



Universidad Austral de Chile

Conocimiento y Naturaleza

**Modelación del servicio ecosistémico de provisión de  
agua bajo diferentes escenarios de cambio de uso de suelo  
en la comuna de Panguipulli, Chile**

Patrocinante: Sra. Laura Nahuelhuel M.

Co-Patrocinante: Sr. Mauricio Aguayo A.

Trabajo de Titulación presentado como parte de los  
requisitos para optar al Título de  
**Ingeniero en Conservación de Recursos Naturales**

**CRISTOBAL FELIPE JULLIAN FIGUEROA**

VALDIVIA

2016

i	Calificación del Comité de Titulación	i
ii	Agradecimientos	ii
iii	Resumen	iii
1	INTRODUCCIÓN	1
2	HIPÓTESIS	3
3	ESTADO DEL ARTE	3
3.1	Servicios ecosistémicos de regulación	4
3.2	Servicio ecosistémico de provisión hídrica	4
3.3	Factores que afectan el SE de provisión de agua: cambio de uso del suelo	5
3.4	Evaluación espacial de servicios ecosistémicos	6
2.5	Evaluación y mapeo de SE usando ECOSER	7
4	MATERIALES Y MÉTODOS	9
4.1	Descripción área de estudio	9
4.1.1	Localización	9
4.1.2	Clima y Topografía	9
4.1.3	Hidrografía	10
4.1.4	Suelos	10
4.1.5	Estadística poblacional	10
4.1.6	Vegetación	12
4.2	Metodología	12
4.2.1	Descripción espacialmente y temporalmente los cambios en el flujo del SE de provisión de agua.	12
4.2.1.1	Método de la curva número: cálculo de infiltración y escurrimiento superficial	13
4.2.2	Factores que determinan el valor Número de Curva	14
4.2.2.1	Uso del suelo y cobertura vegetal	14
4.2.2.2	Grupo hidrológico de suelo	14
4.2.2.3	Condición de humedad del suelo	14
4.2.3	Proceso en <i>Arcgis</i>	15
4.2.3.1	Curva número (CN)	15
4.2.3.2	Precipitación (P)	16
4.2.3.3	Infiltración y evapotranspiración (IE)	16
4.2.3.4	Escurrimiento superficial (ES)	16
4.2.3.5	Días de tormenta	16
4.2.3.6	REP	16
4.2.4	Identificación y construcción de escenarios posibles de uso de suelo que comprometan o favorezcan la provisión del SE	16
5	CRONOGRAMA DE TRABAJO	17
6	FINANCIAMIENTO	18
7	REFERENCIAS	19
Anexos	1 Series de suelo de la comuna de Panguipulli y sus superficies	
	2 Cuencas a utilizar para determinar valores curva número	

## Calificación del Comité de Titulación

		<b>Nota</b>
Patrocinante:	Sra. Laura Nahuelhual Muñoz	6.4
Co-Patrocinante:	Sr. Mauricio Aguayo Arias	6.2
Informante:	Sr. G. Ignacio Díaz Gálvez	6.3

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el Reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.



---

Sra. Laura Nahuelhual Muñoz

## **Agradecimientos**

A todos y todas las personas que formaron parte de mi entorno social y que directa e indirectamente contribuyeron a la realización y finalización de esta etapa de mi vida. A todos ellos.

Gracias.

## **Resumen**

Los cambios en el uso del suelo (CUS) condicionan la provisión de numerosos servicios ecosistémicos. Entre ellos, la provisión y regulación de agua, SE denominado de regulación que sustenta numerosos beneficios y satisface múltiples necesidades de las poblaciones locales (ej. agua potable, agua para riego, beneficios espirituales). Por ende, la construcción de escenarios prospectivos de CUS, nos permite determinar la existencia de zonas con potencial déficit hídrico y su efecto en la captura de beneficios por parte del componente social, a través de la disminución cuantitativa de los caudales en los ríos. El objetivo principal de este trabajo es evaluar y mapear las zonas potenciales de pérdida del SE de provisión de agua en las principales cuencas de la comuna de Panguipulli, Chile, frente a escenarios futuros de cambio de uso de suelo. Para lograr esto, los objetivos específicos son: (1) identificar y construir escenarios posibles de uso de suelo que comprometan o favorezcan la provisión del SE y (2) describir espacialmente y temporalmente los cambios en los flujos del SE. Los resultados esperados de este trabajo son mapas de distribución espacial actual del SE de provisión de agua y mapas de cambio espacial ante escenarios de CUS. Además, la cuantificación de la pérdida de los caudales ante CUS, a través de los valores de curva.

**Palabras claves:** Servicios ecosistémicos, Provisión de agua, Cambio de uso de suelo, plantaciones forestales.

## INTRODUCCIÓN

Los Servicios Ecosistémicos (SE) se consideran como los componentes de la naturaleza, directamente disfrutados, consumidos, o usados para producir bienestar humanos (Boyd y Banzhaf, 2007). Los SE se clasifican usualmente en cuatro categorías: servicios de provisión, regulación, culturales y soporte (MEA, 2005). El SE de provisión de agua se considera como la capacidad de los ecosistemas para filtrar, retener y almacenar el agua en, principalmente, arroyos, lagos y acuíferos. Los elementos más relevantes que influyen en la función ecosistémica (FE) para soportar el SE de provisión de agua son la cubierta vegetal del suelo y las características edáficas. Además, la pluviometría del lugar, la cual depende de las características de la topografía y de la sub-superficie del ecosistema involucrado (de Groot *et al.*, 2002).

El consumo por parte de la población humana para satisfacer sus necesidades se entiende como la captura de ese beneficio y así en conjunto con la FE se constituye el SE de provisión de agua, SE cada vez más escaso e inmerso en debate debido a la preocupación que emerge sobre los riesgos que esto genera para los Sistemas Socio-Ecológicos (SSE).

Las prácticas de cosecha a pequeña y gran escala de plantaciones forestales han generado paulatinamente un proceso de erosión y pérdida de características edáficas claves en garantizar la capacidad del suelo para retener las precipitaciones. La FE de la vegetación y el suelo para retener agua, adquiere mayor relevancia si consideramos el contexto del cambio climático en Chile, el cual se caracteriza por la disminución de las precipitaciones. Por ende, la expansión de plantaciones forestales condiciona pérdida y alteración del SE de provisión de agua, incidiendo directamente en la carencia del flujo continuo para cubrir la demanda de la sociedad, disminuyendo la capacidad para mitigar el déficit hídrico, sobretodo en épocas estivales. Sin embargo, la conservación de los elementos del paisaje que soportan y garantizan el flujo del SE de provisión de agua, permite a un SSE mayor capacidad adaptativa ante los efectos del CUS y la disminución de las precipitaciones.

El enfoque sobre SE y las herramientas desarrolladas para su evaluación, como es el caso de ECOSER, incluyen la cuantificación y representación espacial del flujo de los SE determinando flujos de FE, las cuales a través de una matriz de integración permiten describir el flujo del SE y la captura de éste, traducido a beneficios derivados para la sociedad. En conjunto con la modelación de los SE, es posible estimar cambios futuros, a través de proyecciones de variables ecológicas (*i.e.*, CUS, precipitaciones, caudales) y sociales (*i.e.*, migración, educación, cohesión social) que favorecen y/o disminuyen su oferta.

La relación entre complementariedad de los elementos del paisaje (dominio biofísico) y su complejidad tiene una clara relevancia para la gestión ambiental y la ciencia de planificación (Lattera *et al.* 2012), ya que permite la identificación de los elementos del paisaje y la sociedad que influyen directamente en el SE y que *in situ* son los que están siendo alterados. En este contexto, el desarrollo de sistemas de manejo que permitan la preservación de los SE se basa en la existencia de indicadores que permitan evaluar la capacidad de los ecosistemas para proveerlos, o en la identificación de grados severos de degradación que impiden su provisión.

Se reconoce el aumento de estudios sobre servicios ecosistémicos en Latinoamérica a partir del 2005. Sin embargo, aún falta desarrollar formas más exhaustivas de aplicación de metodologías como las anteriormente mencionadas. Los estudios realizados en Chile se han enfocado en los SE provenientes de ecosistemas forestales y son escasos aquellos que incorporan el mapeo y modelación SE (Bachmann *et al.*, 2014).

En este sentido, este trabajo se enmarca en la intención de generar información que otorgue a las instituciones competentes una base analítica sobre la exposición de la comuna de Panguipulli ante el CUS y la pérdida de recursos hídricos. La base científica coadyuvará la toma de decisiones por parte de estas instituciones ante planes de ordenamiento territorial que garanticen el abastecimiento y uso de agua para consumo de la sociedad enmarcada en el territorio Panguipulli.

### **Objetivo principal.**

Cuantificar y determinar la distribución espacial del SE de provisión de agua y sus potenciales cambios temporales bajo escenarios de cambio de uso de suelo en las principales cuencas de la comuna de Panguipulli, Chile.

### **Objetivos específicos.**

- 1) Describir espacialmente y temporalmente los cambios en el flujo del SE de provisión de agua.
- 2) Identificar y construir escenarios posibles de uso de suelo que comprometan o favorezcan la provisión del SE.

## HIPÓTESIS

EL SE de provisión de agua está condicionado fuertemente por procesos de CUS. En este sentido, estos procesos modifican el paisaje, alterando la cobertura vegetal y las características edáficas que generan las FE que soportan el SE de provisión de agua. Así, generar escenarios prospectivos de CUS nos permitirá identificar las cuencas con potencial déficit hídrico y viceversa en la comuna de Panguipulli. Por otro lado, escenarios de conservación, permitirá que las zonas o cuencas preserven las FE que soportan el SE de provisión de agua, manteniendo la generación del flujo que beneficia a la sociedad, manteniendo el *stock* del SE. En cambio, el escenario pesimista, que involucra el aumento de plantaciones forestales, afectara las FE que proveen soporte al SE, disminuyendo los flujos del SE y los beneficios potenciales a ser capturados por la sociedad.

## ESTADO DEL ARTE

Para entender la relación entre los recursos hídricos y los SE es imprescindible describir algunas generalidades enmarcadas en las ciencias que investigan los SE.

Dentro de este enfoque, los científicos hacen el llamado repetidamente por una mayor integración entre el dominio biofísico y social (Collins *et al.*, 2002) debido a los alcances e implicancias que generan su interacción cotidiana e histórica. Desde esta relación, surge la investigación que integra estos dominios como parte de un sistema abierto, un sistema socio-ecológico (SSE). Los SSE están sujetos a presiones externas (*v.g.*, clima, globalización) que condiciona el grado de exposición de este, trascendiendo los dominios que lo constituyen.

El dominio biofísico se compone de una comunidad estructura y dinámica, donde ocurren procesos e interacciones naturales y otras condicionadas por estas presiones externas. De aquí emergen FE (*i.e.*, retención de precipitaciones), que sirven de soporte para mantener los flujos de SE (*i.e.*, provisión y regulación hídrica). El dominio social se compone de un conjunto de personas que comparten similares necesidades, las cuales son cubiertas por un abanico de satisfactores a elegir, dependiendo de su nivel socio-económico. Las necesidades emergen con el interés de cada individuo por alcanzar un mayor *comfort* (*v.g.*, mayor calidad de vida, salud). Sin embargo, las necesidades básicas (necesidad que todo individuo debe satisfacer), como proveerse de agua, dependen del dominio biofísico y su capacidad para proveerlas. Así, la pérdida de FE por presiones externas, disminuye la potencial del SE para garantizar el bienestar humano (*v.g.*, calidad de vida, salud) pero también genera un cambio de percepción a través de la valorización de lo biofísico. Finalmente la pérdida de SE genera

comportamientos sociales (v.g., migración campo-ciudad, abandono agrícola, mercados, decisiones políticas) responde a la “presiones” (v.g., cambio climático, aumento nivel del mar, incrementos población humana) y “pulsos” (incendios, sequías, fertilización, tormentas) que afectan el dominio biofísico (Collins *et al.*, 2011).

### ***Servicios ecosistémicos de regulación hídrica***

Las funciones de regulación se refieren a la capacidad de los ecosistemas naturales y semi-naturales para regular procesos ecológicos esenciales y sistemas de soporte de vida a través de los ciclos biogeoquímicos y otros procesos naturales, además de mantener los ecosistemas saludables. Estas funciones de regulación proporcionan muchos servicios que tienen beneficios directos e indirectos para los seres humanos (como el aire limpio, el agua y el suelo, y los servicios de control biológico) (de Groot *et al.*, 2002).

Algunos de los procesos más relevantes, implican la transformación de energía, principalmente de la radiación solar, en biomasa (productividad primaria); almacenamiento y transferencia de minerales y energía en las cadenas alimentarias (productividad secundaria); ciclos biogeoquímicos (por ejemplo, el ciclo del nitrógeno y otros nutrientes a través de la biosfera); mineralización de la materia orgánica en los suelos y sedimentos; y la regulación del sistema climático físico. Todos estos procesos, a su vez, están regulados por la interacción de factores abióticos (es decir, el clima) con los organismos vivos a través de mecanismos de evolución y control. Debido a los beneficios indirectos de las funciones de regulación, a menudo no se reconocen hasta que se pierden o son perturbadas (de Groot *et al.*, 2002).

### ***Servicio ecosistémico de provisión hídrica.***

La disponibilidad de agua se define como el volumen de agua superficial y subterránea potencialmente aprovechable en un territorio (Balvaner y Cloter, 2009).

El SE de provisión de agua se ha denominado de diferentes formas, tales como servicios hidrológicos, servicios de cuencas, servicios de los ecosistemas de agua, según el marco conceptual utilizado. En concreto, el suministro de agua también se conoce como la producción de agua. El suministro o provisión de agua se refiere a la función de vegetación para retener la humedad y regular la escorrentía a través de la redistribución de las precipitaciones (Jaramillo, 2014).

Provisión de agua se refiere a la filtración, la retención y el almacenamiento de agua, principalmente, en arroyos, lagos y acuíferos. La filtración del agua está condicionada en gran medida por el tipo de suelo y cubierta vegetal sobre éste. La capacidad de retención y almacenamiento depende de la topografía y del subsuelo características del ecosistema involucrado (Balvanera y Cloter, 2009). Los SE asociados con el suministro de agua se refieren al uso consuntivo de agua (por los hogares, la agricultura, industria, entre otros) (cuadro 1).

**Cuadro 1.** Funciones, bienes y servicios de los ecosistemas naturales y semi-naturales. Adaptado desde de Groot *et al.*, (2002).

Función	Componentes y procesos ecosistémicos.	Bienes y servicios (ejemplos)
Funciones de regulación	Mantenimiento de los procesos ecológicos esenciales y sistemas de soporte vital	
Provisión de agua	Filtrado, retención y almacenamiento de agua dulce (por ejemplo, en los acuíferos)	Provisión de agua para uso consuntivo (potable, riego y uso industrial)

***Factores que afectan el SE de provisión de agua: cambio de uso del suelo***

El SE de provisión de agua parece depender del tipo de uso de la tierra y su transición en el tiempo (Nahuelhual *et al.*, 2014). Chile ha experimentado sobreexplotación de sus ecosistemas naturales, en específico, durante décadas y hasta el día de hoy sus bosques templados son talados, incendiadas y reemplazados por especies de rápido crecimiento, lo que disminuye la oferta de SE fundamentales como la regulación hídrica y la provisión de agua limpia (Lattera y Nahuelhual, 2014; Lara *et al.* 2010). El agua disponible depende de patrones climáticos regionales de precipitación, del balance de los componentes del ciclo hidrológico, así como de las características de la vegetación, suelo y subsuelo (Balvaner y Cloter, 2009). Comparando distintos usos de suelo, la vegetación arbórea tiene efectos positivos en la calidad del agua no potable, influyendo en potabilización natural de esta (Fiquepron *et al.*, 2013).

En Chile, el uso de la tierra y el cambio que se genera en ella se han generado principalmente por causas de transformación del paisaje. En un inicio la habilitación de terrenos para la agricultura, y,

posteriormente, la expansión de las plantaciones forestales incentivadas por un fuerte subsidio estatal (Aguayo *et al.*, 2009). Este cambio es, probablemente, el factor más importante que influye en la conservación del medio ambiente. A nivel mundial, algunos de los impactos adversos del cambio de cubierta han dado lugar a la modificación de la biodiversidad, alterando los procesos funcionales y disminución del suministro de los SE a la sociedad. En este contexto, la gestión de los hídricos debiese apuntar a asegurar el suministro de agua para el consumo humano y complementar las actividades antrópicas que sean compatibles con las funciones del ecosistema y su integridad (Jaramillo, 2014).

El uso que se le da a la tierra está estrechamente relacionado con procesos hidrológicos muy relevantes en el SE de provisión y regulación hídrica. El tipo de cobertura tiene un efecto en el régimen de evapotranspiración y en la generación e inicio de la escorrentía superficial (Fohrer *et al.*, 2000). Temáticas relacionadas con cambio de uso de suelo deben generar discusión en las políticas públicas, en donde se aborden aspectos como; las opciones sustentables del uso de la tierra y el incentivo a la conservación del bosque, por ejemplo, la creación de un sistema de pago por servicio ambiental, con el objeto de un buen uso del recurso forestal (Fiquepron *et al.*, 2013).

### ***Evaluación espacial de servicios ecosistémicos***

En el paisaje se generan servicios ecosistémicos a través de la complementariedad de los elementos naturales que se traducen a compensaciones (*v.g.*, control inundaciones, madera, provisión de agua). La complementariedad de los SE se puede considerar como la propiedad funcional dentro los paisajes naturales rurales la cual depende mayoritariamente de la complejidad del paisaje. Esta complejidad es una propiedad multidimensional de paisajes dependiendo tanto de su composición (*v.g.*, la proporción de la cobertura y uso del suelo) y sus métricas de como los elementos de distribuyen y configuran espacialmente (*v.g.*, número, tamaño, forma, la diversidad y la conectividad de los parches) que son sólo en parte correlacionadas entre ellas (Latterra *et al.* 2012).

Los estudios que evidencian de forma cuantitativa los cambios en el SE de provisión de agua dependen fuertemente de la información que emerge de análisis multitemporales de cambio de uso de suelo. Sin embargo, en los últimos tiempos se acoplan a la información sobre cambio de uso de suelo, modelos hidrológicos que sirven como herramienta para explicar de mejor forma los cambios netamente relacionados al agua como SE de provisión de agua, específicamente, el destino de ésta en el sistema hidrológico condicionada por diferentes factores (Nahuelhual *et al.* 2014).

Por otro lado, el mapeo nos permite clarificar la distinción entre funciones o servicios intermedios y SE finales. En específico, nos ayuda a reconocer implícitamente que puede ocurrir que la misma función ecosistémica, puede generar distintos SE y a su vez, un mismo SE puede depender de más de una función, por ende, los SE no debiesen corresponder a una determinación unilateral sobre las funciones (Latterra y Nahuelhuel, 2014). Las potencialidades del mapeo de SE se definen como: la ayuda que otorgan en la identificación de problemas ambientales, la generación de instancias de discusión sobre acciones a implementar y las alternativas que emergen en su debate, la mejora y focalización de los recursos con el fin de demostrar los beneficios y costos de la implementación pertinente al accionar político y lo pedagógico que puede ser un mapa para aclarar la importancia de la biodiversidad y de los SE (Jaramillo, 2014).

### ***Evaluación y mapeo de SE usando ECOSER***

ECOSER<sup>1</sup>, es un protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el ordenamiento territorial. Este protocolo integra tres marcos conceptuales complementarios: a) sistemas socio-ecológicos (SSE), b) servicios ecosistémicos y c) vulnerabilidad socio-ecológica (Latterra *et al.*, 2015).

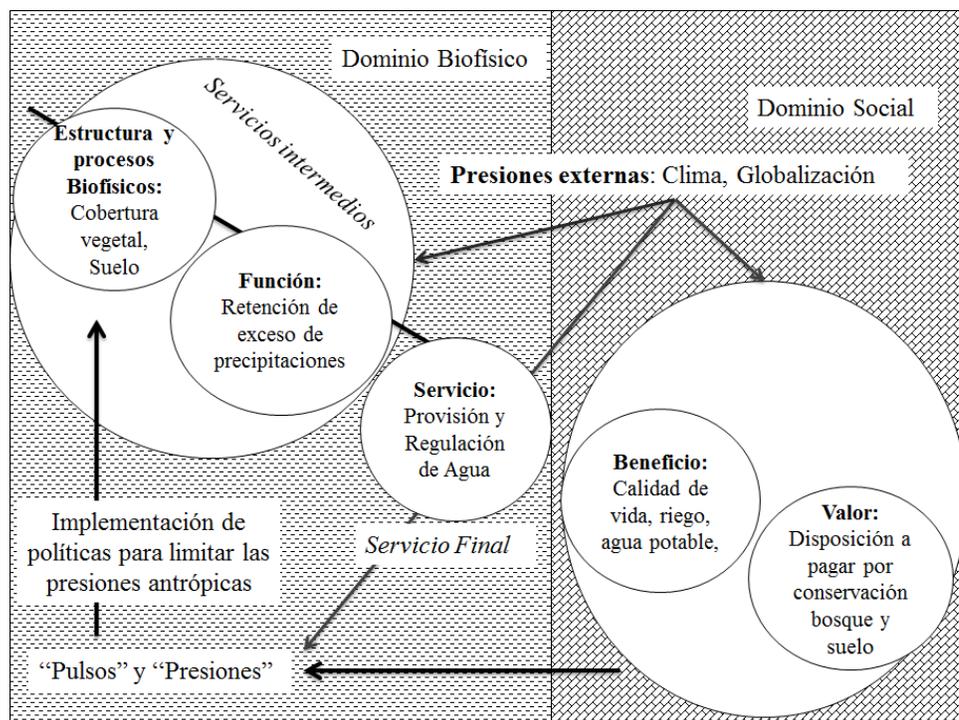
Estudios de este tipo involucran la opinión de científicos relacionados al área temática y de los grupos de interés. Lo anterior, permite sinérgicamente la identificación y cuantificación de los SE a través de productos, como un mapa de distribución espacial del SE. La valoración (no solo monetaria) del SE consiste en una tarea conjunta entre científicos y grupos interesados, quienes permiten una visión más holística sobre el SE, abarcando múltiples percepciones de quienes se benefician y por ende valoran el SE. El desarrollo de sistemas de manejo que permitan el mantenimiento de los SE se basa en la existencia de indicadores que permitan evaluar la capacidad de los ecosistemas para proveerlos, o en la identificación de grados severos de degradación que impiden su provisión. El conocimiento y modelado de los procesos biofísicos subyacentes al flujo de SE se encuentra en permanente cambio, por lo que la utilidad de una herramienta como ECOSER depende de su capacidad de actualización. En ese sentido, ECOSER aspira a constituir un protocolo colaborativo, a través del cual los distintos tipos de usuarios comenten, corrijan, adecuen e integren los distintos modelos, índices y funciones que lo componen, y compartan nuevos modelos complementarios u alternativos para actualizar y expandir su utilidad. ECOSER permite contribuir a la caracterización de un SE y permite describir el grado de exposición del flujo de SE, la sensibilidad de los beneficios frente a un escenario de cambio, expresada

---

<sup>1</sup> <http://www.eco-ser.com.ar/index.php>

como el cambio marginal en el flujo de los beneficios derivados de SE a la sociedad, entre otras funciones (Laterra *et al.*, 2015).

El marco conceptual de los SSE integra la relación entre el componente ecológico, el cual genera servicios y el componente social, el cual se beneficia, captura y valoriza a través de la utilización (Figura 2). Las estructuras y procesos biológicos que generan FE que sirven de soporte para generar un SE y así estas puedan ser capturadas y valorizadas en un sistema económico-social (Haines-Young y Potschin, 2012). Sin embargo, en los SSE, el componente ecológico y social asociados al SE de provisión de agua se han entendido de forma bilateral ante el los efectos del CUS, disociando muchas veces el lazo que históricamente los han definido a través de la generación y uso por parte de la sociedad. Por otro lado, el marco conceptual de los SSE propicia la asociación e integración de la reciprocidad entre los dos componente, es decir, entender como las decisiones político-administrativa (*i.e.* Uso potencial del suelo) se crean respondiendo a interés socio-económicos predominantes (*i.e.* Actividades agrícolas y silviculturales) afectando atributos y FE del sistema ecológico (*i.e.* erosión, cambio uso suelo, inundaciones, déficit hídrico) que finalmente generan inequidad ante los beneficios sociales que se capturan.

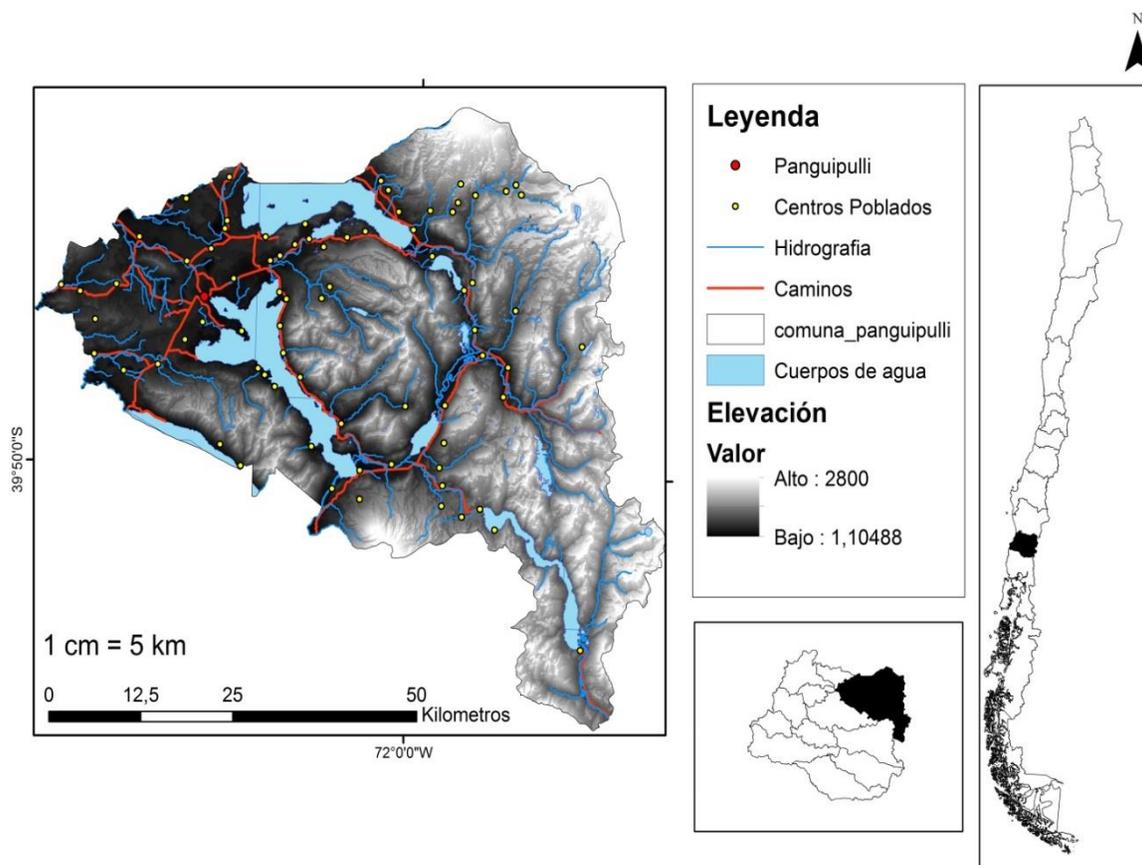


**Figura 1.** Cascada de los servicios ecosistémicos adaptada desde Haines-Young y Potschin, 2012 incluyendo enfoque SSE Collins *et al.*, 2011.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción área de estudio

*Localización:* Panguipulli ( $39^{\circ} 38' 0''$  S,  $72^{\circ} 20' 0''$  O), es una comuna chilena fundada en el año 1946. Se emplaza en la provincia de Valdivia, región de Los Ríos. Limita al norte con la comuna de Villarrica, al oeste con las comunas de Lanco y Los Lagos, al sur con la comuna de Futrono y al este con la República de Argentina. Contempla una superficie de 3.332 hectáreas y existen 75 localidades distribuidas en la comuna (figura 3).



**Figura 2.** Mapa de la comuna de Panguipulli. Elaboración propia.

*Clima y topografía:* El clima para la comuna de Panguipulli se define como templado lluvioso con influencia mediterránea, predominando los vientos del norte en invierno y oeste/sur en verano. La pluviometría anual es de 2.558 mm en la ciudad de Panguipulli y de 4.440 mm en Puerto Fuy (Lago Pihueico). La topografía de la comuna se caracteriza por ser altamente accidentada, predominando cerros y montañas andinas con altitudes de hasta 2.847 metros, que corresponden al volcán Villarrica.

Su emplazamiento es cordillerano, dominado por montañas, quebradas abruptas asociadas a fenómenos de erosión glacial (Agenda 21, 2004).

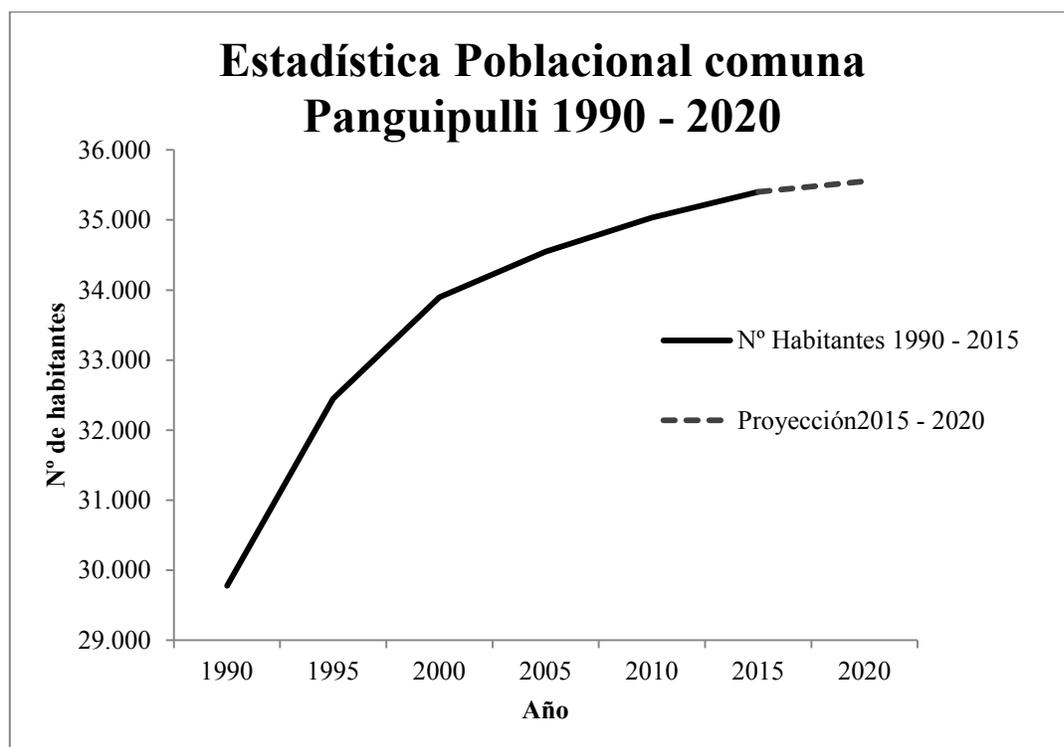
*Hidrografía:* Su hidrografía se caracteriza por una gran cantidad de ríos entre los que destacan la cuenca binacional Lacar- Valdivia, que nace en el lago Lacar en San Martín de Los Andes (Argentina), desde el lago Pihueico, río Fuy, río Enco, lago Panguipulli, lago Riñihue, río San Pedro, hasta la desembocadura en el Puerto de Corral. Además, se conforma por otros lagos como el Calafquén, Pellaifa, Pullinque y Neltume y un sinnúmero de ríos y lagunas (figura 2) (Agenda 21, 2004).

*Suelos:* En todo este sector, entre los 600 y los 1400m s.n.m., existe una dominancia de suelos derivados tefras de granulometrías gruesa a media, es decir, pumícea, cinerítica y fragmental. Se trata de suelos profundos y moderadamente profundos, con clase textural que varía entre franco arenosa gruesa y franco limosa. Generalmente presentan colores pardos en superficie, que se encuentra en el matiz 10YR y que puede llegar a un color pardo amarillento, en el matiz 7,5YR, en profundidad. La mayor parte de los suelos tiene como sustrato, en límite abrupto, a gravas escuriáceas de origen volcánico cuyo tamaño puede variar entre 2 y 6 cm de diámetro. La permeabilidad es de moderada a rápida y el drenaje es de bueno a excesivo (Luzio *et al.*, 2009). Son 15 las series de suelo que existen en la comuna. A continuación se ordenan de mayor a menor representatividad en superficie; Lanco, Huellahue, Terrazas aluviales ríos pre-cordilleranos, Panguipulli, Liquiñe, Choshuenco, Chesque, Asociación los nevados, Correltue, Los Lagos, Miscelaneos, Terrazas aluviales cenizas volcánicas, Terrazas aluviales, Malihue y Calafquen (Anexo 2).

*Estadística poblacional:* Esta comuna, de acuerdo a las proyecciones de población, tendría del orden de 35,3 mil habitantes el año 2013, lo que representa el 9,2% de la población proyectada para la región de Los Ríos y 0,2% del país (Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional, CASEN, 2013). Esta comuna contaba con 29.799 habitantes para el año 1990 (Cuadro 2). A medida que pasa el tiempo la tendencia es al aumento, proyectándose que para el año 2020 se espera una población de 35.552 habitantes (Figura 4).

**Cuadro 2.** Estadística poblacional de la comuna de Panguipulli en los años 1990 y 2015 y proyectada al 2020. Adaptado desde INE<sup>2</sup>.

Año	Nº Habitantes
1990	29.779
1995	32.449
2000	33.899
2005	34.549
2010	35.034
2015	35.400
2020	35.552



**Figura 3.** Nº de habitantes entre el año 1990 y 2020 para la comuna de Panguipulli. Elaboración propia.

<sup>2</sup> Proyecciones al 30 de junio de 2013, basadas en Censo de Población 2002. Instituto Nacional de Estadísticas.

*Vegetación:* La vegetación presente en la comuna se evidencia por la presencia de bosques de montaña de muy alto valor biológico, constituido por una gran cantidad de especies de árboles del Bosque Siempreverde, dentro de los cuales se puede mencionar: *Araucaria araucana* (Mol.) Koch. (araucaria), *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Serm et Bizzarri., (ciprés de la cordillera), *Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst., (coihue), *Nothofagus alpina* (Poepp. et Endl.) Oerst, (raulí), *Laureliopsis philippiana* (Looser) R.Schodde., (tepa), *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser., (lenga), *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst., (roble), entre otras. Estas especies se distribuyen entre las regiones vegetales del tipo bosques laurifolio valdiviano, bosque caducifolio andino y bosque andino patagónico (sub-región de las cordilleras patagónicas) (Gajardo, 1994).

## Metodología

### Descripción espacial y temporal del SE de provisión de agua

Para la evaluación y mapeo del SE se debe contar con una base de datos espacial del área de estudio (Cuadro 3) y el *software* Arcgis 10.1, con la extensión de *Acrtoolbox* ECOSER 2.0. El método para mapear y cuantificar el SE de provisión de agua se basará en la combinación de indicadores (uso actual, tipo suelo, entre otros) para definir la función (escorrentía superficial) (Barral, 2015).

**Cuadro 3.** Insumos necesarios para aplicar metodología curva número.

Insumo	Escala y Resolución	Fuente	Descripción
DEM	Modelo equidistante a 30 m.	USGS	Modelo digital de elevación
Series de Suelo	1:50.000	CIREN (1999)	Información espacial de las series de suelos con propiedades físicas de los horizontes.
Uso de Suelo	1: 10.000	Catastro Bosque Nativo CONAF	Mapa del uso/cobertura del suelo (1998 – 2012)
Datos meteorológicos	Datos desde 1998 - 2012	Dirección General de Aguas (DGA)	Estaciones Meteorológicas Coñaripe, Liquiñe, Lago Calafquen, Pirihueico, Lago Neltume, Rio Fui en desagüe lago Pirihueico

Datos Fluviométricos	Datos desde 1988 - 2012	Dirección General de Aguas (DGA)	Estaciones Fluviométricas - Río Fui, Río Huahum en desembocadura Lago Pirihueico - Río Huahum en la frontera, Río Liquiñe,
----------------------	-------------------------	----------------------------------	--

***Método de la curva número: cálculo de infiltración y escurrimiento superficial***

El método utilizado será el Curva Número (CN de aquí en adelante) desarrollado por el *Soil Conservation Service* (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Lo que busca esta metodología es determinar el impacto de la vegetación sobre los cambios en el balance agua. El cambio en el balance hídrico depende de un gran número de factores incluidos el patrón espacial de la vegetación, los suelos, el acuífero y los patrones de lluvias. El CN es un índice empírico cuyo objetivo es calcular la precipitación neta o escorrentía generada por una tormenta, es decir, representa la probabilidad de que la lluvia se convierta en escurrimiento como resultado del tipo de cobertura vegetal y su interacción con propiedades del suelo. La ecuación básica de este método es:

$$ES = \frac{(P - 0.2IE)^2}{P + 0.8IE}$$

donde: ES escurrimiento superficial (mm), P precipitación en mm de un evento de lluvia dado, y IE pérdida inicial por infiltración y evapotranspiración, calculada como:

$$IE = \frac{25400}{(254 + NC)}$$

siendo, NC valor de curva número para un determinado tipo hidrológico de suelo, condición de humedad previa y uso de la tierra.

Un CN de valor 100 representará una condición nula de retención potencial (IE=0), esto es, una cuenca completamente impermeable. Contrariamente, un número de curva de valor 0 corresponderá a una retención potencial ilimitada, esto es, una cuenca capaz de retener toda precipitación. Lo ideal sería emplear valores NC locales, pero en el caso de cuencas no aforadas se suministran tablas en las que éstos varían para cada complejo uso del terreno-suelo-vegetación (Barral, 2015).

## **Factores que determinan el valor Número de Curva**

**Uso del suelo y cobertura vegetal:** Las categorías de uso/coberturas consideradas para este estudio serán, bosque adulto, bosque secundario, plantaciones de árboles exóticos, matorral arborescente, matorral, praderas y otros.

**Grupo hidrológico de suelo.** Existen cuatro categorías de tipo hidrológico del suelo:

- a) Grupo A: suelos con bajo potencial de escurrimiento por su gran permeabilidad y con elevada capacidad de infiltración, aun cuando estén húmedos. Se trata principalmente de suelos profundos y con texturas gruesas (arenosa o areno-limosa).
- b) Grupo B: suelos con moderada capacidad de infiltración cuando están saturados. Principalmente consisten en suelos de mediana a alta profundidad, con buen drenaje. Sus texturas son moderadamente gruesas (franca, franco-arenosa o arenosa).
- c) Grupo C: suelos con escasa capacidad de infiltración una vez saturados. Su textura va de moderadamente fina a fina (franco-arcillosa o arcillosa). También se incluyen aquí suelos que presentan horizontes someros bastante impermeables.
- d) Grupo D: suelos muy arcillosos con elevado potencial de escurrimiento y, por lo tanto, con muy baja capacidad de infiltración cuando están saturados. También se incluyen aquí los suelos que presentan una capa de arcilla somera y muy impermeable así como suelos jóvenes de escaso espesor sobre una roca impermeable, ciertos suelos salinos y suelos con nivel freático alto.

Para determinar los grupos hidrológicos en la comuna de Panguipulli, existe la series de suelo, la cuales aportarán la información necesaria (v.g., textura, drenaje interno, estructura, etc) que permitirá determinar cada grupo.

**Condición de humedad del suelo (CHS):** La condición de humedad del suelo en la cuenca de drenaje antes de que ocurra el escurrimiento es otro factor de importancia en la determinación del valor final de NC. En este método la condición de humedad, se clasifica en tres clases (Barral *et al.*, 2015).

- a) CHS I: Los suelos en la cuenca se encuentran muy secos.
- b) CHS II: Condición hidrológica promedio.

c) CHS III: Los suelos de la cuenca están próximos a la saturación debido a lluvias anteriores.

Para determinar la condición de humedad del suelo, se considerará en función de la precipitación acumulada (mm) en cinco días previos al evento en consideración. El valor nos indicará en que condición de humedad se encuentra el suelo, con respecto a los rangos propuestos por Boughton (1989) (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Rangos de precipitación acumulada (mm) para determinad condición de humedad del suelo.

Fuente: Boughton, 1989.

Condición del suelo	Precipitación total (Pt) en mm en cinco días previos	
	Estación de latencia (septiembre - febrero)	Estación de crecimiento (marzo - agosto)
I Seco	$Pt \leq 13$	$Pt \leq 35,6$
II Medio	$13 \leq Pt \leq 28$	$35,6 \leq Pt \leq 53,3$
III Medio	$Pt \geq 13$	$Pt \geq 53,3$

Para efectos de este trabajo, se estimaran los valores de curva número, para el periodo de estación de latencia (septiembre – febrero) y para la estación de crecimiento (marzo – agosto) con el fin de contrastar el comportamiento ante los cambios en el régimen pluviométrico anual.

### Proceso en Arcgis

Para todas las entradas la proyección utilizada debe ser la misma (metros), así como la resolución espacial. En muchas ocasiones puede suceder que el SIG del área de estudio contenga capas con resoluciones espaciales diferentes (por ejemplo, el DEM con una resolución de 90 x 90m, mientras que la clasificación de coberturas sea de 30 x 30m) (Barral *et al.*, 2015).

**Curva número (CN):** Se creará una capa *raster*, determinando que cada pixel representara el valor CN dado. El valor de curva número varía dependiendo el tipo hidrológico de suelo y uso de la tierra. Por lo tanto es necesario contar con:

a) Capa de coberturas donde el valor del píxel representa el uso/cobertura de la tierra

- b) Capa con el tipo hidrológico del suelo. El método del número de curva distingue cuatro tipos de suelos: A, B, C y D.

**Precipitación (P):** El valor del píxel sea la lluvia de un evento de tormenta se asigna a cada píxel. Esto se llevara a cabo por medio de estaciones pluviométricas y la creación de polígonos de thiessen.

**Infiltración y evapotranspiración (IE):** El valor de píxel indica la infiltración y evapotranspiración (mm), asociado al valor curva número que contenga ese píxel.

$$IE = \frac{25400}{(254+NC)}$$

**Escurrimiento superficial (ES):** El valor de píxel indica el escurrimiento superficial generado bajo el evento de precipitación seleccionado en mm. Esto en base al tipo de IE y precipitación.

**Días de tormenta:** deberá ingresar el número de días de tormenta en un año. Para este caso de estudio, se considerará una tormenta a un evento de precipitación que supere los 50 mm en 24 horas se considerará como una tormenta que genera excedentes.

**REP:** El valor de píxel indica la retención de excesos de precipitación (mm). Los resultados obtenidos desde la metodología de curva número serán caudales mensuales a la salida de una cuenca y como éstos cambian a través de los escenarios propuestos en la siguiente sección.

**Identificación y construcción de escenarios posibles de uso de suelo que comprometan o favorezcan la provisión del SE.**

Se construirán dos escenarios prospectivos de cambio de uso de suelo (A y B). Escenario A, implicará la conservación de elementos del paisaje que contribuyen a soportar el flujo continuo del SE de provisión, como el bosque nativo. Para ellos, se establecen las siguientes reglas heurísticas con respecto a las áreas probables de conservación: a) la permanencia de iniciativas de conservación presentes en la comuna (*i.e.*, Reserva San Pablo de Tregua, Parque Nacional Villarrica, Reserva Nacional Mocho-choshuenco, Reserva Huilo-Huilo), b) zonas de amortiguación de franjas ribereñas en los principales cuerpos de agua (*i.e.*, ríos y esteros) contemplando 25 metros de protección vegetal por cada ribera de los cuerpos de agua, c) la conservación de las cabeceras de cuencas, las cuales son

potenciales proveedoras de agua y d) áreas de abandono agrícola donde el bosque nativo es capaz de recolonizar.

Por otro lado, el escenario B se construirá considerando expansión de plantaciones forestales de especies exóticas. Para ello, se utilizarán los factores de forzamiento propuestos por Jaramillo (2014) para predecir los cambios en el uso del suelo, los cuales son: a) la densidad y la distancia a las carreteras, b) la cobertura del suelo actual, c) tamaño de los predios privados, d) la pendiente y e) la distancia de las plantaciones previamente establecidas. Para esto, es necesario contar con los insumos pertinentes (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Insumos para determinar el escenario (B) de expansión de plantaciones forestales.

Insumo	Escala y Resolución	Fuente	Descripción
DEM	Modelo equidistante a 30 m.	USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos)	Modelo digital de elevación
Uso de Suelo	1: 20.000	Catastro Bosque Nativo CONAF	Mapa del uso/cobertura del suelo (1998 – 2012)
Predios	1:20.000	CIREN (2007)	Capa de los predios espacializados.
Red Vial	1:400.000	Subsecretaría de Turismo, Región de los Ríos.	Capa de los caminos primarios y secundarios

## CRONOGRAMA DE TRABAJO

**Cuadro 1.** Calendario de actividades a realizar durante el estudio.

Carta Gantt	2015		2016									
	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	
1. Elaboración proyecto de tesis	X	X										
2. Inscripción proyecto de tesis			X									
3. Recolección de datos secundarios para modelado			X	X								
4. Creación de un indicador espacial				X	X							

5. Mapeo SE provisión agua.			X	X				
6. Creación de escenarios		X	X	X				
7. Evaluación de CUS bajo escenarios					X	X	X	X
Tesis con financiamiento total por proyecto FONDECYT 1151187								

## FINANCIAMIENTO

### Detalle general de recursos económicos.

**Cuadro 2.** Recursos necesarios para cubrir los gastos operacionales del estudio.

Ítem	Recursos FONDECYT
Personal (remuneración)	300.000
Viajes	44800
Alojamientos	50000
Alimentación	32000
Materiales e insumos	116600
<b>Total</b>	<b>543.400</b>

### Detalle específico ítem recursos económicos.

**Cuadro 3.** Detalles de los gastos que involucrará el estudio.

Ítem	cantidad	Precio unidad	Total (CLP)
Viajes	10	4480	44800
Alojamiento	5	10000	50000
Alimentación	5	6400	32000
<b>Materiales e Insumos</b>			
Ploteo mapas	4	7600	30400
Marcadores	3	800	2400
Libretas	2	1300	2600
Lápices	2	600	1200
GPS	1	80000	80000
<b>Total</b>			<b>116600</b>

El proyecto de tesis presentado anteriormente será financiado por proyecto FONDECYT 1151187.

## REFERENCIAS

Agenda 21(CL). 2004. Diagnostico comuna de Panguipulli. 15 p. Disponible en ([Agenda 21 local, 2004](#))

Aguayo M, A Pauchard, G Azócar y O Parra. 2009. Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. 3 p. Revista Chilena de Historia Natural 82: 361-374.

Bachmann P, F de la Barra, A Tironi. 2014. Recopilación y sistematización de información relativa a estudios de evaluación, mapeo y valorización de servicios ecosistémicos en Chile. 5 p. Consultado 25 oct. 2015. Disponible en ([Bachmann, 2014](#)).

Balvanera y Cloter. 2009. Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. 206 p. Consultado 3 dic. 2015. Disponible en ([Balvanera et al., 2009](#)).

Barral MP. 2015. Tutorial para el mapeo de funciones ecosistémicas y servicios ecosistémicos. 12 – 18 p.

Boughton WC. 1989. A review of the USDA SCS curve number method. 5 p.

Boyd J. S Banzhaf. 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. 4 p. Consultado mar. 13 2016. Disponible en ([Boyd y Banzhaf, 2007](#)).

Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional, CL. 2013. Reporte Comunal: Panguipulli, Región de Los Ríos. 2 p. Consultado mar. 15 2016. Disponible en ([CASEN, 2013](#)).

Collins S, L Carpenter, S Swinton, S Orenstein, D Childers, D Gragson, T Gragson, N Grimm J Grove, S Harlan, J Kaye, A Knapp, G Kofinas, J Magnuson, W McDowell, J Melack, L Ogden, G Robertson, M Smith y A Whitmer. 2011. An integrated conceptual framework for long-term social-ecological research. 3 p. Consultado 11 mar. 2016. Disponible en ([Collins et al., 2011](#))

De Groot R, Wilson M y Boumans R (2002). A typology for the description, classification and valuation of ecosystem functions, goods and services. 6 y 7 p.

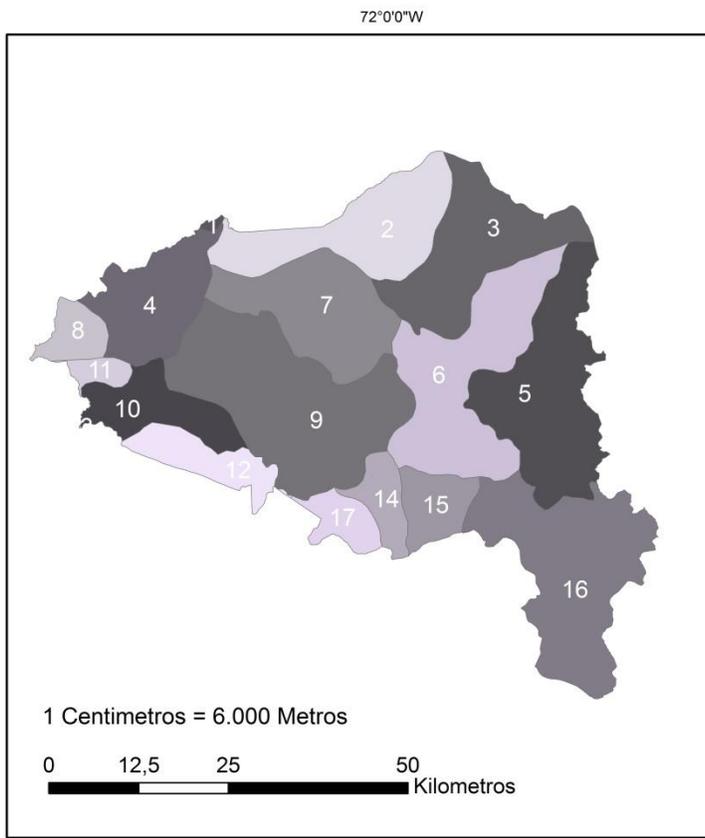
- Fiquepron J, S Garcia y A Stenger. 2013. Land use impact on water quality: Valuing forest services in terms of the water supply sector. 10 p. *Journal of Environmental Management* 126 113 – 121.
- Fohrer N, S Haverkamp, K Eckhardt y H frede. 2001. Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. 2 p. *Phys. Chem. Earth (B)*, 26, 7-8, pp. 577-582.
- Gajardo R. 1994. La Vegetación Natural de Chile. Clasificación y Distribución Geográfica. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 165p.
- Haines-Young R y M Potschin. 2012. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on Version 4.
- Jaramillo A. 2014. Modelación del servicio ecosistémico de provisión y regulación hídrica bajo diferentes escenarios de uso de suelo: caso de estudio en el sur de Chile. Tesis Magister en Ciencias, Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile. 19 p.
- Lara A, C Little. 2010. Restauración ecológica para aumentar la provisión de agua como un servicio ecosistémico en cuencas forestales del centro-sur de Chile. *Revista Bosque* 31(3): 175-178. Consultado el 27 de oct de 2015. Consultado 4 sep. 2015. Disponible en ([Lara y Little, 2010](#)).
- Laterra P, L Nahuelhual. 2014. Internalización de los servicios ecosistémicos en el ordenamiento territorial rural: bases conceptuales y metodológicas. 4 p.
- Laterra, P., P Barral , A Carmona, L Nahuelhual. 2015. ECOSER: protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el ordenamiento territorial. 3 p.
- Luzio W, M Casanova y O Seguel. 2009. Suelos de Chile, Capítulo 5: Suelos de la zona mediterránea húmedas. 201 p.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment, USA). 2005. Freshwater Ecosystem Services. Capítulo 7. 3 p. Consultado 4 nov. 2015. Disponible en ([Capítulo 7: Freshwater Ecosystem Services](#)).
- Nahuelhual L, A Carmona, M Aguayo y C Echeverría. 2014. Land use change and ecosystem services provision: a case study of recreation and ecotourism opportunities in southern Chile. *Landscape Ecol* 29:329–344. 330 y 341 p.

## ANEXOS

Anexo 1. Series de suelo de la comuna de Panguipulli y sus superficies.

Nombre serie	Superficie (hectáreas)
ASOCIACION LOS NEVADOS	4245,5
CALAFQUEN	1219,4
CHESQUE	4300,1
CHOSHUENCO	4429,0
CORRELTUE	37422,9
HUELLAHUE	9712,3
LANCO	9787,4
LIQUINE	48333,8
LOS LAGOS	16641,3
MALIHUE	12367,2
MISCELANEOS	15833,0
PANGUIPULLI	594,9
TERRAZAS ALUVIALES	1543,6
TERRAZAS ALUVIALES CENIZAS	1390,2
VOL	6966,0
TERRAZAS ALUVIALES RIOS PRECOR	6966,0
TOTAL	174786,6

Anexo 2. Cuencas a utilizar para determinar valores curva número.



ID	NOMBRE
1	Rio Cruces (S. Jose) bajo E. Niguen
2	Desague Lago Calafquen desde desembocadura Lago Conaripe
3	Rio Canaripe en desembocadura Lago Calafquen
4	Rio Leufucade bajo Rio Antihue
5	Rio Lizan en junta Rio Reyehueico
6	Rio Neltume entre arriba Rio Reyehueico y Rio Fui
7	Rio Guanehue entre desague Lago Calafquen y Lago Panguipulli
8	Rio Inaque bajo Rio Pillecozcoz
9	Lago Panguipulli
10	Rio San Pedro entre desague Lago Rinhue y bajo Rio Manio
11	Rio San Pedro entre Rio Manio y Rio Quinchilca
12	Lago Rinhue
13	Rio Quinchilca entre Rio Pichico y Rio San Pedro
14	Rio Llanquihue entre junta Rios Fui y Neltume y desemb. en Lago Pan
15	Rio Fui entre desague Lago Pirehueico y Rio Neltume
16	Desague Lago Pirehueico
17	Rio Enco