

TRANSFORMACIONES SOCIOECOLÓGICAS EN LA CUENCA DEL ITATA (1990-2010): CONDICIONES BASALES PRE-MEGASEQUÍA EN CHILE CENTRAL

Socio-ecological transformations in the Itata basin (1990–2010):
Baseline conditions prior to the megadrought in Central Chile

Juan Sebastián Donoso Alarcón | dono_59@hotmail.com

RESUMEN: El estudio caracteriza las condiciones basales pre-megasequía en la cuenca inferior del río Itata (Chile central, 1.960,5 km²) durante 1990-2010, analizando interrelaciones entre capacidad agroecológica, disponibilidad hídrica y transformaciones socioeconómicas. Mediante la integración de Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio se evaluó la correspondencia entre aptitud territorial y usos efectivos del suelo, complementada con modelación hidrológica retrospectiva y análisis multitemporal de cobertura vegetal.

Los resultados muestran un superávit hídrico climático persistente (balance medio: 674,11 mm), aunque con alta variabilidad interanual (C.V. 33-43%) y marcada diferenciación espacial: las estaciones costeras registran superávits significativamente menores que las precordilleranas, evidenciando un gradiente orográfico oeste-este. El período 1991-1996 concentra los años de menor superávit, coincidiendo con fases *La Niña*. El análisis multitemporal documentó la expansión de plantaciones forestales (+50,76%), drástica reducción del bosque nativo (-61,88%) y retroceso agrícola (-8.801 ha). La evaluación territorial evidencia desacoplamiento crítico entre capacidad agroecológica y usos actuales. Estas transformaciones coinciden con cambios en la dinámica demográfica, envejecimiento poblacional, y un IDH promedio de 0,607, configurando fragilidades estructurales posteriormente exacerbadas por la megasequía post-2010.

PALABRAS CLAVES: Capacidad agroecológica – Vulnerabilidad hídrica – Evaluación multicriterio – Transformaciones territoriales – Sistemas socioecológicos – Cuenca hidrográfica – Chile central

SUMMARY: *The study characterizes the pre-megadrought baseline conditions in the lower Itata River basin (central Chile, 1,960.5 km²) over the period 1990–2010, analyzing the interrelationships between agroecological capacity, water availability, and socioeconomic transformations. By integrating Geographic Information Systems and Multi-Criteria Evaluation, the correspondence between land suitability and actual land uses was assessed, supplemented by retrospective hydrological modeling and multitemporal analysis of vegetation cover.*

The findings show a persistent climatic water surplus (average balance: 674.11 mm), although with high interannual variability (C.V. 33–43%) and marked spatial differentiation: coastal stations record significantly lower surpluses than those in the foothills, indicating a west-to-east orographic gradient. The 1991–1996 period concentrates the years with the lowest surplus, corresponding to La Niña phases. The multitemporal analysis documented the expansion of forest plantations (+50.76%), a drastic reduction in native forest (-61.88%), and agricultural retreat (-8,801 ha). The territorial assessment reveals a critical mismatch between agroecological capacity and current land uses. These transformations coincide with changes in demographic dynamics, population aging, and an average HDI of 0.607, creating structural vulnerabilities that were subsequently exacerbated by the post-2010 megadrought.

KEY WORDS: *Agroecological capacity – Water vulnerability – Multi-criteria assessment – Territorial transformations – Socio-ecological systems – Watershed – Central Chile*

INTRODUCCION

Desde 2010, Chile central enfrenta una megasequía sin precedentes en el registro instrumental, caracterizada por un déficit sostenido del 30% en precipitaciones y temperaturas entre 0,5-1,5°C sobre el promedio histórico, afectando desde la *Región de Coquimbo* hasta *La Araucanía* (Garreaud et al., 2017; 2019). Este evento, extraordinario en el último milenio según reconstrucciones dendrocronológicas, ha generado impactos hidrológicos, ecológicos y socioeconómicos (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR2], 2015). Sin embargo, comprender las dinámicas actuales de vulnerabilidad hídrica requiere analizar las condiciones basales que precedieron este fenómeno en la *Región de Ñuble*. El período 1990-2010 constituye así una ventana temporal para caracterizar las debilidades estructurales, tanto biofísicas como socioeconómicas, que posteriormente fueron exacerbadas por la megasequía.

Las cuencas hidrográficas en contextos mediterráneos representan regímenes socioecológicos complejos donde interactúan procesos hidrológicos, transformaciones territoriales y dinámicas socioeconómicas (Scown et al., 2017). Estos regímenes exhiben características de no-linealidad, heterogeneidad espacial y ciclos de retroalimentación que configuran itinerarios de cambio diferenciados (Ostrom, 2009; Folke et al., 2010). La situación hídrica, en este marco, emerge no solo como fenómeno climático sino como construcción socioecológica resultante de interacciones entre disponibilidad biofísica de agua, patrones de uso del territorio y arreglos institucionales que regulan el acceso al agua (Mehta, 2007).

La cuenca inferior del río *Itata*, ubicada en la *Región de Ñuble* (36°10' - 36°43' S; 72°10' - 72°52' O), con una superficie de 1.960,50 km², constituye un caso de estas dinámicas. Durante 1990-2010 este territorio experimentó transformaciones en sus patrones de uso del suelo, particularmente la expansión de plantaciones forestales comerciales (*Pinus radiata* y *Eucalyptus spp.*) incentivadas por el Decreto Ley 701 de 1974, que estableció subsidios estatales para forestación con especies exóticas de rápido crecimiento y alto consumo de agua. Simultáneamente, la cuenca enfrentó variabilidad pluviométrica característica de climas mediterráneos (700-1200 mm/año, concentrados entre mayo-octubre), conformando un escenario de vulnerabilidad hídrica que influyó en las dinámicas socioproductivas locales.

La expansión de plantaciones forestales en Chile central ha sido ampliamente documentada desde los años 1970. En la cordillera de la Costa entre los ríos *Maule* e *Itata*, Echeverría et al. (2006) registraron una pérdida del 67% de bosque nativo entre 1975 y 2000, equivalente a una tasa anual de 4,5%. Estudios posteriores confirmaron que esta transformación continuó en las décadas siguientes (Heilmayr et al., 2016; Miranda et al., 2017; Rivas & Zapata, 2024), estableciendo a la provincia de *Itata* como la cuarta provincia con mayor superficie de plantaciones forestales en Chile, con 156.000 hectáreas al 2021 (*Plantaciones Forestales*, 2024).

Investigaciones han documentado los impactos hidrológicos de plantaciones forestales exóticas en Chile central. Álvarez-Garretón et al. (2021) demostraron que incrementos de 10.000 ha en plantaciones forestales reducen el escurrimiento medio anual entre 2,2% y 7,2%, con mayor impacto en cuencas más secas. White et al. (2021) encontraron que tanto *Pinus radiata* como *Eucalyptus globulus* presentan evapotranspiración de aproximadamente 100 mm/año superior al bosque nativo en la cordillera de la costa de Chile central. Boisier et al. (2025) estimaron que la industria forestal, desarrollada principalmente entre las décadas de 1970 y 2000, incrementó el consumo hídrico nacional en aproximadamente 80 m³/s, intensificando la presión sobre recursos hídricos en cuencas con plantaciones intensivas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus*, particularmente en la cordillera de la costa de Chile central. Estos hallazgos afirman que las transformaciones territoriales durante el período pre-megasequía ya configuraban condiciones de estrés hídrico, las cuales fueron posteriormente agravadas por el déficit pluviométrico sostenido post-2010.

Sin embargo, los estudios existentes han abordado mayormente aspectos hidrológicos o productivos de manera sectorial, con menor atención a las implicaciones socioeconómicas

integradas. Persisten vacíos sobre: (1) la correspondencia espacial entre capacidad agroecológica del territorio y usos efectivos del suelo, particularmente en cuencas menores; (2) las interrelaciones entre déficit hídrico, transformaciones de cobertura vegetal y dinámicas demográficas locales; y (3) la caracterización sistemática de condiciones basales pre-megasequía, esencial para evaluar impactos posteriores y comprender la construcción histórica de fragilidades actuales.

El estudio examina las transformaciones socioecológicas en la cuenca inferior del río *Itata* durante 1990-2010, analizando dos dimensiones interrelacionadas: primero, la evaluación de la capacidad agroecológica del territorio mediante integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Evaluación Multicriterio (EMC), contrastándola con usos actuales del suelo; segundo, el análisis de implicaciones socioeconómicas de la variabilidad hídrica, examinando transformaciones demográficas, estructura productiva e índices de desarrollo humano. La hipótesis central propone que durante el período pre-megasequía, pese a la persistencia de un superávit hídrico climático anual, la combinación de variabilidad pluviométrica interanual, déficits estacionales estivales, prácticas inadecuadas de uso del suelo y expansión de plantaciones forestales con alta evapotranspiración generó un deterioro socioecológico progresivo que afectó las condiciones socioeconómicas de la población local, configurando fragilidades estructurales que serían posteriormente amplificadas por la megasequía.

El estudio caracteriza las condiciones basales que precedieron la megasequía, proporcionando una línea base temporal para evaluar impactos posteriores; segundo, identifica desacoples entre aptitud territorial y usos actuales, evidenciando déficits de planificación ecológica con implicaciones para la gestión sostenible de cuencas; tercero, documenta mecanismos de retroalimentación entre transformaciones territoriales, disponibilidad hídrica y condiciones socioeconómicas en un contexto mediterráneo. Estos hallazgos resultan particularmente relevantes considerando que las proyecciones climáticas para Chile central indican reducción de precipitaciones del 5-20% hacia 2050 y aumento en la recurrencia de megasequías, de cada 300 años históricamente, a cada 20 años bajo escenarios pesimistas de emisiones (Boisier et al., 2018), lo que demanda comprender dinámicas de vulnerabilidad para orientar políticas de adaptación territorial.

DESARROLLO

La cuenca hidrográfica como sistema socioecológico

Las cuencas hidrográficas constituyen unidades territoriales donde convergen procesos biofísicos y dinámicas sociales, configurando sistemas socioecológicos complejos caracterizados por interacciones no-lineales, ciclos de retroalimentación y heterogeneidad espaciotemporal (Ostrom, 2009; Gain et al, 2020). Esta conceptualización representa una evolución desde visiones puramente hidrológicas hacia marcos integrados que reconocen la indivisibilidad entre sistemas sociales y ecológicos (Berkes et al., 1998; Folke et al., 2010).

Los sistemas socioecológicos en cuencas hidrográficas exhiben cinco atributos fundamentales (Gain et al., 2020): causalidad (interacciones entre variables del sistema donde cambios en un proceso causan cambios en otro), retroalimentación (relaciones interactivas que crean ciclos donde los resultados retroalimentan el origen del proceso), no-linealidad (desproporcionalidad entre entradas y salidas que puede conducir a puntos de inflexión), heterogeneidad (variabilidad espaciotemporal reconocida como indicador temprano de puntos de inflexión), y dinámicas multiescala (retroalimentaciones e interacciones a través del tiempo y el espacio). Estos atributos configuran pequeñas perturbaciones que pueden generar transformaciones sistémicas, mientras que grandes presiones pueden ser absorbidas sin cambios sustanciales dependiendo de las condiciones de resiliencia del sistema.

La gestión de cuencas bajo esta perspectiva requiere superar enfoques sectoriales fragmentados que históricamente han dominado la administración de recursos hídricos (Molle,

2009). La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) emerge como paradigma que promueve el desarrollo coordinado del agua, tierra y recursos relacionados para maximizar bienestar económico y social sin comprometer la sostenibilidad de ecosistemas vitales (Naciones Unidas, 2024). Sin embargo, la implementación efectiva de GIRH enfrenta desafíos significativos: a ritmo actual, el mundo no alcanzará la gestión sostenible del agua hasta 2049, y para 2030 al menos 3.300 millones de personas carecerán de marcos de gobernanza efectivos para balancear demandas hídricas competitivas (Naciones Unidas, 2024).

En regiones con clima mediterráneo, donde estacionalidad pluviométrica y variabilidad interanual configuran regímenes hídricos complejos (Grantham et al., 2013), la perspectiva de sistemas socioecológicos resulta relevante. Estos territorios enfrentan creciente estrés hídrico derivado de combinaciones entre factores climáticos (sequías recurrentes, aumento de evapotranspiración), transformaciones territoriales (expansión agrícola, forestación, urbanización) y dinámicas sociopolíticas (asignación de derechos de agua, conflictos sectoriales, desigualdades en acceso).

Balance hídrico y escasez en contextos de cambio climático

El balance hídrico en una cuenca representa la ecuación fundamental que relaciona entradas (precipitación) y salidas (evapotranspiración, escurrimiento) de agua en un territorio determinado (Chow et al., 1994; Vich, 1996). Este balance constituye un indicador para evaluar la disponibilidad hídrica y vulnerabilidad ante cambios climáticos o transformaciones territoriales.

La vulnerabilidad hídrica emerge como fenómeno físico derivado de condiciones hidrometeorológicas y como construcción socioecológica resultante de interacciones entre disponibilidad biofísica, patrones de uso del territorio y arreglos institucionales (Mehta, 2007). Esta conceptualización desafía visiones deterministas que atribuyen escasez únicamente a déficits pluviométricos, reconociendo que factores sociales, económicos y políticos configuran condiciones de estrés hídrico tanto o más que variables climáticas (Swyngedouw, 2009).

En regiones mediterráneas, de marcada estacionalidad, con precipitaciones concentradas en meses invernales y déficit estivales prolongados, se conforman regímenes hídricos que demandan estrategias adaptativas de almacenamiento, gestión de demanda y asignación intertemporal. El cambio climático intensifica estos patrones, proyectándose reducciones de 5-20% en precipitaciones y aumentos en frecuencia e intensidad de sequías para mediados del siglo XXI (Boisier et al., 2018).

Las transformaciones en cobertura vegetal, particularmente la expansión de plantaciones forestales comerciales con especies de alto consumo hídrico como *Pinus radiata* y *Eucalyptus*, modifican significativamente los flujos hidrológicos. Investigaciones en Chile central demuestran que estas plantaciones presentan una evapotranspiración superior al bosque nativo (White et al., 2021), y que el incremento espacial en plantaciones forestales reduce el escurrimiento medio anual entre 2,2% y 7,2% dependiendo de características de la cuenca (Álvarez-Garretón et al., 2021). Estos hallazgos se convierten en mecanismos de retroalimentación para la toma de decisiones sobre uso del suelo, considerando que la modificación de la disponibilidad hídrica condiciona opciones productivas futuras.

La denominada memoria hidrológica resulta relevante para comprender respuestas particulares de cuencas ante déficits pluviométricos. Cuencas con mayor memoria, determinada por características geológicas, edáficas y de cobertura vegetal que favorecen el almacenamiento y la liberación gradual de agua, exhiben mayor capacidad para amortiguar impactos de sequías de corta duración, pero mayor vulnerabilidad ante sequías prolongadas donde las reservas acumuladas se agotan (Álvarez-Garretón et al., 2021).

Capacidad de acogida territorial y planificación bajo cambio climático

La capacidad de acogida territorial refiere a la aptitud de un territorio para soportar determinados usos sin degradar sus valores ecológicos y productivos (Gómez Orea, 1994). Aplicado al ámbito agroecológico, permite evaluar la idoneidad de los suelos para sostener distintos tipos de producción, considerando tanto limitaciones biofísicas como impactos ambientales potenciales (Delgado & Méndez, 1996).

La evaluación de capacidad de acogida implica la combinación de múltiples criterios heterogéneos mediante técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) integradas con Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Malczewski, 2004). Estas técnicas han evolucionado significativamente desde formulaciones clásicas basadas en superposición lineal ponderada hacia enfoques que incorporan lógica difusa, algoritmos de aprendizaje automático y análisis de sensibilidad (Liao et al., 2023), permitiendo análisis espacialmente explícitos que visualizan distribución de aptitudes y facilitan procesos de toma de decisiones

Persiste el debate metodológico sobre los criterios de ponderación de factores (Greco et al., 2019). Mientras los enfoques tradicionales dependen de juicios de expertos o consultas a actores clave, susceptibles a subjetividad y sesgos, aproximaciones recientes exploran métodos estocásticos y aprendizaje automático para derivar pesos de importancia basados en patrones observados en datos (Kizielewicz et al., 2024; Liao et al., 2023). La elección metodológica implica concesiones entre objetividad estadística y pertinencia contextual, pues ponderaciones óptimas para maximizar eficiencia económica pueden diferir de aquellas que priorizan sostenibilidad ecosistémica o equidad social.

En contextos de cambio climático, la planificación territorial enfrenta desafíos adicionales derivados de la incertidumbre sobre condiciones futuras. Los escenarios climáticos proyectan modificaciones en regímenes de temperatura, precipitación y evapotranspiración que alterarán aptitudes actuales del territorio (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023). Esto demanda enfoques adaptativos de planificación que incorporen flexibilidad para ajustar estrategias ante condiciones cambiantes (Colombo & Byer, 2012), en contraste con modelos tradicionales de planificación estática que asumen condiciones climáticas estacionarias (Fletcher et al., 2019).

La correspondencia entre capacidad de acogida y usos actuales constituye el indicador relevante de sostenibilidad territorial. Desacoples significativos —donde actividades productivas se localizan en suelos inadecuados— generan múltiples externalidades negativas: degradación edáfica por erosión y compactación, reducción de productividad económica por rendimientos subóptimos, y conflictos socioambientales por competencia sobre recursos escasos (FAO, 2022). Estos desacoples típicamente reflejan déficits de gobernanza territorial, donde decisiones sobre uso del suelo responden a incentivos económicos de corto plazo sin consideración de limitaciones biofísicas ni externalidades socioecológicas.

Transformaciones socioambientales, vulnerabilidad y conflictos

Las transformaciones territoriales en espacios rurales responden a complejas interacciones entre factores biofísicos, económicos, políticos y culturales de cambio socioecológico (Kay, 2009). En contextos de estrés hídrico, estas transformaciones pueden exacerbar vulnerabilidades preexistentes o, alternativamente, catalizar procesos adaptativos que incrementan la resiliencia sistémica.

La vulnerabilidad socioecológica refiere a la susceptibilidad de sistemas acoplados sociedad-naturaleza a perturbaciones, determinada por tres componentes: exposición (intensidad de perturbaciones), sensibilidad (grado en que el sistema es afectado), y capacidad adaptativa (habilidad para ajustar respuestas) (Drakes et al., 2024). Esta conceptualización que supera las visiones que atribuyen fragilidad exclusivamente a factores biofísicos, reconoce que las

condiciones socioeconómicas, políticas e institucionales son determinantes, también, de la capacidad de respuesta ante cambios ambientales (Hossain et al., 2023).

En comunidades rurales dependientes de recursos naturales, la fragilidad hídrica se manifiesta mediante múltiples conjuntos: reducción de productividad agrícola y ganadera por déficits hídricos, intensificación de competencia intersectorial por agua disponible, deterioro de servicios ecosistémicos dependientes de flujos hídricos, y exacerbación de desigualdades en acceso a agua entre actores con distintas capacidades económicas y políticas (Drakes et al., 2024). Estas manifestaciones interactúan mediante ciclos de retroalimentación que pueden conducir a trampas de pobreza socioecológica donde vulnerabilidad y marginación se refuerzan mutuamente.

Los conflictos socioambientales por agua emergen cuando actores con intereses divergentes compiten por recursos hídricos insuficientes para satisfacer demandas agregadas (Hasan et al., 2025). La literatura reciente documenta el incremento global en frecuencia e intensidad de estos conflictos, particularmente en regiones sometidas a estrés hídrico creciente y débil gobernanza institucional. Factores que exacerbaban la conflictividad incluyen: asignación percibida como inequitativa de derechos de agua, ausencia de mecanismos participativos en toma de decisiones hídricas, debilidad de instituciones para mediar disputas, y superposición de tensiones hídricas con otras dimensiones de desigualdad social (clase, etnia, género) (Hasan et al., 2025).

En Chile, el marco institucional del agua, establecido por el Código de Aguas de 1981, ha sido objeto de creciente cuestionamiento por generar la mercantilización del recurso que favorece su concentración en actores con mayor capacidad económica, en detrimento de usuarios tradicionales y comunitarios (Budds, 2020). Este contexto institucional configura condiciones propicias para conflictos entre agricultura de riego, actividad forestal, consumo urbano y conservación ecosistémica, agudizados durante episodios de sequía prolongada como la megasequía 2010-presente (Garreaud et al., 2019).

Las respuestas comunitarias ante vulnerabilidad hídrica y transformaciones territoriales incluyen estrategias diversas: migración selectiva hacia zonas urbanas o regiones con mejores condiciones hídricas, diversificación de los medios de vida reduciendo la dependencia en actividades agrícolas vulnerables, intensificación tecnológica mediante sistemas de riego eficiente, y organización colectiva para negociar el acceso a agua o influir en políticas públicas (Hasan et al., 2025). La efectividad de estas estrategias varía según el capital social, humano, financiero y natural disponible, estableciendo respuestas diferenciadas que perpetúan o modifican patrones preexistentes de desigualdad.

METODOLOGIA

El estudio adopta un enfoque mixto con predominancia cuantitativa, combinando análisis espacial mediante *Sistemas de Información Geográfica* (SIG) con técnicas de *Evaluación Multicriterio* (EMC) para determinar la capacidad agroecológica del territorio y analizar las implicaciones socioeconómicas de la vulnerabilidad hídrica en la cuenca inferior del río *Itata* durante el período 1990-2010.

El diseño metodológico sigue un proceso secuencial que permite integrar múltiples variables físicas y socioeconómicas en una evaluación comprehensiva de las dinámicas territoriales (Figura 1). Este enfoque responde a lo planteado por Chow et al. (1994), López, et al. (1992) y Vich (1996), quienes indican que el tratamiento de información física y humana requiere métodos que permitan cuantificar y espacializar los datos para su adecuada interpretación.

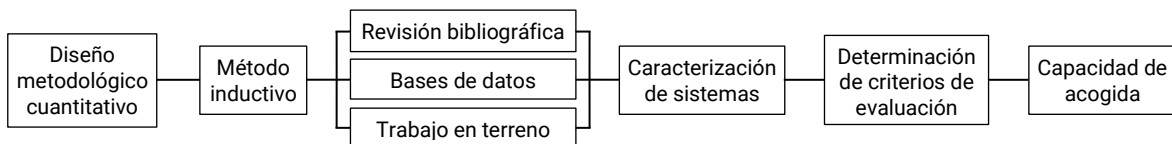


Figura 1: Diseño metodológico.
Fuente: Elaboración propia.

La investigación se estructura según el método inductivo, partiendo de la caracterización detallada de componentes específicos del sistema para llegar a una comprensión integrada de las dinámicas territoriales. Esta aproximación permite identificar patrones y relaciones emergentes a partir del análisis sistemático de las variables seleccionadas.

Área de estudio

El área de estudio comprende el curso inferior de la cuenca del río *Itata*, con una superficie total de 1.960,5 km² (17,5% de la cuenca total), ubicada entre los 36°10' y 36°43' de latitud sur, y los 72°10' y 72°52' de longitud oeste. Este territorio incluye parcial o totalmente las comunas de *San Carlos*, *San Nicolás*, *Coelemu*, *Quirihue*, *Ninhue*, *Trehuaco*, *Portezuelo*, *Ranquil* y *Tomé*, abarcando unidades geomorfológicas diversas como planicies litorales, cordillera de la costa y parte de la depresión intermedia.

La provincia de *Itata*, donde se localiza el sector de la cuenca por donde transita el curso inferior del río *Itata*, presenta una de las mayores concentraciones de plantaciones forestales del país. Comunas como *Quirihue* (capital provincial) experimentaron una expansión forestal del 33,4% entre 1995-2016, transformando principalmente ecosistemas de bosque espinoso y caducifolio (Plissock, 2020). En *Ránquil*, el 60% del territorio cultivable está ocupado por plantaciones forestales (Dirección General de Aguas [DGA], 2018), mientras que comunas como *Cobquecura* y *Ninhue* concentran el 72% de su terreno arbolado en plantaciones, con escaso encadenamiento productivo local (Catalán & Valenzuela, 2021).

Recopilación y procesamiento de datos

Datos físicos

La caracterización del sistema físico para la Evaluación Multicriterio se desarrolló mediante el análisis de 12 variables clave:

Variables edáficas

- *Drenaje*: Clasificación según CIREN-CORFO (2005) en 6 categorías (bueno, moderado, excesivo, imperfecto, pobre, muy pobre).
- *Profundidad de suelos*: Estratificación en 5 rangos (<25 cm; 25-50 cm; 50-75 cm; 75-100 cm; >100 cm), originados por CIREN-CORFO (2005).
- *Textura*: Clasificación en 7 categorías texturales (muy fina, fina, moderadamente fina, media, moderadamente gruesa, gruesa, muy gruesa), en base a CIREN-CORFO (2005).
- *Capacidad de uso*: Clasificación según sistema USDA en clases II-VIII, datos CIREN-CORFO (2005).
- *Erosión*: Categorización en 5 niveles (sin erosión, ligera, moderada, severa, muy severa), por CIREN-CORFO (2005).
- *Suelos no correspondientes*: Identificación de áreas inapropiadas para usos productivos (cajas de río, pantanos, dunas, urbano), fuente CIREN-CORFO (2005).

Variables geomorfológicas

- *Geomorfología*: Clasificación de unidades geomorfológicas (planicie litoral, cordillera de la costa, depresión intermedia, lecho de inundación, terrazas fluviales), fuente IGM y CIREN-CORFO.

- *Relieve*: Caracterización en 13 categorías desde plano hasta muy escarpado, fuente CIREN-CORFO (2005).
- *Pendiente*: Estratificación en 4 rangos (0-15%, 15-30%, 30-50%, >50%), calculada mediante análisis de Modelo Digital de Elevación.

Variables biogeográficas

- *Cobertura vegetal*: Clasificación en 9 categorías (bosque nativo, plantaciones forestales, matorral, praderas, terrenos agrícolas, renoval, caja de río, ciudades, lagos), fuente CIREN-CORFO (2005).
- *Exposición solar*: Clasificación en 3 categorías (norte, sur, plano), calculada mediante análisis de orientación de laderas.

Variables hidrológicas

- *Balance hídrico*: Balance hídrico climático: Calculado como la diferencia entre precipitación media anual y evapotranspiración real media anual ($BH = P - EVT_r$), expresado en mm. La evapotranspiración real se estimó mediante la fórmula de Turc (en Vich, 1996). Se clasificó en 3 categorías según magnitud de superávit: alto (>600 mm), moderado (300-600 mm) y bajo (<300 mm). Los datos de precipitación y temperatura se obtuvieron de cinco estaciones pluviométricas con registro completo para el período 1990-2010: *Nueva Aldea, Cancha los Litres, Rafael, Coelemu y Mangarral*. La evapotranspiración real (EVT_r) se calculó mediante la fórmula de Turc (en Vich, 1996).

$$EVT_r = \frac{P}{\sqrt{0,9 + (P/L)^2}}$$

Donde:

- EVT_r = evapotranspiración anual (mm).
- P = precipitación anual (mm).
- $L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$
- T = temperatura media del aire (°C).

Datos complementarios para caracterización contextual

Adicionalmente, se recopilaron datos de series de suelo, caudal y datos climáticos desagregados (precipitación, temperatura) para la caracterización descriptiva del territorio, aunque estas variables no fueron incluidas directamente en el modelo de Evaluación Multicriterio.

La Tabla 1 muestra la asignación de pesos a cada variable según su relevancia para la capacidad agroecológica, desde 0,05 (factores de menor incidencia) hasta 0,15 (factores clave).

Tabla 1: Variables ponderadas.

Variable	Ponderación
Drenaje	0,15
Profundidad de suelos	0,05
Textura	0,05
Capacidad de uso	0,10
Erosión	0,10
Suelos no correspondientes	0,05
Geomorfología	0,05
Relieve	0,05
Pendiente	0,10
Cobertura vegetal	0,10
Exposición solar	0,05
Balance hídrico	0,15
TOTAL	1,00

Esta asignación se fundamentó en la metodología propuesta por Gómez Orea (1994) y Gómez y Barredo (2006) para la evaluación de tierras, adaptada al contexto mediterráneo de Chile central. El proceso consideró el principio de decisión multicriterio explícito, reconociendo que cada criterio tiene diferente influencia en las actividades agrícolas y su sostenibilidad.

Los factores limitantes primarios (balance hídrico y drenaje) recibieron la máxima ponderación (0,15) por condicionar directamente la viabilidad productiva en contextos de vulnerabilidad hídrica característica de climas mediterráneos. En territorios donde la disponibilidad de agua constituye el factor más restrictivo para la producción agrícola, el balance hídrico determina fundamentalmente qué actividades pueden sostenerse, mientras que el drenaje condiciona tanto la salud radicular de los cultivos como el riesgo de degradación edáfica por anegamiento o salinización.

Los factores condicionantes de nivel intermedio (capacidad de uso del suelo, pendiente, cobertura vegetal y erosión) recibieron ponderación media (0,10), reconociendo su rol significativo, pero no determinante, en la aptitud territorial. Estos factores modifican sustancialmente las posibilidades productivas, pero pueden ser parcialmente manejados mediante prácticas agrícolas apropiadas (terrazas, curvas de nivel, manejo de cobertura).

Los factores complementarios (profundidad, textura, exposición solar, suelos no correspondientes, geomorfología y relieve) recibieron ponderaciones menores (0,05), reflejando su carácter de variables que refinan la evaluación, pero cuyo impacto es secundario cuando los factores limitantes primarios están comprometidos.

Esta jerarquización de ponderaciones fue validada mediante consulta a expertos locales en planificación territorial de la Universidad del Bío-Bío, quienes confirmaron que, en el contexto específico del curso inferior del Itata, la disponibilidad hídrica constituye efectivamente la restricción dominante para usos productivos sostenibles.

Datos socioeconómicos

La caracterización del sistema humano se realizó mediante el análisis de:

- *Datos demográficos:* Población total, urbano-rural, estructura etaria y composición por sexo de los censos 1992 y 2002, obtenidos a través de la plataforma REDATAM+SP del Instituto Nacional de Estadísticas (INE).
- *Vivienda y servicios básicos:* Información sobre disponibilidad de agua potable y suministro eléctrico (INE, 2002).
- *Actividades económicas:* Distribución de la población económicamente activa por sectores productivos.
- *Índice de desarrollo humano:* Valores comunales del IDH 2003 y su evolución respecto a 1994.

Modelación hidrológica retrospectiva

Para comprender la evolución temporal de las condiciones hídricas en la cuenca, se implementó un análisis retrospectivo del balance hídrico utilizando series temporales completas del período 1990-2010. Este proceso incluyó:

- *Cálculo de balances hídricos anuales:* Se calcularon los valores de balance hídrico para cada año de la serie utilizando datos de cinco estaciones representativas (*Nueva Aldea, Cancha Los Litres, Rafael, Coelemu y Mangaral*).
- *Análisis de tendencias temporales:* Se aplicaron técnicas de análisis de series temporales para identificar patrones de variabilidad interanual, tendencias a largo plazo y eventos climáticos extremos. Se calcularon estadísticos descriptivos (media,

mediana, desviación estándar), coeficientes de variación y grado de asimetría para cada estación y para la cuenca en conjunto.

- *Clasificación de años hidrológicos:* Se categorizaron los años del período según su condición hidrológica (húmedos, normales, secos) utilizando umbrales estadísticos basados en la distribución histórica de los valores de balance hídrico.
- *Análisis de frecuencia de eventos extremos:* Se calculó la frecuencia e intensidad de períodos de déficit hídrico consecutivo, identificando intervalos críticos de escasez de agua.
- *Correlación con índices climáticos regionales:* Se exploraron posibles correlaciones entre los valores de balance hídrico y fenómenos climáticos de gran escala como *El Niño-Oscilación del Sur* (ENSO), para evaluar la influencia de patrones climáticos regionales en las condiciones hídricas locales.

Este análisis permite identificar no solo la distribución espacial del déficit hídrico, sino también su comportamiento temporal, aportando una dimensión dinámica a la comprensión de la escasez de agua en la cuenca.

Análisis multitemporal de usos del suelo

Para evaluar las transformaciones del paisaje durante el período de estudio, se implementó un análisis multitemporal que comprende:

- *Compilación de datos históricos:* Se recopilaron datos de cobertura vegetal y uso del suelo de distintos momentos del período 1999-2008, utilizando información geoespacial de CIREN-CORFO, y estudios previos sobre la región (Instituto Geográfico Militar [IGM], 2001; Peña & Mardones, 1999).
- *Homogeneización de categorías:* Se estandarizaron las clasificaciones de cobertura y uso para permitir comparaciones consistentes entre distintos momentos. Las categorías principales incluyeron: bosque nativo, plantaciones forestales, matorral, praderas, cultivos agrícolas, terrenos urbanos y cuerpos de agua.
- *Análisis de cambio de uso del suelo:* Se cuantificaron las transiciones entre categorías durante el período, generando matrices de cambio que identifican las transformaciones dominantes en términos de superficie y distribución espacial.
- *Cálculo de tasas de cambio:* Se determinaron las tasas anuales de cambio para cada categoría, identificando patrones de intensificación, abandono o transformación productiva.
- *Análisis de contexto espacial:* Se examinó la ubicación de los cambios en relación con variables físicas (pendiente, capacidad de uso, balance hídrico) y socioeconómicas (cercanía a centros urbanos, accesibilidad).

Este análisis multitemporal proporciona evidencia sobre la magnitud y dirección de las transformaciones territoriales, permitiendo evaluar si los cambios en la cobertura vegetal han exacerbado o mitigado los efectos de la vulnerabilidad hídrica en diferentes sectores de la cuenca.

Evaluación Multicriterio (EMC)

Para determinar la capacidad agroecológica del territorio, se implementó un modelo de EMC mediante la técnica de sumatoria lineal ponderada (Gómez & Barredo, 2006), siguiendo estos pasos:

- *Selección de criterios:* Se identificaron factores de aptitud (drenaje, profundidad, textura, capacidad de uso), impacto (balance hídrico, pendiente, cobertura vegetal, exposición solar, erosión) y restricción (suelos no correspondientes, geomorfología, relieve).

- *Valoración de criterios:* Cada criterio fue evaluado en una escala ordinal de cinco niveles (-2, -1, 0, 1, 2), correspondientes a valoraciones cualitativas (muy baja, baja, media, alta, muy alta).
- *Ponderación de criterios:* Se asignaron pesos diferenciados a cada variable según su relevancia para la capacidad agroecológica, desde 0,05 (factores de menor incidencia) hasta 0,15 (factores clave).
- *Integración mediante SIG:* Se realizó la superposición ponderada de las 12 capas mediante la calculadora ráster del SIG, aplicando la fórmula:

$$CA = \sum (wi \times vi)$$

Donde:

- CA = capacidad agroecológica.
- wi = peso del criterio i .
- vi = valor del criterio i .
- *Categorización de resultados:* Los valores resultantes (-2,00 a 2,00) fueron clasificados en cinco categorías de capacidad agroecológica:
 - Muy alta: 1,3 a 2
 - Alta: 0,4 a 1,29
 - Media: -0,39 a 0,39
 - Baja: -1,29 a -0,4
 - Muy baja: -2 a -1,3

Análisis de correspondencia uso-capacidad

Para evaluar la adecuación entre los usos actuales del suelo y la capacidad agroecológica del territorio, se realizó un análisis de correspondencia mediante la herramienta "Constructor de consultas" del SIG, considerando dos categorías principales:

- *Uso agrícola:*
 - Óptimo: Polígonos con valor de capacidad agroecológica $\geq 0,4$
 - Inapropiado: Polígonos con valor de capacidad agroecológica $\leq 0,39$
- *Uso forestal (bosque exótico asilvestrado):*
 - Óptimo: Polígonos con valor de capacidad agroecológica $\leq 0,29$
 - Inapropiado: Polígonos con valor de capacidad agroecológica $\geq 0,3$

Análisis de implicaciones socioeconómicas

Para evaluar las implicaciones socioeconómicas de la vulnerabilidad hídrica, se desarrolló un análisis integrado que incluye:

- *Análisis demográfico:* Evolución de la población total, índice de ruralidad, estructura etaria e índice de masculinidad entre 1992-2002.
- *Análisis de servicios básicos:* Evolución de la disponibilidad de agua potable y suministro eléctrico.
- *Análisis de actividades económicas:* Distribución sectorial de la población económicamente activa.
- *Análisis de desarrollo humano:* Valores del IDH 2003 y su evolución respecto a 1994.
- *Análisis de correlación espacial:* Relación entre zonas de mayor déficit hídrico y áreas de mayor pérdida poblacional o menor IDH.

Síntesis e integración

Para integrar los múltiples aspectos analizados y obtener una visión comprehensiva de las dinámicas territoriales en la cuenca, se implementó un proceso de síntesis que incluye:

- *Superposición espacial de resultados:* Se integraron espacialmente los mapas de capacidad agroecológica, balance hídrico, transformación de usos del suelo y variables socioeconómicas para identificar patrones y correlaciones geográficas.
- *Análisis de congruencia temporal:* Se examinaron las coincidencias temporales entre períodos de mayor déficit hídrico, transformaciones significativas del paisaje y cambios demográficos.
- *Elaboración de modelo conceptual integrado:* Se desarrolló un modelo que sintetiza las interrelaciones entre componentes biofísicos y socioeconómicos, destacando mecanismos de retroalimentación y procesos clave.
- *Identificación de zonas críticas:* Se delimitaron áreas que presentan simultáneamente alta vulnerabilidad hídrica, uso inadecuado del suelo y deterioro de condiciones socioeconómicas, como focos prioritarios para intervenciones de gestión territorial.

Esta metodología integrada permite evaluar la capacidad agroecológica del territorio y sus implicaciones socioeconómicas actuales, así como también comprender los procesos históricos que han configurado la situación presente, aportando una perspectiva dinámica esencial para la planificación y gestión sostenible de la cuenca.

RESULTADOS

Modelación hidrológica retrospectiva (1990-2010)

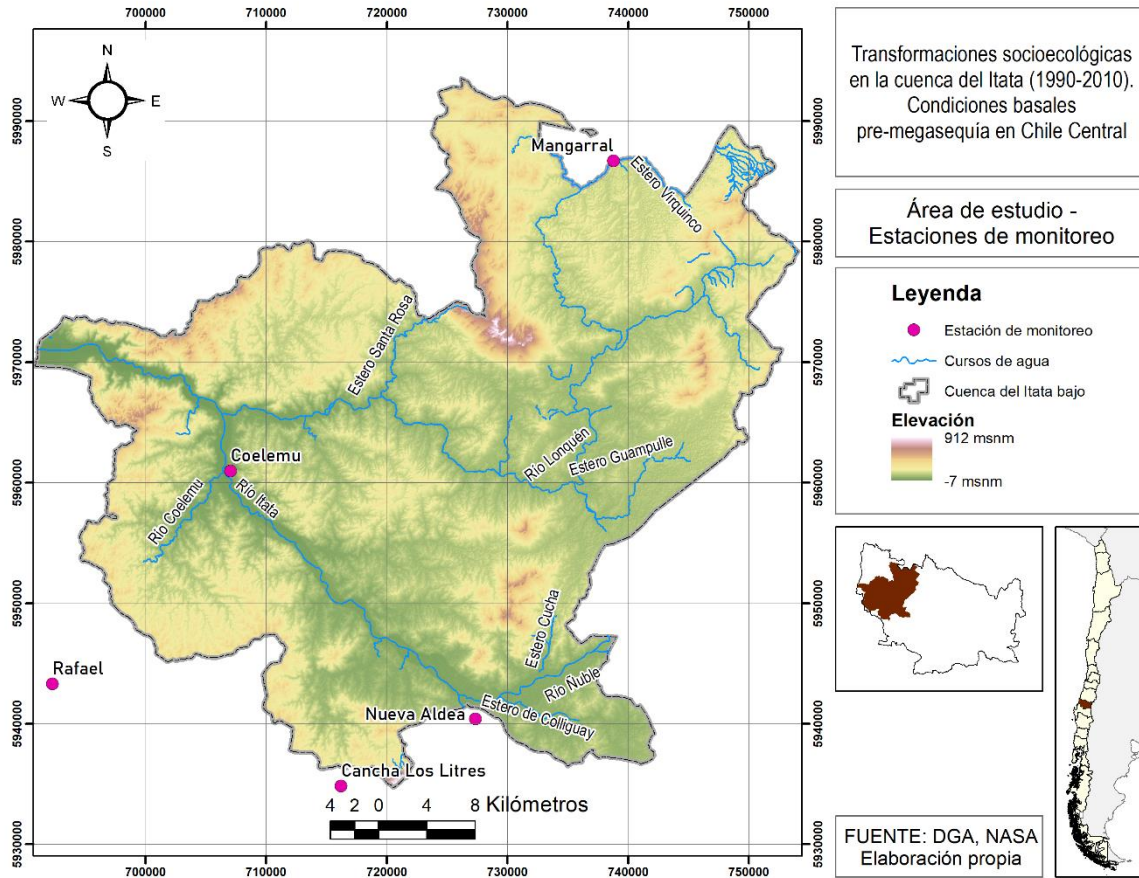
Evolución temporal del balance hídrico

El análisis retrospectivo del balance hídrico en la cuenca inferior del río Itata reveló un patrón de alta variabilidad interanual. La media del período fue de 674,11 mm, indicando un superávit hídrico climático consistente con la clasificación perhúmeda-húmeda de Henríquez (1990). No obstante, este superávit presenta alta variabilidad interanual (C.V. = 33-43%) y marcada diferenciación espacial (Tabla 2).

Tabla 2: Estadísticos descriptivos del balance hídrico por estación (1990-2010).

Estación	Media (mm)	Mediana (mm)	D.E.	C.V. (%)	Mín.	Máx.
Nueva Aldea	672.27	698.21	267.63	39.81	134.19	1170.52
Cancha los Litres	625.62	577.16	266.75	42.64	100.28	1240.11
Rafael	935.92	977.15	381.28	40.74	300.34	1605.01
Coelemu	577.88	562.83	236.00	40.84	176.18	927.84
Mangarral	558.86	565.30	189.29	33.87	183.55	984.50
Media 5 estaciones	674.11					

La distribución espacial de esta variabilidad muestra un gradiente oeste-este: las estaciones costeras (Coelemu: 577,88 mm; Mangarral: 558,86 mm) presentan valores inferiores a las ubicadas en la depresión intermedia (Nueva Aldea: 672,27 mm) y precordillera (Rafael: 935,92 mm). Este gradiente refleja la mayor pluviosidad en la vertiente andina documentada por Henríquez (1990). Este patrón confirma la importancia de la configuración orográfica en la distribución de los recursos hídricos, con sectores de barlovento recibiendo mayores aportes pluviométricos que las zonas de sotavento.



Mapa 1: Área de estudio.

El análisis temporal identificó tres períodos distintivos durante las dos décadas estudiadas (Figura 2):

- *Período 1991-1996*: Superávit moderado pero decreciente (de 605,94 mm en 1991 a 318,07 mm en 1996). 1996 registra el año con menor superávit de la serie, coincidiendo con la fase *La Niña*
- *Período 1997-1998*: Fuerte incremento del superávit (1.011,69 mm en 1997), asociado al evento *El Niño*.
- *Período 1999-2010*: Alternancia entre años de superávit alto (>800 mm: 2000, 2001, 2002, 2006) y moderado (269-717 mm), sin tendencia clara.

La clasificación de años hidrológicos reveló que el 100% del período presentó superávit hídrico climático anual ($P > EV_{Treal}$), aunque con variabilidad significativa: el 47,6% de los años registró superávit superior a 700 mm, mientras que el 14,3% presentó superávit inferior a 350 mm (años 1996, 1998 y 2007).

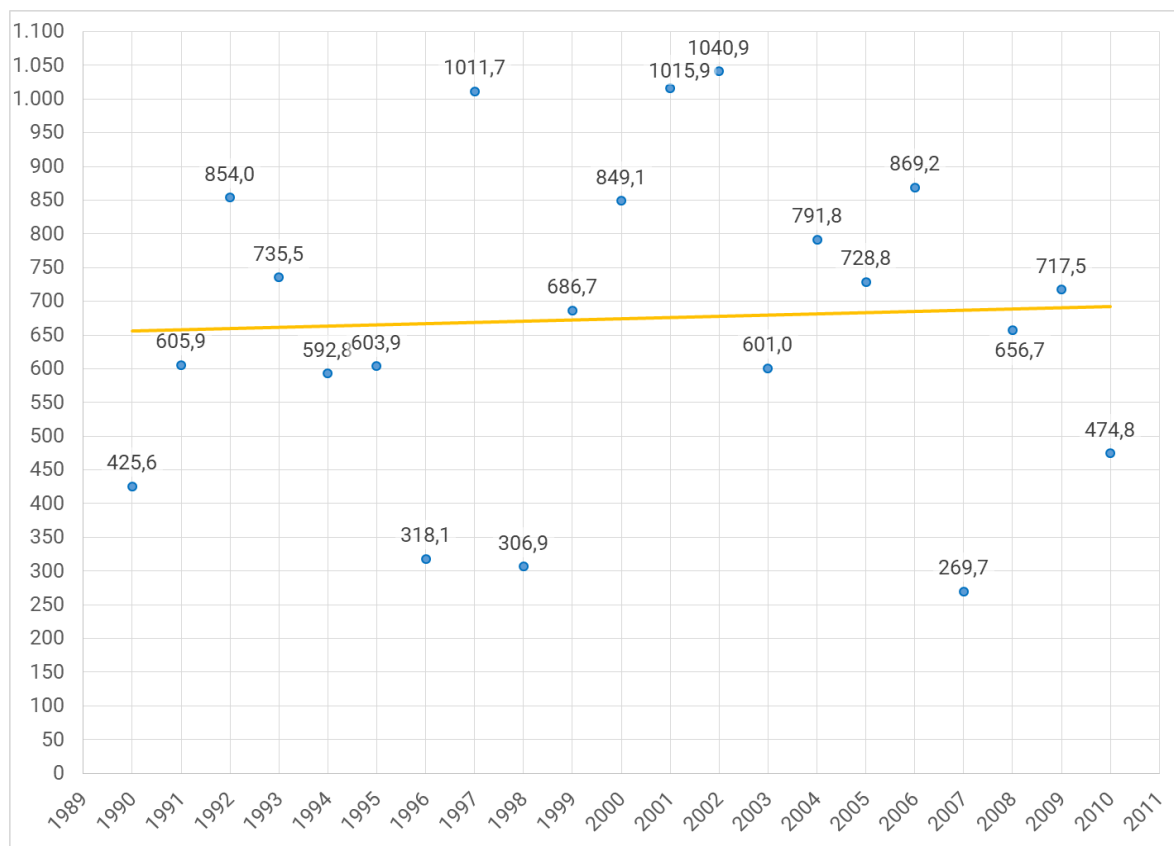


Figura 2: Evolución temporal del balance hídrico medio anual, periodo 1990-2010 (en milímetros).

Frecuencia de eventos extremos

Análisis de períodos con superávit reducido (años donde BH < media - 1 D.E.), destacando 1996 (318 mm), 1998 (307 mm) y 2007 (270 mm) como los años de menor disponibilidad hídrica.

El análisis temporal del balance hídrico reveló correspondencia con las fases del fenómeno ENSO. El episodio de superávit moderado 1991-1996 coincidió con el predominio de condiciones de *La Niña*, mientras que el fuerte superávit 1997-1998 correspondió a un evento *El Niño* de intensidad mayor. Este patrón es consistente con literatura que documenta la influencia de ENSO sobre disponibilidad hídrica en Chile central (Garreaud et al., 2017), donde fases *La Niña* típicamente reducen precipitaciones en la región mediterránea.

Análisis multitemporal de usos del suelo

Transformaciones del paisaje 1999-2008

El análisis multitemporal reveló transformaciones significativas en la cobertura vegetal y usos del suelo durante el período estudiado (Tabla 3). Los cambios más relevantes fueron:

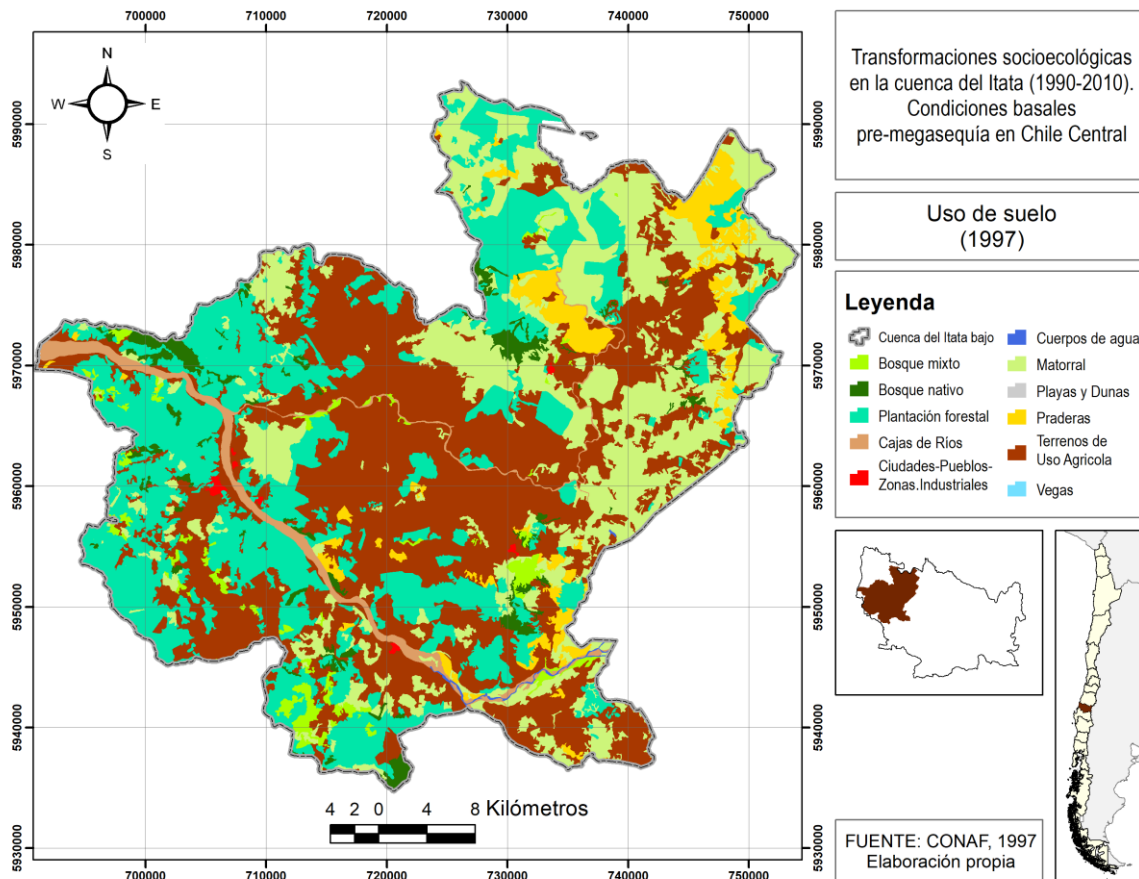
Tabla 3: Evolución de cobertura vegetal y usos del suelo (1999-2008).

Categoría	1999 (ha)	1999 (%)	2008 (ha)	2008 (%)	Cambio neto (ha)	Tasa anual (%)
Bosque nativo	3.756,51	1,92	1.431,99	0,73	-2.324,52	-4,71
Plantaciones forestales	25.256,68	12,91	38.077,43	19,46	+12.820,75	+2,06
Matorral	47.534,95	24,29	43.632,81	22,30	-3.902,14	-0,43
Praderas	12.358,23	6,32	9.578,10	4,89	-2.780,13	-1,27
Terrenos agrícolas	82.864,86	42,36	74.063,62	37,85	-8.801,24	-0,56
Otros usos	23.918,97	12,20	28.906,25	14,77	+4.987,28	+0,95
Total	195.690,20	100	195.690,20	100	-	-

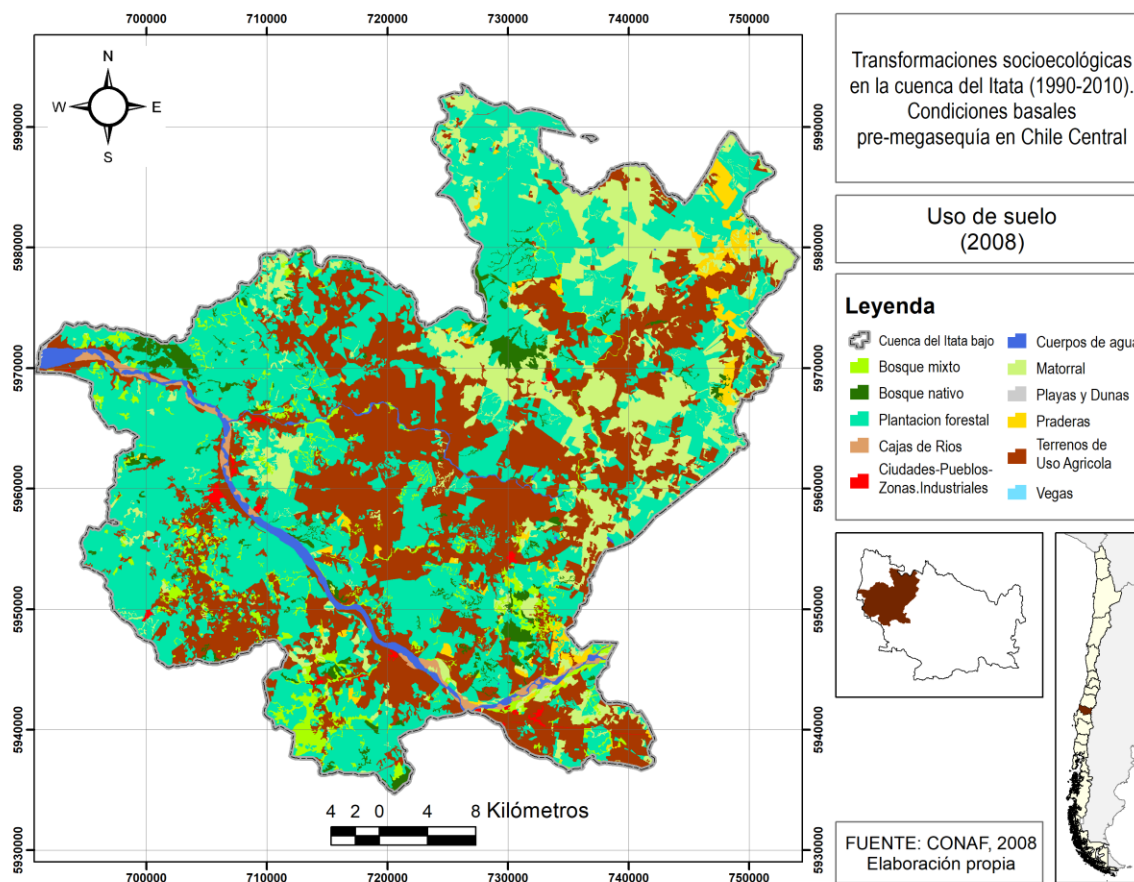
El análisis multitemporal reveló transformaciones en la cobertura vegetal y usos del suelo durante el período estudiado. Las plantaciones forestales experimentaron el mayor aumento proporcional, pasando de 25.256,68 ha (12,91%) en 1999 a 38.077,43 ha (19,46%) en 2008, con una tasa anual de expansión del 2,06%. Esta transformación se concentró principalmente en terrenos anteriormente ocupados por praderas, matorrales y bosque nativo.

En contraste, la cobertura de bosque nativo se redujo, pasando de 3.756,51 ha (1,92%) a 1.431,99 ha (0,73%), lo que representa una pérdida del 61,88% de su superficie inicial y una tasa anual de reducción del 4,71%. Los remanentes quedaron confinados principalmente a quebradas y áreas de alta pendiente. Simultáneamente, la superficie dedicada a agricultura experimentó una reducción de 8.801,24 ha, pasando del 42,36% al 37,85% del territorio. Esta disminución fue más acentuada en áreas de capacidad de uso intermedia (IV-VI), mientras que los suelos de mayor aptitud agrícola (II-III) mantuvieron relativa estabilidad.

Las praderas y matorrales, formaciones vegetales importantes como zonas de amortiguación hidrológica, experimentaron reducciones del 22,49% y 8,21% respectivamente, contribuyendo a la simplificación del paisaje.



Mapa 2: Uso de suelo (1997).



Mapa 3: Uso de suelo (2008).

Las tasas de cambio observadas son coherentes con estudios regionales previos. La expansión forestal de 2,06% anual en la cuenca del *Itata* es similar a las tasas documentadas por Heilmayr et al. (2016) para la región *Maule-Biobío* (1,8-2,3% anual entre 1986-2011), y se enmarca en el proceso de sustitución de bosque nativo y agricultura por plantaciones forestales ampliamente documentado para esta zona (Echeverría et al., 2006; Aguayo et al., 2009; Miranda et al., 2017).

Patrones espaciales de transformación

El análisis espacial de las transformaciones reveló patrones diferenciados según las características físicas del territorio.

- Efecto de la pendiente

El análisis cruzado entre rangos de pendiente y tipos de cobertura vegetal mostró una distribución diferenciada de los usos del suelo según el grado de inclinación del terreno. La Tabla 4 presenta la distribución de pendientes en la cuenca y su relación con los usos predominantes identificados en la caracterización territorial.

Tabla 4: Distribución de pendientes y usos predominantes del suelo.

Rango pendiente	Superficie (ha)	% del área	Uso predominante	Tipo cobertura dominante 2010
0-15%	51.113,87	26,12	Agrícola con riego	Terrenos agrícolas (74.063 ha, 37,85%)
15-30%	101.418,84	51,83	Forestal	Plantaciones forestales (38.077 ha, 19,46%)
30-50%	30.771,58	15,72	Forestal/conservación	Plantaciones + matorral
>50%	5.515,02	2,82	Conservación	Bosque nativo remanente + matorral

Las plantaciones forestales se expandieron preferentemente en terrenos con pendientes entre 15-30% (que representan el 51,83% del área total), zona que coincide con suelos de capacidad VI-VII donde la agricultura enfrenta mayores limitaciones por erosión y disponibilidad hídrica. En contraste, los suelos con pendientes inferiores al 15% (26,12% del área), localizados principalmente en el este de la cuenca en las comunas de *Ninhue* y *Portezuelo*, mantuvieron mayoritariamente usos agrícolas debido a sus mejores condiciones de retención hídrica y menor riesgo erosivo. El cruce espacial de capas de pendiente y cobertura vegetal 1999-2008 confirmó que el 77,98% de la expansión forestal (9.998 ha de 12.821 ha de incremento) ocurrió en terrenos con pendientes superiores al 15%.

Este patrón espacial es consistente con la caracterización de Aguayo et al. (2009), quienes documentaron que en *Maule-Biobío* el 20% de los bosques nativos en laderas de la cordillera de la Costa fueron convertidos a plantaciones entre 1979-2000, mientras que las zonas planas mantuvieron mayoritariamente usos agrícolas.

- Relación con capacidad de uso del suelo

Para evaluar la asociación entre capacidad de uso del suelo y estabilidad de cobertura, se realizó un análisis correlacional entre las clases de capacidad identificadas por CIREN-CORFO y las tasas anuales de cambio observadas durante 1999-2008. Se asignaron tasas de cambio promedio a cada clase según su uso predominante documentado en la caracterización territorial.

Tabla 5: Tasas de cambio promedio por clase de capacidad de uso del suelo.

Clase capacidad	Superficie (ha)	% del área	Uso predominante	Tasa cambio anual (%)	Fuente asignación
II	7.253,31	3,71	Agrícola con riego	0,56	Terrenos agrícolas
III	16.274,14	8,32	Agrícola con riego	0,56	Terrenos agrícolas
IV	12.856,15	6,57	Agrícola-praderas	0,85	Promedio ponderado: 60% agrícola (0,56) + 40% praderas (1,27)
VI	23.659,34	12,09	Praderas-forestales	1,74	Promedio ponderado: 40% praderas (1,27) + 60% forestales (2,06)
VII	129.447,85	66,15	Forestales-matorral	1,57	Promedio ponderado: 70% forestales (2,06) + 30% matorral (0,43)

El análisis correlacional entre capacidad de uso (escala ordinal donde mayor valor indica mayor aptitud productiva) y estabilidad de cobertura (inverso de la tasa de cambio) reveló una asociación muy fuerte y significativa ($r = 0,96$, $p < 0,01$). La Tabla 6 presenta el procedimiento completo de cálculo.

Tabla 6: Cálculo de correlación entre capacidad de uso y estabilidad de cobertura.

Clase	Capacidad (X)	Tasa cambio (%)	Estabilidad (Y)	(X - \bar{X})	(Y - \bar{Y})	(X- \bar{X})(Y- \bar{Y})	(X- \bar{X}) ²	(Y- \bar{Y}) ²
II	7	0,56	1,79	2,4	0,60	1,43	5,76	0,36
III	6	0,56	1,79	1,4	0,60	0,83	1,96	0,36
IV	5	0,85	1,18	0,4	-0,01	-0,01	0,16	0,00
VI	3	1,74	0,57	-1,6	-0,62	1,00	2,56	0,39
VII	2	1,57	0,64	-2,6	-0,55	1,44	6,76	0,31
				Σ		4,70	17,20	1,41

Utilizando la fórmula de correlación de Pearson:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y - \bar{y})^2}}$$

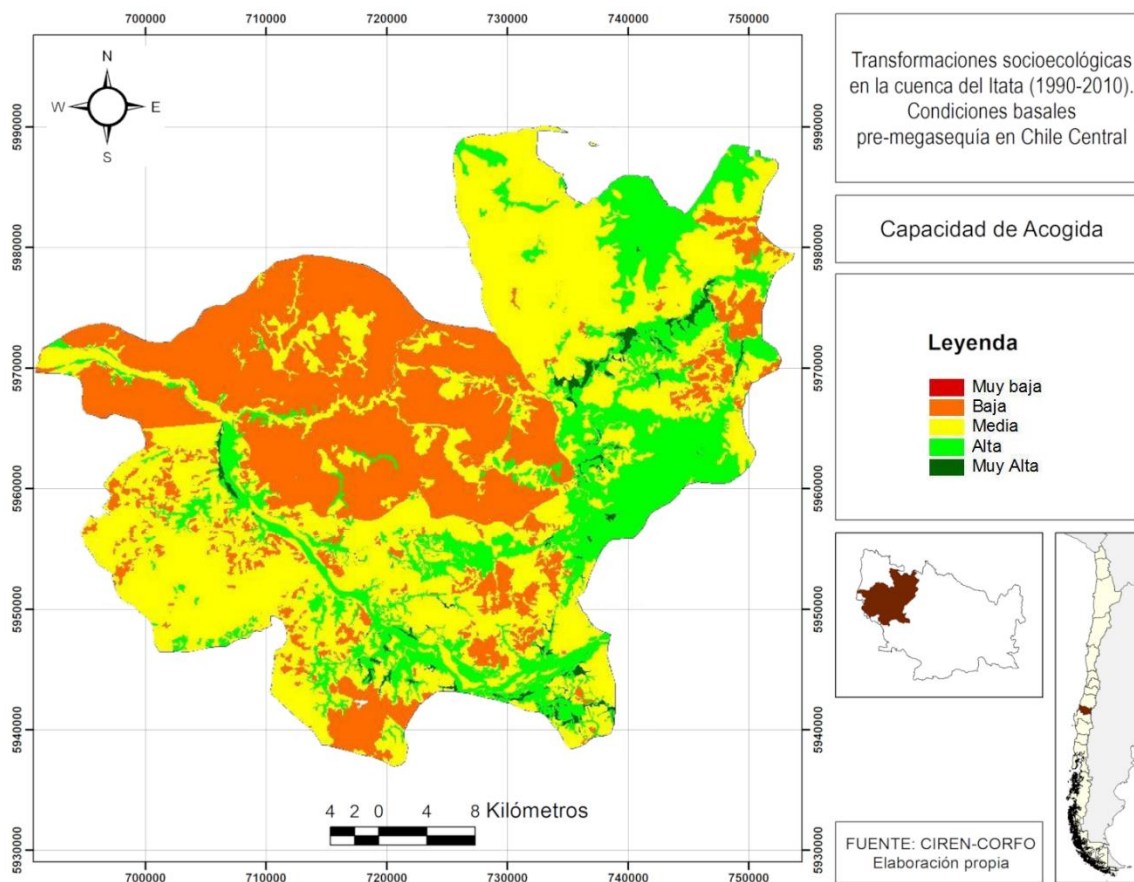
Donde:

- x, y = valores individuales de las variables X e Y.
- \bar{x}, \bar{y} = medias aritméticas de las variables X e Y.

Los suelos de clase II-III mostraron tasas de cambio menores (0,56% anual, equivalente a estabilidad 1,79) que los suelos de clases VI-VII, que experimentaron transformaciones más intensas (1,74% y 1,57% anual respectivamente, con estabilidades de 0,57 y 0,64). Esta relación indica que los suelos de menor capacidad productiva fueron los más afectados por cambios de uso durante el período 1999-2008, particularmente debido a la expansión de plantaciones forestales en terrenos de baja aptitud agrícola donde la agricultura enfrentaba mayores limitaciones biofísicas.

Capacidad agroecológica y usos actuales del suelo

Distribución espacial de la capacidad agroecológica



Mapa 4: Distribución espacial de la capacidad agroecológica.

La evaluación multicriterio de la capacidad agroecológica del territorio generó un modelo espacializado que clasifica la cuenca en cinco categorías de aptitud (Tabla 7). Los resultados revelan una predominancia de territorios con baja capacidad agroecológica (46,27%), seguidos por áreas de capacidad media (27,86%) y alta (20,79%). Las zonas de aptitud muy alta representan apenas el 5,07% de la superficie total.

Tabla 7: Distribución de categorías de capacidad agroecológica.

Valoración nominal	Valoración numérica	Superficie (ha)	%
Muy baja	-2,00 a -1,30	0	0
Baja	-1,29 a -0,40	90.555,48	46,27
Media	-0,39 a 0,39	54.504,16	27,86
Alta	0,40 a 1,29	40.692,95	20,79
Muy alta	1,30 a 2,00	9.937,61	5,07
Total	-	195.690,20	100

La distribución espacial de estas categorías muestra un patrón geográfico (Mapa 4). Las zonas de capacidad alta y muy alta se concentran en el sector oriental de la cuenca, coincidiendo con la depresión intermedia y terrenos de menor pendiente, mayor profundidad de suelo y balance hídrico positivo. Por el contrario, las áreas de baja capacidad predominan en el sector occidental, asociadas a la cordillera de la costa, con pendientes pronunciadas, erosión severa y balance hídrico deficitario.

Los factores que más influyen en la determinación de zonas de alta capacidad son: balance hídrico positivo, suelos profundos (>100 cm), texturas medias, capacidad de uso II-III, pendientes <15% y exposición solar plana. En contraste, las zonas de baja capacidad se caracterizan por: balance hídrico negativo, erosión severa, pendientes >30%, capacidad de uso VII y suelos de profundidad media (50-75 cm).

Correspondencia entre capacidad agroecológica y usos actuales

El análisis de correspondencia entre capacidad agroecológica y usos actuales reveló desajustes significativos en la utilización del territorio (Tabla 8 y Tabla 9).

Tabla 8: Correspondencia entre uso agrícola actual y capacidad agroecológica.

Correspondencia	Superficie (ha)	% del uso agrícola total
Óptimo	276,68	23,65
Inapropiado	893,35	76,35
Total	1.170,03	100

Tabla 9: Correspondencia entre uso forestal (bosque exótico) y capacidad agroecológica.

Correspondencia	Superficie (ha)	% del uso forestal total
Óptimo	77,39	4,49
Inapropiado	1.646,66	95,51
Total	1.724,05	100

En el caso de terrenos agrícolas, el 76,35% de la superficie actualmente bajo este uso se ubica en zonas de capacidad agroecológica media o baja ($\leq 0,39$), consideradas inapropiadas para esta actividad. Estas áreas se concentran principalmente en las comunas de *Cobquecura*, *Trehuaco*, *Portezuelo* y *Quirihue*, donde predominan suelos de capacidad VI-VII, pendientes >15% y balance hídrico negativo.

La situación del uso forestal (bosque exótico asilvestrado) es aún más crítica, con el 95,51% de su superficie ubicada en terrenos considerados inapropiados para esta actividad desde una perspectiva agroecológica. Particularmente preocupante es la expansión de plantaciones en terrenos con capacidad agroecológica alta ($\geq 0,30$), que podrían sostener usos productivos de mayor valor socioeconómico.

Este desajuste entre aptitud territorial y usos actuales evidencia la ausencia de criterios de planificación ecológica en las decisiones de uso del suelo, con implicaciones potencialmente graves para la sostenibilidad socioecológica de la cuenca.

Los resultados obtenidos confirman que el sector de la cuenca del río *Itata* experimentó durante 1990-2010 las mismas dinámicas de transformación territorial documentadas para el conjunto de la región centro-sur de Chile. La pérdida de 2.324 hectáreas de bosque nativo (tasa anual -4,71%) se enmarca en el proceso regional de deforestación documentado por Echeverría et al. (2006), quienes registraron pérdidas del 67% en la cordillera de la Costa entre *Maule* y *Cobquecura* (1975-2000). La expansión de plantaciones forestales de 12.821 hectáreas (tasa anual +2,06%) es coherente con el crecimiento promedio regional de 2,0-2,3% anual documentado por Heilmayr et al. (2016) para el período 1986-2011.

La concentración de la expansión forestal en suelos de clase VI-VII (capacidad preferentemente forestal) y en terrenos con pendientes superiores al 15% refleja el patrón esperado según la aptitud territorial, pero también evidencia el retroceso de usos tradicionales en zonas de

secano que enfrentan limitaciones hídricas y erosivas. Este proceso ha sido particularmente intenso en la *provincia de Itata*, donde comunas como *Quirihue* experimentaron expansiones forestales superiores al 33% entre 1995-2016 (Pliscoff, 2020), estableciendo a esta provincia como la cuarta con mayor superficie de plantaciones en Chile (CIREN, 2024).

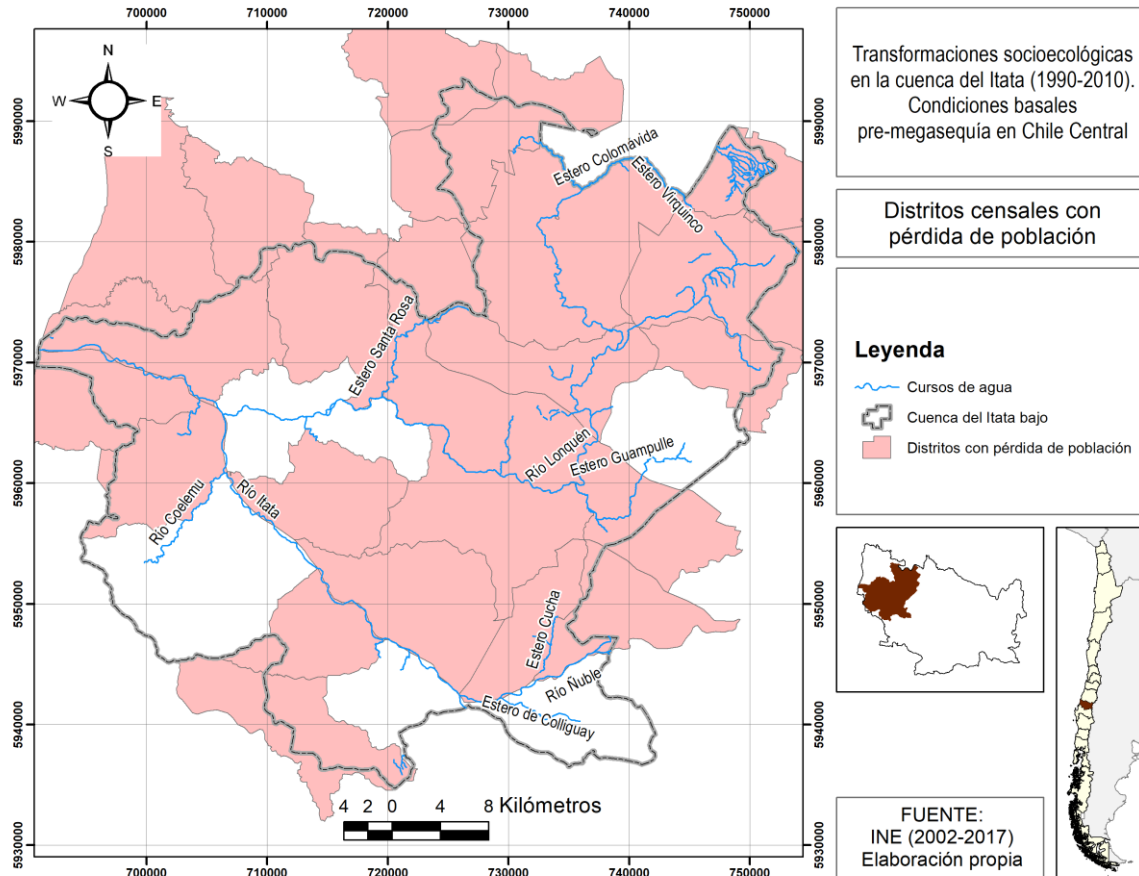
Implicaciones socioeconómicas en la cuenca del Itata

Transformaciones demográficas

El análisis de datos censales reveló cambios demográficos entre 1992 y 2002, aunque la consideración de datos en las diez comunas donde se inserta la cuenca baja del Itata muestran un leve incremento en el volumen de población influenciado por el crecimiento urbano, la tendencia indica despoblamiento en los distritos rurales. Esta tendencia es coherente con la disminución en la cantidad de habitantes de los distritos rurales en la región de Ñuble durante el mismo período. El índice de ruralidad pasó de 75,49% en 1992 a 66,83% en 2002, reflejando un proceso de urbanización interna y emigración selectiva desde áreas rurales.

Tabla 10: Resumen de datos demográficos cuenca del río Itata (1992-2002).

Indicador	1992	2002	Cambio Absoluto	Cambio %
Población total	165.194 hab.	167.654 hab.	2.460 hab.	1,49%



Mapa 5: Distritos censales con pérdida de población.

Servicios básicos y condiciones de habitabilidad

Pese a la complejidad en la dinámica demográfica, se registraron mejoras en la disponibilidad de servicios básicos. El porcentaje de viviendas con agua potable dentro de la vivienda aumentó del 29,58% al 49,10%, mientras que las viviendas sin acceso a agua por cañería

disminuyeron del 41,31% al 20,30%. De manera similar, la conexión a la red pública de electricidad se incrementó del 58,37% al 80,38% de las viviendas, reduciendo el número de hogares sin acceso a electricidad.

Estos avances, sin embargo, coexisten con la persistencia de carencias estructurales, particularmente en áreas rurales donde el acceso al agua condiciona tanto las actividades productivas como la calidad de vida cotidiana.

Tabla 11: Acceso a agua por cañería.

Indicador	1992	2002	Cambio
Agua dentro de la vivienda	29,58%	49,10%	+19,52 pp
Sin acceso a agua por cañería	41,31%	20,30%	-21,01 pp

Tabla 12: Suministro eléctrico.

Indicador	1992	2002	Cambio
Conexión a red pública	58,37%	80,38%	+22,01 pp

Actividades económicas y desarrollo humano

El análisis de la estructura productiva mostró un predominio de actividades terciarias (41%) y primarias (40%) entre la población económicamente activa, con las actividades secundarias representando apenas el 19% del empleo local. Dentro del sector primario, la agricultura, ganadería y actividades conexas concentran el 71,37% del empleo (3.353 personas), mientras que las actividades forestales representan el 27,44% (1.289 personas). Esta estructura muestra la persistente dependencia de actividades directamente afectadas por las condiciones hídricas del territorio: la expansión forestal, que ocupó crecientes superficies durante el período analizado, genera sustancialmente menos empleo por unidad de superficie que la agricultura tradicional –y consume más agua-, contribuyendo potencialmente a las dinámicas de despoblamiento observadas.

Tabla 13: Estructura de la población económicamente activa.

Sector económico	Porcentaje PEA	Personas estimadas*
Actividades terciarias	41,0%	4.815
Actividades primarias	40,0%	4.698
• Agricultura, ganadería y conexas	28,5%	3.353
• Actividades forestales	11,0%	1.289
• Otras actividades primarias**	0,5%	56
Actividades secundarias	19,0%	2.232
TOTAL PEA*	100%	11.745

*Estimado a partir de datos sectoriales.

**Pesca, minería y otras actividades extractivas.

El Índice de Desarrollo Humano (IDH) para las diez comunas del curso inferior de la cuenca del río Itata en 2003 promedió 0,607, significativamente inferior al promedio nacional (0,725), evidencia una brecha de desarrollo de 0,118 puntos. La dimensión más crítica corresponde a ingresos, con un valor medio de 0,544, reflejando condiciones económicas precarias explicadas por la dependencia a actividades agrícolas de autosustento y bajos salarios en el sector primario. Las comunas con IDH más bajo (*Trehuaco*: 0,562, lugar 333 nacional; *Ninhue*: 0,569, lugar 332 nacional) coinciden espacialmente con áreas de mayor déficit hídrico y transformación territorial intensiva. Ambas comunas presentan dimensiones de ingresos bajos (*Trehuaco*: 0,496; *Ninhue*: 0,456), confirmando que la vulnerabilidad hídrica condiciona no solo las actividades productivas sino también el desarrollo humano integral de las comunidades locales.

Tabla 14: IDH 2003 - curso inferior cuenca río Itata.

Comuna	IDH 2003	Salud	Educación	Ingresos	Lugar Nacional	Ubicación
Tomé	0,668	0,733	0,717	0,554	196	Costa
San Carlos	0,653	0,696	0,686	0,578	235	Valle interior
San Nicolás	0,625	0,725	0,613	0,539	298	Valle interior
Coelemu	0,611	0,600	0,664	0,568	312	Costa
Portezuelo	0,599	0,660	0,639	0,497	323	Valle

Comuna	IDH 2003	Salud	Educación	Ingresos	Lugar Nacional	Ubicación
Quirihue	0,594	0,528	0,668	0,585	326	Secano interior
Ranquil	0,586	0,580	0,660	0,517	328	Secano costero
Ninhue	0,569	0,646	0,605	0,456	332	Secano interior
Trehuaco	0,562	0,569	0,620	0,496	333	Costa
Cobquecura	0,633	0,712	0,596	0,589		Costa
PROMEDIO	0,610	0,645	0,647	0,538	-	-
Nacional	0,725	0,776	0,748	0,650	-	-
Brecha	0,115	0,131	0,101	0,112	-	-

Fuente: Calculado a partir de datos de CIREN-CORFO (2005)

Correlación espacial

El análisis de correlación espacial reveló asociaciones significativas entre variables hídricas, transformaciones territoriales y condiciones socioeconómicas.

Las áreas con menor superávit hídrico durante el episodio crítico 1991-1996 coinciden espacialmente con los distritos censales que experimentaron mayor pérdida poblacional entre 1992-2002. Este patrón es particularmente evidente en las comunas del secano costero e interior (*Ninhue*, *Trehuaco*, *Cobquecura*, *Ranquil*), donde el superávit hídrico reducido y sostenido coincide con la disminución demográfica, las comunas con menor disponibilidad hídrica presentaron reducciones proporcionalmente superiores, contrastando con la relativa estabilidad poblacional de comunas del valle interior (*San Carlos*, *San Nicolás*), donde el superávit hídrico es significativamente mayor conforme al gradiente orográfico oeste-este documentado en la modelación hidrológica

Se observó una asociación espacial inversa entre intensidad de transformación forestal y desarrollo humano comunal, particularmente en la dimensión ingresos. Las comunas con mayor presencia histórica de plantaciones forestales y expansión reciente (*Ninhue*, *Trehuaco*, *Cobquecura*) presentan los IDH más bajos del área de estudio (*Trehuaco*: 0,562; *Ninhue*: 0,569), con dimensiones de ingresos críticas (0,496 y 0,456 respectivamente). Esta relación se explica por la convergencia de dos factores: la baja generación de empleo por unidad de superficie de las plantaciones forestales en comparación con sistemas agrícolas tradicionales (27,44% del empleo del sector primario versus 71,37% en agricultura, pese a ocupar mayor superficie territorial), y la elevada evapotranspiración de las plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp., que reduce la disponibilidad hídrica efectiva para actividades productivas alternativas.

Tabla 15: Transformación territorial y desarrollo humano (2003-2010).

Comuna	IDH 2003	Dim. Ingresos	Uso predominante 2010	Característica territorial	Balance hídrico
Trehuaco	0,562	0,496	Forestal-agrícola	Costa, alta forestación	Bajo
Ninhue	0,569	0,456	Forestal-agrícola	Secano interior, alta forestación	Bajo
Cobquecura	0,633	0,589	Forestal-agrícola	Secano costero, alta forestación	Bajo
Ranquil	0,586	0,517	Agrícola-forestal	Secano costero, forestación moderada	Bajo-Moderado
Quirihue	0,594	0,585	Agrícola	Secano interior, agricultura predominante	Moderado
Portezuelo	0,599	0,497	Agrícola	Valle transición, forestación baja	Moderado
Coelemu	0,611	0,568	Agrícola-forestal	Costa, forestación moderada	Moderado
San Nicolás	0,625	0,539	Agrícola	Valle interior, forestación baja	Alto
San Carlos	0,653	0,578	Agrícola	Valle interior, agricultura intensiva	Alto
Tomé	0,668	0,554	Urbano-agrícola	Costa urbana, forestación baja	Alto

Fuente: Elaboración propia a partir de Gore Biobío (2011), CIREN-CORFO (2005) y análisis multitemporal 1990-2010.

Los distritos con mayor proporción de terrenos de baja capacidad agroecológica (46,27% del territorio clasificado en esa categoría) presentan índices superiores de emigración joven, menor disponibilidad de agua potable y menor IDH. Esta relación se evidencia en la concentración espacial de las comunas con peores indicadores socioeconómicos (*Trehuaco*, *Ninhue*, *Cobquecura*) en zonas del secano costero e interior caracterizadas por suelos de capacidad IV-VII, pendientes superiores al 15%, superávit hídrico reducido y limitadas opciones productivas. La emigración de

población menor de 35 años (-7.891 personas en el período 1992-2002) se concentró predominantemente en estas zonas de baja capacidad agroecológica, mientras que las comunas del valle interior con mayor capacidad productiva (*San Carlos, San Nicolás*) mantuvieron relativa estabilidad demográfica.

Tabla 16: Capacidad agroecológica y condiciones socioeconómicas.

Zona geográfica	Capacidad agroecológica predominante	Comunas representativas	IDH 2003 promedio	Agua dentro vivienda 2002	Ruralidad 2002	Emigración joven
Secano costero	Baja-Media (IV-VII)	Trehuaco, Cobquecura	0,560-0,610	<40%	>75%	Alta
Secano interior	Baja-Media (IV-VI)	Ninhue, Quirihue	0,565-0,595	<45%	>70%	Alta
Valle transición	Media-Alta (III-V)	Portezuelo, Coelemu	0,595-0,615	45-50%	60-70%	Moderada
Valle interior	Alta (II-IV)	San Carlos, San Nicolás	0,625-0,655	>50%	<60%	Baja
Urbano costero	Variable (urbano)	Tomé	0,668	>60%	<35%	Baja

Fuente: Elaboración propia a partir de Censo 2002 (INE), Gore Biobío (2011) y Evaluación Multicriterio

Estos resultados evidencian que la disponibilidad hídrica restringida, junto con las transformaciones de uso del suelo y las limitaciones de capacidad agroecológica, ha tenido implicaciones socioeconómicas directas, conformando un proceso de deterioro socioecológico que se manifiesta en despoblamiento, envejecimiento poblacional y precarización de las condiciones de vida, particularmente en áreas rurales del secano costero e interior. La convergencia espacial de superávit hídrico reducido, expansión forestal, baja capacidad agroecológica y deterioro de indicadores socioeconómicos en las mismas comunas (*Trehuaco, Ninhue, Cobquecura, Ranquíl*) sugiere procesos de retroalimentación que amplifican la vulnerabilidad territorial.

CONCLUSIONES

El análisis integrado de las dinámicas hidrológicas, transformaciones territoriales y procesos socioeconómicos en la cuenca inferior del río *Itata* durante 1990-2010 revela interrelaciones que configuran un ciclo de deterioro socioecológico con implicaciones para la sostenibilidad territorial.

La modelación hidrológica retrospectiva confirma la existencia de un superávit hídrico climático persistente en la cuenca (balance medio: 674,11 mm), con marcada variabilidad interanual y diferenciación espacial según un gradiente orográfico oeste-este. Sin embargo, este superávit anual no contradice la existencia de déficits estacionales estivales, documentados por Henríquez (1990), que afectan la disponibilidad de agua durante los meses críticos para la actividad agrícola. El carácter estructural del problema hídrico en la cuenca no reside, por tanto, en una ausencia absoluta de agua, sino en la combinación de tres factores: la concentración invernal de las precipitaciones propia del régimen mediterráneo, la reducción progresiva del superávit en los sectores costeros y de secano, y la presión creciente sobre el recurso derivada de la expansión de plantaciones forestales con alta evapotranspiración.

La expansión de plantaciones forestales comerciales (incremento del 50,76%) a expensas de coberturas vegetales nativas ha modificado los patrones hidrológicos locales. Esta transformación, impulsada como respuesta adaptativa a condiciones de vulnerabilidad hídrica y erosión, ha exacerbado los procesos que originalmente pretendía mitigar, ilustrando mecanismos de retroalimentación negativa entre decisiones productivas y disponibilidad hídrica. La pérdida acelerada de bosque nativo (-61,88% en nueve años), considerando su rol en la regulación hidrológica y la provisión de servicios ecosistémicos, ha relegado los remanentes boscosos a quebradas y áreas marginales, configurando un paisaje fragmentado que compromete funcionalidades ecológicas esenciales.

El desacoplamiento entre capacidad agroecológica y usos actuales del suelo evidencia un déficit de planificación ecológica en la gestión territorial. Esta discordancia refleja la predominancia de lógicas sectoriales y cortoplacistas, donde la racionalidad económica instrumental prevalece sobre consideraciones de sostenibilidad territorial integrada. El análisis multitemporal documenta el carácter unidireccional de estas transformaciones, con plantaciones forestales como destino dominante de terrenos que abandonan otros usos (57,2% desde agrícola, 42,3% desde matorral), proceso que este estudio denomina *forestalización* del paisaje.

Las modificaciones en la estructura demográfica y socioeconómica de la cuenca no pueden comprenderse aisladamente de las transformaciones territoriales y condiciones hídricas analizadas. La correlación espacial entre zonas de menor superávit hídrico, mayor intensidad de transformación forestal y mayor pérdida poblacional sugiere vínculos causales significativos. La concentración de condiciones socioeconómicas precarias (IDH promedio: 0,607, brecha de 0,110 respecto al nacional) en comunas caracterizadas simultáneamente por menor disponibilidad hídrica y mayor transformación territorial (*Trehuaco*: 0,562; *Ninhue*: 0,569) evidencia trampas socioecológicas donde vulnerabilidades biofísicas y marginación socioeconómica se refuerzan mutuamente. Este patrón demuestra que determinados modelos de intensificación productiva pueden generar simultáneamente crecimiento económico sectorial y precarización de condiciones socioeconómicas locales, particularmente en comunidades rurales dependientes de recursos naturales cada vez más presionados.

La evidencia presentada confirma la hipótesis en sus términos complejizados: no fue la ausencia absoluta de agua sino la construcción socioterritorial de vulnerabilidad hídrica — mediante forestalización del paisaje, desacoplamiento entre aptitud y uso del suelo, y dependencia de actividades sensibles a la variabilidad estacional — lo que configuró el deterioro socioecológico pre-megasequía. Este hallazgo es particularmente significativo porque demuestra que existió una ventana de intervención: durante 1990-2010 la cuenca aún disponía de superávit hídrico climático suficiente para sostener transiciones productivas y adaptaciones territoriales que, de haberse implementado, habrían reducido la vulnerabilidad que la megasequía post-2010 encontró ya consolidada.

Los hallazgos tienen implicaciones directas para la política pública. Se requieren instrumentos de planificación territorial vinculantes que orienten actividades productivas según aptitudes biofísicas del territorio, así como la reformulación de instrumentos de fomento forestal para incorporar criterios de localización basados en capacidad agroecológica y potenciales impactos hidrológicos. Se recomienda complementar estos resultados con aproximaciones cualitativas que exploren percepciones y estrategias adaptativas de comunidades locales, y con modelaciones que integren proyecciones climáticas regionalizadas con escenarios alternativos de uso del territorio.

La cuenca hidrográfica, como unidad espacial donde convergen procesos biofísicos y construcciones sociopolíticas, constituye un ámbito privilegiado para desarrollar aproximaciones integradas de gestión territorial. La sostenibilidad territorial no puede alcanzarse mediante intervenciones técnicas aisladas, sino que requiere transformaciones en los marcos conceptuales e institucionales que determinan las relaciones sociedad-naturaleza, superando visiones que separan artificialmente fenómenos sociales y naturales y reconociendo la naturaleza socializada de problemáticas como la vulnerabilidad hídrica.

Referencias

- Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G., & Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82(3), 361-374. <https://rchn.biologiachile.cl/es/contents/2009v82n3/4.php>
- Álvarez-Garretón, C., Boisier, J.P., Garreaud, R., Seibert, J., & Vis, M. (2021). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(1), 429-446. <https://doi.org/10.5194/hess-25-429-2021>
- Berkes, F., Folke, C. & Colding, J. (Eds.). (1998). *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. Cambridge University Press.
- Boisier, J.P., Alvarez-Garretón, C., Cordero, R.R., Damiani, A., Gallardo, L., Garreaud, R.D., Lambert, F., Ramallo, C., Rojas, M. & Rondanelli, R. (2018). Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6, 74. <https://doi.org/10.1525/elementa.328>
- Boisier, J. P., Álvarez-Garretón, C., Marinao, R. & Galleguillos, M. (2025). Increasing water stress in Chile revealed by novel datasets of water availability, land use and water use. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(20), 5185–5212. <https://doi.org/10.5194/hess-29-5185-2025>
- Budds, J. (2020). Securing the market: Water security and the internal contradictions of Chile's Water Code. *Geoforum*, 113, 165-175. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.09.027>
- Catalán, G., & Valenzuela, E. (2021). Extractivismo forestal, centralismo neoliberal y Pobreza Estructural del Itata (Chile). *RTR Revista Territorios y Regionalismos*, 5. <https://doi.org/10.29393/rtr5-5efge20005>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR2]. (2015). *Informe a la Nación: La Megasequía 2010-2015*. Universidad de Chile. <https://www.cr2.cl/megasequia/>
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw Hill.
- Colombo, A. F. & Byer, P. H. (2012). Adaptation, flexibility and project decision-making with climate change uncertainties. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 30(4), 229–241. <https://doi.org/10.1080/14615517.2012.731189>
- Delgado, M. T. & Méndez, E. (1996). *Planificación territorial: medio ambiente y calidad de vida*. Litorama.
- Dirección General de Aguas [DGA]. (2018). *Prospección geofísica sector rural déficit hídrico Valle del Itata*. Ministerio de Obras Públicas.
- Drakes, O., Restrepo-Osorio, D., Powlen, K. A. & Hines, M. (2024). Social Vulnerability and Water Insecurity in the Western United States: A Systematic Review of Framings, Indicators, and Uncertainty. *Water Resources Research*, 60(8), e2023WR036284. <https://doi.org/10.1029/2023WR036284>
- Echeverría, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J. M., Lara, A., & Newton, A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests. *Biological Conservation*, 130(4), 481-494. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.01.017>
- FAO. (2022). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point. Main report*. <https://doi.org/10.4060/cb9910en>

- Fletcher, S., Lickley, M. & Strzepek, K. (2019). Learning about climate change uncertainty enables flexible water infrastructure planning. *Nature Communications*, 10, 1782. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09677-x>
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T. & Rockström, J. (2010). Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. *Ecology and Society*, 15(4), 20. <https://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art20/>
- Gain, A. K., Hossain, S., Benson, D., Di Baldassarre, G., Giupponi, C. & Huq, N. (2020). Social-ecological system approaches for water resources management. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 28(2), 109–124. <https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1780647>
- Garreaud, R., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J. & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrological and Earth System Sciences*, 21(12), 6307-6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Garreaud, R., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H. & Veloso-Águila, D. (2019). The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Gómez Orea, D. (1994). *Ordenación del Territorio, una aproximación desde el medio físico*. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Gómez, M. & Barredo, J. (2006). *Sistemas de información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio* (2.ª ed.). RA-MA.
- Grantham, T.E., Figueroa, R. & Prat, N. (2013). Water management in mediterranean river basins: a comparison of management frameworks, physical impacts, and ecological responses. *Hydrobiologia*, 719, 451–482. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1289-4>
- Greco, S., Ishizaka, A., Tasiou, M. & Torrisi, G. (2019). On the Methodological Framework of Composite Indices: A Review of the Issues of Weighting, Aggregation, and Robustness. *Social Indicators Research*, 141(1), 61-94. <https://doi.org/10.1007/s11205-017-1832-9>
- Hasan, M.H., Hossain, M.J. & Nipa, S.A. (2025). Navigating water discord: a review of water conflicts in the common resource management system in coastal areas. *Frontiers in Water*, 6, 1405601. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1405601>
- Heilmayr, R., Echeverría, C., Fuentes, R., & Lambin, E. F. (2016). A plantation-dominated forest transition in Chile. *Applied Geography*, 75, 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.014>
- Hossain, M.S., Basak, S.M., Amin, M.N., Anderson, C.C., Cremin, E. & Renaud, F.G. (2023). Social-ecological systems approach for adaptation to climate change. *Sustainable Development*, 32(3), 2766–2778. <https://doi.org/10.1002/sd.2801>
- Instituto Geográfico Militar [IGM]. (2001). *Geografía de Chile: Tomo VIII Región del Biobío*. Instituto Geográfico Militar.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Kay, C. (2009). Estudios rurales en América Latina en el periodo de globalización neoliberal: ¿una nueva ruralidad?. *Revista Mexicana de Sociología*, 71(4), 607-645. <https://revistamexicanadesociologia.unam.mx/index.php/rms/article/view/17769>

- Kizielewicz, B., Więckowski, J., Paradowski, B., Shekhovtsov, A., Wątróbski, J., & Sałabun, W. (2024). Stochastic Approaches for Criteria Weight Identification in Multi-criteria Decision Analysis. En N. T. Nguyen, R. Chbeir, Y. Manolopoulos, H. Fujita, T. Hong, L. M. Nguyen, & K. Wojtkiewicz (Eds.), *Intelligent Information and Database Systems: 16th Asian Conference, ACIIDS 2024, Ras Al Khaimah, UAE, April 15–18, 2024, Proceedings, Part I*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4982-9_4
- Liao, H., He, Y., Wu, X., Wu, Z., & Bausys, R. (2023). Reimagining multi-criterion decision making by data-driven methods based on machine learning: A literature review. *Information Fusion*, 100, 101970. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.101970>
- López, F., Rubio, J. & Cuadrat, J. (1992). *Geografía Física*. Cátedra.
- Malczewski, J. (2004). GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*, 62(1), 3-65. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2003.09.002>
- Mehta, L. (2007). Whose scarcity? Whose property? The case of water in western India. *Land Use Policy*, 24(4), 654-663. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2006.05.009>
- Miranda, A., Altamirano, A., Cayuela, L., Lara, A., & González, M. (2017). Native forest loss in the Chilean biodiversity hotspot: revealing the evidence. *Regional Environmental Change*, 17(1), 285-297. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1010-7>
- Molle, F. (2009). River-basin planning and management: The social life of a concept. *Geoforum*, 40(3), 484-494. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2009.03.004>
- Naciones Unidas. (2024). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024: Agua para la prosperidad y la paz*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000391195>
- Ostrom, E. (2009). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science*, 325(5939), 419-422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Peña, F. & Mardones, M. (1999). Planificación ecológica en el curso inferior del río Itata, VIII región del Biobío. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, (44), 45-63.
- *Plantaciones Forestales*. (2024). Observatorio Institucional CIREN. https://observatorio.ciren.cl/profile/uso_de_suelos/plantaciones-forestales
- Pliscoff, P. (2020). *Análisis del estado actual de los ecosistemas terrestres, asociados a dos cuencas en Chile central: Maipo y Maule*. Escenarios Hídricos 2030.
- Rivas Maldonado, J., & Zapata Márquez, N. (2024). Crecimiento forestal en Ñuble (Chile): ¿desarrollo regional o actividad extractivista? *Proyección Estudios Geográficos y de Ordenamiento Territorial*, 18(36), 48-71. <https://doi.org/10.48162/rev.55.062>
- Scown, M.W., Flotemersch, J.E., Spanbauer, T.L., Eason, T., Garmestani, A. & Chaffin, B.C. (2017). People and water: Exploring the social-ecological condition of watersheds of the United States. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 5, 64. <https://doi.org/10.1525/elementa.189>
- Swyngedouw, E. (2009). The Political Economy and Political Ecology of the Hydro-Social Cycle. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 142(1), 56-60. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2009.00054.x>
- Vich, A. (1996). *Aguas Continentales, Formas y Procesos*. Universidad Nacional de Cuyo.
- White, D. A., Silberstein, R. P., Balocchi-Contreras, F., Quiroga, J. J., Meason, D. F., Palma, J. H. & De Arellano, P. R. (2021). Growth, water use, and water use efficiency of Eucalyptus globulus and Pinus radiata plantations compared with natural stands of Roble-Hualo forest in the coastal mountains of central Chile. *Forest Ecology And Management*, 501, 119676. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119676>