



UNIVERSIDAD VIÑA DEL MAR
FACULTAD DE INGENIERÍA, NEGOCIOS Y CIENCIAS AGROAMBIENTALES
MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

Trabajo Final de Grado.

**Propuesta de un plan de gestión territorial sustentable, adaptado a la situación de Cambio Climático,
para la comuna de Petorca, utilizando Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN).**

Magistrante: Andrés Trabal Fernández

Académico/a Guía: Lorena del Pilar Muñoz del Campo

2026

Agradecimiento y dedicatoria

A mi esposa Paula y mi hijo Mateo, por su amor incondicional, su paciencia y su compañía en cada etapa de este proceso, que dieron sentido y equilibrio a las exigencias académicas y personales. A la profesora Lorena del Pilar Muñoz del Campo, por su guía rigurosa, su confianza y el apoyo sostenido que orientó este trabajo desde sus primeros esbozos hasta su formulación final. A la directora del Magíster, Agnes, por su apoyo constante, su presencia atenta y su compromiso con la formación académica y humana que hizo posible culminar este camino en un entorno exigente y, al mismo tiempo, profundamente acogedor.

Resumen

Este Trabajo Final de Grado propone un plan de gestión territorial sustentable para la comuna de Petorca (Región de Valparaíso, Chile), adaptado al contexto de crisis hídrica y cambio climático mediante la implementación de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN). A partir de información secundaria proveniente de organismos públicos (DGA, ODEPA, CIREN, INE), literatura científica y documentos institucionales, se desarrolla un diagnóstico socioambiental y productivo que evidencia una marcada desalineación entre el modelo agroexportador intensivo, centrado en frutales como el palto y los límites ecológicos de la cuenca. Esta situación se manifiesta en una reducción cercana al 50% de los caudales del río Petorca, balances hídricos subterráneos persistentemente negativos, sobreasignación de derechos de agua, degradación del suelo, pérdida de vegetación nativa y fuerte fragmentación del paisaje.

Sobre esta base, se diseña una propuesta de SbN organizada en cuatro líneas estratégicas: restauración ribereña con vegetación nativa, establecimiento de setos multifuncionales en predios agrícolas, infraestructura verde orientada a la infiltración y manejo hídrico, y transición agroecológica. Estas medidas fueron priorizadas espacialmente mediante análisis SIG y articuladas con los actores locales relevantes. La evaluación del potencial ecológico, social y económico, utilizando indicadores comparables con la línea base y alineados con criterios de la UICN y de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, demuestra que las SbN pueden mejorar la infiltración y recarga hídrica, reducir la erosión, aumentar la conectividad ecológica, disminuir la huella hídrica y de carbono del sistema agroproductivo y fortalecer la seguridad hídrica comunitaria. Asimismo, se identifican oportunidades para diversificación productiva, generación de empleo verde y acceso a instrumentos de financiamiento climático.

Si bien se reconoce el carácter exploratorio del estudio y su dependencia de información secundaria, se ofrece un marco metodológico replicable para el diseño y evaluación de SbN en cuencas semiáridas, junto con lineamientos estratégicos para transitar hacia un modelo territorial más resiliente, equitativo y coherente con los límites ecológicos y los compromisos de sostenibilidad del país.

Palabras clave: Soluciones basadas en la Naturaleza; gestión ambiental territorial; escasez hídrica; Petorca; huella hídrica; huella de carbono; restauración ecológica; recarga e infiltración hídrica; resiliencia socioecológica; adaptación al cambio climático; gobernanza del agua; evaluación multidimensional; Objetivos de Desarrollo Sostenible; agricultura sustentable.

Abstract.

This Final Degree Project proposes a sustainable territorial management plan for the commune of Petorca (Valparaíso Region, Chile), adapted to the context of severe water scarcity and climate change through the implementation of Nature-Based Solutions (NbS). Using secondary information from public agencies (DGA, ODEPA, CIREN, INE), scientific literature, and institutional documents, a comprehensive socio-environmental and productive diagnosis was conducted. The results reveal a pronounced misalignment between the intensive agro-export model, dominated by avocado orchards, and the ecological limits of the watershed. This mismatch is reflected in an approximate 50% reduction in river flows, persistent negative groundwater balances, over-allocation of water rights, soil degradation, loss of native vegetation, and significant landscape fragmentation.

Based on this diagnosis, an NbS proposal was designed and structured around four strategic lines: riparian restoration with native species, multifunctional hedgerows in agricultural landscapes, green infrastructure to enhance infiltration and water retention, and agroecological transition. These measures were spatially prioritized through GIS analysis and linked to local stakeholders. The ecological, social, and economic potential of the proposal, assessed using indicators aligned with IUCN and SDG criteria, shows that NbS can enhance infiltration and groundwater recharge, reduce erosion, improve ecological connectivity, lower the water and carbon footprint of the agricultural system, and strengthen community water security. Additionally, NbS open opportunities for productive diversification, green employment, and access to climate finance instruments.

Although this study is exploratory and based solely on secondary data, it provides a replicable methodological framework for designing and evaluating NbS in semi-arid basins, as well as strategic guidelines for transitioning toward a more resilient, equitable, and ecologically coherent territorial model consistent with Chile's sustainability commitments.

Keywords: Nature-Based Solutions (NbS); territorial environmental management; water scarcity; Petorca (Chile); water footprint; carbon footprint; ecological restoration; groundwater recharge and infiltration; socio-ecological resilience; climate change adaptation; water governance; multidimensional assessment; Sustainable Development Goals (SDGs); sustainable agriculture.

INDICE

1.-Introducción.	6
1.1.- Objetivo General.	9
1.2.- Objetivos Específicos.	9
1.2.1- <i>Objetivo Específico 1.</i>	9
1.2.2- <i>Objetivo Específico 2.</i>	9
1.2.3.- <i>Objetivo Específico 3.</i>	9
1.2.4.- <i>Objetivo Específico 4.</i>	9
1.3 Limitaciones del Estudio.	9
1.4.- Estructura Desagregada del Trabajo.	10
2.- Antecedentes.	13
2.1.- Caracterización Geográfica y Socioeconómica del Área de Estudio.	13
2.2.- Estado del arte.	16
2.2.1 <i>Desarrollo Sostenible y Límites Planetarios.</i>	16
2.2.2.- <i>Soluciones Basadas en la Naturaleza.</i>	16
2.2.3- <i>Vulnerabilidad Climática, Escasez Hídrica y Conflictividad Territorial.</i>	18
2.2.4.- <i>Enfoques Ecológicos del Desarrollo Rural.</i>	18
2.2.5.- <i>Justicia Ambiental y Economía Ecológica.</i>	19
2.3.- Marco Legal.	20
2.4.- Evaluación de Impacto del Proyecto.	21
2.5.- Propuesta y Justificación Territorial.	21
3.-Metodología.	22
3.1.- Descripción de las etapas del método, con sus técnicas y herramientas.	22
3.1.1.- <i>Recopilación de datos espaciales y socioambientales:</i>	22
3.1.2.-. <i>Análisis espacial en ArcGIS Pro 3.5.3:</i>	23
3.1.3. <i>Análisis gráfico y estadístico (R):</i>	24
3.1.4.- <i>Diseño de la propuesta de intervención (SbN):</i>	25
3.1.5.- <i>Evaluación del potencial de la propuesta (indicadores):</i>	26
3.2.- Descripción Metodológica por Objetivo Específico:	27
3.2.1.- <i>Metodología Para Alcanzar el OE1.</i>	27
3.2.1.1.- Tarea 1 Revisión Bibliográfica.	27
3.2.1.2.- Tarea 2 Sistematización de Información.	27

3.2.1.3.- Tarea 3 Identificación y Caracterización.....	28
3.2.2.- Metodología Para Alcanzar el OE2.	28
3.2.2.1.- Tarea 1 Análisis Crítico.	28
3.2.2.2.- Tarea 2 Evaluación de Datos.....	28
3.2.2.3.- Tarea 3 Estimación de Huella.....	28
3.2.2.4.- Recopilación de datos	28
3.2.2.5.- Cálculo de la HH:.....	29
3.2.2.6.- Cálculo de la HC:	29
3.2.2.7.- Análisis comparativo e indicadores:.....	30
3.2.3.- Metodología Para Alcanzar el OE3.	30
3.2.3.1.- Tarea 1 Revisión de Prácticas en SbN.	30
3.2.3.2.- Tarea 2 Selección y Justificación.....	31
3.2.3.3.- Tarea 3 Integración de Criterios.	31
3.2.3.4.- Tarea 3 análisis FODA.....	31
3.2.4.- Metodología Para Alcanzar el OE4.	31
3.2.4.1.- Tarea 1 Aplicación de Indicadores.....	32
3.2.4.2.- Tarea 2 Estimación Preliminar.....	32
3.2.4.3.- Tarea 3 Validación del Diseño.....	32
4.-Resultados	33
4.1.- Resultados descriptivos del área de estudio OE1.	33
4.1.1.- Ubicación y contexto geográfico OE1.....	33
4.1.2.- Clima y recursos hídricos OE1.	34
4.1.3 Aptitud Agrológica y Potencial de Uso del Suelo OE1.....	38
4.1.4.- Uso de suelo y actividad socioeconómica OE1.	38
4.1.4.1.- Usos de suelo y pisos vegetacionales.	39
4.1.4.2.- Uso de suelo, vegetación y estructura productiva en Petorca.....	42
4.1.5.- Superficie cultivada y modelos agro-frutícolas OE1.	43
4.1.5.1.-Superficie cultivada vs. aptitud agroclimática por especie	43
4.1.5.2.-Zonas de sobreuso y conflictos asociados.....	44
4.1.5.3.- Erosión y degradación de suelos.	46
4.1.5.4.- Uso de áreas no aptas.	47
4.1.5.5.- Coherencia con sostenibilidad y SbN.....	47
4.1.5.6.- Implicancias para los ODS.....	47

4.1.6.- Disponibilidad y uso de recursos hídricos OE1.	48
4.1.6.1.- Disponibilidad y estado del recurso hídrico superficial.	48
4.1.6.2.- Condición y explotación de los acuíferos subterráneos.	50
4.1.6.3.- Derechos de aprovechamiento de aguas (DAA) y competencia.	50
4.2.- Resultados analíticos OE2.	50
4.2.1.- HH y HC OE2.	51
4.2.1.1.- Metodología y Aplicación a Petorca Metodología de Cálculo de HH	51
4.2.1.2.- Huellas ambientales de la matriz productiva (HH y GEI)	53
4.2.1.3.- HH de cultivos clave	53
4.2.1.4.- Factores GEI-AR5 Petorca.	53
4.2.2.- Indicadores socioambientales OE2.	56
4.2.2.1. Normalización e integración de indicadores socioambientales (1994-2024).	56
4.2.2.2. Análisis multivariado de indicadores integrados (PCO)	59
4.2.2.3.- Datos Clave y Síntesis Histórica de la Crisis Hídrica	61
4.2.2.4.- Análisis Socio-Hidrológico de la Comuna de Petorca: Presiones, Estado y la Urgencia de la Gobernanza Sostenible (1987-2019).	62
4.2.2.5.- Hacia una gobernanza sostenible	63
4.2.3.-Instrumentos de fomento en Petorca y su enfoque SbN/ODS OE2.	69
4.2.3.1.- Propósito y enfoque.	69
4.2.3.2.- Marco de instrumentos (síntesis normativa).	69
4.2.3.3.- Resultados cartográficos por instrumento.	70
4.2.3.4.- Lecturas integradas del conjunto de mapas.	72
4.2.3.5.- Implicancias para la planificación con SbN y ODS.	73
4.3.- Discusión de resultados.	73
4.3.1.- Justificación de la selección de Petorca como área de estudio.	74
4.3.2.- Desalineación Agroclimática y Degradación Ecosistémica	74
4.3.3.- Relación con estudios previos y estado del arte.	74
4.3.3.1.- Conflictos socioambientales y gestión del agua.	75
4.3.3.2.- Crisis humanitaria y conflicto socioambiental.	76
4.3.3.3.- Conflictos ambientales asociados.....	77
4.3.3.4.- Integración de criterios ecológicos, sociales y productivos en el diseño del paisaje. ...	77
4.3.4.- Implicancias para la gestión territorial.	81
4.3.4.1.- Biodiversidad y patrimonio.....	81

4.3.4.2.- Justificación y enfoque territorial.....	81
4.3.4.3.- Patrimonio y presión hídrica.....	82
4.3.4.4.- Lectura desde SbN como líneas prioritarias.....	83
4.3.4.5.- Alineación con ODS y propuesta operativa.....	83
4.3.5.- <i>Enlace con los ODS.</i>	83
5.- Diagnóstico y propuesta de desarrollo.....	88
5.1.- Síntesis diagnóstica para la acción.	88
5.2.- Propuesta de intervención basada en SbN.	91
5.2.1. <i>Restauración ecológica y conectividad: Franjas riparias y corredores biológicos.</i>	91
5.2.2. <i>Infraestructura verde para retención e infiltración hídrica.</i>	92
5.2.3. <i>Transición agroecológica y diversificación productiva.</i>	93
5.2.4. <i>Gestión territorial colaborativa y fortalecimiento comunitario.</i>	93
5.3.- Diseño de la Intervención: Setos Multifuncionales en Sistemas Agrícolas Intensivos.	96
5.3.1.- <i>Fundamentación y diseño ecológico de la intervención.</i>	96
5.3.2.- <i>Beneficios ecosistémicos y productivos.</i>	97
5.3.2.1. Ahorro hídrico y reducción de evapotranspiración.....	97
5.3.2.2. Mayor infiltración y mejora de la estructura del suelo.....	97
5.3.2.3. Control de erosión y estabilización del terreno	97
5.3.2.4. Aumento de biodiversidad funcional	98
5.3.2.5.- Conectividad ecológica del paisaje.....	98
5.3.3. <i>Beneficios socioeconómicos y de gobernanza</i>	98
5.3.3.1. Producción complementaria y diversificación.	98
5.3.3.2. Valor agregado y certificaciones para grandes productores.	99
5.3.3.3. Gobernanza colaborativa y legitimidad social	99
5.4.- Justificación técnica y socioambiental de la propuesta.....	100
5.5.- Evaluación del potencial de la propuesta.....	101
5.5.1. <i>Evaluación del potencial ecológico.</i>	102
5.5.2. <i>Evaluación del potencial social</i>	103
5.5.3. <i>Evaluación del potencial económico</i>	104
5.5.4. <i>Validación de la propuesta según Estándares Globales de la IUCN (2020).</i>	107
5.5.5. <i>Sistema integrado de indicadores para la evaluación del potencial SbN</i>	107
5.5.5.1. Indicadores ecológicos.	108
5.5.5.2. Indicadores sociales.....	108

5.5.5.3. Indicadores económicos.....	109
5.5.6. Síntesis integradora del rendimiento potencial de la propuesta SbN	110
5.5.7. Puntuación integrada y fundamentación técnica.	111
5.5.8.- Evaluación preliminar de la HH y HC de la propuesta SbN.	112
5.5.8.1.- Potencial de reducción de HH.....	112
5.5.8.2.- Potencial de reducción de HC.	113
5.6.- Estrategia de implementación y validación.	114
5.6.1.- Actores locales y gobernanza ambiental.....	115
5.6.2.- Plan de acción y fases de implementación.....	117
5.6.3.- Indicadores de seguimiento y evaluación.	119
6.- Conclusiones.....	121
6.1 Síntesis de hallazgos	121
6.2 Implicancias para la gestión ambiental e institucionalidad territorial	123
6.3 Limitaciones del estudio.....	125
6.4 Proyecciones y líneas futuras de acción	127
7.- Referencias	130

1.-Introducción.

La crisis climática global, caracterizada por un aumento sostenido de la temperatura y fenómenos extremos de acuerdo con el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2023), tiene en la escasez hídrica una de sus expresiones más críticas. En Chile, esta crisis se territorializa de manera ejemplar en la comuna de “Petorca”, donde la convergencia entre una megasequía histórica y un modelo agroexportador intensivo ha generado un colapso sociohidrológico. En un escenario de crisis climática sin precedentes, con incrementos en la temperatura promedio de la superficie de la tierra +1,5°C (IPCC, 2023). El aumento sostenido de emisiones de gases efecto invernadero ha desencadenado fenómenos extremos, como, olas de calor, sequías prolongadas, incendios forestales y pérdida de biodiversidad acelerada, amenazando la estabilidad de los ecosistemas y la seguridad de la población humana (IPCC, 2023; Marquet et al., 2022). Lo que ha llevado tanto a Naciones Unidas, como a la comunidad científica y diversos organismos a promover la necesidad de transitar hacia un modelo sostenible, resiliente y regenerativo, que integre los límites ecológicos del planeta y el bienestar humano (Aguirre, 2025; CEPAL, 2020; Doménech, 2006; IUCN, 2020).

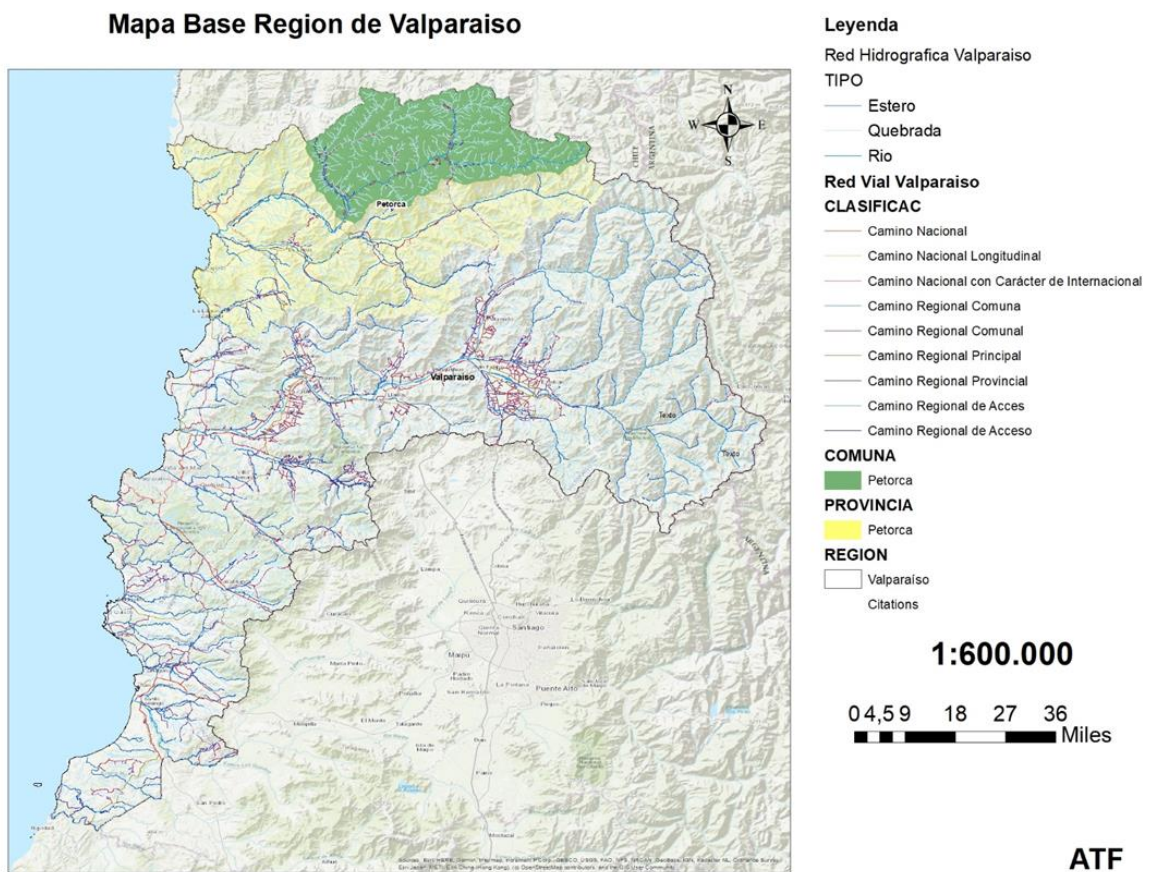
Chile, es considerado un país con altos niveles de vulnerabilidad al Cambio Climático debido a su geografía, su gran diversidad climática y su dependencia de los recursos naturales; a pesar de tener bajas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el contexto global. Sin embargo, debemos destacar que el nivel de emisiones per cápita se encuentra entre los más altos de América Latina, alcanzando 4,27 toneladas por habitante en 2022 (The Global Economy, 2025; Worldometer, 2022). Lo que indica, la necesidad del país a tomar medidas climáticas coherentes con sus compromisos internacionales, ya que además de las emisiones totales, se debe considerar los estilos de vida y actividades productivas para llegar al modelo sostenible.

Asimismo, la persistencia de la mega sequía durante más de diez años ha exacerbado las vulnerabilidades del territorio. Su impacto heterogéneo ha profundizado crisis críticas como la escasez hídrica, la erosión edáfica y las disputas por el recurso hídrico (CEPAL, 2020). En el contexto, el cultivo intensivo de frutales especialmente paltos, cítricos y nogales basado en un modelo agroexportador en la comuna de Petorca, Región de Valparaíso (Chile), se ha transformado en un recurso de alto interés económico. Este modelo ha configurado las zonas de producción como una de las más críticas en términos de conflictos socioambientales, debido al uso intensivo de los recursos naturales, particularmente al alto requerimiento hídrico de estas especies (Bolados, 2016; Panez-Pinto et al., 2018).

Esta estructura productiva ha generado una concentración extrema de la tenencia del suelo y sus recursos: 296 pequeños productores controlan menos de 5 hectáreas cada uno, mientras que apenas 14 productores concentran más de 500 hectáreas de frutales en la zona (ODEPA y CIREN, 2017). La desigualdad resultante ha profundizado la baja cohesión territorial y sinergia entre actores productivos, exacerbando las brechas socioeconómicas, las que se profundizan con los efectos del Cambio Climático. Las proyecciones climáticas indican que las precipitaciones en Petorca disminuirán de 246 mm a 200 mm hacia 2050, acompañadas de un incremento estimado de 2 °C en la temperatura media (Santibáñez y Santibáñez, 2014). Este escenario aumentará significativamente la presión sobre los acuíferos, acelerará la erosión de suelos y profundizará la fragmentación de ecosistemas (Pavez-Pinto et al., 2018), configurando una trayectoria de crisis socioambiental acumulativa.

Figura 1.

Mapa Base de la Región de Valparaíso con la red hidrográfica de Valparaíso y detalles de esta.



***Nota.** Elaborado por, Trabal, A., 2025. *Mapa Base región de Valparaíso* (Mapa). Escala 1:600000. ArcGIS Pro 3.5.3. Creado con datos, DGA, 2020, 2013; Dirección de Vialidad, MOP, 2021; SUBDERE, 2023.

Todo lo anterior, genera impactos ambientales significativos en la zona, resultando, además, una pérdida de cobertura vegetal nativa y la instalación de cultivos en laderas con pendientes superiores al 30%. Esto se observa en el 39% de las plantaciones de frutales, las cuales, incrementan el riesgo de escorrentía superficial y degradación de suelos, disminuyendo la infiltración y afectando la recarga de los acuíferos (Panez-Pinto et al., 2018). En este contexto, los pequeños productores de la zona enfrentan dificultades para sostener su actividad, acceder al agua y mantener una calidad de vida digna, mantener la biodiversidad, entre otros problemas; careciendo de mecanismos efectivos de responsabilidad territorial y sostenibilidad ambiental desde las grandes empresas frutícolas, como responsables de este panorama. En virtud de ello, se considera el uso de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), como acciones que protegen, gestionan o restauran de forma sostenible ecosistemas naturales y modificados, los cuales abordan desafíos sociales como el Cambio Climático, la seguridad alimentaria el riesgo de desastre y a su vez generan beneficios al bienestar humano y la biodiversidad (IUCN, 2020). Estas soluciones promueven una visión integradora de la gestión territorial, donde la infraestructura ecológica y los procesos naturales son utilizados como herramientas efectivas, sostenibles y adaptativas frente a los múltiples efectos de la crisis ambiental.

En contexto de escasez hídrica, degradación de suelo y fragmentación del paisaje, como el que enfrenta la comuna de Petorca; las SbN ofrecen una oportunidad viable al enfoque extractivista y tecnológico, al incorporar en la cotidianidad los servicios ecosistemas como base de resiliencia y desarrollo. Desde esta perspectiva, se propone la elaboración de una estrategia de intervención territorial que establezca directrices para la recuperación ambiental, socioeconómica de la zona, entre otros beneficios, a través por ejemplo de diseño de estrategias de gestión agrícola, creadas para favorecer la conectividad ecológica, proteger zonas de infiltración hídrica y diversificar el uso del suelo.

La intervención territorial de la zona de esta medida será evaluada como una aplicación concreta de SbN, priorizando así, especies vegetales adaptadas a condiciones semiáridas y con potencial ecológico para restaurar la funcionalidad del paisaje. De esta forma, esta iniciativa busca no sólo mitigar los impactos ecológicos, sino también integrar a pequeños y grandes productores mediante un modelo colaborativo que favorezca la cohesión social y socio productiva, la diversificación productiva y el desarrollo sostenible local de los agricultores de la zona de la quinta región.

El presente trabajo se enmarca en el cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos por la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2015); especialmente aquellos vinculados con la sostenibilidad ambiental, el uso eficiente de los recursos naturales y la resiliencia de los ecosistemas. De manera particular, los ODS que se abordan son los

siguientes: 1) ODS 6: “Agua limpia y saneamiento”, 2) ODS 13: “Acción por el clima”, y 3) ODS 15: “Vida de ecosistemas terrestres” y 4) ODS 12: “Producción y consumo responsables”, centrándose en la problemática socioambiental de la cuenca de Petorca, marcada por la escasez hídrica, la presión agroindustrial y la degradación del capital natural. Desde la perspectiva de los pilares de la sostenibilidad, el presente proyecto considera la dimensión ambiental, mediante el análisis de SbN para restaurar y conservar servicios ecosistémicos clave en la cuenca. Así mismo en la dimensión social, al poner énfasis en la participación comunitaria, la equidad en el acceso al agua, los beneficios ambientales, la dimensión económica, al evaluar alternativas de uso del suelo y gestión de recursos, que promuevan una producción más sostenible, diversificada y resiliente ante el Cambio Climático. Este enfoque permite vincular las SbN con la implementación de los ODS a nivel local, tal como se ha propuesto en los informes del IPCC (2019) y estudios recientes que resaltan el potencial de mitigación y adaptación de estas estrategias (Griscom et al., 2017; Marquet et al., 2022; Seddon et al., 2020).

1.1.- Objetivo General.

Proponer un plan de gestión territorial sustentable, adaptado a la situación de Cambio Climático, para la comuna de Petorca, utilizando SbN.

1.2.- Objetivos Específicos.

1.2.1- Objetivo Específico 1.

Diagnosticar el contexto socioambiental productivo de la comuna de Petorca, con énfasis en las condiciones ecológicas, uso del suelo, distribución del recurso hídrico y actores territoriales involucrados.

1.2.2- Objetivo Específico 2.

Analizar las principales problemáticas derivadas del modelo agroexportador intensivo, en relación con escasez hídrica, pérdida de biodiversidad y fragmentación del paisaje.

1.2.3.- Objetivo Específico 3.

Diseñar una propuesta de intervención territorial sustentada en SbN.

1.2.4.- Objetivo Específico 4.

Evaluar el potencial ecológico, social y económico de la propuesta, en función de indicadores de resiliencia, eficiencia hídrica y articulación productiva entre actores locales.

1.3 Limitaciones del Estudio.

Este trabajo adopta un enfoque exploratorio y se basa exclusivamente en el análisis de información secundaria proveniente de literatura científica, informes técnicos, documentos institucionales y datos

oficiales disponibles. Por tanto, no contempla trabajo de campo ni generación de información primaria, lo que implica ciertas limitaciones en cuanto a la validación empírica directa de los supuestos o propuestas planteadas. Asimismo, al tratarse de un estudio de carácter inicial, no se abordan en profundidad aspectos operativos, presupuestarios o normativos que serían necesarios para una implementación territorial concreta. En este sentido, el presente trabajo debe entenderse como una etapa preliminar de diagnóstico y fundamentación, orientada a consolidar una base conceptual y estratégica que permita proyectar una intervención futura en el territorio de manera participativa y situada.

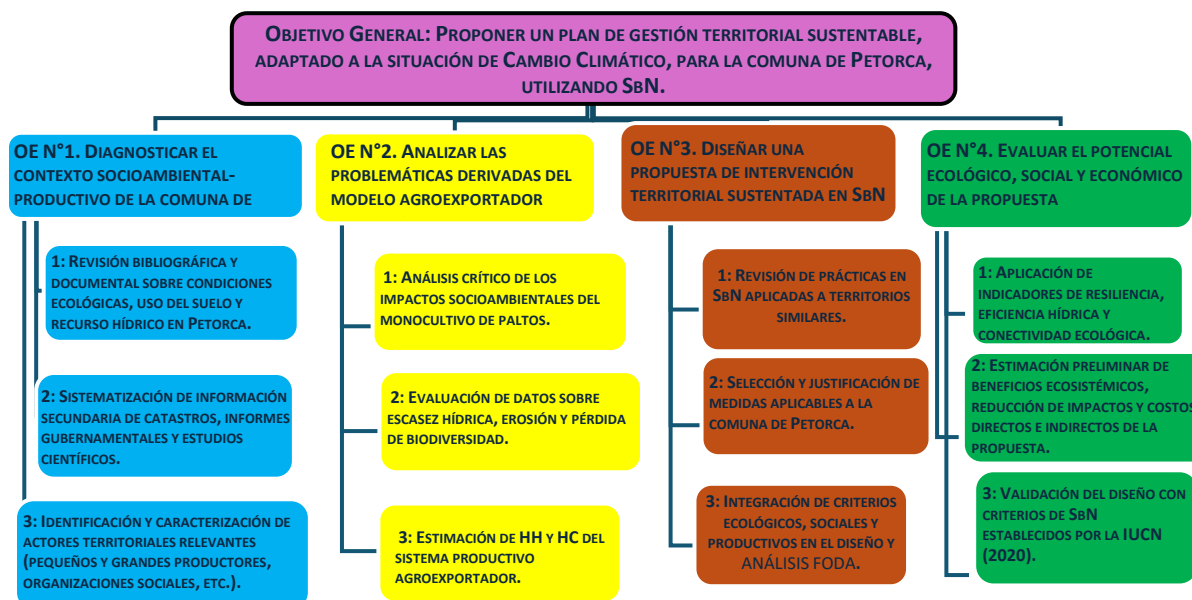
Pese a estas restricciones, el análisis busca ofrecer lineamientos sólidos y coherentes con los marcos actuales de sostenibilidad y adaptación al Cambio Climático, sirviendo como insumo para futuras investigaciones aplicadas o diseños de políticas públicas a escala local.

1.4.- Estructura Desagregada del Trabajo

En la Figura 2 se presenta un cuadro desagregado que ilustra la estructura general del trabajo, donde se organizan las distintas etapas, tareas y objetivos específicos del proyecto de tesis. A continuación, se ofrece una descripción detallada de cada uno de estos componentes, explicando su propósito, la secuencia lógica en la que se desarrollarán y cómo contribuyen estos, al cumplimiento del objetivo general planteado.

Figura 2.

Estructura desagregada del diseño del trabajo.



***Nota.** Elaborado por Trabal A. 2025.

Además, en la Tabla 1 se detalla la correspondencia entre los Objetivos Específicos (OE), las subactividades del trabajo y ODS e indicadores, con los cuales se alinea el trabajo, y las actividades propuestas, respondiendo a una necesidad de trabajo que evidencia la coherencia del estudio con la Agenda 2030 y con los enfoques de sostenibilidad y gobernanza ambiental aplicados al territorio de Petorca.

Tabla 1. Asociación de los Objetivos Específicos, Aplicación / justificación para el TFG.

ODS asociado	Código Indicador	Nombre del indicador	Descripción	Aplicación TFG Petorca	Objetivo específico al que tributa
ODS 6	6.1.1	Acceso seguro a agua potable (%)	Porcentaje de hogares con acceso continuo y seguro.	Mide inequidad hídrica rural.	OE1
ODS 6 ODS 13	6.4.2 13.1.1	Índice de estrés hídrico (%)	Extracción vs. disponibilidad renovable.	Fundamenta recarga, infiltración y manejo hídrico.	OE1-OE2
ODS 6	6.3.2, 6.6.1	Calidad del agua (ICA superficial/subterránea)	Evaluación química y biológica de cuerpos de agua.	Define zonas de restauración ribereña.	OE1-OE2
ODS 15 ODS 13	15.1.1 15.3.1 15.5.1 15.4.2 13.1.1	Cobertura vegetal nativa (NDVI/NDBI)	Vigor y superficie vegetal vía teledetección.	Mide degradación ecosistémica.	OE2
ODS 15	15.3.1	Superficie anual degradada (%)	Suelos erosionados, compactados o desertificados.	Sustenta restauración y manejo de cuencas.	OE2
ODS 15	15.5.1	Especies nativas y estado de conservación	Nº especies en categoría UICN-MMA.	Prioriza remanentes nativos y conectividad.	OE2
ODS 12 ODS 13	12.2.1 13.1.1	HH agrícola (m ³ /ha)	Intensidad del uso de agua agrícola.	Conecta agroexportación con presión hídrica.	OE1- OE2
ODS 12	12.4.2	Uso de agroquímicos (kg/ha)	Pesticidas y fertilizantes aplicados por superficie.	Evalúa presión sobre suelo y agua.	OE2
ODS 13	13.1.1	Emisiones agrícolas de GEI (CH ₄ y N ₂ O)	Estimación IPCC 2019.	Relaciona agricultura intensiva con mitigación.	OE2
ODS 13	13.1.1	Índice de riesgo climático local	Exposición, sensibilidad y	Petorca como “hotspot” de megasequía.	OE1-OE3

			capacidad adaptativa.		
ODS 8	8.2.1 8.3.1, 8.4.2	Empleo en agricultura de pequeña escala (%)	Empleo no dependiente del monocultivo intensivo.	Mide vulnerabilidad socioeconómica.	OE1-OE2
ODS 9 ODS 13	9.1.1 ,9.5.1, 9.c.1, 13.2.2	Infraestructura hídrica resiliente	Nº de proyectos de adaptación hídrica.	Articula infraestructura verde/gris + SbN.	OE3-OE4
ODS 11 ODS 13	11.3.1 11.6.2 11.b.1 13.2.2	Planificación territorial climática	Actualización PLADECOS, ERD, PRC.	Evalúa coherencia institucional territorial.	OE3
ODS 12	12.5.1	Valorización de residuos orgánicos (%)	Residuos transformados en compost y bioinsumos.	Impulsa economía circular y agroecología.	OE2-OE3
ODS 15	15.4.2	Conectividad ecológica del paisaje	Índices de fragmentación y continuidad.	Prioriza corredores biológicos.	OE2-OE3
ODS 6 ODS 17	6.b, 17.16.1	Participación comunitaria en APR	APR activas con gestión participativa.	Fortalece gobernanza hídrica.	OE3-OE4
ODS 17	17.16.1 17.17.1	Alianzas territoriales interinstitucionales	Colaboraciones municipio academia comunidad.	Permite escalar propuestas SbN.	OE3-OE4
ODS 4 ODS 13	4.7.1 13.3.1	Educación ambiental y formación climática	Personas capacitadas.	Mide apropiación social y replicabilidad.	OE3 - OE4

***Fuente:** Elaboración propia.

2.- Antecedentes.

2.1.- Caracterización Geográfica y Socioeconómica del Área de Estudio.

La Región de Valparaíso se localiza en el centro de Chile continental, con una superficie de 16.396 km², presentando una geografía diversa con zonas costeras, valles interiores y sectores insulares como el archipiélago de Juan Fernández e Isla de Pascua. Su relieve y clima la posicionan como una zona de transición entre el norte semiárido y la zona central, cuenta con cuencas hidrográficas como las de los ríos Petorca, La Ligua y Aconcagua, todas con alimentación nival y pluvial. En el ámbito socioeconómico, es una región densamente poblada (93,9 Hab/km² en 2002), con más del 90% de la población en áreas urbanas, la zona de Petorca tiene la característica de mantener el componente rural, por lo cual, los valles de Petorca y La Ligua concentran actividades agrícolas orientadas a la exportación (paltas, cítricos) a pesar de enfrentar escasez hídrica, sumándose a esto un crecimiento desigual del PIB regional y desafíos sociales como el envejecimiento poblacional y la presión ambiental en zonas costeras industrializadas como Quintero-Puchuncaví (GORE Valparaíso, 2020, Villena et al., 2017). En ese contexto, la comuna de Petorca se ha convertido en un emblema de la crisis hídrica en Chile, donde la escasez de agua combina factores climáticos y de gestión humana. Estudios paleoclimáticos recientes confirman que la megasequía de 2010-2020 ha sido la más extrema y prolongada en al menos 700 años en la zona central (Garreaud et al., 2017). Sin embargo, la falta de agua no se explica solo por la sequía: el sobreuso y mala gestión del recurso hídrico han desempeñado un papel crucial. A partir de los años 1990, se otorgaron masivamente derechos de aprovechamiento de agua a grandes agricultores en Petorca, duplicándose hacia 2000 y aumentando un 1200% hasta 2018 (Muñoz et al., 2020). Las consecuencias sociales y ecológicas de esta situación son severas; ríos que antes eran caudalosos se han convertido en lechos secos, ecosistemas ribereños se degradan y los acuíferos están sobreexplotados. Diversos estudios identifican a Petorca como zona altamente vulnerable al Cambio Climático, proyectando disminuciones sostenidas en precipitaciones y recargas de agua superficial y subterránea (Muñoz et al., 2020). La falta de una gestión integrada de cuencas y la promoción de sistemas productivos poco resilientes (monocultivos intensivos de alto requerimiento hídrico) han acelerado procesos de desertificación, pérdida de suelos fértiles y fragmentación del paisaje agrario (Panez-Pinto et al., 2018).

La creciente desigualdad de la comuna de Petorca se caracteriza por exhibir una estructura altamente desigual en el uso del suelo agrícola, dominada por unos pocos grandes propietarios. En 2023, la comuna de Petorca contaba con 6.678,73 hectáreas frutícolas (principalmente paltos, cítricos y nogales), manteniéndose la tendencia de concentración productiva en rubros orientados a la exportación (ODEPA y

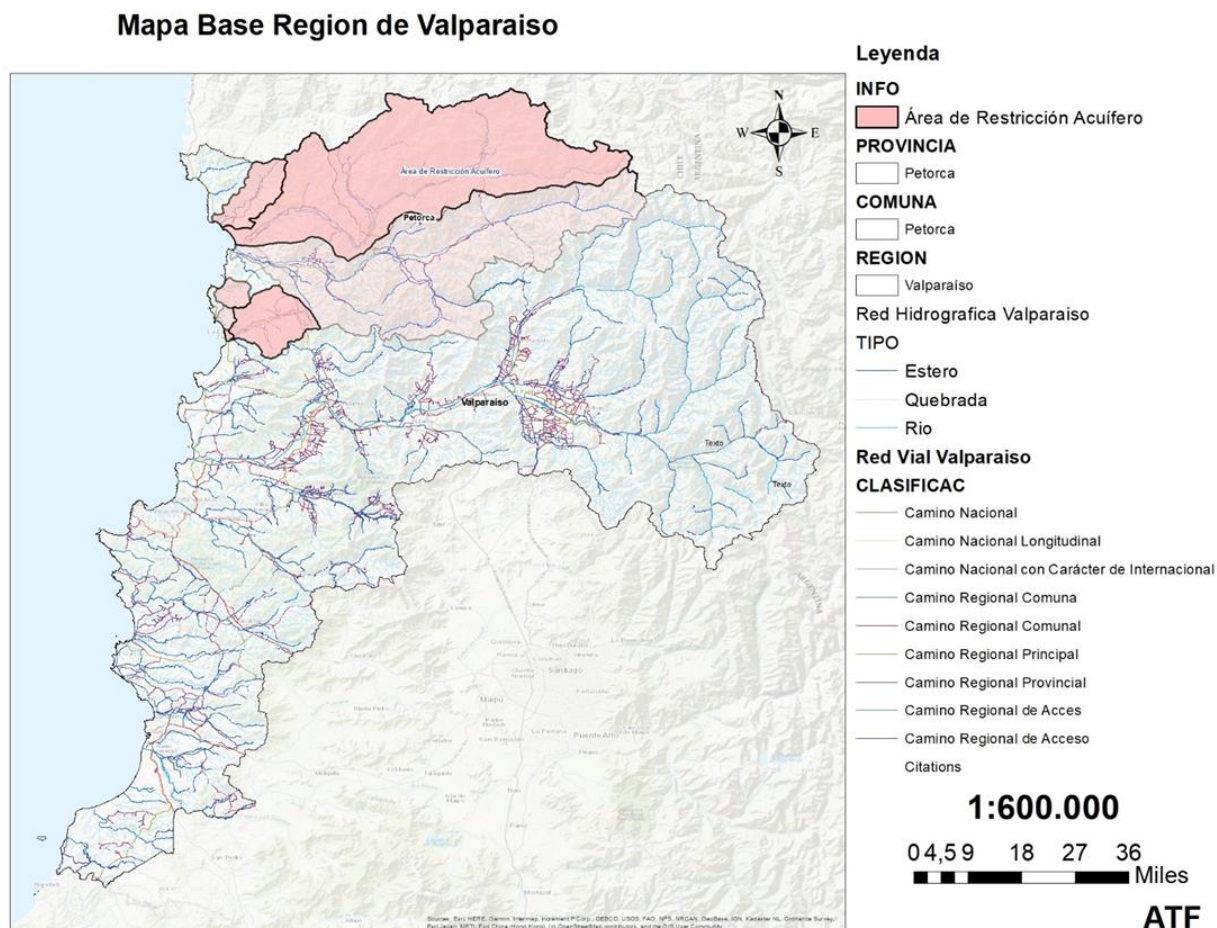
CIREN, 2023). Este patrón productivo, se refleja a nivel regional, ya que la palta sigue siendo el principal frutal de Valparaíso (~20.434 ha correspondido al 62% de la producción nacional de palta), lo que evidencia cómo pocas agroindustrias controlan gran parte del territorio cultivable, reproduciendo tensiones por el acceso a recursos y tierra. En ese contexto, datos del Catastro Frutícola de Valparaíso (ODEPA y CIREN, 2023) muestran que en la comuna de Petorca se registran 346 pequeños productores con menos de 5 hectáreas de propiedad, frente a solo 18 grandes productores con > 500 hectáreas de propiedad. En conjunto, estos grandes agricultores concentran una porción significativa de la superficie frutal comunal (con alrededor de 1.556,65 hectáreas), mientras que todos los pequeños productores sumados apenas alcanzan las ~482,4 hectáreas. Esta distribución desigual de la tierra ha favorecido la expansión del monocultivo de paltos a gran escala, en detrimento de la agricultura familiar campesina. Aunque informes recientes indican que la prolongada sequía forzó cierta contracción de las plantaciones (una reducción de ~30% en la superficie de paltos en Petorca), la hegemonía del modelo agroexportador no ha variado sustancialmente (El Mercurio de Valparaíso, 2023). Con ello, se ha generado un incremento en las concesiones de agua, con registros de agotamiento de las aguas superficiales del Río Petorca al 1997, declarado por la Dirección General de Aguas (DGA), con restricciones a las aguas subterráneas al 2004 (Figura 3).

Por lo cual, muchos de los predios de producción, profundizaron pozos y continuaron extrayendo agua, en ocasiones de forma ilegal. En 2008 y 2018 la DGA recibió 241 denuncias formales por extracciones ilegales en Petorca, reflejo de la débil fiscalización y la competencia por el recurso (Muñoz et al., 2020).

Desde 2018, el gobierno ha debido reiteradamente declarar a Petorca zona de escasez hídrica mediante decretos de emergencia, y más del 20% de la población comunal depende hoy de camiones aljibe para acceder al agua potable, según datos de la propia DGA y el MMA (Muñoz et al., 2020). Esta situación ha agudizado los conflictos socioambientales; comunidades locales, agrupaciones como MODATIMA y activistas como Rodrigo Mundaca (actual gobernador de la región de Valparaíso) llevan más de una década movilizándose denunciando que “no es sequía, es saqueo”. La contracara de esta tragedia hídrica son los cerros cubiertos de paltos: vistos desde lejos permanecen verdes y frondosos incluso en plena sequía, consumiendo la poca agua disponible. No es casualidad que ambientalistas y académicos señalen a Petorca como “el epicentro nacional de la violación del derecho humano al agua” (Le Monde Diplomatique Chile, 2017).

Figura 3.

Mapa de la región de Valparaíso con las restricciones y prohibiciones de acuíferos.



***Nota.** Elaborado por Trabal, A., (2025). *Mapa Base región de Valparaíso* (Mapa). Escala 1:600000. ArcGIS Pro 3.5.3. Creado con datos, DGA, 2023, 2020, 2013; Dirección de Vialidad, MOP, 2021; SUBDERE, 2023.

Considerando este panorama, se requiere priorizar intervenciones que transformen la realidad territorial. En términos ecológicos, se plantea reorientar el uso del suelo hacia sistemas más resilientes y sostenibles, reduciendo la superficie de cultivos sedientos en zonas críticas. La restauración de ecosistemas degradados, protección de acuíferos y transición a una agricultura regenerativa son desafíos clave. En el plano social, es crucial garantizar el acceso equitativo al agua como derecho humano, fortaleciendo las organizaciones de usuarios y priorizando el consumo humano y la pequeña agricultura por sobre la gran industria. En cuanto al aspecto económico, se requieren políticas de reconversión productiva en Petorca, apoyando a los agricultores locales para diversificar cultivos menos demandantes de agua e invertir en tecnologías de riego eficiente.

2.2.- Estado del arte.

2.2.1 Desarrollo Sostenible y Límites Planetarios.

Desde la publicación del informe Brundtland (Naciones Unidas, 1987), el concepto de desarrollo sostenible ha sido parte de las políticas ambientales a nivel internacional. No obstante, la economía ecológica (Daly, 2007; Raworth, 2017) y la agroecología (Altieri & Nicholls, 2007; Gómez-Sal, 2000) convergen en que el crecimiento perpetuo supera los límites biofísicos, especialmente en agricultura intensiva de exportación. Surgiendo propuestas como la economía ecológica, la economía del bienestar y el enfoque de la “rosquilla” (doughnut economics), que posicionan la sostenibilidad como una condición estructural y no, como una variable dependiente del desarrollo económico.

Raworth (2017) presenta una perspectiva de progreso que se mueve dentro de dos fronteras cruciales: los límites impuestos por el planeta y las bases del bienestar social. Este esquema se ve reforzado por los hallazgos del Informe Planeta Vivo (WWF, 2022), que nos pone en sobre aviso acerca del rápido declive de la vida silvestre y el uso excesivo de los recursos naturales. En relación con esto, la CEPAL (2020) señala que Latinoamérica se topa con una triple problemática en términos de sostenibilidad: en lo social, lo económico y lo medioambiental, lo cual exige cambios amplios y radicales. Puntualmente, Chile es un país bajas emisiones globales, pero con una de las huellas ecológicas (HE) per cápita más elevadas de la región (Ivanova y Wood, 2020; Worldometer, 2022). Lo que exige un replanteamiento del modelo productivo y del consumo de recursos naturales, especialmente en sectores como la agricultura intensiva.

2.2.2.- Soluciones Basadas en la Naturaleza.

Las SbN (IUCN, 2020) protegen, gestionan y restauran ecosistemas para abordar desafíos sociales con beneficios humanos y ecológicos. Este enfoque es particularmente relevante en cuencas semiáridas sobreexplotadas como Petorca ya que abordan retos sociales de forma eficaz y adaptativa, proporcionando beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad (Seddon et al., 2020). En el contexto chileno, las SbN han sido identificadas como herramientas clave para alcanzar “Neutralidad de Carbono o Carbono neutralidad” enfrentar la vulnerabilidad climática (Marquet et al., 2022). El marco teórico de este trabajo integra enfoques de ecología política, economía ecológica y justicia ambiental, reconociendo que la crisis ambiental no puede desvincularse de los conflictos distributivos y las asimetrías de poder sobre el territorio (Altieri y Nicholls, 2007; Raworth, 2017). Por lo tanto, se consideran los principios de la restauración ecológica y la gestión participativa de cuencas hidrográficas como marcos conceptuales complementarios. Así mismo, desde el enfoque de durabilidad en estrategias de remoción de carbono, se plantea que las SbN deben planificarse con criterios de permanencia, integridad ecológica

y gobernanza inclusiva, evitando soluciones de corto plazo o meramente compensatorias (Streck et al., 2025).

Las SbN son una herramienta importante para cumplir los ODS y los compromisos del Acuerdo de París, al tiempo que fomentan una transición hacia economías regenerativas (Naciones Unidas, 2022). En las últimas dos décadas, las SbN se han utilizado como uno de los enfoques fundamentales para abordar los principales desafíos ambientales y sociales, vinculados al Cambio Climático, como son la pérdida de la biodiversidad, la degradación de los ecosistemas y la seguridad hídrica. Inicialmente el concepto SbN, se enfocaba a la conservación, avanzado hacia una perspectiva integradora que combina mitigación, adaptación, desarrollo local y resiliencia ecológica.

En Chile, el documento del Ministerio del Medio Ambiente "SbN para Chile" (Marquet y Rojas, 2021), el cual, identifica que nuestro país, presenta condiciones ecológicamente diversas, pero también altamente vulnerables, presentando a las SbN como una línea central de política ambiental. Destacando, además, que Chile ha comenzado a incorporar este enfoque en sus planes nacionales de adaptación al Cambio Climático, especialmente en los sectores de biodiversidad, recursos hídricos, agricultura y ciudades. Enfocándonos en poder incorporar los avances en materia de SbN, con los compromisos internacionales en sostenibilidad, la transición hacia economías regenerativas, y la apuesta por aportar una gestión ambiental justa y acorde con el territorio.

En la Región de Valparaíso, se enfrentan importantes desafíos asociados a la escasez hídrica, la fragmentación del paisaje y la presión sobre los ecosistemas costeros y de secano. En este escenario, las SbN surgen como una alternativa viable para articular medidas de restauración ecológica, conservación productiva y gobernanza territorial inclusiva. Tal como se señala en el Diagnóstico de Sostenibilidad Empresarial (DSE, 2024), existe un creciente interés en el sector privado por implementar SbN que no sólo reduzcan impactos, sino que también agreguen valor social y ambiental a sus operaciones.

La valoración económica de los servicios ecosistémicos se ha convertido en una herramienta fundamental para respaldar la adopción de enfoques más integrales de gestión ambiental. Como plantea Machín (2020), reconocer el valor tangible de los beneficios que los ecosistemas proporcionan desde la regulación hídrica hasta el soporte para actividades productiva, ha permitido abrir camino a la incorporación progresiva de SbN en la planificación territorial, en los mecanismos de compensación ambiental y en el diseño de infraestructura verde. No obstante, este avance aún enfrenta importantes desafíos en su aplicación concreta a escala local, donde persisten brechas de capacidad institucional, financiamiento y articulación entre actores públicos y privados.

EL concepto de SbN en Chile está en avanzando en el plano normativo y programático, pero con desafíos en su aterrizaje territorial, especialmente en regiones como Valparaíso. Siendo fundamental su capacidad para integrar restauración ecológica, desarrollo rural y justicia ambiental desde una mirada territorial y multisectorial.

2.2.3- Vulnerabilidad Climática, Escasez Hídrica y Conflictividad Territorial.

Debido a su configuración geográfica, diversidad climática y alta dependencia de sus recursos naturales; Chile, es uno de los países más vulnerables al Cambio Climático (Santibáñez y Santibáñez., 2014). La región de Valparaíso, y en particular la provincia de Petorca, ejemplifican esta vulnerabilidad en términos concretos, ya que desde los años 90 la expansión del monocultivo ha aumentado el uso intensivo del suelo y el agua, generando desequilibrios ecológicos y profundizando las desigualdades sociales (Bolados, 2016; Sanhueza, 2016).

Investigaciones como, las de Panes-Pinto et al. (2018) han documentado que cerca del 39% de las plantaciones de palto se desarrollan en pendientes superiores al 30%, aumentando significativamente los riesgos de erosión y escorrentía superficial. Además, el catastro frutícola de la región de Valparaíso (ODEPA y CIREN, 2017) confirma la concentración de la propiedad y el uso desigual de los recursos hídricos entre grandes y pequeños productores.

Asimismo, el Informe Final de la Cuenca Petorca-La Ligua (Sanhueza,2016) y diversos análisis socioambientales (Molina et al., 2017; Rodríguez, 2016) han evidenciado cómo estas transformaciones del paisaje agrícola se vinculan con la pérdida de resiliencia territorial, el debilitamiento de las organizaciones campesinas y la crisis del mundo rural.

En Chile, cerca del 90 % de las emisiones brutas de gases de efecto invernadero (GEI) provienen de los sectores energético, agrícola y de residuos. Estas fuentes han sido cuantificadas con metodologías alineadas a las Directrices del IPCC, lo que ha permitido al país elaborar Inventarios Nacionales de GEI homogéneos y comparables a nivel internacional (MMA, 2019). Dentro de este conjunto, el sector agrícola representa aproximadamente el 11 % del total nacional, siendo sus principales contribuyentes la aplicación de fertilizantes nitrogenados, la fermentación entérica del ganado y el manejo de estiércoles. Esta aproximación técnico-normativa constituye la base para estimar la huella de carbono (HC) en distintos sistemas productivos (Montero y del Campo, 2024).

2.2.4.- Enfoques Ecológicos del Desarrollo Rural.

Considerando la agroecología y la ecología del paisaje, se plantean con una perspectiva distinta para el progreso rural. Esta propuesta realza el valor de los entornos agrícolas de antaño, el saber popular y cómo

funciona ecológicamente la región (De Miguel & Gómez-Sal, 2002; Gliessman et al., 2007; Gómez-Sal & González-García). Estas ideas combinan aspectos naturales, sociales y económicos, subrayando la trascendencia de la variedad biológica, las múltiples funciones del territorio y su gestión como bases de la sostenibilidad.

Por otro lado, cabe indicar que, los entornos rurales han de entenderse más allá de meros lugares de producción; más bien, como complejos sistemas socio-ecológicos. En estos, convergen dinámicas ecológicas, interacciones de poder y evoluciones culturales. Considerar la integridad ecológica a nivel del paisaje, ofrece una perspectiva valiosa para analizar los cambios estructurales del territorio y plantear opciones de gestión que se adapten a las circunstancias (Porcuna, 2007, junto con Vélez y Gómez-Sal, 2008).

Estas estructuras se ven reforzadas por la iniciativa de capital natural (Comité Capital Natural, 2024), que plantea, una evaluación ecológica para cuantificar cómo las acciones productivas influyen en los entornos naturales, impulsando la inclusión de los gastos ambientales y la estimación de los beneficios que ofrecen los ecosistemas. Esta visión, unida a la auditoría medioambiental (Doménech, 2006), hace posible incorporar parámetros de sostenibilidad más sólidos para orientar las resoluciones tanto del sector público como del privado.

2.2.5.- Justicia Ambiental y Economía Ecológica.

Es fundamental abordar la situación en Petorca considerando la equidad ambiental. La disparidad en el acceso al agua, la acumulación del poder económico y la marginación de los residentes en la planificación territorial crean un ambiente de injusticia arraigada. Este enfoque se apoya en las ideas de autores como Altieri y Nicholls (2007) y Daly (2008), que argumentan que el progreso sostenible exige sistemas de redistribución y fortalecimiento comunitario que mitiguen las desigualdades socioambientales.

De igual manera, las contribuciones de la economía ecológica (Bravo y Cadena, 2021; Gómez-Sal, 2000) y la discusión en torno a las consecuencias sociales del aprovechamiento del entorno natural (Bassi et al., 2015; Coase, 1960) reafirman la urgencia de implementar herramientas económicas que abarquen principios de justicia entre generaciones y compromiso con el territorio. En definitiva, se plantea, la unión de diferentes enfoques teóricos que facilitan la comprensión de la compleja realidad socio-ecológica del área de Petorca. Partiendo de estas estructuras, se pretende sentar las bases para una acción que no solo aborde los efectos visibles de la crisis ambiental, sino que plantee una renovación profunda del esquema de progreso territorial.

2.3.- Marco Legal.

La adopción de las SbN en Chile se enmarca en un conjunto de instrumentos internacionales y nacionales que definen obligaciones, principios y mecanismos para enfrentar el Cambio Climático mediante la protección y restauración de ecosistemas.

A- Tratados internacionales

En el plano global, Chile se adhiere a dos marcos internacionales centrales:

Acuerdo de París (2015), cuyo objetivo es limitar el aumento de la temperatura global y fortalecer la adaptación al Cambio Climático.

Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que establece metas globales como el ODS 13 (Acción por el Clima) y el ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres), altamente vinculados a las SbN (Naciones Unidas, 2022).

B- Adopción y ratificación en Chile

El Acuerdo de París fue suscrito por Chile el 20 de septiembre de 2016, posteriormente ratificado por el Senado de la República, y finalmente promulgado mediante el Decreto Supremo MINREL N.º 30, de fecha 13 de febrero de 2017, integrándose oficialmente al ordenamiento jurídico nacional (BCN, 2017).

Del mismo modo, Chile ha reconocido formalmente la Agenda 2030 y sus ODS mediante múltiples compromisos gubernamentales y planes de acción sectoriales.

C.- Normativa nacional

- **Nivel constitucional.** La Constitución vigente reconoce el derecho de las personas a vivir en un medio ambiente libre de contaminación y el deber del Estado de tutelar la preservación de la naturaleza, lo cual entrega el marco superior para integrar enfoques ecosistémicos y SbN en la gestión territorial.
- **Leyes.** La Ley N.º 21.455, Ley Marco de Cambio Climático, establece definiciones esenciales vinculadas a adaptación, resiliencia, recuperación de ecosistemas y participación ciudadana. La ley incluye explícitamente a las SbN como instrumentos prioritarios para enfrentar los impactos del Cambio Climático (Marquet y Rojas, 2021). Asimismo, diversos planes nacionales de adaptación sectoriales como los de biodiversidad, agricultura, recursos hídricos y ciudades incorporan medidas de restauración ecológica y manejo ecosistémico coherentes con las SbN.
- **Decreto.** Entre los decretos relevantes destacan los que aprueban y actualizan los planes sectoriales de adaptación y las estrategias climáticas de largo plazo, que operacionalizan los lineamientos de la Ley Marco sobre Cambio Climático.

- **Normas y circulares técnicas.** Reglamentos del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), normas de calidad ambiental y diversas circulares ministeriales permiten integrar SbN como medidas de compensación, mitigación o restauración dentro de proyectos sometidos a evaluación ambiental.
- **Documentos técnicos nacionales y regionales.** A escala regional, instrumentos como la Estrategia Regional de Desarrollo de Valparaíso y las actualizaciones del Plan de Ordenamiento Territorial priorizan la recuperación ecológica, el manejo sustentable del agua y la gobernanza territorial como ejes de desarrollo resiliente (GORE Valparaíso, 2020). Del mismo modo, la Estrategia Nacional de Biodiversidad al 2030, los Planes de Prevención y Descontaminación Ambiental (PPDA) y otros documentos técnicos del Ministerio del Medio Ambiente establecen lineamientos para integrar SbN en políticas de restauración y gestión territorial.

2.4.- Evaluación de Impacto del Proyecto.

La implementación de SbN en la cuenca de Petorca implica una serie de impactos positivos esperados, en las dimensiones ambiental, social y económica. En términos ambientales, se proyecta la restauración de funciones ecosistémicas como la retención hídrica, la formación de suelo y la captura de carbono (Griscom et al., 2017). Estudios como el de Marquet et al. (2022) estiman un potencial de mitigación de hasta 7,5 Tg CO₂e año⁻¹ en Chile por acción de medidas como la reforestación y el manejo sustentable de suelos. En los aspectos sociales, se espera fortalecer la organización comunitaria, mejorar la equidad en el acceso a recursos y recuperar prácticas agroecológicas adaptadas al territorio. En el ámbito económico, la utilización de las SbN puede abrir oportunidades para actividades productivas compatibles como la conservación, generar empleo verde y atraer financiamiento climático internacional, especialmente si se vinculan con mecanismos del Artículo 6 del Acuerdo de París (Granziera et al., 2023).

2.5.- Propuesta y Justificación Territorial.

La intervención en la comuna de Petorca se justifica por su alta conflictividad socioambiental, su condición de zona de sacrificio hídrico y la urgencia de transitar hacia modelos de desarrollo más resilientes. El enfoque de SbN permite restaurar el capital natural y reconstruir relaciones entre sociedad y ecosistemas degradados, articulando conocimientos tradicionales y científicos.

En esta propuesta, se prioriza la reforestación con especies nativas, la restauración de cauces y humedales, el manejo agroecológico del suelo y la participación social en la gestión territorial. Estas acciones, además de ser eficaces ecológicamente, son coherentes con las estrategias de mitigación y adaptación promovidas en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) de Chile y los lineamientos de políticas públicas como el Plan de Adaptación al Cambio Climático del sector Silvoagropecuario (MMA, 2013).

3.-Metodología.

Esta investigación se desarrollará bajo un enfoque cualitativo-descriptivo, utilizando información secundaria proveniente de fuentes institucionales, estudios académicos y bases de datos públicas. Dado el alcance territorial y ambiental de la propuesta, la metodología integra herramientas de diagnóstico territorial, análisis HH y HC, y criterios de evaluación de SbN.

También se integrará técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) mediante ArcGIS Pro 3.5.3. y análisis estadístico con R, siguiendo un enfoque mixto de análisis, para abordar los objetivos planteados. En términos generales, se recopilarán datos espaciales y socioambientales de la comuna de Petorca, se generarán mapas temáticos para diagnosticar la situación actual, se aplicarán análisis gráficos y estadísticos que evidencien las problemáticas detectadas, y finalmente se diseñará y evaluará una propuesta de intervención basada en SbN.

3.1.- Descripción de las etapas del método, con sus técnicas y herramientas.

3.1.1.-Recopilación de datos espaciales y socioambientales:

Se reunirán las fuentes de información, necesarias para caracterizar el contexto de Petorca. Esto incluye capas SIG en formato shapefile obtenidas de geo portales oficiales chilenos (IDE Chile, MMA, DGA, etc.) con datos como uso/cobertura de suelo, hidrografía y recursos hídricos, delimitación de cuencas y subcuencas, áreas con restricciones y prohibiciones de extracción de agua, humedales y decretos de escasez hídrica entre otros. Por ejemplo, se incorporará la capa de Decretos de Escasez Hídrica (declaratorias oficiales de sequía) vigente a 2019, la cartografía de cuencas y subcuencas hidrográficas de la región de Valparaíso, y datos del uso agrícola a nivel comunal (p. ej., del Censo Agropecuario) para identificar la distribución de cultivos relevantes. Asimismo, se descargarán imágenes satelitales recientes (por ejemplo, Sentinel-2 o Landsat 8, años 2015-2023) para analizar cambios en la cobertura vegetal y estado del paisaje. Estos insumos se complementarán con información secundaria (reportes técnicos, estudios previos y datos climáticos e hidrológicos históricos, como series de precipitación, caudales o niveles freáticos) necesarios para comprender la evolución de la escasez hídrica en Petorca. Todos los datos recopilados serán referenciados espacialmente en coordenadas apropiadas (WGS84 UTM Zona 19S, estándar para Chile central) y revisados en cuanto a su calidad y vigencia (privilegiando información de los últimos 5-7 años).

Para calcular la Huella de Carbono (HC) del sistema agroexportador en Petorca, se emplearán factores de emisión referenciales que están validados por el IPCC y debidamente contextualizados para Chile a través del Inventario Nacional de GEI.

Específicamente, se tomarán como base los coeficientes y escenarios de mitigación definidos en el estudio del MMA (2019). Dicha referencia es clave porque establece rangos de emisiones detallados para distintos tipos de insumos, incluyendo fertilizantes, energía, transporte y residuos orgánicos, además de proponer acciones concretas de reducción. Esta fuente proporciona una base técnica sólida y ajustada al contexto nacional, esencial tanto para la cuantificación de las emisiones como para la proyección de futuros escenarios de mejora (Montero y del Campo, 2024).

3.1.2.- Análisis espacial en ArcGIS Pro 3.5.3:

Con los datos geográficos depurados, se llevarán a cabo distintos procesos de SIG para cumplir los primeros objetivos específicos. En primer lugar, se elaborarán mapas temáticos diagnósticos que caractericen el contexto socioambiental productivo de Petorca. Se confeccionará un mapa de uso del suelo y cobertura ecológica, distinguiendo las principales clases (por ejemplo: áreas de cultivo especialmente cultivos de exportación como paltos, vegetación nativa, zonas urbanas, cuerpos de agua, etc.). Este mapa puede obtenerse a partir de la clasificación de imágenes satelitales recientes y/o el procesamiento de las capas de uso de suelo disponibles. Adicionalmente, se generará un mapa de recursos hídricos que muestre la red de drenaje (ríos, esteros), ubicaciones de acuíferos o pozos si se cuenta con esa información, así como las zonas bajo restricción hídrica legal (ej. áreas con prohibición de nuevas extracciones de agua subterránea) y las áreas con declaratoria de escasez hídrica vigente. También se podría incluir en el mapa elementos socio-territoriales clave, como la distribución de localidades y actores productivos (ej. sectores con alta concentración de predios agroexportadores vs. comunidades rurales), para visualizar posibles conflictos en la distribución espacial de recursos. Con estos mapas base se realizará un análisis espacial comparativo. Por un lado, se estudiará la transformación del territorio en las últimas décadas, especialmente la expansión de la agricultura intensiva de exportación. Para ello, se podrían comparar coberturas de suelo en distintos momentos (ej. Usando imágenes satelitales de 2000 vs 2020) a fin de cuantificar el cambio de uso de suelo. Siguiendo metodologías recientes de detección de cambios con SIG, se determinarán las superficies ganadas por cultivos frutícolas versus la pérdida de vegetación natural. Un estudio similar realizado en Veracruz México empleó SIG y teledetección para evaluar el cambio de uso de suelo y la fragmentación del paisaje en un periodo de 26 años, evidenciando que este tipo de análisis es viable y revelador (Hernández-Pérez, et al., 2022). De igual forma, en Petorca se aplicarán métricas de fragmentación de paisaje para cuantificar las principales alteraciones ecológicas: por ejemplo, se calcularán indicadores como el número y tamaño de parches de vegetación nativa remanente, el índice de conectividad entre fragmentos de hábitat, o la densidad de bordes entre áreas naturales y agrícolas. Estas métricas de ecología del paisaje pueden obtenerse mediante extensiones de ArcGIS (v.gr. Patch Analyst).

Los resultados que se obtengan permitirán identificar las zonas más afectadas por la fragmentación y la pérdida de biodiversidad, cumpliendo el Objetivo Específico 2.

Los SIG son una herramienta fundamental en este tipo de análisis socioambiental, y pueden facilitar la visualización y el entendimiento geográfico de problemas complejos. Por ejemplo, los SIG permiten integrar capas de información para relacionar la distribución espacial de cultivos con la de la disponibilidad hídrica, revelando patrones de riesgo o conflictividad. Por lo tanto, mediante ArcGIS se obtendrá un conjunto de mapas relevantes para el TFG que ilustrarán:

- a) las condiciones ecológicas y productivas actuales de Petorca (uso de suelo, cobertura vegetal, clima, etc.),
- b) la distribución y estado del recurso hídrico (cursos de agua, cuencas, áreas en sequía) y su superposición con las áreas agrícolas intensivas.
- c) las zonas críticas de pérdida de biodiversidad o paisaje fragmentado.

Estos resultados cartográficos responderán a los objetivos diagnósticos (Objetivos Específicos 1 y 2) y los mapas más significativos se integrarán en el cuerpo del trabajo, dejando mapas secundarios o de apoyo en anexos según corresponda

3.1.3. Análisis gráfico y estadístico (R):

De forma paralela al análisis espacial, se desarrollarán análisis cuantitativos en el entorno R (v. 4.3.2) con el objetivo de profundizar en las problemáticas detectadas y aportar evidencia estadística que complemente la información cartográfica. La primera etapa consistirá en una exploración descriptiva de las series climáticas e hidrológicas disponibles: tendencias de precipitación anual y caudales de ríos en la cuenca de Petorca durante las últimas décadas, permitiendo cuantificar la magnitud de la megasequía regional. Para ello se emplearán pruebas de tendencia (Mann-Kendall) y modelos de regresión lineal que estimen la tasa de disminución de lluvias o escorrentía. En paralelo, se contrastará oferta y demanda hídrica: derechos de aprovechamiento y volúmenes extraídos para riego se compararán con los requerimientos de consumo humano, evidenciando el déficit crónico. Panez-Pinto et al. (2018) ya advirtieron que el volumen destinado a la agroindustria en Petorca multiplica por varios órdenes al consumo domiciliario; mediante diagramas de barras y razones porcentuales generados en R se visualizará dicha brecha.

El software también servirá para producir gráficos estadísticos que consoliden el diagnóstico: histogramas y boxplots de precipitación anual, series temporales de caudales, mapas de calor y diagramas de dispersión que relacionen, por ejemplo, porcentaje de superficie cultivada con la reducción porcentual de caudal en la subcuenca respectiva. Estos análisis permitirán detectar asociaciones significativas como la correlación

entre expansión del palto y decremento de escorrentía a través de coeficientes de Pearson/Spearman o modelos de regresión simple que estimen la pérdida de caudal por cada hectárea adicional de cultivo, siempre que la información lo permita. Todos los resultados incluirán intervalos de confianza y valores-p, asegurando la validez estadística de las inferencias. La utilización de R, con su ecosistema de paquetes especializados en análisis y visualización de datos ambientales, garantiza la reproducibilidad de los cálculos los scripts correspondientes se anexan y refuerza la robustez metodológica del trabajo.

3.1.4.-Diseño de la propuesta de intervención (SbN):

Con base en los hallazgos del diagnóstico socioambiental (mapas y análisis previos), se procederá a formular una propuesta de ordenamiento territorial sustentada en SbN, cumpliendo el Objetivo Específico 3. Este paso tendrá un carácter proyectivo y de planificación. Inicialmente, se identificarán las estrategias SbN pertinentes para abordar las problemáticas de Petorca, la selección de estas medidas SbN se fundamentará en revisiones bibliográficas de experiencias exitosas en contextos similares (climas semiáridos con agricultura intensiva) por ejemplo, guías de SbN a nivel internacional y nacional y en criterios ecológicos locales (especies locales apropiadas, zonas de alto valor de conservación identificadas en el diagnóstico, etc.).

Una vez definidas las medidas, se delimitarán espacialmente las áreas de intervención prioritaria usando ArcGIS. Es decir, se generará un mapa de propuesta donde se señalen, por ejemplo: zonas ribereñas críticas a reforestar (para proteger cauces y mejorar la infiltración), laderas erosionadas donde introducir forestación y técnicas de conservación de suelos, polígonos agricultura regenerativa (p. ej. sustitución de cultivos de alta demanda hídrica por otros más sostenibles), y áreas para la creación de conectores ecológicos entre fragmentos de bosque esclerófilo remanente. Esta asignación espacial se basará en un análisis multicriterio cualitativo: se traslaparán las capas de problemas (déficit hídrico, pérdida de vegetación, erosión) con las de potencial ecológico (existencia de cobertura nativa, pendientes aptas para reforestación, etc.) para priorizar sitios óptimos para cada SbN. El resultado será un conjunto de mapas propositivos que ilustran cómo y dónde se podrían implementar las SbN en el territorio de Petorca, integrando consideraciones tanto biofísicas como sociales (por ejemplo, cercanía a comunidades que podrían colaborar en las acciones). Esta fase de diseño se apoyará también en herramientas cartográficas digitales para calcular las superficies abarcadas por la propuesta y estimar, aunque sea de forma preliminar, el potencial impacto (ej.: hectáreas a reforestar, caudal adicional potencialmente retenido por nuevos bosques, etc.).

3.1.5.- Evaluación del potencial de la propuesta (indicadores):

Finalmente, para el Objetivo Específico 4, se establecerá un sistema de indicadores de desempeño que permita evaluar la viabilidad ecológica, social y económica de la intervención propuesta. Siguiendo recomendaciones de guías recientes sobre SbN (MMA, 2025), se definirán indicadores multidimensionales que abarquen los tres ejes de la sostenibilidad (ambiental, social y económico) y reflejen la contribución de las SbN. Por el lado ecológico, se considerarán métricas de resiliencia ambiental y salud del ecosistema: por ejemplo, incremento en la cobertura vegetal nativa (hectáreas restauradas), mejora en la conectividad ecológica (evaluada a través de la reducción de la fragmentación del hábitat) (MMA, 2013), aumento de la capacidad de infiltración y retención hídrica en el suelo (estimado a partir de cambios esperados en caudal base o recarga de acuíferos), y recuperación de biodiversidad (p. ej., retorno de especies clave indicadoras en las áreas intervenidas). En cuanto a la eficiencia hídrica, un indicador central será la reducción en la demanda de agua para riego gracias a las medidas propuestas esto podría expresarse como porcentaje de ahorro hídrico frente al escenario actual, o aumento de eficiencia (producción agrícola por metro cúbico de agua). También se evaluará la disponibilidad hídrica comunitaria tras las SbN, por ejemplo, cuántas personas podrían beneficiarse de un flujo de agua más estable en períodos secos gracias a la recarga mejorada (indicador social-ambiental).

En el plano socioeconómico, se propondrán indicadores de articulación productiva y cohesión social en torno a las SbN. Por ejemplo: número de actores locales involucrados en la implementación (organizaciones de agricultores, comunidades, autoridades locales), nivel de diversificación productiva logrado (medido como cantidad de nuevas actividades económicas sostenibles derivadas de las SbN, como ecoturismo o nuevos cultivos de menor HH), y generación de empleo verde o ingresos locales asociados a los proyectos SbN. También es relevante un indicador de gobernanza y participación, que mida el grado de colaboración entre los actores (por ej., existencia de mesas de agua, acuerdos de manejo comunitario, etc. impulsados por la iniciativa SbN) (MMA, 2013).

Para cada indicador se establecerán, si es posible, valores de referencia o metas esperadas (p. ej., % de aumento de cobertura forestal, volumen de agua ahorrado, número de beneficiarios), de modo de poder monitorear el progreso en una implementación hipotética. La evaluación global del potencial de la propuesta se realizará cualitativa y cuantitativamente: por un lado, se discutirá cómo las SbN sugeridas responden a las problemáticas identificadas (resiliencia climática, escasez hídrica, fragmentación) en función de evidencia científica y experiencias previas. Por otro lado, mediante los indicadores definidos, se puede crear un cuadro comparativo o gráfico radar que muestre la puntuación de la propuesta en dimensiones ecológica, social y económica. Este enfoque integral está alineado con las recomendaciones

internacionales, que enfatizan medir tanto la reducción de riesgo y beneficios ambientales de las SbN, como sus co-beneficios sociales y económicos. En síntesis, la propuesta será evaluada bajo un criterio de sostenibilidad integral, verificando que mejore la resiliencia del ecosistema y de las comunidades, optimice el uso del agua en el territorio, y fomente un modelo productivo más articulado e inclusivo a nivel local. Todas estas etapas metodológicas se desarrollarán de manera secuencial pero interrelacionada. La elaboración de mapas en ArcGIS proporcionará la base espacial para entender dónde se concentran los problemas y podrían situarse las soluciones; el análisis en R aportará evidencia cuantitativa de cuánto se manifiestan las tendencias y efectos observados; y el diseño evaluado de la propuesta SbN integrará ambos insumos para ofrecer respuestas concretas y fundamentadas. A su vez la integración de métodos (SIG, estadística, revisión bibliográfica) refuerza la validez del estudio, permitiendo abordar la sostenibilidad territorial de Petorca desde una perspectiva sistémica y multidisciplinaria (Arroyo, 2025). De esta forma, la metodología propuesta asegurará un tratamiento profesional y riguroso de cada objetivo específico del TFG, con resultados respaldados por datos recientes y buenas prácticas internacionales en planificación territorial y SbN.

3.2.- Descripción Metodológica por Objetivo Específico:

3.2.1.- Metodología Para Alcanzar el OE1.

Diagnosticar el Contexto Socioambiental-productivo de la Comuna de Petorca.

3.2.1.1.- Tarea 1 Revisión Bibliográfica.

Realización de una revisión bibliográfica y documental, sobre condiciones ecológicas, uso del suelo y recurso hídrico en Petorca, revisando fuentes secundarias relevantes, tales como informes del MMA, catastro frutícola, estudios sobre escasez hídrica y documentos académicos vinculados a la ecología del paisaje.

Subproducto: Revisión bibliográfica sistematizado, con una síntesis temática (agua, suelo, biodiversidad, modelo agroexportador, gobernanza hídrica) y listado de fuentes clasificadas.

3.2.1.2.- Tarea 2 Sistematización de Información.

Sistematización de información secundaria de catastros, informes gubernamentales y estudios científicos. Construir una matriz con variables clave (uso de suelo, tenencia, superficie agrícola, cobertura vegetal) para identificar patrones territoriales y zonas críticas.

Subproducto: Variables territoriales y socioambientales sistematizadas, con mapas preliminares de distribución de usos de suelo y cobertura vegetal.

3.2.1.3.- Tarea 3 Identificación y Caracterización.

Identificación y caracterización de actores territoriales relevantes (pequeños y grandes productores, organizaciones sociales, etc.), clasificando a los actores locales en función de su rol productivo y territorial, cruzando fuentes como la Cuenta Pública Municipal, catastro de INDAP, y artículos sobre conflictos hídricos.

Subproducto: Mapa y perfil de actores territoriales, clasificados por rol productivo, relación con el agua y nivel de influencia local.

3.2.2.- Metodología Para Alcanzar el OE2.

Analizar las Problemáticas Derivadas del Modelo Agroexportador Intensivo

3.2.2.1.- Tarea 1 Análisis Crítico.

A través de un análisis crítico, se abordarán los impactos socioambientales del monocultivo, apoyándonos en la evidencia documental de los conflictos y la concentración de recursos que derivan de esta actividad.

Subproducto: Análisis crítico del modelo agroexportador, con identificación de impactos socioambientales clave.

3.2.2.2.- Tarea 2 Evaluación de Datos.

Evaluación de datos sobre escasez hídrica, erosión y pérdida de biodiversidad, mediante revisión de fuentes primarias, en donde se identificarán variables clave para la vulnerabilidad del sistema agroexportador.

Subproducto: Base de datos depurada con indicadores de escasez hídrica, erosión y biodiversidad, y síntesis de vulnerabilidades territoriales, disponibles.

3.2.2.3.- Tarea 3 Estimación de Huella.

Estimación de la HH y de HC del sistema productivo agroexportador, aplicaremos coeficientes reconocidos, como los de la Water Footprint Network para la HH. En cuanto a la HC, utilizaremos factores de emisión basados en las normas ISO 14064-1, ISO 14064-3 e ISO 14067, las cuales proveen los marcos necesarios para su contabilidad, verificación y cuantificación. De esta manera, proyectaremos las emisiones evitables y compararemos los consumos del sistema, entre otros indicadores clave.

Subproducto: HH y HC del sistema agroexportador, con análisis comparativo por cultivo.

3.2.2.4.- Recopilación de datos

Se recolectarán datos de entrada sobre el sistema productivo a partir de fuentes oficiales y confiables. En particular, se utilizarán información proporcionada por organismos nacionales como la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) y el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), así como por ministerios relevantes. Estas fuentes aportan estadísticas agrícolas, hidrológicas y energéticas actualizadas, asegurando la calidad y representatividad de los datos empleados en los cálculos. También se considerarán bases de datos internacionales cuando sea pertinente, garantizando la comparación con referencias globales.

Subproducto: Base de datos consolidada del sistema productivo local, lista para su aplicación en los cálculos de huellas y escenarios.

3.2.2.5.- Cálculo de la HH:

Para estimar la HH del sistema se aplicará la metodología de la Water Footprint Network (WFN), la cual cuantifica las tres componentes de la HH: verde, azul y gris, correspondientes al agua de lluvia incorporada, el agua superficial y subterránea consumida, y el volumen requerido para diluir contaminantes, respectivamente (Hoekstra et al., 2011).

Se utilizarán coeficientes reconocidos por la WFN para los cultivos y procesos relevantes. En particular, la base de datos WaterStat provee valores promedio de consumo hídrico por producto, empleados aquí como factores de conversión. Conforme al enfoque estándar de la WFN, primero se definirá el alcance del estudio unidad de análisis por hectárea y por ciclo anual y luego se calcularán las componentes azul, verde y gris a lo largo de toda la cadena de valor.

El cálculo se realizará por etapas del proceso productivo, integrando tanto las contribuciones directas (uso de agua en predios y plantas exportadoras) como las indirectas (agua incorporada en insumos y servicios). Este enfoque permite estimar el volumen total de agua consumida o contaminada por el sistema agroexportador, indicando su procedencia y su impacto sobre la calidad del recurso. De este modo, la metodología WFN facilita evaluar la sostenibilidad hídrica del sistema considerando simultáneamente eficiencia y contaminación.

Cuando sea posible, se emplearán datos locales clima, rendimientos y prácticas de riego para refinar las estimaciones y complementar los coeficientes globales de la WFN.

Subproducto: Resultados detallados de la HH total y por componente para cultivos claves de la comuna.

3.2.2.6.- Cálculo de la HC:

La cuantificación de la HC (es decir, las emisiones de GEI, expresadas en CO₂ equivalente) seguirá las directrices de las normas ISO 14064-1:2018, ISO 14064-3:2019 y ISO 14067:2018. Estas normas

establecen los criterios para la cuantificación, verificación y reporte de emisiones tanto a nivel organizacional como de producto (ISO, 2018a; ISO, 2019; ISO, 2018b).

Se identificarán las fuentes de emisión dentro del sistema productivo: consumo de combustibles fósiles en maquinaria y transporte, uso de fertilizantes nitrogenados, emisiones del suelo, consumo eléctrico, entre otras. A cada actividad se le asignará un factor de emisión, obtenido desde las directrices actualizadas del IPCC, (2019) o desde fuentes nacionales (MMA, Inventario Nacional de GEI de Chile). Los factores se expresarán en kg CO₂e por unidad de insumo (litro de combustible, kg de fertilizante, kWh de electricidad, etc.).

El resultado incluirá emisiones directas (combustión, emisiones del suelo) e indirectos (producción de insumos, electricidad) asociadas a la cadena agroexportadora. El análisis se hará por hectárea de cultivo, permitiendo caracterizar la intensidad de carbono del sistema productivo.

Subproducto: Identificación de emisiones GEI del sistema agroexportador, con análisis de fuentes principales y emisiones por hectárea.

3.2.2.7.- Análisis comparativo e indicadores:

Se calcularán indicadores clave por hectárea, como, HH total (m³/ha/año), discriminada por tipo (azul, verde, gris), HC (kg CO₂e/ha/año), Intensidad hídrica y de carbono por unidad de producción, Porcentaje de HH gris (indicador de presión contaminante) Distribución de emisiones por fuente (riego, transporte, energía, etc.)

Además, se proyectarán emisiones evitables y reducciones potenciales de consumo de agua bajo escenarios de reconversión agroecológica o aplicación de SbN. Estos escenarios permitirán estimar el beneficio ambiental teórico frente al modelo intensivo actual. Finalmente, los resultados serán verificados internamente, y se considerará la posibilidad de validación externa conforme a ISO 14064-3.

Subproducto: Panel comparativo de indicadores (agua, emisiones, degradación) y escenarios de mitigación/adaptación basados en SbN

3.2.3.- Metodología Para Alcanzar el OE3.

Diseñar una Propuesta de Intervención Territorial Sustentada en SbN.

3.2.3.1.- Tarea 1 Revisión de Prácticas en SbN.

Revisión de prácticas en SbN aplicadas a territorios similares, analizando experiencias relevantes respecto al tema.

Subproducto: Prácticas SbN relevantes para Petorca, con descripción funcional y contexto de aplicación.

3.2.3.2.- Tarea 2 Selección y Justificación.

Selección y justificación de medidas específicas aplicables a la comuna de Petorca, basándose en criterios de adaptabilidad al contexto local, multifuncionalidad de las acciones propuestas y su potencial de apropiación por parte de la comunidad. Para definir las medidas que serán consideradas prioritarias para su implementación.

Subproducto: Criterios de selección y justificación territorial para cada medida SbN seleccionada.

3.2.3.3.- Tarea 3 Integración de Criterios.

Integración de criterios ecológicos, sociales y productivos en el diseño, incorporando principios de ecología del paisaje, conectividad ecológica y diversidad funcional, según Gómez-Sal (2000) y Gleissman (2007).

Subproducto: Diseño integrado de intervención territorial con enfoque de paisaje, SbN y criterios socio-productivos.

3.2.3.4.- Tarea 3 análisis FODA.

El análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) se utilizó como herramienta de síntesis estratégica para integrar la información generada en el diagnóstico socioambiental del territorio. En términos conceptuales, el FODA permite organizar factores internos (fortalezas y debilidades) y externos (oportunidades y amenazas) relevantes para la planificación, a partir de una matriz 2x2 ampliamente empleada en la gestión estratégica (Helms & Nixon, 2010; Ghaleb, 2024). Para este TFG, la matriz se construirá a partir de la información ya sistematizada en los capítulos de diagnóstico y la revisión bibliográfica y documental, identificando factores clave para la gestión socioambiental comunal y clasificándolos según su naturaleza interna y externa y su efecto potencial positivo o negativo. Posteriormente, los cruces entre cuadrantes (por ejemplo, Fortalezas Oportunidades o Debilidades Amenazas) sirven como base para formular líneas de acción y propuestas de intervención, en coherencia con el enfoque original del FODA/TOWS y sus desarrollos recientes en planificación estratégica (Phadermrod et al., 2019; Puyt et al., 2023).

Subproducto: Obtención de Matriz FODA sistematizada e identificación de líneas estratégicas derivadas de los cruces.

3.2.4.- Metodología Para Alcanzar el OE4.

Evaluar el Potencial Ecológico, Social y Económico de la Propuesta

3.2.4.1.- Tarea 1 Aplicación de Indicadores.

Aplicación de indicadores de resiliencia, eficiencia hídrica y conectividad ecológica, empleando métricas como conectividad, eficiencia hídrica (mm/ha), resiliencia productiva y cobertura vegetal para evaluar impactos.

Subproducto: Indicadores de resiliencia, con resultados cualitativos y cuantitativos aplicados a la propuesta.

3.2.4.2.- Tarea 2 Estimación Preliminar.

Estimación preliminar de beneficios ecosistémicos y reducción de impactos, utilizando metodologías de cálculo de biocapacidad, HE (Doménech, 2006) y valoración de servicios ecosistémicos (Machín, 2020). Análisis preliminar de viabilidad económica estimando los costos directos e indirectos asociados a la implementación de las medidas SbN propuestas.

Subproducto: Beneficios ecosistémicos y viabilidad económica preliminar de la propuesta SbN, estimados.

3.2.4.3.- Tarea 3 Validación del Diseño.

Validación del diseño con criterios de SbN establecidos por la IUCN (2020), aplicando los estándares de esta, para verificar pertinencia, eficacia y beneficios sociales y ecológicos de la propuesta.

Subproducto: Validación técnica del diseño SbN según estándar IUCN, con recomendaciones finales de ajuste.

4.-Resultados

Este capítulo sintetiza los resultados clave que permiten demostrar la vulnerabilidad territorial de Petorca, la cual emerge de la interacción crítica entre el estrés hidrológico extremo por la megasequía y un modelo productivo intensivo, a través del monocultivo de Paltas, exponiendo una severa desalineación territorial. No obstante, el análisis identifica simultáneamente activos patrimoniales y ecológicos que ofrecen potencial para desarrollar estrategias de resiliencia, basadas en la utilización de SbN.

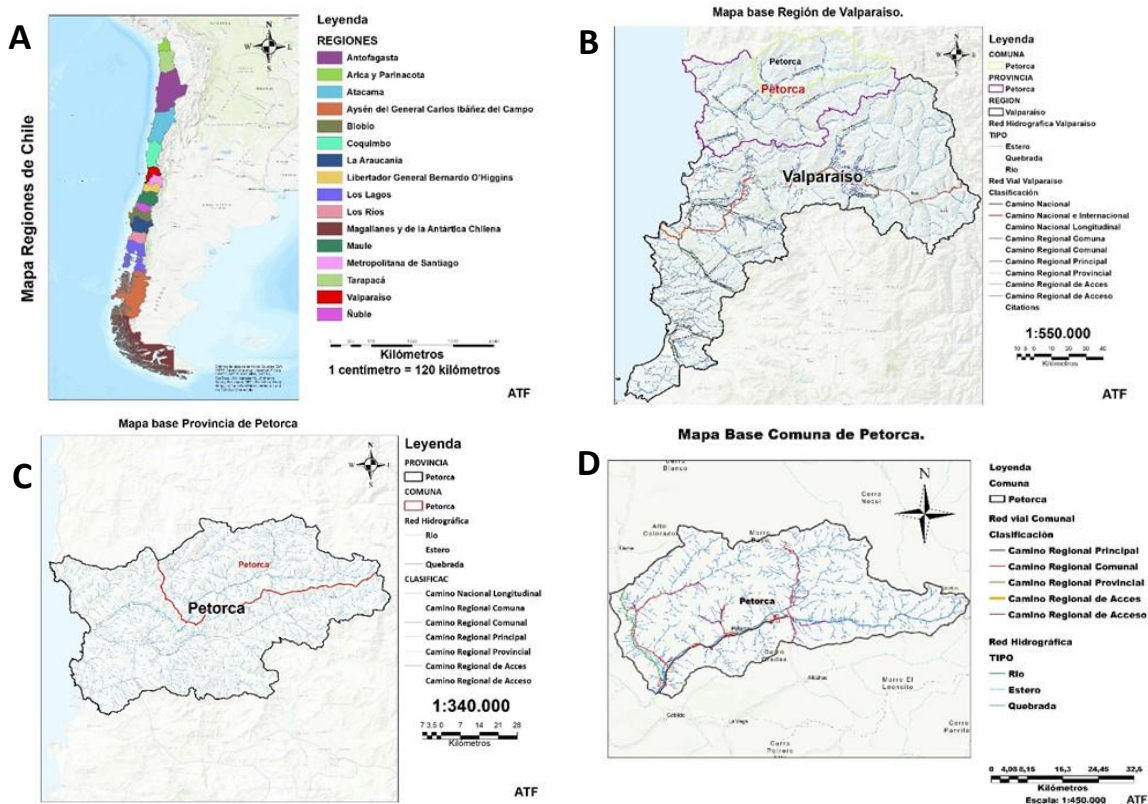
4.1.- Resultados descriptivos del área de estudio OE1.

4.1.1.- Ubicación y contexto geográfico OE1.

La comuna de Petorca se ubica en la provincia homónima, al norte de la Región de Valparaíso, en la zona central de Chile. Este territorio marca la transición entre el Norte Chico semiárido y la Zona Central mediterránea, con una geografía diversa que abarca la Cordillera de los Andes al este, la Cordillera de la Costa al oeste y valles interiores estrechos entre cadenas montañosas (CIREN y SITRural, 2024; Garreaud et al., 2017). La altitud varía desde unos 200 m en los sectores bajos hasta más de 3500 m en la alta cordillera oriental, configurando un paisaje accidentado donde el río Petorca fluye de forma sinuosa por un valle angosto (500-2000 m de ancho) entre cerros elevados (CIREN y SITRural, 2024). La localidad principal, Petorca, se ubica en el fondo de este valle longitudinal, mientras que otras localidades rurales como Chincolco y Pedegua se distribuyen a lo largo de la cuenca. Administrativamente, la comuna de Petorca es predominantemente rural, a diferencia del resto de la Región de Valparaíso, mayoritariamente urbana (más del 90% de población). Esta ruralidad, en un contexto de crisis hídrica sistémica, amplifica la vulnerabilidad social, ya que las comunidades locales dependen directamente de un recurso que se encuentra sobreexplotado por el sector agroexportador. Esta condición se refleja en la relevancia de las actividades agropecuarias tradicionales y en la preservación de prácticas locales, que coexisten con la expansión reciente de la agroindustria de exportación, analizada en las secciones siguientes. En la Figura 4 se muestra la ubicación de la comuna a nivel nacional, regional y provincial, destacando elementos físicos relevantes como la red hidrográfica y los límites comunales y provinciales.

Figura 4.

Secuencia de mapas de ubicación espacial. A: Mapa Base Regiones de Chile. B: Mapa Base Región de Valparaíso. C: Mapa Base Provincia de Petorca. D: Mapa Base Comuna de Petorca.



***Nota.** Elaborado por Trabal, A. (2025). *Mapa Base* (Mapa). Escala A: 1:120 B: 1:550000 C: 1:340000 D: 1:450000. ArcGIS Pro-3.5.3. (Esri, 2024). Creado con datos, DGA, 2023, 2020, 2013; Dirección de Vialidad, MOP, 2021; SUBDERE, 2023.

4.1.2.- Clima y recursos hídricos OE1.

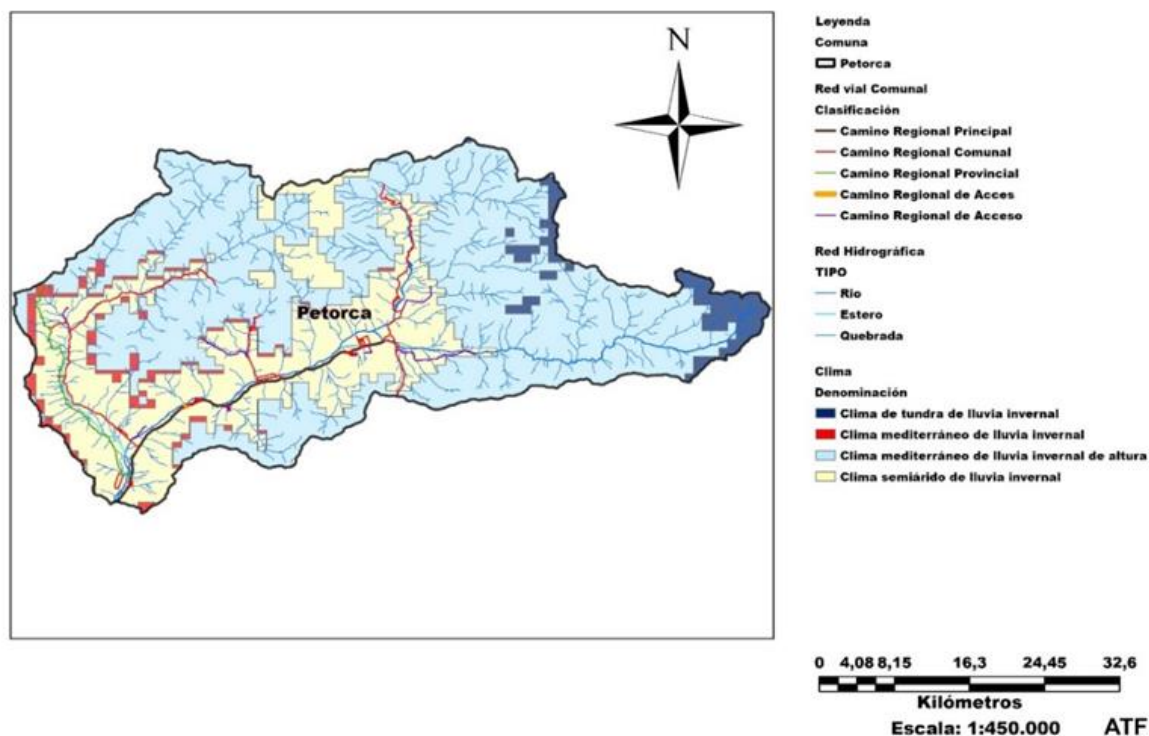
El clima de la comuna de Petorca es mediterráneo semiárido con lluvias invernales, mostrando variaciones locales influenciadas por la altitud y la cercanía al mar. Según la clasificación de Köppen adaptada a Chile, predomina un clima Semiárido Templado con lluvias invernales (*Bsk*, “estepa con invierno húmedo”), con una franja Intermedia de clima Templado cálido (*Csb*) y sectores altos con clima Templado frío (*Csc*) y tundra alpina (*ETH*) en las cumbres andinas (ver Figura 5).

El promedio histórico anual de precipitaciones en la cuenca es de unos 250 mm en años normales (Santibáñez y Santibáñez, 2014), concentradas principalmente en invierno (junio-agosto) y con alta variabilidad interanual: algunos años apenas registran 150-200 mm, mientras otros superan los 300 mm, evidenciando la alternancia entre periodos húmedos y sequías propias del clima semiárido (CIREN y

SiTRural, 2020). Las temperaturas reflejan también este carácter: amplias oscilaciones diarias y estacionales, con promedios desde $\sim 4,6$ °C en invierno hasta ~ 28 °C en verano en el valle, y condiciones mucho más frías en la alta cordillera, donde las máximas estivales rara vez superan los 7-8 °C (CIREN y SiTRural, 2024).

Figura 5.

Mapa Base y Clasificación de climas según Köppen.



***Nota.** Elaborado por Trabal, A. (2025). *Mapa Base y Clasificación de clima según Köppen.* (Mapa). Escala: 1:450000. ArcGIS Pro-3.5.3. (Esri, 2024). Creado con datos, DGA, 2023, 2020, 2013; Dirección de Vialidad, MOP, 2021; SUBDERE, 2023.

En las últimas décadas, la comuna de Petorca ha experimentado una sequía progresivamente más intensa y prolongada. Estudios paleoclimáticos indican que el evento de 2010-2020 constituyó la sequía más extrema en al menos 700 años en la zona central de Chile, con un déficit de precipitaciones cercano al 30 % y temperaturas inusualmente altas, fenómeno conocido como la mega sequía central chilena (Garreaud et al., 2017). Esta tendencia se ha extendido y profundizado en los años recientes, configurando un escenario de hipersequía sin precedentes, caracterizado por una persistente anomalía negativa de

precipitación, incrementos sostenidos de temperatura y una intensificación del déficit hídrico en la zona centro-norte (Garreaud et al., 2025) (ver Tabla 2).

En Petorca, la disponibilidad hídrica natural depende casi exclusivamente de las lluvias y nevadas invernales, ya que sus ríos carecen de aporte glaciar significativo. La fuerte reducción de estas fuentes, junto con la elevada evaporación estival, ha provocado una disminución crítica de los caudales del río Petorca y sus afluentes. Pequeños cuerpos de agua, como tranques o embalses locales, por ejemplo, Los Sobrantes, en la parte alta de la cuenca, registraron descensos notables en la última década. A diferencia de décadas anteriores, cuando las zonas altas retenían mejor el agua, la reciente aridificación ha afectado también esos sectores tradicionalmente más húmedos (Muñoz et al., 2020).

Tabla 2: Evolución climática e hidrológica de la comuna de Petorca (1985-2024)

Indicador	Período histórico / Evento	Valor histórico o promedio	Período reciente / Evento específico	Valor actual o reciente	Cambio o variación	Fuente	Observaciones
Precipitación anual media	1985-2015	≈250 mm	2010-2023	≈125 mm	-50 %	Muñoz et al., 2020; DGA, 2022.	Reducción sostenida asociada a la megasequía; tendencia negativa significativa.
Promedio histórico anual		≈200-250 mm				BCN, 2020; DGA, 2022.	Corresponde al rango promedio previo a la megasequía.
Precipitación anual 2021			2021	≈43 mm		DGA, 2022.	Uno de los años más secos registrados.
Precipitación anual 2023			2023	≈52 mm		DMC, 2023.	Muestra ligera recuperación, sin revertir déficit acumulado.
Evento pluviométrico 13-14 jun 2024			2024	≈73 mm (en 2 días)	Episodio puntual	CR2, 2024.	Evento extremo dentro de un régimen árido; no modifica tendencia de sequía.
Humedad relativa		≈40-55 % (media anual)			Estable	BCN, 2020.	Condiciones de humedad bajas y constantes;

(interior comuna)							agravan evaporación y déficit hídrico.
Caudal medio del río Petorca	1985-2015	2,6 m ³ /s	2001-2018	1,3 m ³ /s	-50 %	Muñoz et al., 2020.	Descenso del caudal; pérdida del régimen nivo-pluvial; alta correlación con déficit de lluvias.
Recarga neta de acuíferos	1990-2010	+78 L/s	2011-2023	-78 L/s	Déficit crítico	Muñoz et al., 2020; DGA, 1996, 2018.	Evidencia sobreexplotación crónica; niveles freáticos en descenso; zona de prohibición desde 2018.

La disponibilidad hídrica depende de forma crítica de un delicado balance entre el factor climático y la presión antrópica. De forma paralela al factor climático, la gestión y uso del agua han contribuido decisivamente a la escasez hídrica en Petorca. Desde la década de 1990 se otorgaron masivamente derechos de aprovechamiento a productores agrícolas, incrementándose en un 1200 % el caudal asignado entre 1987 y 2018 (Garreaud et al., 2017). Según Muñoz et al. (2020), el volumen total de derechos concedidos equivale al 15 % de la precipitación media anual de la cuenca, considerando aguas superficiales y subterráneas. Este nivel de extracción, sumado al déficit pluviométrico, generó un severo desequilibrio hídrico, provocando la reducción e incluso desaparición de los caudales naturales (ver Tabla 2).

Hacia fines de los noventa, el río Petorca dejó de fluir regularmente en su parte baja; en 1997 la Dirección General de Aguas (DGA) declaró agotadas sus aguas superficiales e impidió nuevos derechos río abajo, estableciendo en 2004 áreas de restricción para la extracción subterránea. En la Figura 2 se muestran estas zonas bajo prohibición, evidenciando la sobreexplotación del acuífero. Pese a las restricciones, numerosos agricultores profundizaron pozos y continuaron extrayendo agua, a menudo de forma ilegal. Entre 2008 y 2018, la DGA recibió 241 denuncias por extracciones no autorizadas, reflejando la débil fiscalización y la fuerte competencia por el recurso.

Desde 2018, el Gobierno de Chile ha debido declarar reiteradamente a Petorca en estado de escasez hídrica mediante decretos de emergencia. Más del 20 % de la población depende de camiones aljibe para abastecerse, con dotaciones que en ocasiones no superan los 100 litros por persona al día (Muñoz et al., 2020). Esta situación crítica ha posicionado a Petorca como símbolo nacional de los conflictos por el agua. Actualmente, la cuenca se encuentra declarada como zona de catástrofe hídrica (Decreto del Ministerio del Interior N.º 1280) y zona de escasez hídrica (Decreto MOP N.º 4 del 05 de enero de 2018).

4.1.3 Aptitud Agrológica y Potencial de Uso del Suelo OE1.

Según el estudio agrológico del CIREN (2014), el análisis de suelos en Petorca muestra una baja aptitud intrínseca para la agricultura intensiva. La distribución territorial por clases agrológicas (Tabla 3) indica que las tierras de óptima aptitud (Clase I) son casi inexistentes, predominando suelos de Clase VII (68,5% del total comunal).

Tabla 3. Distribución de la Superficie Comunal según Clases de Capacidad de Uso Agrológico (CIREN, 2014).

Clase Agrológica	Porcentaje Comunal	Aptitud de Uso	Limitaciones
I	0,2%	Agricultura intensiva	Sin limitaciones
II-IV	≈11%	Uso agrícola	Limitaciones leves a severas
VVI	20,3%	Praderas y forestación	Inadecuado para cultivos (permanentes)
VII	68,5%	Forestal/pastoreo extensivo	Limitaciones muy severas
VIII	≈0%	Conservación	Sin aptitud agropecuaria

***Fuente:** Elaboración propia con datos CIREN (2014).

La predominancia estructural de la Clase VII es el pilar del argumento de desalineación territorial, ya que estas tierras solo son recomendadas para pastoreo extensivo o forestación debido a sus severas limitaciones como fuertes pendientes, riesgo de erosión, suelos someros y baja retención hídrica. Las tierras aptas para cultivos (Clases II-IV), aunque con restricciones de leves a severas, representan apenas un 11 % de la superficie comunal, concentrándose exclusivamente en las estrechas planicies y terrazas aluviales del río Petorca.

4.1.4.- Uso de suelo y actividad socioeconómica OE1.

El uso del suelo en Petorca refleja el choque entre un entorno semiárido y la agricultura intensiva: laderas y cumbres dominadas por matorral xerófito y estepa altoandina, mientras vegas y fondos de valle concentran suelos agrícolas. Desde fines del siglo XX la fruticultura de exportación paltos, cítricos y nogales transformó el paisaje: en 2023 se registraron 6 678 ha de frutales en la provincia, siendo Petorca y La Ligua el 62 % de la producción nacional de palta (20 434 ha) (Muñoz et al., 2020; ODEPA y CIREN, 2023).

Esta expansión acentuó la desigualdad: coexisten 346 pequeños productores (<5ha) que suman ~482 ha (≈7%) con 18 grandes (>500 ha) que concentran ~1556 ha (≈23%) (ODEPA y CIREN, 2023). La concentración de tierra y agua ha generado una profunda fractura socio-metabólica en el territorio, entendida como la ruptura en los flujos de energía y materiales entre el sistema natural y el sistema social. Esta fractura se manifiesta en la apropiación desproporcionada de recursos hídricos por parte del agronegocio exportador,

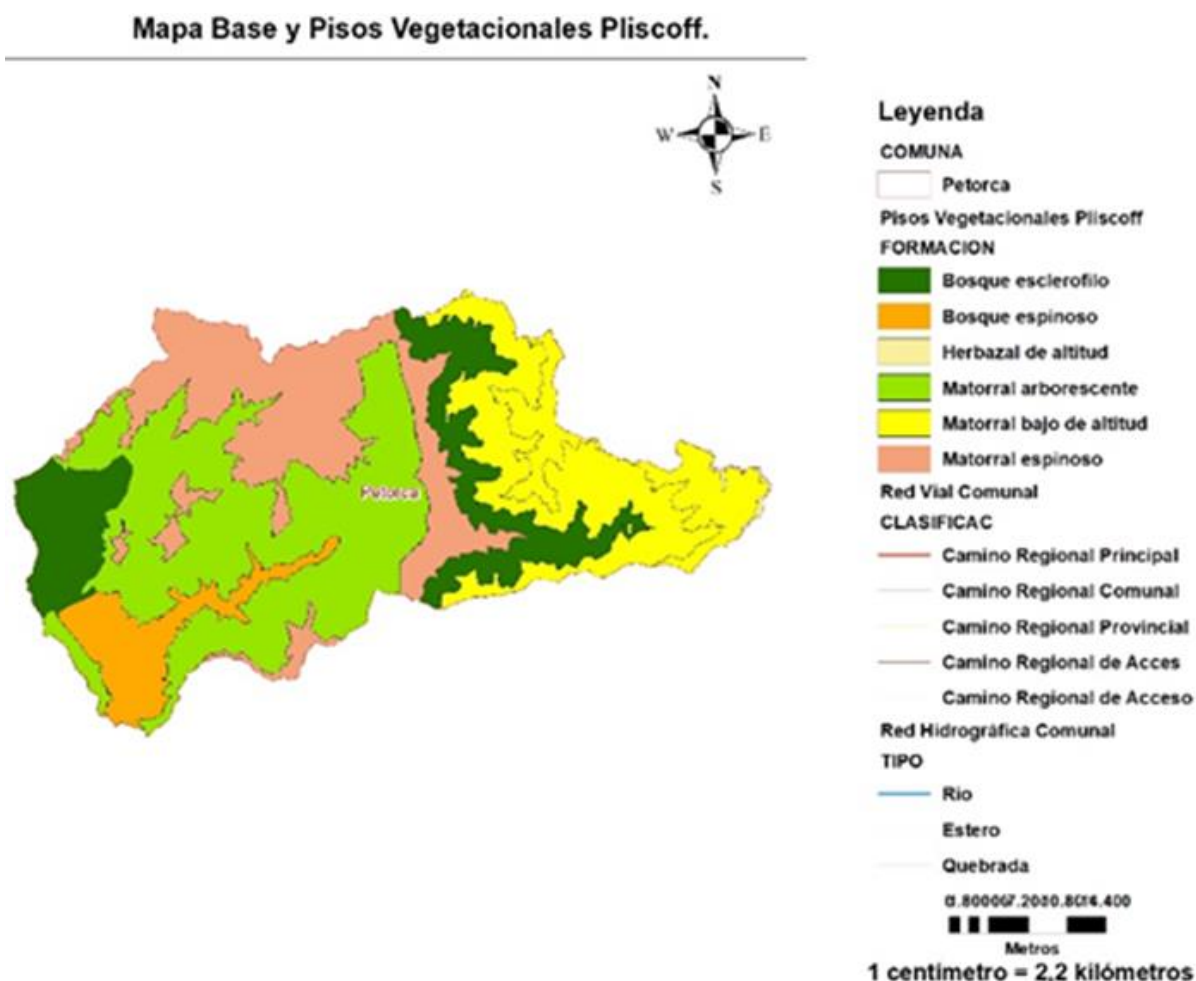
mientras los costos ambientales y sociales, como la escasez hídrica para consumo humano y la degradación de ecosistemas son externalizados hacia las comunidades locales y pequeños agricultores (Panez-Pinto et al., 2018; Miranda, 2018). Aunque la sequía redujo ~30 % la superficie de paltos, el modelo agroexportador de alta demanda hídrica persiste mediante pozos profundos y bombeo límite o ilegal, intensificando conflictos socioambientales (Comité de Palta de Chile, 2019; CIREN y SiTRural, 2024; Villalobos, 2023).

4.1.4.1.- Usos de suelo y pisos vegetacionales.

La cobertura vegetal de Petorca está dominada por vegetación esclerófila y matorrales xerófitos p. ej., *Quillaja saponaria*, *Porlieria chilensis*, *Cryptocarya alba*, *Lithraea caustica*, *Peumus boldus*, con parches de bosque nativo restringidos a quebradas y mayores altitudes, y una matriz antrópica en valles y terrazas aluviales. El gradiente altitudinal y el clima mediterráneo semiárido explican la heterogeneidad: estepa altoandina en cumbres y matorrales ralos en laderas contrastan con enclaves agrícolas en fondos de valle (Santibáñez y Santibáñez, 2014). (ver Figuras 6 y 7).

El análisis espacial evidencia alta fragmentación de coberturas nativas y pérdida de continuidad, sobre todo bajo fuerte presión agrofrutícola; los mapas muestran amplios parches sin vegetación o plantaciones en el valle y manchas verdes aisladas en cerros

Figura 6.



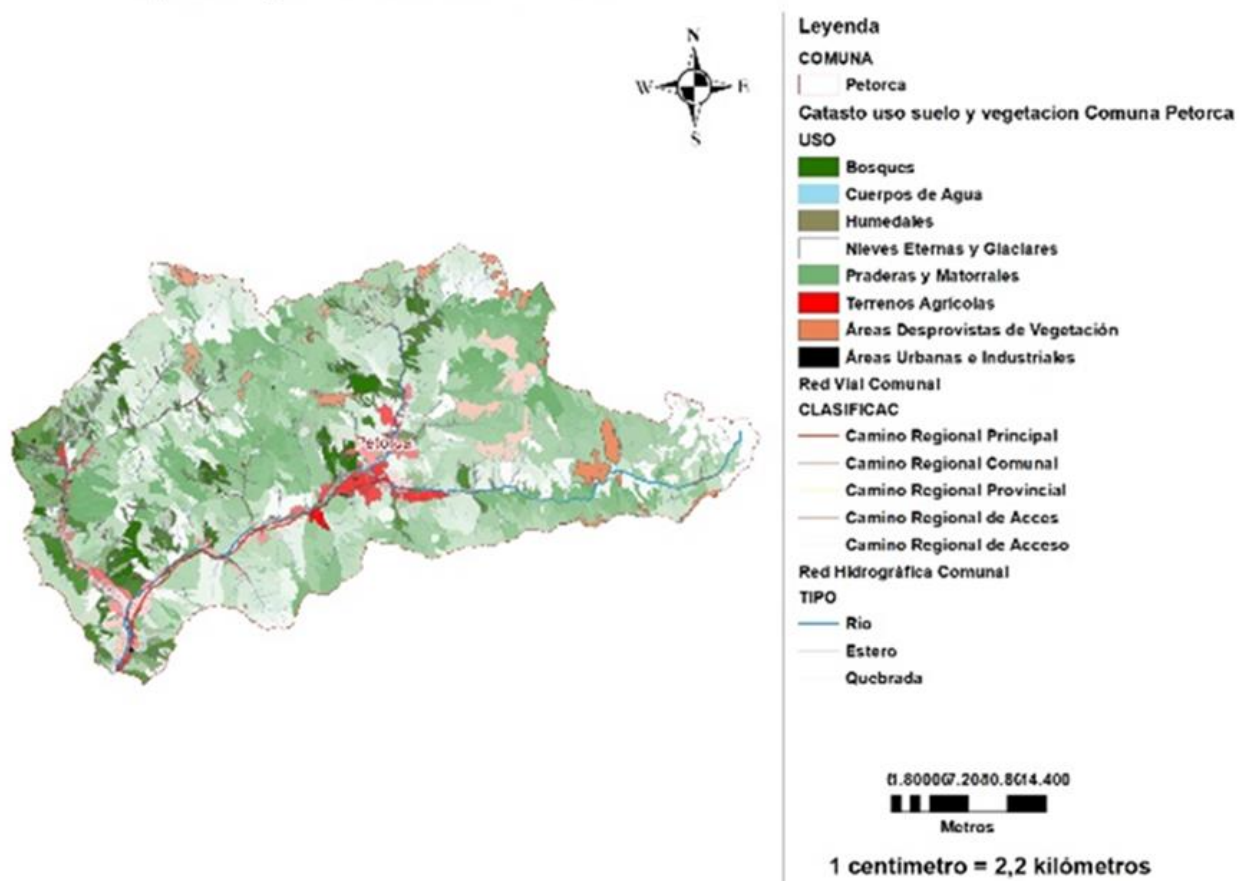
***Nota.** Elaborado por Trabal, A., 2025. Mapa Base y Pisos Vegetacionales Pliscoff. Escala: 1:20.000. ArcGISPro3.5.3. (Esri, 2024). Creado con datos, DGA, 2023, 2020, 2013; Dirección de Vialidad, MOP, 2021; MMA, 2020; SUBDERE, 2023.

La expansión agroexportadora (paltos, cítricos, nogales) intensifica la presión sobre ecosistemas nativos, incluso en laderas de suelos someros y baja retención hídrica, afectando infiltración, conectividad y servicios ecosistémicos (ODEPA y CIREN, 2023; Panez-Pinto et al., 2018). Este avance ocurre en contexto de mega sequía y sobreasignación de derechos de agua, agravando la escasez estructural y presionando caudales y niveles freáticos; territorialmente, se concentra en valles y abanicos aluviales, reemplazando formaciones nativas y extendiéndose hacia laderas de alto riesgo erosivo (Muñoz et al., 2020; ODEPA y CIREN, 2023; Panez-Pinto et al., 2018). Desde la conservación, destacan sitios prioritarios «Altos de Petorca y Alicahue» y «Petorca», con alto endemismo y hábitats clave para la zona central, esenciales para conectividad ecológica y recarga hídrica; allí deben focalizarse acciones de conservación y restauración

para sostener servicios ecosistémicos y resiliencia climática (Santibáñez et al., 2014; MMA, 2023). El análisis

Figura 7.

Mapa Base y Catastro usos de suelos.



***Nota.** Elaborado por Trabal, A., 2025). Mapa Base y catastro de uso de suelo. (Mapa). Escala: 1:2,2. ArcGIS Pro-3.5.3. (Esri, 2024). Creado con datos, DGA, 2023, 2020, 2013; Dirección de Vialidad, MOP, 2021; MMA, 2016; SUBDERE, 2023).

sugiere que las SbN a escala de cuenca, como franjas ribereñas, restauración de laderas con especies nativas y manejo integrado de microcuencas, podrían contribuir significativamente a aumentar la recarga hídrica mientras se adapta al Cambio Climático y reduce la demanda hídrica del modelo productivo actual (MMA, 2023; Muñoz et al., 2020; Santibáñez y Santibáñez, 2014). Las áreas prioritarias incluyen: (1) cabeceras y laderas altas con remanentes nativos; (2) tramos medios del río Petorca y esteros con franjas ribereñas y exclusión ganadera; (3) laderas intervenidas y empinadas con reforestación de esclerófilas; y (4) mosaicos de setos vivos entre predios, priorizando por sensibilidad ecológica, pendiente, cercanía a cauces y presión antrópica

para orientar inversiones de mayor retorno ecosistémico (MMA, 2023; Santibáñez y Santibáñez, 2014).

El paisaje de la comuna de Petorca combina ecosistemas mediterráneos valiosos pero fragmentados con un modelo agro productivo intensivo que excede los límites hidroecológicos, reduciendo caudales y degradando vegetación nativa en contexto de mega sequía (Muñoz et al., 2020; Santibáñez y Santibáñez, 2014). La cartografía uso/cobertura confirma una matriz de matorral esclerófilo y xerófitas interrumpida por núcleos agrícolas en valles y terrazas, donde plantaciones de alto requerimiento hídrico ocupan suelos de mejor aptitud, desplazando coberturas nativas y aumentando la fragmentación (ver Figuras 6 y 7) (ODEPA y CIREN, 2023; Santibáñez y Santibáñez, 2014).

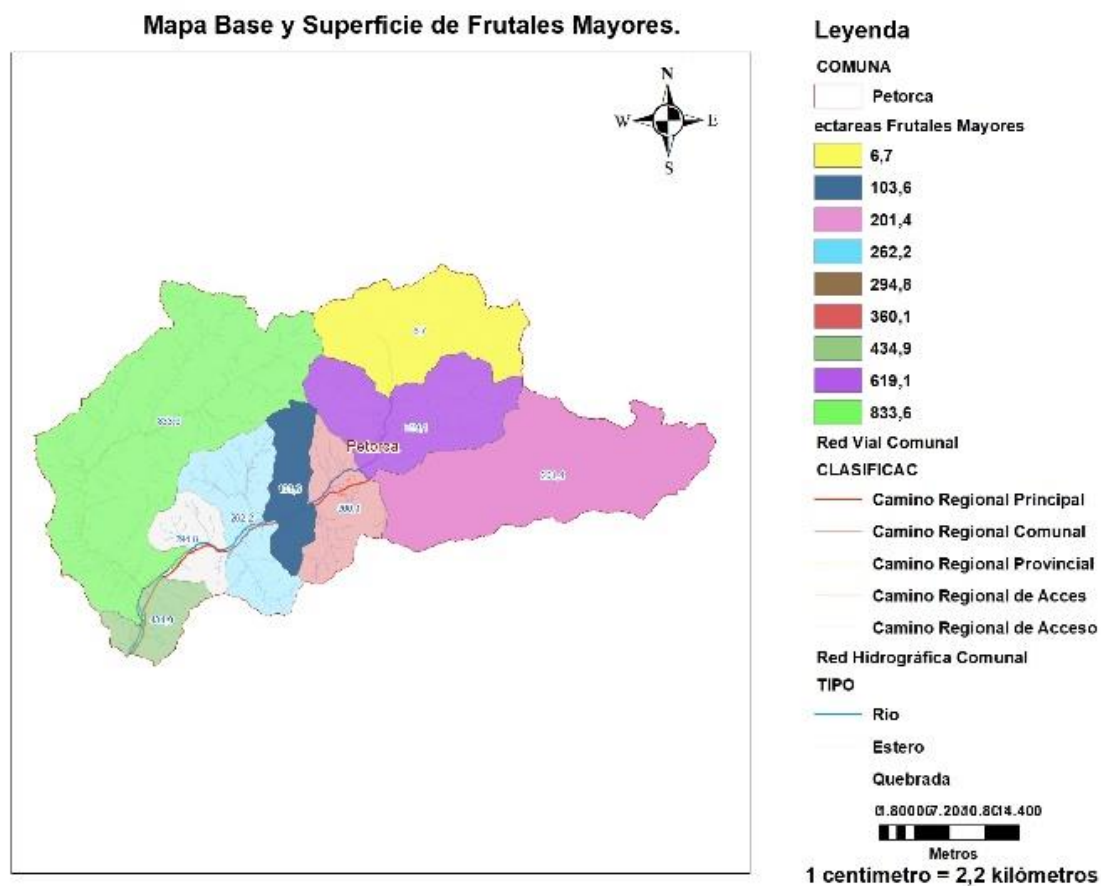
4.1.4.2.- Uso de suelo, vegetación y estructura productiva en Petorca.

El catastro 2019 muestra que áreas agrícolas y «sin vegetación» dominan la cuenca media-baja, afectando la recarga de acuíferos y la estabilidad de laderas (ODEPA y CIREN, 2023). La expansión de frutales sobre suelos de baja retención hídrica intensifica erosión, escorrentía, sedimentación y deterioro de la calidad del agua, debilitando servicios esenciales de regulación hídrica y control de erosión en clima semiárido (Santibáñez y Santibáñez, 2014). La concentración espacial de paltos, cítricos y nogales junto a fuentes hídricas y corredores viales (Figura 7) intensifica esta dinámica de exclusión, donde la agricultura familiar es progresivamente marginada del acceso a los recursos estratégicos, profundizando las asimetrías territoriales ya identificadas (ODEPA y CIREN, 2023).

En la práctica, los montes de frutales se extienden por laderas donde antes crecía matorral nativo, lo que ha sido documentado con imágenes satelitales (Youlton et al., 2010) y entrevistas a agricultores locales (MODATIMA, 2019). Evidenciando un conflicto persistente entre expansión agrofrutícola y funciones ecosistémicas que exige zonificación con núcleos de conservación, amortiguación riparia y laderas, y corredores que conecten remanentes nativos (Santibáñez y Santibáñez, 2014; ODEPA y CIREN, 2023). Se requieren SbN a escala de cuenca: (1) franjas ribereñas con nativas, (2) restauración de laderas para estabilizar suelos e incrementar infiltración, (3) setos vivos y agroforestería que reconecten parches y apoyen polinizadores, y (4) diversificación productiva con menor HH (MMA, 2023; Santibáñez y Santibáñez, 2014). Estas medidas fortalecen la resiliencia climática y la provisión de servicios de regulación y soporte (MMA, 2023).

Figura 8.

Mapa Base con superficie frutales mayores.



ATF

***Nota.** Elaborado por Trabal, A., 2025. Mapa Base y Superficie frutales Mayores. (Mapa). Escala: 1:2,2. ArcGIS Pro-3.5.3. (Esri, 2024). Creado con datos, DGA, 2023, 2020, 2013; Dirección de Vialidad, MOP, 2021; Ministerio de Agricultura, 2007; SUBDERE, 2023.

4.1.5.- Superficie cultivada y modelos agro-frutícolas OE1.

4.1.5.1.-Superficie cultivada vs. aptitud agroclimática por especie

La comparación entre superficie cultivada y modelos de aptitud agroclimática revela una desalineación estructural: numerosas plantaciones se asientan en áreas marginales o excluidas (MMA, 2024; ODEPA y CIREN, 2023). En Petorca, la mayoría de los paltos ocupa zonas con limitaciones severas o fuera de la aptitud recomendada; el patrón se repite regionalmente en cítricos, mientras que los nogales, menos extensos, se localizan en sitios de mejor aptitud relativa (ODEPA y CIREN, 2023; Panez-Pinto et al., 2018; Santibáñez & Santibáñez, 2014). Ello evidencia

desplazamiento de la frontera agrícola hacia entornos eco hidrológicamente sensibles, desatendiendo la vocación del territorio (MMA, 2024; Panéz-Pinto et al., 2018).

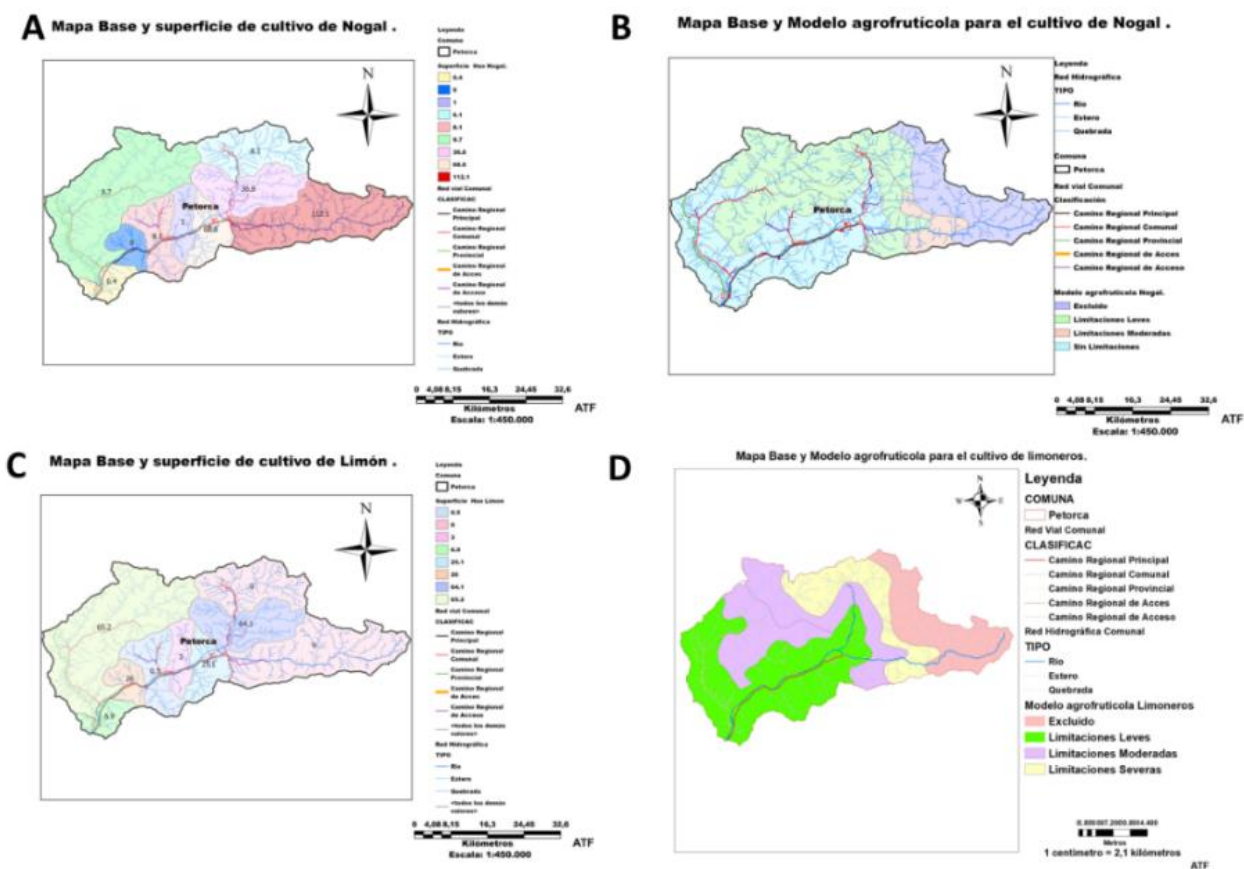
4.1.5.2.-Zonas de sobreuso y conflictos asociados

En la Región de Valparaíso, aproximadamente el 70 % de las plantaciones de palto se encuentran en suelos sin aptitud agrícola: 41 % en Clase VII y 9 % en Clase VIII (Miranda, 2022). Entre 2014 y 2023, se incorporaron más de 2.000 ha en laderas con pendientes superiores al 30 %, sustituyendo vegetación nativa a través de planes de manejo aprobados por la SAG (ODEPA y CIREN, 2023).

Estas áreas, clasificadas como VII-VIII (CIREN, 1997), son marginales o excluidas por alto riesgo erosivo y baja aptitud frutícola. Cítricos (limoneros y naranjos) avanzan sobre superficies con fuertes limitaciones en cuencas semiáridas (BSk) y alto déficit hídrico (INIA y CIREN, 2017; Minagri, 2017). La cartografía muestra sobreuso de laderas pendientes, suelos someros, baja infiltración y pérdida de coberturas nativas, mientras planicies de valle de alta aptitud permanecen subutilizadas (ver Figuras 9 y 10) (MMA, 2024; ODEPA y CIREN, 2023; Panéz-Pinto et al., 2018; Santibáñez & Santibáñez, 2014). En ecosistema semiárido y mega sequía, la expansión frutícola ha elevado la demanda de riego por sobre la recarga, agravando sobreasignación de derechos, descenso de niveles freáticos, déficit para consumo humano y conflictividad social (CR2, 2023; Muñoz et al., 2020).

Figura 9.

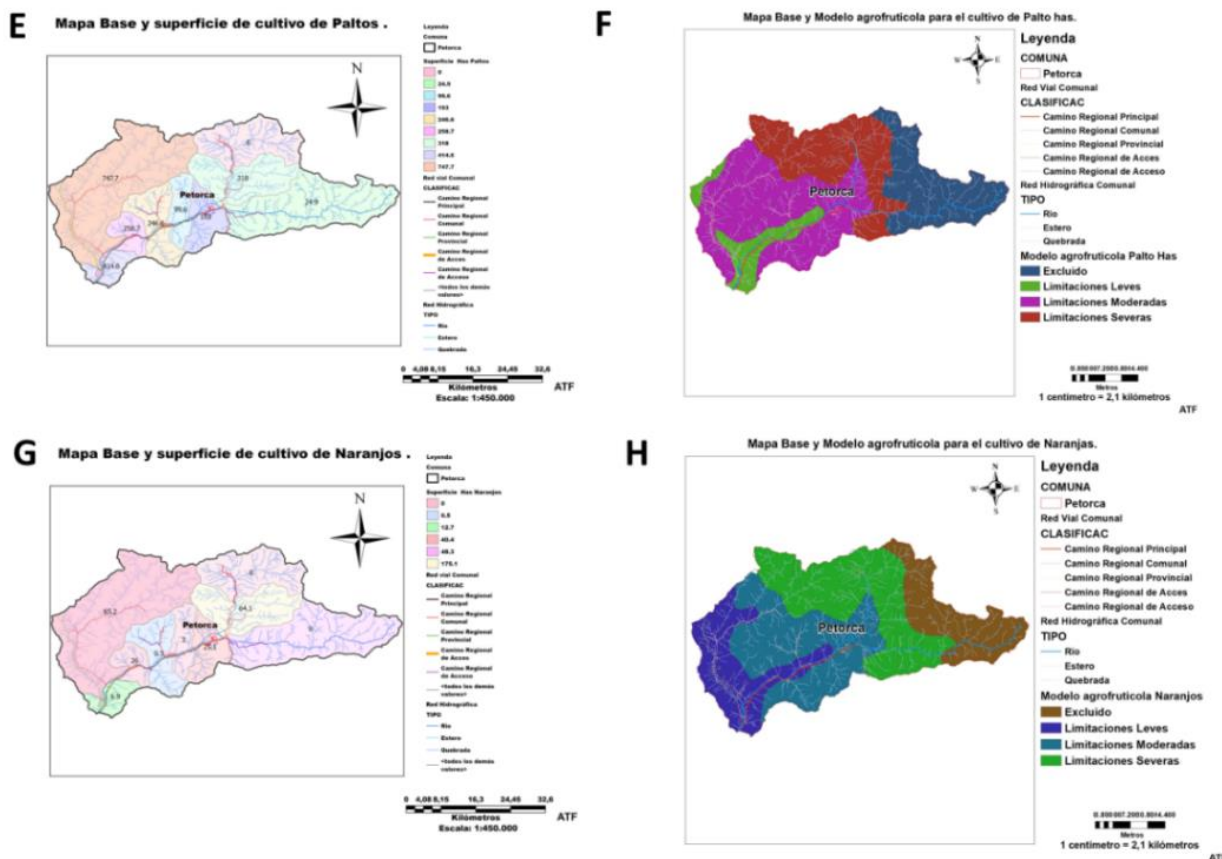
Secuencia de mapas base: superficies cultivadas vs. modelo de aptitud edafoclimática por especie. A: Superficie de cultivo de nogal. B: Modelo agrofrutícola para nogal. C: Superficie de cultivo de limones. D: Modelo agrofrutícola para limones.



***Nota.** Trabal, A., 2025. Mapa Base. Escala A-D: 1:21000. ArcGIS Pro-3.5.3. (Esri, 2024). Elaborado con datos Ministerio de Agricultura, 2007; DGA, 2013, 2020, 2023; Dirección de Vialidad, MOP, 2021; SUBDERE, 2023.

Figura 10.

Secuencia de mapas base: superficies cultivadas vs. modelo de aptitud edafoclimática por especie. A: Superficie de cultivo de paltos. B: Modelo agrofrutícola para paltos. C: Superficie de cultivo de naranjos. D: Modelo agrofrutícola para naranjos.



***Nota.** Elaborado por Trabal, A., 2025. Mapa Base. Escala A-D: 1:2,1. ArcGIS Pro-3.5.3. (Esri, 2024). Elaborado con datos Ministerio de Agricultura, 2007; DGA, 2013, 2020, 2023; Dirección de Vialidad, MOP, 2021; SUBDERE, 2023.

4.1.5.3.- Erosión y degradación de suelos.

Paltos y cítricos ocupan áreas de severas limitaciones, mientras naranjos y nogales se ajustan mejor a las condiciones, generando erosión, sobreuso hídrico y pérdida de vegetación nativa (Muñoz et al., 2020; Panez-Pinto et al., 2018). El cultivo en laderas con camellones y suelos frágiles acelera escorrentía y pérdida de suelo fértil, reduciendo infiltración y recarga (MMA, 2024; Santibáñez y Santibáñez, 2014). La sustitución de matorral y bosque esclerófilo por plantaciones en pendientes aumenta la susceptibilidad a eventos extremos (lluvias concentradas) con efectos aguas abajo (MMA, 2024; Panez-Pinto et al., 2018).

4.1.5.4.- Uso de áreas no aptas.

El establecimiento de cultivos en terrenos catalogados con limitaciones severas o excluidos tensiona los ecosistemas y el marco regulatorio ambiental, la evidencia cartográfica sugiere uso excesivo de tierras inapropiadas. De esta forma, en Petorca se han instalado plantaciones de frutales en laderas con alta pendiente y en suelos de baja aptitud agrícola, generando pasivos ambientales por erosión, pérdida de biodiversidad y estrés hídrico (ver Figura 9 y 10) (MMA, 2024; ODEPA y CIREN, 2023; Panez-Pinto et al., 2018).

4.1.5.5.- Coherencia con sostenibilidad y SbN.

Las SbN exigen alinear la producción con los límites eco-hidrológicos del territorio (IUCN, 2020; MMA, 2024). En Petorca, la ubicación de frutales en áreas marginales y riberas sin vegetación nativa contradice esos principios al omitir salvaguardas ecosistémicas (IUCN, 2020; MMA, 2024). Desde SbN, la reorientación espacial y el manejo adaptativo debieran priorizar: (1) franjas ribereñas con nativas para proteger cauces y calidad de agua; (2) restauración de laderas (coberturas, terrazas vivas, setos) que establezcan suelos e incrementen infiltración; (3) conectividad de parches nativos y corredores biológicos; (4) diversificación hacia especies y manejos de menor HH (MMA, 2024; Santibáñez y Santibáñez, 2014).

4.1.5.6.- Implicancias para los ODS.

Petorca exhibe una desconexión crítica con varios ODS.

ODS 6 (Agua limpia): La demanda supera la recarga, dificultando la gestión sostenible (meta 6.6).

ODS 15 (Vida terrestre): La conversión de laderas nativas a monocultivos compromete la conservación de ecosistemas terrestres (meta 15.1) y acelera degradación del suelo (MMA, 2024; Santibáñez y Santibáñez, 2014;).

ODS 12 (Producción responsable): El modelo exportador intensivo en agua no alinea la eficiencia de recursos ni circularidad (MMA, 2024; ONU, 2015).

ODS 13: baja cobertura vegetal y escasa infiltración reducen resiliencia a extremos; las SbN son clave para adaptación en cuencas semiáridas (IUCN, 2020; MMA, 2024).

ODS 2: especialización en cultivos de exportación, sin respetar límites ecológicos y seguridad hídrica local, tensiona seguridad alimentaria y equidad comunal (ODEPA y CIREN, 2023; ONU, 2015).

El estudio evidencia desconexión entre expansión productiva y límites ecológicos, priorizando rentabilidad cortoplacista sobre sostenibilidad. Las SbN ofrecen la vía estratégica para revertir esta tendencia y cumplir integralmente los ODS.

4.1.6.- Disponibilidad y uso de recursos hídricos OE1.

El diagnóstico de la gestión hídrica municipal en Petorca revela que la disponibilidad de agua está fuertemente condicionada por debilidades de coordinación institucional: a escala país, el 44 % de la escasez obedece a fallas de gestión más que a causas climáticas (Fundación Chile, 2019, citado en Villalobos, 2023).

En la comuna operan 24 sistemas de Agua Potable Rural (APR), de los cuales 13 disponen de pozos propios; sin embargo, la mayoría registra descensos freáticos y al menos cuatro presentan derechos no regularizados, lo que restringe la oferta efectiva y aumenta la vulnerabilidad operativa (Villalobos, 2023). Para suplir la brecha, se utiliza el Sistema de Aducción del río Petorca más de 40 km que interconecta 11 APR, cerca de 7 000 habitantes aún dependen de camiones aljibe, con un costo anual aproximado de \$1 250 millones para el municipio (Villalobos, 2023).

El patrón actual prioriza el abastecimiento de emergencia y el trasvase intercomunal por encima de una gestión que establezca las fuentes. Reorientar la inversión hacia infraestructura resiliente nuevos pozos, redes con telemetría y plantas descentralizadas de tratamiento y medidas de base ecosistémica reforestación de cuencas, restauración de suelos y protección de zonas de infiltración permite recuperar recarga y reducir pérdidas, mejorando la disponibilidad neta para APR y consumo humano (IUCN, 2020; Villalobos, 2023). Impera, transitar de soluciones paliativas a una gestión integrada del recurso hídrico equilibraría oferta y demanda, disminuyendo la dependencia del transporte de agua y fortaleciendo la seguridad hídrica local (Villalobos, 2023).

4.1.6.1.- Disponibilidad y estado del recurso hídrico superficial.

El río Petorca, históricamente nivo-pluvial, ha reducido drásticamente sus caudales: el medio anual bajó de $\sim 2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (1985-2015) a $\sim 1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (2001-2018), muy por debajo de los $\sim 4,1 \text{ m}^3/\text{s}$ esperables en régimen natural (Universidad de Chile, 2020). La disminución se acentúa en verano: en febrero 2023 el caudal fue inferior al promedio histórico 1991-2020 (DGA, 2023). Desde 1997 la autoridad declaró agotadas las aguas superficiales del cauce, prohibiendo nuevos derechos consuntivos (BCN, 2025).

En cuanto a calidad, las aguas superficiales presentan baja salinidad en la alta cuenca, aptas para riego y consumo, aunque con niveles algo elevados de Fe y Mn mitigables por filtración (CIREN y SITRural, 2024). Las tablas 4 y 5 resumen los datos hidrológicos, condición y calidad de aguas superficiales y subterráneas.

Tabla 4. Datos hidrológicos superficiales y subterráneos Petorca.

Aspecto	Datos Clave	Fuente
Disponibilidad superficial	Río Petorca con caudal medio anual actual $\sim 1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (2001-2018), antes $\sim 2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (1985-2015); régimen históricamente nivo-pluvial; aguas superficiales declaradas agotadas a fines de los 90.	U. de Chile, 2020; DGA, 1997.
Calidad superficial	Baja salinidad en tramos altos; aumento progresivo hacia costa; apta para riego y consumo con tratamiento de Fe y Mn.	CIREN, 2024.
Disponibilidad subterránea	Acuífero aluvial libre (8-25 m de espesor); extracciones superan recarga; balance negativo ($\sim 78 \text{ L/s}$ ya en 1996).	DGA, 1996.
Estado de acuíferos	Sobreexplotados en todos los sectores; demanda > oferta; niveles freáticos descendentes; Zona de Prohibición desde 2018 (no se otorgan nuevos DAA).	DGA, 2018.
Calidades subterráneas	Similar a superficial, baja salinidad; leve aumento hacia costa; Fe y Mn sobre norma.	CIREN, 2024.
Caudales recientes	Febrero 2023: déficit de 79% en caudal respecto del promedio 1991-2020; en años secos $< 100 \text{ L/s}$.	BCN, 2024.
Sectores hidrogeológicos	5 sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC), cada uno con Comunidad de Aguas Subterráneas (CAS) constituida desde 2016.	DGA, 2024.
DAA otorgados	Mayoritariamente consuntivos para riego; predominan derechos subterráneos; concentración en grandes productores de paltos y cítricos; comunidades APR y pequeños regantes con menor proporción.	INDH, 2019; U. de Chile, 2020.
Situación legal DAA	Superficiales agotados desde 1997; subterráneos bajo área de restricción (2004) y luego Zona de Prohibición (2018) . No se admiten nuevos derechos.	DGA, 2018.

Tabla 5. Indicadores Críticos del Balance Hídrico en la Cuenca de Petorca

Indicador	Valor (Referencia temporal)	Estado/Restricción	Fuente
Caudal medio anual reciente	~1,3 m ³ /s (2001-2018)	Reducción vs. histórico	U. de Chile, 2020.
Caudal histórico	~2,6 m ³ /s (1985-2015)		U. de Chile, 2020.
Déficit Caudal (Estiaje)	febrero 2023	Escasez extrema, -79% vs. promedio 1991-2020	BCN, 2024.
Aguas Superficiales	Déficit de -78 L/s	Prohibición de nuevos DAA	DGA, 1997.
Balance Acuífero (1996)	Sobreexplotadas	Balance Negativo	DGA, 1996.
Aguas Subterráneas	(1990s a 2018)	Zona de Prohibición desde 2018	BCN, 2018.
Aumento DAA Concedidos			CR2, 2022.

4.1.6.2.- Condición y explotación de los acuíferos subterráneos.

El agua subterránea es hoy la principal fuente de la comuna y los acuíferos aluviales se encuentran sobreexplotados. Limitados a los rellenos del valle con espesores de 8-25 m (CIREN y SITRural, 2024), registran un balance negativo sostenido: ya en 1996 las extracciones superaban la recarga en ≈-78 L/s (Bujes, 2015; DGA, 1996) y en 2018 la DGA confirmó que la demanda comprometida sobrepasa la disponibilidad sostenible en todos los sectores, declarándolos formalmente en Zona de Prohibición (Res. Ex. DGA N° 19/2018; BCN, 2018). Las restricciones preceden: acuífero río Petorca, Área de Restricción desde 1997 (Res. DGA N° 216); río La Ligua, desde 2004 (Res. DGA N° 204). La calidad del agua subterránea es baja en salinidad y apta para consumo y riego, con excedencias tratables de Fe y Mn (CIREN y SITRural, 2024).

4.1.6.3.- Derechos de aprovechamiento de aguas (DAA) y competencia.

El marco legal y la asignación histórica de DAA explican la crisis hídrica local. El boom de concesiones para frutales desde fines de los 8 duplicó los derechos consuntivos hacia 2000 y los elevó ~1200 % hasta 2018 (Muñoz et al., 2020). El volumen total de DAA alcanza ~30 % de la lluvia media anual (~15% superficial y ~15% subterránea), concentrándose en pocos titulares y orientado casi exclusivamente a la agricultura de exportación (Bujes, 2015; Muñoz et al., 2020). Esta escasez inducida generó extracciones ilegales: entre 2008 y 2018 la DGA recibió 241 denuncias formales en Petorca (Muñoz et al., 2020).

4.2.- Resultados analíticos OE2.

Esta sección dimensiona las presiones ambientales mediante la cuantificación de huellas ambientales y el análisis de indicadores socioambientales.

4.2.1.- HH y HC OE2.

La HE cuantifica la superficie biológicamente productiva necesaria para absorber los impactos del consumo humano (energía, agua, residuos, ocupación de suelo) y es clave para evaluar la sostenibilidad territorial. La presión antrópica sobre el recurso hídrico se ve reflejada también en HH de los cultivos predominantes, analizada a continuación.

4.2.1.1.- Metodología y Aplicación a Petorca Metodología de Cálculo de HH

La estimación de la HH para los cultivos de Petorca se basó en la metodología estandarizada de la Water Footprint Network (Mekonnen y Hoekstra, 2011), los valores se interpretaron con un factor de ajuste ($k=1.35$) para reflejar las condiciones semiáridas de Petorca utilizando los coeficientes reportados en la base de datos WaterStat (Mekonnen y Hoekstra, 2011).

Se aplicaron los siguientes criterios metodológicos:

- **Valores sustitutos:** Dada la ausencia de estudios específicos de HH para Petorca, se utilizaron los valores globales como aproximación, considerando que representan promedios bajo condiciones de cultivo estándar.
- **Componentes consideradas:**
 - **Agua verde:** Precipitación almacenada en el suelo
 - **Agua azul:** Extracción de fuentes superficiales y subterráneas
 - **Agua gris:** Volumen requerido para diluir contaminantes
- **Ajustes contextuales:** Los valores se interpretaron considerando las condiciones semiáridas de Petorca, donde la componente azul adquiere mayor relevancia debido a la dependencia del riego.

Limitaciones reconocidas: Los coeficientes globales pueden subestimar o sobreestimar la HH real en Petorca debido a diferencias en eficiencia de riego, condiciones edafoclimáticas locales y prácticas de manejo específicas.

Metodología de Cálculo de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Los factores de emisión de GEI se calcularon siguiendo las Directrices del IPCC (2006) y su Refinamiento 2019, con las siguientes adaptaciones para el contexto de Petorca:

- **Factores de emisión base:** Se utilizaron los factores nacionales reportados por el Programa HuellaChile del MMA (2024) cuando estuvieron disponibles.
- **Ajustes por escala comunal:** Para actividades sin factores específicos a nivel comunal, se aplicaron los valores regionales o nacionales, explicitando este supuesto metodológico (de acuerdo con el IPCC, 2006).

- Sectores considerados:
 - **Transporte:** Factores de combustión móvil del Balance Nacional de Energía
 - **Agricultura:** Factores Tier 1 del IPCC para fermentación entérica y manejo de suelos
 - **Residuos:** Modelo de primer orden del IPCC para rellenos sanitarios

Supuestos metodológicos clave:

1. **Equivalencia climática:** Se asumió que las condiciones de Petorca son representativas de los promedios regionales para los factores de emisión agrícolas
2. **Consistencia temporal:** Todos los cálculos utilizaron el potencial de calentamiento global (GWP) del AR5 (CO₂=1, CH₄=28, N₂O=265)
3. **Representatividad operacional:** Para el sector residuos, se asumió una disposición en relleno sanitario sin captura de biogás, lo que corresponde a un escenario conservador recomendado cuando no existe información local sobre recuperación o quema de metano. La Tabla 6 resume los valores utilizados para los principales gases considerados en el inventario comunal, basados en los potenciales de calentamiento global (GWP₁₀₀) del IPCC AR6.

Tabla 6. Potenciales de Calentamiento Global (GWP₁₀₀) para los gases incluidos en el inventario

Gas (fórmula)	GWP (100 años, referencia IPCC AR6)
Dióxido de carbono (CO ₂)	1.0.
Metano (CH ₄) efecto directo + indirecto	27.9 (valor AR6 usado frecuentemente para GWP ₁₀₀ “metano”).
Óxido nitroso (N ₂ O)	273.
Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	≈23 500 (orden de magnitud según AR6/seguimiento técnico).

*Fuente: IPCC (2021), Sexto Informe de Evaluación, WG1.

Cálculo de emisiones sectoriales:

La estimación de emisiones por actividad se realizó mediante la fórmula:

Emisiones = Datos de actividad × Factor de emisión × GWP.

Donde los datos de actividad se obtuvieron de fuentes oficiales (INE, ODEPA, municipio) para el año base 2023.

Limitaciones y alcance:

- El inventario no incluye emisiones por cambio de uso de suelo
- No se consideraron sumideros de carbono
- La resolución comunal puede ocultar variaciones intercomunales.

4.2.1.2.- Huellas ambientales de la matriz productiva (HH y GEI)

Para dimensionar las presiones ambientales, se analizaron los coeficientes de HH y los factores de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

4.2.1.3.- HH de cultivos clave

Los coeficientes de HH provienen de la base WaterStat de la Water Footprint Network (Mekonnen y Hoekstra, 2011) y se emplean como valor sustituto para Petorca, expresando el volumen total de agua componentes verde, azul y gris consumido por tonelada de producto agrícola (ver Tabla 7). El palto presenta una HH ajustada de 2430 ± 270 m³/ton en contexto semiárido, clasificándolo como un cultivo de presión hídrica "Muy alta". Es fundamental notar que el Olivo, con una HH ajustada de 4739 ± 527 m³/ton representa un riesgo aún mayor de insostenibilidad si se expande en esta zona.

Tabla 7. HH ajustada por cultivo en contexto semiárido de la cuenca del río Petorca (WFN,2023; Mekonnen y Hoekstra, 2011)

Cultivo	HH Global (m ³ / ton)	Componente Agua Gris (m ³ / ton)	k Ajuste Semiárido	HH Ajustada (m ³ / ton)	Intensidad Contexto Semiárido
Olivo	3 510		1,35	4739 ± 527	Extremadamente alta
Palto	1 800	200	1,35	2430 ± 270	Muy alta
Nogal	1 350		1,35	1823 ± 203	Alta
Cítricos	540-642		1,35	$729-867 \pm 81$	Significativa

***Nota.** $k=1,35$ corresponde al factor de ajuste estimado para zonas semiáridas (precipitación <250mm/año) con déficit hídrico estructural. El rango "±" representa una variación del ± 10 % para reflejar incertidumbre de estimaciones globales adaptadas a condiciones locales. "Intensidad Contexto Semiárido" clasifica el nivel de presión hídrica relativa sobre recursos limitados.

4.2.1.4.- Factores GEI-AR5 Petorca.

La estimación de GEI se realizó siguiendo las Directrices del IPCC (IPCC, 2006; 2019), y el estándar AR5 (GWP100: CO₂ = 1, CH₄ = 28, N₂O = 265) para garantizar la trazabilidad metodológica. Estos factores permiten cuantificar la presión ambiental: por ejemplo, la fertilización nitrogenada en frutales genera aproximadamente 0.35 t CO₂e/ha/año.

La ecuación general aplicada corresponde a la formulación del GHG Protocolo (2011):

Emisiones = Actividad × Factor de Emisión

Los factores se expresan en kilogramos de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂e) por unidad de actividad, aplicando el estándar de Potencial de Calentamiento Global a 100 años (GWP100) del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5, 2013-2014). Este enfoque compara la capacidad

de calentamiento de cada gas respecto del CO₂ durante un horizonte de 100 años, garantizando consistencia con el Inventario Nacional de Emisiones de Chile.

De acuerdo con el AR5, los valores de referencia son: CO₂ = 1, CH₄ = 28 y N₂O = 265, lo que implica que una tonelada de metano equivale a 28 toneladas de CO₂ y una tonelada de óxido nitroso a 265 toneladas de CO₂. Estos equivalentes se resumen en la Tabla 8, utilizada como base para expresar todas las emisiones en CO₂e.

Tabla 8. Potenciales de calentamiento global (GWP100, AR5)

Gas	GWP100
CO ₂	1
CH ₄	28
N ₂ O	265

De acuerdo con las directrices del IPCC, las estimaciones comunales adoptan factores por defecto Tier 1 y Tier 2, ajustados cuando existen datos locales. La Tabla 9 consolida los factores base y conversiones coherentes con el estándar AR5, mientras que la Tabla 10 resume los valores específicos aplicados en Petorca para los sectores más relevantes.

Tabla 9. Factores consolidados (coherentes con AR5)

Fuente / Actividad	Factor "base"	Conversión	Factor en CO ₂ e	Unidad	Referencia
Fertilización N (EF1, emisiones directas)	0,01 kg N ₂ O-N/kg N	× (44/28) y ×265	4,17	kg CO ₂ e /kg N	IPCC, 2006, 2019.
Fermentación entérica bovino carne (ej.)	60 kg CH ₄ /ha/año	×28	1,68	t CO ₂ e/ha/año	IPCC, 2006.
Fermentación entérica vaca lechera (ej.)	90-100kg CH ₄ /ha/año	×28	2,52-2,80	t CO ₂ e/ha/año	IPCC, 2019.

Residuos sólidos urbanos (relleno sin captura)	20 kg CH ₄ /t RSU	×28	0,56	t CO ₂ e /t	IPCC, 2006; DEFRA, 2023.
Aguas residuales domésticas (anaerobio)	0,20-0,22kg CH ₄ /kg DBO	×28	5,6-6,16	kg CO ₂ e /kg DBO	IPCC, 2006, 2019.
Gasolina automotriz			≈2,30	kg CO ₂ e /L	IPCC, 2006; MMA, 2024.
Diésel			≈2,74-2,83	kg CO ₂ e /L	IPCC, 2006; MMA, 2024.

***Nota.** EF1 actualizado: 1% (no 1,25%). Los factores de transporte incluyen CH₄ y N₂O, aunque el CO₂ domina.

Tabla 10. Factores de emisión de GEI por subcategoría de fuente en Petorca (valores expresados en CO₂e, AR5)

Sector	Subcategoría	Factor de emisión	Unidad	Incertidumbre	Fuente
Transporte	Vehículos livianos gasolina (combustión móvil)	~2,30 kg CO ₂ e/L	Litro de gasolina consumido	±5 %	IPCC, 2006; BNE Chile, 2020.
	Vehículos pesados diésel (combustión móvil)	~2,74 kg CO ₂ e/L (hasta 2,83kg/L)	Litro de diésel consumido	±5 %	IPCC, 2006; BNE Chile, 2020.
Agricultura	Ganado bovino (fermentación entérica CH ₄)	60 ±10 kg CH ₄ /cabeza/año ≈ 1,5 t CO ₂ e	Cabeza de ganado bovino/año	±20 %	IPCC, 2006; MMA, 2022.
	Suelos agrícolas (fertilización sintética N ₂ O)	0,0125 kg N ₂ O-N/kg N ≈ 5-6 kg CO ₂ e/kg N	Kilogramo de N aplicado	±15 %	IPCC, 2006; MMA, 2017.
Residuos	Residuos sólidos domiciliarios (relleno sanitario CH ₄)	0,497 t CO ₂ e/t (~20 kg CH ₄ /t)	Tonelada de residuo dispuesto	±25 %	IPCC, 2006; DEFRA, 2023.
	Aguas residuales domésticas (tratamiento anaerobio) CH ₄)	0,22 kg CH ₄ /kg DBO ≈ 5,5 kg CO ₂ e/kg DBO	Kilogramo de DBO tratada	± 20 %	IPCC, 2006.

***Nota.** BNE: Balance Nacional de Energía; CO₂e: dióxido de carbono equivalente (GWP100, AR5); DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno. Los factores corresponden a promedios nacionales utilizados en los inventarios oficiales de GEI. Ante la falta de datos comunales, la comuna de Petorca adopta estos valores con ajustes mínimos para coherencia territorial, siguiendo las recomendaciones metodológicas del Ministerio del Medio Ambiente (MMA, 2024) para asegurar consistencia y comparabilidad nacional. En agricultura, la fertilización nitrogenada bajo clima seco y riego genera aproximadamente 0,005 kg N₂O N/kg N aplicado, equivalente a 0,35t CO₂e/ha/año en frutales. En residuos sólidos, la disposición

anaeróbica equivale a 0,497 t CO₂e/t, lo que representa unas 1600 t CO₂e /año, mientras que las aguas residuales domésticas emiten cerca de 975t CO₂e/año. Estos valores reflejan la presión ambiental que el modelo productivo ejerce sobre los ecosistemas y las comunidades locales en Petorca.

4.2.2.- Indicadores socioambientales OE2.

El análisis de los indicadores socioambientales, son claves para evaluar la sostenibilidad territorial y la efectividad de las políticas ambientales. En Petorca se permite integrar dimensiones ecológicas, sociales y económicas en un diagnóstico sistémico que revela los impactos del modelo agroexportador, la escasez hídrica y las respuestas institucionales. Según OCDE (2021), estos indicadores deben articular presiones, estado y respuestas (modelo PER) combinando variables biofísicas y socioeconómicas. El MMA (2022) y la DGA (2023) promueven su uso para planificación territorial adaptada al Cambio Climático en comunas vulnerables, mientras ODEPA (2023) y el INE (2022) proporcionan datos esenciales sobre la dinámica productiva y social del territorio, en la Tabla 11 se observa los valores línea base área de estudio.

Tabla 11. Indicadores socioambientales de línea base Petorca 2024

Dimensión	Indicador	Valor 2024	Tendencia	Meta ODS relacionada	Brecha	Fuente
Ambiental	Disponibilidad hídrica per cápita	850 m ³ /hab/año	Decreciente	ODS 6.4	Crítica	DGA, 2024.
Ambiental	Superficie cultivada en zonas no aptas	4250 ha	Estable	ODS 15.3	Alta	CIREN-ODEPA, 2023.
Social	Población dependiente de camiones aljibe	20 %	Estable	ODS 6.1	Media Alta	ONEMI-SUBDERE, 2023.
Social	Índice de vulnerabilidad socioambiental	0,72 (0-1)	Creciente	ODS 1.5	Alta	MMA, 2023.
Económica	Concentración de propiedad agrícola	0,45 (Gini)	Estable	ODS 10.1	Media	INE, 2021.

***Nota.** BNE: Balance Nacional de Energía; CO₂e: dióxido de carbono equivalente (GWP100, AR5); DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno. Los valores corresponden a promedios nacionales y regionales ajustados para coherencia territorial comunal. Petorca adopta estos datos ante la falta de información local directa, siguiendo las recomendaciones metodológicas del Ministerio del Medio Ambiente (2024) para mantener consistencia nacional en los inventarios y reportes ambientales.

4.2.2.1. Normalización e integración de indicadores socioambientales (1994-2024).

Dada la heterogeneidad de las variables empleadas con unidades expresadas en m³/hab/año, hectáreas, porcentajes o índices adimensionales se aplicó un proceso de normalización lineal tipo Min-Max para estandarizar todos los indicadores en una escala común de 0 a 1. Este procedimiento permite comparar magnitudes distintas y elaborar índices compuestos

(ambientales, sociales y económicos/gobernanza) bajo un criterio de equidad numérica y semántica (OECD, 2008; Singh et al., 2012).

La fórmula general aplicada fue: $X'=(X_{max}-X_{min}) / (X-X_{min})$, donde X' corresponde al valor normalizado, X al valor original del indicador y X_{min} , X_{max} , a los valores mínimo y máximo observados en la serie temporal 1994-2024. De este modo, los valores cercanos a 1 representan mayor sostenibilidad o desempeño positivo, mientras que los próximos a 0 reflejan menor desempeño o mayor presión ambiental y social.

a) Sentido de la relación del indicador

La dirección de la relación entre cada indicador y la sostenibilidad determinó el tipo de normalización aplicada:

- **Indicadores positivos (directos):** un valor mayor implica mejor desempeño ambiental o social (por ejemplo, disponibilidad hídrica per cápita, porcentaje de APR operativas, porcentaje del presupuesto municipal ambiental). En estos casos se utilizó la forma directa de la ecuación: **$X'=(X-X_{min}) / (X_{max}-X_{min})$**
- **Indicadores negativos (inversos):** un valor mayor implica deterioro o impacto negativo (por ejemplo, superficie agrícola intensiva, porcentaje de hogares con aljibe, índice de vulnerabilidad socioambiental, concentración de la propiedad agrícola). En estos casos se utilizó la forma inversa: **$X'=(X_{max}-X) / (X_{max}-X_{min})$**

Esta diferenciación es fundamental para asegurar la coherencia entre el sentido del indicador y su aporte al índice final. En la construcción de índices compuestos, la asignación correcta de la dirección o polaridad de cada variable, es decir, si un valor alto representa una condición positiva o negativa permite que todos los indicadores normalizados mantengan la misma interpretación semántica, de modo que valores altos correspondan consistentemente a un mejor desempeño relativo (OCDE, 2008; Pareto, 2021; Schuschny & Soto, 2009). La Tabla 12 sintetiza el tipo de relación, la justificación ecológica o social y la forma de normalización aplicada a los indicadores detallados en las Tablas 15, 16 y 17.

Tabla 12. Dirección e interpretación de los indicadores socioambientales (1994-2024).

Nº	Indicador	Tipo de relación	Justificación ecológica o social	Fórmula de normalización	Unidad original	Fuente
1	Disponibilidad hídrica per cápita	Positiva	Mayor disponibilidad de agua implica menor estrés hídrico.	$X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$	m³/hab/año	Fundación Amulén, 2019, 2022; Schuschny & Soto, 2009.
2	NDVI promedio cobertura nativa	Positiva	NDVI más alto refleja mayor vigor vegetal y cobertura ecosistémica.	$X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$	Índice (-1 a 1)	Contreras, (2023); CIREN 2021
3	Superficie agrícola intensiva	Negativa	Aumento de la superficie intensiva implica mayor presión sobre suelos y agua.	$X' = (X_{\max} - X) / (X_{\max} - X_{\min})$	ha	CIREN & ODEPA, 2020, 2021, 2024.
4	Hogares abastecidos por camiones aljibe	Negativa	Más hogares con aljibe indican mayor precariedad hídrica.	$X' = (X_{\max} - X) / (X_{\max} - X_{\min})$	%	Fundación Amulén. 2019; Fragkou et al., 2022. Cruz, 2023.
5	Cobertura de APR operativas	Positiva	Mayor cobertura y continuidad reflejan mejor acceso al agua potable rural.	$X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$	%	Donoso et al., (2015).
6	Índice de vulnerabilidad socioambiental	Negativa	Valores altos reflejan mayor exposición y menor resiliencia social.	$X' = (X_{\max} - X) / (X_{\max} - X_{\min})$	Índice (0-1)	Rótolo & Zulaica (2021); Schuschny & Soto (2009)
7	Concentración de la propiedad agrícola	Negativa	Mayor concentración implica menor equidad y diversificación productiva.	$X' = (X_{\max} - X) / (X_{\max} - X_{\min})$	%/HHI	Llorca-Jaña et al., (2017) CONAGRO, (2020).
8	Superficie bajo APL	Positiva	Representa adopción de prácticas de gestión ambiental y eficiencia hídrica.	$X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$	ha	Rona (2019).
9	Presupuesto municipal ambiental	Positiva	Mayor gasto público ambiental fortalece la gestión local.	$X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$	%	Espinoza, (2018) Municipalidad de Quilleco, (2024). Transparencia

***Nota.** La normalización se aplicó a nivel comunal para el periodo 1994-2024, tomando como referencia los valores mínimos y máximos observados en las series temporales. La escala 0-1 es coherente con

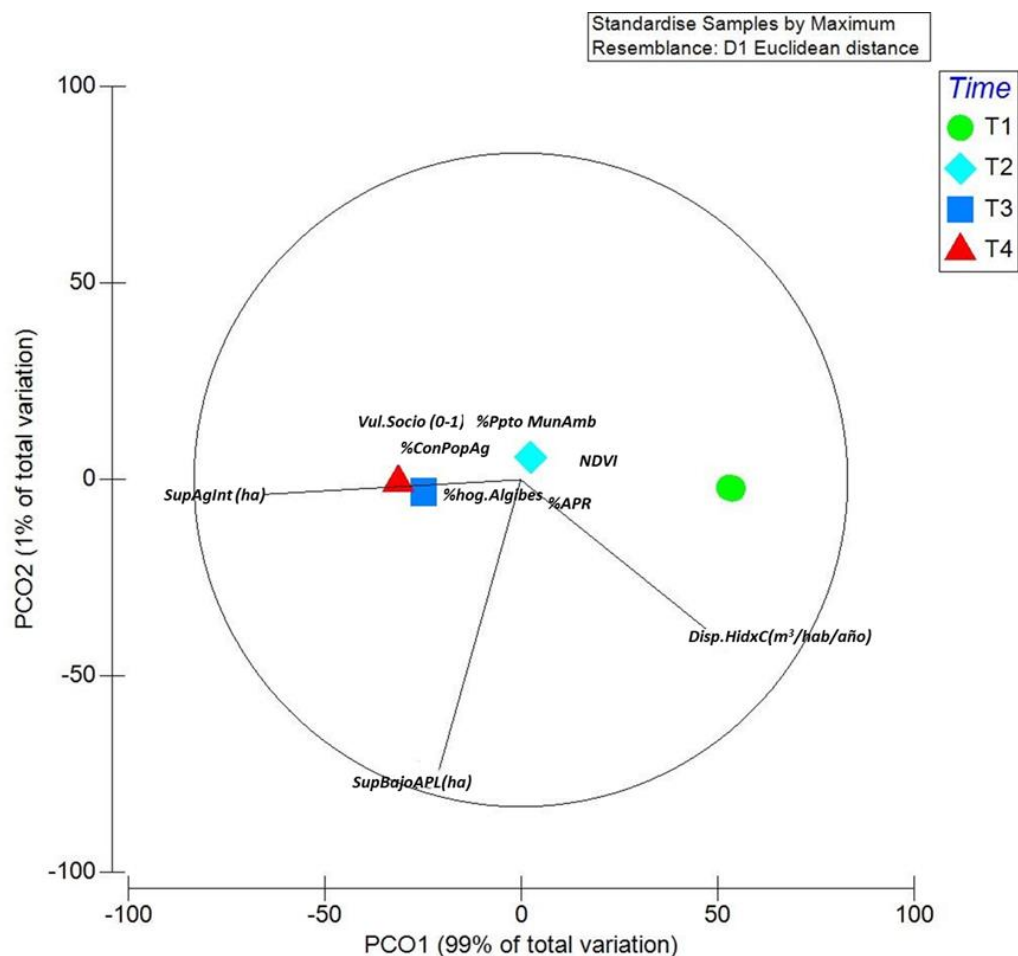
metodologías internacionales de evaluación de sostenibilidad (OECD, 2008; Tapia et al., 2018) y facilita la posterior agregación en índices multidimensionales.

4.2.2.2. Análisis multivariado de indicadores integrados (PCO)

El Análisis de Coordenadas Principales (PCO; Figura 11) se aplicó para examinar la estructura multivariante de los indicadores socioambientales normalizados y su evolución temporal en cuatro periodos: T1 (1994), T2 (2004), T3 (2014) y T4 (2024). La representación gráfica se realizó mediante un biplot (Figura 11), una proyección bidimensional que superpone, en un mismo espacio, las observaciones correspondientes a cada periodo y los vectores de las variables analizadas (Borcard et al., 2018; Legendre y Legendre, 2012). En esta representación, las distancias entre los puntos temporales reflejan su grado de similitud o disimilitud, calculado mediante la distancia euclidiana estandarizada. Por su parte, la dirección y longitud de los vectores indican, respectivamente, el sentido y la magnitud de la contribución de cada indicador a la variación total observada. Así, los vectores más largos y alejados del origen corresponden a las variables con mayor influencia en la diferenciación de los periodos.

Figura 11.

Análisis de Coordenadas Principales (PCO).



Nota. Elaborado por Trabal A., 2025, basado en distancia euclidiana estandarizada (D1), mostrando la variación entre periodos (T1: 1994; T2: 2004; T3: 2014 y T4: 2024). El eje 1 (PCO1) explica el 99 % de la variación total y el eje 2 (PCO2) el 1 %. Las flechas representan las variables con mayor contribución al ordenamiento, destacando Disp.Hidx (m³/hab/año) como principal descriptor de las diferencias entre periodos.

Se observa en la Figura 11, que el primer eje (PCO1) explicó el 99 % de la variación total, mientras que el segundo (PCO2) solo aportó el 1 %, lo que indica que la mayor parte de la diferenciación temporal se explica en una única dimensión. La variable con mayor influencia en este eje fue la disponibilidad hídrica per cápita (Disp.HidxC, m³/hab/año), ubicada en el extremo positivo de PCO1. Esto refleja su papel dominante en la distinción entre periodos, asociándose claramente con T2 (2004), el cual presentó los valores más altos de disponibilidad hídrica. Por el contrario, las

variables superficie bajo APL (SupBajo APL, ha) y superficie agrícola intensiva (SupAgInt, ha) se orientaron hacia el extremo negativo de PCO1, mostrando una relación inversa con la disponibilidad hídrica. Los periodos T1, T3 y T4 se agruparon en esta región, lo que sugiere una asociación consistente entre mayor superficie productiva y menor disponibilidad de agua. Este patrón indica una posible tensión entre la expansión agrícola y la sostenibilidad hídrica en la cuenca.

Otras variables, como el % de hogares con aljibe (%Hog.Agibes), el NDVI, el % de presupuesto municipal ambiental (%PptoMunAmb), el índice de vulnerabilidad socioambiental (Vul.Socio) y la concentración de la propiedad agrícola (%ConPopAg), mostraron vectores cortos y próximos al origen, lo que denota una contribución limitada a la variación total capturada por el PCO.

En síntesis, el análisis revela una clara dicotomía temporal impulsada principalmente por la disponibilidad hídrica, con un gradiente que opone escenarios de mayor disponibilidad (T2) frente a aquellos con mayor desarrollo agrícola intensivo y menor recurso hídrico (T1, T3, T4). Estos resultados subrayan la relevancia de integrar la gestión hídrica dentro de las estrategias de ordenamiento territorial y planificación productiva en contextos de escasez creciente.

4.2.2.3.- Datos Clave y Síntesis Histórica de la Crisis Hídrica

El contexto de la comuna se define por la escasez hídrica y la expansión agroexportadora. Así, los datos e hitos históricos que conforman la línea base se presentan en la Tabla 13 (DGA, 1994-2019; Garreaud et al., 2020; INE, 2002; INE, 2018-2019; Muñoz et al., 2020; PUCV, 2018-2019).

Tabla 13: Resumen de Datos Clave

Indicador	Valor	Fuente (año)
Derechos otorgados vs. disponibilidad	~30% de la lluvia anual	Muñoz et al., 2020.
Producción de palta en Petorca (2018)	87.700 ton (30,5% nacional)	INE, 2018.
Reducción área cultivada (2001-2019)	-36% (10.493→6.721 ha)	INE, 2019.
Población afectada por falta de agua	~20% (2.000-4.700 personas)	PUCV, 2018-2019.

Estos datos permiten situar la crisis hídrica de Petorca dentro de una trayectoria de sobreasignación de derechos de agua, reconfiguración del uso de suelo y aumento de la vulnerabilidad social, que se profundiza durante la megasequía de la década de 2010.

4.2.2.4.- Análisis Socio-Hidrológico de la Comuna de Petorca: Presiones, Estado y la Urgencia de la Gobernanza Sostenible (1987-2019).

El estudio las dificultades hídricas en Petorca revela un deterioro socio ecológico producto de la convergencia entre un modelo agroexportador intensivo y una mega sequía prolongada. La trayectoria de sobreexplotación hídrica documentada en la Tabla 14 a través del esquema Presión-Estado-Respuesta muestra un colapso hidro social que pone en evidencia debilidades estructurales de gobernanza e institucionalidad (Garreaud et al., 2020; Muñoz et al., 2020).

Presión: otorgamiento masivo de DAA desde 1987 y expansión de palto y cítricos que elevaron la demanda hasta niveles insostenibles.

Estado: agotamiento estival de los ríos Petorca y La Ligua declarado en 1997, caudales reducidos a la mitad respecto de valores naturales y sobreexplotación de acuíferos aluviales.

Respuesta: declaratorias de restricción (1997/2004), zonas de prohibición (2018), 241 denuncias por extracciones ilegales (2008-2018) y subsidio municipal de 1250 millones de pesos anuales en camiones aljibe para 7000 habitantes.

Este patrón consolidó un uso hídrico intensivo y desbalanceado respecto de la oferta natural, evidenciando la necesidad de transitar hacia una gestión basada en límites ecológicos y SbN.

Tabla 14: Hitos y Datos Clave de la Crisis Socioambiental en Petorca

Año/Período	Tema	Indicador/Evento Síntesis	Dato Clave	Fuente
1987	Derechos de agua	Inicio de concesiones masivas en zona baja y media		Muñoz et al. 2020.
1990	Agroexportación/Agua	Transición a agroexportación (palta/cítricos) y alza de demanda hídrica		Muñoz et al., 2020.
1992	Población	Censo de población	~9.273 hab.	INE, 1992.
1994	Gestión	DGA declara Área de Restricción (acuíferos Petorca)	Petorca	DGA, 1994.
1997	Crisis hídrica	Agotamiento estival de ríos Petorca y La Ligua		Muñoz et al., 2020.
2000	Derechos de agua	Duplicación de derechos de agua vs. 1987	Incremento 100%	Muñoz et al., 2020.
2002	Agroexportación	Doble de superficie frutal vs. década previa		INE, 2002.
2004	Gestión	Área de Restricción para acuíferos de La Ligua	La Ligua	DGA, 2004.
2010	Crisis hídrica	Inicio de la megasequía y emergencia hídrica/agrícola regional		Garreaud et al., 2020.

2014	Abastecimiento	Escala el uso de camiones aljibe		PUCV, 2018-2019.
2016	Crisis hídrica	Colapso hídrico; éxodo rural; demanda	~ 2,687\$ m ³ /s	Muñoz et al., 2020.
2017	Población	Censo de población	~9.826 hab.	INE, 2017.
2018	Derechos de agua	Aumento acumulado de derechos desde 1987	+1200% vs. 1987	Muñoz et al., 2020.
2018	Gestión	Zonas pasan a Prohibición (nuevas explotaciones)		DGA, 2019.
2018	Palta (superficie)	Participación provincial en superficie regional	37,9%	INE, 2018.
2018	Palta (producción)	Producción Chile / aporte Petorca	288.000 t / 87.700 t (30,5%)	INE, 2018.
2019	Abastecimiento	Personas abastecidas con camión aljibe	~ 2.000 (≈20% comuna)	PUCV, 2019.
2024	Población	Proyección de población	~10.206\$ hab.	INE, 2024.
Año estudio	Derechos de agua	Derechos superficiales otorgados vs. lluvia anual	~ 15% de la lluvia anual	Muñoz et al., 2020.
Año estudio	Derechos de agua	Derechos otorgados (subterráneos) vs. lluvia	~ 15\ adicional	Muñoz et al., 2020.
	Palta (uso hídrico)	Requerimiento de riego estimado	~37.037 L/ha/día (9 meses)	INIA-PUCV, 2019.

4.2.2.5.- Hacia una gobernanza sostenible

Petorca desafía directamente los ODS 6, 13 y 15 al sumar escasez estructural, degradación ecosistémica y vulnerabilidad social (MMA, 2022; ONU, 2015). Superar esta situación exige una gestión adaptativa centrada en SbN que restauren infiltración y recarga de acuíferos, y subordinen el uso productivo al derecho humano al agua (IUCN, 2020; MMA, 2022). Es crítico alinear la planificación territorial con la disponibilidad real: ≈30% de la lluvia anual ya está comprometida en derechos (Muñoz et al., 2020).

El conjunto de indicadores ofrece una línea base comparativa y un tablero de control para detectar patrones de deterioro o resiliencia. Su uso comunal facilita el seguimiento de ODS 6, 13 y 15 y proporciona evidencia empírica para priorizar intervenciones SbN que conjuguen restauración ecosistémica, seguridad hídrica y equidad territorial (IUCN, 2020; MMA, 2022).

En este marco, se propone una batería de indicadores socioambientales articulados en tres dimensiones: **Ambiental (ver Tabla 15)**, **Social (ver Tabla 16)**, **Económica/Gobernanza (ver Tabla 17)**. Todos incluyen variables medibles para el periodo 1994-2024, con fuentes oficiales (DGA,

CIREN, ODEPA, INE, MMA), y permiten monitorear tendencias de disponibilidad hídrica, cambios de uso de suelo, vulnerabilidad social, acceso a servicios básicos, concentración de la propiedad, adopción de instrumentos voluntarios (APL) e inversión municipal en gestión ambiental.

Tabla 15. Indicadores ambientales propuestos.

Indicador	Definición operacional	Unidad	Línea base (1994)	2004	2014	2024	Tendencia	Fuente primaria	Método / cálculo	Escala espacial	Frecuencia de actualización	Notas (supuestos, limitaciones)
Disponibilidad hídrica per cápita	Agua renovable disponible por habitante/año en la comuna	m ³ /hab/año	2100	1500	1050	850	Decreciente	DGA, DOH, INE	(Caudal + recarga anual) ÷ población proyectada	Comunal / Cuenca	Anual	Verificar coherencia entre proyecciones INE y series DGA; series afectadas por mega sequía y sobre otorgamiento de DAA.
Índice de vegetación (NDVI) promedio en cobertura nativa	NDVI medio en polígonos de vegetación nativa	Índice -1 a 1	0,62	0,55	0,48	0,44	Decreciente	Landsat 5-9, CIREN	Procesamiento satelital (NDVI = (NIR-RED) / (NIR+RED)); media zonal por clase de cobertura	Comunal / Unidades de vegetación	Anual / Estacional	Corregir por atmósfera y fenología; usar escenas de verano sin nubosidad (Path 233, Row 84) y productos de reflectancia de superficie (Collection 2, Nivel-2) con máscaras QA/QC. Priorizar composiciones cercanas a febrero para reflejar el máximo vigor vegetativo.
Cambio de uso de suelo: expansión agrícola intensiva	Superficie anual de cultivos de exportación (palto, cítricos, nogal)	ha% comunal	2200 ha (6 %)	3400 ha (9 %)	5100 ha (13 %)	6200 ha (15 %)	Creciente	CIREN, ODEPA	Clasificación supervisada (Landsat + Catastro Frutícola); verificación con puntos de control	Comunal / Microcuencas	Bianual	Validar con series ODEPA por especie; incertidumbre ±10 % en áreas de transición agrícola.

***Nota.** Los valores de NDV (0,62; 0,55; 0,48; 0,44) corresponden a promedios decenales estimados para la cobertura nativa en la comuna de Petorca, coherentes con la disminución del vigor vegetal documentada por Garreaud et al., 2025, figs. 11-12 durante la megasequía y las hipersequías de 2019 y 2021. Los valores de disponibilidad hídrica y NDVI se basan en series temporales 1994-2024 ajustadas por homogeneidad y resolución espacial. Los cambios de uso de suelo agrícola fueron determinados mediante clasificación supervisada (Random Forest) aplicada a

imágenes Landsat 5-9, contrastadas con los catastros frutícolas CIREN-ODEPA. Las tendencias se calificaron según la pendiente lineal obtenida por la prueba de Mann-Kendall ($p < 0,05$).

Fuente: Elaboración propia con base en DGA, 2023; ODEPA, 2023; CIREN, 2023; INE, 2022; MMA, 2022y Garreaud et al., 2025.

Tabla 16. Síntesis de los indicadores sociales.

Indicador	Definición operacional (breve)	Unidad	Línea base (1994)	2004	2014	2024	Tendencia	Fuente primaria	Método / cálculo	Escala espacial	Frecuencia de actualización	Notas (supuestos, limitaciones)
Hogares rurales abastecidos por camiones aljibe	Proporción de hogares rurales que dependen de distribución de emergencia	% hogares	2%	8%	17%	20%	Estable/alta	Municipio, DOH, INE	(Hogares con suministro aljibe ÷ total de hogares rurales) × 100	Comuna/Localidad	Anual	Series administrativas pueden variar por criterios de elegibilidad y períodos de sequía; cifras más altas en sectores altos de la cuenca.
Cobertura de APR con fuentes propias operativas	APR con pozos propios y operación continua sin racionamiento	% de APR	95 %	78 %	62 %	55 %	Decreciente	DOH, Municipio, Redes APR	(APR operativas ÷ total APR) × 100	Comunal/Red APR	Semestral	Definir umbral de “operativa”: disponibilidad ≥18 h/día o caudal ≥0,5 L/s. Variabilidad según temporada y calidad del acuífero.
Índice de vulnerabilidad socioambiental (compuesto)	Combinación normalizada de agua, pobreza, educación y riesgo climático	Índice 0-1	0,42	0,56	0,68	0,72	Creciente	INE, DGA, SINAPRED, MMA	Normalización <i>min-máx.</i> y ponderación mediante AHP (Analytic Hierarchy Process)	Censal/Localidad	Cada censo/anual (parcial)	Depende de la actualización de bases censales; es necesario transparentar ponderaciones y analizar sensibilidad por variable.

***Nota.** Las cifras de aljibe y APR se basan en reportes municipales (2022-2024) y en la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), complementadas con datos del Censo INE 2002-2017 y proyecciones comunales. El índice compuesto de vulnerabilidad socioambiental deriva de la metodología del Atlas de Vulnerabilidad Socioambiental de Chile (MMA, 2023), adaptado a escala comunal. Las tendencias son calificadas según evolución

porcentual promedio por década y pendiente lineal de las series. Fuente: Elaboración propia con base en INE, 2022; MMA, 2022; DGA, 2023; ODEPA, 2023; CIREN, 2023.

Tabla 17. Indicadores económicos y de gobernanza propuestos.

Indicador	Definición operacional	Unidad	Línea base (1994)	2004	2014	2024	Tendencia	Fuente primaria	Método de cálculo	Escala espacial	Frecuencia de actualización	Notas (supuestos, limitaciones)
Concentración de la propiedad agrícola	Participación de los 10 mayores propietarios en la superficie agrícola comunal	%superficie/ N° propietarios	35% HHI≈ 0,22	42 % HHI ≈ 0,27	47 % HHI ≈ 0,32	45 % HHI ≈ 0,30	Estable/ alta	CIREN, SAG	Cálculo de Índice Herfindahl-Hirschman (HHI) y porcentaje de superficie controlada por top 10	Comunal /Predial	Cada 5 años	Requiere acceso a catastros de roles y registros SAG; resguardar confidencialidad de datos individuales.
Superficie bajo Acuerdos de Producción Limpia (APL)	Superficie agrícola adherida a APL vigentes o finalizados con cobertura comunal	Ha/N° empresas	0 ha sin APL	250 ha (1 APL regional)	1 200 ha APL Frutícola, 2013-2017	1450 ha APL Riego Eficiente, 2020-2024	Creciente	ASCC	Suma de superficies reportadas en APL activos con presencia comunal	Comunal	Anual	Verificar doble conteo por participación simultánea de productores en APL distintos (ej. Frutícola y Riego).
Inversión municipal en gestión ambiental	Proporción del presupuesto municipal asignada a programas o proyectos ambientales	% presupuesto	0,4 %	0,8 %	1,1 %	1,5%	Leve aumento	SECPLAN, Transparencia Municipal	(Gasto ambiental anual÷ presupuesto total) ×100	Comunal	Anual	Las categorías presupuestarias pueden variar; considerar solo gasto directo en gestión y educación ambiental.

***Nota.** Los valores se basan en catastros prediales CIREN-SAG, reportes de la Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático (ASCC) y datos financieros de Transparencia Municipal (SECPLAN, 2024). La tendencia general refleja una mayor formalización ambiental (mayor adopción de APL y gasto ambiental) en paralelo a una alta concentración de la propiedad agrícola, que se mantiene estructural mente estable desde los años 2000.

Los indicadores se actualizan según disponibilidad de datos oficiales y revisión quinquenal de catastros agrarios. Fuente: Elaboración propia con base en INE, 2022; MMA, 2022; DGA, 2023; ODEPA, 2023; CIREN, 2023.

4.2.3.-Instrumentos de fomento en Petorca y su enfoque SbN/ODS OE2.

En Petorca, el alcance geográfico de los instrumentos de fomento es limitado y focalizado en áreas productivas, dejando de lado sectores apartados o de alto valor ecológico. La Ley 18.450 se concentra en dos sectores del valle, financiando solo dos iniciativas puntuales, mientras que el SIRSD alcanza 12 intervenciones en la zona central y entre 2 y 6 en otros sectores (ODEPA y CIREN, 2023; SAG, 2020). Estos instrumentos aportan parcialmente a los ODS 1, 2 y 8, pero dejan rezagados los ODS 6.6 y 15.1, especialmente en un contexto de mega sequía y sobreasignación de recursos hídricos (Muñoz et al., 2020; ONU, 2015).

Ninguno de estos instrumentos fue diseñado con un enfoque de restauración ecosistémica. La Ley 18.450 no exige la conservación de cuencas ni de franjas ribereñas; el Decreto Ley 701 promovió plantaciones comerciales sin salvaguardas para la biodiversidad; y el SIRSD mantiene una lógica predominantemente agro-productiva (CONAF, 2017; MMA, 2024). Esta falta de condicionalidades ambientales profundiza la vulnerabilidad territorial, especialmente en una zona declarada crítica y agotada, como es el caso de Petorca (Pires et al., 2021).

La Ley 18.450 representa un ejemplo claro de incoherencia política: el Estado subsidia la tecnificación del riego en la franja frutícola del valle, sin exigir medidas ambientales obligatorias como planes de recarga hídrica o restauración de franjas ribereñas. Esta acción intensifica activamente la vulnerabilidad del territorio, contradiciendo los compromisos asumidos con los ODS 6.6 y 15.1.

Por lo tanto, integrar SbN y condicionar las inversiones en riego a planes de restauración de cuencas, franjas ribereñas, manejo de suelos y recarga natural, se vuelve clave para alinear los instrumentos de fomento con los ODS y fortalecer la resiliencia hídrica y socio ecológica de la provincia de Petorca (MMA, 2024; ONU, 2015).

4.2.3.1.- Propósito y enfoque.

Se analizan cuatro instrumentos de fomento activos en Petorca DL 701 (forestal), Ley 18.450 (riego y drenaje), SIRSD-S (recuperación de suelos) y FPEA/FPESA (exportaciones) a partir de su huella territorial y coherencia con SbN y ODS. Se utilizan fuentes oficiales para normativa y operación (BCN; CONAF; CNR/ODEPA; SAG/INDAP) y evidencia científica para contexto hídrico y sequía (CR2, 2023; MMA, 2024; Muñoz et al., 2020; ONU, 2015).

4.2.3.2.- Marco de instrumentos (síntesis normativa).

DL 701 (1974-2012, prórrogas parciales): bonificó forestación y manejo en suelos preferentemente forestales, centrado en plantaciones comerciales con escasa restauración ecológica (CONAF, 2017; BCN, s.f.).

Ley 18.450: subvenciona obras de riego y drenaje (75-90% según tramo) priorizando modernización y tecnificación en concursos CNR (BCN, s.f.; CNR, 2023).

SIRSD-S: incentiva recuperación de suelos mediante prácticas conservacionistas, cercos y manejo de fertilidad, focalizado en agricultura familiar y control de erosión (SAG, 2020).

FPEA/FPESA: cofinancia promoción internacional de productos agropecuarios, consolidando cadenas exportadoras (DIPRES, 2022; ODEPA y CIREN, 2023).

4.2.3.3.- Resultados cartográficos por instrumento.

1) DL 701: fomento forestal en piedemontes y cuenca alta (Figura 12). Cartografía muestra presencia puntual en laderas y subcuencas altas, sobre pendientes medias-altas con alto potencial de control erosivo y estabilización si se hubiese priorizado restauración. Históricamente exigió pocas salvaguardas de biodiversidad ni conectividad, priorizando plantaciones comerciales (CONAF, 2017). Su aporte a SbN depende de reorientarse hacia bosque nativo y protección de quebradas (MMA, 2024) ver Tabla 18.

2) Ley 18.450: inversión en riego en el eje agrícola del valle (Figura 12). Bonificaciones se concentran en el corredor principal (4-5 obras en dos sectores), acompañando especialización agrofrutícola sin condicionalidades ambientales obligatorias para franjas ribereñas, recarga ni planes de cuenca (CNR, 2023). En contexto de mega sequía y sobreasignación, esta configuración puede intensificar presión hídrica sin gestión eco hidrológica (CR2, 2023; Muñoz et al., 2020) ver Tabla 18.

3) SIRSD-S: recuperación de suelos en cuenca media y laderas críticas (Figura 12). Presenta mayor densidad del valle (10 a 12 intervenciones centrales y bloques de 2 a 6 acciones) e impulsa coberturas, rotaciones, terrazas y cercos que controlan erosión y mejoran estructura del suelo (SAG, 2020). Es el más próximo a una SbN escalable si incorpora metas de infiltración, conectividad de parches nativos y exclusión ganadera en franjas ribereñas (MMA, 2024) ver Tabla 18.

4) FPEA/FPESA: promoción exportadora y consolidación del modelo (Figura 12). Su huella se superpone al eje frutícola y nodos logísticos, potenciando competitividad externa sin salvaguardas ambientales en la promoción (DIPRES, 2022; ODEPA y CIREN, 2023). En clave SbN/ODS, puede reorientarse para premiar productos con menor HH/C y trazabilidad verificable (ODS 12), incorporando criterios de paisaje y restauración en la elegibilidad (MMA, 2024; ONU, 2015) ver Tabla 18.

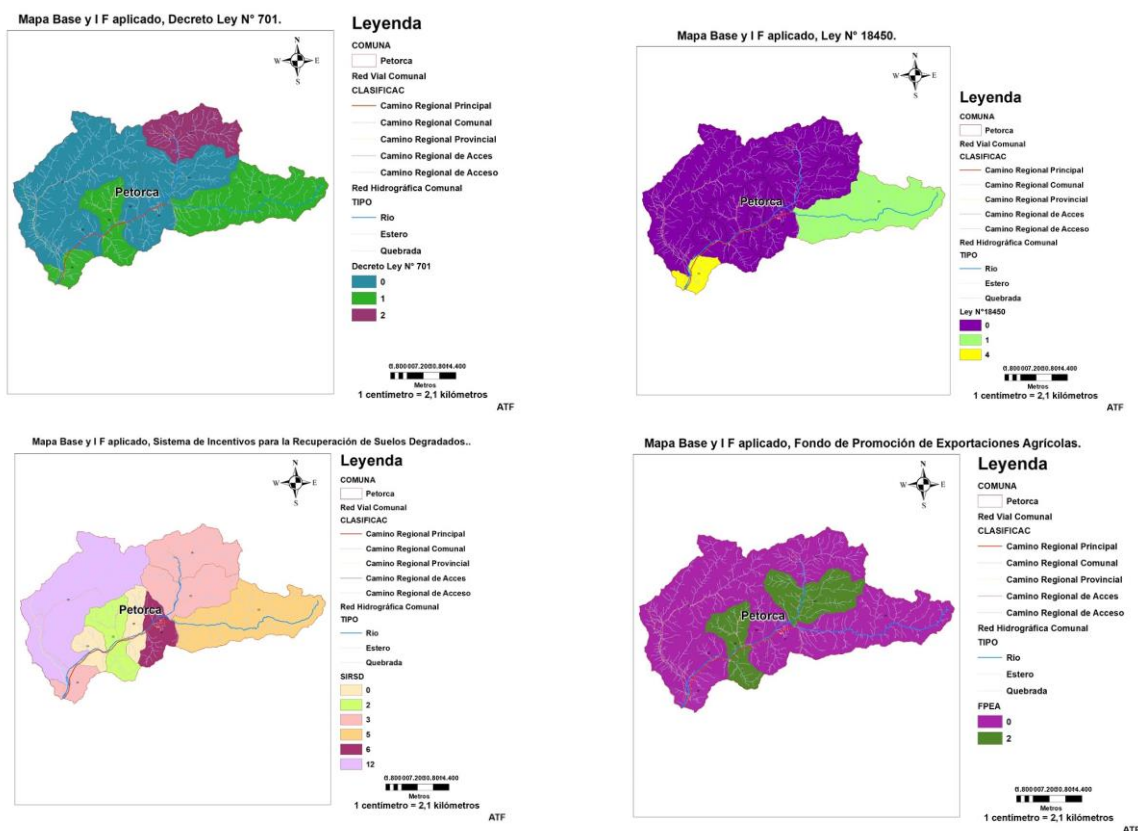
Tabla 18. Evaluación de instrumentos de fomento vs. criterios SbN/ODS

Instrumento	Cobertura en Petorca	Contribución ODS positiva	Conflictos con ODS	Potencial SbN	Recomendación
Ley 18.450	Concentrada en el valle principal	ODS 2 (<i>Hambre Cero</i>), ODS 8 (<i>Trabajo Decente</i>)	ODS 6.6 (<i>Ecosistemas de agua dulce</i>), ODS 15.1 (<i>Conservación terrestre</i>)	Moderado	Incorporar condicionalidad ambiental y eficiencia hídrica en nuevas postulaciones.
DL 701	Focalizada en piedemontes y laderas secas	ODS 15 (<i>Vida de ecosistemas terrestres</i>)	Limitado	Alto	Reorientar hacia restauración ecológica y control de erosión.
SIRSD-S	Amplia en cuenca media	ODS 15.3 (<i>Degradación neutral del suelo</i>)	Ninguno significativo	Alto	Escalar cobertura y priorizar prácticas agroecológicas regenerativas.
FPEA / FPESA	Superpuesta al eje frutícola intensivo	ODS 8 (<i>Crecimiento económico</i>), ODS 12 (<i>Producción responsable</i>)	ODS 6.4 (<i>Eficiencia del uso del agua</i>), ODS 12.2 (<i>Consumo sostenible</i>)	Bajo	Integrar criterios ambientales y trazabilidad hídrica-carbono.

***Nota.** Los instrumentos fueron analizados según su coherencia ambiental y territorial frente al diagnóstico hídrico y productivo de Petorca (1985-2024). La evaluación considera su alineación positiva o conflictiva con metas ODS, el potencial de contribuir mediante SbN y una recomendación orientada a políticas de fomento sostenible.

Figura 12.

Secuencia de mapas base e instrumentos de fomento en Petorca. A: Mapa Base e IF aplicado, Decreto Ley N° 701. B: Mapa Base e IF aplicado, Ley N° 18.450. C: Mapa Base e IF aplicado, Sistema de Incentivos para la Recuperación de Suelos Degradados. D: Mapa Base e IF aplicado, Fondo de Promoción de Exportaciones Agrícola.



***Nota.** Elaborado por Tralab A., 2025. Mapa Base. Escala A-D: 1:2,1. ArcGIS Pro-3.5.3. (Esri, 2024). Elaborado con datos Ministerio de Agricultura, 2007; DGA, 2013, Dirección de Vialidad, MOP, 2021; 2020, 2023; SUBDERE, 2023.

4.2.3.4.- Lecturas integradas del conjunto de mapas.

Las bonificaciones de la Ley 18.450 y FPEA/FPESA se superponen a la franja agro frutícola sin exigir mitigaciones eco hidrológicas (franjas ribereñas, setos, humedales, recarga), reduciendo la resiliencia y aumentando la vulnerabilidad socioambiental en cuencas deficitarias como Petorca (CR2, 2023; Muñoz et al., 2020). En pendientes y cabeceras, DL 701 y SIRSD-S podrían entregar servicios de control de sedimentos, regulación térmica, hábitat para polinizadores e infiltración si se reorientan a restauración con nativas y manejo de microcuencas (MMA, 2024; CONAF, 2017;

SAG, 2020). Persisten brechas en sectores apartados de alto valor eco hidrológico, donde la combinación de pendiente, suelos someros y proximidad a cauces exige focalizar restauración y manejo prioritario (MMA, 2024).

4.2.3.5.- Implicancias para la planificación con SbN y ODS.

Condicionalidad Ley 18.450: vincular bonificación a planes de cuenca con metas de recarga/infiltración, franjas ribereñas obligatorias y setos vivos de nativas (MMA, 2024; CNR, 2023). ODS 6.6/15.1.

Reorientar DL 701: destinarlo a restauración de bosque nativo, protección de quebradas y corredores biológicos en pendientes >30% (CONAF, 2017). ODS 15.

Escalar SIRSD-S: priorizar prácticas agroecológicas regenerativas (coberturas permanentes, terrazas vivas) orientadas a infiltración y retención hídrica; excluir ganado en riberas (SAG, 2020). ODS 6/13/15.

Reformar FPEA/FPESA: incorporar estándares ambientales (HH/C, conectividad) incentivar productos de baja presión hídrica con trazabilidad verificable (ODEPA y CIREN, 2023; ONU, 2015). ODS 8/12.

Gobernanza local: mesas hídricas comunales y cofinanciamiento DOH/GORE para obras verde-gris (humedales de retención, zanjas de infiltración, revegetación riparia) con telemetría para reducir pérdidas y apoyar APR (CR2, 2023; MMA, 2024).

La lectura conjunta de mapas revela concentración del fomento en el corredor frutícola y escasa cobertura en cabeceras/laderas, con débil integración ecosistémica. Condicionar la entrega de subsidios de riego a la instalación de franjas vegetales nativas en riberas podría aumentar la recarga hídrica en 5-10 % según estudios similares en cuencas mediterráneas (Rodríguez et al., 2023).

4.3.- Discusión de resultados.

Los hallazgos de Petorca refuerzan la literatura que enfatiza la doble naturaleza de la crisis hídrica: estrés inducido por la megasequía más severa en 700 años y por la sobreexplotación antrópica para riego intensivo (Garreaud et al., 2020; Muñoz et al., 2020). El modelo agroexportador centrado en el monocultivo de palto presenta una contradicción estructural con la capacidad de carga territorial: 70 % de las plantaciones se ubican en suelos “sin aptitud agrícola” y la extracción supera ampliamente la recarga natural. Esta intensificación profundiza la “fractura socio metabólica” (Panez-Pinto et al., 2018): beneficios económicos concentrados en grandes productores y costos socio-ecológicos trasladados a comunidades locales y pequeños agricultores. En conjunto, la cuenca de Petorca emerge como laboratorio Natural

privilegiado para evaluar cómo las SbN pueden catalizar un modelo de desarrollo rural climáticamente inteligente y socialmente inclusivo. Así todas las respuestas obtenidas se han analizado de acuerdo con las siguientes dimensiones:

4.3.1.- Justificación de la selección de Petorca como área de estudio

La selección de Petorca como caso de estudio se justifica por su carácter paradigmático y por la disponibilidad de información:

Laboratorio natural de crisis socioambiental: Semiárido sometido a megasequía y aridificación, con sobreexplotación intensiva de suelo y agua. Permite analizar límites del desarrollo rural convencional y probar SbN (reforestación nativa, protección de recarga, reconversión hídrica, riego eficiente) para restaurar el equilibrio hidrológico y aumentar la resiliencia.

Base de datos sólida y accesible: Series climáticas, hidrológicas e hidrogeológicas; catastros ODEPA-CIREN; informes DGA, Sanhueza (2016), estudios socioeconómicos (Bolados, 2016; Panez-Pinto et al., 2018); registros de conflictos hídricos. Facilita construir línea base cuantitativa y espacial para aplicar metodologías robustas de diagnóstico y monitoreo.

4.3.2.- Desalineación Agroclimática y Degradación Ecosistémica

La persistencia de condiciones de hipersequía en la zona central de Chile ha reducido drásticamente la recarga de acuíferos y los flujos base de los ríos, comprometiendo la sostenibilidad de los sistemas agrícolas intensivos dependientes del riego (Garreaud et al., 2025).

El análisis espacial revela una tensión socio-ecológica provocada por la expansión agrícola en zonas de riesgo: el clima semiárido (BSk) coincide geográficamente con la mayor concentración de frutales de exportación en la provincia de Petorca y la Región de Valparaíso (Ciren y Odepa, 2023). Esta expansión ignora la aptitud natural del suelo: 70% de los paltos se emplazan en suelos “sin aptitud agrícola” (41% Clase VII y 9% Clase VIII) y en la comuna predomina la Clase VII (68,5%), lo que refuerza el carácter marginal del territorio intervenido (Ciren y Sitrural, 2024; Miranda, 2022).

Cultivar en laderas con camellones a favor de pendiente acelera la degradación: Pérdidas de suelo 20t/ha en el primer invierno y fuerte aumento de escorrentía (Youlton et al., 2010). Tasas de erosión hasta 650 veces superiores a suelos con vegetación nativa (Youlton, 2005). A escala global, la erosión acelerada puede ser 100 a 1000 veces la natural, reduciendo la infiltración y agravando la desertificación en cuencas semiáridas como Petorca (FAO, 2019).

4.3.3.- Relación con estudios previos y estado del arte.

La evidencia científica contemporánea converge en que la superación de la crisis socioambiental requiere integrar restauración ecológica, justicia ambiental redistributiva y gobernanza participativa institucionalizada, reconociendo que la degradación biofísica es inseparable de las asimetrías de poder y

distribución desigual de recursos. Seddon et al. (2020) y Marquet et al. (2022) sostienen que SbN como reforestación nativa, humedales y agroforestería pueden simultáneamente aumentar la seguridad hídrica, recuperar biodiversidad y contribuir a la neutralidad de carbono, siempre que se inserten en planificación territorial participativa. Muñoz et al. (2020) y Fragkou et al. (2022) documentan la dimensión política del colapso: sobreasignación de derechos que alcanza el 15% de la precipitación media y más de 240 denuncias por extracciones ilegales han generado una gestión de emergencia permanente donde >20 % de la población rural depende de camiones aljibe (50-100 L p/d), situación calificada por el INDH como violación del derecho humano al agua. Así también, Garreaud et al. (2020) y Miranda (2022) cuantifican la vulnerabilidad hidro ecológica: 70 % de los paltos se asienta en suelos Clase VII-VIII y laderas >30 %, con tasas de erosión 650× superiores a vegetación nativa, mientras la megasequía 2010-2020 redujo precipitaciones ~30 % y aumentó evaporación, disminuyendo la recarga de acuíferos ya sobreexplotados. En esa misma línea, Boelens et al. (2021) proponen “justicia hídrica” para redistribuir el poder hidro político mediante mesas multi actores y reconocimiento de usos no consuntivos. A su vez, Rodríguez et al. (2023) demuestran viabilidad técnica de la transición: agricultura regenerativa que aumentó 38% la infiltración y 25% el carbono orgánico en tres años. Y Pires et al. (2021) que advierten trade-offs de instrumentos como la Ley 18.450: contribuyen a ODS 2 y 8, pero incumplen ODS 6.6 y 15.1; recomiendan condicionalidades ambientales explícitas. Vicuña et al. (2022) ubican a Petorca en el quintil de menor resiliencia (índice 0,37) y proponen fortalecer capital social, diversificar cultivos y restaurar infraestructura ecológica. Finalmente, Altieri y Nicholls (2021) concluyen que agroecología, cultivos de bajo consumo hídrico y cercos vivos alineados con SbN permiten cumplir ODS 6, 13 y 15 al tiempo que diversifican ingresos rurales.

4.3.3.1.- Conflictos socioambientales y gestión del agua.

Petorca simboliza a escala nacional la crisis hídrica y el conflicto socioambiental chileno (Miranda, 2018; Muñoz et al., 2020; Panes-Pinto et al., 2018). La prolongada sequía y la gestión precaria del agua han tensionado a actores sociales: grandes exportadoras concentran derechos otorgados por el Código de Aguas de 1981 que privilegiaba el uso económico mientras comunidades y pequeños agricultores sufren un drástico descenso en el acceso, configurando profunda injusticia hídrica (Villalobos, 2023).

En la comuna, desde 2010 se ha declarado “comuna en escasez y emergencia agrícola”, medidas que las comunidades consideran insuficientes frente a la sobreasignación del recurso. La consigna “No es sequía, es saqueo”, impulsada por MODATIMA y Rodrigo Mundaca, resume la denuncia de acaparamiento y la vulneración del derecho humano al agua (Bolados, 2016; Le Monde

Diplomatique Chile, 2017). La situación ha atraído atención internacional: OCDE y PNUD recomiendan fortalecer regulación y fiscalización en cuencas sobreexplotadas. La reforma al Código de Aguas (2022) prioriza consumo humano y preservación de ecosistemas, pero su aplicación en Petorca aún es limitada (Muñoz et al., 2020; Villalobos, 2023).

Los impactos ambientales severos: cauces secos gran parte del año, pérdida de hábitats ribereños, descenso freático y avance de la desertificación con erosión y degradación de suelos (Villena et al., 2017). Petorca figura entre las zonas más vulnerables al Cambio Climático, con proyecciones de menor precipitación, menor recarga hídrica y extremos térmicos más frecuentes (Muñoz et al., 2020; Villena et al., 2017). Este escenario exige respuestas integradas de adaptación y gestión ambiental orientadas a restaurar funciones ecosistémicas y garantizar equidad hídrica.

Finalmente, la evaluación del proyecto concluye que la implementación de SbN y la reconversión de sistemas agroexportadores hacia modelos resilientes se alinean con la planificación climática nacional. Estrategias como forestación nativa, compostaje y eficiencia hídrica son altamente costo-efectivas y reducen emisiones de GEI, contribuyendo a las metas del Acuerdo de París (MMA, 2019; Montero y del Campo, 2024).

4.3.3.2.- Crisis humanitaria y conflicto socioambiental.

La sobreexplotación y la sequía han convertido la escasez hídrica de Petorca en una crisis humanitaria y un conflicto socioambiental cronificado, documentado por el INDH desde 2014 y reiterado en sus seguimientos posteriores (INDH, 2014; 2018).

Impacto social cuantificable: con un 20 % de la población depende de camiones aljibe para acceder al agua potable básica (CR2-PUCV, Policy brief; Muñoz et al., 2020). Esta dependencia persiste a pesar de los decretos de “zona de escasez hídrica” dictados y renovados desde agosto de 2018 y durante 2021 para la provincia de Petorca (BCN, 2018a).

Golpe a la economía campesina: A fines de 2019 se reportó mortandad masiva de ganado caprino y bovino en Valparaíso, con Petorca entre las zonas más afectadas, obligando a operativos extraordinarios de alimentación animal y afectando gravemente a pequeños productores (El Mostrador, 2019).

Conflicto y justicia hídrica: Organizaciones como MODATIMA han visibilizado el caso con la consigna “No es sequía, es saqueo”; literatura académica y crónicas califican a Petorca como “epicentro” de la vulneración del derecho humano al agua (Vilches, 2021).

4.3.3.3.- Conflictos ambientales asociados.

Presión hídrica extrema: las plantaciones extensivas en esta zona semiárida exigen riego intensivo; metodologías Water Footprint Network reportan huellas elevadas: limón en España 271 L/kg, palto en Chile 1800 L/kg y almendra en California 5290 L/kg de agua azul (Ailimpo, 2022; Becker y Gondhalekar, 2022).

Este consumo consuntivo compite con usos prioritarios, en cuencas deficitarias: en Petorca la población rural dependió durante años de camiones aljibe a 50 L/p/d, hasta que en marzo 2021 la Corte Suprema ordenó garantizar 100 L/p/d por derecho humano al agua (Fragkou et al., 2022).

La sobre extracción y el sobre otorgamiento de derechos han hundido los niveles freáticos y generado déficit estructural: agotamiento en Petorca y brechas persistentes en el balance de Aconcagua (DGA, 2017; Duran-Llacer et al., 2020).

Erosión y degradación de suelos: la implantación de huertos en laderas con camellones a favor de pendiente acelera la escorrentía y la erosión hídrica. En ensayos de la V Región se han registrado tasas de erosión hasta 650 veces mayores que en suelos con cobertura nativa y pérdidas intensas de suelo en los primeros inviernos posteriores al establecimiento, reduciendo la filtración y, por ende, la recarga (Youlton, 2005). Además, se han reportado correlaciones espaciales entre la expansión frutícola y el descenso de aguas subterráneas en el sistema Ligua-Petorca, con disminuciones significativas en 75% de los pozos analizados (Duran-Llacer et al., 2020). La conversión de pendientes conservadas a huertos frutales implica, asimismo, pérdida de vegetación nativa, lo que incrementa la erosión y reduce la biodiversidad (Miranda, 2022).

Uso de áreas no aptas: el avance de frutales sobre tierras Clase VII-VIII refleja sobreuso y uso marginal, en Valparaíso >2.000 ha de paltos han reemplazado bosque nativo en laderas inestables desde 2014, tensionando la aptitud agro-edáfica y aumentando riesgos (Miranda, 2022). De esta manera, en Petorca el 68,5% del territorio corresponde a suelos Clase VII, confirmando que la mayor parte del área intervenida presenta limitaciones severas para fruticultura intensiva (CIREN y SITRural, 2024).

4.3.3.4.- Integración de criterios ecológicos, sociales y productivos en el diseño del paisaje.

En coherencia con los resultados obtenidos sobre la disminución de la precipitación ($\approx -50\%$ entre 1985 y 2023), la reducción de caudales y la expansión de monocultivos frutales en la cuenca de Petorca, de acuerdo con los principios de la ecología del paisaje (Gómez-Sal, 2000) y de la agroecología funcional (Gliessman, 2007) se propone un diseño del paisaje que integre criterios ecológicos, sociales y productivos;

A.- Criterios ecológicos: se plantea fortalecer la conectividad entre remanentes de vegetación nativa, cauces y zonas de recarga mediante la creación de corredores biológicos y franjas riparias, que reduzcan la fragmentación y favorezcan la infiltración hídrica y el control de la erosión.

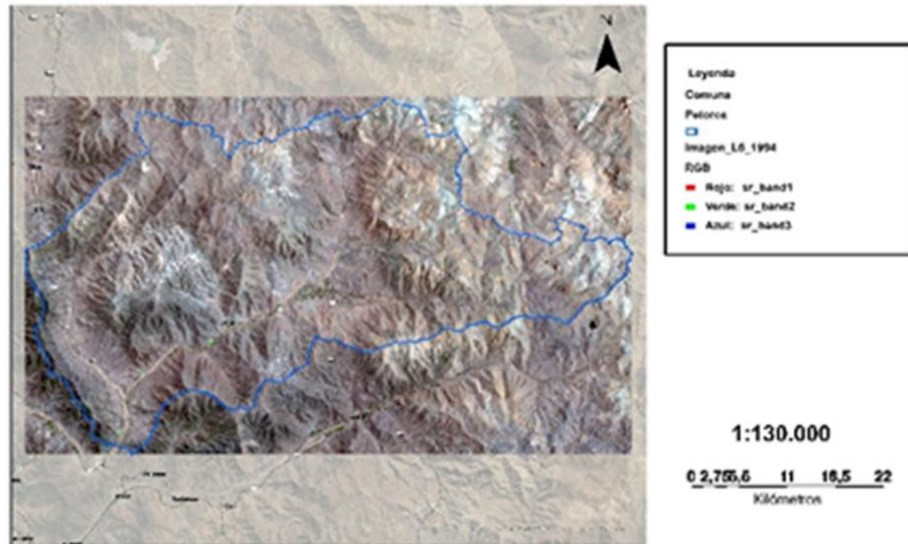
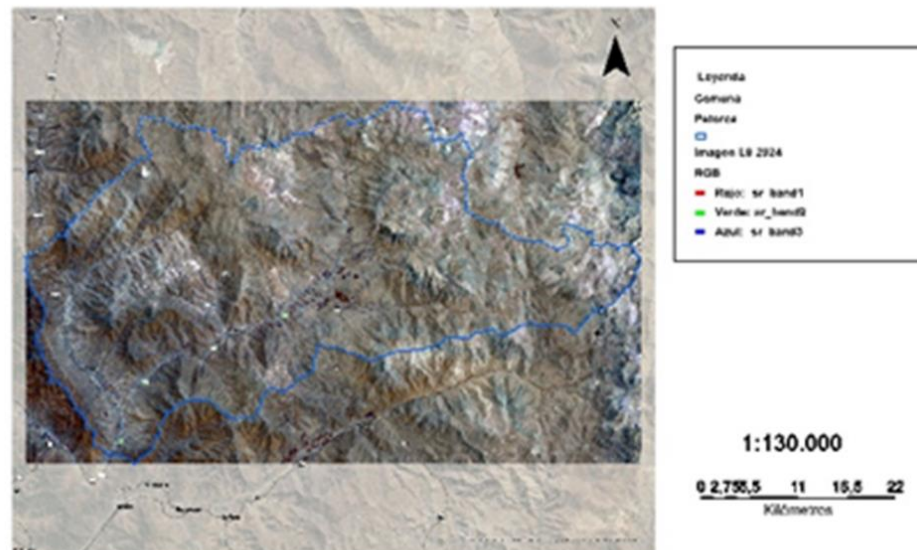
B.- Criterios sociales: se enfatiza la cogestión del territorio junto a comunidades rurales, sistemas de Agua Potable Rural (APR) y asociaciones agrícolas locales, incorporando su conocimiento en la planificación del paisaje. Esta integración multidimensional permite alinear los objetivos de conservación, producción y bienestar, reforzando la resiliencia socio ecológica frente a la escasez hídrica y el Cambio Climático.

C.- Criterios productivos: se promueve la diversificación funcional a través de mosaicos agroecológicos que integren frutales, cultivos de cobertura y setos multipropósito, con el fin de optimizar la eficiencia hídrica y disminuir la huella ambiental de la producción.

Como complemento a estos criterios, se desarrolló un análisis de evolución del paisaje mediante imágenes satelitales Landsat 5 (1994) y Landsat 9 (2024) (Figura 13A-B), procesadas en el entorno de ArcGIS Pro 3.5.4 (Esri, 2024). Ambas imágenes se obtuvieron desde el catálogo público del United States Geological Survey (USGS), correspondiendo a la Path 233 / Row 84 de la misión Landsat Collection 2, Nivel-2 (USGS, 2024). Todo esto con el objetivo de comparación del paisaje y rectificar los procesos de disgregación de este.

Figura 13.

Imágenes correspondientes a la comuna de Petorca. Ambas composiciones RGB utilizan Band 1 (rojo), Band 2 (verde) y Band 3 (azul). A) Muestra el paisaje antes del boom de la fruticultura extensiva. B) Se aprecia una disminución significativa de la cobertura vegetal y el vigor ecosistémico entre ambos periodos, junto con la expansión de la frontera agrícola en el valle bajo.

A) Mapa de Imagen satelital Landsat 5 1994**B) Mapa de Imagen satelital Landsat 9 2024**

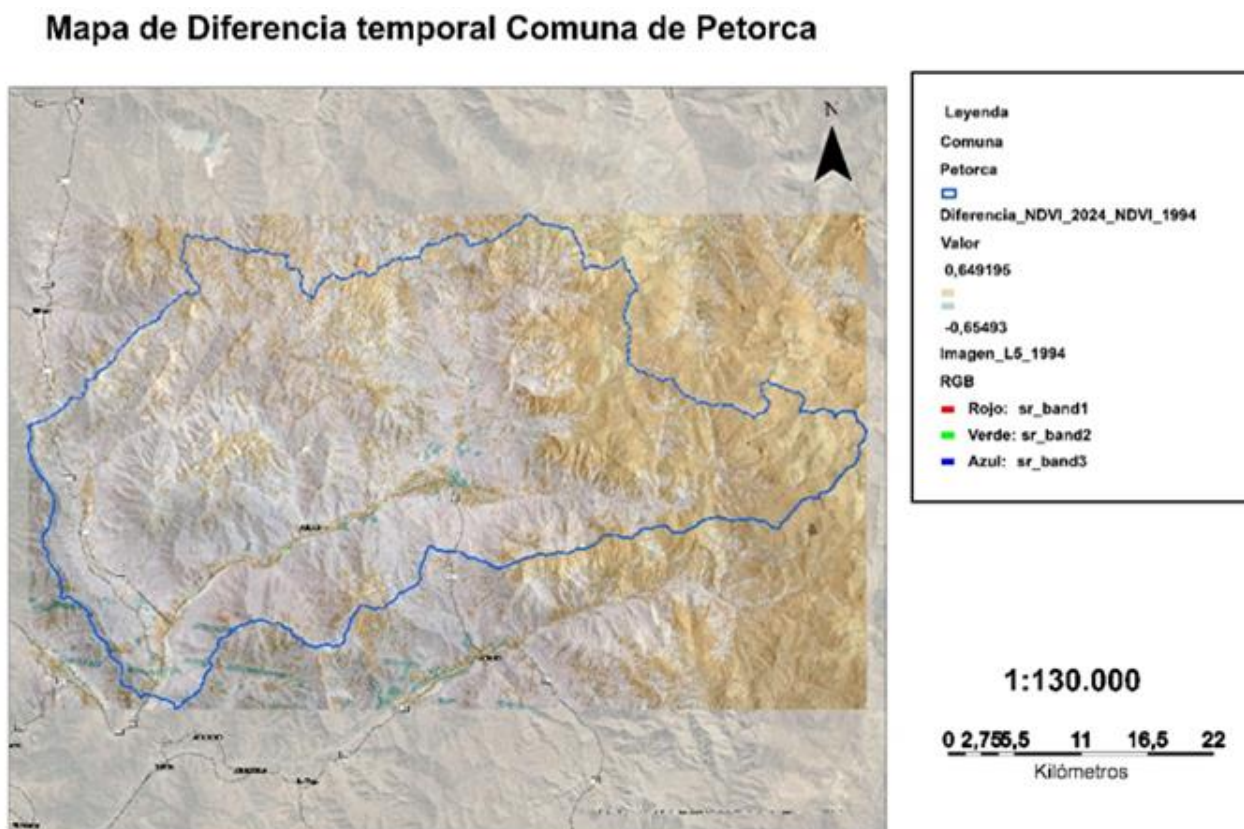
ATF

***Nota.** Elaborado por Trabal A., 2025. Mapas de Imágenes Satelitales Landsat 5-1994 y Landsat 9-2024. Escala 1:130.000. ArcGIS Pro-3.5.4. (Esri, 2024). Elaborado con datos del United States Geological Survey (USGS), Landsat Collection 2 Level-2, Path 233/Row 84.

Posteriormente, se aplicó el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) para comparar la cobertura vegetal entre ambos años, generando un mapa de diferencia temporal (Figura 14). Este procedimiento permitió identificar una marcada disminución del vigor vegetal en la zona media y alta de la cuenca, así como la expansión de áreas agrícolas en el valle bajo, asociadas a cultivos frutales intensivos.

Figura 14.

Mapa de diferencia temporal del índice de vegetación normalizada (NDVI) entre los años 1994 y 2024 en la comuna de Petorca. Los valores negativos (amarillos) indican pérdida de cobertura vegetal, mientras que los positivos (verdes) representan ganancia o regeneración.



***Nota.** Elaborado por Tralab A., 2025. Mapa de Diferencia Temporal NDVI (1994-2024). Escala 1:130.000. ArcGIS Pro-3.5.4. (Esri, 2024). Elaborado con datos del United States Geological Survey (USGS), Landsat Collection 2 Level-2, Path 233/Row 84.

El análisis NDVI se realizó mediante una función ráster personalizada creada en ArcGIS Pro, (Esri, 2024). lo que permitió cuantificar la variación espacial del índice entre 1994 y 2024 y disponer de una herramienta replicable para otros sectores de la región. Los resultados evidencian la pérdida progresiva de vegetación nativa y la transformación del uso de suelo hacia sistemas productivos intensivos, reforzando la necesidad

de aplicar los criterios ecológicos, sociales y productivos propuestos en este estudio para restaurar la funcionalidad del paisaje.

4.3.4.- Implicancias para la gestión territorial.

La gestión territorial debe basarse en el reconocimiento de activos ecosistémicos. El patrimonio cultural-natural (Altos de Petorca y Alicahue, Palmar de Tilama) debe entenderse como infraestructura ecológica clave para la regulación hídrica, protección de suelos y base para economías de bajo consumo de agua, como el turismo sustentable. Este enfoque reorienta la planificación hacia la resiliencia climática y la justicia ambiental.

4.3.4.1.- Biodiversidad y patrimonio.

Sitio Prioritario Petorca (Río Petorca): Bosque espinoso mediterráneo interior (*Acacia caven*, *Prosopis chilensis*) y matorral esclerófilo (*Quillaja saponaria*, *Porlieria chilensis*). (MMA-SIMBIO, 2025; Luebert y Plissock, 2017).

Altos de Petorca y Alicahue: Corredor biológico de aproximadamente 102300 hectáreas con 105 especies de vertebrados y la mayor población de guanacos de Chile central; 40 hitos arqueológicos. (CONAMA, 2007, cit. en Municipalidad de Petorca, 2021; MMA-SIMBIO, 2025).

Palmar de Petorca (Palmas de Tilama): 1896 hectáreas con *Jubaea chilensis*, 190 plantas vasculares (15 en conservación); en trámite para declarar más de 500 hectáreas como área protegida. (Municipalidad de Petorca, 2021; SEREMI MMA, 2025; Youlton et al., 2016).

Zona de Patrimonio cultural: Iglesia Nuestra Señora de La Merced (1640), Monumento Histórico. Casa natal de Manuel Montt (1809), Monumento Nacional. Petroglifos El Arenal/Pedernal. Planificación territorial: PRI Valparaíso Satélite Petorca Cabildo (MINVU, 2014-2015) protege Altos de Petorca Alicahue y Palmas de Tilama como áreas de conservación.

4.3.4.2.- Justificación y enfoque territorial.

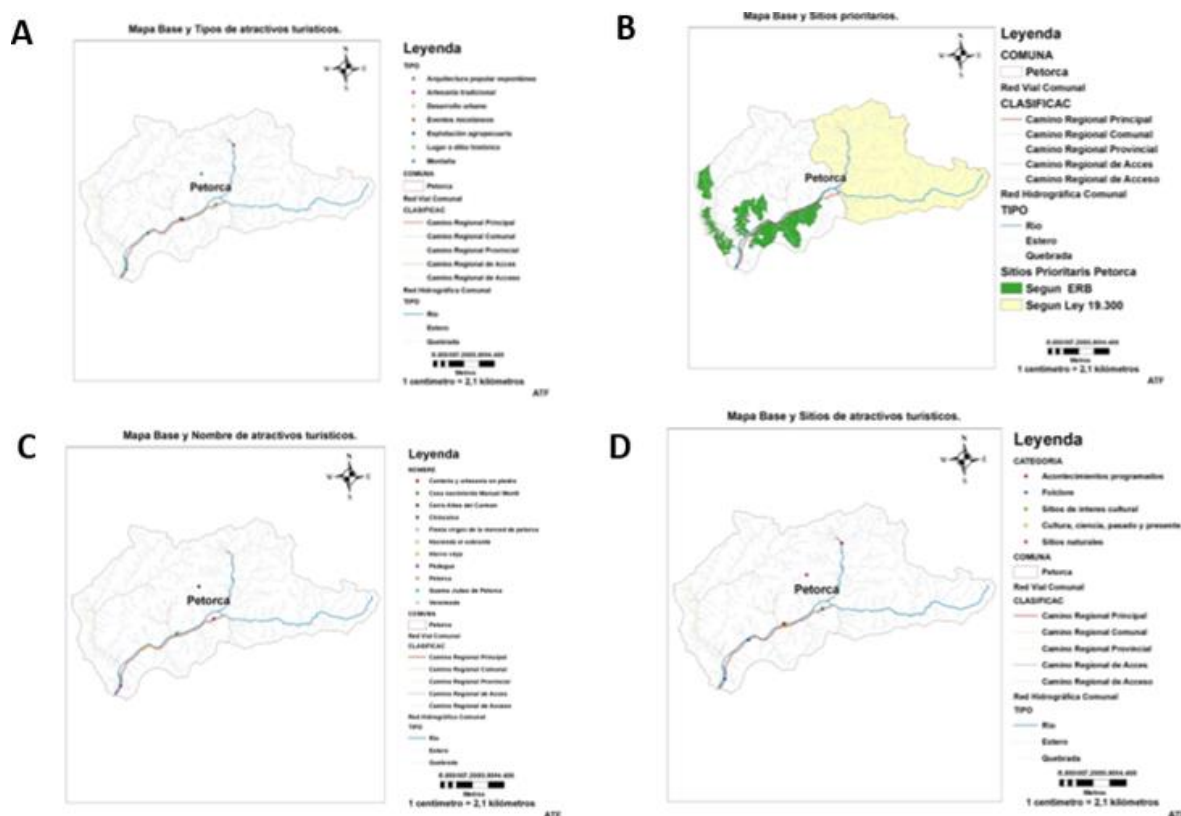
Intervenir en Petorca es altamente relevante y replicable: sus aprendizajes en adaptación climática, restauración y gobernanza del agua pueden trasladarse a otras cuencas semiáridas con conflictos hídricos. Desarrollar un plan de gestión territorial sustentable permite evaluar in situ el potencial de las SbN para encauzar el territorio hacia la resiliencia y la equidad. Además, el turismo sustentable patrimonial, de naturaleza y agroturismo emerge como alternativa de baja demanda hídrica y generadora de empleo local, ya promovida por programas públicos (INDAP, 2019; IUCN, 2020).

4.3.4.3.- Patrimonio y presión hídrica.

El patrimonio cultural natural de Petorca con monumentos, sitios arqueológicos, paisajes cordilleranos y el Palmar de Tilama, se distribuye de forma policéntrica que permite articular corredores temáticos. Coincide con el Sitio Prioritario “Altos de Petorca y Alicahue”, destacado por su biodiversidad y conectividad andino-costera (Figura 13).

Figura 13.

Secuencia de mapas base con sitios de atractivos turísticos y sitios prioritarios en comuna de Petorca. A: Mapa Base y Tipos de atractivos turísticos. B: Mapa Base y Sitios Prioritarios. C: Mapa Base y Nombre de atractivos turísticos. D: Mapa Base y sitios de atractivos turísticos



***Nota.** Tralbal, A., 2025. Mapa Base (Mapa). Escala A: 1:2,1 B: 1:2,1 C: 1:2,1 D: 1:2,1. ArcGIS Pro-3.5.3. Creado con datos, Ministerio de Agricultura, 2007; Servicio Nacional de Turismo, 2015, 2012; DGA, 2023, 2020, 2013; Ministerio de Medio Ambiente, 2021; Dirección de Vialidad, MOP, 2021; SUBDERE, 2023.

Esto, respalda su integración al ordenamiento territorial: funciona como infraestructura ecológica clave (regulación hídrica, protección de suelos) y como base para economías de bajo consumo de agua (turismo, servicios ambientales) (CONAMA, 2005; INDAP, 2019; Machín, 2020; SIMBIO-MMA, sf). En contexto de megasequía y sobreasignación, este patrimonio constituye un activo

estratégico para la resiliencia socio ecosistémica (Bolados, 2016; Muñoz et al., 2020; Santibáñez y Santibáñez, 2014).

4.3.4.4.- Lectura desde SbN como líneas prioritarias.

Conectividad y restauración: consolidar corredores entre sitios prioritarios y restaurar riberas y laderas con plantas nativas para infiltrar y controlar erosión.

Turismo naturaleza y patrimonio: rutas interpretativas y circuitos culturales con participación comunitaria y manejo de capacidad de carga.

Gestión de cuencas y servicios ecosistémicos: valorar servicios (agua, suelos, paisaje) y condicionar usos a franjas riparias, microcuencas de recarga y manejo de suelos. Requieren conservación efectiva y gobernanza inclusiva para evitar sobrecarga de áreas frágiles (Altieri & Nicholls, 2007; CONAMA, 2005; INDAP, 2019; UICN, 2020; Machín, 2020; MMA, 2007; Santibáñez & Santibáñez, 2014).

4.3.4.5.- Alineación con ODS y propuesta operativa.

El enfoque aporta a ODS 6 (recarga y humedales), 11 (corredores verdes y patrimonio), 12 (turismo sustentable y agroecología), 13 (adaptación basada en ecosistemas) y 15 (restauración de esclerófilo y palmares) (INDAP, 2019; UICN, 2020; MMA, 2007; MMA, 2025; Muñoz et al., 2020; Santibáñez & Santibáñez, 2014). Se propone planificación climáticamente inteligente que combine zonificación ecológica (núcleos, amortiguación, conectividad), SbN (franjas ribereñas, agroforestería, nativas) y gobernanza participativa. Integrar el patrimonio como infraestructura ecológica mediante corredores, restauración y turismo de baja HH reorienta el territorio hacia resiliencia climática y justicia ambiental, reduciendo presiones sobre el agua y generando beneficios socioeconómicos locales (Altieri & Nicholls, 2007; CONAMA, 2005; INDAP, 2019; UICN, 2020; Machín, 2020; MMA, 2007; MMA, 2025; Muñoz et al., 2020).

4.3.5.- Enlace con los ODS.

El modelo productivo predominante en la comuna de Petorca presenta graves incoherencias con los ODS (ODS 6, 12, 13 y 15), al evidenciar sobreexplotación hídrica, degradación de suelos y pérdida de cobertura vegetal. La expansión frutícola intensiva basada principalmente en monocultivos de palto y cítricos de alto consumo hídrico ha comprometido la sostenibilidad ecológica y social del territorio (CIREN, 2023; DGA, 2023; INE, 2019; ODEPA, 2023).

Como se observa en la Tabla 19, las brechas son críticas en las metas vinculadas al uso sostenible del agua, la acción climática y la conservación de ecosistemas terrestres. En particular, la asignación hídrica cercana al 30 % de la lluvia anual en derechos de aprovechamiento (Muñoz et al., 2020) y la dependencia de

abastecimiento de emergencia (50 L persona/día; PUCV, 2019) evidencian un sistema de gestión del agua centrado en la rentabilidad productiva más que en el equilibrio ecosistémico y la equidad social. Dado que, la localización del 70 % de los cultivos de palto en suelos de Clase VII-VIII y las tasas de erosión hasta 650 veces superiores a las de la vegetación nativa (CIREN, 2023) confirman un patrón de uso del suelo incompatible con los ODS 12 y 15.

Tabla 19. Alineación del modelo socio-hidrológico de Petorca con las metas de los ODS 2, 6, 12, 13 y 15

ODS / Meta específica (ONU, 2015)	Indicador local (1987-2024)	Situación comunal actual (2024)	Brecha frente a la meta ODS	Implicancia para la gestión ambiental
ODS 2-Hambre cero Meta 2.3: Aumentar la productividad agrícola y el acceso equitativo a los recursos.	Reducción del área cultivada (-36% entre 2001-2019, INE, 2019). Predominio de cultivos de exportación (palta, cítricos).	El modelo agroexportador prioriza la rentabilidad externa sobre la producción local de alimentos.	Alta brecha. No existe garantía de seguridad alimentaria ni diversificación productiva.	Promover reconversión agrícola hacia cultivos locales y resilientes, fortaleciendo mercados territoriales.
ODS 6-Agua limpia y saneamiento Meta 6.4: Aumentar la eficiencia en el uso del agua y garantizar una extracción sostenible.	Disponibilidad hídrica per cápita (DGA, 2023). Derechos otorgados ≈30% de la lluvia anual (Muñoz et al., 2020). Abastecimiento de emergencia: 50 L/persona/d. 100 L solo por fallo judicial (2021).	Sobreasignación hídrica estructural y acceso limitado al agua para consumo humano.	Muy alta brecha. No se cumple el estándar de acceso ni la sostenibilidad de extracción.	Reasignar derechos priorizando el uso humano y fortalecer la gobernanza local del recurso.
ODS 12-Producción y consumo responsables Meta 12.2: Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.	Monocultivo exportador intensivo (ODEPA, 2023). HH elevada (≈37.000 L/ha/día, INIA-PUCV, 2019). Baja circularidad de insumos y residuos.	El sistema productivo depende de insumos externos y uso intensivo del agua, sin gestión de ciclo cerrado.	Alta brecha. No existen prácticas productivas sostenibles ni control de la HH.	Implementar APL con enfoque circular y tecnologías de eficiencia hídrica y energética.
ODS 13-Acción por el clima Meta 13.1: Fortalecer la resiliencia y capacidad de adaptación al Cambio Climático.	Inicio de la megasequía (2010, Garreaud et al., 2020). Pérdida de cobertura vegetal: menor infiltración y mayor escorrentía.	Alta vulnerabilidad ante extremos climáticos; sin planes comunales de adaptación.	Alta brecha. Escasa adaptación local al Cambio Climático.	Integrar SbN (infiltración, humedales artificiales, setos nativos) en planificación comunal.
ODS 15-Vida de ecosistemas terrestres Meta 15.1: Conservar y restaurar ecosistemas terrestres y su biodiversidad.	70% de los paltos en suelos Clase VII-VIII (CIREN, 2023). Erosión 650 veces mayor que en vegetación nativa.	Avance de cultivos sobre suelos no aptos y degradación severa del capital natural.	Muy alta brecha. Ecosistemas degradados y	Priorizar restauración ecológica, corredores biológicos y

	Pérdida de hábitats y fragmentación del paisaje.		sin restauración activa.	control de erosión.
ODS 15-Meta 15.3: Combatir la desertificación y rehabilitar tierras degradadas.	Suelos degradados por sobreuso agrícola. Descenso freático y pérdida de productividad (DGA, 2019).	Procesos activos de desertificación y pérdida de fertilidad.	Alta brecha. Ausencia de monitoreo y programas de rehabilitación de suelos.	Incorporar manejo de suelos, recarga artificial y revegetación nativa en planes comunales.

***Fuente:** Elaboración propia con base en DGA, 1994, 2004, 2019, 2023; ODEPA, 2023; INE, 2019, 2024; CIREN, 2023; PUCV, 2019; Garreaud et al., 2020; INIA-PUCV, 2019; MMA, 2022; IUCN, 2020; y ONU, 2015.

Estas condiciones mencionadas anteriormente, se encuentran agravadas por la megasequía iniciada en 2010 (Garreaud et al., 2020), ya que se reduce la resiliencia del territorio ante eventos climáticos extremos, vulnerando también el ODS 13.

Sin embargo, se observa una alineación parcial con los ODS 1, 2 y 8, dado que algunos instrumentos de fomento rural han contribuido, aunque de forma limitada a reducir la pobreza y generar empleo agrícola local, sin modificar las bases estructurales del modelo productivo (INE, 2024; ODEPA, 2023).





En coherencia con lo planteado, la evaluación detallada de los indicadores locales y su correspondencia con las metas específicas de los ODS permitió definir el grado y dirección de las brechas de sostenibilidad comunal entre 1994 y 2024 (ver Tabla 20). Esta tabla consolida los indicadores hidrológicos, productivos, sociales e institucionales, incorporando la unidad de medida, la frecuencia de actualización, y una escala homogénea de brechas (crítica / alta / media /baja, con tendencia ↑ creciente, ↓ decreciente o ↔ estable). Este formato busca facilitar el seguimiento municipal y la priorización de intervenciones en materia de gestión ambiental y cumplimiento de la Agenda 2030.

El conjunto de indicadores confirma que las brechas más críticas se concentran en la dimensión hídrica (ODS 6), la estructura productiva agroexportadora (ODS 12) y la conservación ecosistémica (ODS 15), lo cual sitúa a Petorca en una situación de alta vulnerabilidad socioambiental (ODS 13).

Reorientar la gestión territorial mediante SbN resulta prioritario, priorizando la protección y recarga de acuíferos, la reducción de cultivos de alta demanda hídrica y la transición hacia una agricultura regenerativa y diversificada. Estas acciones permitirían restablecer los procesos ecológicos esenciales, mejorar la infiltración y fertilidad del suelo y avanzar hacia una sostenibilidad y resiliencia socio-ecológica integral (IUCN, 2020; MMA, 2022; ONU, 2015).

Tabla 20. Vinculación de los indicadores locales con los ODS y evaluación de brechas (Petorca, 1994-2024)

Nº	Indicador local (unidad)	ODS y metas ONU vinculadas	Justificación de la vinculación	Evaluación de la brecha 1994-2024	Implicancia para la gestión ambiental	Frecuencia de actualización
1	Disponibilidad hídrica per cápita (m³/hab/año)	ODS 6 (Metas 6.1, 6.4)	Mide la disponibilidad efectiva de agua dulce; su disminución refleja sobreexplotación estructural y acceso inequitativo.	● Brecha crítica (↑) Caudal y disponibilidad en descenso sostenido.	Reasignar derechos priorizando consumo humano; fortalecer gobernanza hídrica local y fiscalización.	Anual
2	NDVI promedio de cobertura nativa (índice -1 a 1)	ODS 15 (Metas 15.1, 15.3); ODS 13 (Meta 13.1)	NDVI alto refleja vigor vegetal y salud ecosistémica. Su reducción implica pérdida de cobertura nativa y resiliencia climática.	● Brecha alta (↑) Reducción de vegetación nativa por expansión agrícola y sequía prolongada.	Implementar SbN de restauración ecológica, corredores biológicos y control de erosión en laderas.	Anual / bianual
3	Superficie agrícola intensiva (ha)	ODS 2 (Meta 2.3); ODS 12 (Meta 12.2); ODS 15 (Meta 15.3); ODS 6 (Meta 6.4)	Aumento de monocultivos exportadores intensivos incrementa presión sobre suelos y agua, afectando la soberanía alimentaria y sostenibilidad.	● Brecha crítica (↑) Expansión sostenida del modelo agroexportador intensivo.	Promover reconversión hacia cultivos locales resilientes y diversificación agroecológica.	Anual / quinquenal
4	Hogares abastecidos por camiones aljibe (% hogares)	ODS 6 (Meta 6.1); ODS 10 (Meta 10.2)	Indica precariedad hídrica rural y desigualdad territorial. Refleja carencia del derecho humano al agua.	● Brecha crítica (↑) Más del 20% de hogares rurales dependen de suministro de emergencia.	Ampliar infraestructura hídrica rural, pozos comunales y planes de resiliencia hídrica.	Anual
5	Cobertura de APR operativas (% de APR)	ODS 6 (Metas 6.1, 6.b)	Refleja capacidad comunitaria para mantener operación continua y acceso	● Brecha alta (↓) Disminución del 95% a 55% de APR operativas.	Fortalecer financiamiento, mantenimiento y gobernanza comunitaria del	Semestral / anual

			equitativo al agua rural.		agua potable rural.	
6	Índice de vulnerabilidad socioambiental I (índice 0-1)	ODS 1 (Meta 1.5); ODS 10 (Meta 10.2); ODS 13 (Meta 13.1)	Integra exposición hídrica, pobreza y riesgo climático. Valores altos reflejan fragilidad social y ambiental.	 Brecha alta (↑) Vulnerabilidad aumentó de 0,42 a 0,72 en tres décadas.	Incorporar planes comunales de adaptación climática y justicia ambiental.	Cada censo / anual (parcial)
7	Concentración de la propiedad agrícola (% superficie / HHI)	ODS 2 (Meta 2.3); ODS 10 (Meta 10.4); ODS 1 (Meta 1.4)	Elevada concentración limita equidad, diversificación y acceso a recursos productivos.	 Brecha alta (↔) Alta concentración estable, sin reversión estructural.	Reformar incentivos hacia pequeña agricultura y equidad territorial.	Cada 5 años
8	Superficie bajo Acuerdos de Producción Limpia (ha)	ODS 12 (Meta 12.2); ODS 6 (Meta 6.4); ODS 13 (Meta 13.2); ODS 15 (Meta 15.3)	Representa adopción de prácticas sostenibles, pero aún marginal frente al modelo intensivo dominante.	 Brecha media (↑) Aumenta la adopción, pero insuficiente frente al deterioro ambiental.	Escalar APL con enfoque territorial, trazabilidad hídrica y carbono.	Anual
9	Presupuesto municipal ambiental (% del presupuesto total)	ODS 17 (Meta 17.17); ODS 13 (Meta 13.2); ODS 11 (Meta 11.3); ODS 16 (Meta 16.6)	Refleja prioridad política y capacidad institucional local para implementar políticas ambientales.	 Brecha media (↑) Aumento leve (0,4 → 1,5%) pero aún insuficiente.	Incrementar presupuesto ambiental y fortalecer alianzas público-privadas.	Anual

*Fuente: Elaboración propia con base en DGA, 1994, 2004, 2019, 2023; ODEPA, 2023; INE, 2019, 2024; CIREN, 2023; ASCC, 2020; MMA, 2022; ONU, 2015.

5.- Diagnóstico y propuesta de desarrollo.

5.1.- Síntesis diagnóstica para la acción.

El diagnóstico integral de la comuna de Petorca, revela la convergencia crítica de tres nudos territoriales interdependientes: (1) una desalineación agroecológica extrema, con ~70% de los cultivos de palto (~4250 ha) implantados en suelos de aptitud marginal (Clases VII-VIII) y laderas >30%, generando tasas de erosión hasta 650 veces superiores a las de la cobertura nativa; (2) una huella hídrica insostenible del modelo agroexportador, con demandas anuales ~1350m³/ha para paltos (ajustada localmente) más de 3 veces la disponibilidad hídrica per cápita actual (~850m³/hab/año) colisionando con el derecho humano al agua, evidenciado en que ~20% de la población rural depende de camiones aljibe; (3) brechas en gobernanza territorial e instrumentos de fomento, ejemplificadas por políticas como la Ley 18.450, que concentran incentivos productivos en zonas críticas sin condicionalidades ambientales, profundizando la vulnerabilidad socioambiental. Este modelo agroexportador dominante ejerce una presión significativa sobre el territorio debido a su elevada demanda hídrica y energética y al uso intensivo de insumos de origen fósil. En efecto, la agricultura intensiva local es una fuente relevante de emisiones de metano (CH₄) y óxidos de nitrógeno (N₂O) asociadas principalmente a fertilización nitrogenada, ganadería y manejo de suelos (IPCC, 2019; MMA, 2022), coincidiendo con estudios internacionales que muestran aumentos significativos de CH₄ y N₂O en sistemas agrícolas intensivos (Patange et al., 2022). Ante esta realidad, es necesario transitar hacia prácticas más sostenibles y diversificadas, como la agroecología, los sistemas agroforestales y las SbN (Montero & del Campo, 2024). Esta necesidad se ve reforzada por los escenarios climáticos proyectados para la zona central de Chile, que anticipan la mantención o agudización del déficit hídrico, subrayando la urgencia de integrar enfoques adaptativos y SbN en la planificación territorial (Garreaud et al., 2025).

El presente capítulo sintetiza los principales hallazgos socioambientales para consolidar un diagnóstico territorial actualizado. A partir de ello, se desarrolla una propuesta de intervención fundamentada en SbN, orientada a la restauración ecológica, la optimización de la gestión hídrica y el fomento de un modelo de desarrollo resiliente, en concordancia con los ODS y con enfoques integrados del nexo agua-agricultura-energía (FAO, 2014) y estrategias de mitigación basadas en secuestro de carbono (Wang et al., 2025). Finalmente, se presentan los lineamientos de implementación y los mecanismos de seguimiento requeridos para operacionalizar esta transición territorial.

Los análisis territoriales evidencian una disminución sostenida de la disponibilidad hídrica superficial y subterránea, consistente con la prolongada megasequía y una recarga insuficiente de acuíferos (DGA,

2023c; Garreaud et al., 2025). Esto se agrava por la expansión de frutales de alto consumo (paltos, cítricos), que han modificado el uso de suelo y aumentado la presión sobre los sistemas hidrológicos locales (INE, 2019; ODEPA, 2023). Los resultados multivariados e indicadores normalizados confirman un descenso progresivo de la vitalidad ecosistémica, reflejado en la caída del índice NDVI en sectores de vegetación nativa y el aumento de superficies bajo manejo intensivo. Esto conlleva, cambios drásticos en la estructura del paisaje y su conectividad ecológica (CIREN, 2021; Montero & del Campo, 2024). Asimismo, se observan brechas institucionales: la distribución de instrumentos de fomento es territorialmente desigual, con incentivos productivos concentrados en zonas, altamente demandantes de agua, aumentando la vulnerabilidad socioambiental; adicionalmente, existe financiamiento climático municipal insuficiente (CDP-EBP, 2023). En conjunto, Petorca enfrenta presiones simultáneas sobre el agua, el suelo y la funcionalidad ecológica. Sin embargo, también mantiene activos estratégicos (remanentes de vegetación nativa con altos valores de índice NDVI en zonas altas, corredores biológicos potenciales) y capital comunitario (conocimiento local en agroecología y gestión tradicional del agua). Esto habilita, oportunidades para una restauración y transición hacia modelos de desarrollo más sostenibles, en línea con evidencia internacional sobre el rol de la agroecología (FAO, 2025) y mecanismos como pagos por servicios ecosistémicos para facilitar transiciones sostenibles (Pagiola, 2020). Asimismo, con el fin de sintetizar estas dinámicas y facilitar la articulación entre el diagnóstico y la propuesta de intervención, se presenta a continuación un análisis FODA integrado (Tabla 21). Este instrumento organiza las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del territorio considerando los hallazgos del análisis multivariado, los indicadores integrados, la evidencia espacial de uso de suelo, conectividad ecológica, instrumentos de fomento y tendencias climáticas. El FODA ofrece una visión estratégica del sistema socioambiental de la comuna de Petorca, identificando factores internos que limitan o favorecen la resiliencia territorial, así como elementos externos, climáticos, productivos e institucionales, que inciden en su vulnerabilidad. Esta síntesis constituye la base para definir una propuesta de desarrollo centrada en SbN, orientada a fortalecer los activos existentes, reducir las presiones críticas y avanzar hacia una gestión territorial adaptativa y sostenible.

Tabla 21. Análisis FODA del diagnóstico territorial de la comuna de Petorca.

CATEGORÍA	Elementos Identificados (Diagnóstico)	Sustento y Referencias Técnicas
FORTALEZAS	<ul style="list-style-type: none"> • Resiliencia de vegetación nativa: Persistencia de altos valores de NDVI, principalmente en zonas altas. • Conectividad potencial: Existencia de corredores ecológicos viables entre quebradas y cauces secundarios. • Capital social y local: Conocimiento comunitario en prácticas agroecológicas y gestión tradicional del agua. • Compromiso institucional: Acuerdos de Producción Limpia (APL) vigentes y disponibilidad de data climática/hidrológica. 	<ul style="list-style-type: none"> • NDVI: CIREN (2021) y procesamiento Landsat. • Conectividad: Análisis espacial (Cap. 4). • Gestión: Diagnóstico integrado institucional y comunitario. • Fomento: APL reportados (ODEPA, 2023).
OPORTUNIDADES	<ul style="list-style-type: none"> • SbN: Restauración ribereña, manejo de laderas e infiltración. • Transición productiva: Giro hacia modelos agroforestales y sistemas de bajo consumo hídrico. • Alineamiento estratégico: Sinergia con ODS (6, 12, 13, 15) y programas estatales de adaptación. • Ordenamiento territorial: Integración de criterios de ecología del paisaje y recuperación de terrazas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Metodología SbN: Montero y del Campo (2024). • Agroecología: Gómez-Sal (2000); Gliessman (2007). • Políticas: Recomendaciones ODEPA (2023); INE (2019). • Brechas: Análisis ODS (Cap. 4).
DEBILIDADES	<ul style="list-style-type: none"> • Desbalance hídrico y legal: Sobre otorgamiento de derechos de agua respecto a la oferta real y débil gobernanza. • Monocultivo intensivo: Dependencia de paltos/cítricos con aumento de NDVI agrícola vs. caída en nativo. • Fragmentación: Pérdida de conectividad ecológica y degradación de infraestructura de riego. • Vulnerabilidad social: Dependencia de camiones aljibe para consumo humano. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hídrico: DGA (2023c) y MMA (2022). • Tendencias NDVI: Series temporales Landsat 5-9; CIREN (2021). • Datos productivos: ODEPA (2023); INE (2019). • Correlación: PCO (Cap. 4) vinculando intensificación con escasez.
AMENAZAS	<ul style="list-style-type: none"> • Crisis Climática: Proyección de déficit hídrico, desertificación y erosión de laderas. • Presión Agroexportadora: Continuidad del modelo intensivo y expansión hacia áreas de valor ecológico. • Deterioro Ecosistémico: Degradación de zonas ribereñas y pérdida de biodiversidad. • Conflictividad: Aumento de conflictos socioambientales por escasez hídrica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Clima: Escenarios zona central (Garreaud et al., 2025). • Suelo y Paisaje: Tendencias degradación (CIREN, 2021). • Riesgos: Discusión socioambiental (Cap. 4). • Evidencia: Análisis normalizados de cobertura y productividad.

*Fuente: Elaboración propia.

En suma, el diagnóstico integral y el análisis FODA revelan que Petorca atraviesa una convergencia crítica de estrés hídrico, intensificación productiva y degradación ecosistémica. Este escenario es consecuencia de la prolongada megasequía, la sobreexplotación del recurso hídrico y la expansión agrícola intensiva en áreas de alta demanda (principalmente paltos en suelos marginales), según lo documentado por DGA

(2023c), Garreaud et al. (2025) y ODEPA (2023). Las tendencias espaciales de NDVI y uso de suelo confirman el deterioro territorial: disminución del vigor de la vegetación nativa y fragmentación del paisaje, subrayando la urgencia de implementar estrategias de restauración ecológica y planificación adaptativa (CIREN, 2021). No obstante, pese a estas presiones, el territorio conserva activos ambientales y capacidades locales que habilitan una transición hacia modelos más sostenibles. Destacan el potencial de la agroecología, los sistemas agroforestales y las SbN para facilitar esta transición (MMA, 2022; Montero & del Campo, 2024). Estos elementos fundamentan el diseño de una propuesta de intervención orientada a fortalecer la resiliencia socioambiental de la comuna, alineando el desarrollo territorial con los ODS y con los escenarios climáticos proyectados para la zona central.

5.2.- Propuesta de intervención basada en SbN.

La propuesta se estructura en torno a cuatro líneas de intervención complementarias, cada una dirigida a mitigar problemáticas específicas identificadas en el diagnóstico, especializadas en polígonos prioritarios dentro de la cuenca de Petorca. Las medidas SbN seleccionadas buscan recuperar funciones ecosistémicas críticas, mejorar la infiltración hídrica, aumentar la conectividad ecológica y favorecer una transición productiva sostenible, de acuerdo con las directrices nacionales sobre SbN (IUCN, 2020; MMA, 2024). A continuación, se detallan las cuatro líneas de acción propuestas:

5.2.1. Restauración ecológica y conectividad: Franjas riparias y corredores biológicos.

Problema que aborda: Fragmentación del paisaje, pérdida de servicios de regulación hídrica y control de erosión en sectores ribereños.

Intervención propuesta: Restauración de zonas ribereñas (500 ha) a lo largo del río Petorca y afluentes principales, mediante franjas de vegetación nativa de 30-50 m de ancho en ambas riberas. Se excluye el ganado por 2-3 años para permitir la regeneración de suelos y ciclos ecológicos (SER, 2019).

La intervención incluye:

- **Reforestación y restauración ribereña:** Plantación de especies nativas esclerófilas adaptadas al semiárido, quillay (*Quillaja saponaria*), litre (*Lithraea caustica*), molle (*Schinus latifolius*), peumo (*Cryptocarya alba*) y boldo (*Peumus boldus*), para estabilizar suelos, mejorar la infiltración y reducir escorrentías superficiales. Esto implica remover especies exóticas invasoras y permitir la regeneración de procesos ecológicos como formación de suelo y ciclos de nutrientes (SER, 2019).
- **Estabilización de cauces y control de erosión:** Construcción de terrazas vegetadas y zanjas de infiltración a lo largo de riberas con pendiente, para retener sedimentos, filtrar contaminantes difusos (agroquímicos) y reducir la escorrentía superficial.

- **Creación de corredores biológicos:** Conexión de fragmentos remanentes de bosque esclerófilo en laderas medias mediante vegetación de enlace, permitiendo la dispersión de fauna y propagación de especies vegetales clave. Estas acciones buscan revertir la fragmentación del paisaje y recuperar servicios ecosistémicos como la regulación hídrica, a la vez que crean sumideros de carbono para la mitigación climática (MMA, 2022; IPBES, 2019).

Localización prioritaria: Riberas del río Petorca (tramos medios y bajos) y subcuencas de Chincolco y Pedegua, donde se han identificado las mayores pérdidas de vegetación ribereña (ver análisis SIG, Cap. 4.2.2).

5.2.2. Infraestructura verde para retención e infiltración hídrica.

Problema que aborda: Escorrentía superficial excesiva, baja infiltración y recarga insuficiente de acuíferos aluviales, con caudales base muy reducidos en la estación seca.

Intervención propuesta: Instalación de estructuras naturales/seminaturales en laderas y zonas de recarga para maximizar la captura y percolación de agua:

- **Sistemas de infiltración en laderas (>30% pendiente):** Construcción de zanjas de infiltración (~0,5m de profundidad, espaciadas 10-15 m siguiendo curvas de nivel) y terrazas vegetadas con especies xerófitas nativas. Pilotos del Centro CERES (2024-2025) demuestran incrementos de infiltración del 20-50% en predios de secano con estas técnicas. Son intervenciones coherentes con estrategias de gestión nexo agua-agricultura en zonas semiáridas (FAO, 2014).
- **Humedales depuradores para reúso de aguas grises:** Construcción de 5-10 pequeños humedales artificiales (200-500m² c/u) para tratar aguas grises domiciliarias y reutilizarlas en riego de huertas comunitarias de bajo requerimiento hídrico, contribuyendo también a la recarga de acuíferos poco profundos. Una experiencia piloto en El Bronce (PUCV, 2023) demostró la viabilidad técnica de estos sistemas.
- **Franjas filtrantes multiespecies:** Establecimiento de cubiertas vegetales de 3-5 m de ancho entre hileras de cultivos intensivos, con mezclas de herbáceas perennes y arbustos de bajo mantenimiento, para reducir la velocidad del escurrimiento y mejorar la retención de humedad en el suelo. Esto sigue lineamientos de adaptación que recomiendan coberturas vegetales contra erosión (MMA, 2024).

Localización prioritaria: Laderas norte y sur de la microcuenca Yerba Loca (identificada como crítica por bajo NDVI y alto estrés hídrico en Cap. 4.2), y sectores medios de subcuencas con pendiente moderada a pronunciada donde la recarga de acuíferos sea factible.

5.2.3. Transición agroecológica y diversificación productiva.

Problema que aborda: Dependencia extrema del monocultivo de paltos, vulnerabilidad socioeconómica de pequeños productores, suelos agotados y alta carga de insumos químicos.

Intervención propuesta: Reconversión productiva de superficies críticas, prioritariamente aquellas hoy ocupadas por paltos en suelos Clase VII-VIII, hacia sistemas más resilientes y diversificados:

- **Sistemas agroforestales:** Integración de árboles nativos (p. ej. quillay, litre, molle, nogal criollo) con cultivos de menor huella hídrica (hierbas medicinales, frutales nativos como maqui o arrayán) y ganadería menor (cabras/ovejas) en rotación. Esto permite recuperar suelos degradados, diversificar ingresos (incluyendo apicultura y agroturismo) y crear paisajes más heterogéneos y funcionales.
- **Agricultura regenerativa (pequeños/medianos productores):** Sustitución de labores intensivas por prácticas de conservación de suelos: mínimo/no laboreo, rotación de cultivos, asociaciones multiestrato y uso de consorcios microbianos (micorrizas, fijadores de nitrógeno). Tales prácticas mejoran la estructura y fertilidad edáfica, incrementando la retención hídrica en 20-30% (FAO, 2014; Portal Agro Chile, 2024).
- **Manejo agroecológico del suelo:** Incorporación de enmiendas orgánicas (mulching, compost in situ) y cobertura permanente para aumentar el carbono orgánico en suelo, reduciendo la dependencia de fertilizantes sintéticos y la erosión. Se estima un aumento del secuestro de carbono de $\sim 0,5-1,5$ tCO₂e/ha/año con estas prácticas (Wang et al., 2025)

Localización prioritaria: Predios de pequeños y medianos productores (unas 482 ha en 346 propiedades; ver catastro ODEPA-CIREN, 2023), y polígonos de sobreuso dentro de fundos de grandes productores donde la rentabilidad de cultivos alternativos lo justifique (identificados en Cap. 4.1.3, suelos Clase V-VI con potencial de diversificación).

5.2.4. Gestión territorial colaborativa y fortalecimiento comunitario.

Problema que aborda: Débil gobernanza hídrica, fragmentación entre actores (APR, pequeños agricultores, agroindustria), conflictividad no canalizada y asimetrías de poder en decisiones territoriales.

Intervención propuesta: Fortalecimiento institucional y mecanismos participativos para la gestión territorial integrada del agua:

- **Mesas de gobernanza hídrica multisectoriales:** Reactivación y formalización del PTI Hídrico de Petorca (iniciativa existente de baja operatividad) mediante 3-5 mesas temáticas permanentes (agua potable rural, agricultura familiar, agricultura empresarial, conservación ecológica, ciencia-

tecnología). Cada mesa incluiría representación equilibrada de APR, MODATIMA, pequeños agricultores, municipio, DGA/DOH y otros organismos pertinentes. Se reunirán trimestralmente para articular demandas, priorizar inversiones y validar políticas, asegurando la participación de todos los sectores.

- **Monitoreo comunitario participativo y “mingas hídricas”:** Reactivación de tradiciones de trabajo colectivo (mingas) enfocadas en: (1) mantención de infraestructuras de riego comunitarias; (2) monitoreo ciudadano de caudales de ríos y niveles freáticos (capacitando a vecinos en uso de instrumentos simples y reporte a DGA), detectando extracciones ilegales o sequías incipientes; (3) reforestación participativa de bosques ribereños. Estas acciones refuerzan la cohesión social y generan alertas tempranas ante eventos extremos.
- **Programas de restauración participativa e inclusión laboral:** Incorporación de mano de obra local (desempleados, jóvenes, mujeres rurales) en viveros comunitarios, brigadas de plantación y mantenimiento de infraestructuras verdes. Se espera generar empleo verde equivalente a 20-40 jornadas/ha durante la fase de implementación (3-5 años). Esto asegura apropiación comunitaria de las soluciones y provee ingresos en periodos críticos de sequía.
- **Financiamiento climático y pagos por servicios ecosistémicos (PSE):** Exploración de instrumentos como créditos verdes CORFO, fondos de adaptación (FNDR regional), bonos de carbono (bajo estándares ISO 14067) y esquemas de PSE que recompensen servicios hídricos, forestales y de biodiversidad provistos por predios que implementen SbN. Actualmente, estos mecanismos están infrautilizados en municipios rurales de la región (CDP-EBP, 2023), por lo que su activación podría complementar el financiamiento de la propuesta.

Alcance espacial: Toda la comuna de Petorca, con implementación gradual focalizada en sectores prioritarios durante las fases piloto.

En la tabla 22, se presenta una síntesis integradora de las propuestas SbN analizadas en este apartado, organizadas según su tipo de intervención, los beneficios esperados en los ejes estratégicos del TFG (seguridad hídrica, biodiversidad, resiliencia climática y transición productiva), los actores involucrados en su implementación y los ODS a los que contribuyen, en ella, podemos visualizar la complementariedad entre las acciones, así como su potencial articulación territorial para avanzar hacia un modelo de gestión ambiental más justo, resiliente y ecológicamente coherente con los desafíos de Petorca.

Tabla 22 Propuestas SbN y ODS asociados en Petorca.

Tipo de Intervención SbN	Beneficios Esperados (ejes clave)	Actores Clave Involucrados	ODS Asociado
Restauración ecológica y conservación <i>(Reforestación nativa, recuperación de cauces)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Seguridad Hídrica: Aumenta la infiltración y caudales base a largo plazo (MMA, 2022). • Biodiversidad: Mejora la conectividad y hábitat de especies endémicas (Cohen-Shacham et al., 2016). • Clima: Actúa como sumidero de carbono y barrera ante eventos extremos (IPCC, 2022). • Producción: Habilita apicultura y recolección sustentable (Katariya et al., 2025). 	<ul style="list-style-type: none"> • MMA y CONAF (apoyo técnico/financiero). • Comunidades locales (viveros y cuidado). • Municipios (ordenanzas ambientales). • Propietarios privados (acuerdos de conservación). 	ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres. ODS 13: Acción por el clima.
Infraestructura verde <i>(Terrazas, zanjas, humedales depuradores)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Agua: Maximiza la captura de lluvias y permite el reúso de aguas grises (PUCV, 2023). • Calidad: Filtros naturales retienen sedimentos y contaminantes. • Resiliencia: Reduce riesgos de aluviones y sequía agrícola (Centro Ceres, 2024). 	<ul style="list-style-type: none"> • Centro CERES y PUCV (investigación/pilotos). • Agricultores (implementación predial). • Gobierno Regional y MOP (financiamiento). 	ODS 6: Agua limpia y saneamiento. ODS 9: Industria, innovación e infraestructura. ODS 11: Ciudades sostenibles.
Transición agroecológica <i>(Agricultura regenerativa, agroforestería)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Suelo: Recupera fertilidad y capacidad de "esponja" hídrica (FAO, 2014). • Economía: Reduce costos de insumos y diversifica la matriz productiva. • Adaptación: Cultivos más resilientes a la escasez hídrica (Portal Agro Chile, 2024). 	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeños productores y APRs. • INDAP y CORFO (fomento productivo). • PTI Hídrico de Petorca (articulación). 	ODS 2: Hambre cero. ODS 12: Producción y consumo responsables.
Gestión hídrica comunitaria <i>(Gobernanza, mesas de agua, mingas)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Equidad: Acceso básico garantizado y reparto justo del agua (FAO, 2021). • Social: Reduce conflictos y fortalece el tejido social (mingas) (Diario La Quinta, 2023). • Alerta: Monitoreo local para respuestas rápidas ante crisis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Asociaciones de APR y Juntas de Vigilancia. • Organizaciones ciudadanas (ej. MODATIMA). • DGA y DOH (marco legal y técnico). 	ODS 6: Agua limpia y saneamiento. ODS 16: Paz, justicia e instituciones sólidas.

*Fuente: Elaboración propia.

5.3.- Diseño de la Intervención: Setos Multifuncionales en Sistemas Agrícolas Intensivos.

Si bien las SbN se pueden aplicar en todo el territorio de Petorca, la formulación de una propuesta concreta requiere focalizar la intervención en el sistema productivo más crítico: la agricultura intensiva de frutales de exportación. Por ello, la propuesta se concentra operativamente en la implementación de setos multifuncionales (o conjuntos multifuncionales) dentro de estos sistemas, como herramienta central para restaurar la resiliencia ecológica, hídrica y productiva de Petorca. Esta elección se justifica por su versatilidad, bajo costo relativo, capacidad de generar múltiples servicios ecosistémicos simultáneamente, y viabilidad demostrada en contextos mediterráneos semiáridos. Los setos multifuncionales transforman los actuales monocultivos en paisajes heterogéneos y eficientes, mejorando la funcionalidad agroecosistémica. Asimismo, su manejo mediante gobernanza colaborativa (comunidades locales, cooperativas agrícolas, empresas frutícolas) promueve el reparto equitativo de beneficios y la legitimidad social del paisaje productivo (Cohen-Shacham et al., 2016; FAO, 2021), y abre oportunidades para financiamiento climático y pagos por servicios ecosistémicos a nivel local (CDP-EBP, 2023; Pagiola, 2020).

5.3.1.- Fundamentación y diseño ecológico de la intervención.

Definición operativa: Los setos multifuncionales son franjas lineales de vegetación arbórea y arbustiva ubicadas entre hileras de cultivo, en bordes de caminos agrícolas o en límites de predios. En Petorca, su diseño se estructura en tres estratos funcionales para maximizar la eficiencia hídrica, la regulación microclimática y la biodiversidad, conforme a lineamientos de restauración ecológica (Cohen-Shacham et al., 2016; Gann et al., 2019) y de uso eficiente del agua en agricultura (FAO, 2014):

- **Estrato bajo (0,5-1,5 m):** Especies: Colliguay (*Colliguaja odorifera*), Trevoa (*Trevoa trinervis*), Tuna (*Opuntia ficus-indica*). Función: Retención de suelo en cercanías del tronco, estabilización mecánica de laderas bajas y amortiguación del viento a nivel del cultivo. Beneficios/productos: Control de erosión eólica/hídrica; forraje de emergencia (nopál) para ganado en sequía.
- **Estrato medio (2-4 m):** Especies: Granado (*Punica granatum*), Higuera (*Ficus carica*), Quillay joven (*Quillaja saponaria*). Función: Sombra parcial para cultivos adyacentes, hábitat para polinizadores y producción frutal complementaria. Beneficios/productos: Fruta para autoconsumo o procesamiento (mermeladas, deshidratados); flores melíferas para abejas nativas que mejoran la polinización.
- **Estrato alto (5 -8 m):** Especies: Quillay adulto (*Quillaja saponaria*), Litre (*Lithraea caustica*), Molle (*Schinus molle*), Escallonia (*Escallonia angustifolia*). Función: Cortina rompevientos estructural

y control de erosión eólica; captura de carbono en biomasa aérea. Beneficios/productos: Madera (leña), biomasa para compost y secuestro de carbono (fijación de CO₂ en troncos y raíces).

La integración de frutales xerófitos (tuna, granado, higuera) aporta alta rusticidad y bajo requerimiento hídrico, generando retornos económicos directos que refuerzan la función ecológica de la barrera vegetal (FAO, 2014; Portal Agro Chile, 2024). En suma, el seto multifuncional actúa simultáneamente como infraestructura verde (mejora suelos, retiene agua, conecta hábitats) y como infraestructura productiva (provee frutos, forraje, insumos apícolas), alineando objetivos ecológicos y económicos.

5.3.2.- Beneficios ecosistémicos y productivos.

5.3.2.1. Ahorro hídrico y reducción de evapotranspiración.

Los setos funcionan como cortinas rompeviento vivas. Estudios en clima mediterráneo indican que estas estructuras pueden disminuir la velocidad del viento dentro de los huertos en un 20-60%, reduciendo la evapotranspiración del cultivo principal en un 10-30%. En Petorca, esto se traduce en mayor eficiencia de riego y menor estrés térmico para los frutales, aspectos fundamentales bajo escasez extrema de agua.

Cuantificación preliminar: La sustitución de 1 ha de palto (HH azul ajustada $\approx 2.430 \text{ m}^3/\text{ton}$) por un sistema agroforestal con setos podría reducir la demanda de riego en 60-70%, ahorrando $\sim 1620\text{-}1700 \text{ m}^3/\text{ha}\cdot\text{año}$. En un piloto de 500 ha restauradas con setos + reconversión productiva, el ahorro acumulado sería del orden de $810.000\text{-}850.500 \text{ m}^3/\text{año}$, equivalente a aportar $\sim 12\text{-}15 \text{ L/s}$ al caudal base o abastecer de agua potable estable a 8.000-12.000 personas.

5.3.2.2. Mayor infiltración y mejora de la estructura del suelo.

La presencia de raíces profundas (especialmente de quillay y litre) y la acumulación de hojarasca (de higuera, granado) mejoran la estructura edáfica y contribuyen a aumentar el carbono orgánico en el suelo, clave para la mitigación climática. Se ha documentado un incremento de la infiltración del 20-50% en sistemas agroforestales con setos, gracias a la apertura de macroporos y la reducción de la escorrentía superficial (Udawatta & Gantzer, 2022). El mantillo orgánico generado protege el suelo de la desecación y aumenta su capacidad de retención hídrica local (Cohen-Shacham et al., 2016; Gann et al., 2019).

5.3.2.3. Control de erosión y estabilización del terreno

La infraestructura verde en zonas semiáridas reduce significativamente la degradación del suelo (Centro Ceres, 2024; MMA, 2023). La presencia del seto disminuye la erosión mediante:

- **Control eólico:** Reducción de pérdida de suelo por viento (20-40%).

- **Control hídrico:** Intercepción foliar y estabilización mecánica por raíces, reduciendo la erosión hasta un 50% en pendientes agrícolas (FAO, 2014; Torralba et al., 2016).

En Petorca, donde ~39% de los paltos se ubican en laderas >30% con erosiones ~650 veces superiores a las de suelo bajo vegetación nativa (Youlton, 2005), los setos serán cruciales para frenar la degradación en curso del terreno.

5.3.2.4. Aumento de biodiversidad funcional

Los setos mixtos (nativas + frutales) proporcionan hábitat permanente y refugio para entomofauna benéfica (polinizadores, controladores biológicos) y crean corredores para la movilidad de aves y reptiles. La floración escalonada de tuna, granado e higuera incrementa la disponibilidad de recursos (néctar, polen) para polinizadores a lo largo del año. Esto fortalece la salud del cultivo principal mediante control biológico natural, reduciendo la dependencia de pesticidas en un ~30-50% (IPBES, 2019; Portal Agro Chile, 2024).

5.3.2.5.- Conectividad ecológica del paisaje

En un territorio fragmentado por monocultivos, los setos permiten reconectar rodales aislados de vegetación nativa (matorral y bosque esclerófilo). Los frutales xerófitos, al alcanzar altura media y copa densa, funcionan como nodos de conectividad que facilitan la dispersión de semillas y la movilidad de fauna a escala de cuenca. De este modo, la matriz productiva incorpora corredores ecológicos que mitigan la fragmentación del paisaje y aumentan la resiliencia ecosistémica frente al cambio climático.

5.3.3. Beneficios socioeconómicos y de gobernanza

5.3.3.1. Producción complementaria y diversificación.

La integración productiva ofrece una alternativa económica resiliente ante el Cambio Climático (FAO, 2021; Portal Agro Chile, 2024):

- **Alimentación:** Frutos frescos y procesados (mermeladas, deshidratados, jugos).
- **Ganadería:** Tuna como forraje estratégico en periodos de sequía.
- **Otros recursos:** Insumos derivados (hojas, semillas) para mercados locales; turismo rural enfocado en agrobiodiversidad; productos apícolas gracias a la flora melífera de los setos.

Esta diversificación reduce la vulnerabilidad económica de pequeños productores, al generar ingresos adicionales y valorizar servicios ecosistémicos (polinización, fertilidad de suelos) que antes no se contabilizaban.

5.3.3.2. Valor agregado y certificaciones para grandes productores.

La implementación de setos facilita la obtención de estándares internacionales de sustentabilidad, mejorando el acceso a mercados de exportación y la rentabilidad predial (Cohen-Shacham et al., 2016; MMA, 2023):

- **Global G.A.P.:** Cumplimiento de criterios de biodiversidad en el predio (setos como hábitat, barrera natural).
- **Rainforest Alliance:** Acreditación de prácticas de agricultura sostenible (reducción de agroquímicos, conservación de suelos).
- **Certificaciones climáticas:** Posibilidad de certificar huella de carbono reducida o de generar créditos de carbono por captura en biomasa (ej. bajo ISO 14067, estándar Verified Carbon Standard).

Estos sellos aumentan la competitividad de los productos petorquinos en mercados premium y pueden traducirse en mejores precios y estabilidad comercial a largo plazo.

5.3.3.3. Gobernanza colaborativa y legitimidad social

El manejo conjunto entre comunidades, pequeños productores y empresas fomenta la corresponsabilidad en el cuidado del territorio. Esto mejora la aceptación social de la actividad agrícola, al vincularla con la restauración ambiental y beneficios comunitarios, alineándose con procesos como el PTI Hídrico Petorca. Se cumplen así principios SbN de gobernanza inclusiva (Cohen-Shacham et al., 2016; FAO, 2021). Además, los setos multifuncionales pueden articularse con mecanismos de financiamiento climático (fondos de adaptación, bonos verdes) y pagos por servicios ecosistémicos, herramientas actualmente poco utilizadas a nivel municipal rural (CDP-EBP, 2023; Pagiola, 2020). En suma, la intervención propuesta no solo es técnicamente viable y económicamente rentable, sino también socialmente legítima, al construirse con participación local y distribuir beneficios de manera equitativa.

Estas intervenciones se alinean con transformaciones necesarias para sistemas alimentarios resilientes (FAO, 2025) y con las metas nacionales de mitigación basadas en captura de carbono (Wang et al., 2025). De manera específica, la Tabla 23 sistematiza los elementos estructurales del diseño propuesto para la agricultura intensiva de Petorca, identificando las especies clave por estrato, sus objetivos funcionales, los beneficios ecosistémicos y productivos asociados, los actores involucrados y su vinculación directa con las metas globales de sostenibilidad.

Tabla 23. Componentes del seto multifuncional y sus contribuciones ecológicas y sociales.

Elemento / Estrato	Especies Clave	Objetivo Principal	Beneficios Asociados	Actores Involucrados	Vinculación ODS
Estrato Bajo	Tunas, colliguay, trevoa.	Retención de suelo	Aumento de infiltración; menor erosión hídrica	Comunidades locales	ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres
Estrato Medio	Granados, higueras	Producción + polinización	Diversificación económica y seguridad alimentaria	Pequeños agricultores	ODS 12: Producción y consumo responsables
Estrato Alto	Quillay, litre, molle	Rompeviento estructural	Menor evapotranspiración, ahorro de agua	Grandes productores	ODS 6: Agua limpia y saneamiento
Gobernanza	Gestión mixta	Cohesión social	Legitimidad territorial y reducción de conflictos	Cooperativas, APR y Empresas	ODS 17: Alianzas para lograr objetivos
Servicios Ecosistémicos	Flora melífera y nativa	Resiliencia productiva	Polinización, control biológico, menor uso de agroquímicos	Predios agrícolas	ODS 13: Acción por el clima

*Fuente: Elaboración propia.

5.4.- Justificación técnica y socioambiental de la propuesta.

La propuesta de intervención SbN se justifica como una estrategia esencial para revertir la degradación ecológica, la sobreexplotación hídrica y los desequilibrios socio-productivos diagnosticados en Petorca. Su diseño está alineado con criterios de eficiencia hídrica, conectividad ecológica, gobernanza territorial y reducción de impactos, en plena coherencia con los lineamientos internacionales de SbN (Cohen-Shacham et al., 2016; FAO, 2021) y con las estrategias nacionales de biodiversidad y adaptación climática (GORE Valparaíso, 2020; MMA, 2013).

Rigor metodológico: La validez técnica de la propuesta reside en la rigurosa comparabilidad metodológica establecida respecto de la línea base ambiental. Los indicadores de HH y HC asociados a las SbN se calcularon usando los mismos factores y criterios empleados para el escenario agroproductivo intensivo, garantizando que la comparación entre el escenario actual y el escenario SbN sea técnicamente válida. En concreto, se utilizaron factores de emisión del IPCC (AR5) y factores nacionales de GEI (MMA, 2024), manteniendo la equivalencia en CO₂e bajo el mismo horizonte temporal. Asimismo, se aplicaron los coeficientes hídricos WaterStat de Water Footprint Network (WFN, 2023) con un factor de ajuste local $k = 1,35$ (coherente con Mekonnen & Hoekstra, 2011). Se mantuvo igual unidad funcional (por tonelada de producto exportado) y el mismo alcance cradle-to-farm-gate para ambos escenarios, abarcando todas las emisiones e impactos hídricos desde la producción de insumos hasta que el producto sale del predio. Este límite del sistema (excluyendo transporte y etapas posteriores) sigue las recomendaciones de WFN

(Mekonnen & Hoekstra, 2011) y de la norma ISO 14067. El uso de un alcance uniforme asegura consistencia al evaluar las variaciones en HH y HC derivadas de implementar SbN.

Fundamento científico: La incorporación de SbN (restauración ecológica, reforestación nativa, manejo agroecológico, corredores) se basa en sólida evidencia científica (Griscom et al., 2017; Marquet et al., 2022). Estas acciones incrementan la infiltración, mejoran la retención hídrica, reducen la erosión y recuperan la biodiversidad funcional, disminuyendo directamente la presión sobre el recurso hídrico, crítico en territorios semiáridos con altas HH ajustadas (WFN, 2023).

Justificación socioambiental: La propuesta aborda directamente problemáticas de desigualdad ambiental, fragmentación del paisaje y gobernanza débil identificadas en el diagnóstico (cap. 4.3). Al fortalecer la cohesión comunitaria y la legitimidad territorial de la gestión del agua, las SbN seleccionadas (setos multifuncionales, restauración ribereña, prácticas agroecológicas) promueven una gobernanza colaborativa que incrementa la corresponsabilidad entre comunidades, APR y productores. Esto aumenta la aceptación social de las medidas y reduce los conflictos socioambientales en cuencas de alta presión extractiva como Petorca (CDP-EBP, 2023; Pagiola, 2020).

Alineación con políticas públicas: La propuesta es coherente con los compromisos climáticos nacionales (Contribución Determinada a Nivel Nacional, NDC), el Plan de Adaptación del sector silvoagropecuario (MMA, 2013) y la Estrategia Regional de Desarrollo de Valparaíso (GORE Valpo, 2020). También se vincula a los ODS 6 (agua limpia), 12 (consumo responsable) y 13 (acción climática), potenciando metas como la 6.4 (eficiencia hídrica) y 15.3 (degradación de suelos).

Beneficios económicos: Las SbN diversifican ingresos, reducen costos asociados a erosión y pérdida de suelo, y generan oportunidades de mercado (ej. certificaciones verdes, productos agroecológicos). Se identifican beneficios complementarios como el control biológico de plagas, la reducción de insumos sintéticos y la menor dependencia hídrica, alineándose con modelos productivos más resilientes y de menor intensidad de carbono (Wang et al., 2025). En suma, la propuesta SbN se sostiene en una justificación multifacética y robusta: técnica (comparabilidad metodológica), ecológica (evidencia de beneficios ecosistémicos), socioambiental (gobernanza y cohesión social) y política (coherencia con NDC y planes regionales).

5.5.- Evaluación del potencial de la propuesta.

La evaluación del potencial de la propuesta SbN determina la capacidad real de estas intervenciones para mejorar las condiciones ecológicas, hídricas, climáticas, socioeconómicas y de gobernanza del territorio de Petorca. Se definió un conjunto de indicadores multidimensionales que permiten comparar consistentemente el desempeño del escenario SbN frente al escenario agroexportador intensivo, usando

la línea base del diagnóstico. Estudios muestran que el éxito de las SbN depende de la adaptación a condiciones locales, más que de aplicar modelos homogéneos. Para asegurar la comparabilidad, los indicadores de HH y HC se calcularon con los mismos factores de emisión (IPCC, 2019; MMA, 2024) y coeficientes hidrológicos (WaterStat-WFN, 2023, $k = 1,35$) que en la línea base, manteniendo el alcance cradle-to-farm-gate. Complementariamente, se siguieron lineamientos de los estándares ISO 14046 (HH) e ISO 14064/14067 (emisiones GEI) para asegurar trazabilidad, transparencia y robustez técnica en los resultados. Análisis recientes enfatizan que la evaluación del potencial SbN no debe ser estática, sino considerar marcos dinámicos y resilientes al clima, integrando justicia espacial, riesgos sistémicos, gobernanza inclusiva, estandarización conceptual e incorporación de saberes ancestrales para garantizar eficacia y legitimidad (Nazir et al., 2025; Recalde et al., 2024). Esta evidencia refuerza la pertinencia de la propuesta SbN para Petorca, a la vez que advierte incorporar reflexión ética sobre posibles consecuencias no intencionadas (Olivadese, 2025).

5.5.1. Evaluación del potencial ecológico.

Los indicadores ecológicos definidos anticipan mejoras significativas en las funciones ecosistémicas del territorio. La propuesta incorpora acciones de restauración de laderas, reforestación nativa y corredores biológicos, lo que se traduce en:

- a) Incremento de cobertura vegetal nativa:** La reforestación con quillay, litre, peumo, boldo, colliguay y otras especies esclerófilas favorece la recuperación del suelo, la regulación hídrica y la provisión de servicios ecosistémicos clave. Se estima restaurar ~500 ha ribereñas y de ladera, equivalente a ~2-3% de la cobertura nativa perdida en décadas recientes, generando una ganancia ecológica tangible.
- b) Mejora de la conectividad ecológica:** La creación de corredores biológicos reduce la fragmentación del paisaje y fortalece el flujo de especies y procesos ecológicos, aumentando la conectividad funcional en al menos 20-30% (según índice de fragmentación, ver Tabla 26 más abajo).
- c) Aumento de la infiltración y retención hídrica:** Las SbN propuestas, infraestructura verde, restauración ribereña, manejo de pendientes, mejoran la recarga de acuíferos y la estabilidad de caudales base. Se espera un incremento de 100-150 mm/año en la infiltración en zonas intervenidas, traducible en mayores niveles freáticos y caudales secos más estables.
- d) Recuperación de biodiversidad funcional:** La intervención favorece especies indicadoras, polinizadores, avifauna y microorganismos del suelo, contribuyendo a la resiliencia ecosistémica local. Se proyecta la reaparición de 5-10 especies nativas clave por zona intervenida (polinizadores, reptiles, aves), mejorando las interacciones bióticas.

Estudios recientes amplían estos puntos al demostrar que ciertas especies nativas poseen alto potencial de fitorremediación. Por ejemplo, *Juncus effusus* L. puede acumular Zn sin efectos tóxicos, reforzando su idoneidad en SbN para estabilización de contaminantes. Sin embargo, investigaciones de largo plazo advierten que algunas SbN (biozanjas) pueden acumular metales tras 10-20 años, por lo que se requiere monitoreo extendido y planes de mantenimiento. En conjunto, las mejoras ecológicas implican una mayor resiliencia ecosistémica ante eventos climáticos extremos y una reducción de la vulnerabilidad socioambiental de la cuenca. Por ejemplo, estudios de dinámica de sedimentos muestran que las SbN pueden disminuir la movilización de material particulado y mejorar la calidad del agua en embalses y cauces durante crecidas (Lee et al., 2024). No obstante, experiencias europeas recientes indican que no todas las SbN son igualmente efectivas y que su desempeño depende fuertemente del contexto hidrológico, social y de gobernanza (Santos, 2025).

Limitaciones ecológicas: La materialización de estos beneficios exige validar en terreno, mediante pilotos de 2-3 años, las proyecciones teóricas. La megasequía vigente podría limitar el prendimiento inicial de reforestaciones, y será necesario asegurar mantenimiento continuo (≥ 5 -10 años) de las plantaciones para garantizar su permanencia. En resumen, el potencial ecológico es alto, pero depende de un acompañamiento técnico prolongado (riego asistido inicial, control de herbívoros, etc.) para concretarse plenamente

5.5.2. Evaluación del potencial social

La propuesta SbN presenta beneficios sociales relevantes, evaluados mediante indicadores de participación, gobernanza, acceso hídrico y cohesión territorial:

a) Mayor disponibilidad hídrica comunitaria: La mejora en infiltración y recarga sugiere mayor estabilidad hídrica para comunidades rurales vulnerables, contribuyendo a reducir inequidades en acceso al agua (ODS 6.1.1). Por ejemplo, la proporción de población abastecida vía camiones aljibe (hoy $\sim 20\%$) podría disminuir a ~ 5 -8% en áreas con infiltración incrementada, beneficiando directamente a ~ 1.500 -2.000 personas.

b) Articulación entre actores locales: La propuesta fortalece la colaboración entre agricultores, organizaciones comunitarias y APR mediante mesas de agua y acuerdos de manejo participativos. Esto rompe el aislamiento sectorial y crea redes de apoyo mutuo en la gestión hídrica.

c) Gobernanza territorial fortalecida: La legitimidad aumenta cuando las intervenciones responden al diagnóstico local e integran necesidades ecológicas y productivas. La incorporación de múltiples actores en la toma de decisiones (gobernanza inclusiva) eleva la confianza y reduce los conflictos, construyendo una gestión del agua más democrática.

d) Cohesión social y nuevas oportunidades: Las SbN habilitan educación ambiental (viveros comunitarios, parcelas demostrativas), ecoturismo (rutas de agrobiodiversidad, observación de aves en setos), diversificación productiva (emprendimientos en apicultura, productos locales) y participación intersectorial, lo que dinamiza el tejido socioeconómico local.

La bibliografía reciente confirma que las SbN exitosas requieren gobernanza inclusiva, justicia espacial y co-creación con la comunidad (Nazir et al., 2025). Además, subraya la importancia de integrar saberes ancestrales como parte de soluciones culturalmente pertinentes y sostenibles (Recalde et al., 2024). En territorios de montaña, como los Andes, la incorporación de prácticas tradicionales de manejo del agua ha demostrado mejorar la funcionalidad y aceptación de SbN (Beccar et al., 2002; Recalde et al., 2024). Investigaciones en sistemas agrícolas tropicales muestran que expandir infraestructura hídrica gris complementada con SbN mejora la resiliencia ante sequías prolongadas (Nguyen et al., 2024). Asimismo, avances en tratamiento de aguas residuales confirman la eficacia de SbN (humedales, biofiltros) para mejorar la calidad del agua en contextos rurales y urbanos (Choudhary & Ray, 2024). Todo lo anterior vincula directamente las SbN con la seguridad hídrica territorial, reforzando su aplicabilidad conceptual y operativa (da Costa et al., 2025).

Limitaciones sociales: La conflictividad histórica en Petorca, por ejemplo, la protagonizada por movimientos como MODATIMA, podría dificultar la plena inclusión de los grandes productores en instancias colaborativas, dado el clima de desconfianza existente. Además, las asimetrías de poder entre actores (pequeños vs. grandes usuarios de agua) son estructurales y no se eliminan solo con mesas participativas. Será necesario invertir en capacitación en gobernanza y mediación de conflictos para equilibrar la participación y evitar cooptación de los procesos participativos.

5.5.3. Evaluación del potencial económico

Desde metodologías de huella ecológica, biocapacidad y valoración de servicios ecosistémicos (Doménech, 2006; Machín, 2020), la propuesta presenta impactos económicos netos positivos:

a) Reducción de costos ambientales y productivos: Al disminuir la erosión y pérdida de suelo, bajar el uso de fertilizantes y pesticidas, y mejorar la humedad edáfica, las SbN reducen costos de remediación y aumentan la eficiencia productiva (menor gasto en insumos).

b) Diversificación productiva: Las SbN promueven sistemas agroecológicos y agroforestales de menor demanda hídrica y mayor resiliencia climática, reduciendo la dependencia de un único cultivo (palto) y repartiendo el riesgo económico en varios rubros.

c) Acceso a mercados exigentes: La adopción de certificaciones hídricas y de carbono fortalece la

competitividad de los productores locales en mercados internacionales cada vez más exigentes en sustentabilidad (ej. supermercados europeos). Esto puede traducirse en primas de precio o en mantenimiento de cuotas de mercado.

d) Generación de empleo verde: Las actividades de reforestación, monitoreo ambiental, manejo de cuencas e infraestructura verde generan empleos locales durante la implementación y operación de las SbN. Se estima la creación de 20-40 empleos directos temporales (viveros, cuadrillas) y 5-10 empleos permanentes (guardaparques, técnicos) asociados a la intervención.

Viabilidad financiera: El costo de implementación promedio se estima en unos USD 1.200/ha (rango USD 800-1.600 según topografía, distancia a viveros, costos locales) para establecer setos multifuncionales e infraestructura verde en predios. Para una escala piloto de 500 ha, la inversión requerida rondaría USD ~600.000; escalar a ~1.200 ha demandaría ~USD 1,44 millones. Las posibles fuentes de financiamiento incluyen: Fondo Nacional de Desarrollo Regional -FNDR (cubrir ~15% = USD 90.000-216.000), Acuerdos de Producción Limpia- APL (~30% = USD 180.000-432.000) y créditos verdes CORFO (~55% = USD 330.000-792.000). Adicionalmente, la venta de bonos de carbono bajo el Artículo 6 del Acuerdo de París podría generar ingresos marginales crecientes (~USD 50-200/ha en 10 años, según precios de carbono proyectados).

La Tabla 24 detalla los supuestos económicos utilizados para evaluar la rentabilidad del caso de referencia “seto productivo de tuna (*Opuntia ficus-indica*)”, incluyendo precios, costos variables, inversión inicial y parámetros financieros.

Tabla 24. Supuestos económicos para el caso de referencia “seto productivo de tuna”

Categoría	Variable	Valor base 2025	Rango	Unidad	Fuente resumida
Precios de venta	Precio productor por kg	\$1.000	\$800- \$1.200	CLP/kg	ODEPA; BuenCampo; Tottus (2024, 2025).
Precios de venta	Precio por caja 18 kg	\$18.000	\$14.400- \$21.600	CLP/caja	Cálculo propio
Insumos agrícolas	Fertilizantes N (urea, nitrato, NPK)	\$714- \$1.206	±10-15%	CLP/kg	Copeval (2024).
Biocontrol/OPEX “costos operacionales anuales”	Biocontroladores y fitosanitarios	\$400.000	\$300.000- \$500.000	CLP/ha/año	ControlBest (2024)
Biocontrol/OPEX	Mantenimiento riego	\$150.000	\$100.000- \$200.000	CLP/ha/año	Estimación técnica (2024)

Mano de obra	Jornal agrícola general (8 h)	\$35.000	\$30.000- \$40.000	CLP/jornal	DT; INE (2024)
Mano de obra	Faenas especializadas / servicios	\$38.000- \$40.000	\$30.000- \$50.000	CLP/jornal	Estimación técnica (2024, 2025)
Mano de obra	Hora técnica ing. agrónomo	\$25.000	\$20.000- \$30.000	CLP/h	Estimación salarial (2024, 2025)
Servicios y logística	Packing, transporte y embalaje	\$294	\$260- \$340	CLP/kg	Estimación técnica y cálculo propio (2024)
Infraestructura (CAPEX) "inversión inicial"	Riego tecnificado	\$18.000.000	\$15-20 M	CLP/ha	INDAP (2023, 2024)
Infraestructura (CAPEX)	Caseta, maquinaria y herramientas	\$15.000.000	\$12-19 M	CLP	Estimación técnica (2024)
Parámetros financieros	Tasa de descuento	8-12%	—	% anual	Estimación financiera agrícola (Chile)
Parámetros financieros	Inflación proyectada	3-3,5%	—	% anual	Banco Central de Chile, IPoM (2024)
Costos fijos	Insumos fijos anuales	\$1.800.000	—	CLP/ha/año	Estimación técnica (2024)

Fuente: Elaboración propia a partir de boletines de precios mayoristas (ODEPA, 2025), catálogos de insumos (Copeval, 2024; ControlBest, 2024) y estimaciones técnicas locales.

Los análisis económicos actuales refuerzan que las SbN pueden ser rentables cuando se integran en modelos de adaptación, diversificación y mitigación (Reyes et al., 2025; Zarei & Shahab, 2025). De hecho, la tuna (*Opuntia*) especie de baja demanda hídrica, muestra rentabilidad positiva con precios ~\$1.000/kg y costos variables ~\$294/kg, lo que sugiere márgenes comerciales favorables incluso bajo condiciones áridas. En consecuencia, la propuesta SbN evaluada es viable económicamente como inversión y replicable en contextos de vulnerabilidad hídrica, siempre que se combinen financiamiento adecuado y articulación de mercados para nuevos productos.

Limitaciones económicas: Los precios de cultivos alternativos (p. ej. frutos de tuna, miel) pueden ser volátiles y los mercados locales para productos no tradicionales aún son incipientes. Esto exige conformar asociatividad entre productores para alcanzar volumen y calidad de exportación, así como apoyo en marketing y desarrollo de productos. Además, muchos beneficios económicos de las SbN (p. ej. ahorro por

menor erosión) se concretan en el largo plazo, por lo que se requiere una visión estratégica y mecanismos de financiamiento puente para los agricultores durante la transición.

5.5.4. Validación de la propuesta según Estándares Globales de la IUCN (2020).

La propuesta fue evaluada frente a los ocho criterios del Estándar Global de SbN de la IUCN (2020), considerando las prioridades territoriales y el diagnóstico socioambiental de la cuenca de Petorca. La propuesta cumple coherentemente con todos los criterios, demostrando pertinencia territorial, solidez técnica, multifuncionalidad y viabilidad de implementación, tal como resume la Tabla 25.

Tabla 25. Validación de la propuesta SbN frente a los criterios IUCN.

Criterio IUCN	Validación para la propuesta SbN
1. Identificación del desafío socioambiental	El diagnóstico del TFG identifica con claridad la escasez hídrica, degradación del suelo, fragmentación ecológica y vulnerabilidad socioeconómica como problemas centrales (MMA, 2022; Montero y del Campo, 2024).
2. Objetivos y resultados esperados	La propuesta define beneficios ecológicos (infiltración, biodiversidad), sociales (acceso al agua, gobernanza) y económicos (diversificación), coherentes con el OE4.
3. Diseño basado en evidencia	Se sustenta en literatura científica, guías nacionales SbN, SIG, análisis espacial y estudios de casos comparables (SER, 2019; MMA, 2024).
4. Maximización de beneficios y reducción de riesgos	Se consideran co-beneficios múltiples y se minimizan riesgos mediante restauración nativa, manejo de laderas y mecanismos participativos.
5. Participación inclusiva	La propuesta incorpora actores locales, organizaciones sociales y agricultores como agentes claves para la implementación.
6. Gestión adaptativa	Se establecen indicadores que permiten ajustar las intervenciones según resultados de monitoreo (MMA, 2013).
7. Escalabilidad y replicabilidad	Las SbN propuestas pueden expandirse a otras cuencas semiáridas, dado su enfoque modular y basado en criterios generales de restauración.
8. Integración en políticas públicas	La propuesta se alinea con ODS, NDC de Chile, estrategias de SbN del MMA (2024) y lineamientos territoriales nacionales.

Conclusión: La propuesta cumple con los criterios SbN de IUCN, demostrando viabilidad técnica y coherencia territorial. Presenta potencial ecológico alto y social medio-alto; requiere un piloto de 2-3 años, monitoreo riguroso de indicadores y ajustes iterativos antes de su escalamiento regional.

5.5.5. Sistema integrado de indicadores para la evaluación del potencial SbN

Para operacionalizar el OE4 y evaluar integralmente el potencial de la propuesta, se construyó un sistema de indicadores ecológicos, sociales y económicos, con línea base territorial, metas proyectadas bajo la implementación de SbN, y su relación con el objetivo específico. Estos indicadores permiten estimar

cuantitativamente los efectos esperados y validan la coherencia de la propuesta en términos de sostenibilidad ambiental, social y económica.

5.5.5.1. Indicadores ecológicos.

La Tabla 26 presenta los indicadores ecológicos clave, con su descripción, valor de línea base estimado en Petorca, meta proyectada con la implementación de SbN, unidad de medida y relación con el OE4.

Tabla 26. Indicadores ecológicos asociados a la propuesta SbN (OE4).

Indicador ecológico	Descripción	Línea base estimada (Petorca)	Meta proyectada con SbN	Unidad	Relación OE
Cobertura vegetal nativa	Superficie de bosque esclerófilo y matorral nativo en estado funcional	32-34% cobertura degradada en zonas medias y altas (diagnóstico cartográfico)	Aumento de 10-15% en áreas prioritizadas de restauración	ha restauradas	OE4
Conectividad ecológica (Índice IF / fragmentación)	Nivel de continuidad funcional entre parches nativos	Fragmentación alta, corredores interrumpidos	Reducción del 20-30% del índice de fragmentación	índice IF	OE4
Infiltración y retención hídrica	Capacidad del suelo para retener e infiltrar agua	Alta escorrentía superficial y baja infiltración en laderas	Incremento del 15-25% en infiltración en microcuencas intervenidas	mm/año	OE4
Recarga de acuíferos (valor sustituto)	Aporte de agua infiltrada a napas subterráneas	Déficit hídrico anual crítico	8-15% aporte estimado en sectores restaurados	m ³ /año	OE4
Biodiversidad funcional	Presencia de especies indicadoras, polinizadores y fauna nativa	Disminución marcada en zonas agrícolas intensivas	Recuperación de 5-10 especies clave por zona intervenida	Nº de especies	OE4

Fuente: Elaboración propia a partir del diagnóstico territorial (Cap. 4) y los lineamientos metodológicos del OE4, siguiendo criterios de evaluación SbN del MMA (2013; 2022; 2024; 2025), SER (2019), IPBES (2019) e IUCN (2020).

5.5.5.2. Indicadores sociales.

La Tabla 27 resume los indicadores sociales definidos para la propuesta, con su línea base, meta con SbN, unidad y relación con el OE4.

Tabla 27. Indicadores sociales asociados a la propuesta SbN (OE4).

Indicador social	Descripción	Línea base estimada	Meta con SbN	Unidad	Relación OE
Acceso comunitario al agua	Estabilidad del suministro para comunidades rurales	Alta variabilidad estacional; APR con déficit	Aumento del 5-10% en caudal disponible en APR cercanas a zonas de infiltración	% aumento	OE4
Participación y gobernanza local	Presencia de actores en mesas territoriales del agua	Participación fragmentada	50-70% de actores relevantes involucrados	% participación	OE4
Número de actores beneficiados	Comunidades, agricultores y APR impactados por SbN	Bajo nivel de beneficios distribuidos	> 500 personas beneficiadas en comunas priorizadas	Nº personas	OE4
Fortalecimiento organizacional	Acuerdos de manejo, comités, mesas de agua	Escasos y poco formales	3-5 acuerdos formales de gobernanza	Nº acuerdos	OE4

Fuente: Elaboración propia a partir del diagnóstico territorial (Cap. 4) y criterios de evaluación social/gobernanza de IUCN (2020) y guías SbN del MMA (2013; 2022; 2024; 2025).

5.5.5.3. Indicadores económicos.

La Tabla 28 muestra los indicadores económicos clave, con línea base, meta con SbN, unidad y relación con OE4.

Tabla 28. Indicadores sociales asociados a la propuesta SbN (OE4).

Indicador económico	Descripción	Línea base	Meta con SbN	Unidad	Relación OE
Reducción de erosión y pérdida de suelo	Disminución de costos por erosión	Pérdidas crecientes en zonas de ladera	Reducción del 15-20% de pérdidas potenciales	% reducción	OE4
Diversificación productiva	Nuevas actividades económicas sostenibles	Matriz productiva altamente concentrada	2 o 3 actividades productivas nuevas	Nº actividades	OE4
Reducción del uso de insumos sintéticos	Fertilizantes y pesticidas	Agricultura intensiva altamente dependiente	Reducción del 10-15% en predios intervenidos	% reducción	OE4
Generación de empleo verde	Trabajo asociado a restauración, manejo y monitoreo	Muy bajo	20-40 empleos directos temporales; 5-10 permanentes	Nº empleos	OE4

Fuente: Elaboración propia a partir del diagnóstico territorial (Cap. 4) y lineamientos metodológicos del OE4, siguiendo criterios económicos de SER (2019), MMA (2022; 2024), IPBES (2019) y Wang et al. (2025).

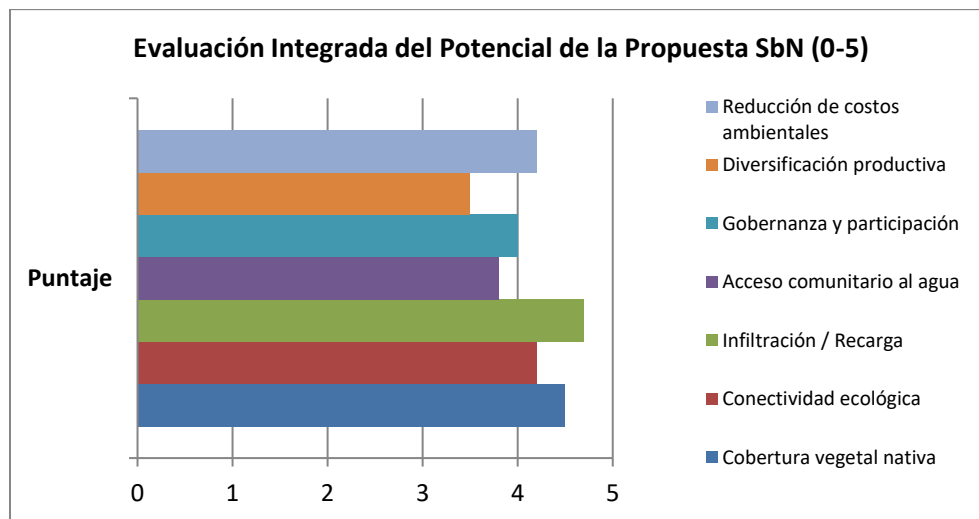
5.5.6. Síntesis integradora del rendimiento potencial de la propuesta SbN

La integración de los indicadores ecológicos, sociales y económicos mediante una escala de puntuación de 0 a 5 permite visualizar de forma sintética el desempeño global de la propuesta (ver Figura 14). Los resultados muestran que la dimensión ecológica alcanza los valores más altos, especialmente en infiltración/recarga hídrica, recuperación de cobertura vegetal nativa y mejora de conectividad ecológica, lo que refleja la solidez técnica y el alto potencial territorial de las intervenciones propuestas.

En el ámbito social, los indicadores de gobernanza, participación y acceso comunitario al agua evidencian un potencial significativo para fortalecer la cohesión territorial y la resiliencia local, dado que las SbN mejoran tanto la disponibilidad hídrica como los procesos organizativos y colaborativos.

En la dimensión económica, se observa un desempeño favorable, destacando la reducción de costos ambientales y la oportunidad de diversificación productiva, posicionando a las SbN como una propuesta con viabilidad de inversión en territorios vulnerables.

Figura 14.



***Nota.** Elaborado por Trabal A., 2025, con datos del OE4, siguiendo IUCN (2020) y MMA (2013; 2022; 2024).

5.5.7. Puntuación integrada y fundamentación técnica.

La Tabla 29 muestra la asignación de puntajes por dimensión, construida a partir del diagnóstico territorial, literatura técnica y lineamientos del MMA (2013; 2022; 2024) y SER (2019). El puntaje total por dimensión se calculó como el promedio simple de los indicadores asociados (cada uno representa un componente clave para evaluar la viabilidad de la propuesta).

Tabla 29. Puntajes integrados por dimensión para la evaluación del potencial de la propuesta SbN (OE4).

Dimensión	Indicador	Puntaje (0-5)	Fundamento técnico del puntaje	Fuente	Cálculo del Puntaje Total por Dimensión
Ecológica	Cobertura vegetal nativa	4.5	Restauración con especies nativas aumenta superficie funcional; evidencia robusta de mejora ecosistémica.	(MMA, 2022; SER, 2019). 5.2.1	Promedio dimensión ecológica: $(4.5 + 4.2 + 4.7) / 3 = 4.47 \approx 4.5$
Ecológica	Conectividad ecológica	4.2	Reducción de fragmentación por corredores biológicos; mejora funcional del paisaje.	(MMA, 2013; IPBES, 2019). 5.2.1	
Ecológica	Infiltración / Recarga	4.7	Evidencia de gran aumento en infiltración y retención hídrica mediante SbN; área de mayor impacto potencial.	(Muñoz et al., 2020; MMA, 2024). 5.2.2	
Social	Acceso comunitario al agua	3.8	SbN mejora disponibilidad hídrica, pero depende de gobernanza y APR; mejora moderada-alta.	(MMA, 2013). 5.5	Promedio dimensión social: $(3.8 + 4.0) / 2 = 3.9$
Social	Gobernanza y participación	4.0	SbN fortalece articulación y acuerdos comunitarios; potencial alto según IUCN.	(IUCN, 2020; MMA, 2013). 5.3.3	
Económica	Diversificación productiva	3.5	Introduce nuevas actividades sostenibles, pero depende de adopción productiva gradual.	(Wang et al., 2025). 5.3.3.1	Promedio dimensión económica: $(3.5 + 4.2) / 2 = 3.85$
Económica	Reducción de costos ambientales	4.2	Restauración reduce erosión, uso de insumos y pérdidas; impacto económico sólido.	(SER, 2019; MMA, 2022). 5.3.3	

Fuente: Elaboración propia a partir del diagnóstico territorial (Cap. 4-5) y metodología OE4, siguiendo lineamientos SbN de IUCN (2020), guías MMA (2013; 2022; 2024) y criterios de restauración SER (2019), complementados con evidencia técnico-económica (Wang et al., 2025; IPBES, 2019).

La interpretación de estos puntajes permite operacionalizar la evaluación integrada de la propuesta SbN según exige el OE4 y los estándares IUCN (2020). Los resultados evidencian un desempeño sobresaliente en la dimensión ecológica (4,5 de 5), atribuible al alto potencial de mejora en infiltración, cobertura vegetal y conectividad. En la dimensión social se observa un rendimiento elevado (3,9 de 5), impulsado por avances en gobernanza y acceso comunitario al agua. Finalmente, la dimensión económica logra un desempeño sólido (3,85 de 5), asociado a la diversificación productiva y reducción de costos ambientales. En conjunto, el puntaje global obtenido (~4,1 de 5) evidencia que la propuesta es técnica y territorialmente robusta, con un balance favorable entre beneficios ecológicos, sociales y económicos. Esto respalda su pertinencia para avanzar hacia un modelo de desarrollo más resiliente e inclusivo en Petorca.

5.5.8.- Evaluación preliminar de la HH y HC de la propuesta SbN.

La evaluación del potencial de la propuesta incluye un análisis preliminar de su contribución a la reducción de la HH y la HC del sistema productivo local, siguiendo los lineamientos metodológicos del MMA (2013; 2022; 2024) y las recomendaciones de las directrices IPCC AR5-AR6 (IPCC, 2019; 2021). Asimismo, se utilizaron coeficientes de Water Footprint Network (WFN) para estimar tendencias de mejora hídrica (Mekonnen & Hoekstra, 2011), según la metodología definida en este TFG.

La propuesta SbN plantea intervenciones que impactan positivamente el ciclo hidrológico y el balance de carbono en Petorca, principalmente a través de la restauración de vegetación esclerófila, el aumento de la infiltración y retención hídrica, y la disminución en el uso de insumos sintéticos. Dado que el alcance de este estudio no contempla mediciones directas en terreno, se optó por una evaluación de potencial, basada en rangos porcentuales y estimaciones típicas documentadas en la literatura y experiencias análogas. A continuación, se presenta el potencial de reducción de la huella hídrica azul, verde y gris, y de la huella de carbono, atribuible a la implementación de las SbN.

5.5.8.1.- Potencial de reducción de HH.

Según WaterStat-WFN y enfoques estándar de evaluación hídrica, la propuesta SbN puede mejorar la disponibilidad y calidad del agua mediante tres mecanismos: aumento de infiltración, reducción de escorrentía y erosión, y disminución de cargas de contaminantes por agroquímicos. La Tabla 30 sintetiza el potencial de reducción de la HH azul y gris y el aumento de HH verde proyectados, con fundamentos y relación al OE4.

Tabla 30. Potencial de reducción de HH asociado a la propuesta SbN

Componente de HH	Descripción	Línea base en Petorca (según diagnóstico)	Potencial de reducción / mejora con SbN	Fundamentación	Relación OE
HH Azul	Extracción directa de agua superficial o subterránea	Sobreexplotación y déficit en APR (ver Cap. 4.3.3)	5-10% de reducción por mayor recarga y regulación hídrica	Restauración ribereña y manejo de laderas (MMA, 2022)	OE4
HH Verde	Agua de lluvia almacenada en vegetación y suelo	Baja retención por degradación y pérdida de cobertura	10-20% de incremento en infiltración y retención	Vegetación nativa mejora estructura del suelo (SER, 2019)	OE4
HH Gris	Agua requerida para diluir contaminantes	Uso intensivo de fertilizantes y pesticidas	10-15% de reducción por disminución de agroquímicos	Modelos agroecológicos reducen insumos (Wang et al., 2025)	OE4

Fuente: Elaboración propia a partir de Mekonnen & Hoekstra (2011), MMA (2022, 2024), SER (2019) y Wang et al. (2025).

Las SbN propuestas contribuyen a bajar la huella hídrica azul al reducir extracciones de riego (priorizando agua para consumo humano) y potenciar la recarga de acuíferos. Paralelamente, aumentan la huella verde al retener más agua de lluvia en el paisaje (menos escorrentía superficial) y disminuyen la huella gris al limitar el uso de agroquímicos que contaminan las aguas.

5.5.8.2.- Potencial de reducción de HC.

En concordancia con los factores de emisión del IPCC AR5/AR6 (IPCC, 2019; IPCC, 2021), la propuesta SbN contribuye a la mitigación climática mediante tres vías principales:

- Captura de carbono biogénico: la restauración de vegetación nativa esclerófila en zonas degradadas captura entre 1,8 y 2,3 tCO₂e/ha/año, según rangos reportados para bosques en regeneración mediterráneos (SER, 2019).
- Reducción de emisiones directas (N₂O): la disminución en ~10-15% del uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos reduce proporcionalmente las emisiones de óxido nitroso (N₂O) provenientes del suelo.
- Reducción de emisiones indirectas: la menor erosión y degradación de suelos con SbN implica hasta 5-10% menos emisiones de CO₂ asociadas a esos procesos (descomposición de materia orgánica expuesta, pérdida de carbono del suelo).

La Tabla 31 resume las contribuciones potenciales de la propuesta a la reducción de la HC local, por componente, con fundamentos y relación al OE4.

Tabla 31. Potenciales contribuciones SbN a la reducción de HC.

Componente HC	Descripción	Línea base (según diagnóstico)	Potencial de mitigación con SbN	Fundamentación	Relación OE
Captura biogénica de CO ₂	Carbono fijado por vegetación restaurada	Cobertura degradada (Cap. 4.3.4)	1.8-2.3 tCO ₂ e/ha/año	Restauración esclerófila (SER, 2019)	OE4
Reducción de emisiones por fertilización	Emisiones de N ₂ O vinculadas a nitrógeno sintético	Alta dependencia de fertilizantes (Cap. 4.1.4)	10-15% de reducción	Disminución de insumos químicos (Wang et al., 2025)	OE4
Reducción de emisiones indirectas	Emisiones por erosión y degradación	Zonas de ladera con erosión severa	5-10% de reducción	Manejo de suelo e infraestructura verde (MMA, 2024)	OE4

Fuente: Elaboración propia a partir de IPCC (2019, 2021), SER (2019), MMA (2024) y Wang et al. (2025).

En conjunto, la implementación de SbN en Petorca tendría una huella de carbono neta menor que el escenario actual, al capturar CO₂ atmosférico en nueva biomasa y reducir emisiones agrícolas. Si bien estos cálculos son preliminares, indican un aporte positivo de la propuesta a las metas de carbono neutralidad locales.

(Nota: La propuesta sigue principios metodológicos ISO 14046 e ISO 14064, asegurando consistencia con estándares internacionales, aunque la evaluación presentada es preliminar dada la falta de mediciones directas.)

5.6.- Estrategia de implementación y validación.

La estrategia de implementación de la propuesta SbN constituye la fase operativa del OE4 y busca traducir el diseño técnico en procesos concretos de gestión territorial. Para ello, articula actores locales, etapas de intervención y un sistema integrado de indicadores (ecológicos, sociales, económicos) orientado al seguimiento y adaptación de las medidas propuestas. Esta estrategia se sustenta en los resultados de la evaluación del potencial (indicadores multidimensionales, beneficios ecosistémicos y socioeconómicos) y en la validación de la propuesta frente a los Estándares Globales de SbN de IUCN, que enfatizan la gobernanza inclusiva, la gestión adaptativa, la coherencia con políticas públicas y la escalabilidad.

La literatura académica reciente refuerza la importancia de estos componentes e incorpora nuevas dimensiones estratégicas. Destaca la necesidad de marcos de evaluación dinámicos y resilientes al clima, que superen análisis estáticos y permitan anticipar trayectorias futuras mediante pensamiento sistémico, escenarios participativos y backcasting (Reyes et al., 2025). Asimismo, cobra relevancia la justicia espacial, la equidad hídrica y la viabilidad financiera como factores determinantes del éxito de las SbN en contextos

socioambientales complejos (Zarei & Shahab, 2025). Otros trabajos subrayan la importancia de estandarizar criterios y tipologías para distinguir las SbN auténticas de intervenciones simplemente inspiradas en la naturaleza, evitando su uso indiscriminado o conceptualizaciones ambiguas (Nazir et al., 2025).

En coherencia con estos avances, la estrategia de implementación propuesta establece una hoja de ruta que vincula el diseño de las medidas (setos multifuncionales, restauración ecológica, infraestructura verde y transición agroecológica) con los actores territoriales, los mecanismos de gobernanza hídrica y los ODS priorizados en el TFG. Esto permite que la implementación no se limite a acciones aisladas, sino que configure un proceso de transformación territorial consistente con las brechas identificadas en Petorca (MMA, 2013; Naciones Unidas, 2015; FAO, 2021). La literatura también advierte adoptar un enfoque reflexivo, capaz de identificar riesgos sistémicos, consecuencias no intencionadas y vulnerabilidades sociopolíticas. En esta línea, se promueve que las SbN integren saberes ancestrales y conocimientos locales, especialmente en territorios donde estos sistemas de manejo han sido históricamente relevantes para la gestión del agua (Beccar et al., 2002; Recalde et al., 2024). Este enfoque complementa la estrategia propuesta, situando las SbN en un marco territorial culturalmente contextualizado y socialmente legitimado.

5.6.1.- Actores locales y gobernanza ambiental.

La implementación efectiva de la propuesta SbN requiere una arquitectura de gobernanza que reconozca la diversidad de actores presentes en la cuenca de Petorca y las asimetrías de poder en torno al agua y al uso de suelo. El diagnóstico caracterizó a pequeños y grandes productores, organizaciones sociales, APR, municipios, organismos sectoriales y academia, mapeando sus roles, nivel de influencia y relación con el agua. La estrategia de gobernanza se articula en torno a cuatro núcleos principales: comunidades locales/APR, productores agrícolas, instituciones públicas y academia/centros de investigación. Esta estructura se operacionaliza mediante mesas de gobernanza hídrica y espacios multi-actor, fortaleciendo instancias existentes como el PTI Hídrico de Petorca para priorizar el consumo humano, la agricultura familiar campesina y la adaptación al cambio climático. Asimismo, se integran prácticas de monitoreo comunitario y “mingas hídricas” para la conservación de suelos/aguas y vigilancia social de caudales, reforzando la transparencia y corresponsabilidad territorial.

La Tabla 32 presenta los actores clave identificados, su rol principal en la implementación, capacidades actuales y necesidades de fortalecimiento:

Tabla 32. Actores locales relevantes para la implementación SbN, con roles, capacidades y necesidades de fortalecimiento.

Actor	Rol Principal	Capacidades actuales	Necesidades de Fortalecimiento
Municipalidad de Petorca	Liderazgo territorial, planificación, financiamiento FNDR de proyectos SbN.	Medias: voluntad política presente, pero capacidad técnica ambiental limitada.	Contratar un gestor ambiental comunal; presupuesto anual dedicado a adaptación/SbN.
DGA + DOH (MOP)	Regulación hídrica, fiscalización de extracciones, priorización de consumo humano.	Medias-Altas: cuentan con datos y marco normativo, presencia regional.	Participación en mesas de agua; flexibilidad para tramitar pilotos SbN (permits temporales).
APRs (Agua Potable Rural)	Gestión de agua domiciliar rural; monitoreo participativo de fuentes locales.	Bajas: operatividad limitada, asociaciones APR fragmentadas.	Capacitación en gobernanza del agua; apoyo para coordinarse en una Unión de APR (estructura supralocal).
Pequeños productores (~346 familias)	Implementadores de SbN a nivel predial; aportan mano de obra y conocimiento local.	Medias: experiencia local en riego/trabajo comunitario; motivación variable.	Capacitación técnica en agroecología y restauración; incentivos económicos iniciales (bonos de plantación, asesoría gratuita).
Grandes productores (~18 empresas)	Facilitadores: ceden franjas de tierra para pilotos, cofinancian implementaciones, adoptan certificaciones.	Altas: capital financiero, tecnología, influencia en mercados.	Negociación de compromisos ambientales (responsabilidad social); construcción de confianzas con comunidad (acuerdos transparentes).
MODATIMA + org. civiles	Mobilización social, monitoreo ciudadano, voz de comunidades ante autoridades.	Altas: alta legitimidad local, redes nacionales e internacionales.	Incorporación formal en mesas de gobernanza; reconocimiento oficial de su experiencia local en gestión del agua.
CONAF + Servicio Biodiv.	Provisión de material vegetal nativo; asesoría técnica en reforestación y protección de ecosistemas.	Medias: viveros y personal disponibles parcialmente, programas limitados.	Ampliación de viveros locales; coordinación con universidades para investigación aplicada.
Centro CERES (Agroecología)	Investigación aplicada, pilotos agroecológicos, capacitación técnica, validación en terreno.	Altas: experiencia local documentada, personal experto.	Financiamiento de estudios de línea base y monitoreo; convenio formal de colaboración con municipio (asesoría permanente).
Academia (PUCV, UNAB, etc.)	Investigación en indicadores, sistemas de monitoreo, evaluación de impactos SbN.	Medias-Altas: experticia disponible pero dispersa, sin coordinación interinstitucional.	Articulación mediante convenios/unidades de investigación conjunta; fondos para I+D aplicada en la cuenca.

La gobernanza ambiental propuesta se centra en alianzas multi-actor (ODS 17). En torno a las mesas de gobernanza hídrica y foros similares, se articularán APR, pequeños agricultores y agroindustrias para priorizar el consumo humano y la agricultura familiar en contextos de escasez (CDP-EBP, 2023; FAO, 2021). Estas mesas se complementarán con prácticas de monitoreo comunitario y mingas hídricas, donde comunidades, APR y organizaciones locales colaborarán en la conservación de suelos y aguas, así como en la vigilancia de caudales y acuíferos. Esto contribuye a la detección temprana de extracciones ilegales o situaciones de sequía extrema (Diario La Quinta, 2023; MMA, 2023), aumentando la transparencia y confianza pública.

En el plano predial, el manejo conjunto entre comunidades, pequeños productores y empresas refuerza la corresponsabilidad en el cuidado del territorio, mejora la aceptación social de la actividad agrícola y se alinea con los principios SbN de gobernanza inclusiva. Abre también oportunidades para mecanismos de financiamiento climático y pagos por servicios ecosistémicos a nivel local (CDP-EBP, 2023; Cohen-Shacham et al., 2016; FAO, 2021; Pagiola, 2020). La propuesta formaliza esta gobernanza colaborativa mediante compromisos entre cooperativas, APR, empresas y municipios, asegurando que la cohesión social y la reducción de conflictos sean resultados explícitos de la articulación SbN en el territorio.

5.6.2.- Plan de acción y fases de implementación.

El plan de acción se estructura en cuatro fases coherentes con los criterios de la IUCN (2020) relativos al diseño basado en evidencia, participación inclusiva, gestión adaptativa y escalabilidad. La literatura reciente aporta herramientas y enfoques que fortalecen estas fases.

Fase 1: Co-diseño participativo y priorización territorial (Meses 1-6). Se consolidan los resultados del diagnóstico socioambiental para priorizar amenazas y oportunidades, identificando zonas críticas para la restauración ecológica, setos multifuncionales, infraestructura verde y transición agroecológica. Se constituye oficialmente un Comité de Gobernanza SbN con representación de actores clave (municipio, DGA, APR, productores, MODATIMA, CERES, academia). Se realizan talleres participativos con pequeños y medianos productores para validar polígonos de intervención, resolver conflictos de tenencia de tierra y definir incentivos (subsidios, asistencia técnica). Se diseñan fichas técnicas por polígono prioritario, con cartografía detallada, especies a utilizar, arreglos espaciales, cronograma y presupuesto desglosado.

Fase 2: Implementación piloto de medidas SbN (Meses 7-36): Se ejecutan pilotos en predios representativos y espacios de uso común, priorizando acciones de rápido impacto social y alto beneficio ecosistémico. La implementación se organiza en bloques: A) establecimiento de setos multifuncionales en 150-200 ha distribuidas en 8-10 predios piloto (pequeños, medianos y grandes productores); B)

restauración de 100-150 ha de riberas en tramos estratégicos del río Petorca (validado con CONAF y DGA); C) instalación de 10-15 sistemas de infiltración (zanjas, terrazas) en laderas críticas, y construcción de 3-5 humedales depuradores piloto; D) reactivación/estructuración formal de 3-5 mesas de gobernanza (agua potable, pequeños productores, agroindustria, conservación, etc.), con realización de mingas comunitarias trimestrales en distintos sectores. Se implementa un monitoreo intensivo: medición bimestral/trimestral de indicadores (NDVI vía drones, nivel freático en pozos, caudal de río en estación DGA, cobertura de setos, empleos generados, participación en mesas, ingresos alternativos). Los resultados preliminares se sistematizan y difunden anualmente para transparencia y ajuste temprano.

Fase 3: Monitoreo, gestión adaptativa y validación (Meses 25-42): Se analizan los resultados piloto, comparando indicadores pre vs. post-intervención; se identifican éxitos y fracasos en cada medida. Con base en ello, se realizan ajustes técnicos: revisión de especies plantadas, densidades, técnicas de mantenimiento, reubicación de obras verdes si es necesario, según el desempeño observado. En paralelo, se evalúa la gobernanza: se analizan la evolución de la conflictividad, la participación y la legitimidad de decisiones en las mesas; se redefinen roles o mecanismos si fuese necesario para mejorar la inclusión. Se documentan las lecciones aprendidas en manuales o informes para facilitar la replicabilidad del modelo SbN en otras localidades. Se difunde el conocimiento generado mediante seminarios locales, materiales audiovisuales y guías técnicas dirigidas a extensionistas, productores y municipios de cuencas análogas. La literatura reciente recomienda complementar este proceso con marcos de evaluación dinámicos y resilientes al clima, soportados en pensamiento sistémico, retroproyección y escenarios participativos (Reyes et al., 2025). Asimismo, herramientas como sistemas de apoyo a decisiones (DSS), por ejemplo, Nat4Wat, permiten comparar alternativas de SbN mediante análisis multicriterio, facilitando la transparencia y decisiones basadas en evidencia (Pueyo-Ros et al., 2025).

Fase 4: Escalamiento y articulación con políticas públicas (Meses 37-60+): Se sistematizan los resultados y se formulan recomendaciones para integrar las SbN en instrumentos de planificación comunal y regional: PLADECO, Plan Regulador Comunal (PRC), Estrategias Regionales de Desarrollo, planes sectoriales de gestión hídrica y climática. La literatura enfatiza la necesidad de marcos estandarizados de evaluación, mecanismos innovadores de financiamiento hídrico y adopción de soluciones no estructurales basadas en la comunidad a largo plazo (Recalde et al., 2024; Santos, 2025). Se procede al escalamiento espacial de las SbN: incorporar 500-1.000 ha adicionales de intervenciones SbN dentro de la planificación comunal (por ejemplo, mediante el PLADECO o instrumentos de ordenamiento). Se institucionaliza la gobernanza: las mesas de agua se oficializan vía ordenanzas municipales, asegurando su funcionamiento autónomo (sin

necesidad de facilitación externa permanente). En cuanto a financiamiento, se busca acceso a créditos verdes CORFO, mecanismos de PSE y bonos de carbono, integrando estas fuentes en presupuestos públicos (FNDR plurianual, programas INDAP, CONAF, etc.) para la sostenibilidad financiera de largo plazo. Se articulan los resultados con instrumentos de fomento, proponiendo la actualización de criterios de la Ley 18.450, APL u otros programas para priorizar proyectos SbN y de agroecología. Finalmente, se promueve la replicabilidad territorial: extender iniciativas análogas a cuencas vecinas (La Ligua, Aconcagua) bajo el liderazgo del Gobierno Regional de Valparaíso y la DGA, aprovechando las redes de conocimiento generadas. Este escalamiento es coherente con análisis territoriales andinos que destacan la importancia de la gobernanza comunitaria del agua (Recalde et al., 2024) y con marcos conceptuales que vinculan SbN y seguridad hídrica (da Costa et al., 2025).

5.6.3.- Indicadores de seguimiento y evaluación.

El sistema de indicadores multidimensionales permite evaluar la contribución de las SbN a la reducción de HH y HC, a la resiliencia ecosistémica y a la mejora socio-productiva. Para fortalecer la validez técnica, los cálculos se alinean con estándares internacionales ISO 14046 (HH) e ISO 14064/14067 (HC), garantizando trazabilidad, comparabilidad y transparencia (ISO, 2018a; 2018b).

Se monitorearán indicadores integrados con distintas frecuencias durante la fase piloto (trimestral) y de escalamiento (anual):

- **Indicadores ecológicos** (piloto: trimestral; escalamiento: anual):
 - NDVI en polígonos intervenidos (imágenes satelitales Landsat/Sentinel-2; comparación antes/después).
 - Nivel de agua en acuíferos aluviales (medición en piezómetros DGA existentes; seguimiento vs línea base histórica).
 - Caudal del río Petorca en estación hidrométrica (datos DGA; comparación con promedio histórico ajustado por lluvia).
 - Cobertura y estado de los setos/bosques restaurados (inventarios participativos semestrales de supervivencia y crecimiento).
- **Indicadores sociales** (trimestrales):
 - Participación en mesas de gobernanza (número de asistentes, sectores representados; acuerdos adoptados por reunión).
 - Acceso a agua APR (porcentaje de población con suministro continuo; encuestas de satisfacción y monitoreo comunitario de interrupciones).

- Empleo verde generado (jornales contratados en viveros, plantaciones; ingresos percibidos por trabajadores locales).
- **Indicadores económicos** (anuales):
 - HH/HC estimadas en predios intervenidos (cálculo simplificado a partir de cambios en cultivos, insumos y cobertura arbórea, usando coeficientes IPCC y WFN).
 - Diversificación productiva (número de rubros no tradicionales operando; volumen de ventas por rubro alternativo; encuestas de ingresos agrícolas).
 - Costo-efectividad de SbN (USD invertidos por ha restaurada; USD por tonelada de CO₂e mitigada; evaluación económica ex-post de beneficios vs costos).
- **Indicadores de gobernanza** (trimestrales):
 - Funcionalidad de mesas (reuniones planificadas vs realizadas; asistencia promedio; número de decisiones vinculantes implementadas).
 - Conflictividad reportada (número de conflictos hídricos elevados a autoridades vs conflictos resueltos vía mesas; seguimiento de casos emblemáticos).
 - Legitimidad social (encuesta anual de percepción ciudadana sobre la gestión del agua; nivel de confianza en instituciones locales; % de encuestados que aprueban las medidas SbN).

Finalmente, se propone vincular explícitamente cada indicador con los ODS priorizados (ODS 6, 12, 13, 15 y 17), utilizando matrices de alineación entre resultados (reducción de HH, HC, mejora ecosistémica, cohesión social) y metas ODS correspondientes. De este modo, el sistema de seguimiento evaluará no solo la eficacia local de la propuesta SbN, sino también su contribución a los compromisos globales de sostenibilidad (UNEP, 2024) y a las políticas nacionales de cambio climático y gestión del agua (Naciones Unidas, 2015; MMA, 2022; 2024; IPCC, 2019; SER, 2019; Wang et al., 2025).

6.- Conclusiones.

6.1 Síntesis de hallazgos

El diagnóstico territorial integrado realizado en este Trabajo Final de Grado evidencia un desalineamiento crítico entre el modelo agroproductivo de Petorca y los límites ecológicos de la cuenca. La expansión intensiva de frutales (especialmente paltos) en suelos marginales y laderas pronunciadas ha coincidido con una crisis hídrica severa: los caudales del río Petorca han disminuido cerca de un 50% (de $\sim 2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1985 a $\sim 1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2018) y el acuífero aluvial muestra balances negativos persistentes desde los años 1990, llevando a restricciones y cierre de nuevas extracciones (Zona de Prohibición desde 2018). Esta sobreexplotación, sumada a más de 240 denuncias por extracciones ilegales de agua, ha provocado la desecación del río y dejado al 20% de la población rural dependiendo de camiones aljibe para agua potable. La calidad del agua subterránea es moderada (baja salinidad) pero con presencia de hierro y manganeso. Se constató, además, una alta desigualdad en el acceso al recurso: pocos grandes productores agroindustriales concentran la mayoría de los derechos de agua subterránea, mientras los pequeños agricultores y sistemas de Agua Potable Rural (APR) sufren un marcado déficit hídrico. En paralelo, se observa una degradación ecológica acelerada: pérdida de vegetación nativa (reducción estimada de $\sim 15\%$ de la cobertura boscosa original), erosión severa en laderas cultivadas (hasta 650 veces mayor que en áreas con cobertura natural) y fragmentación de hábitats. Este colapso socioambiental confirma que Petorca es un caso extremo de territorio insostenible, donde la mega-sequía climática, la sobreasignación histórica de agua y un modelo productivo extractivista han convergido para generar escasez hídrica, deterioro de suelos y conflictos sociales en torno al agua.

Frente a este diagnóstico, el presente trabajo diseñó y evaluó una propuesta de intervención basada en SbN, concluyendo que estas medidas ofrecen un alto potencial transformador para reconducir el territorio hacia la sustentabilidad. Las SbN propuestas, incluyendo la restauración de fajas ribereñas (reforestación de ~ 500 ha con especies nativas como quillay, litre, molle), la recarga gestionada de acuíferos mediante infiltración (zanjas de infiltración, terrazas vegetadas y humedales artificiales piloto en ~ 150 ha), la implementación de setos agroforestales multifuncionales entre cultivos (en ~ 1.200 ha de plantaciones para reducir erosión y mejorar la retención hídrica), la cosecha de aguas lluvia y el reúso seguro de aguas tratadas, resultan técnica y ambientalmente viables, socialmente bien encaminadas y económicamente justificables para Petorca. Los análisis ecohidrológicos sugieren que estas intervenciones podrían aumentar la infiltración efectiva entre un 20% y 50% en las áreas intervenidas (con recargas adicionales del orden de decenas de L/s en un piloto de 500 ha), reducir la erosión del suelo en un 40-50% en laderas con barreras vegetales, y restaurar funciones ecosistémicas clave en la cuenca (mejorando la retención de

humedad, la calidad del suelo y la conectividad ecológica a través de ~15-20 km de corredores biológicos ribereños). Consecuentemente, se espera una recuperación paulatina de la vegetación nativa (incremento proyectado del índice de vegetación NDVI de ~0,44 a 0,65 en zonas intervenidas) y un aumento de la biodiversidad funcional (por ejemplo, +5 a 10 especies nativas de polinizadores y controladores biológicos por hectárea) que fortalecerán la resiliencia del paisaje frente al cambio climático.

Desde el punto de vista social, las SbN ofrecen soluciones concretas para mejorar la equidad hídrica y la calidad de vida en la comuna. Al incrementar la disponibilidad y regulación natural del agua, estas medidas podrían reducir sustancialmente la dependencia de camiones aljibe y garantizar el acceso básico al agua potable a comunidades rurales hoy vulnerables (se proyecta bajar del 20% a menos del 5-8% la población rural sin acceso regular, beneficiando a unas 1500-2000 personas). Asimismo, la implementación de SbN bajo un modelo de gobernanza colaborativa (mesas de agua participativas entre APR, agricultores grandes y pequeños, autoridades y organizaciones sociales) fomentaría la participación comunitaria en el monitoreo y cuidado de los ecosistemas, reconstruyendo la confianza entre actores y reduciendo la conflictividad histórica en torno al “saqueo hídrico”. En el ámbito productivo, las SbN posibilitan diversificar y estabilizar la economía agrícola local. La introducción de prácticas agroforestales y suelos “esponja” mejora la eficiencia en el uso del agua (se estima que la huella hídrica azul del cultivo de palto podría reducirse en un 40-50%, de ~2400m³ a ~1200-1500m³ por tonelada de palta, gracias a menores requerimientos de riego y a la recarga de acuíferos), disminuye la dependencia de insumos externos (fertilizantes, pesticidas) y aumenta la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a sequías prolongadas. A mediano plazo, esto abre oportunidades para una reconversión hacia agricultura regenerativa con productos más sostenibles, el desarrollo de nuevos nichos económicos verdes (por ejemplo, apicultura, silvopastoril, ecoturismo rural) y la generación de empleo verde local (estimada en unas 20-40 jornadas de trabajo por hectárea durante la fase de implementación de las SbN, dinamizando la economía comunal).

En síntesis, los hallazgos del TFG confirman que es posible y deseable transitar hacia un modelo territorial más equilibrado y justo en Petorca. Las SbN evaluadas son una herramienta estratégica para compatibilizar la producción agrícola con la disponibilidad real de agua y la conservación ecológica. Su implementación simultáneamente atiende los desafíos socioambientales identificados como la escasez hídrica, degradación de suelos, pérdida de biodiversidad e inequidad en el acceso al agua, aportando soluciones basadas en evidencia científica y adaptadas al contexto local. Además, el cruce de esta propuesta con los ODS priorizados revela que, a diferencia del modelo agroexportador convencional (que actualmente dificulta el logro integrado de metas en agua limpia, producción responsable, acción climática, vida de

ecosistemas terrestres y alianzas institucionales: ODS 6, 12, 13, 15 y 17, un enfoque territorial sustentado en SbN permite avanzar coordinadamente en dichos ODS. En efecto, equilibrar la producción con la gestión hídrica y la restauración ecosistémica crea sinergias positivas: mejora la seguridad hídrica y alimentaria (ODS 6 y 2), promueve prácticas agrícolas responsables (ODS 12), contribuye a la adaptación al cambio climático (ODS 13), detiene la desertificación y recupera servicios ecosistémicos (ODS 15) y exige alianzas entre comunidad, autoridades y sector privado (ODS 17). En conjunto, esta propuesta posicionaría a Petorca como referente de adaptación al cambio climático y gestión sostenible del paisaje en zonas semiáridas, demostrando en la práctica cómo las decisiones de planificación territorial pueden apoyarse en la infraestructura natural para reconstruir la resiliencia ecológica y social de un territorio en crisis.

6.2 Implicancias para la gestión ambiental e institucionalidad territorial

Los resultados obtenidos conllevan importantes implicancias para la gestión ambiental y las políticas públicas en Petorca (y en otros territorios con problemas similares), especialmente en materia de gobernanza del agua, ordenamiento territorial y marcos de fomento agrícola:

Reforma de la gobernanza hídrica: Se debe fortalecer la institucionalidad del agua incorporando criterios de sustentabilidad y equidad. En Petorca urge pasar de una gestión sectorial y reactiva a una gobernanza colegiada y anticipatoria. Esto implica, por un lado, dotar de atribuciones vinculantes a instancias locales de gestión integrada (por ejemplo, convertir las actuales mesas de trabajo hídrico o Comunidades de Aguas Subterráneas en plataformas con participación de todos los usuarios, facultadas para regular extracciones según la disponibilidad real). Por otro lado, supone actualizar los criterios de asignación de agua: priorizar formalmente el consumo humano y el riego de subsistencia por sobre el uso agroindustrial, sobre todo bajo decretos de escasez hídrica, de modo que ante la falta de agua la carga no se distribuya solo proporcionalmente a derechos históricos, sino que garantice un piso mínimo vital. Junto con esto, se debe robustecer la fiscalización y transparencia en el uso del recurso, aumentar la presencia de la DGA en terreno, integrar sistemas de monitoreo hidrológico participativo (con tecnología accesible y control social) y sancionar efectivamente las extracciones ilegales. Estas reformas de gobernanza son fundamentales para asegurar que los beneficios de las SbN (recarga de acuíferos, caudales mejorados) no sean capturados desproporcionadamente por quienes ya concentran el recurso, sino que se traduzcan en un acceso más equitativo y sostenible al agua.

Instrumentos de fomento agrícola con criterios de sostenibilidad: Los incentivos y subsidios públicos deben reorientarse para corregir las externalidades ambientales del modelo productivo actual en lugar de exacerbarlas. En este sentido, se recomienda revisar programas como la Ley N°18.450 de fomento al riego:

en el futuro, las bonificaciones estatales deberían condicionarse a prácticas sostenibles, por ejemplo, otorgándose preferentemente a proyectos con SBN incorporadas (restauración de vegetación nativa, sistemas de riego con infiltración, tecnificación eficiente con control de extracciones) y a cultivos de menor huella hídrica. Una posibilidad concreta es exigir que las iniciativas financiadas con fondos públicos acrediten una huella hídrica azul bajo cierto umbral (p. ej. $\leq 1000 \text{ m}^3/\text{ton}$) o incluyan medidas de compensación ecohidrológica, desincentivando de facto la expansión de cultivos sedientos en zonas de estrés. Adicionalmente, los instrumentos de desarrollo productivo (como los APL y programas de INDAP) deberían incorporar metas explícitas de reducción de impacto y promoción de SbN en predios agrícolas, con seguimiento y verificación periódica. De esta forma, las políticas de fomento pueden alinearse con la adaptación climática, apoyando económicamente a los agricultores que transiten hacia una agricultura más eficiente en agua y regenerativa, en vez de subsidiar prácticas que agravan la crisis hídrica.

Planificación territorial y ordenamiento adaptativo: Las SbN deben integrarse de manera explícita en los instrumentos de planificación local y regional para orientar un uso de suelo acorde con la disponibilidad hídrica futura. En Petorca, esto supone incluir este plan de restauración e infraestructura verde como eje en el próximo Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO) y en la actualización del Plan Regulador u ordenanzas municipales pertinentes. Es necesario delimitar zonas prioritarias de conservación y recarga hídrica (por ejemplo, las microcuencas como Yerba Loca identificadas en este estudio, las riberas del río Petorca y las áreas de APR sensibles) donde se concentren esfuerzos de reforestación y protección de suelos. Igualmente, se sugiere establecer límites a la expansión de monocultivos en zonas de alta pendiente o suelos frágiles (Clases VII-VIII), ya sea mediante normas locales que prohíban nuevas plantaciones en dichas áreas o incentivos para la reconversión de esas tierras hacia usos más sostenibles (conservación, silvopastura, etc.). Dado el escenario climático proyectado (menores precipitaciones y mayores temperaturas hacia 2050), la planificación debe incorporar escenarios de riesgo: por ejemplo, definir la superficie agrícola máxima sostenible bajo distintas disponibilidades de agua (según proyecciones, unas ~ 3.500 ha de frutales podrían ser el techo viable en vez de las ~ 4.250 ha actuales) y orientar la matriz productiva comunal en consecuencia. Integrar las SbN en la normativa territorial garantizará que estas soluciones no queden en iniciativas aisladas, sino que formen parte de una estrategia de desarrollo comunal resiliente a largo plazo.

Mobilización de financiamiento climático y público: La implementación de las SbN requerirá recursos significativos, pero existen oportunidades para apalancar financiamiento a distintas escalas. A nivel nacional-regional, se pueden destinar fondos públicos (FNDR regional, programas sectoriales de riego, conservación y emergencia agrícola) para costear pilotos y expansiones iniciales, según estimaciones, con

costos de alrededor de US\$1.000-1.500 por hectárea intervenida, es decir, unos US\$600 mil para intervenir las primeras 500 ha críticas. En paralelo, es factible gestionar fondos internacionales de clima y sostenibilidad: por ejemplo, proyectos al Fondo Verde del Clima (GCF) o al Fondo de Adaptación, enfocándose en adaptación comunitaria al estrés hídrico; créditos blandos o garantías a través de CORFO para emprendimientos “verdes” locales; e incluso la venta de bonos de carbono o de biodiversidad generados por la reforestación y la agricultura regenerativa (en el marco del Acuerdo de París, Artículo 6). Aunque los ingresos por servicios ecosistémicos (captura de carbono, regulación hídrica) aún son modestos, pueden crecer en la próxima década y complementar la inversión pública. Es clave que el municipio y el Gobierno Regional articulen estas fuentes, incluyendo alianzas público-privadas con agroindustrias responsables, para asegurar la sostenibilidad financiera de la transición territorial hacia SbN.

Justicia ambiental y participación social: Finalmente, las políticas resultantes deben atender la dimensión de justicia ambiental que subyace al conflicto en Petorca. Declarar formalmente a la comuna como zona prioritaria de restauración y justicia hídrica en la región de Valparaíso podría ayudar a canalizar recursos especiales y reconocimiento institucional a la problemática. Más importante aún, la implementación de cualquier medida debe involucrar procesos participativos inclusivos, donde las comunidades locales, pequeños agricultores y organizaciones como MODATIMA tengan voz en el diseño, monitoreo y distribución de beneficios de las SbN. Garantizar el derecho humano al agua como principio rector, asegurando al menos 50 L/persona/día de agua potable para todos los habitantes, incluso en años secos, es una condición ética que debe incorporarse en la toma de decisiones. Asimismo, se debe procurar una transición justa: los eventuales ajustes productivos (por ejemplo, reducción de superficie de palto en zonas inviables) han de acompañarse de apoyo a los trabajadores y productores afectados, ofreciéndoles capacitación y alternativas en las nuevas actividades sostenibles. Solo con este enfoque inclusivo, que combina ciencia, política pública y participación ciudadana, las soluciones propuestas podrán consolidarse en el tiempo y reconciliar las necesidades sociales con la sostenibilidad del territorio.

6.3 Limitaciones del estudio

Al interpretar las conclusiones anteriores, es importante reconocer las limitaciones inherentes a este estudio, las cuales abren oportunidades para profundizar en investigaciones futuras.

Limitaciones metodológicas y de datos: Este TFG se basó principalmente en datos secundarios (informes técnicos, censos, imágenes satelitales) y en modelos teóricos, debido a restricciones de tiempo y recursos para levantamientos de campo. La ausencia de mediciones in situ, por ejemplo, de tasas reales de

infiltración en suelos locales, calidad de suelos o encuestas directas a actores, introduce cierta incertidumbre en las extrapolaciones. Del mismo modo, algunos parámetros utilizados provienen de literatura genérica; por ejemplo, el factor de ajuste empleado para la huella hídrica local ($k \approx 1,35$) y los coeficientes de infiltración o erosión se tomaron de estudios análogos, pero no fueron calibrados específicamente para Petorca. Además, la información disponible presenta vacíos: las series hidrométricas oficiales llegan solo hasta 2019 y están incompletas para años recientes de megasequía, lo que dificulta proyectar tendencias con alta confiabilidad; y los catastros agrícolas subestiman a pequeños productores no formalizados. Estas lagunas de datos sugieren que los resultados numéricos (p. ej., aumentos de recarga, reducciones de huella hídrica) deben tomarse como estimaciones indicativas, a validar con estudios más detallados.

Alcance espacial-temporal limitado: La propuesta de SbN, si bien ambiciosa, cubriría inicialmente una fracción del territorio afectado. Incluso expandiendo las intervenciones a $\sim 1000-1500$ ha (como se plantea en fases posteriores), esto representa alrededor del 15-20% de la superficie frutícola actual de Petorca. Una recuperación hidrológica integral de la cuenca requeriría eventualmente escalar a unas 3000-4000 ha restauradas con vegetación nativa y manejos sostenibles, lo cual excede el alcance inmediato de este estudio. Asimismo, el horizonte temporal considerado fue de corto a mediano plazo: el análisis proyecta ciertos beneficios a 5-10 años vista, pero los procesos ecológicos y sociales de restauración pueden tomar décadas. Factores como la variabilidad climática interanual extrema (p. ej., la prolongación o agravamiento de la megasequía bajo escenarios de altas emisiones) podrían ralentizar o comprometer los impactos esperados de las SbN si no se ajusta el plan adaptativamente. En resumen, los resultados aquí presentados deben entenderse dentro de un escenario base; cambios significativos en las condiciones climáticas o socioeconómicas podrían requerir ampliar las intervenciones o replantear algunas estrategias.

Complejidades de la gobernanza y viabilidad política: Si bien la propuesta asume una colaboración entre actores tradicionalmente enfrentados, no se pueden soslayar las tensiones históricas y asimetrías de poder en Petorca. Grandes agroexportadores con mayor influencia pueden mostrar resistencia a medidas que limiten sus cultivos o impongan nuevas regulaciones, mientras que las comunidades locales, aun cuando apoyan las SbN, podrían desconfiar de procesos liderados institucionalmente si no sienten una participación real. Este estudio no profundizó mediante metodologías participativas (como entrevistas etnográficas o mediaciones) en cómo superar estos obstáculos sociopolíticos; por tanto, la factibilidad de implementar las SbN a escala territorial dependerá de voluntades políticas y liderazgos que exceden lo técnico. Del mismo modo, costos indirectos no fueron cuantificados: por ejemplo, los recursos necesarios para capacitar actores, facilitar mesas de diálogo, o compensar transitoriamente ingresos de quienes

adopten cambios productivos. Tales factores podrían incidir en la velocidad y éxito de la transición, y merecen consideración en futuros planes más detallados.

Limitaciones en la evaluación de impacto social y económico: Las proyecciones de beneficios sociales (mejora del acceso al agua, empleos verdes creados, etc.) se basan en supuestos teóricos y en experiencias de referencia, pero no han sido validadas en terreno. La aceptación cultural de prácticas nuevas como los setos vivos o la agricultura regenerativa no ha sido evaluada directamente con los agricultores de Petorca; es posible que algunos adopten con entusiasmo las innovaciones, mientras otros requieran mayores incentivos o evidencias de éxito para sumarse. Igualmente, la estimación de retornos económicos (ROI > 1 en 7-10 años) depende de condiciones de mercado relativamente favorables (p. ej., precios de miel, frutos o bonos verdes) y de que los agricultores puedan organizarse para acceder a dichos mercados. Estos supuestos podrían no cumplirse plenamente, por lo que la rentabilidad real y la distribución justa de esos beneficios económicos deberán monitorearse cuidadosamente durante la implementación. En resumen, las conclusiones económicas y sociales apuntan a una viabilidad promisorio pero condicionada: serán necesarios pilotajes y ajustes sobre la marcha para confirmar que los beneficios teóricos se materialicen en la práctica local.

6.4 Proyecciones y líneas futuras de acción

Considerando los hallazgos y limitaciones expuestos, se vislumbran a continuación líneas de acción y de investigación futuras para consolidar la transición de Petorca hacia la sostenibilidad.

Implementación piloto y escalonamiento progresivo: Una hoja de ruta realista sería iniciar con un piloto acotado en los próximos 1-2 años, interviniendo las áreas más críticas identificadas (por ejemplo, 500 ha repartidas entre restauración ribereña, setos en predios piloto e infraestructura verde de infiltración). Este piloto debería ir acompañado de un monitoreo científico riguroso, medición periódica de caudales, niveles freáticos, humedad de suelos, cobertura vegetal vía dron o satélite de alta resolución, seguimiento socioeconómico de las comunidades, para evaluar en tiempo real la efectividad de las SbN implementadas. Si los resultados confirman las mejoras proyectadas, se podrá ampliar la escala en fases subsiguientes: a 5 años, aspirar a 1000-1500 ha intervenidas; a 10 años, apuntar a 3000+ ha, incorporando gradualmente más predios y cuencas vecinas. Este escalamiento adaptativo, con ajustes basados en la evidencia recopilada, maximizará la probabilidad de éxito y la eficiencia en el uso de recursos. Para el año 2035, en un escenario de implementación sostenida, Petorca podría haber transformado una fracción significativa de su paisaje agrícola hacia un mosaico de infraestructura verde y sistemas productivos resilientes, sentando un precedente replicable en otras comunas semiáridas.

Profundización del conocimiento ecohidrológico local: Paralelamente, se recomienda impulsar investigaciones longitudinales que acompañen el proceso. Será crucial, por ejemplo, modelar en detalle el comportamiento hidrológico de la cuenca con y sin SbN (usando herramientas como modelos de flujo subterráneo MODFLOW u otros) para cuantificar con mayor certeza el impacto en la recarga del acuífero y en los caudales superficiales bajo distintos escenarios climáticos. También se propone estudiar la respuesta ecológica a la restauración: monitorear la sucesión de la vegetación nativa reintroducida, la recuperación de fauna benéfica, y la durabilidad de los servicios ecosistémicos obtenidos (¿se mantienen las tasas de infiltración y control de erosión tras 10-20 años?). Estos datos alimentarán un aprendizaje continuo, permitiendo refinar las técnicas (por ejemplo, seleccionar las especies nativas más exitosas en cada microhábitat, optimizar el diseño de zanjas de infiltración) y ajustar las expectativas de lo que las SbN pueden lograr bajo condiciones reales de cambio global.

Innovación en valoración económica y financiamiento de servicios ecosistémicos: Otra línea importante es la valorización de los beneficios intangibles que generan las SbN para la sociedad. Estudios de economía ambiental podrían estimar la disposición a pagar de la población por mejoras en la seguridad hídrica, por la protección contra aluviones o por la conservación del bosque esclerófilo, proporcionando argumentos para esquemas de pago por servicios ecosistémicos (PSE). Asimismo, se debe explorar la integración de Petorca en mercados verdes emergentes: certificaciones internacionales (ej. Rainforest Alliance) que den valor agregado a los productos locales cultivados con prácticas regenerativas, o la venta agregada de créditos de carbono por reforestación y agroforestería comunitaria. En conjunto, estas iniciativas pueden generar flujos financieros adicionales que hagan autosustentable la mantención y expansión de las SbN en el largo plazo, al internalizar económicamente sus beneficios ambientales.

Fortalecimiento de la gobernanza territorial y la participación científica-ciudadana: Desde el punto de vista institucional, un tema para futuras acciones es experimentar con nuevos mecanismos de gobernanza colaborativa. Por ejemplo, podría conformarse un comité permanente multi-actor que actúe como instancia de cogestión adaptativa de la cuenca, respaldado por acuerdos formales (ordenanzas municipales o convenios) que le otorguen legitimidad. Investigar metodologías de resolución de conflictos socioambientales y de distribución justa de agua en contextos de escasez aportaría herramientas para mediar las persistentes tensiones en Petorca. En este mismo sentido, involucrar a instituciones académicas y centros de investigación en un rol de acompañamiento técnico independiente (p. ej., auditando los resultados ambientales, formando a monitores comunitarios, asegurando la transparencia de datos) puede aumentar la confianza entre las partes y garantizar que el proceso se mantenga basado en evidencia. Consolidar esta alianza entre ciencia, comunidad y Estado resultará esencial para sostener la

voluntad política más allá de ciclos electorales y para institucionalizar las prácticas de gestión ambiental exitosas que surjan del piloto.

En conclusión, este Trabajo de Final de Grado de Magister, ofrece una visión integrada y propositiva para enfrentar la crisis hídrica y socioecológica de la Comuna de Petorca mediante Soluciones basadas en la Naturaleza. Si bien, existen desafíos significativos por delante, las evidencias recopiladas y los análisis realizados confirman la viabilidad de un cambio de trayectoria: acerca de que, si es posible reconvertir un territorio marcado por la sobreexplotación y la inequidad, en un paisaje más justo, eficiente y ecológicamente funcional, siempre que las decisiones se adopten con base científica, participación social y una perspectiva de largo plazo. Así, la comuna de Petorca puede transformarse en una comuna modelo pionera de adaptación al cambio climático y de gestión sustentable del agua en zonas áridas, demostrando que, con creatividad y compromiso colectivo, incluso las cuencas más degradadas, pueden regenerarse y asegurar un futuro digno para sus comunidades.

7.- Referencias

- Aguirre, M. (06 de febrero de 2025) La hoja de ruta del Club de Roma para un futuro equilibrado. *El País, Planeta Futuro*. Recuperado: <https://elpais.com/planeta-futuro/2025-02-06/la-hoja-de-ruta-del-club-de-roma-para-un-futuro-equilibrado.html>
- Ailimpo. (2022). *Lemon water footprint Spain* (Methodology WFN). Recuperado: <https://ailimpo.com/wp-content/uploads/2022/02/Lemon-water-footprint-Spain.pdf>
- Altieri, M., y Nicholls, C. (2007). Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación: *Ecosistemas*, 16(1). Recuperado: <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/133>
- Altieri, M., y Nicholls, C. (2021). *Agroecología: ciencia y política para la agricultura sustentable*. Editorial Universidad de Chile.
- Arroyo, I. (2025). Sistemas de Información Geográfica: aliados en los estudios socioambientales. *Revista Digital Universitaria (ICUAP)*, 11(31), artículo 1553. Recuperado: <https://orcid.org//0000-0002-4619-8185>
- Bassi, A. (2015). Moving towards integrated policy formulation and evaluation: The Green Economy Model. *Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti*, 16, 5. Recuperado: <https://doi.org/10.1515/rtuect-2015-0009>
- Beccar, L., Boelens, L., & Hoogendam, P. (2002). Water rights and collective action in community irrigation. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 15(3), 327-353. <https://doi.org/10.1023/A:1015093717544>
- Becker, L., y Gondhalekar, D. (2022). Estimating the water and carbon footprints of growing avocados in the Munich metropolitan region using waste heat as a water-energy-food nexus potential. *Frontiersn Sustainable Food Systems*, 6, 857650. Recuperado: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.857650>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (30 de octubre de 1985). *Marco legal de fomento forestal y riego* (DL 701; Ley 18.450). Recuperado: <https://bcn.cl/2errl>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (15deJulio de2004). *Resolución DGA N° 204: Declara Área de Restricción en el acuífero del río La Ligua*. Recuperado: <https://bcn.cl/LDBQeS>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (23 de mayo de 2017). *Decreto 30 Promulga el acuerdo de parís, adoptado en la vigésimo primera reunión de la conferencia de las partes de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Recuperado: <https://bcn.cl/29kt2>

- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (17 de agosto de 2018). Decreto 114. Declara zona de escasez a las comunas de Petorca, Cabildo, La Ligua, Zapallar y Papudo, Provincia de Petorca, Región de Valparaíso. Recuperado: <https://bcn.cl/OSfkm>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (15 de septiembre de 2018). *Resolución DGA N° 19 Declara zonas de prohibición para nuevas explotaciones de aguas subterráneas en los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca, ubicados en la región de Valparaíso*. Recuperado: <https://bcn.cl/2suak>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2025). *Panorama en materia de gestión hídrica de la Región de Valparaíso*. Asesoría Técnica Parlamentaria. Recuperado: https://www.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio%2F10221%2F37101%2F1%2FPanorama_Hidrico_Region_Valparaiso_F.pdf
- Boelens, R., Hoogesteger, J., y Vos, J. (2021). Water justice and hydrosocial territories: The role of power and materiality. *WIREs Water*, 8(5), e1539. Recuperado: <https://doi.org/10.1002/wat2.1539>
- Bolados, P. (2016). Conflictos socioambientales/territoriales y el surgimiento de identidades post neoliberales (Valparaíso-Chile). *Izquierdas*, (31), 102-129. Recuperado: <https://doi.org/10.4067/S0718-50492016000600102>
- Boogaard, F., Venvik, G., y Roest, A. (2024). Stormwater Quality and Long-Term Efficiency Capturing Potential Toxic Elements in Sustainable Urban Drainage Systems—Is the Soil Quality of Bio-Swales after 10-20 Years Still Acceptable? *Sustainability*, 16(7), 2618. Recuperado: <https://doi.org/10.3390/su16072618>
- Bravo, M., y Cadena, V. (2021). Economía ambiental (EA) vs. economía ecológica (EE): Una mirada desde la sustentabilidad. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(5), 10419-10430. Recuperado: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i5.1081
- Bujes, N. (2015). *Estudio de la propiedad del agua subterránea del acuífero del río Petorca en la Región de Valparaíso, Chile* (Tesis de pregrado, Universidad de Chile). Recuperado: <https://repositorio.uchile.cl/xmlui/bitstream/handle/2250/150902/Estudio-de-la-propiedad-del-agua-subterranea-del-acuifero-del-rio-petorca-en-la-Region-de-Valparaiso-Chile.pdf?isAllowed=yysequence=1>
- CDP Y EBP Chile. (2023). *Desafíos para el financiamiento climático en las comunas de Chile*. Recuperado: [https://cdn.cdp.net/cdp-production/cms/reports/documents/000/007/458/original/VF_Desaf%C3%ADos_para_el_financiamiento_clim%C3%A1tico_en_las_comunas_de_Chile_\(1\).pdf](https://cdn.cdp.net/cdp-production/cms/reports/documents/000/007/458/original/VF_Desaf%C3%ADos_para_el_financiamiento_clim%C3%A1tico_en_las_comunas_de_Chile_(1).pdf)

- Centro Ceres. (2024, septiembre 30). *Centro Ceres desarrolla diseño hidrológico para captura y almacenamiento de agua en sistemas agrícolas de secano*. (Comunicado de prensa). Recuperado: <https://www.centroceres.cl/centro-ceres-desarrolla-diseno-hidrologico-para-captura-y-almacenamiento-de-agua-en-sistemas-agricolas-de-secano/>
- Centro Ceres. (2025, julio 30). *Técnica con Enfoque Geomorfológico: Recuperan laderas degradadas con uso de técnicas ancestrales*. (Comunicado de prensa). Recuperado: <https://www.centroceres.cl/tecnica-con-enfoque-geomorfologico-recuperan-laderas-degradadas-con-uso-de-tecnicas-ancestrales/>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2020). *Crisis hídrica en la cuenca de Petorca: Una combinación entre la megasequía y el manejo del agua* (Policy Brief N.º 4). Recuperado: <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2020/04/Policy-brief-N4-Crisis-h%C3%ADdrica-en-la-cuenca-de-Petorca.pdf>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2023). *Crisis hídrica en la cuenca del río Petorca*. Recuperado: <https://www.cr2.cl/crisis-hidrica-en-la-cuenca-del-rio-petorca/>
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) y Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2020). *Catastro frutícola: Región de Valparaíso. Principales resultados*. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Recuperado <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstreams/773b506e-e2bb-4e62-a8fe-b251cb6d7418/download>
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2021). *Vuelo de dron* (Servicio geoespacial que incluye productos NDVI). CIREN. Recuperado: <https://www.ciren.cl/productos/vuelo-de-dron>
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) y Sistema de Información Territorial Rural (SiTRural). (2020). *RECURSOS NATURALES COMUNA DE CABILDO: Proyecto* (Informe técnico). Recuperado: https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2020/03/Cabildo_rec_nat_proy.pdf
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) y Sistema de Información Territorial Rural (SiTRural). (2024). *Recursos naturales comuna de Petorca*. Recuperado: https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2024/11/Petorca_rec_nat.pdf
- Chilepatrimonios. (2009, 30 de marzo). *“Iglesia Nuestra Señora de la Merced (Petorca) Decreto N.º 17 (Monumento Histórico)”*. Recuperado: <https://www.chilepatrimonios.gob.cl/ficha?doi=01PMN-2321>
- Chilepatrimonios. (1929, 25 de enero). *"Casa donde nació el presidente Manuel Montt Ley N.º 4542 (Monumento Nacional)"*. Recuperado: <https://www.monumentos.gob.cl/monumentos/monumentos-historicos/casa-donde-nacio-el-presidente-manuel-montt>

- Choudhary, M., y Ray, S. (2024). Sustainable wastewater management: Exploring nature-based treatment. *Int. J. Environ. Sci*, 15, 63-69. Recuperado: <https://doi.org/10.53390/IJES.2024.15202>
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., Y Maginnis, S. (2016). Nature-based solutions to address global societal challenges. IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe, (CEPAL). (2020). Las tres brechas del desarrollo sostenible y el cierre de la brecha ambiental en Chile. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Recuperado: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/45626>
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). (2007). "Estrategia Regional de Biodiversidad: Región de Valparaíso". Recuperado: <https://biodiversidad.mma.gob.cl/avance-actualizacion-erb-valparaiso/>
- Comisión Nacional de Riego (CNR). (2023). *Bases y concursos de la Ley 18.450*. Recuperado: <https://www.cnr.gob.cl/agricultores/concursos-de-riego-y-drenaje/>
- Coase, R. (1960). The Problem of Social Cost. *Journal of Law and Economics*, 3(1), 1-44.
- Comité de Capital Natural (2025). Informe anual del Comité de Capital Natural para el año 2024. Ministerio de Hacienda. Recuperado: <https://hacienda.cl/areas-de-trabajo/finanzas-internacionales/finanzas-sostenibles/capital-natural>
- Comité de Palta de Chile. (2019). En Petorca la superficie de paltos ha bajado un 30% y se estima que podría reducirse hasta en 50%. Recuperado: <https://paltahass.cl/en-petorca-la-superficie-de-paltos-ha-bajado-un-30-y-se-estima-que-podria-reducirse-hasta-en-50/>
- Confederación Nacional de Federaciones y Sindicatos Campesinos y Trabajadores Agrícolas (CONAGRO). (2020). La tenencia de la tierra en Chile (Cartilla N.º 31). CONAGRO. Recuperado: <http://www.conagro.cl/wp-content/uploads/2023/06/2020-11-Cartilla-31-CONAGROliviano.pdf>
- Contreras Ortiz, F. (2023). *Modelo de predicción del estado hídrico en avellano europeo (Corylus avellana L.) cv. Tonda di Giffoni utilizando imágenes multiespectrales* Repositorio Académico de la Universidad de Talca. Recuperado: <https://www.google.com/url?sa=t&source=webyrct=j&yopi=89978449&url=https://repositorio.otalca.cl/repositorio/bitstreams/68b3f232-5822-4315-affa-1ed4a29fc106/download>
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2013). Áreas protegidas oficiales (Capa vectorial shapefile). Geo portal. Recuperado: <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/download/d72c89d3-4a6a-3f95-b80a-2dbd3937b6e3>
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2011). *DL 701: Historia, evaluación y cierre programático*. Recuperado: <https://www.conaf.cl/centro-documental/libro-resena-historica-de-la-aplicacion-del-dl-701/>

- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 2015-2030: Manejo de ecosistemas*. Recuperado: <https://www.conaf.cl/manejo-de-ecosistemas/objetivos-de-desarrollo-sostenible-ods-2015-2030/>
- Cruz, G. (2023). La transición de los sistemas de agua potable rural a los servicios sanitarios rurales [2.3249]. *En Las Fronteras Del Derecho*, 2. Recuperado: <https://doi.org/10.56754/2735-7236.2023.3249>
- da Costa, M., Arcoverde, G., y da Paz, M. (2025). NATURE-BASED SOLUTIONS AND WATER SECURITY: CONCEPTS, TYPOLOGIES AND APPLICATIONS. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 19(2), 1-17. Recuperado: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n2-090>
- Daly, H. (2007). Ecological economics and sustainable development, selected essays by Herman Daly. In *Ecological Economics and Sustainable Development, Selected Essays of Herman Daly*. Edward Elgar Publishing. Recuperado: <https://doi.org/10.4337/9781847206947>
- Dematte, R., Gandolfo Raso, E., Y Huespe, J. (2025). Protection of vineyards from Zonda wind: Evaluation of forest windbreaks. Mendoza, Argentina. Recuperado: <https://doi.org/10.14198/INGEO.27853>
- Department for Energy Security y Net Zero (DEFRA). (2023). *Greenhouse gas reporting: Conversion factors 2023*. GOV.UK. Recuperado: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2023>
- De Miguel, J., y Gómez-Sal, A. (2002). Diversidad y funcionalidad de los paisajes agrarios tradicionales. En F. Díaz Pineda (Coord.), *La diversidad biológica de España*. Prentice Hall (pp. 273-284).
- Diagnóstico de Sostenibilidad Empresarial DSE. (2024). Resultados generales. Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático. Recuperado: <https://accionempresas.cl/content/uploads/Diagnostico-de-Sostenibilidad-Empresarial-DSE-2024-resultados-generales.pdf>
- Diario La Quinta. (2 de mayo 2023). Iniciativa basada en la naturaleza busca mejorar uso eficiente del agua en sistemas agrícolas de la región. *Diario La Quinta*. Recuperado: <https://diariolaquinta.cl/2023/10/04/iniciativa-basada-en-la-naturaleza-busca-mejorar-uso-eficiente-del-agua-en-sistemas-agricolas-de-la-region/>
- Dirección General de Aguas (DGA). (1997). Resolución DGA Nº 216: *Declara Área de Restricción para nuevas extracciones de aguas subterráneas en el acuífero del valle del río Petorca*. Recuperado: https://www.google.com/url?sa=tysource=webyrct=jyopi=89978449yurl=https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2023/07/res_216.pdfyved=2ahUKewj2rdqu1ZWQAxUvq5UCHcRTHP0QFnoECBYQAQyusg=AOvVaw326XIQx0v191HZPq- IVnE

Dirección General de Aguas (DGA). (2004). Resolución Afecta N°204: Declara área de restricción acuífero río La Ligua. Ministerio de Obras Públicas. Recuperado:

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1068064>

Dirección General de Aguas (DGA). (2013). Cuencas hidrográficas de Chile (Capa vectorial shapefile). Geo portal. Recuperado: <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/download/589fddeb-4a43-37e7-bc14-d125b1cf7c61>

Dirección General de Aguas (DGA). (2013). Restricción y prohibición de acuíferos (Capa vectorial shapefile). Geo portal. Recuperado: <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/download/1304e317-0612-3a91-adc7-12360a7aec2b>

Dirección General de Aguas (DGA). (2016, 10 de mayo). Se constituyen las comunidades de aguas subterráneas de La Ligua y Petorca en Chile. Agua. Recuperado:

<https://www.iagua.es/noticias/chile/dga-chile/16/05/10/se-constituyen-comunidades-aguas-subterraneeas-ligua-y-petorca>

Dirección General de Aguas (DGA). (2017). *Actualización del balance hídrico nacional: Informe final, resumen ejecutivo (SIT N° 417)*. Ministerio de Obras Públicas, División de Estudios y Planificación. Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado: <https://uchile.cl/dam/jcr:c9895061-40f4-4f23-8cf7-64737495bbad/balancedhidricodga2017sit417resumenejecutivovf.pdf>

Dirección General de Aguas. (2018). Resolución Exenta N.º 19/2018: Declara zonas de prohibición para nuevas explotaciones de aguas subterráneas en SHAC de las cuencas de La Ligua y Petorca. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Recuperado: <https://bcn.cl/2suak>

Dirección General de Aguas. (2019). Declaración de agotamiento (Capa vectorial shapefile). Recuperado: <https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2024/07/DeclaracionesAgotamiento.zip>

Dirección General de Aguas. (2019). Subcuencas (Capa vectorial shapefile). Recuperado: https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2024/07/SubCuencas_BNA-1.zip

Dirección General de Aguas. (2020). Cuencas Banco Nacional de Aguas (Capa vectorial shapefile). Recuperado: https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2024/07/Cuencas_BNA.zip

Dirección General de Aguas. (2021). Decretos de Escasez Hídrica (Capa vectorial shapefile). Recuperado: <https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2024/07/DecretosEscasezHidrica.zip>

Dirección General de Aguas. (2023a). Áreas de restricción y zonas de prohibición de acuíferos (Capa vectorial shapefile). Ministerio de Obras Públicas. Recuperado: https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2024/07/PROT_AR_ZP_202302.zip

Dirección General de Aguas (DGA). (2023b). Boletín de información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. N.º 538. Recuperado:

https://www.google.com/url?sa=t&source=webyrct=j&yopi=89978449&url=https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2023/07/Boleti%25CC%2581n-DGA-febrero-2023.pdf&ved=2ahUKEwjry7Ti1JWQAxXys5UCHdAwBYIQFnoECBYQAQyusg=AOvVaw0bOmeusd-wDx0_eKbJWcSa

Dirección General de Aguas (DGA). (2023c). Informe de disponibilidad hídrica y gestión de recursos en cuencas críticas. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Recuperado:

<https://dga.mop.gob.cl/informe-final-mesa-nacional-del-agua/>

Dirección General de Aguas (DGA). (2024). Boletín N° 553 mayo 2024: Información hidrometeorológica.

Recuperado: https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2024/06/Informe_Mayo_2024-1.pdf

Dirección de Presupuestos (DIPRES). (2022). Fondo/Programa de Promoción de Exportaciones Agrícolas (FPEA/FPESA). Recuperado: <http://bibliotecadigital.dipres.cl/handle/11626/21706>

Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas. (2021). *Red Vial Chile*. Cobertura de líneas que representan la Red Vial Nacional, con su tipo de carpeta. Unidad de SIG y Cartografía. Recuperado:

<https://www.mapas.mop.cl>

Doménech, J. (2006). Huella social y desarrollo sostenible: un nuevo indicador de sostenibilidad. En Segundo Encuentro Internacional sobre Pobreza, Desigualdad y Convergencia. Universidad de Málaga.

Donoso, G., Calderón, C., y Silva, M. (2015). Informe final de evaluación infraestructura hidráulica de agua potable rural (APR). Santiago: Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas.

Recuperado:

https://www.google.com/url?sa=t&source=webyrct=j&yopi=89978449&url=https://www.dipres.gob.cl/597/articles-141243_informe_final.pdf

Duran-Llacer, I., Munizaga, J., Arumí, J. L., Ruybal, C., Aguayo, M., Sáez-Carrillo, K., Arriagada, L., y Rojas, O. (2020). Lessons to Be Learned: Groundwater Depletion in Chile's Ligua and Petorca Watersheds through an Interdisciplinary Approach. *Water*, 12(9), 2446. Recuperado:

<https://doi.org/10.3390/w12092446>

El Mercurio Campo. (5 de agosto 2019). *Ganadería de Petorca en estado terminal*. El Mercurio.

Recuperado: <https://www.elmercurio.com/Campo/Noticias/Redes/Detallenoticia.aspx?id=906454>

El Mercurio de Valparaíso. (2023, 25 de abril). La palta, una fruta de gran valor para la región. Recuperado:

<https://paltahass.cl/el-mercurio-valparaiso-2/>

- El Mostrador. (2019, 1 de septiembre). *El doloroso saldo de la peor sequía en Chile: 10 mil animales han muerto entre las regiones de Coquimbo al Maule*. Recuperado: <https://www.elmostrador.cl/dia/2019/09/01/el-doloroso-saldo-de-la-peor-sequia-en-chile-10-mil-animales-han-muerto-entre-las-regiones-de-coquimbo-al-maule/>
- Espinoza, T. M. R. (2018). Rol de la educación ambiental en la gestión ambiental local: Análisis de los programas ambientales en la Ilustre Municipalidad de Santiago, Chile. Repositorio Institucional. Recuperado: <https://estudiosurbanos.uc.cl/wp-content/uploads/2018/08/TESIS-TRE.pdf>
- Esri. (2024). ArcGIS Pro (versión 3.5.4) (Software de sistema de información geográfica). Environmental Systems Research Institute.
- Faggioni, T., y del Campo, L. (2022). Propuesta de Compensación Ambiental para la Huella Ecológica del Campus Rodelillo, Universidad Viña del Mar. *Revista de Investigación Científica y Tecnológica*, 6(2), 28-47. Recuperado: [https://doi.org/10.36003/Rev.investig.cient.tecnol.V6N2\(2022\)4](https://doi.org/10.36003/Rev.investig.cient.tecnol.V6N2(2022)4)
- Fragkou, M-C, Monsalve-Tapia, T., Pereira-Roa, V., y Bolados-Arratia, M. (2022). *Abastecimiento de agua potable por camiones aljibe durante la megasequía. Un análisis hidrosocial de la provincia de Petorca, Chile*. *EURE*, 48(145), 1-22. Recuperado: <https://doi.org/10.7764/eure.48.145.04>
- Fundación Amulén. (2019). *Pobres de agua: Radiografía del agua rural de Chile. Visualización de un problema oculto*. Fundación Amulén. Recuperado: https://www.fundacionamulen.cl/wp-content/uploads/2020/07/Informe_Amulen.pdf
- Fundación Amulén. (2022). *Sequía: La brecha más profunda*. Fundación Amulén. Recuperado: https://www.google.com/url?sa=tysource=webyrct=jyopi=89978449yurl=https://www.fundacionamulen.cl/wp-content/uploads/2022/07/Informe-Sequi%25CC%2581afinal_compressed.pdf
- Ghaleb, B. (2024). The importance of using SWOT analysis in business success. *Int. J. Asian Bus. Manag*, 3(4), 557-564. Recuperado: <https://doi.org/10.55927/ijabm.v3i4.10857>
- Gann, G., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C., Jonson, J., Y Dixon, K. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restoration Ecology*. 27: S1-S46. Recuperado: <https://doi-org.uvm.idm.oclc.org/10.1111%2Frec.13035>
- Garreaud, R., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., y Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadroughtn central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 6307-6327. Recuperado: <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>

- Garreaud, R., Boisier, J., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., y Veloso-Águila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439. Recuperado: <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Garreaud, R., Boisier, J., Christie, D., Le Quesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M., Barichivich, J., Galleguillos, M., Alvarez-Garretón, C., y Montecinos, A. (2025). Hyper droughts in central Chile: Drivers, impacts and projections. *Hydrology and Earth System Sciences*. Recuperado: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-517>
- Gliessman, S., García-Barrios, L., Gaspar, M., y Guadarrama-Zugasti, C. (2007). Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible. *Ecosistemas*, 16(1), 13-23.
- Gnanasanjevi, G., Balasubramaniam, P. y Gopishankar, S. (2025). Building Resilient Food Systems through Agroecology: Strategies and Impacts. *Eco. Env. Y Cons.*, 31(2), 806-809. Recuperado: <http://doi.org/10.53550/EEC.2025.v31i02.061>
- Gómez-Sal, A. (2000). Aspectos ecológicos de los sistemas agrícolas: las dimensiones del desarrollo. Universidad Autónoma de Madrid.
- Gómez-Sal, A., y González-García, A. (2007). A comprehensive assessment of multifunctional agricultural land-use systems in Spain using a multi-dimensional evaluative model. *Agriculture, ecosystems y environment*, 120(1), 82-91. Recuperado: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.06.020>
- GORE Valparaíso. (2020). Estrategia Regional de Desarrollo de la Región de Valparaíso 2020. *Una Región Diversa*. Recuperado: <https://proactiva.subdere.gov.cl/handle/123456789/317>
- Granziera, B., Hamrick, K., y Verdieck, J. (2024). Article 6 Explainer: Questions and Answers about the Cop Decisions on Carbon Markets and What They Mean for NDCs, Nature, and the Voluntary Carbon Markets. *The Nature Conservancy*. Recuperado: https://www.google.com/url?sa=t&source=webyrct=j&opi=89978449&url=https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/c/m/CM-TNC-Article-6-Explainer.pdf&ved=2ahUKEwjZh974w_uOAxWRjJUCHUFUOyIQFnoECCAQAQyusg=AOvVaw2hBYNu_hjhKvEjGYagChDTi
- Greenhouse Gas Protocol. (2011). El protocolo de gases de efecto invernadero: Estándar corporativo para la contabilidad y reporte de emisiones. World Resources Institute Y World Business Council for Sustainable. Recuperado: [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/standards/GHGP_GPC%20\(Spanish\).pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/standards/GHGP_GPC%20(Spanish).pdf)
- Greksa, A., Mihajlović, I., Ljubojević, M., Blagojević, B., Vijuk, M. I., Podunavac-Kuzmanović, S., Kovačević, S., y Štrbac, M. (2024). Investigation of Juncus and Iris Plant Potential-Two Native Serbian Species for

- Utilization in Nature-Based Solutions towards Improving the Quality of Water Contaminated with Zinc and Supporting Biodiversity. *Sustainability*, 16(15), 6467. Recuperado: <https://doi.org/10.3390/su16156467>
- Griscom, B., Adams, J., Ellis, P., Houghton, R., Lomax, G., Miteva, D., Schlesinger, W., Shoch, D., Siikamäki, J., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M., y Fargione, J. (2017). *Natural climate solutions*. Proceedings of the *National Academy of Sciences*, 114(44), 11645-11650. Recuperado: <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Guiloff, M., Mewes, I., Rivera, R., y Edwards, J. (2013). El derecho al agua como un derecho humano: El caso de la provincia de Petorca. En Informe anual sobre derechos humanos en Chile 2013 (pp. 255-286). Centro de Derechos Humanos, Universidad Diego Portales. Recuperado: <https://derechoshumanos.udp.cl/cms/wp-content/uploads/2020/12/Cap-7-Derecho-al-agua-como-ddhh-caso-provincia-de-petorca.pdf>
- Helms, M., y Nixon, J. (2010). Exploring SWOT analysis. Where are we now? A review of academic research from the last decade. *Journal of Strategy and Management*, 3(3), 215-251. Recuperado: <https://doi.org/10.1108/17554251011064837>
- Hernández-Pérez, E., García-Franco, J., Vázquez, G., y Cantellano de Rosas, E. (2022). Cambio de uso de suelo y fragmentación del paisaje en el centro de Veracruz, México (1989 - 2015). *Madera y bosques*, 28(1). Recuperado: <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812294>
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., y Mekonnen, M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. *Earthscan*. Recuperado: https://www.waterfootprint.org/resources/TheWaterFootprintAssessmentManual_English.pdf
- Instituto de Investigaciones Agropecuaria y Centro de Información de Recursos Naturales (INIA y CIREN). (2017). *Atlas agroclimático de Chile. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule (déficit hídrico, índice de aridez, heladas)*. Recuperado: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/bd0acf38-105f-4437-9e62-545a7099ffc5>
- Instituto Nacional de Derechos Humanos (INDH). (2014-2019). Misión de observación y seguimientos sobre crisis hídrica en Petorca. (Conclusiones y recomendaciones sobre derecho humano al agua). Recuperado: <http://bibliotecadigital.indh.cl/handle/123456789/774>
- Instituto Nacional de Derechos Humanos (INDH). (2021, 24 de marzo). Corte Suprema fija mínimo de 100 litros de agua por persona al día para Petorca. Recuperado: <https://www.indh.cl/corte-suprema-fija-minimo-de-100-litros-de-agua-por-persona-al-dia-para-petorca/>

- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (1992). Censo de población y vivienda 1992. INE. Recuperado: <https://biblioteca.inia.cl/items/a3e1b614-376b-4c64-9bf5-85ced4ca39e4>
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2002). Censo de población y vivienda 2002. INE. Recuperado: https://redatam-ine.ine.cl/redbin/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CENSO_2002ylang=esp
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2017). *Censo de población y vivienda 2017*. INE. Recuperado: <http://resultados.censo2017.cl>
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2024). Proyección de población comunal 2024. INE. Recuperado: <http://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/demografia-y-vitales/proyecciones-de-poblacion/proyecciones-de-poblaci%C3%B3n>
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2022). Compendio estadístico comunal 2022: Petorca. Gobierno de Chile. Recuperado: https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2023yidcom=5404
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 2 - Energy; Volume 4 - Agriculture, forestry, and other land use (AFOLU)*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Recuperado: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Recuperado: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- International Organization for Standardization. (2019). ISO 14064-3:2019 Greenhouse gases Part 3: Specification with guidance for the verification and validation of greenhouse gas statements. ISO
- International Organization for Standardization. (2018a). ISO 14064-1:2018: Greenhouse gases Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals. ISO
- International Organization for Standardization. (2018b). ISO 14067:2018: Greenhouse gases Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification. ISO
- Intergovernmental Panel on Climate Change, (IPCC). (2023). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, H. Lee, and J. Romero (eds.))* IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34. Recuperado: <https://doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>

- International Union for Conservation of Nature, (IUCN). (2020). Nature-based Solutions Global Standard: A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS. *International Union for Conservation of Nature*. Recuperado: <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.08.en>
- Ivanova D., Wood R., (2020). The unequal distribution of household carbon footprints in Europe and its link to sustainability. *Global Sustainability* 3, e18, 1-12. Recuperado: <https://doi.org/10.1017/sus.2020.12>
- Katariya I., Pradhan L., Tripathi N., (2025). Comparative Economic Analysis and Environmental Benefits of Agroforestry Systems: A Case Study from Saharanpur, India with Global Perspectives . *Indian Journal of Agricultural Research*. 59(4): 664-671. doi: 10.18805/IJArE.A-6308. Recuperado: <https://arccjournals.com/journal/indian-journal-of-agricultural-research/A-6308>
- Lee, S.-H., Kim, H., Moon, H., Kim, H.-S., Han, S.-S., Y Jeong, S. (2023). Effects of Wind Barrier Porosity and Inclination on Wind Speed Reduction. *Applied Sciences*, 13(14), 8310. Recuperado: <https://doi.org/10.3390/app13148310>
- Lee, F., Lai, J., Kantoush, S., y Sumi, T. (2024). Analysis of turbidity current plunging and floating woody debris in a reservoir during flood events. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 56, 102027. Recuperado: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102027>
- Le Monde Diplomatique Chile. (2017, junio). Violación del derecho al agua en Chile: Rodrigo Mundaca, vocero de MODATIMA. *Le Monde Diplomatique*. Recuperado: <https://www.lemondediplomatique.cl/violacion-del-derecho-al-agua-en-chile-rodrigo-mundaca-vocero-de-modatima.htm>
- Llorca-Jaña, M., Ortiz, C., Navarrete-Montalvo, J., y Valenzuela, R. (2017). La agricultura y la élite agraria chilena a través de los catastros agrícolas, c. 1830-1855. *Historia (Santiago)*, 50(2), 597-639. Recuperado: <https://dx.doi.org/10.4067/s0717-71942017000200597>
- Luebert, F., y Pliscoff, P. (2017). *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile (2.ª ed.)*. Editorial Universitaria. Recuperado: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181641>
- Machín, M. (2020, abril 18). *Valoración económica de bienes y servicios ambientales*. Recuperado: <https://www.gestiopolis.com/valoracion-economica-de-bienes-y-servicios-ambientales/>
- Marquet, P. Arellano, R. Arriagada, M. Fernández, A. Gaxiola, C. León, F. Meza, R. Larraín, P. Pliscoff, S. Reyes, J. y Vargas (2022). *Soluciones Basadas en la Naturaleza para Chile*. Resumen para Tomadores de Decisiones. *TNC, CCG, Santiago, Chile*. Recuperado: https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/SOLUCIONES_BASADAS_EN_LA_NATURALEZA_PARA_CHILE-NOV2022.pdf

- Marquet, P., y Rojas, M. (2021). Soluciones basadas en la naturaleza. *Zenodo*. Recuperado: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5736938>
- Mekonnen, M., y Hoekstra, A. (2011). The green, blue, and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600. Recuperado: <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Ministerio de Agricultura (Minagri). (1990). Modelo de Diagnóstico Agro frutícola (Capa vectorial shapefile). Recuperado: https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/wp-content/uploads/DESCARGAS/CAPAS/CLIMA_METEOROLOGIA_ATMOSFERA/CLIMA_CIREN/modelo_de_diagnostico_agrofruticola_nacional_1990.rar
- Ministerio de Agricultura (Minagri). (2007). Censo Agropecuario 2007 Especies frutales mayores Chile Continental (Capa vectorial shapefile). Recuperado: https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/wp-content/uploads/DESCARGAS/CAPAS/AGRICULTURA_GANADERIA/CENSO_AGROPECUARIO/cc_fruamay.rar
- Ministerio de Agricultura (Minagri). (2007). Censo Agropecuario 2007 Especies frutales menores Chile Continental (Capa vectorial shapefile). Recuperado: https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/wp-content/uploads/DESCARGAS/CAPAS/AGRICULTURA_GANADERIA/CENSO_AGROPECUARIO/cc_frumen.rar
- Ministerio de Agricultura (Minagri). (2007). Censo Agropecuario 2007 Riego Chile Continental (Capa vectorial shapefile). Recuperado: https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/wp-content/uploads/DESCARGAS/CAPAS/AGRICULTURA_GANADERIA/CENSO_AGROPECUARIO/cc_riegor.rar
- Ministerio de Agricultura (Minagri). (2007). Censo Agropecuario 2007 Uso de instrumentos de fomento Chile Continental (Capa vectorial shapefile). Recuperado: https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/wp-content/uploads/DESCARGAS/CAPAS/AGRICULTURA_GANADERIA/CENSO_AGROPECUARIO/cc_ifomento.rar
- Ministerio de Agricultura (Minagri). (2017). Zonas climáticas de Chile según Köppen-Geiger escala 1:1.500.000 (Capa vectorial shapefile). Recuperado: <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/download/8e85a12a-151d-31c0-9e7e-e356f92ece84>
- Ministerio de Energía. (ME) (2022). Informe Balance Nacional de Energía 2020. División de Políticas y Estudios Energéticos y Ambientales. Recuperado:

https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/2022_informe_anual_bne_2020.pdf

Ministerio de Bienes Nacionales. (2013). Comunidades agrícolas (Capa vectorial shapefile). Geo portal.

Recuperado: <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/download/c206db6e-81d2-39b5-bfd1-47d3311281cf>

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2013). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Sector Silvoagropecuario. Recuperado:

https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/02/Plan_Adaptacion_CC_S_Silvoagropecuario.pdf

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2016). Catastros de Uso de Suelo y Vegetación (Capa vectorial shapefile). Recuperado: <https://sit.conaf.cl/exp/ficha.php>

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2020). Pisos vegetacionales de Luebert y Pliscoff 2017 (Capa vectorial shapefile). Recuperado:

https://gis.mma.gob.cl/server/rest/services/IDE_2019/IDE_Biodiversidad/MapServer/10

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2021). Sitios prioritarios (Capa vectorial shapefile). Recuperado:

<https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/download/88a80f20-e4b6-360e-8d3a-4845271f8b57>

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2022). Estrategia nacional de biodiversidad y Cambio Climático. Gobierno de Chile. Recuperado:

https://www.google.com/url?sa=tysource=webyrct=jyopi=89978449yurl=https://estrategia-aves.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/03/MMA_2017_Estrategia_Nacional_Biodiversidad_2017-2030.pdf

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2023). Atlas de Riesgo Climático para Chile (ARCLIM). Recuperado:

https://arclim.mma.gob.cl/media/learning/ARCLIM_documentacion.pdf

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2024a). Lineamientos para la incorporación de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) para la adaptación al Cambio Climático. Gobierno de Chile. Recuperado:

<https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2024/01/Lineamientos-para-la-incorporacion-de-SbN.pdf>

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2024b). *Factores de emisión para el cálculo de la huella de carbono-Nivel básico (Versión 3, 28/11/2024)*. Programa HuellaChile, División de Cambio Climático.

Recuperado: https://huellachile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2024/11/HuellaChile-DCC-Factores-de-emision-nivel-basico_v3.pdf

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2025a). Guía para incorporar Soluciones Basadas en la Naturaleza en los planes de adaptación al Cambio Climático en Chile. División de Cambio Climático, Gobierno de Chile. Recuperado:

<https://www.google.com/url?sa=t&source=webyrct=jyopi=89978449&url=https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2025/03/Guia-para-incorporar-soluciones-basadas-en-la-naturaleza-en-los-planes-de-adaptacion-al-cambio-climatico-en-Chile-2025.pdf>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo, (MINVU) y Secretaría Regional Ministerial Valparaíso (SEREMI Valparaíso). (2014-2015). Plan Regulador Intercomunal de Valparaíso Satélite Petorca-Cabildo (Informes ambientales y memoria). Recuperado:

https://www.google.com/url?sa=t&source=webyrct=jyopi=89978449&url=https://eae.mma.gob.cl/storage/documents/02_2do_IA_PRM_Valparaiso-Petorca_Cabildo.pdf.pdf

Miranda, F. (2022). *Erosión de suelos y crisis hídrica: Las sombras del modelo agroexportador del Palto* (2da ed.). Fundación Terram. Recuperado: https://www.terram.cl/descargar/naturaleza/agua/app_-_ analisis_de_politicas_publicas/APP-70-Erosion-de-suelos-y-crisis-hidrica-las-sombras-del-modelo-agroexportador-de-palto.pdf

Molina, M., de, García, D., y Casado, G. (2017). Politizando el consumo alimentario: estrategias para avanzar en la transición agroecológica. *Redes*, 22(2), 31-55. Recuperado:

<https://doi.org/10.17058/redes.v22i2.9430>

Montero, M., y del Campo, L. (2024). Evaluación del potencial de reducción de los gases de efecto invernadero de los certificados de servicios ambientales otorgados en el Paraguay bajo el marco de la Ley 3001. *Revista de Investigación Científica y Tecnológica*, 8(2), 99-119. Recuperado:

[https://doi.org/10.36003/Rev.investig.cient.tecnol.V8N2\(2024\)7](https://doi.org/10.36003/Rev.investig.cient.tecnol.V8N2(2024)7)

Municipalidad de Petorca. (2021, 9 de diciembre). Estrategia Energética Local de Petorca (EEL Petorca) (pp. 19-21). Recuperado:

<https://www.google.com/url?sa=t&source=webyrct=jyopi=89978449&url=https://www.comunaenergetica.cl/wp-content/uploads/2021/12/EEL-Petorca-.pdf>

Municipalidad de Quilleco. (2024). *Plan de Acción Municipal 2024* (incluye área estratégica de medio ambiente). Municipalidad de Quilleco. Recuperado:

https://municipalidadquilleco.cl/Municipalidad%20de%20Quilleco/transparencia/20_Otros_Antecedentes_Municipales/7_PDA/2024.pdf

Muñoz, A., Klock-Barría, K., Álvarez-Garretón, C., Aguilera-Betti, I., González-Reyes, Á., Lastra, J., Chávez, R., Barría, P., Christie, D., Rojas-Badilla, M., y Le Quesne, C. (2020). Water Crisis in Petorca Basin, Chile: The Combined Effects of a Mega-Drought and Water Management. *Water*, 12 (3), 648. Recuperado:

<https://doi.org/10.3390/w12030648>

Naciones Unidas. (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común. ONU. Recuperado:

https://www.google.com/url?sa=t&source=webyrct=j&opi=89978449&url=https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf

Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado: <https://sdgs.un.org/2030agenda>

Naciones Unidas. (2022). Agenda 2030 y el compromiso global por la sostenibilidad. Recuperado: <https://sdgs.un.org/es/goals>

Nazir, N., Lee, K., Ab Rahim, A., Goh, T., Mokhtar, M., Abdullah, W y Mamat, R. (2025). Delineating the fundamental attributes and traits of nature-based solutions in wastewater management. *Journal of Environmental Management*, 380, 124811. Recuperado: <https://doi.org.uvm.idm.oclc.org/10.1016/j.jenvman.2025.124811>

Nguyen, C., Ton-That, L., y Pham, T. (2024). Land use, land cover changes, and expansion of artificial reservoirs in Eastern Thailand: implications for agriculture and vegetation drought reduction. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(11), 1009. Recuperado: <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13151-7>

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias y Centro de Información de Recursos Naturales (ODEPA y CIREN). (2023). Catastro Frutícola, Región de Valparaíso 2023. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias y Centro de Información de Recursos Naturales. Recuperado: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstreams/52f7900-febb-40c5-b4bc-498c8170da80/download>

Olivadese, M. (2025). Rethinking Nature-Based Solutions: Unintended Consequences, Ancient Wisdom, and the Limits of Nature. *Land*, 14(6), 1272. Recuperado: <https://doi.org/10.3390/land14061272>.

Organization for Economic Co-operation and Development. (2008). Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide. OECD Publishing. Recuperado: <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>

Organization for Economic Co-operation and Development. (2021). OECD environmental indicators, modelling, and outlooks. OECD. Recuperado: <https://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Recuperado: <https://sdgs.un.org/2030agenda>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), (2014). *Water-energy-food nexus*. Recuperado: <https://www.fao.org/land-water/water/watergovernance/waterfoodenergynexus/en/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), (2019). *Mensajes clave Simposio Mundial sobre la Erosión del Suelo*. Recuperado: <https://www.fao.org/about/meetings/soil-erosion-symposium/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), (2021). *Gobernanza del agua en territorios agrícolas*. Recuperado: <https://www.google.com/url?sa=tYsource=webYrct=jYopi=89978449Yurl=https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/736becbb-7457-49dd-a5ee-fe98b9c1dbd6/content>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), (2025). *Creación de sistemas alimentarios resilientes*. Recuperado: https://www.google.com/url?sa=tYsource=webYrct=jYopi=89978449Yurl=https://www.fao.org/fileadmin/templates/cfs/CFS53/Plenary_documents/Inf.21_HLPE-FSN_Report/Compiled_ES.pdf
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD) (2024). *Environmental Performance Reviews*, OECD Publishing, Paris. Recuperado: <https://doi.org/10.1787/5bc65d36-en>
- Pagiola, S., Honey-Rosés, J., Y Freire-González, J. (2020). Assessing the permanence of land-use change induced by payments for environmental services: Evidence from Nicaragua. *Tropical Conservation Science*, 13. Recuperado: <https://doi.org/10.1177/1940082920922676>
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. (2019). *Perfeccionamiento de 2019 de las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau, y S. Federici, Eds.). IPCC. Recuperado: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Panez-Pinto, A., Mansilla-Quiñones, P., y Moreira-Muñoz, A. (2018). Agua, tierra y fractura socio-metabólica del agronegocio. Actividad frutícola en Petorca, Chile. *Bitácora Urbano Territorial*, 28(3), 153-160. Recuperado: <https://doi.org/10.15446/bitacora.v28n3.72210>
- Pareto, A. (2021). Normalization (of an Indicator) Composite Indicator Construction. *Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research*. Springer, Cham. Recuperado: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69909-7_104641-1
- Patange, O., Purohit, P., Klimont, Z., Garg, A., Y Avashia, V. (2022). Mitigation scenarios for CH₄ and N₂O emissions from Indian agriculture. *IASA*. Recuperado:

https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/18025/1/CL3.2.2_CH4_N2O_scenarios.pdf

- Phadermrod, B., Crowder, R., y Wills, G. (2019). Importance-performance analysis-based SWOT analysis. *International journal of information management*, 44, 194-203. Recuperado: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2016.03.009>
- Pires, A., Barbano, M., y Barbano, A. (2021). Agricultural policy instruments and the Sustainable Development Goalsn semi-arid basins of Latin America and Europe. *Journal of Environmental Management*, 295, 113132. Recuperado: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113132>
- Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, (PUCV), (2023 junio 8). *Estudiantes elaboran humedales artificiales para filtrar aguas grises*. Recuperado: <https://www.pucv.cl/pucv/estudiantes-elaboran-humedales-artificiales-para-filtrar-aguas-grises>
- Porcuna, J. (2007). Producción integrada. Una estrategia de tránsito hacia sistemas más sostenibles. *Ecosistemas*, 16(1). Recuperado: <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/136>
- Portal Agro Chile. (2 de enero de 2024). *La Agricultura Regenerativa: Un enfoque vital para la sostenibilidad ambiental*. Recuperado: <https://www.portalagrochile.cl/2024/01/02/la-agricultura-regenerativa-un-enfoque-vital-para-la-sostenibilidad-ambiental/>
- Pueyo-Ros, J., Mendoza, E., Buttiglieri, G., y Comas, J. (2025). Nat4Wat: a co-developed decision-support system for resilient urban water management with nature-based solutions. *Environmental Modelling & Software*, 106797. Recuperado: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106797>
- Puyt, R., Lie, F., y Wilderom, C. (2023). The origins of SWOT analysis. *Long range planning*, 56(3), 102304. Recuperado: <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2023.102304>
- Raworth, K. (2017). Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist. *Chelsea Green Publishing*. Recuperado: <https://doi.org/10.14482/indes.26.2.330>
- Recalde, Y., Popartan, L., y Rodríguez-Roda, I. (2024). Nature-based solutions for water management: Analysis of the Andean context. *Blue-Green Systems*, 6(1), 153-168. Recuperado: <https://doi.org/10.2166/bgs.2024.103>
- Reyes, M., Tung, C., y Sun, S. (2025). Conceptual Framework for Nature-Based Solutions: A Systematic Review and Co-occurrence Analysis. *Nature-Based Solutions*, 100276. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2025.100276>
- Rodríguez, A. (2016). Observaciones a la evolución y comunicación ambiental de Modatima: Elaboraciones semánticas y discursivas en el conflicto ambiental de la provincia de Petorca. Recuperado: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/159347>

- Rodríguez, J., Casanova, M., y Gómez, A. (2023). Regenerative agriculture increases soil water infiltration and organic carbon in semi-arid Chile. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 354, 108564. Recuperado: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108564>
- Rona, V. (2019). Chile: Acuerdos de Producción Limpia (Serie Experiencias de Desarrollo Compatible con el Clima, LEDS LAC). Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático / LEDS LAC. Recuperado: <https://www.google.com/url?sa=t&source=webyrct=j&opi=89978449&url=https://ledslac.org/wp-content/uploads/2019/09/EdC-APL-Chile-30.07.19-vf.pdf>
- Rótolo, M., y Zulaica, M. L. (2021). Vulnerabilidad socioambiental y resiliencia en dos barrios del borde urbano de la ciudad de Mar del Plata: Aportes para la gestión local. *Astrágalo. Cultura de la Arquitectura y la Ciudad*, 1(28), 73-102. Recuperado: <https://doi.org/10.12795/astragalo.2021.i28.04>
- Sanhueza, M. (2016). Estudio básico Diagnóstico para desarrollar plan de riego en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca: informe final. Recuperado: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstreams/c308f18e-8949-4d94-bd3b-2903600105a8/download>
- Santibáñez Q., y Santibáñez V. (2014). Atlas del Cambio Climático en las zonas de régimen árido y semiárido: Regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Centro de Agricultura y Medio Ambiente y Ministerio del Medio Ambiente. Recuperado: <https://www.google.com/url?sa=t&source=webyrct=j&opi=89978449&url=https://educacion.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/09/Atlas-CC-ZonaAridas-Semiaridas-Chile.pdf>
- Santos, E. (2025). Nature-Based Solutions for Water Management in Europe: What Works, What Does Not, and What's Next? *Water*, 17(15), 2193. Recuperado: <https://doi.org/10.3390/w17152193>
- Schuschny, A., y Soto de la Rosa, H. (2009). *Guía metodológica: Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible* (Doc. de proyecto N.º 255). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Recuperado: <https://hdl.handle.net/11362/3661>
- Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C. A., Smith, A., y Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190120. Recuperado: <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0120>
- Secretaría Regional Ministerial, (SEREMI), del Medio Ambiente, Región de Valparaíso. (2025, 30 de junio). Seremi de Medio Ambiente y SAG avanzan en la protección del Palmar de Petorca. Recuperado: <https://mma.gob.cl/seremi-de-medio-ambiente-y-sag-avanzan-en-la-proteccion-del-palmar-de-petorca/>

- Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). (2020). Sistema de Incentivos para la Recuperación de Suelos Degradados (SIRSD): Bases y lineamientos. Recuperado: <https://www.sag.gob.cl/ambitos-de-accion/programa-de-recuperacion-de-suelos-degradados>
- Servicio Nacional de Turismo. (2012). Atractivos turísticos nacionales (Capa vectorial shapefile). Geo portal. Recuperado: <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/download/7c9cb305-dba5-3b29-8d32-a24d1721eeb6>
- Servicio Nacional de Turismo. (2015). Circuitos turísticos (Capa vectorial shapefile). Geo portal. Recuperado: <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/download/e1dfdfbc-b861-3b92-87cd-26d8bc964171>
- Streck, C., Minoli, S., Roe, S., Barry, C., Brander, M., Chiquier, S. y Zarin, D. (2025). Considering durabilityn carbon dioxide removal strategies for climate change mitigation. *Climate Policy*, 1-9. Recuperado: <https://doi.org/10.1080/14693062.2025.2501267>
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE). (2023). *División Político-Administrativa 2023* (Shapefile de polígonos). Unidad de Investigación Territorial, Departamento de Estudios y Análisis Territorial, División de Políticas y Estudios. Recuperado: <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/download/912598ad-ac92-35f6-8045-098f214bd9c2>
- The GlobalEconomy.com, (2025). Chile: Emisiones de CO2 per cápita. Recuperado: https://es.theglobaleconomy.com/Chile/Carbon_dioxide_emissions_per_capita/#:~:text=Para%20ese%20indicador%2C%20proporcionamos%20datos%20para%20Chile,dato%20de%202023%20es%204.27%20toneladas%20m%C3%A9tricas.
- Theodoridou, T., y Vitopoulou, A. (2025). Comparative analysis of Nature-based Solutions for urban flood management in Mediterranean cities. In E3S Web of Conferences. EDP Sciences. Vol. 669, p. 01003. Recuperado: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202566901003>
- Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P., Moreno, G., y Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, ecosystems Y environment*, 230, 150-161. Recuperado: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>
- Udawatta, R., y Gantzer, C. (2022). Soil and water ecosystem services of agroforestry. *Journal of Soil and Water Conservation*, 77(1), 5A-11A. Recuperado: <https://doi.org/10.2489/jswc.2022.1028A>
<https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.2489/jswc.2022.1028A?needAccess=true>
- United States Geological Survey (USGS). (2024). *Landsat Collection 2 Level-2 Science Products*. U.S. Department of the Interior. Recuperado: <https://www.usgs.gov/landsat>

- Universidad de Chile. (2020, 27 de agosto). *La investigación que detalla la disponibilidad de agua en Chile* (Balance Hídrico para DGA). Recuperado: <https://www.uchile.cl/noticias/166819/la-investigacion-que-detalla-la-disponibilidad-de-agua-en-chile>
- Vélez, L., y Gómez-Sal, A. (2008). "Un marco conceptual y analítico para estimar la integridad ecológica a escala de paisaje." *ARBOR. Ciencia, Pensamiento y Cultura*, 184(729), 31-44. Recuperado: <https://doi.org/10.3989/arbor.2008.i729.217>
- Vicuña, S., Scott, C., y Meza, F. (2022). A socio-ecological resilience index for water-stressed basins in Chile. *Science of The Total Environment*, 838, 156452. Recuperado: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156452>
- Vilches, N. (2021). No es sequía es saqueo: Movimientos sociales por la recuperación del agua en Chile. De la protesta social a la Constituyente, auto etnografía del caso de Modatima. *Clivaje. Estudios y testimonios del conflicto y el cambio social*, (9). Recuperado: https://www.researchgate.net/publication/357517866_No_es_sequia_es_saqueo_Movimientos_sociales_por_la_recuperacion_del_agua_en_Chile_De_la_protesta_social_a_la_Constituyente_autoetnografia_del_caso_de_Modatima
- Villalobos, P. (2023). Desarrollo de una estrategia de gestión hídrica aplicada a la Municipalidad de Petorca. Recuperado: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/195012>
- Villena, M., Melo, O., Ansoleaga, A., Campos, B., Concha, J., Delgado, R., y Villena, J. (2017). Estudio de adaptación a la restricción de recursos hídricos en Chile. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Recuperado: https://opia.fia.cl/601/articles-92358_archivo_01.pdf
- Wang, Q., Barré, P., Deng, O., Lan, T., Zeng, M., Gao, X., y Le Noë, J. (2025). Soil carbon sequestration, climate change mitigation, nitrogen pollution, and agro-food supply: Navigating trade-offs in future cropland management strategies. *Environmental Research Letters*, 20(4), 044004. Recuperado: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adbc04>
- Worldometer. (2022). Chile CO₂ Emissions. Recuperado: <https://www.worldometers.info/co2-emissions/chile-co2-emissions/>
- WWF. (2022). Living Planet Report 2022. *Worldwide Fund for Nature*. Recuperado: https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2022-10/LPR_2022_Full_Report.pdf
- Youlton C. (2005) *Cuantificación de la erosión en camellones a favor de pendiente para el cultivo frutal de laderas en el valle de Quillota, V región, Chile*. Recuperado: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/33617>

- Youlton, C., Espejo, P., Biggs, J., Norambuena, M., Cisternas, M., Neaman, A., y Salgado, E. (2010). Quantification and control of runoff and soil erosion on avocado orchards on ridges along steep-hillslopes. *Ciencia investigación agraria: revista latinoamericana de ciencias de la agricultura*, 37(3), 113-123. Recuperado: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-16202010000300010>
- Youlton, C., Squeo, F., y Gutiérrez, A. (2016). Distribución, tamaño y estructura poblacional de *Jubaea chilensis* en “Las Palmas”, Petorca. *Bosque*, 37(3), 501-507. Recuperado: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002016000300007>
- Zarei, M., & Shahab, S. (2025). Nature-Based Solutions in Urban Green Infrastructure: A Systematic Review of Success Factors and Implementation Challenges. *Land*, 14(4), 818. <https://doi.org/10.3390/land14040818>