

EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE INUNDACIÓN A TRAVÉS DE LA OFERTA DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE REGULACIÓN ASOCIADOS A LA CUENCA DEL RÍO CARAMÁVIDA, COMUNA LOS ÁLAMOS

Elba Arriagada Fren¹, Mauricio Villagrán Valenzuela² y María Elisa Díaz Burgos³

RESUMEN:

La degradación de los servicios ecosistémicos, y el agotamiento de los recursos naturales constituye un obstáculo importante para la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) generando un impacto en la calidad y la sostenibilidad de la vida de las personas. El objetivo de este estudio es evaluar los procesos de inundación a través de la oferta de los servicios ecosistémicos de regulación asociados a la cuenca del río Caramávida en la comuna de Los Álamos frente a máximas precipitaciones, y así permitir una planificación territorial que se adapte a las condiciones fluviales estimadas mediante un modelo de inundación. Se consideran aspectos históricos, geológico-geomorfológicos e hidráulicos para el cálculo y modelamiento del riesgo de inundación en Caramávida. Finalmente, se obtiene el mapa de riesgo que da cuenta de las áreas con mayor riesgo coincidiendo con las zonas más urbanizadas. Las medidas propuestas consisten en evitar seguir construyendo en la llanura de inundación del estero Pichicaramávida considerando una mantención para el cauce, y un trabajo colaborativo con la comunidad para educar y elaborar planes de emergencia ante inundaciones.

PALABRAS CLAVES: servicios ecosistémicos, inundación, riesgo.

ABSTRACT:

The degradation of ecosystem services and the depletion of natural resources constitutes a major obstacle to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs), generating an impact on the quality and sustainability of people's lives. The objective of this study is to evaluate flooding processes through the supply of regulatory ecosystem services associated with the Caramávida River basin in the commune of Los Álamos in the face of maximum rainfall, and thus allow territorial planning that adapts to river conditions estimated using a flood model. Historical, geological-geomorphological and hydraulic aspects are considered for the calculation and modeling of flood risk in Caramávida. Finally, the risk map is obtained that accounts for the areas with the highest risk, coinciding with the most urbanized areas. The proposed measures consist of avoiding further construction in the flood plain of the Pichicaramávida estuary, considering maintenance for the channel, and collaborative work with the community to educate and develop emergency plans for floods.

KEYWORDS: ecosystem services, flood, risk.

¹ Estudiante, Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, earriagada@ing.ucsc.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mvillagran@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad Católica de Temuco, CHILE, mdiaz@uct.cl

1. INTRODUCCIÓN

La alerta de la degradación de los servicios de los ecosistemas (MEA, 2005) constituye un obstáculo importante para la consecución de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ONU, 2019). En este sentido, es necesario reconocer que los ecosistemas brindan servicios indispensables para la calidad y la sostenibilidad de la vida de las personas, por lo que resulta crucial evitar el agotamiento de los recursos naturales para mantener un equilibrio ecológico (MEA, 2005).

El recurso hídrico es un tema de conflicto que estará sometido a las mayores amenazas durante este siglo en Chile debido al consumo desmedido, mala distribución, conflictos socio ecológicos y a la reducción de su disponibilidad como consecuencia de los impactos del cambio climático sobre el régimen de lluvias (ENRH, 2013). El cambio climático altera la regulación del ciclo del agua y las características de los recursos hídricos, donde la principal fuente de captación de agua para el uso humano y los ecosistemas es a través de las cuencas de drenaje, unidad física básica de regulación del agua (Stehr et al., 2019).

En Chile, los decretos de escasez hídrica se han definido a partir de divisiones político-administrativas (municipios, provincias, o regiones) no coincidiendo con los límites geográficos de las cuencas (Dourogeanni et al., 2002). Para una gestión eficiente y sustentable del agua se debe considerar el modelo de GIRH identificando las necesidades locales para definir acciones y medidas deseables y viables para cada cuenca, a través de instancias de coordinación y participación entre los actores involucrados (ENRH, 2013). Las cuencas hidrográficas cumplen importantes funciones regulatorias como, la protección frente a peligros naturales (FAO, 2017) y su gestión contribuye a los ODS (ONU, 2023) minimizando los ciclos de inundación y sus variados efectos (naturales y antrópicos) (CENAPRED, 2019).

La cuenca del río Caramávida constituye un sistema socio ecológico que abarca desde la Quebrada de Caramávida, designada como sitio prioritario de conservación biológica (Ley 19.300 art. 11, letra d), considerada un refugio biológico de alta importancia, debido a que contiene ecosistemas, rasgos o especies de flora y fauna vulnerables, en la cual los procesos ecológicos han podido seguir su curso natural pese a la interferencia humana (WWF, 2011), hasta la junta del estero Huentelí. Su función reguladora del clima y generadora de lluvias aún no ha sido adecuadamente descrita, aunque su rol en la preservación de la biodiversidad de plantas, anfibios, aves y mamíferos de Nahuelbuta ya es materia de análisis y estudio por un importante número de investigadores (MMA, 2016).

La localidad de Caramávida presenta inundaciones por desbordes del río del mismo nombre y Pichicaramávida (Municipalidad de Los Álamos, 2018), donde no sólo se ve afectada la población que habita el sector, debido al transporte de sólidos la turbiedad del agua interfiere en el funcionamiento del sistema de agua potable rural, afectando a cerca de 6000 personas en las localidades de Antihuala, La Araucana y Temuco Chico (Radio Bio Bío, 2017).

La cuenca del río Caramávida provee una elevada cantidad de servicios ecosistémicos, los cuales no han sido estudiados. Por lo que esta investigación contribuye a la evaluar los procesos de inundación a través de la oferta de los SE de regulación asociados a la cuenca del río Caramávida, comuna de Los Álamos, mediante la caracterización del sistema socio ecológico, identificación de los servicios ecosistémicos de regulación presentes en la cuenca y, el análisis a través de un modelo hidráulico, permitiendo proponer medidas de mitigación para el riesgo de inundación en las áreas ribereñas de la cuenca del río Caramávida.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Servicios ecosistémicos (SE)

El concepto de SE surge con el objetivo de evaluar las consecuencias de los cambios en los ecosistemas para el bienestar humano, y para mejorar la conservación del medio ambiente (MEA, 2005).

A partir de la Evaluación del Milenio (MEA, 2005), la conceptualización, definición, y clasificación de los SE han obtenido importantes avances respecto a su operatividad. Su uso se ha convertido en un nuevo paradigma para la conservación de la biodiversidad, la gestión ambiental y la planificación territorial, englobando las interacciones socio-ecológicas de dependencia hombre naturaleza, contribuyendo al bienestar de las personas y a las economías locales y nacionales (De Groot et al., 2010; Wainger et al., 2010, Wu, 2013).

En el año 2012, la Clasificación Común Internacional de Servicios Ecosistémicos (CICES por su sigla en inglés) los distingue entre SE intermedios: soporte, y SE finales: provisión, regulación, y culturales (HainesYoung and Potschin 2013). En este sentido, los servicios de provisión consideran alimentos, agua, la madera y las fibras, entre otras. Los servicios de regulación incluyen el control de inundaciones y sequías, la regulación en la calidad del aire y del agua, siendo vitales para el bienestar humano (MEA, 2005; Gómez y De Groot, 2007). Finalmente, los servicios culturales comprenden los beneficios espirituales, y recreativos del entorno.

2.1.1. SE de regulación asociados al recurso hídrico

Uno de los servicios más tangibles y de mayor impacto es la regulación hídrica (Gaspari et al., 2015). Su deterioro se ha incrementado producto de la variabilidad climática asociada al calentamiento global, ejerciendo un aumento de la presión sobre el recurso hídrico, con consecuencias para los seres humanos y el medio ambiente aumentando la ocurrencia de eventos climáticos extremos (Oyarzún et al., 2005; SEMARNAT, 2012). En este sentido, el exceso de precipitaciones en lapsos muy cortos de tiempo provoca inundaciones, y en periodos prolongados de escasez trae sequías. Lo cual incide negativamente en la capacidad de provisión de la disponibilidad del agua, disminuyendo la calidad del recurso hídrico y amenazando la sostenibilidad, la biodiversidad y el disfrute de los diversos SE (e.g Regulación de caudales para mitigar inundaciones, la recarga de acuíferos, la purificación del agua y el control de la erosión, entre otros) (Conagua, 2010; IDEAM, 2010).

2.2. Recursos hídricos en Chile

Chile es uno de los principales productores de cobre, celulosa y papel, lo que genera una creciente demanda de agua, tanto para el consumo y para las áreas productivas. Durante este siglo el recurso hídrico estará sometido a las mayores amenazas, debido al consumo desmedido y a la reducción de su disponibilidad a consecuencia de los impactos del cambio climático (ENRH, 2013). Proyectando un déficit del 40% de agua frente a los escenarios de cambio climático actual (WWAP, 2015).

En Chile, la adaptación del marco regulatorio a los principios del modelo de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) ha sido escasa, si bien el art. 3 del Código de Aguas establece el principio de unidad de cuenca, los numerosos decretos de escasez hídrica en los últimos tiempos para enfrentar y mitigar los efectos de la sequía se han definido a partir de las jurisdicciones político administrativas (municipios, provincias, o regiones) no coincidiendo con los límites geográficos de dichos territorios (Dourogeanni et al., 2002).

La Estrategia Nacional 2012-2025 señala que para una gestión eficiente y sustentable del agua se debe considerar el modelo de GIRH, tomando en cuenta las particularidades de cada territorio considerando la disponibilidad y calidad del agua, de las condiciones en que se aprovecha ésta y de los objetivos de cada cuenca. Una vez establecido una GIRH se pueden identificar las acciones y medidas deseables y viables para cada cuenca, a través de instancias de coordinación y participación entre los actores involucrados (ENRH, 2013).

La gestión de cuencas hidrográficas contribuye a los ODS 6) Agua limpia y saneamiento, y 15) Vida de ecosistemas terrestres (ONU, 2023). Las cuencas hidrográficas cumplen importantes funciones y servicios, como la protección frente a peligros naturales (FAO, 2017) regulando los patrones hídricos, evitando la saturación del suelo y minimizando ciclos de inundación y sus efectos (naturales y antrópicos) (CENAPRED, 2019).

2.3. Sistema Socio Ecológico (SSE): Cuenca Hidrográfica

Los SSE son complejos adaptativos y evolutivos, su enfoque está ligado a la interacción de diversos componentes (e.g culturales, políticos, sociales, económicos, entre otros) los cuales son necesarios para la vida humana (Ostrom 2009). Sus partes interactúan para formar una entidad más compleja con visión integral (Rathe, 2017). En el caso del recurso hídrico es posible definir un SSE basándose en la delimitación de un territorio, por ejemplo, una cuenca hidrográfica. En este sentido, las cuencas hidrográficas suministran una gran variedad de SE para la sociedad (regulación hídrica, producción y calidad de agua) (Smith, 2007).

Las cuencas hidrográficas son territorios definidos naturalmente donde todos los procesos socio ecológicos están íntimamente ligados entre sí (SEMARNAT, 2013). Se considera un ecosistema cuando se delimita únicamente teniendo en cuenta las relaciones entre la fauna, la flora, y sus factores abióticos, pero se convierte en un SSE al considerar las poblaciones humanas que la habitan y se benefician de sus SE (Salas et al., 2011).

Los cambios en la cobertura y uso del suelo, y sus dinámicas como inundaciones, variaciones climáticas se encuentran entre los motores de cambio más importantes de los sistemas ecológicos en todo el mundo (Yang Bai et al., 2019) afectando directamente la composición y configuración de los ecosistemas, y su capacidad para proporcionar SE (Mononen et al., 2016; Yang Bai et al., 2019).

2.4. Cobertura de suelo

El suelo es una capa delgada compuesta por minerales, materia orgánica, agua, y aire que ocupan los poros, espacios producidos entre las partículas de suelo debido a las irregularidades de su forma y tamaño (MMA, 2021). Su formación es un proceso muy lento, siendo considerado un recurso natural no renovable que se ha visto afectado por la expansión de actividades antropogénicas generando una pérdida de más del 35% de la superficie vegetativa libre de hielo del planeta (MMA, 2021).

Los suelos no sólo constituyen la base de la producción y la seguridad alimentaria, de estos también dependen la seguridad de la civilización, como la seguridad climática, la hídrica y la del ecosistema (FAO, 2015); y funcionan como el “mayor filtro y tanque de almacenamiento de agua en la Tierra” controlando la cantidad y calidad de los recursos de agua dulce (FAO, 2015). Así también la cubierta vegetal es importante para proteger el suelo del impacto de las gotas de lluvia (FAO, 2015).

2.5. Inundación

La interacción antropogénica del día a día, en y con el territorio, determina la alteración y el constante deterioro del medio ambiente contribuyendo a las graves consecuencias de los desastres naturales (CENAPRED, 2019). Existe un peligro al transformar el territorio, un claro ejemplo son las inundaciones. Una inundación corresponde a un incremento rápido del nivel del agua, cubriendo superficies de terreno que normalmente son secas (SENAPRED, 2023). Sus efectos pueden generar afectación en el medio natural y antrópico (CENAPRED, 2019).

En el medio natural destacan la: movilización de sólidos desde la cabecera de la cuenca, aceleración de los procesos de erosión, transporte y sedimentación, generación de corrientes anárquicas en llanos de inundación como también microformas de relieve, variaciones de geometría y trazado del cauce, renovación del ambiente fluvial y de los hábitats (Geis and Steeves, 1980).

Por otro lado, las consecuencias antrópicas son en su mayoría negativas: daños en infraestructuras, repercusiones en la vida humana (falta de comunicaciones, gastos económicos, cesantía, efectos psicológicos, sociológicos, problemas de salud, abastecimiento, etc.) y pérdidas de vidas humanas (Ollero, 1997; Arman, 2010; Djordjevic et al., 2011;). La principal causa de las inundaciones son las precipitaciones intensas en un corto período de tiempo, donde se supera la capacidad de absorción del suelo y comienza a subir el nivel de los ríos (SENAPRED, 2023).

La actividad humana asociada a la expansión urbana descontrolada, carente de ordenamiento y planificación territorial ha incrementado su exposición a las inundaciones, ya sea por la ocupación de terrazas y llanuras de inundación o por la modificación de los sistemas de drenaje naturales (CENAPRED, 2019) afectando de manera contundente a las poblaciones provocando incomunicación, pérdidas humanas, materiales y económicas (Ramsar, 2016).

2.6. Riesgo de inundación

El riesgo de inundación combina la información de la amenaza y la vulnerabilidad a la inundación (Ramsbottom et al., 2006) traducido en la probabilidad de experimentar daños y pérdidas de vidas humanas, sociales, económicas o ambientales, en un área particular y durante un período de tiempo (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2021).

La amenaza representa la inundación y los pérdidas, daños o trastornos a las personas, infraestructura, servicios, modos de vida o medio ambiente (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2021). La vulnerabilidad corresponde a las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, institucionales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de una persona, una comunidad, los bienes, infraestructura o servicios a los efectos de las amenazas (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2021).

Un componente fundamental en materia de desarrollo sostenible es reducir la vulnerabilidad a los desastres naturales mediante un enfoque integral y, por lo tanto, evitar desastres o mitigar sus efectos sobre la población, la infraestructura y la base de recursos naturales que respaldan el desarrollo económico. Al disminuir cualquiera de estas componentes se logra reducir el riesgo (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2021).

2.6.1 Mitigación

La mitigación comprende las medidas dirigidas a reducir los riesgos existentes, evitar la generación de nuevos riesgos y limitar los impactos adversos o daños producidos por las amenazas reconociendo que en ocasiones es imposible evitar su ocurrencia (SENAPRED, 2023).

El manejo de amenazas naturales puede dividirse en medidas previas al evento como mitigación de amenazas (recopilación y análisis de datos, y reducción de vulnerabilidad), preparación para eventos naturales (predicción, preparación para emergencias incluyendo monitoreo, alerta y evacuación, educación y capacitación). Por otro lado, la acciones durante el evento (rescate y asistencia) e inmediatamente posteriores a él (rehabilitación y reconstrucción). De estas medidas, la mitigación es la más efectiva en términos de costos para reducir el número de fatalidades y destrucción de propiedades, así como también es la más compatible con el proceso de planificación del desarrollo (OEA, 2007).

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

La zona de estudio se ubica en la región del Biobío, a 117 km al suroeste de Concepción en la comuna de Los Álamos, en específico a 5 km aproximadamente de localidad de Antihuala (Figura 1).

La cuenca del río Caramávida es una sub sub cuenca de la sub cuenca del río Paicaví, perteneciente a las Cuencas Costeras Lebu – Paicaví de la región del Biobío (DGA, 2004). Sus límites geográficos abarcan una superficie de 166,33 km² cubriendo parte de las comunas de Los Álamos y Cañete. Su principal afluente es el río Caramávida que nace en la Quebrada del mismo nombre y fluye en dirección este - oeste, hasta su confluencia con el estero Huentelí, dando inicio al río Tucapel en la comuna de Cañete. El río Caramávida tiene un recorrido, de no más de 30 km de longitud, es de aguas tranquilas y poco profundas.

Dentro de esta cuenca, se encuentra la microcuenca del estero Pichicaramávida, en la cual se emplaza una población de interés para el estudio del riesgo de inundación perteneciente al sector de Caramávida (PLADECO, 2016-2020).

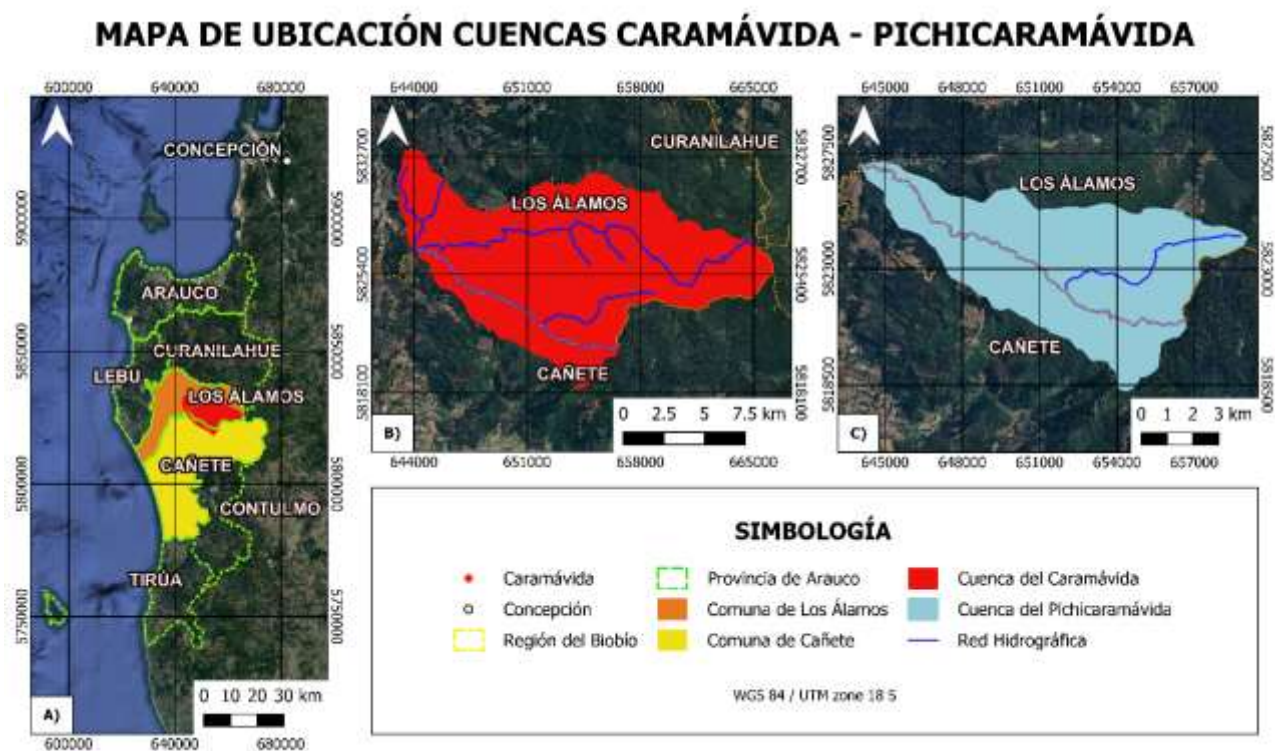


Figura 1. Ubicación área de estudio. A) Cuenca del Caramávida B) Cuenca del Pichicaramávida. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Delimitación y caracterización del SSE

El levantamiento de información bibliográfica de la zona de estudio correspondiente al SSE de la cuenca del Caramávida, se llevó a cabo mediante un diagnóstico geoespacial/territorial de este sistema con interrelaciones físico-humano.

Este diagnóstico corresponde a un análisis descriptivo que recopila información geográfica y demográfica, clasificadas en sistema físico natural (ubicación, clima, geomorfología y geología, flora y fauna, y usos de suelo), y sistemas humanos (historia, población, infraestructura, economía, y turismo), respectivamente. Para ambos

sistemas se utilizó información recopilada desde diversas fuentes relacionadas a la provincia de Arauco, a la comuna de Los Álamos y en específico al sector de Caramávida y Cordillera de Nahuelbuta (CONAF, 2015; INE, 2017; INE, 2019; MMA, 2017; DGA, 2004; PLADECO, 2016-2020).

Los antecedentes correspondientes al sistema humano, su historia, población, infraestructura, economía, y turismo se obtuvieron de fuentes como Plan de Desarrollo Comunal Los Álamos (PLADECO, 2016-2020), CENSO 2017 (INE, 2017), División Político-Administrativa y Censal Región del Biobío (INE, 2019),

3.3. Identificación de los SE en la cuenca río Caramávida

Mediante el método de mapeo de suministro de servicios ecosistémicos propuesta por Burkhard et al. (2009 y 2012^a) basado en una evaluación biofísica no monetaria se asignan valores en matrices de demanda de SE, que posteriormente son sistematizados en una única matriz permitiendo la evaluación de la capacidad de los ecosistemas de la cuenca para proveer SE.

Esta capacidad fue evaluada usando una escala que toma valores entre 0 (nula) y 5 (muy alta) (Burkhard et al., 2009) de esta forma se logró evaluar la aptitud o capacidad de distintas unidades geoespaciales para proporcionar SE. A estos valores se les aplicó la metodología de estandarización planteada por Petter et al., 2013 obteniendo una visión generalizada de la percepción, donde los valores entre 0 y 2 se les asignó el valor de 0, y entre 3 y 5 el valor de 1.

Para construir la matriz de demanda de SE, se usaron 19 SE con potencial en la zona seleccionados de acuerdo con clasificación de CICES (HainesYoung and Potschin 2013) (en columnas) y 14 tipos de ecosistemas o sub usos de suelo obtenidos del Catastro de Uso de Suelo y Vegetación de la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2015) (en filas). Las intersecciones representan las capacidades de demanda potencial de los diferentes ecosistemas para proporcionar SE.

Debido a que no existen estudios previos sobre la valoración de SE esta se llevó a cabo por actores locales con conocimiento ecológico local.

3.4. Modelación hidráulica

Para el análisis de los procesos de inundación, se utilizó el modelo hidrológico - hidráulico HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineers, 2016). El cual permite simular flujos unidimensionales en régimen permanente gradualmente variado a partir de la ecuación de conservación de la energía (EC.1), considerando pérdidas de energía del flujo de agua por fricción (ecuaciones de Manning) permitiendo estimar las profundidades y velocidades de las inundaciones.

$$Y_2 + Z_2 + \frac{a_2 + V_2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{a_1 + V_1}{2g} + h_e \quad EC.1$$

Donde:

Y1, Y2 = tirante de sección transversal;

Z1, Z2 = altura del fondo en canal principal;

V1, V2 = velocidades medias;

a1, a2 = coeficientes de velocidad;

g = gravedad,

he = energía perdida

La modelación hidráulica consistió inicialmente en generar los ejes y bordes de los esteros de la cuenca a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM) de resolución espacial 27.6 x 27.6 m en QGIS 3.22.0. Posteriormente se mejoró el detalle del relieve del río y las secciones transversales en CIVIL 3D 2023 Métrico Español; en este software se obtuvo la geometría del cauce del estero que es exportada a HEC-RAS 5.0.7, donde a partir de datos de terreno, caudales y características del cauce se simuló el comportamiento hidráulico del río para determinar los niveles de agua máximas en un evento de crecida.

3.4.1. Estimación de caudales

Se realizó el cálculo del caudal para periodos de retorno de 2, 5, 20 y 50 años, proponiendo el método DGA-AC (DGA, 1995). Método basado en desarrollos teórico-empíricos para cuencas pluviales o pluvionivales entre las regiones de Atacama y la Araucanía sin información fluviométrica y con áreas comprendidas entre 20 y 10.000 km², restringiendo su uso a períodos de retorno inferiores a 100 años (DGA, 1995).

El método consiste definir la zona homogénea a la que pertenece la cuenca en estudio, determinando la curva de frecuencias regional adimensionada para la variable caudal medio diario máximo en un periodo de retorno de 10 años (Q_{10}), utilizando la ecuación (2) (DGA, 1995), donde, AP es el área pluvial de la cuenca expresada en km², y P es la precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años (mm).

$$Q_{10} = 2 * 10^{-3} * Ap^{0.973} * P_{24}^{10^{1.224}} \quad EC.2$$

Finalmente, a través del producto del factor de conversión de caudal medio diario máximo determinado en función de la zona homogénea a la cual pertenece la cuenca y la curva de frecuencias de caudal medio diario máximo se obtienen los caudales instantáneos (DGA, 1995). Para el área aportante pluvial es necesario definir la ubicación de la línea de nieves, correspondientes a la cota promedio durante eventos de tormentas donde se produce la interfase lluvia-nieve (DGA, 1995). La cual se obtuvo utilizando el método de Escobar y Vidal (1992), que comprende áreas entre 35° y 39° de latitud sur. La precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años se obtuvo en base a los planos de isoyetas del estudio “Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 días de escala 1:500.000 de la DGA (1991).

3.4.2. Estimación del coeficiente n de Manning

El coeficiente n de Manning refleja la cantidad de resistencia dinámica del flujo en cauces naturales o artificiales, siendo muy variable debido a que se encuentra en función de factores como la rugosidad, la vegetación, las irregularidades del cauce, el perímetro mojado, las obstrucciones, el caudal, el nivel y el cambio estacional (Fernández de Córdova et al., 2018).

Para este estudio se utilizó el método de Cowan (1956), procedimiento que consiste en estimar el valor de n en función de parámetros característicos del cauce, aplicando la siguiente fórmula:

$$n = (n0 + n1 + n2 + n3 + n4) * m5 \quad EC.3$$

Los valores por considerar en la ecuación (3) según las condiciones del canal en la zona húmeda corresponden a $n0$ un valor que representa la materialidad del perímetro, $n1$ valor que indica el grado de irregularidad, $n2$ considera las variaciones de las secciones transversales del canal, $n3$ considera el efecto de las obstrucciones, $n4$ considera la vegetación, y $m5$ es un factor de corrección de los efectos por meandros en el canal (Chow, 1959). Para las llanuras de inundación se utilizaron los valores propuestos por Horton (1916).

3.5. Mitigación para el riesgo de inundación

3.5.1. Riesgo de inundación

La Organización de los Estados Americanos (OEA) proponen un modelo de análisis cuantitativo que establece la ponderación de la amenaza (A) y la vulnerabilidad (V) para obtener el valor del riesgo (R) (Ecuación 4).

$$R = A * V \quad EC.4$$

Finalmente, para la obtención del riesgo mediante la versión QGIS Desktop 3.22.0 se generaron las capas de amenaza y vulnerabilidad ponderadas a través de la herramienta calculadora ráster, y el resultado corresponde al mapa de riesgo de inundación en la cuenca del Caramávida.

3.5.2. Peligro de inundación

A partir de un modelo hidrológico – hidráulico se evaluó el peligro de inundación (HR) utilizando el método planteado por Ramsbottom et al. (2006) (Fase 2 del informe “Riesgo de Inundación para Personas” del DEFRA) mediante la ecuación (5), donde se considera la velocidad del flujo (v), la profundidad de inundación (d), y el factor de escombros (DF) siguiendo a Ramsbottom et al., (2006).

$$HR = D * (V + 0,5) + DF \quad EC.5$$

Generando un mapa de amenaza para la peligrosidad frente a la inundación, que muestra la ubicación de las diferentes clases de peligro en áreas propensas a inundaciones (Ramsbottom et al., 2006). Esto se desarrolla en base a datos de caudales y niveles de suelo, donde se plasman las condiciones hidráulicas que afectan la seguridad de las personas (Tabla 1) en función de la profundidad y velocidad del agua obtenidas en el software HEC-RAS 5.0.7, Y posteriormente modelados y ponderados en el software QGIS Desktop 3.22.0 a través de la herramienta calculadora ráster.

Tabla 1. Peligro para las personas. Fuente: Ramsbottom et al., 2006.

$D * (V + 0,5)$	Grado de peligro de inundación	Descripción
< 0,75	Leve	"Zona de inundación con flujo de agua poco profunda o agua estancada profunda"
0,75 - 1,25	Moderado	Peligroso para algunos (por ejemplo, niños). "Peligro: Zona de inundación con agua profunda o que fluye rápido"
1,25 - 2,5	Significativo	Peligroso para la mayoría de la gente. "Peligro: Zona de inundación con aguas profundas de flujos rápidos"
> 2,5	Extremo	Peligroso para todos. "Peligro extremo: Zona de inundación con aguas profundas y de flujos rápidos"

3.5.3. Vulnerabilidad

Para el cálculo de la vulnerabilidad se consideró un análisis de la población expuesta correspondiente a la cantidad de personas que residen en la zona propensa a inundarse (Ramsbottom et al., 2006) a partir de los datos del último Censo (INE, 2017). Estos fueron modelados mediante la herramienta “estimación de densidad de núcleo” del software QGIS Desktop 3.22.0 (León et al., 2023).

4. RESULTADOS

4.1. Sistema Socio Ecológico de Caramávida

La cuenca del río Caramávida presenta un clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea (PLADECO 2016-2020). Su principal característica es la presencia de una humedad constante con precipitaciones máxima diaria de 102,81 mm (DGA, 1991).

La geomorfología se caracteriza al Oeste por la presencia de zonas de planicies marina y/o fluviomarina, al Este destacan los relieves correspondientes a la Cordillera de la Costa, donde destacan los cordones montañosos de la Cordillera de Nahuelbuta alcanzando alturas cercanas a los 1.500 m.s.n.m, y compuestos principalmente por rocas graníticas y metamórficas de la edad paleozoica hace unos 570 millones de años (WWF, 2011). En estos nacen los ríos Caramávida, Pilpilco y Trongol (PLADECO 2016-2020).

En Caramávida, se encuentra una diversidad de flora compuesta por bosques nativos y distintas especies vegetales que se han ido adaptando a las condiciones climáticas de la zona, que originalmente debe haber tenido un gran desarrollo y riqueza florística, pero ha sido casi completamente reemplazado por las plantaciones de *Pinus radiata* (PLADECO, 2016-2020). La comunidad vegetal dominante corresponde al bosque mixto templado de Coigüe (*Nothofagus dombeyi*) y Roble (*Nothofagus obliqua*). Le acompaña un complejo de comunidades de bosque caducifolio, laurifolio y siempreverde donde *Nothofagus dombeyi*, *Nothofagus obliqua* y *Eucryphia cordifolia* (ulmo) alternan la dominancia (MMA, 2016). Encabezando la lista de prioridades de conservación destacan el michay rojo, el pitao, la araucaria y el queule.

La fauna acuática potencialmente presente en los afluentes de la cuenca son Perca Trucha (Percichthyidae), Puye o Peladilla (Galaxiidae), Trucha Arcoiris (Salmonidae) (Fotografía 1), Trucha de río o Trucha común (Salmonidae) (DGA, 2004).



Fotografía 1. Fauna acuática presente en la cuenca del Caramávida. Fuente: toma propia.

Algunas de las especies terrestres de interés y amenazadas corresponden a *Lycalopex fulvipes* (Zorrito de Darwin) (Fotografía 2), *Campephilus magellanicus* (Carpintero) y *Dromiciops gliroides* (Monito Del Monte) *Pristidactylus torquatus* (Gruñidor del Sur) (ARAUCO, 2012).



Fotografía 2. Especies terrestres en amenaza presente en la cuenca del Caramávida. Fuente: toma propia.

En base al Catastro de Uso de Suelo y Vegetación de la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2015) se diferenciaron los siguientes sub usos de suelo para la cuenca del río Caramávida descritos en la Tabla 2, donde se visualizan 14 sub usos de suelo con su respectiva área y porcentaje de ocupación, calculando un área total de 166,33 km².

El Bosque Nativo representa el mayor subuso de suelo presente en la cuenca del Caramávida con un 56.74% de ocupación correspondiente a un área de 94.37 km². Le sigue plantación con una ocupación de 34.43% lo que corresponde a un área de 57.27 km². Los sub usos de suelo Ríos y Vegas representan la menor área ocupación equivalente a 0.02 km² correspondiente a un 0.01% respectivamente.

Tabla 2. Áreas y porcentajes de ocupación del área de estudio asociado los sub usos de suelo. Fuente: Elaboración propia.

Sub usos de suelo	Área de ocupación (km ²)	Porcentaje de ocupación (%)
Bosque Nativo	94.37	56.74
Plantación	57.27	34.43
Matorral	6.14	3.69
Matorral Arborescente	2.34	1.41
Bosque Mixto	2.17	1.30
Terreno de Uso Agrícola	2.12	1.27
Praderas	0.96	0.58
Otros Sin Vegetación	0.41	0.25
Matorral - Pradera	0.28	0.17
Lagos, Lagunas, Embalses, Tranques	0.19	0.11
Otros Terrenos Húmedos	0.03	0.02
Rotación Cultivo - Pradera	0.03	0.02
Ríos	0.02	0.01
Vegas	0.02	0.01

Dentro de la comuna de Los Álamos las localidades pobladas que interactúan con esta cuenca y que conforman el SSE, corresponden a Caramávida, Antihuala, Temuco Chico y La Araucana, debido a su abastecimiento de agua mediante una captación de Agua Potable Rural (APR), ubicada en la confluencia del río Caramávida, específicamente en la junta del estero Huentelí. La cuenca posee un área urbana de aproximadamente 0.61 km², con una población de 50 personas y un total de 31 viviendas en zona rural (INE, 2019).



Fotografía 3. Ubicación captación de Agua Potable Rural (APR). Fuente: toma propia.

La principal actividad económica de la cuenca es forestal, con desarrollo de agricultura de subsistencia, el emprendimiento a través de la elaboración de productos agroecológicos, principalmente mermeladas, miel, café de trigo, verduras, papas, harina tostada, etc., y la actividad turística rural comunitaria y ecológica, además del turismo de sol y playa promovido por los campings del sector (DECOOP, 2020). También destaca la extracción de rocas metamórficas (piedra laja), utilizadas como materiales de construcción en revestimientos de suelos y paredes en casas y todo tipo de edificaciones (DECOOP, 2020).

Caramávida promueve la actividad turística rural comunitaria y ecológica, además del turismo de sol y playa promovido por los campings del sector que gira en torno a los atractivos naturales existentes en la zona, entre ellos el Río Caramávida y su cercanía a los sitios pertenecientes al Parque Nacional Nahuelbuta y sitio prioritario de conservación biológica como la Quebrada de Caramávida (DECOOP, 2020).

El río Caramávida, que significa en mapuche “montañas verdes” (Karumawida), es un lugar extenso y con un entorno natural de inapreciable belleza, donde concurren muchas familias que desean el descanso, la naturaleza, la tranquilidad y las aguas puras y cristalinas que bajan entre piedras, arenas, remansos y correntadas desde la Cordillera de Nahuelbuta. En él se realizan actividades como: pesca, trecking, kayak, rafting, y stand up (DECOOP, 2020)

Todas estas interacciones del recurso hídrico necesarios para la vida humana (Ostrom 2009) hacen posible definir a la cuenca de Caramávida un SSE al suministrar una gran variedad de SE para su población ribereña.

4.2. Matriz de Burkhard

La aplicación de la matriz de Burkhard tuvo una buena recepción por parte de la comunidad. De un total de 125 respuestas recibidas se construyó la matriz de demanda estandarizada usando las modas totales de subuso de suelo con la metodología estandarizada descrita por Petter et al, (2013) (Tabla 3).

Al obtener la matriz estandarizada se realizó una suma horizontal con la demanda potencial los sub-usos de suelo, esto para saber la cantidad de SE que se entrega del total categorizados. Estas coberturas fueron obtenidas del Catastro de Uso de suelo de CONAF (2015) (Figura 2).

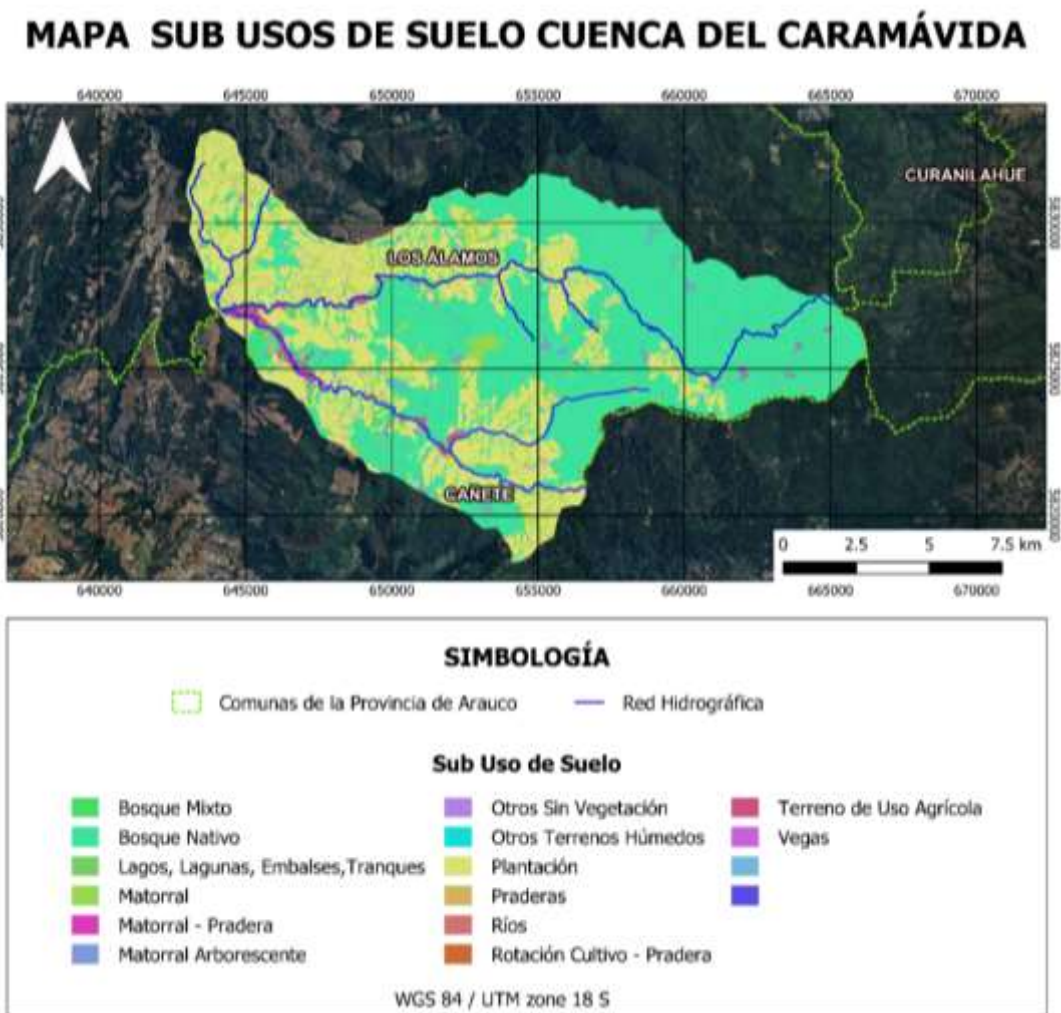


Figura 2. Sub Usos de Suelo presentes en la cuenca del Caramávida. Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 3 se tiene que de los 14 Sub usos de suelo presentes en la cuenca del Caramávida 13 presentan una demanda sobre el 50%. El Bosque Mixto y Bosque Nativo demandan el 100% de los SE evaluados en la cuenca, al contrario de Otros Terrenos Sin Vegetación con una demanda del 0%.

4.2.1. Mapeo de SE de Provisión

En cuanto a la demanda de los SE de provisión evaluados se obtuvo una amplia valoración de los sub usos de suelo correspondientes a Bosque Mixto, Bosque Nativo y Matorral Arborescente (Tabla 3), destacando una alta demanda de provisión en siete SE identificados en el área correspondiente al 100% de estos (Figura 3). En contraste con los Terrenos Sin Vegetación que obtuvieron valoración de baja demanda de SE representando un 0% en todos los SE.

Para los sub usos de suelo Matorral y Plantación se obtuvo un 86% de alta demanda en sus SE (Figura 3), el 14% restante corresponde a la baja demanda para el SE de Agua Fresca (Tabla 3).

Se obtiene un 71 % de alta demanda en los SE de provisión para los sub usos de suelo Matorral-Pradera, Praderas, y Rotación Cultivo-Pradera (Figura 3) las que obtuvieron valores de baja demanda de provisión para los SE de Combustible y Agua fresca equivalente al 29% (Tabla 3).

Las coberturas de Terreno de Uso Agrícola y Vegas obtuvieron valoraciones de baja demanda de provisión para los SE Combustible, Recursos Ornamentales y Agua Fresca (Tabla 3) representando un 43% de la demanda (Figura 3).

Lagos, Lagunas, Embalses, Tranques y Ríos (Figura 3) obtuvieron valoraciones de alta demanda de provisión de Alimentos y Agua Fresca correspondiente al 29%, mientras que en el resto de SE presentan una baja demanda (Tabla 3). En contraste, los Terrenos Húmedos obtuvieron una alta demanda de provisión en los SE de Forraje y Agua Fresca, y baja demanda en los SE restantes equivalente al 71%.

4.2.2. Mapeo de SE de Regulación

La demanda de los SE de regulación para Bosque Mixto, Bosque Nativo, Matorral, Matorral Arborescente, y Plantación obtuvieron valores de alta demanda (Tabla 3) representando el 100%. En cambio, a Otros Terrenos Sin Vegetación que obtuvo una baja demanda de regulación en todos los SE, correspondiente a un 0% (Figura 4).

El 86% de la demanda (Figura 4) se encuentra representado por el sub uso de suelo Matorral – Pradera que obtuvo valoraciones de baja demanda en el SE de Purificación del Agua y Tratamiento de Desechos (Tabla 3).

Las coberturas de Lagos, Lagunas, Embalses, Tranques y Otros Terrenos Húmedos obtuvieron una baja demanda de regulación en los SE de Polinización y Regulación de Eventos Naturales (Tabla 3) obteniendo un 29% de la demanda de los SE. Los sub usos de suelo Praderas, Rotación Cultivo-Pradera, Terreno de Uso Agrícola, presentan una baja demanda de los SE de Purificación del Agua y Tratamiento de

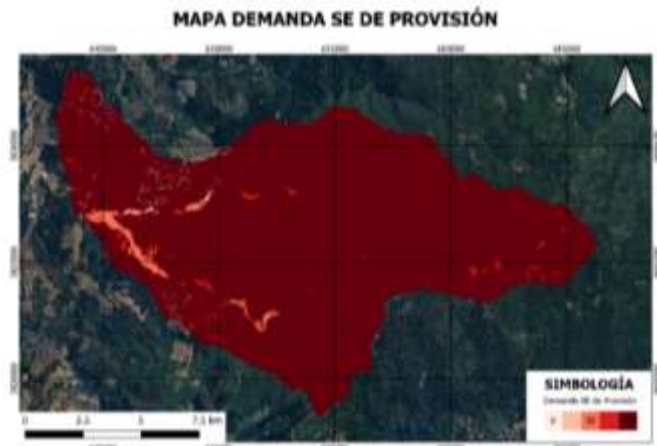


Figura 3. Mapeo de demanda SE de provisión cuenca del Caramávida. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. Mapeo de demanda SE de regulación cuenca del Caramávida. Fuente: Elaboración propia.

Desechos, y Regulación de Eventos Naturales (Tabla 3). Los Ríos presentan baja demanda de los SE de Regulación de la Erosión y Polinización (Tabla 3). Las Vegas presentan baja demanda de los SE de Regulación de la Calidad el Aire y Regulación de eventos naturales. Cada una de estas coberturas representan el 71% de la alta demanda (Figura 4).

4.2.3. Mapeo de SE Culturales

Para los SE culturales se tiene que 13 de 14 coberturas presentes en la cuenca del Caramávida obtuvieron valores de alta demanda en más del 50% de sus SE (Figura 5). Los sub usos de suelo Bosque Mixto, Bosque Nativo, Lagos, Lagunas, Embalses, Tranques, Plantación y Ríos obtuvieron apreciaciones del 100% de la demanda en los SE (Figura 5). Por el contrario, Otros Terrenos Sin Vegetación obtuvieron una baja demanda en todos los SE con un 0%.

Para los sub usos de suelo como Matorral, Matorral-Pradera, Matorral Arborescente, Otros Terrenos Húmedos, Praderas, Rotación Cultivo-Pradera, Terreno de Uso Agrícola y Vegas se obtuvo una alta demanda en el 80% de la demanda de SE (Figura 5), y un 20% de baja demanda para los SE de Valores Religiosos y Espirituales.



Figura 5. Mapeo de demanda SE culturales cuenca del Caramávida. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Zonificación del peligro por inundación

4.3.1. Método hidráulico

Para la simulación del cauce en HEC-RAS 5.0.7 se requieren datos de caudales, geometría, dinámica del flujo del cauce en función de factores como la rugosidad, la vegetación, las irregularidades del cauce, el perímetro mojado, las obstrucciones, el caudal, el nivel y el cambio estacional.

Para el análisis hidrológico se estimaron caudales máximos instantáneos a través del método DGA-AC para cada uno de los esteros de la microcuenca del Pichicaramávida utilizando caudales entre $22.7 (m^3/s)$ y $54.9 (m^3/s)$ para períodos de retorno de 2 y 50 años respectivamente (Tabla 4). Esta microcuenca es de interés para la evaluación del riesgo de inundación debido a la ubicación de su población ribereña y los antecedentes de inundaciones anteriores.

Tabla 4. Caudales Instantáneos Máximos mediante el método DGA-DC. Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Descripción	Caudal para T=2 años (m^3/s)	Caudal para T=5 años (m^3/s)	Caudal para T=20 años (m^3/s)	Caudal para T=50 años (m^3/s)
Pichicaramávida	Estero principal	9.934	14.465	20.217	24.051
Epumallín	Estero afluente	8.319	12.114	16.930	20.141
Chicharrones	Estero afluente	4.446	6.474	9.048	10.764

La modelación se hizo en régimen mixto, con condiciones de borde “Normal Depth” (profundidad normal) con una pendiente de 0.01 para el estero Pichicaramávida. La geometría del cauce se obtiene en base a un Modelo Digital de Elevación (DEM) de resolución espacial 27.6 x 27.6 m, con secciones transversales espaciadas cada 500 m en un tramo de 12 km a lo largo del estero Pichicaramávida. Para este estudio, no se contó con la batimetría del sector, lo que implica un menor detalle del relieve del lecho del estero teniendo que ser ajustado en algunas secciones transversales para nivelarlo con la morfología actual.

En la Tabla 5 se indican los valores obtenidos para el coeficiente de Manning en la zona húmeda mediante el método de Cowan (1956), y para el caso de las llanuras de inundación a partir de los valores recomendados por Horton (1916).

Tabla 5. Valores para el coeficiente de Manning mediante el método de Cowan (1956) y Horton (1916). Fuente: Elaboración propia.

Estero Pichicaramávida		
Zona húmeda	Coeficiente de Manning	
0-12 km	0.06	
Planicies de inundación	Borde derecho	Borde izquierdo
0-5.5 km	0.035	0.035
6-12 km	0.08	0.08

De acuerdo con los valores de la Tabla 5, para la zona húmeda a lo largo de los 12 km del estero se consideró un valor de $n = 0,06$ obtenido de la Ec.3, donde se consideraron los valores descritos en la tabla 6.

Tabla 6. Valores para el coeficiente de Manning para la zona húmeda del cauce mediante el método de Cowan (1956). Fuente: Elaboración propia.

Condiciones del canal		Valor Coeficiente de Manning	
Material del perímetro	Grava fina	n0	0.024
Grado de irregularidad	Moderada	n1	0.01
Variación de la sección transversal	Ocasional	n2	0.005
Efecto de las obstrucciones	Menor	n3	0.0125
Vegetación	Baja	n4	0.005
Curvaturas en planta	Apreciables	m5	1.15

Para el caso de las planicies, en el primer tramo que abarca hasta los 5.5 km se obtiene un valor de 0,035 por la presencia de matorrales dispersos, y mucha maleza en ambos costados. Desde los 6 km se tiene un valor de 0,08 por presentar gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, y nivel del agua por debajo de las ramas.

La Figura 6 corresponde al perfil longitudinal del eje hidráulico del estero Pichicaramávida como parte de los resultados obtenidos de HEC-RAS 5.0.7, donde se identifica que el régimen de río corresponde a subcrítico con un Froude < 1 en todas las secciones transversales.

La Figura 6.a es un fragmento del comportamiento del estero entre los 500 m y 1.5 km, donde se mantiene el régimen subcrítico. Las velocidades al inicio del tramo son inferiores a 0.3 m/s. Entre los 4 y 6 km (Figura 6.b) el régimen se mantiene subcrítico. Las velocidades cercanas a los 5 km son de 0.6 m/s. Por último, la Figura 6.c es un fragmento del comportamiento del eje donde se genera un pozón entre los 7.5 y 8.5 km, correspondiente a un régimen subcrítico con control de aguas abajo producto de velocidades mínimas de a 0.12 m/s.

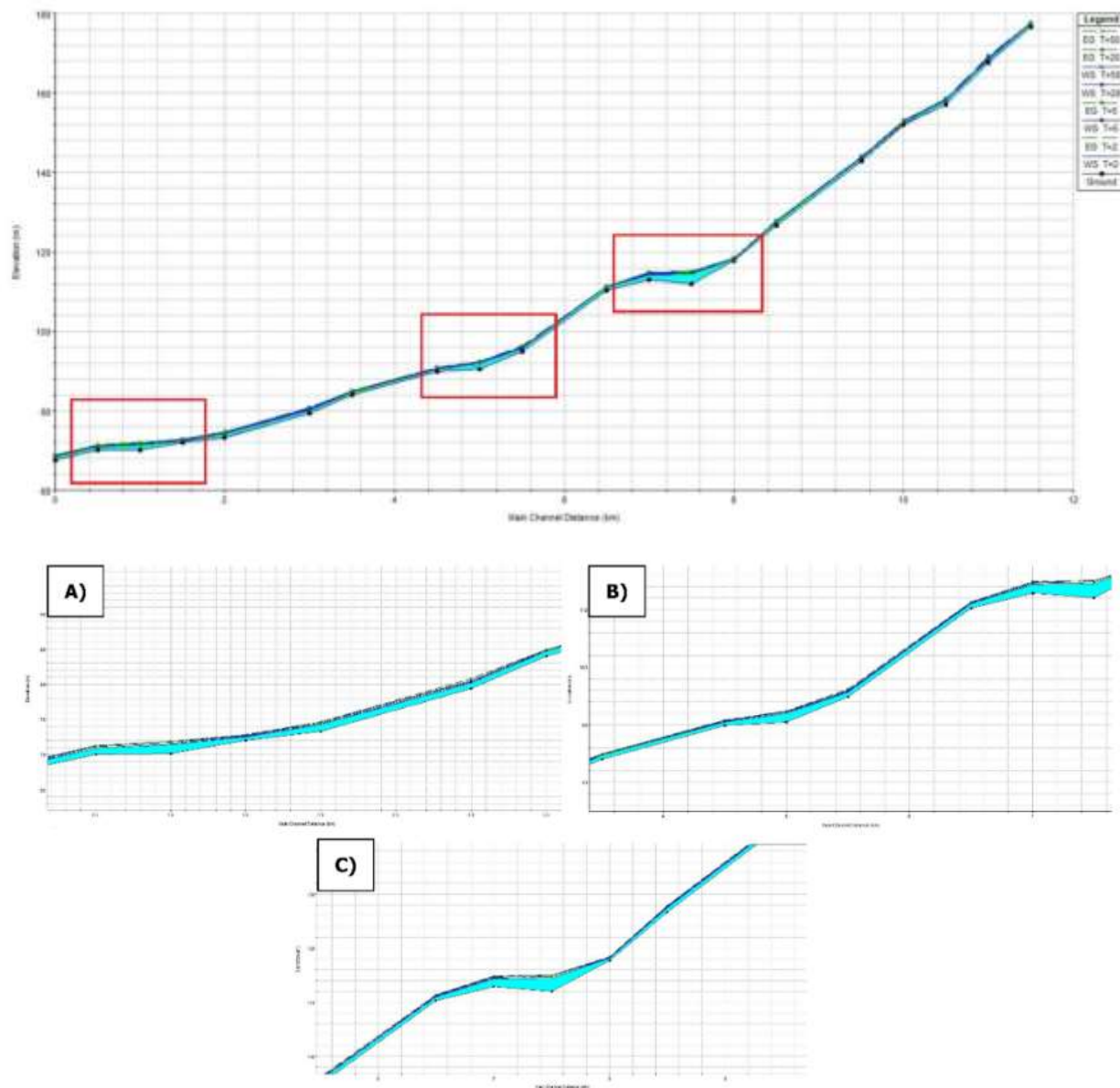


Figura 6. Eje hidráulico estero Pichicaramávida. Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Zonificación del peligro por inundación

Para la elaboración del mapa de inundación fluvial (Figura 6) se cuantificó el peligro mediante el método de Ramsbottom et al. (2006), usando un Modelo Digital de Elevación (DEM) de resolución espacial 27.6 x 27.6 m, a través de la calculadora ráster en el software QGIS 3.22.0 con los datos de profundidad y velocidad entregados por la simulación del modelo hidráulico unidimensional del software HEC-RAS 5.0.7 para periodos de retorno de 2, 5, 20 y 50 años.

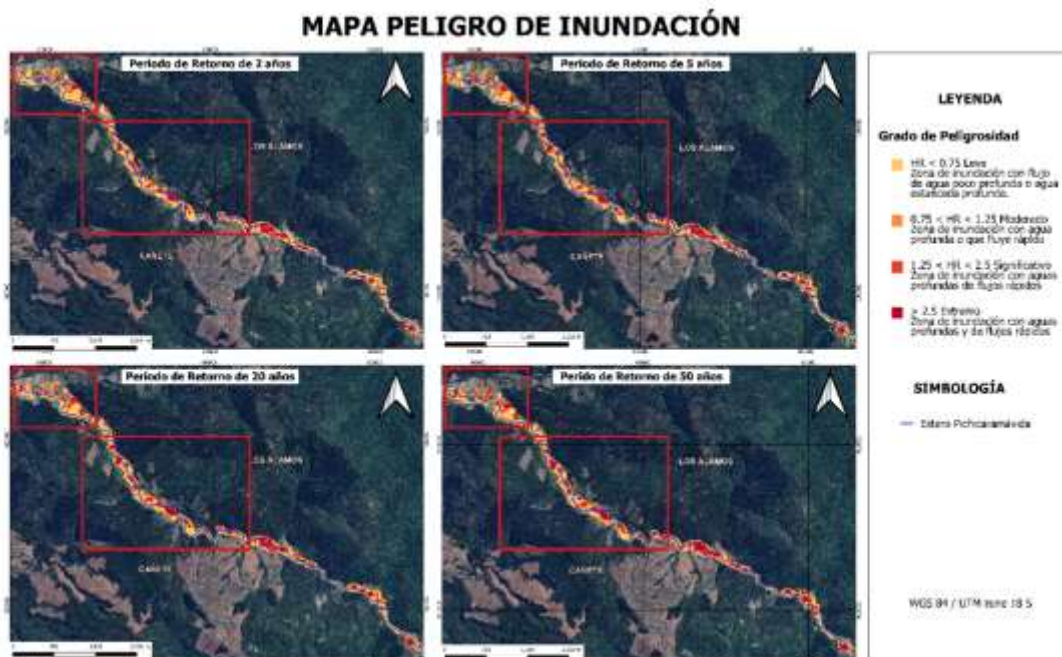


Figura 7. Mapa de inundación fluvial para el estero Pichicaramávida, comuna de Los Álamos. Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 7, se observa el comportamiento del flujo para los distintos periodos de retorno donde se identifican pequeños cambios en la dimensión de la inundación, y en el grado de peligrosidad. En general, las áreas de inundación obtienen valores de peligrosidad leve a extrema, con alturas de inundación que van desde 0.004 mm para peligro leve hasta 6 m para peligro extremo. Se identificaron dos áreas de interés para la obtención del riesgo de inundación destacadas en rectángulos rojos (Figura 7). Estas corresponden a las áreas más urbanizadas en la microcuenca correspondiente a los primeros 2.5 km del estero Pichicaramávida (de Oeste a Este), y desde el kilómetro 4 hasta los 5.5 km. Los 6 km restantes no se consideran para el cálculo del riesgo, ya que no presentan habitantes.

4.4. Evaluación del riesgo

Para la evaluación del riesgo de inundación (Figura 8) se consideraron los datos del peligro a inundación (Figura 7) con los de la vulnerabilidad. La vulnerabilidad para el estero Pichicaramávida, se obtiene a través de la densificación de su población mediante un mapa de calor generado a través de la calculadora ráster de QGIS 3.22.0 de resolución espacial 27.6 x 27.6 m.



Figura 8. Mapa de riesgo de inundación fluvial para el estero Pichicaramávida, comuna de Los Álamos. Fuente: Elaboración propia.

Es posible observar en la Figura 8 valores de riesgo leve a extremo para la llanura de inundación del estero Pichicaramávida donde existe el asentamiento de una población ribereña donde hubo afectaciones por desborde durante los temporales del 20 al 25 de junio (Fotografía 4 y 5), 20 de agosto y 14 de septiembre.



Fotografía 4. Desborde estero Pichicaramávida junio 2023. Fuente: toma propia.



Fotografía 5. Inundaciones septiembre, octubre 2023. Fuente: toma propia.

5. CONCLUSIÓN

El cambio de cobertura vegetal y el crecimiento de la mancha urbana son algunos de los factores asociados a la pérdida de los SE relacionados a las inundaciones en el SSE de Caramávida. En general, la llanura de inundación del estero Pichicaramávida presenta coberturas con áreas de inundación de peligro que van desde valores leves a extremos.

Las coberturas más expuestas, y con valores de riesgo de leve a extremo corresponden sub usos de suelo son Terreno de Uso Agrícola donde además existe el asentamiento de una población ribereña, que deja en evidencia la falta de planificación y ordenamiento territorial permitiendo esta exposición directa a los desbordes de este en crecidas. Los sub usos de suelo Terreno de Uso Agrícola, Praderas, y Vegas presentan 71% de la demanda en sus SE de regulación, donde el SE de regulación de eventos naturales obtuvo un valor de baja demanda en todas estas coberturas.

Al contrario de la valoración de los SE las Coberturas como Bosque Nativo y Plantación que obtuvieron valores de alta demanda correspondiente al 100% en sus SE de regulación debido a su capacidad reguladora del clima favoreciendo la estabilización del paisaje y su función receptora y canalizadora de agua mediante las hojas, ramas y troncos evitando la saturación del suelo, ayudando en la minimización ciclos de inundación y sequías. En este sentido, en el medio natural la inundación se comporta como un renovador del ambiente fluvial y de los hábitats mediante la movilización de sólidos desde la cabecera de la cuenca; aceleración de los procesos de erosión, transporte y sedimentación.

Las medidas de mitigación que se proponen están enfocadas en lograr una situación de convivencia entre la población y el afluente, que respete la dinámica fluvial natural de este, y salvaguarde las vidas, actividades y propiedades de los habitantes. Estas consisten en limpieza y mantenimiento del cauce, planificación y control efectivo del asentamiento habitacional, realizar campañas efectivas y periódicas de difusión y educación en la prevención de este riesgo a la población y trabajo colaborativo con la comunidad en la implementación planes de comunicación y evacuación de emergencia.

La Ley N°21.364 del Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2021) establece la elaboración de instrumentos para la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD), a través de la identificación de las amenazas dentro del territorio comunal, elaborando Planes de Emergencia específico por Variable de Riesgo y contemplando la coordinación y funcionamiento del sistema comunal durante la Fase de Respuesta a este tipo de emergencias.

Este estudio desde la gestión de riesgo en la planificación urbana contempla uno de los principios de la Ley 21364, poniendo a Chile en el camino hacia la consecución de ciudades y comunidades sostenibles, es decir, lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles (ODS 11). En este sentido, es necesario tener claro que la llanura de inundación del estero Pichicaramávida no es apta para edificación de ningún tipo.

6. REFERENCIAS

Arman, H., Yuksel, I., Saltabas, L., Goktepe, F. y Sandalci, M. (2010). Descripción general de las inundaciones daños y sus destrucciones: un estudio de caso de Zonguldak-Bar-Cuenca de estaño en Turquía. *Ciencias Naturales*. 4 (2), 409-417.

Ayala, F., Olcina, J. (2002). “Riesgos naturales, conceptos fundamentos y clasificación”. Barcelona: *Editorial Ariel S.A.*, p 889-912.

Baeza, E., (2019). Evolución de la legislación chilena en materia de derechos de aprovechamiento de aguas. Asesoría Técnica Parlamentaria, Biblioteca del Congreso Nacional, Valparaíso, octubre 2019, p. 4.

Bosques Arauco S.A. (ARAUCO) (2012). Ficha de Área de Alto Valor de Conservación (AAVC) Caramávida. Disponible en https://docplayer.es/23640145-Caramavida-ubicacion-y-superficie-valores-de-conservacion-proyectos-y-estudios-amenazas-a-los-valores-de-conservacion.html#google_vignette

Burkhard, B.; Kroll, F.; Müller, F. y W. Windhorst (2009). Capacidades de los paisajes para proporcionar servicios ecosistémicos: un concepto para las evaluaciones basadas en la cobertura terrestre, 15, 1–22.

Burkhard, B.; Kroll, F.; Nedkov, S. y F. Müller (2012^a). Mapeo de oferta, demanda y presupuestos de servicios ecosistémicos. *Indicadores ecológicos* 21, 17–29.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2019). Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, México. Disponible en: https://pcivil.michoacan.gob.mx/wp-content/uploads/2018/02/Folleto_de_Inundaciones.pdf

Corporación Nacional Forestal (CONAF) (2015). Catastro de uso de suelo y vegetación de la Corporación Nacional Forestal.

Chow, V. (1959). “Hidráulica de Canales Abiertos”. New York: Compañía McGraw-Hill Book.

Comisión nacional del agua de México (CONAGUA) (2010). Diálogos por el agua y el cambio climático. Disponible en: www.unwater.org/downloads/llamado_a_la_accion.pdf

Cowan, W. (1956). “Estimación de coeficientes de rugosidad hidráulica”, *Ingeniería Agrícola*. Vol 37, N° 7, p 473-475.

De Groot, R.S., R. Alkemade, L. Braat, L. Hein & L. Willemen (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 7: 260-272.

Diario Electrónico Cooperativa de las Americas (DECOOP) (2020). Disponible en: <https://www.decoopchile.cl/las-mujeres-emprendedoras-de-nahuelbuta-cooperativa-de-caramavida-araukoindomito/>

Dirección General de Aguas (DGA) (1995). “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica”. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA) (1991). “Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días”. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA) (2004). “Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad – Cuenca del río Paicaví”. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile. Disponible en: <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Paicavi.pdf>

Djordjevic, S., Butler, D., Gourbesville, P., Mark, O. y Pasche, E. (2011). Nuevas políticas para abordar el cambio climático y otros factores que impactan en la resiliencia a las inundaciones en zonas urbanas: el enfoque CORFU. *Ciencia medioambiental & Política*, 14, 864-873.

Dourogeanni, A., Jouravlev, A., Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: de la teoría a la práctica. División de Recursos Naturales e Infraestructura. Santiago de Chile, agosto de 2002.

Escobar, F., Vidal, F. (1992). “Experiencia sobre la determinación de la línea de nieves en cuencas de Chile Central”. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, Vo. 7, N° 2.

Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (ENRH) (2013). Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (ENRH) 2012-2025, Chile cuida su Agua., Gobierno de Chile, Santiago, 2013, pp. 29-31, disponible en: https://www.mop.cl/Documents/ENRH_2013_OK.pdf [acc. 22/09/21].

Fernández de Córdova, C., León, A., Rodríguez, Y., Martínez, P., Meneses, D. (2018). “Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales”. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 17-31.

Gaspari, Fernanda J.; Díaz Gómez, Andrea Romina; Delgado, María Isabel; Senisterra, Gabriela Elba; (2015). Evaluación del Servicio Ambiental de provisión hídrica en cuencas hidrográficas del sudeste bonaerense, Argentina; Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales; *Revista de la Facultad de Agronomía*.

Geis, D. and Steeves, B. (1980). *Flood Hazards.*, 33 (4). 28-31.

Gómez-Baggethun, R. de Groot. (2007). Capital natural y funciones de los ecosistemas: explorando las bases ecológicas de la economía. *Ecosistemas* 16 (3): 4-14. septiembre 2007.

Haynes-Young, R. & M. Potschin (2013). Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on Version 4, August-December 2012. Disponible en: http://test.matth.eu/content/uploads/sites/8/2012/07/CICES-V43_RevisedFinal_Report_29012013.pdf

Horton, R. (1916). “Some better Kutter’s formula coefficients, *Engineering News*”. Vol 75, N° 8, p 862-863.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Estadísticas (INE) (2017). CENSO 2017. Disponible en: <http://resultados.censo2017.cl/Region?R=R08>

Instituto Nacional de Estadística (INE) (2019). División político-administrativa y censal región del Biobío. Disponible en: <https://geoarchivos.ine.cl/File/pub/poblaci%C3%B3n-y-vivienda-biob%C3%ADo.pdf>

Larraín, P., Simpson, P. (1994). “Percepción y prevención de catástrofes naturales en Chile”. Santiago: Universidad Católica de Chile.

León B., Arias C., R. King (2023). Riesgo de remoción en masa en la comuna de Santa Juana posterior al incendio forestal de febrero de 2023.

- Millennium Ecosystem Assessment (MEA) (2005).** Ecosystems and human well-being: Synthesis. Island Press, Washington, D.C. Disponible en: <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Ministerio del Interior y Seguridad Pública (2021).** Ley 21364, establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, sustituye la Oficina Nacional de Emergencia por el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, y adecúa normas que indica. Recuperado de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163423>
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA) (2021).** Informe estado del medio ambiente. Capítulo 8: Tierras. Disponible en: <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/04/8-tierras-1.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente (2016).** Guía introductoria a la flora de la quebrada de Caramávida. Disponible en: <https://repositorioambiental.mma.gob.cl/index.php/2019/09/17/guia-flora-quebrada-de-caramavida/>
- Ministerio de Obras Públicas (MOP) (2018).** Diagnóstico de la Vulnerabilidad de las Obras del MOP y Medidas de Adaptación al Cambio Climático. Disponible en: https://dgop.mop.gob.cl/centro_documental/Documents/VulnerabilidadObrasMOPyMedidasdeAdaptacionalCCMOP.pdf
- Módulos Universitarios en ciencia del Desarrollo Sostenible (MOUDS) (2023).** <http://www.desenvolupamentsostenible.org/es/los-riesgos-naturales/3-concepto-y-tipo-de-riesgo/3-7-riesgo-de-inundaciones>
- Mononen, L., Auvinen, A.P., Ahokumpu, A.L., Rönkä, M., Aarras, N., Tolvanen, H., Kamppinen, M., Viirret, E., Kumpula, T., Vihervaara, P., (2016).** National ecosystem service indicators: Measures of social-ecological sustainability. *Ecol. Indic.* 61, 27–37. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.041>
- Municipalidad de Los Álamos (2018).** Página de noticias municipal: Temporal en Los Álamos: Caramávida vive las mayores complicaciones. Recuperado de: <https://www.munilosalamos.cl/web/tag/temporal/page/2/>
- Ollero, A. (1997).** Crecidas e inundaciones como riesgo hidrológico un planteamiento didáctico. Recuperado de <https://www.ingeba.org/lurralde/lurranet/lur20/200oller/ollero20.htm>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2019).** Informe de políticas de la ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua. Recuperado de https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2019/12/UN-Water_PolicyBrief_Water_Climate-Change_ES.pdf
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2023).** Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial Por un plan de rescate para las personas y el planeta. Recuperado de: https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*1ihm0tj*_ga*MTE5Mjg3ODM0OC4xNzAxOTY5MDU5*_ga_TK9BQL5X7Z*MTcwMzA4MjM3NS4yLjEuMTcwMzA4MjUwMi4wLjAuMA..
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2017).** Manejo de cuencas, conocimiento básico. Recuperado de: <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules-alternative/watershed-management/basic-knowledge/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2015).** Estado mundial del recurso suelo. Resumen técnico. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- Organización de los Estados Americanos (OEA) (2007).** Programa Interamericano para el Desarrollo Sostenible (PIDS) (2006 – 2009). Disponible en: <https://www.oas.org/dsd/documents/pidses.pdf>
- Oyarzún, E. C., Nahuelhual, L. y Núñez, D. (2005).** Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Revista ambiente y desarrollo*, XXI (1), 88-95.
- Ostrom, E., (2009).** A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science* (80-.). 325, 419–422.

Petter, M., Mooney, S., Maynard, S. M., Davidson, A., Cox, M., & Horosak, I. (2013). A methodology to map ecosystem functions to support ecosystem services assessments. *Ecology and Society*, 18(1).

Plan de Desarrollo Comunal de Los Álamos (PLADECO) (21016-2020). Ilustre Municipalidad de Los Álamos, Región del Biobío, Chile: Disponible en: https://www.munilosalamos.cl/web/wp-content/uploads/2018/04/PLADECO_2016_2020.pdf.

Radio Bio bío (2017). Página de noticias radial: Sistema frontal provocó inundaciones, cortes de luz y nevazones en provincia de Arauco. Recuperado de: <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-bio-bio/2017/06/17/sistema-frontal-provoco-inundaciones-cortes-de-luz-y-nevazones-en-provincia-de-arauco.shtml>

RAMSAR (2016). Manual de la Convención de RAMSAR 5° Edición. Introducción a la Convención sobre los Humedales (anteriormente Manual de la Convención de Ramsar), Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza). Disponible en: https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/handbook1_5ed_introductiontoconvention_s_final.pdf

Ramsbottom, D., Floyd, P., Penning-Rowsell, E. (2006). “Flood Risks to People; Phase 2: Project Record”. FD 2321/PR. Reino Unido.

Rathe, L., (2017). La sustentabilidad en los sistemas socio-ecológicos. *Utopía y Praxis Latinoamericana*, 22(78), 65-78.

Rojas, O., Martínez, C. (2011). “Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales”. *Revista Universitaria de Geografía*, 20(1), 83-116.

Salas-Zapata, W. A., Ríos-Osorio, L. A., & Álvarez-Del Castillo, J. (2011). Bases conceptuales para una clasificación de los sistemas socioecológicos de la investigación en sostenibilidad. *Revista Lasallista de Investigación*, 8(2), 136-142.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2012). Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México: Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, INECC.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Disponible en https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/Cuencas_final_2014.pdf

Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) (2023). Dptico de inundaciones. Ministerio del Interior y Seguridad Pública, Gobierno de Chile. Disponible en: https://bibliogrdsenapred.gob.cl/bitstream/handle/2012/1714/02_dptico_inundaciones_2023_SENAPRED.pdf?sequence=7&isAllowed=y

Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) (2023). Curso Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) módulo 2 de la academia SENAPRED. Ministerio del Interior y Seguridad Pública, Gobierno de Chile.

Smith, M. (2007). Pago: Establecer pagos por servicios de cuencas. (UICN, Ed.) Gland, Suiza: ORO Print S. A.

Stehr A., C. Álvarez, P. Álvarez, J. L. Arumí, C. Baeza, R. Barra, C. A. Berroeta, Y. Castillo, G. Chiang, D. Cotoras, S. A. Crespo, V. Delgado, G. Donoso, A. Dussillant, F. Ferrando, R. Figueroa, C. Frêne, R. Fuster, A. Godoy, T. Gómez, E. Holzapfel, C. Huneeus, M. Jara, C. Little, K. Lizama, M. Musalem, M. Olivares, O. Parra, R. D. Ponce, D. Rivera, I. Rodríguez, A. Sepúlveda, M. Somos, F. Ugalde, R. Urrutia, M. Valenzuela, C. Vargas, X. Vargas, S. Vásquez, I. L. Vera, S. Vicuña, G. Vidal, M. Yevenes (2019). Recursos hídricos en Chile: Impactos y adaptación al cambio climático Cap.19. Recuperado de:

https://cdn.digital.gob.cl/filer_public/e6/ff/e6ff260a-d926-4210-83e6-ad7b840b320c/19agua-recursos-hidricos-stehr.pdf

URA. (2013). Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental Ámbito. Memoria resumen de los Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación, Comunidad Autónoma del País Vasco

U.S. Army Corps of Engineers (2016). HEC-RAS. River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 5.0, Hydrologic Engineering Center

Wainger, L.A., D.M. King, R.N. Mack, E.W. Price & T. Maslin (2010). ¿Can the concept of ecosystem services be practically applied to improve natural resource management decisions? *Ecological Economics*, 69: 978-987.

Wolodarsky-Franke, Alexia y Díaz Herrera, Susan. (WWF) (2011). Cordillera de Nahuelbuta. Reserva Mundial de Biodiversidad. Valdivia, Chile.

World Water Assessment Program (WWAP) (2015). Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015: Agua para un mundo sostenible. Datos y cifras.

Wu, J., (2013). Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 28(6), 999-1023.

Yang Bai, Thomas O. Ochuodho, Jian Yang, (2019). Impact of land use and climate change on water related ecosystem services in Kentucky, USA. *Ecol. Indic.* 51–64.