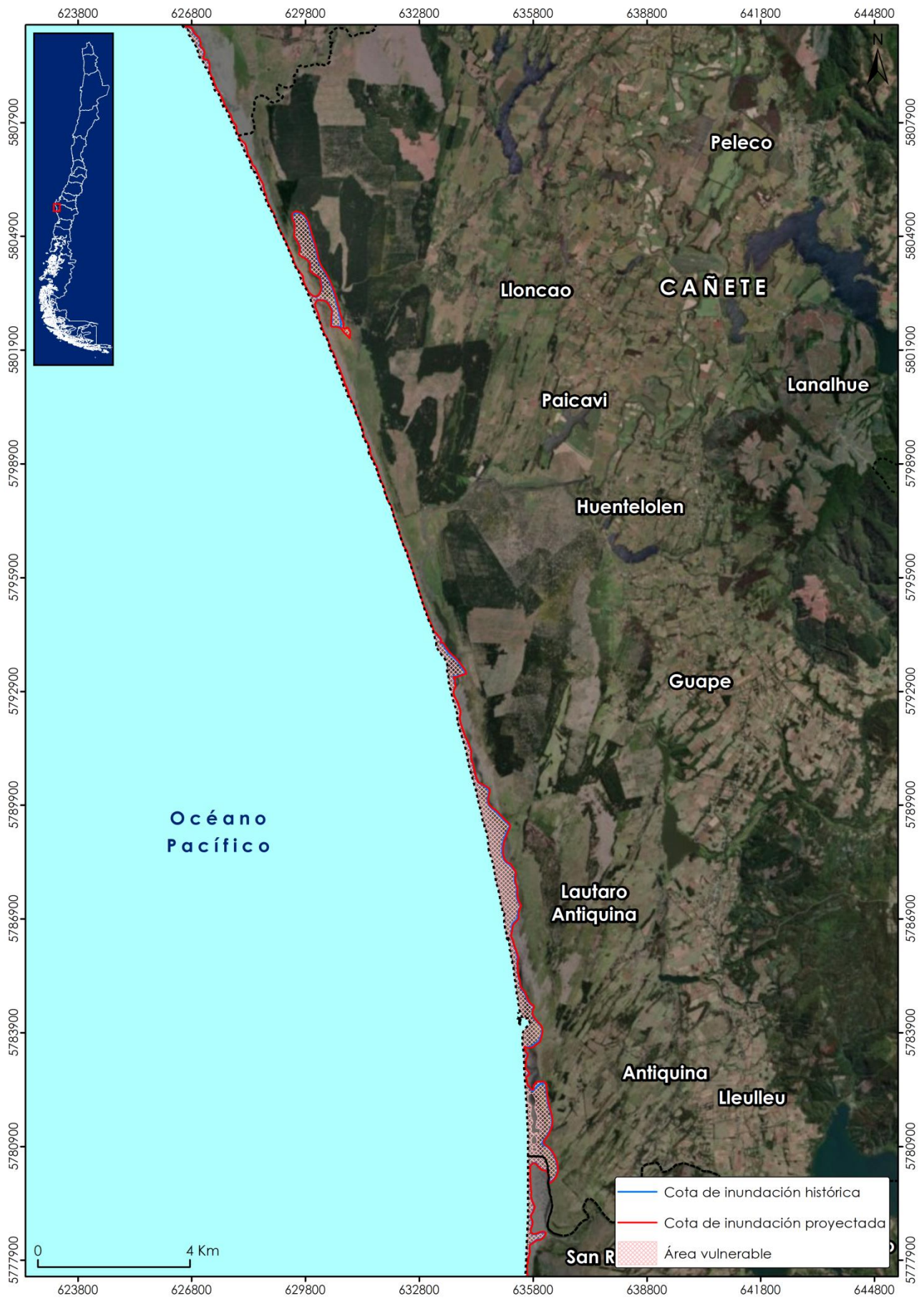
0 1 Km

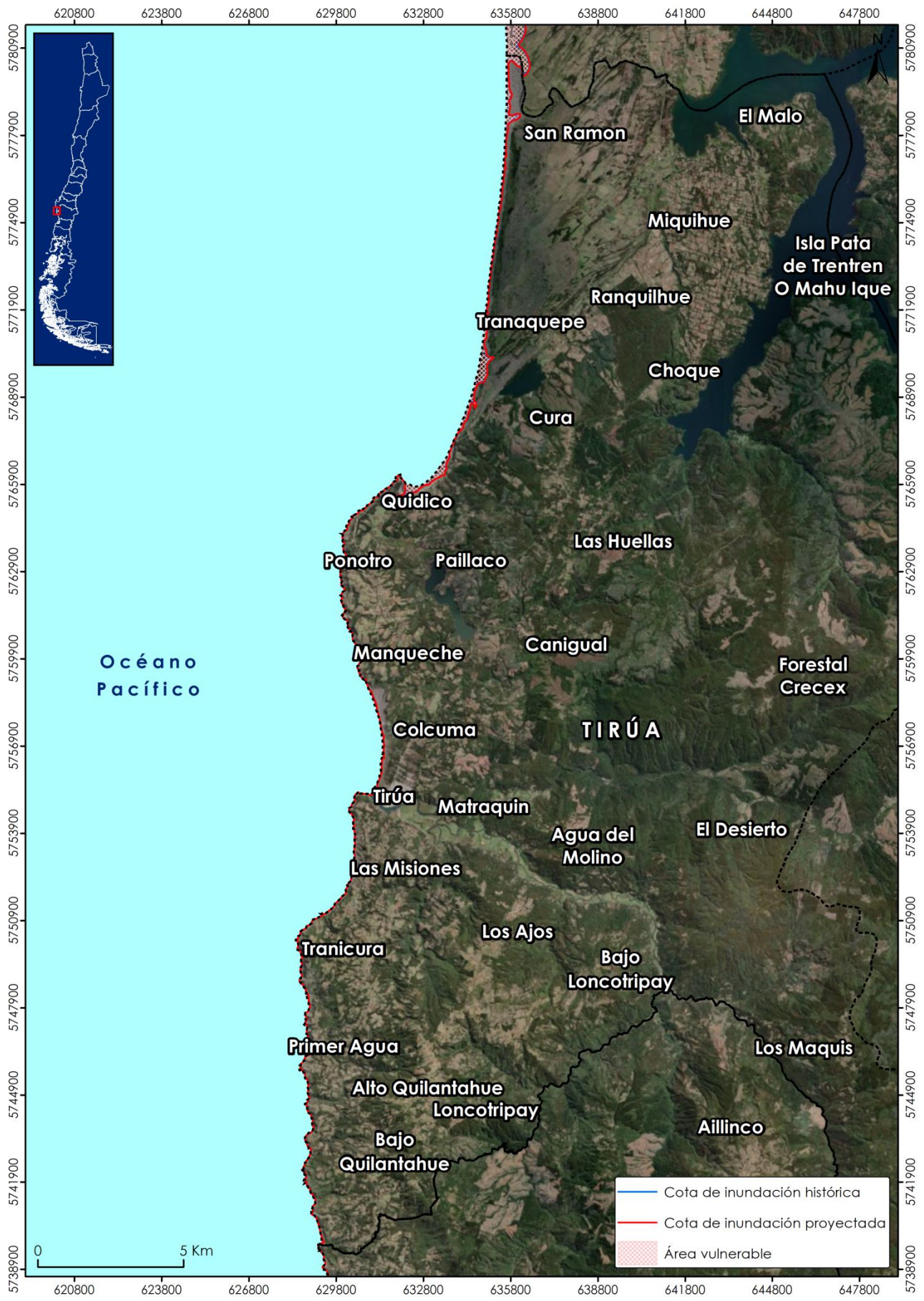
- Cota de inundación histórica
- Cota de inundación proyectada
- Área vulnerable

625800

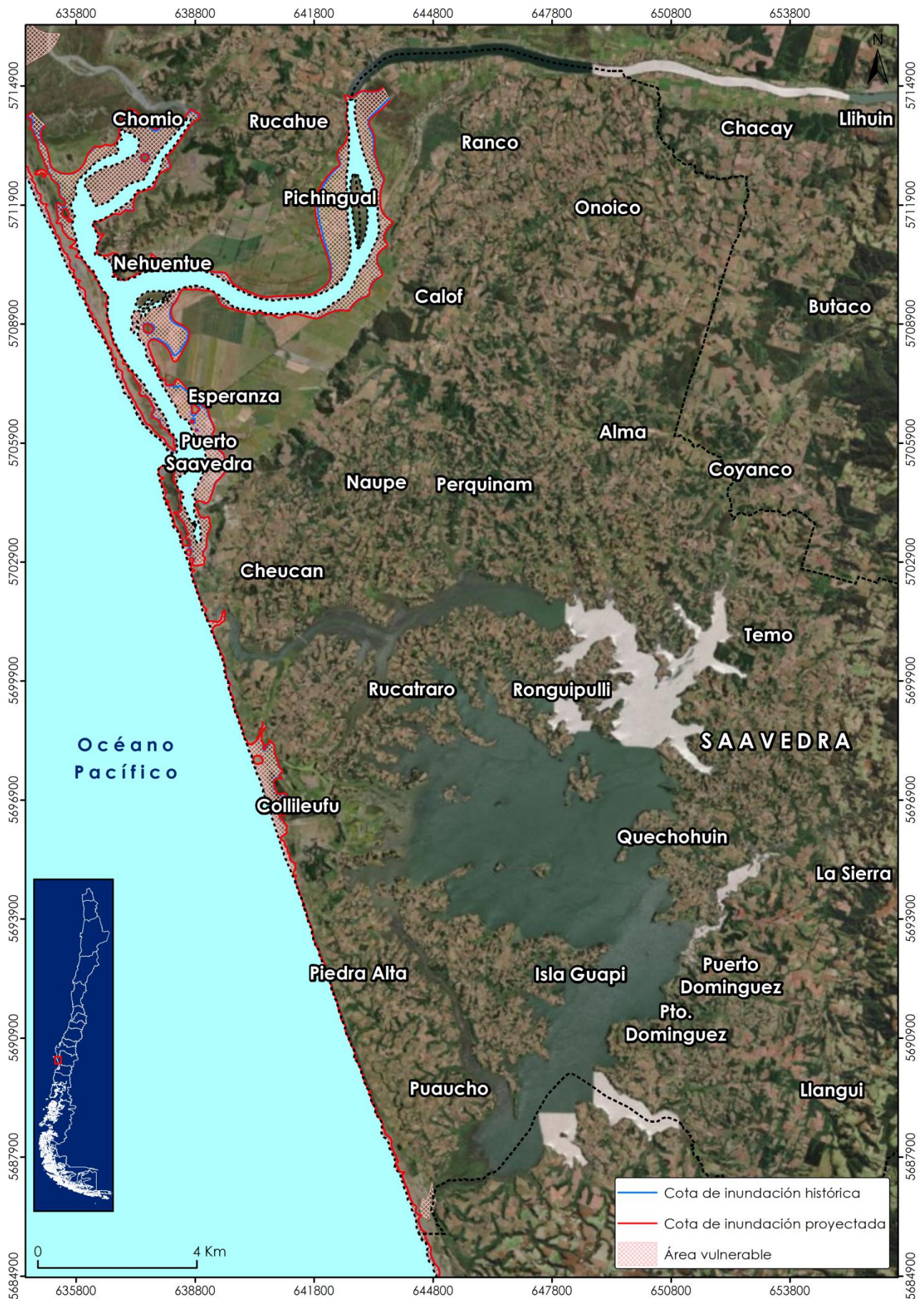
627800

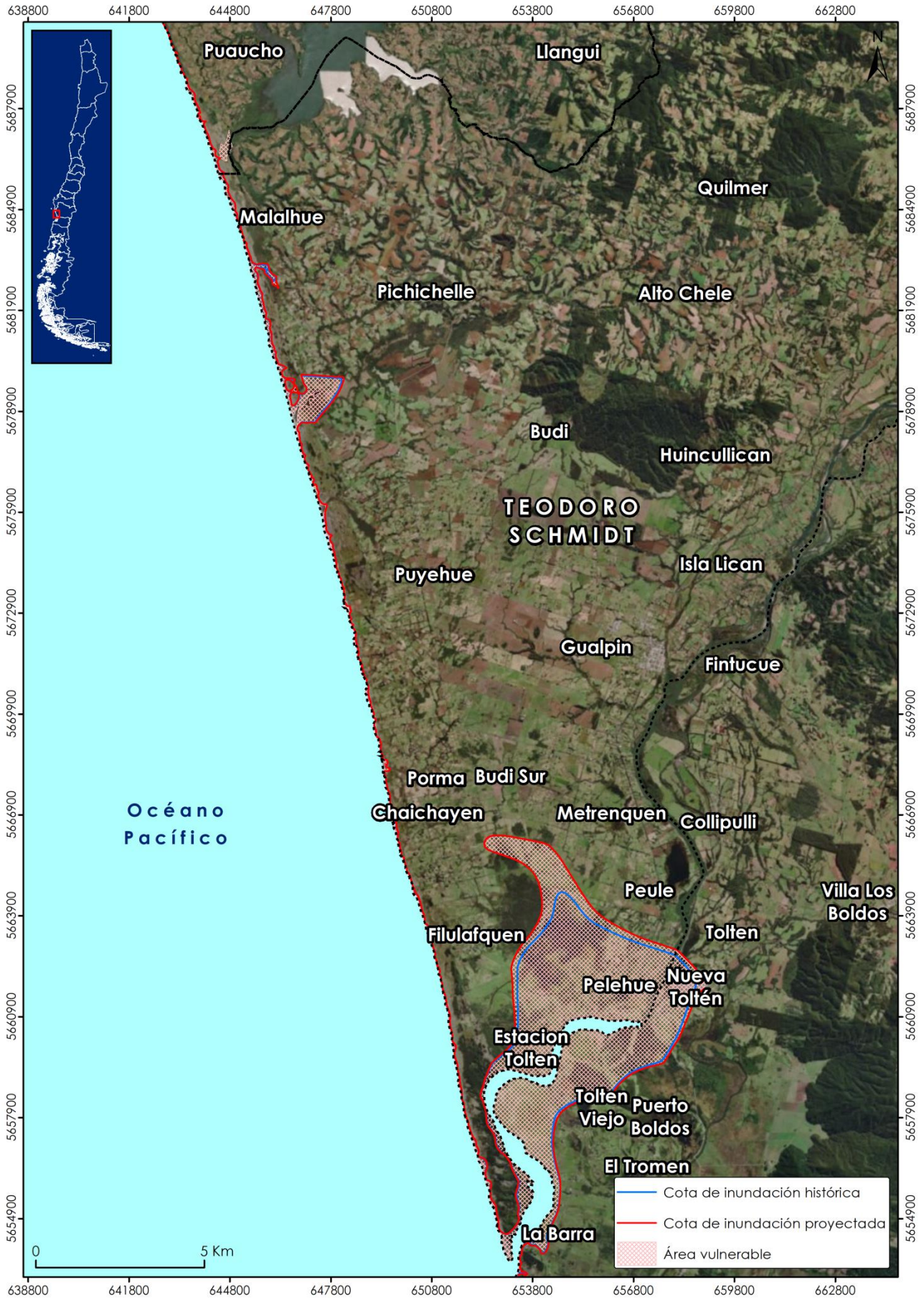
629800

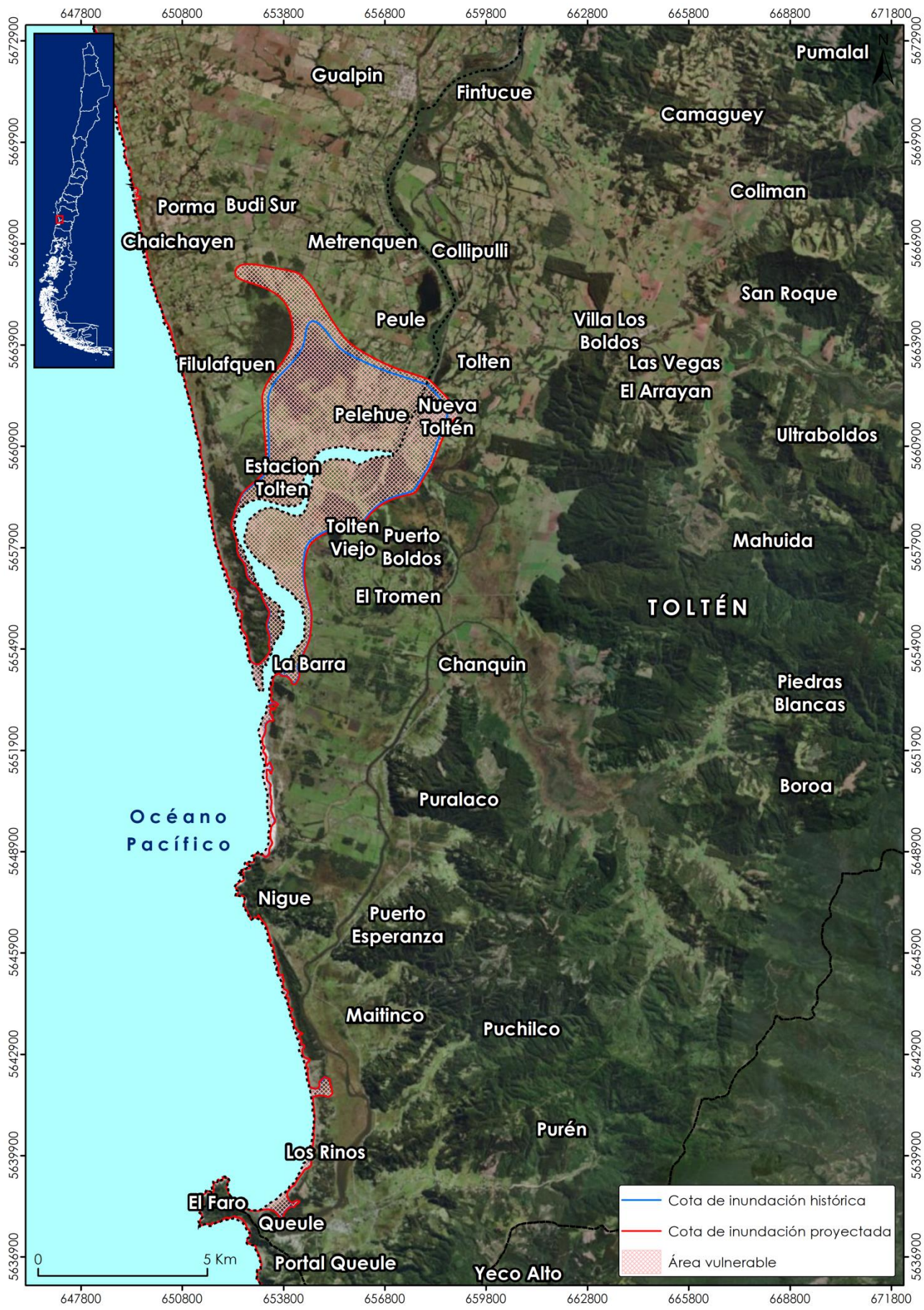




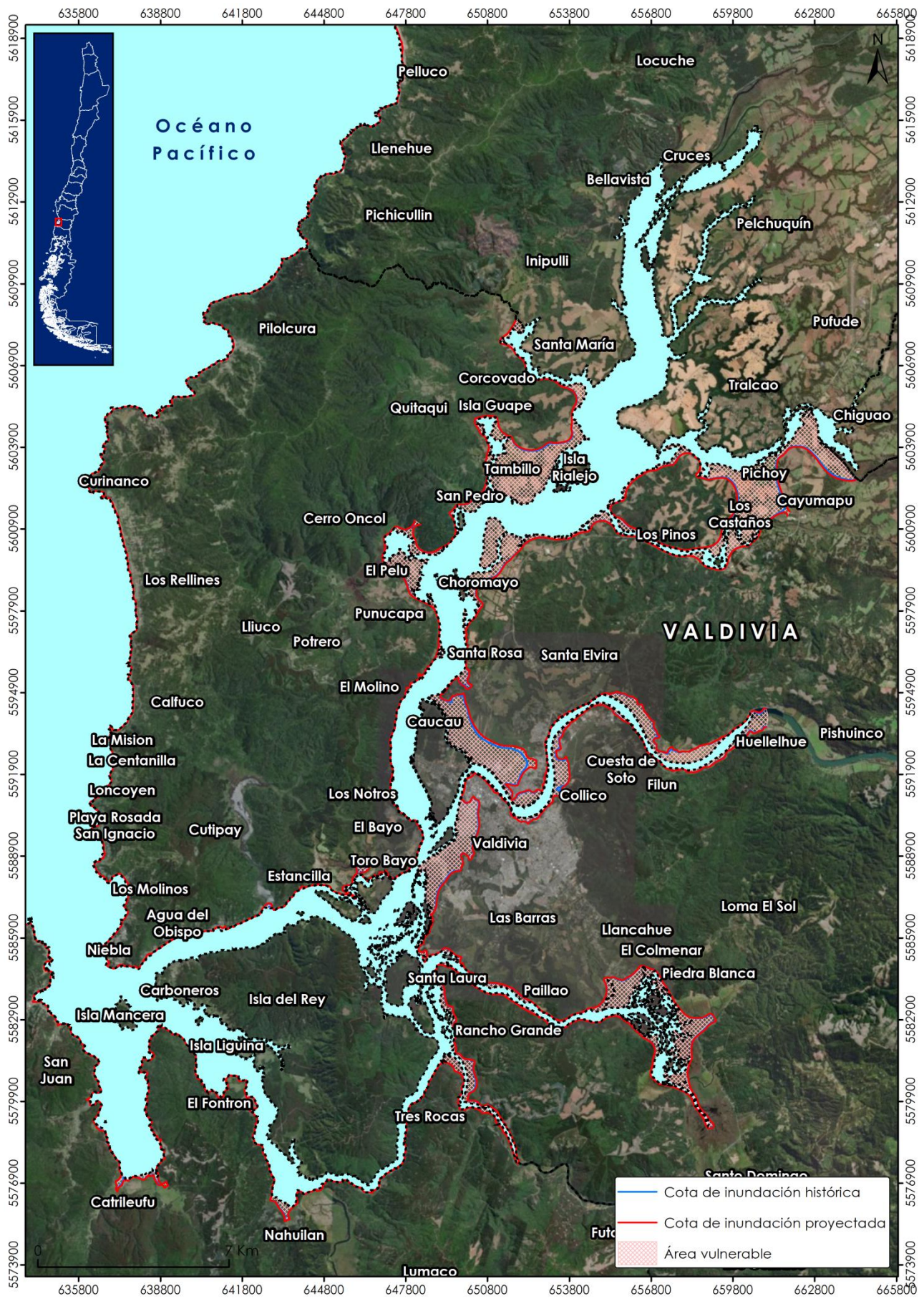


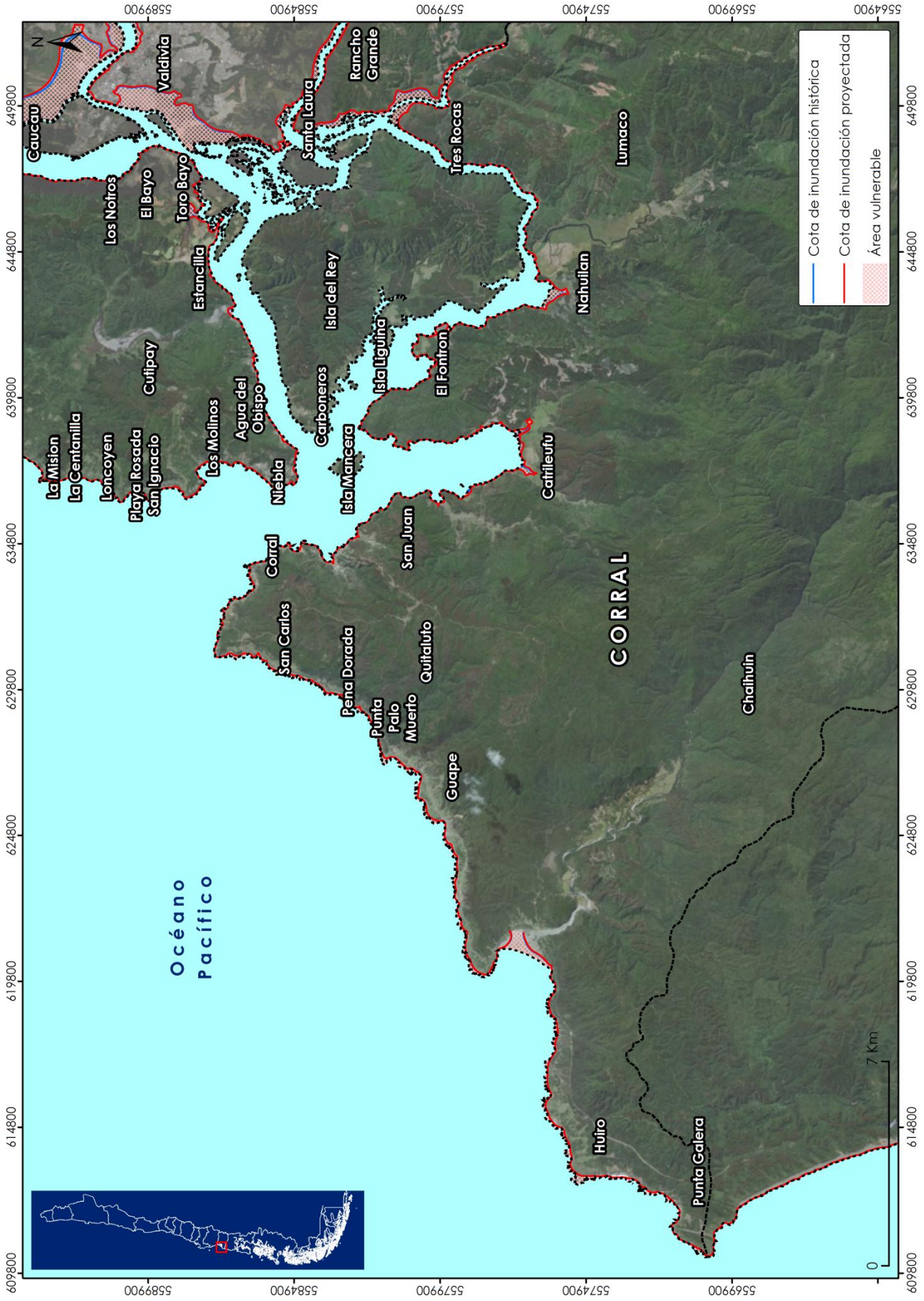


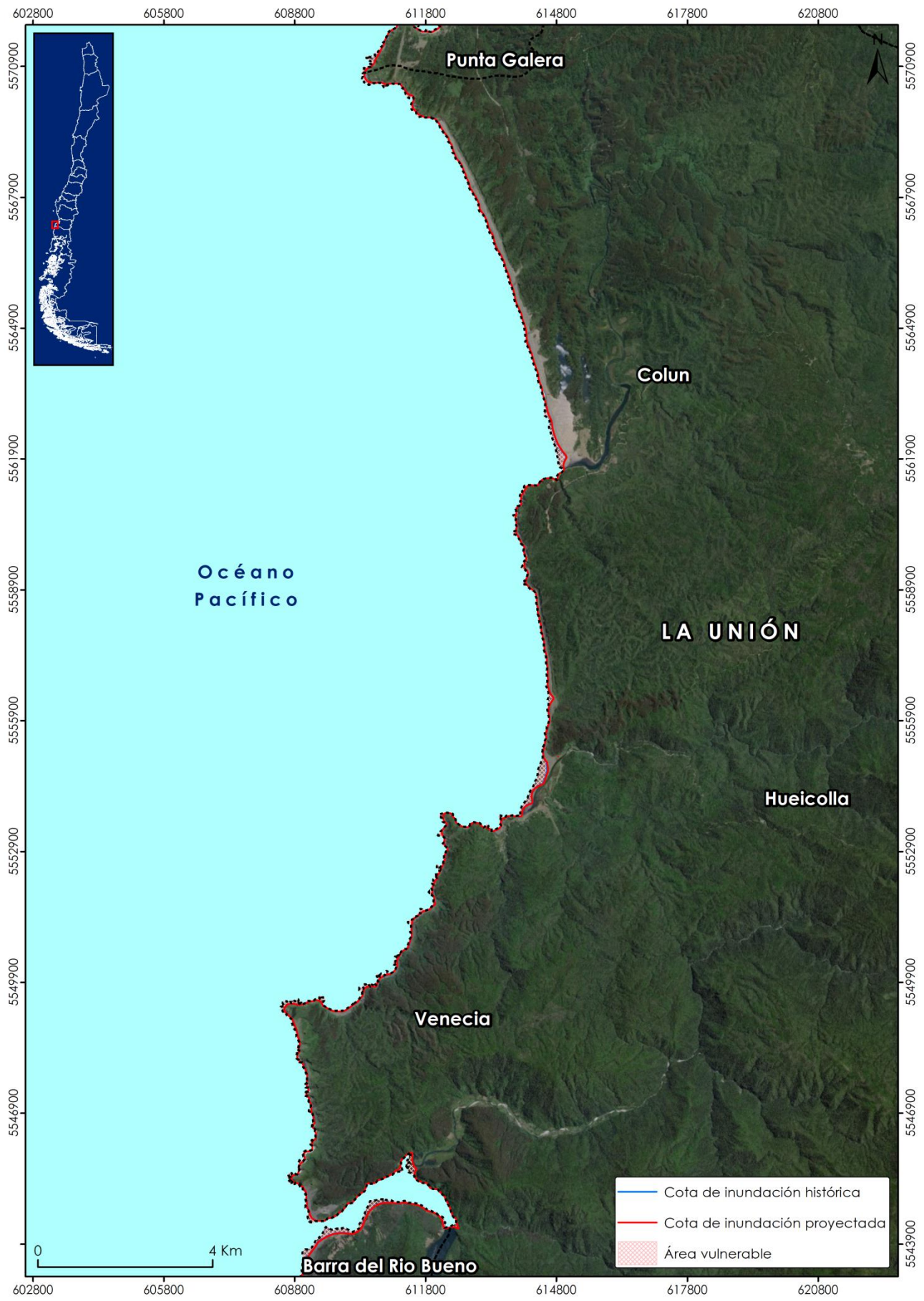












Océano
Pacífico

Punta Galera

Colun

LA UNIÓN

Hueicolla

Venecia

Barra del Rio Bueno

- Cota de inundación histórica
- Cota de inundación proyectada
- Área vulnerable

0 4 Km

602800 605800 608800 611800 614800 617800 620800

5570900 5567900 5564900 5561900 5558900 5555900 5552900 5549900 5546900 5543900

