



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES  
ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES  
Laboratorio de Limnología y Recursos  
Hídricos Laboratorio Ecotoxicología y  
Monitoreo Ambiental

---

## INFORME FINAL

*Análisis de la Carga de  
Nutrientes (Nitrógeno y  
Fósforo) de las principales  
Subcuencas aportantes el Lago  
Villarrica.*

## **EQUIPO DE TRABAJO**

Director Proyecto: Dr. Francisco Encina Montoya

Laboratorios de Limnología, Recursos Hídricos, Ecotoxicología y Monitoreo Ambiental.  
Escuela de Ciencias Ambientales, Facultad de recursos Naturales. Universidad Católica de  
Temuco, Manuel Montt 56, Casilla 15-D, Temuco, Chile.

### **Equipo de trabajo**

Dr. Francisco Ramón Encina Montoya

Laboratorio Ecotoxicología y Monitoreo Ambiental

Escuela de Ciencias Ambientales

Facultad de Recursos Naturales

Dr. David Figueroa Hernández

Laboratorio de Limnología y Recursos Hídricos

Escuela de Ciencias Ambientales

Facultad de Recursos Naturales

Dr ©. Carlos Esse

Magíster en Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota

Laboratorio de SIG – Teledetección y Bosques

Escuela de Ciencias Forestales

Facultad de Recursos Naturales



Mg© Amerindia Jaramillo Allendes

Bióloga en Gestión de Recursos Naturales

Escuela de Ciencias Ambientales

Universidad Católica de Temuco

Ing. Acuicultura Carlos Felipe Aguayo Arias

Laboratorio Ecotoxicología y Monitoreo Ambiental

Laboratorio de Limnología y Recursos Hídricos

Escuela de Ciencias Ambientales

Facultad de Recursos Naturales



## INDICE GENERAL

<b>1. DEFINICIÓN DEL PROGRAMA.....</b>	<b>4</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....</b>	<b>12</b>
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>13</b>
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>48</b>
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....</b>	<b>98</b>
<b>7. REFERENCIAS .....</b>	<b>100</b>



## ANTECEDENTES PROYECTO

### 1. DEFINICION DEL PROGRAMA

<b>1.1. Nombre del Proyecto</b>	<b>“Análisis de la carga de nutrientes (nitrógeno y fósforo) de las principales subcuencas aportantes al lago Villarrica”</b>
<b>1.2. Duración del Programa</b>	5 meses
<b>1.3. Fondos Requeridos</b>	\$ 6.200.000
<b>1.4. Unidad Técnica</b>	Subsecretaría de Medio Ambiente
<b>1.5. Unidad Ejecutora</b>	Laboratorios de Limnología y Recursos Hídricos & Ecotoxicología y Monitoreo ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales - Universidad Católica de Temuco
<b>1.7. R.U.T. UC-Temuco</b>	71.918.700-5
<b>1.8. Director de Proyecto</b>	Dr. Francisco Encina Montoya

## 2. INTRODUCCIÓN

El estudio de las interrelaciones estructurales y funcionales en ecosistemas de aguas continentales y como éstos se ven influenciados por la dinámica espacio-temporal del territorio, permitirá comprender los mecanismos causales que están operando y controlando el ambiente acuático tanto en lagos como en ríos, y por tanto, mayor será la probabilidad de predecir con adecuada exactitud los patrones de determinados eventos en estos sistemas ya sea como resultado de disturbios naturales o de intervenciones antrópicas (Wetzel, 2001).

Los sistemas acuáticos del sur de Chile están sometidos a constantes alteraciones, producto de las innumerables actividades humanas desarrolladas, ya que lagos y ríos son objetos de alto interés turístico, económico, y productivo. Los llamados Lagos Araucanos monomícticos y templados como Villarrica, Panquipulli y Llanquihue se caracterizan por ser oligotróficos, transparentes y de muy baja productividad primaria (Soto & Campos, 1995). Sin embargo estos cuerpos continentales podrían acelerar sus procesos de eutroficación por un incremento en el aporte de nutrientes, especialmente fósforo y nitrógeno, debido a la creciente intervención de sus cuencas hidrográficas.

Los mayores cambios en las condiciones tróficas de lagos y ríos tienen como causa diversas actividades antrópicas. Así, cambios en el uso del suelo como las actividades agrícolas, se traducen habitualmente en una alteración de las condiciones de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo. El alto transporte de compuestos nitrogenados, principalmente nitrato, es típico para cauces que drenan áreas con uso extensivo de fertilizantes (Oyarzún et al. 1997).

La remoción de vegetación habitualmente provoca un incremento en las tasas de sedimentos en suspensión, nitrógeno y fósforo total en el escurrimiento superficial, particularmente en áreas intensivamente cultivadas o dedicadas al pastoreo (Heathweire et al. 1990).

El proceso de eutroficación de cuerpos de agua semicerrados (lago, bahías) es una consecuencia de los flujos relativamente altos de nutrientes. Al aumentar la disponibilidad de nutrientes limitantes (nitrógeno y fósforo) para el crecimiento de los productores primarios que habitan estos cuerpos de agua, se genera un aumento de la biomasa (y clorofila A) y por ende de su productividad. Los principales efectos negativos asociados a esta eutroficación se engloban en: aumento de la abundancia, biomasa y productividad primaria de algas macrófitas, disminución de la transparencia (visibilidad) del agua debido principalmente al florecimiento masivo (blooms) de algas, disminución del oxígeno en la columna de agua, principalmente en el hipolimnion (estratos profundos) del lago durante la estratificación térmica en verano aumento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), cambio de especies en los distintos nivel tróficos: algas, zooplancton, peces, bentos aumento exponencial de algas azules (cianobacterias) en verano que potencialmente producen toxinas que afectan a vertebrados, aumento de la abundancia, biomasa y productividad de organismos heterotróficos (zooplancton, bacterias, peces, bentos).

Los lagos Araucanos del sur de Chile, cuyo rol fundamental es actuar como moderadores del régimen de los ríos y que representan un ecosistema muy particular y valioso, ven acelerados sus procesos de eutroficación por aporte de nutrientes. Por tal motivo y de acuerdo a diversos estudios realizados en estos lagos, se detecta un aumento del nivel trófico en forma acelerada. El incremento de la trofia de los lagos se relaciona con las diversas actividades productivas desarrolladas en las cuencas aportantes al cuerpo de agua (en la zona de influencia). Actualmente se ha incrementado el aporte de nutrientes y sedimentos a estos lagos, por lo cual, la trofia de estos sistemas está cambiando de un estado de oligotrofia es decir, bajo nivel de nutrientes y productividad a un estado de mesotrofia debido principalmente a un aumento de la carga de nutrientes P y N.

Diversos estudios realizados en estos lagos, señalan que existiría un enriquecimiento de nutrientes en la columna de agua, principalmente por aportes de la agricultura y acuicultura, situación observada durante el período de mezcla de la columna de agua en algunas bahías

específicas (Soto, 2002). Un factor relevante en el manejo de cuencas es la provisión de agua en adecuada calidad, como un servicio ecosistémico (Mark & Dickinson, 2008).

Un desafío fundamental en países con economías emergentes y en desarrollo, como Chile, donde los servicios ecosistémicos están siendo vulnerados por una demanda creciente de éstos y constante deterioro ambiental, es la generación de información científica con la finalidad de aportar a las decisiones políticas en el desarrollo de proyectos que impacten el medioambiente. Esta información puede provenir de un programa de monitoreo de gran extensión y costoso, pero también debe ser complementado con la aplicación de herramientas de modelación.

Las cuencas de mesoescala representan en el hemisferio sur un importante desafío; por la necesidad de desarrollar instrumentos de planificación territorial (uso del suelo) que consideren la conservación de áreas de bosques nativos y la disponibilidad de agua en cantidad y calidad para el desarrollo de diversas actividades económicas, recreación y consumo humano (Stehr et al. 2010).

Las tendencias y la extensión de la producción de agua afectada por los patrones de uso del suelo, dependen del caso de estudio en particular. Así, el cambio de uso del suelo modifica la intercepción y la infiltración afectando la escorrentía superficial y los flujos subterráneos (Foley et al. 2005).

En este contexto se hace necesario comprender el comportamiento de estos ecosistemas acuáticos como reservorios naturales de agua para el país. Para ello, la recopilación de antecedentes existente y el desarrollo de monitoreos y análisis físicos, químicos y biológicos periódicos han permitido, en los últimos años, aportar con valiosa información base de estos cuerpos acuáticos continentales.

El lago Villarrica constituye un recurso natural que juega un rol fundamental en el desarrollo de la zona lacustre de la región de La Araucanía, dado que sustenta importantes funciones ecológicas y ambientales, a su vez, constituye un atractivo turístico de gran valor impulsando la actividad turística como eje económico principal de esta zona.

El uso múltiple de las subcuencas aportantes al lago impacta en mayor o menor medida la calidad de las aguas del lago; actividades económicas tales como la agricultura, ganadería, industrias, pisciculturas, aguas servidas sin tratamiento y turismo (embarcaciones), contribuyen a aumentar los aportes de nutrientes y el nivel de eutroficación del lago. Se ha estimado que las entradas de nutrientes transportados por los ríos y esteros al lago Villarrica corresponden en total a 900,71 ton/año de nitrógeno total y a 227,9 ton/año de fósforo total, lo cual representa el 94,7 y 98,2% de las cargas difusas al lago respectivamente. Respecto a las subcuencas, aquellas que generan mayores aportes o entradas de nutrientes al lago, corresponden a las subcuencas del Maichin, Trancura, Caburgua, Pangui, Liucura y Pucón (UACH, 2010). Este estudio ha determinado el aporte diferencial de las coberturas de uso del suelo a los cauces y al lago, estableciéndose índices de exportación de nitrógeno y fósforo por cada cobertura y estimando sus cargas críticas.

Así, se hace necesario profundizar la información y análisis existentes respecto a la estimación de los aportes de nutrientes al lago asociados fundamentalmente a los usos de suelo predominantes en las principales subcuencas de este sistema. Para ello, se efectuó la modelación hidrológica y de carga de nutrientes (nitrógeno y fósforo) del lago Villarrica, con la finalidad de calibrar y validar en el área de estudio esta herramienta espacialmente semi-distribuida, lo cual finalmente permitirá generar nuevos escenarios de uso del suelo que permitan predecir diferencias en las actuales cargas de nutrientes en el cuerpo lacustre, constituyendo un insumo fundamental en la toma de decisiones respecto a gestión de recursos hídricos y aplicación de medidas de mitigación en esta cuenca.

Los modelos de simulación hidrológica surgen como una herramienta de evaluación y predicción cuantitativa, que permite describir el flujo del agua, su calidad, ecología y

economía. Se debe considerar que los estudios de modelación usualmente no abordan todo el proceso de planificación y gestión sino que lo apoyan de manera fundamental (Refsgaard, 2007), permitiendo el entendimiento de los procesos precipitación-escorrentía, tanto en el mediano como largo plazo, facilitando la evaluación de los efectos de las actividades humanas sobre los fenómenos hidrológicos ocurridos en cuencas (Stehr, 2008). Los modelos hidrológicos buscan simplificar la complejidad del mundo real por medio de una selección de los aspectos fundamentales que determinan el funcionamiento del sistema hidrológico a estudiar, debiendo mantener un adecuado equilibrio, siendo suficientemente sencillo para comprenderlo y usarlo, y suficientemente complejo para representar correctamente el sistema modelado (Estrela, 1992).

De esta forma, el estudio clásico de caudales y nutrientes en sistemas acuáticos ha sido sustituido por la utilización de modelos hidrológicos basados en una descripción física de los procesos más relevantes, relacionando las variables climáticas con los caudales (Di Luzio et al., 2002), permitiendo estimar las respuestas y parámetros necesarios para predecir y comprender el comportamiento hídrico de un sistema natural (Stehr, 2008), y a su vez, comprender sus modificaciones producto del impacto de las actividades humanas (uso del suelo).

Actualmente la modelación parece ser una de las únicas herramientas eficaces para tratar los complejos problemas ambientales y de recursos hídricos. Especialmente cuando se involucra la predicción de condiciones hidrológicas futuras al evaluar cambios de uso de suelo y clima, permitiendo extrapolar datos disponibles tanto en el tiempo como en el espacio (Xu & Singh, 2004); obteniendo relaciones de causa-efecto y simulación de escenarios, sin haber realizado cambios en los sistemas reales (Benavides, 1998). El desarrollo de estos métodos indirectos de evaluación de recursos hídricos, sumado a los avances respecto a la masificación de los sistemas de información geográfico (SIG), la mejora en las técnicas de medición de los parámetros de entrada y la creciente necesidad de solucionar problemas cada vez más complejos ha llevado a un incremento en su utilización,

facilitando el análisis de los procesos hidrológicos en intervalos de tiempo más cortos y con un mayor detalle espacial (Pizarro et al., 2005). Sin embargo no se debe olvidar que, un modelo sólo podrá representar de manera adecuada la realidad de una cuenca en la medida que los datos de entrada sean lo suficientemente verosímiles (Rasmussen et al., 1998).

La modelación hidrológica espacialmente distribuida ha alcanzado realce en las últimas décadas dada la mayor disponibilidad y utilización de SIG (Daly et al., 2000). Los modelos de simulación hídrica en interfaz con SIG entregan la posibilidad de reproducir todos los componentes del ciclo hidrológico, permitiendo crear escenarios para condiciones presentes, pasadas y/o futuras, determinando cómo afectará el cambio de una u otra variable (meteorológica o de uso de suelo) en la producción de caudales y sedimentos. Estos modelos físicamente basados se fundamentan en la comprensión de los procesos hidrológicos que controlan la respuesta de las cuencas. Por lo tanto, utilizan ecuaciones matemáticas físicamente establecidas para describir estos procesos, constituyendo valiosas herramientas para evaluar el efecto de prácticas de manejo sobre el escurrimiento, producción de sedimentos, erosión y productividad (Torres et al. 2003).

Inicialmente en Chile, el empleo de modelos hidrológicos y de calidad de agua se centró en modelos empíricos, concentrados espacialmente y calibrados en base a registros históricos de datos de precipitaciones, caudales y nutrientes, pero dado que en estos modelos los parámetros utilizados son calibrados para toda una cuenca, sólo reflejan las condiciones imperantes en ésta cuando se colectaron los datos, por tanto, no permiten la simulación y análisis de los efectos que puedan ejercer cambios en el uso y esquemas de manejo del suelo de una cuenca hidrográfica, impidiendo la realización de estudios a nivel histórico o la evaluación de escenarios de cambio (Campos, 2005). Sin embargo, en la actualidad se hace creciente la adaptación y utilización de modelos de simulación hidrológica espacialmente distribuidos, principalmente en estudios que han empleado los modelos, WaSiM-ETH (Jofré 2007), SWAT (Yarrow & Chambel-Leitao 2008, Stehr et al. 2008, Stehr et al. 2010, Jaramillo et al. 2010), SWMM (Rivera et al. 2007) y SHETRAN (Saéz 1999).

Los análisis y la modelación hidrológica y de calidad de aguas que se desarrolló en este estudio empleó el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) en su versión Arc-SWAT 2009 del USDA.

La elección de este modelo se basa en que constituye una herramienta que permite predecir el impacto del uso dado al suelo en la generación de sedimentos y en la producción de agua en cuencas de mediano y gran tamaño (Pikounis et al. 2003); es un modelo computacionalmente eficiente, ya que permite simulaciones de meso y macro cuencas con comportamientos complejos, sin invertir demasiado tiempo ni dinero (Neitsch et al. 2005); la utilización de este modelo bajo un sistema de información geográfica (interfaz gráfica Arc-SWAT en la plataforma ArcGIS 9.3) lo hacen atractivo y facilita su funcionamiento para la simulación de escenarios; constituye es una herramienta de modelación bien documentada (manuales de uso y numerosas investigaciones), siendo aplicada en cuencas hidrográficas de Latinoamérica y Chile, lo que ha contribuido a su desarrollo y perfeccionamiento local. Unido a ello, específicamente este equipo de trabajo ha desarrollado múltiples investigaciones empleando con éxito este modelo en base a información adaptada localmente (cuenca del río Traiguén, cuenca del río Renaico, microcuencas costera de la región de Los Ríos-actualmente en desarrollo-).

### **3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

#### **3.1. Objetivo General**

Estimar la influencia del manejo del suelo y la vegetación asociados a los usos de suelo de las principales subcuencas del Lago Villarrica, en la producción de agua, sedimentos y nutrientes hacia el Lago.

#### **3.2. Objetivos Específicos.**

3.2.1 Actualizar las estimaciones de carga de nutrientes (nitrógeno y fósforo totales) al año 2010 de acuerdo a los usos de suelo y aportes de las principales subcuencas que forman parte de la cuenca del lago Villarrica.

3.2.2 Implementar y calibrar un modelo hidrológico que incorpore un Sistema de información geográfica (SIG), para predecir los impactos del manejo del suelo y la vegetación en el aporte de agua, sedimentos y nutrientes, considerando las principales subcuencas aportantes al lago Villarrica, tales como Maichin, Palguin, Trancura, o bien aquellas que cuenten con la información de monitoreo para lograr establecer la calibración pertinente del modelo hidrológico seleccionado.

3.2.3 Analizar el efecto de cambios de los usos de suelo de las subcuencas en la respuesta hidrológica en términos de cantidad y calidad de agua generando al menos 3 escenarios de modelación proyectados en 3 cortes temporales cuyos supuestos serán definidos en conjunto con la contraparte técnica del estudio.

## 4. METODOLOGÍA.

### 4.1 Área de Estudio.

El presente estudio se está desarrollando en las principales subcuencas aportantes al Lago Villarrica, éstas son Maichin, Pangui y Trancura. La subcuenca del lago Villarrica formada por el lago y sus afluentes, tiene una extensión de 2.805 km<sup>2</sup>, se localiza entre los 39°18' de latitud sur y los 72°05' de longitud Oeste, a una altitud de 230 msnm y con una profundidad media de 120 m. La delimitación de las subcuencas del lago se muestra en la Figura 1.

En si, esta subcuenca forma parte de una cuenca hidrográfica mayor, la cuenca del río Toltén la cual está conformada por la conjunción de dos ríos principales como son, el río Allipén y el río Toltén. El río Allipén constituye la rama norte de la cuenca, recibe en su trayecto las aguas del río Curaco que es el desagüe natural de lago Colico. El río Toltén corresponde a la rama sur y le da su nombre a la cuenca. En su nacimiento en el lago Villarrica, el Toltén reúne las aguas de una subcuenca de 2805 km<sup>2</sup> de superficie. El caudal medio anual del río Toltén en Villarrica alcanza los 275 m<sup>3</sup>/s. La subcuenca del lago Villarrica está constituida por una serie de ríos de corto desarrollo, afluentes del lago y un río principal Pucón que constituye aproximadamente el 90% de las agua de escorrentía que el lago recibe.

El río Pucón o Minetue se forma de la confluencia de dos ríos que discurren paralelos a la frontera con Argentina y que tienen direcciones opuestas. De sur a norte avanza el río Trancura cuyas agua proviene, en parte, de las faldas del volcán Lanin. De norte a sur lo hace el río Maichin que tiene su origen en los Nevados de Sollipulli, como río Reigolil o Curimeno. A la altura de Curarrehue se unen el Trancura y el Maichin dando origen al río Pucón o Minetue. IGM, cartografía 1 a 50.000. El río Pucón recibe en su trayecto a los ríos Cavisañe, Palguin, Llafenco y Turbio desde el sur y al Liucura desde el norte, que ha recibido en su curso las aguas del lago Caburgua (Campos et al. 1983). El río Pucón es el principal afluente del lago Villarrica, pues su aporte constituye aproximadamente el 90% de las aguas que el lago recibe de sus ríos tributarios. La cuenca hidrográfica del río Toltén es una cuenca andina

de acuerdo a la clasificación geográfica de Chile (Niemayer, 1984). El lago Villarrica ocupa la depresión de un valle terciario que fue remodelado por la acción glaciaria de la última glaciación que data de hace 10 a 12.000 años (Mercier & Laugenie 1973). El glaciar que le dio origen ocupó durante la glaciación los valles por los que hoy discurren los ríos antes mencionados, al límite que alcanzó el hielo glaciario sobrepasa hacia el oeste la ciudad de Villarrica. Al término de la glaciación el agua quedó ocupando la depresión remodelada por el hielo dando origen al lago Villarrica primitivo (Mercier & Laugenie 1971).

El uso de suelo de la subcuenca del Lago Villarrica corresponde principalmente a bosque nativo el cual representa el 31,8% del uso del suelo total de la cuenca, los bosques renovales el 25,4 % y las praderas el 17,9 % como usos principales. El agua es el 8,0 % de la cuenca representada por los lagos Villarrica y Caburgua, principalmente. La Tabla 1 muestra la superficie cubierta por cada uso de suelo para la cuenca en estudio.

Tabla 1. Categorías de uso del suelo subcuenca del Lago Villarrica al año 2007.

<b>Uso de Suelo</b>	<b>Superficie (ha)</b>
Agua	23.457
Bosque Nativo	93.258
Matorral	27.094
Nieve	6.069
Plantaciones Exóticas	3.201
Pradera	52.382
Suelo desnudo	12.365
Renoval	74.481
Agrícola	20
Urbano	440

Fuente: CONAF-CONAMA (2007).

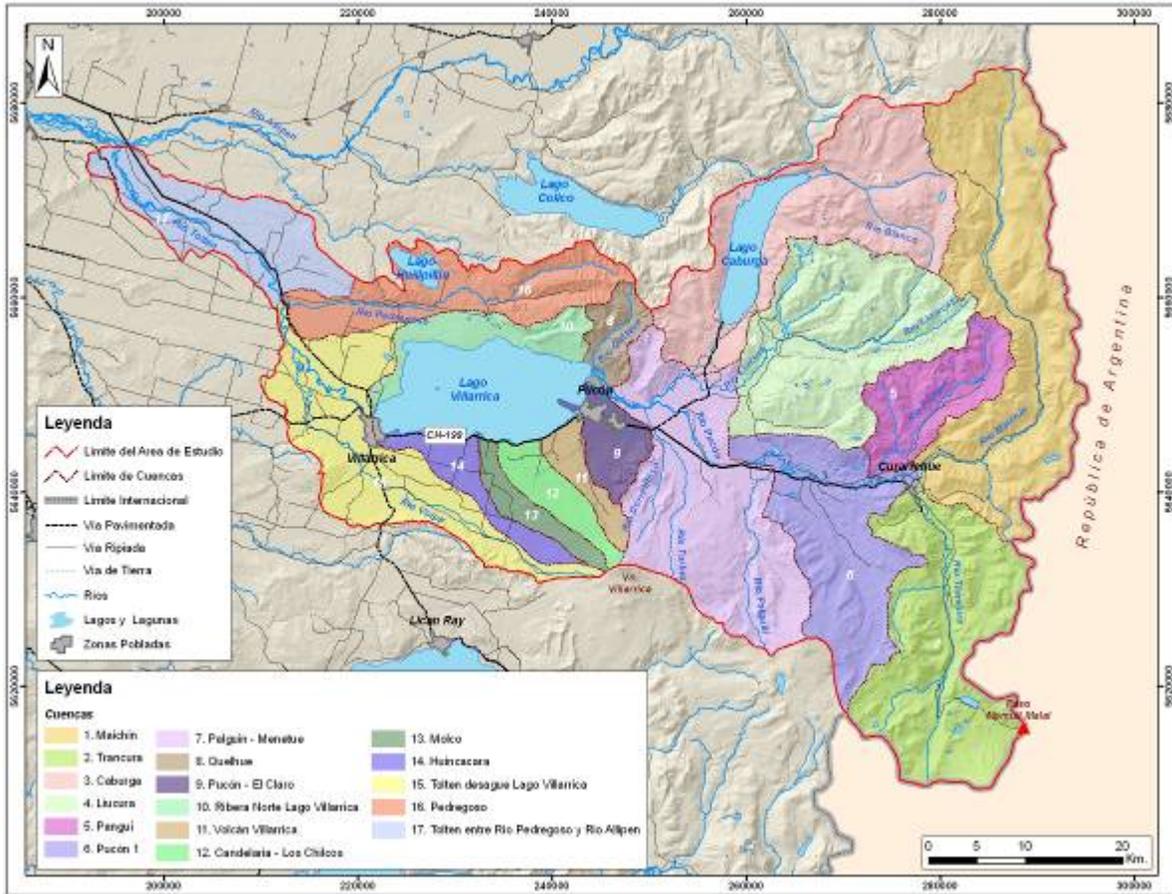


Figura 1. Subcuencas aportantes al Lago Villarrica, Región de La Araucanía.

#### 4.2 Métodos a emplear por objetivo específico.

A continuación se detalla la metodología a aplicar para el adecuado cumplimiento de cada uno de los objetivos propuestos en este estudio:

**Objetivo 1. Recopilar y actualizar la información asociada a las estimaciones de cargas de nutrientes proveniente de fuentes difusas (nitrógeno y fósforo totales) al año 2010 para principales sub-cuenclas que integran la cuenca del lago Villarrica.**

Las actividades establecidas para el cumplimiento de este objetivo fueron las siguientes:

1. Revisión de últimos estudios en relación a estimaciones de nutrientes (N y P) asociados a fuentes difusas en la cuenca del lago Villarrica.
2. Determinación de las principales fuentes de nutrientes asociadas a fuentes difusas de las subcuencas seleccionadas del lago Villarrica.
3. Cálculo de los principales aportes de nutrientes asociados a fuentes difusas en la cuenca del lago Villarrica.
4. Recopilación de información y generación de bases de datos de todos los insumos necesarios para efectuar la modelación en software Soil and Water Assessment Tool (SWATv.2009).

En esta etapa se efectuó la recopilación y sistematización de información científico- técnica de los últimos estudios desarrollados respecto a estimaciones de cargas y exportación de nutrientes (fósforo y nitrógeno) asociadas a fuentes difusas para la cuenca del lago Villarrica.

De esta forma, se recopiló y analizó la información bibliográfica disponible a la fecha para esta cuenca, dicha recopilación se efectuó empleando bases de datos y estudios proporcionados por instituciones tanto públicas como privadas. Consultando también la información existente en diferentes tipos de publicaciones (ISI, SCIELO, de divulgación general), tesis de grado, estudios de línea de base, programas, propuestas y proyectos; empleando además bases de datos universales tales como Scopus, WEBScience, Elsevier, ASFA, entre otras.

Finalmente esta información permitió complementar las bases de datos desarrolladas por estudios anteriores en el área, actualizando al año 2011 la recopilación de estudios en relación a nutrientes y sedimentos en la cuenca del lago Villarrica con que cuenta la Seremi del Medio Ambiente de la región de La Araucanía. Posterior a la recopilación de información ésta fue sistematizada mediante la confección de una base de datos integrada para el manejo de datos de fuentes difusas en la cuenca del lago Villarrica, la cual constituye un

input fundamental para adaptar el modelo de simulación hidrológica seleccionado a valores de usos de suelo y carga de nutrientes locales (Tabla 2. Base\_datos\_Estudios\_Villarrica.xlsx).

En cuanto a la determinación de fuentes contaminantes difusas en la cuenca en estudio, ésta se efectuó mediante metodología de análisis espacial la cual permitió la identificación y posterior modelación de las fuentes difusas considerando como base la información de uso actual del suelo definido por el Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales de Chile, región de La Araucanía (CONAF *et al.*, 2007) en formato *shape*, esta información de formato vectorial permitió la interpretación y asignación de los valores teóricos de uso de suelo a cada subcuenca en estudio, relacionando éstos con los índices de exportación de nutrientes para cada categoría de uso de suelo, en base a la información recopilada de la revisión de estudios y tesis de grado en la materia, en conjunto con los antecedentes entregados por la Seremi de Medio Ambiente Región de La Araucanía relativos a estudios anteriores efectuados en la cuenca (UACH, 2010), de esta forma fue posible identificar las principales características del área en cuanto al cálculo de carga y exportación de nutrientes (N y P) para cada una de las nueve subcuencas en estudio, comparando éstos resultados con la información disponible a la fecha.

Los índices de exportación de nutrientes Nitrógeno y Fósforo para cada uso de suelo por subcuenca fueron extraídos de información actualizada de diversas cuencas hidrográficas andinas del sur de Chile a partir de estudios de biogeoquímica de bosques nativos y exportación de nutrientes en cuencas de uso múltiple (Oyarzún et al. 1997, Godoy et al. 1999, Godoy et al. 2001, Oyarzún & Huber 2003, Oyarzún et al. 2004).

Para la superficie de cada categoría de uso de suelo estimada por subcuenca y para cada escenario de evaluación (Escenario Actual, Escenario Favorable y Escenario Desfavorable), se estimó el aporte anual en kg N-total o P-total/año por subcuenca de nutrientes (nitrógeno y fósforo total), para ello se emplearon dichos índices de exportación de nutrientes recopilados y sistematizados y los caudales originados por precipitación efectiva, de tal

forma que se descontó el caudal base, pues la movilización de Fósforo y Nitrógeno está asociado a la escorrentía. La determinación del caudal medio anual por subcuenca (caudales base y escorrentía) se efectuó mediante la información de salida que entrega el modelo SWAT en su módulo hidrológico, luego de ser calibrado y validado el modelo.

### **Modelación Hidrológica y de Calidad de Agua: Recolección de información básica y preparación para su ingreso al modelo.**

El modelo seleccionado para efectuar el análisis de carga de nutrientes de las principales subcuencas del lago Villarrica fue el software Soil and Water Assessment Tool (SWAT) en su versión Arc-SWAT 2009 en interfaz con el software de Sistemas de Información Geográfica ArcGIS 9.x ha sido seleccionado como modelo de simulación hidrológica, ello considerando las bases de datos disponibles (meteorológicas, fluviométricas, de uso de suelo, series de suelo, entre otras) y las adaptaciones a datos locales para la región que se han efectuado en el marco del actual proyecto y en estudios anteriores desarrolladas por este grupo de investigación.

Se describe a continuación el funcionamiento del modelo de simulación hidrológica empleado en el desarrollo de este estudio.

### **Descripción del Modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT).**

SWAT es un modelo integral de cuenca (Arnold et al. 1998) de simulación continua, determinístico, espacialmente semi-distribuido (utiliza una aproximación mixta entre raster y vector) y físicamente basado desarrollado durante la década del 90 por el Servicio de Investigación Agrícola del USDA (United States Department of Agricultura) (Neitsch et al. 2005). Incorpora características de varios modelos anteriormente desarrollados por ARS (Agricultural Reserch Service) y nace a partir de la combinación de los modelos EPIC (Erosion

Productivity Impact Calculador) y GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems) (Arnold et al. 1998), mejorando su interfaz y los procesos de simulación en su módulo hidrológico y de calidad de agua.

Este modelo hidrológico y de calidad de agua, fue diseñado para simular el transporte de agua, sedimentos y contaminantes generados y exportados desde cuencas individuales, permitiendo realizar una predicción del comportamiento de sistemas hidrográficos complejos (Torres-Benites et al. 2005) ante impactos producidos por las prácticas de manejo sobre los balances de agua, sedimentos y calidad del agua en meso y macro cuencas (desde cientos de hectáreas a miles de kilómetros cuadrados), con diferentes tipos y uso de suelo y sobre largos períodos de tiempo. Teniendo como principal objetivo facilitar la toma de decisiones con base científica, centrado en el manejo de la producción de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas con razonable precisión (Arnold et al. 1990).

Para los propósitos de modelación la cuenca hidrográfica ha sido dividida en subcuencas, procesos que resultan especialmente beneficiosos cuando diferentes áreas del sistema hídrico son dominadas por usos de suelo y tipo de suelos diversos con impacto directo sobre la hidrología del sistema. La información, dentro del modelo, es organizada para cada subcuenca e incluye las categorías: clima, embalses, agua subterránea, cauce principal (drenaje de cada subcuenca) y unidades de respuesta hidrológica (HRU por la sigla en inglés), estas últimas corresponden a las unidades espaciales donde se desarrollan los cálculos necesarios para llevar a cabo la simulación y se asumen como homogéneas con respecto a sus propiedades hidrológicas (Neitsch et al. 2005) siendo derivadas semiautomáticamente por el modelo, a partir de una base de datos espacial que relaciona el uso de suelo, tipo de suelo, modelo de elevación digital y ciertos criterios definidos por el usuario de acuerdo a los módulos ha calibrar (Stehr, 2010). Dado que el modelo emplea típicamente una escala de tiempo diaria para llevar a cabo las simulaciones (Neitsch et al. 2005), se hace especialmente útil su aplicación en áreas donde no se cuenta con datos meteorológicos sub-

diarios, como es el caso de la red de monitoreo meteorológica presente en gran parte de Chile.

Para la realización del presente estudio se ha efectuado la recopilación de información, adaptación de bases de datos para su ingreso al modelo y se ha desarrollado la etapa de calibración y validación del modelo SWAT tanto en su módulo hidrológico como de calidad de agua (nutrientes), lo que permitió posteriormente la aplicación de éste a nuevos escenarios de cambio de uso del suelo.

Se ha empleado en este estudio el modelo SWAT en su versión 2009 (Neitsch et al. 2010) asociada a la interfaz gráfica Arc-SWAT (Di Luzio et al. 2002) la cual está integrada a un SIG por medio de un preprocesador incluido en ArcGIS 9.3, como extensión de éste. La interfaz gráfica permite obtener las redes de drenaje y subcuencas a partir de un Modelo de Elevación Digital de Terreno y modelar los cálculos hidrológicos al incluir información geográfica como coberturas de tipo y uso de suelo, puntos de control, estaciones meteorológicas entre otros datos. De esta forma, para la configuración de la cuenca hidrográfica el modelo define varias subunidades dentro de ésta (Neitsch et al. 2005), las cuales ocupan una posición geográfica específica y están espacialmente relacionadas entre sí. A su vez cada una de las subcuencas contendrá a lo menos una unidad de respuesta hidrológica (HRU), que corresponde a la combinación específica entre un tipo de suelo y una categoría de uso de suelo. El caudal y la concentración de nutrientes es calculado separadamente en cada una de estas Unidades Hidrológicas y luego sumado en el punto de salida de la subcuenca respectiva.

El modelo está constituido en sí por una serie de módulos, los cuales son empleados para simular distintos procesos hidrológicos, los componentes principales empleados son: hidrología, clima, sedimentación, crecimiento del cultivo, nutrientes, manejo agrícola y plaguicidas.

Al simular el comportamiento hídrico de la cuenca, el modelo divide conceptualmente la hidrología de ésta en dos etapas mayores, la primera de ellas corresponde a la fase terrestre del ciclo hidrológico la cual controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y carga de pesticidas que llegan al cauce principal en cada subcuenca (Cuello, 2003). La segunda etapa tiene relación directa con el flujo de agua y corresponde a la fase de ruteo del ciclo hidrológico (transporte), el cual puede ser definido como el movimiento de agua, sedimentos y nutrientes a través de la red de drenaje hasta los puntos internos de control y finalmente al punto de descarga de la cuenca.

### Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico.

Dado que el éxito de la simulación radica en la representación de los fenómenos involucrados en el ciclo hidrológico, de la manera más detallada y precisa posible, el modelo SWAT considera el principio teórico del balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca, modelando la respuesta hídrica en base a la siguiente ecuación:

$$WYLD = PP - ET - \Delta SW - (PERC - GWQ)$$

Donde:

WYLD: Cantidad de agua en la subcuenca (incluye escorrentía superficial, flujo lateral y caudal base).

PP: Precipitación.

$\Delta SW$ : Cambio en el contenido de agua del suelo (zona vadosa).

PERC: Caudal hacia agua subterránea.

GWQ: Caudal Base contribuido al caudal total.

La subdivisión de la cuenca en subcuencas permite al modelo reflejar la influencia de características locales (p.e. tipo y uso de suelo) sobre los distintos componentes del balance hídrico, consiguiendo una mejor representación física de los procesos hidrológicos.

Los principales datos de entrada requeridos por el modelo, así como los procesos involucrados en esta fase del ciclo hidrológico, corresponden a:

## **Clima.**

Las variables climáticas son relevantes dentro de la modelación ya que proveen las entradas de humedad y energía necesarias para controlar el balance hidrológico y determinan la importancia relativa de los distintos componentes del ciclo. Las variables climáticas requeridas por SWAT son: precipitación diaria, temperatura máxima/mínima del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Estos datos de entrada pueden ser series de datos observados o generados durante la simulación por el generador climático incorporado, a partir de datos meteorológicos medios mensuales. Sin embargo, de acuerdo a estudios desarrollados anteriormente, se tiene que el ingreso de datos de precipitaciones diarias mejora de manera significativa la calidad y rendimiento del modelo.

## **Hidrología.**

La precipitación generada puede ser interceptada por la vegetación o bien caer sobre el suelo, para seguir potenciales caminos (ciclo hidrológico), dichos movimientos del agua son simulados por SWAT en cada HRU. Los principales componentes considerados por el modelo son (Neitsch et al. 2005):

- a) Evapotranspiración: SWAT ofrece tres opciones para modelar la evapotranspiración utilizando uno de los siguientes métodos: Penman- Monteith (Monteith 1965), Prestly-Taylor (Prestly & Taylor 1972) o Hargreaves (Hargreaves et al. 1985), los cuales se diferencian en los datos de entrada requeridos para el cálculo.
- b) Escorrentía Superficial: Para el cálculo de este parámetro el modelo ofrece dos alternativas, el método modificado del Número de Curva (SCS CN) (USDA, 1972) o el método de infiltración Green & Ampt (Green & Ampt 1911), sin embargo, para este último se requieren series de datos subdiarios lo que limita su utilización por la disponibilidad de dicha información. El método de Número de Curva fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de Norteamérica (USSCS por la sigla en inglés), este método directo de estimación del escurrimiento superficial integra la interceptación, infiltración y el almacenamiento en pequeñas depresiones. La ecuación que describe dicho método fue propuesta por el Soil Conservation Service (SCS) en 1972

y consiste en el cálculo de un parámetro de retención ( $S$ ) el cual cambia espacialmente, debido a la variabilidad espacial de las características de los suelos, del uso de suelo, del manejo de éste y la pendiente. Para un mismo lugar su valor, cambia en el tiempo debido a modificaciones en el contenido de agua del suelo. El Número de Curva es función de la permeabilidad del suelo, uso del suelo y las condiciones hidrológicas del suelo (NRCS, 2002).

- c) Intercepción: El agua interceptada por la superficie vegetal, es contenida y puesta a disposición para la evapotranspiración. Al emplear el método de Curva Número para estimar la escorrentía superficial, éste parámetro es relevante durante los cálculos llevados a cabo.
- d) Infiltración: Dado que los análisis hidrológicos son realizados a nivel diario, no es posible modelar directamente la infiltración, sino que la cantidad de agua que ingresa al suelo es calculada como la diferencia entre la precipitación caída y la escorrentía superficial producida.
- e) Redistribución de agua en el perfil del suelo: Este movimiento continuo de agua a través del suelo es provocado por diferencias en el contenido hídrico del perfil, de esta forma, SWAT modela la redistribución de agua por medio de técnicas de almacenamiento y recorrido que permiten predecir el flujo desde distintos estratos de suelo hacia la zona de las raíces.
- f) Flujo Lateral: Esta contribución al caudal del río originada bajo la superficie (0-2 m), pero sobre la zona de saturación, es calculada simultáneamente con la redistribución y considera las variaciones en conductividad, pendiente y contenido de agua del suelo.
- g) Caudal de Retorno: SWAT divide el agua subterránea en dos tipos de acuíferos, uno superficial no confinado que constituye el caudal base y el caudal superficial dentro de la cuenca, y un segundo acuífero profundo confinado, donde el agua que entra deja de circular en la cuenca. El agua percolada se divide en dos fracciones, una para cada tipo de acuífero.
- h) Cauces: Dentro de cada subcuenca se definen dos tipos de cauces, el cauce principal y los tributarios. Cada cauce tributario dentro de una subcuenca drena solamente una porción

de ésta, y todo su caudal es liberado y trasladado a través del cauce principal, utilizando las características de cada tributario para determinar el tiempo de concentración para cada subcuenca.

### **Nutrientes.**

El modelo SWAT rastrea el movimiento y transformación de las diversas formas de nitrógeno y fósforo en las microcuencas generadas por el modelo. En el suelo, la transformación de nitrógeno de una forma a otra sigue los pasos representados en la Figura siguiente, de acuerdo al ciclo biogeoquímico del nitrógeno. La transformación del fósforo en el suelo es controlada por el ciclo del fósforo, que sigue las etapas que se muestran en la Figura 3. Estos nutrientes son incorporados a los cauces principales y transportados aguas abajo en la cuenca tanto por escorrentía, flujo superficial o flujo subterráneo lateral.

a) Nitrógeno: Los diferentes procesos modelados por SWAT en cada una de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs) y las zonas de retención de nitrógeno en el suelo son representados en la Figura 2. El uso de nitrógeno por las especies vegetales presentes en la cuenca se estima utilizando el enfoque de oferta y demanda de este nutriente. El uso de nitrógeno y fósforo en plantas se estima con un enfoque de oferta y demanda, donde el nitrógeno diario de la planta y demandas de fósforo son calculados por la diferencia entre la concentración verdadera del elemento en la planta y la concentración óptima. La concentración óptima de los elementos varía con la etapa de crecimiento así como es descrito por Jones (1983). Adicionalmente al uso efectuado por las plantas, el nitrato y el nitrógeno y el N orgánico pueden ser removidos de la tierra a través del flujo masivo del agua. Las cantidades de  $\text{NO}^3\text{-N}$  contenidas en las escorrentías, flujo lateral e infiltración son estimados como productos del volumen de agua y la concentración de nitrato en el suelo. El transporte del N orgánico con sedimento, es calculado, con una función de la carga desarrollada por McElroy et al. (1976) y modificado por William y Hann (1978) para la aplicación a eventos individuales de escorrentías. La función de la carga estima la

pérdida diaria por escorrentías del N orgánico basada en la concentración del N orgánico en la primera capa de suelo y en la producción de sedimento.

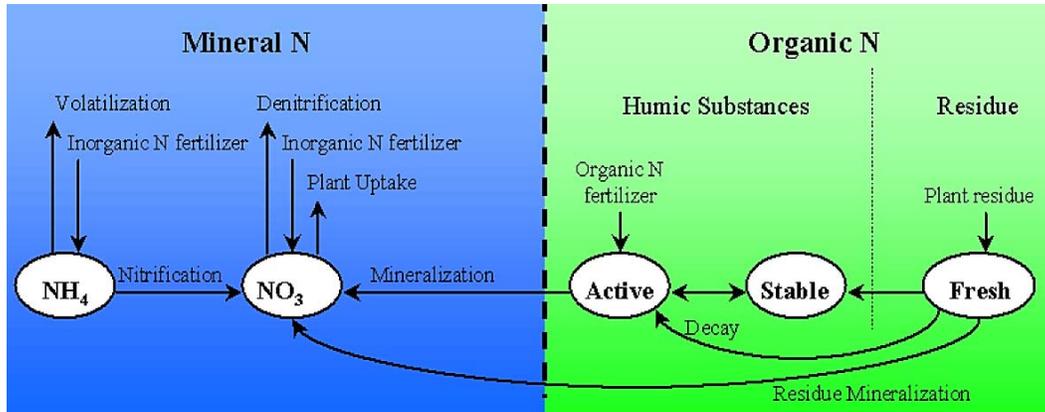


Figura 2. Fracciones y procesos del nitrógeno modelados en SWAT.

b) Fósforo:

Los diferentes procesos modelados por SWAT en las HRUs y en las diversas áreas de depositación de fósforo en el suelo son representados en la Figura 3. El fósforo empleado por las plantas es estimado utilizando el enfoque de oferta y demanda descrito anteriormente para el nitrógeno. Además del nitrógeno utilizado por las especies vegetales, el fósforo soluble y el P orgánico pueden ser removidos del suelo a través de flujos de aguas. El fósforo no es un nutriente móvil entonces la interacción entre la escorrentía superficial y la solución de fósforo en los primeros 10 mm de suelo no será completa. La cantidad de fósforo soluble removido por la escorrentía se predice utilizando la concentración de fósforo en solución en los primeros 10 mm de suelo, el volumen de escorrentías y un factor de división.

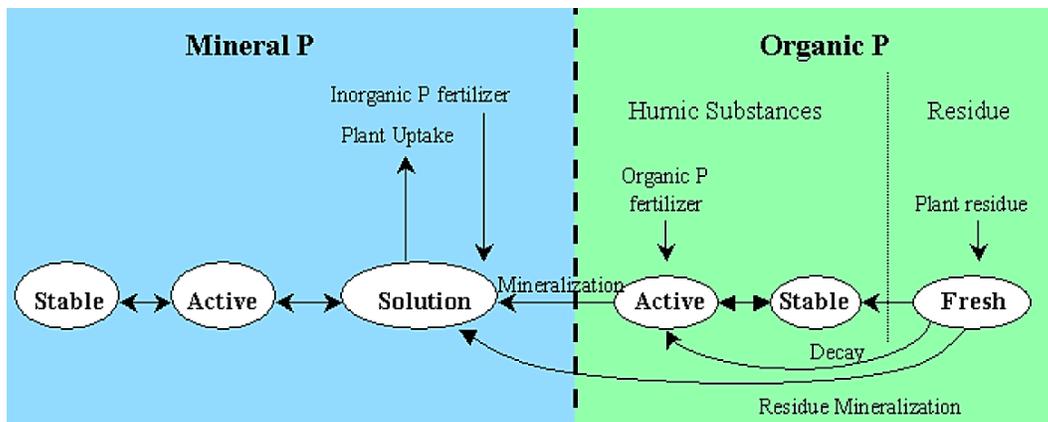


Figura 3. Fracciones y procesos del fósforo modelados en SWAT.

### Fase Líquida.

Esta fase comprende el movimiento de agua y sedimentos a través de la red de drenaje hasta la salida de la cuenca o puntos de aforo. Al escurrir el agua hacia zonas bajas de la cuenca, una porción puede perderse debido a la evaporación y transmisión a través del lecho del río. Y otra pérdida potencial puede ser atribuida a la remoción del agua del cauce para uso agrícola, forestal o humano. Parte del caudal puede ser suplementado por la caída directa de lluvia sobre éste y la proveniente de fuentes puntuales. SWAT emplea la ecuación de Manning para definir la tasa y velocidad de la escorrentía y para el rastreo el modelo permite elegir entre el método de Muskingum y el método de almacenamiento variable, en el cual para cada segmento del río el rastreo se basa en la ecuación de continuidad (Cuello, 2003).

### Interfaz Gráfica.

La interfaz gráfica que utiliza SWAT2009 es ArcSWAT, integrada en ArcGIS 9.3, lo cual facilita su operación, tiempo y economía, así como la reducción de errores de ponderación en grandes cuencas; empleándose en la confección de los mapas temáticos de tipos de suelos, uso actual de suelo y la realización de GRIDS de elevación. Poniéndose de manifiesto la gran capacidad que poseen los SIG como herramienta para modelamiento, permitiendo el pre y post procesamiento de datos (Oñate, 2003).

Dada la necesidad de evaluar los impactos que los usos de suelo generan y ha generado en la cuenca del Lago Villarrica, respecto a cantidad y calidad del agua de este cuerpo lacustre, es que SWAT se convierte en una herramienta de gran utilidad. Al mismo tiempo, probada es la capacidad del modelo para predecir los efectos de la simulación de nuevos escenarios de uso sobre la escorrentía (Torres-Benites et al. 2005). Actualmente el modelo SWAT está siendo empleado en diferentes investigaciones a nivel nacional e internacional por su capacidad para estudiar acabadamente cuencas hidrográficas y permitir la determinación de potenciales formas de manejo del suelo y la predicción del impacto de la disponibilidad hídrica a nivel de macro y meso cuencas hidrográficas (Gassman et al. 2007, Neitsch et al.

2005, Srinivasan & Arnold 1990, Yang et al. 2008, Yarrow & Chambel-Leitao 2007, Stehr et al. 2010).

### Calibración y validación del modelo SWAT.

A pesar del desarrollo de métodos de campo para medir la mayoría de los parámetros de entrada utilizados por los modelos (conductividad hidráulica, capacidad de agua disponible, albedo, entre otros), virtualmente todos los modelos requieren una calibración para ajustar al menos algunos de sus parámetros (Torres-Benites et al. 2005). Esta etapa consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los escurrimientos medidos y los simulados, mediante la variación de los parámetros de mayor influencia en la modelación, aún de aquellos considerados conocidos (USDA-ARS, 1996).

En el marco de este estudio, luego de recopilados los datos de entrada necesarios para la modelación en SWAT y generadas las bases de datos necesarias para el desarrollo de este modelo, se ha calibrado el modelo en sus módulos hidrológicos y de calidad de agua (nitrógeno y fósforo total). Ello se ha llevado a cabo por medio de una serie de simulaciones que permitieron, en base a análisis de sensibilidad, calibrar el modelo para su posterior aplicación a nuevos escenarios de cambio.

Luego de la etapa de calibración se efectuó la validación del modelo, la cual consiste en medir su capacidad predictiva mediante la comparación de los escurrimientos y nutrientes (N y P) simulados y los medidos en un período diferente de tiempo al empleado en la calibración, previo ajuste de los parámetros más relevantes en la modelación (análisis de sensibilidad).

De esta forma, un modelo espacialmente distribuido y físicamente basado como es SWAT, permite una descripción acabada de los efectos que los manejos del suelo y la vegetación y en específico cada subcuenca están generando sobre la carga de sedimentos y nutrientes

del lago, siendo una herramienta ampliamente utilizada para comprender la influencia de procesos antrópicos sobre la hidrología y la erosión en cuencas hidrográficas.

A continuación la Figura 4 muestra el flujo metodológico empleado para efectuar la simulación hidrológica mediante el modelo ArcSWAT 2009 en la cuenca del Lago Villarrica.

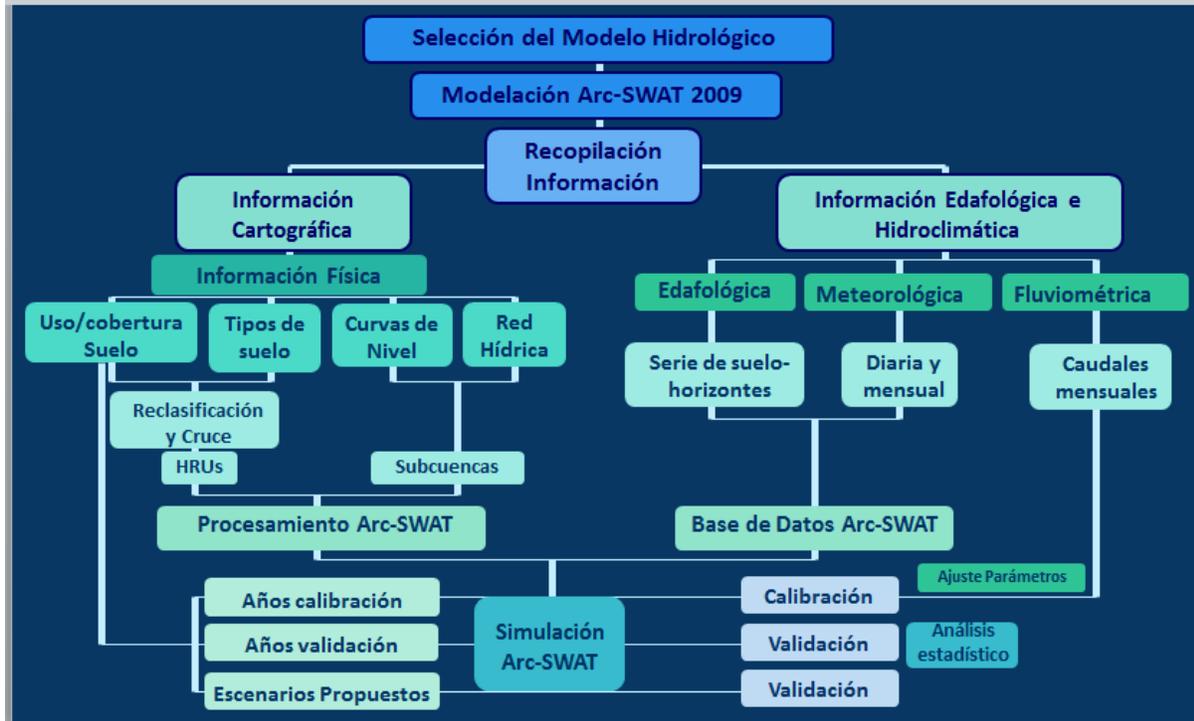


Figura 3. Flujo metodológico simulación hidrológica subcuenca del Lago Villarrica.

Recolección de información básica y preparación para su ingreso al modelo.

En esta etapa se recopilaron y acondicionaron los archivos necesarios como INPUTS del modelo hidrológico, tales como: Capas de información espacial de subcuencas de Lago Villarrica, red de drenaje, parámetros meteorológicos, datos fluviométricos, usos y tipos de suelo a nivel de microcuencas. Ello con la finalidad de implementar y calibrar el modelo para la cuenca en estudio.

## A) Capas de Información en SIG (Sistemas de Información Geográfica).

Junto a la recopilación de información de hidrológica y de calidad de agua, se ha generado y validado la información cartográfica necesaria para el desarrollo del modelo propuesto, esto es:

- a) Un modelo de elevación digital de terreno (DEM por sus siglas en inglés) con una base equidistante de 30 metros basada en información satelital rasterizada. El procesamiento se realizó mediante las extensiones 3D Analyst Spatial y Spatial Analyst de ArcGIS 9.3.
- b) Mapas de Uso/Cobertura de Suelo en la cuenca, los cuales fueron extraídos de la información proveniente del Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de La Región de La Araucanía (CONAF-CONAMA, 2007), en esta etapa se debió efectuar la recopilación de información detallada de cada uno de los usos de suelo locales para la cuenca, ello pues las bases de datos incluidas por defecto en el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) no permiten representar de forma adecuada el comportamiento hidrológico de cuencas del centro-sur de Chile (UCT, 2009). A partir de la bibliografía recopilada y sistematizada se han extraído valores locales para factores fisiológicos tales como: Eficiencia en el uso de la radiación (RUE), Máximo índice área foliar (BLAI), Altura máxima potencial del dosel (CHTMX), Máxima profundidad de raíz (RDMX), Máxima conductancia de hojas (GSI), entre otros. Éstos factores han sido recopilados para determinadas especies forestales presentes en el bosque nativo perenne (*Coigüe- Nothofagus dombeyi*) de la cuenca y especies forestales exóticas, en el caso de estudio se seleccionó la especie *Eucalyptus spp.*, puesto que actualmente corresponde a las plantaciones exóticas dominantes en la cuenca alta del Lago Villarrica. Además, las plantaciones de este género han experimentado un crecimiento sostenido en la región pasando de 753 há en 1974 a 330.000 há el 2000 (INFOR 2001), suceso generado principalmente por su breve período de maduración (en general, no mayor a 15 años), su probada resistencia al frío, su precio más alto como producto final y la preferencia de los importadores (CEPAL-OCDE, 2005).

Debido a la falta de valores locales para diversos parámetros (como Curva Número, índice de área foliar, entre otros), que describan las características hidrológicas de otros tipos de uso de suelo en la cuenca, cada uno de los cultivos o usos de suelo observados localmente en la cuenca fueron asociados a un “tipo de uso de suelo o cobertura” contenido en la base de datos del modelo SWAT. En la mayoría de los casos, estos usos de suelo presentes en la cuenca del lago Villarrica estaban contenidos en la base de datos del modelo, aquellos usos no incorporados fueron asociados a tipos de uso de suelo que más se aproximaran a las características de éstos.

- c) Mapa de tipos de suelo con sus respectivas características físicas e hidráulicas. Datos que fueron obtenidos del Estudio Agrológico de la Región de la Araucanía (CIREN- CORFO, 2002) escala 1:50.000.

Para aquellas series de suelo que no presentan coberturas completas para la zona cordillerana de la región de La Araucanía, se debió completar estas bases de datos, así para cada serie de suelo de la cuenca se generó una base de datos que considera grupo hidrológico, horizontes de suelo, granulometría, densidad aparente, conductividad hidráulica saturada, entre otros.

Toda la información cartográfica antes mencionada fue referenciada en Datum WGS 1984 y Huso 19 Sur.

## **B) Fuentes de Datos y Series de Tiempo.**

### **Información edafológica- tipos de suelo:**

La información contenida en la cartografía de tipos de suelo (CIREN, 2003), fue complementada con la determinación de las propiedades físicas de cada una de las series de suelo existente en el área de estudio, así los parámetros requeridos por el modelo son:

- Determinación del Grupo Hidrológico de cada serie de suelo según la metodología del número de curva del U.S. Soil Conservation Service (Martínez de Azafrá & Navarro 1996).

- Número de Horizontes por serie de suelo, datos extraídos de la información contenida en CIREN (2003).
- Granulometría, Densidad Aparente y Contenido de Carbono Orgánico por horizonte de suelo, extraídos de la información contenida en CIREN (2003).
- Capacidad de agua disponible por horizonte de suelo, determinada a partir de las ecuaciones del Modelo de Retención de Agua del Suelo propuestas por Rawls et al. (1982), mediante la utilización de Soil Water Characteristics Calculador (Saxton & Rawls, 2006).
- Conductividad hidráulica saturada por horizonte de suelo, determinada a partir de Lui et al. (2002) en Campos (2005).
- Factor de erodabilidad (K) por horizonte de suelo, será calculado en base a la ecuación propuesta por Wischmeier & Smith (1978) en Almorox (1994).

### **Información Meteorológica.**

Para la obtención de la información meteorológica fueron seleccionadas 6 estaciones meteorológicas (Banco Nacional de Aguas, DGA) localizadas en la cuenca del Lago Villarrica, las cuales que permitieron describir el comportamiento climático de la cuenca en estudio, éstas presentan una data histórica continua desde el año 2006 al año 2010 (11 años), lo que permite incorporar estos datos como inputs en la modelación. La Tabla 2 y la Figura 4 muestran la localización de estas estaciones.

Tabla 2. Estaciones Meteorológicas en la Cuenca del Lago Villarrica.

<b>Estación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Registro (años)</b>
Currehue	277853	5640156	2000-2010
Llafenco	257199	5642939	2000-2010
Lago Tinquilco	264255	5660823	2000-2010
Lago Caburga	257008	5655905	2000-2010
Villarrica	739311	5649117	2000-2010
Pucón	247739	5647431	2000-2010

En términos específicos la información meteorológica que el modelo requiere incluye:

- Número de años con información de precipitaciones.
- Localización de la estación meteorológica (coordenadas geográficas o UTM)
- Elevación de las estaciones meteorológicas.
- Promedio de temperaturas máximas y mínimas mensuales y sus respectivas desviaciones estándar.
- Precipitaciones diarias, desviación estándar de la precipitación diaria y el coeficiente de asimetría de Pearson de dichas precipitaciones.
- Probabilidad de que un día húmedo siga a un día seco y probabilidad de que un día húmedo siga a un día húmedo, a partir del número de precipitaciones en el mes.
- Promedio de precipitaciones al mes.
- Lluvias máximas en media hora, datos determinados a partir de las ecuaciones propuestas Varas & Sánchez (1984).
- Velocidad del viento media mensual.
- Humedad relativa media mensual.
- Punto de rocío mensual, determinado a partir de ecuación propuesta en Neitsch et al. (2005).
- Radiación solar media mensual.

En general, la cuenca en estudio presenta un registro continuo de datos pluviométricos, sin embargo, en casos de datos faltantes (0,35% de las observaciones) se efectuaron procedimientos estándar de complementación de información meteorológica con la intención de preservar la continuidad de las series de tiempo considerando correlación y extrapolación entre estaciones vecinas, por medio de acumulaciones dobles (UNESCO 1982) siguiendo el procedimiento propuesto por Pezoa (2003).

### **Información Fluviométrica y de Calidad del Agua (Nutrientes).**

Las mediciones de caudales medios mensuales y de calidad de agua (monitoreo estacional) fueron obtenidas de 3 estaciones fluviométricas y 1 estación de monitoreo de calidad de agua que la Dirección General de Aguas posee en la cuenca en estudio. Estas bases fueron analizadas (análisis de outliers) para determinar la data más adecuada a emplear como input del modelo hidrológico, considerando datos diarios y mensuales desde 2000 a 2010 para estaciones fluviométricas y desde 1986 a 2010 para estación de calidad de agua. Estos antecedentes han permitido la calibración y validación del modelo en cuanto a sus módulos hidrológicos y de calidad de agua (considerando nutrientes Fósforo y Nitrógeno Total anual). En las Tablas 3 y 4 y en la Figura 4 se muestra la localización de estas estaciones.

Tabla 3. Estaciones Fluviométricas Cuenca del Lago Villarrica.

<b>Estación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Registro (años)</b>
Río Trancura en Curarrehue	277642	5640023	2000-2010
Río Trancura en Llafenco	261528	5642507	2000-2010
Río Liucura en Liucura	256283	5650926	2000-2010

Tabla 4. Estación Calidad de Agua Cuenca del Lago Villarrica.

<b>Estación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Registro (años)</b>
Río Pucón en balseadero Quelhue	245421	5651257	1986-2010

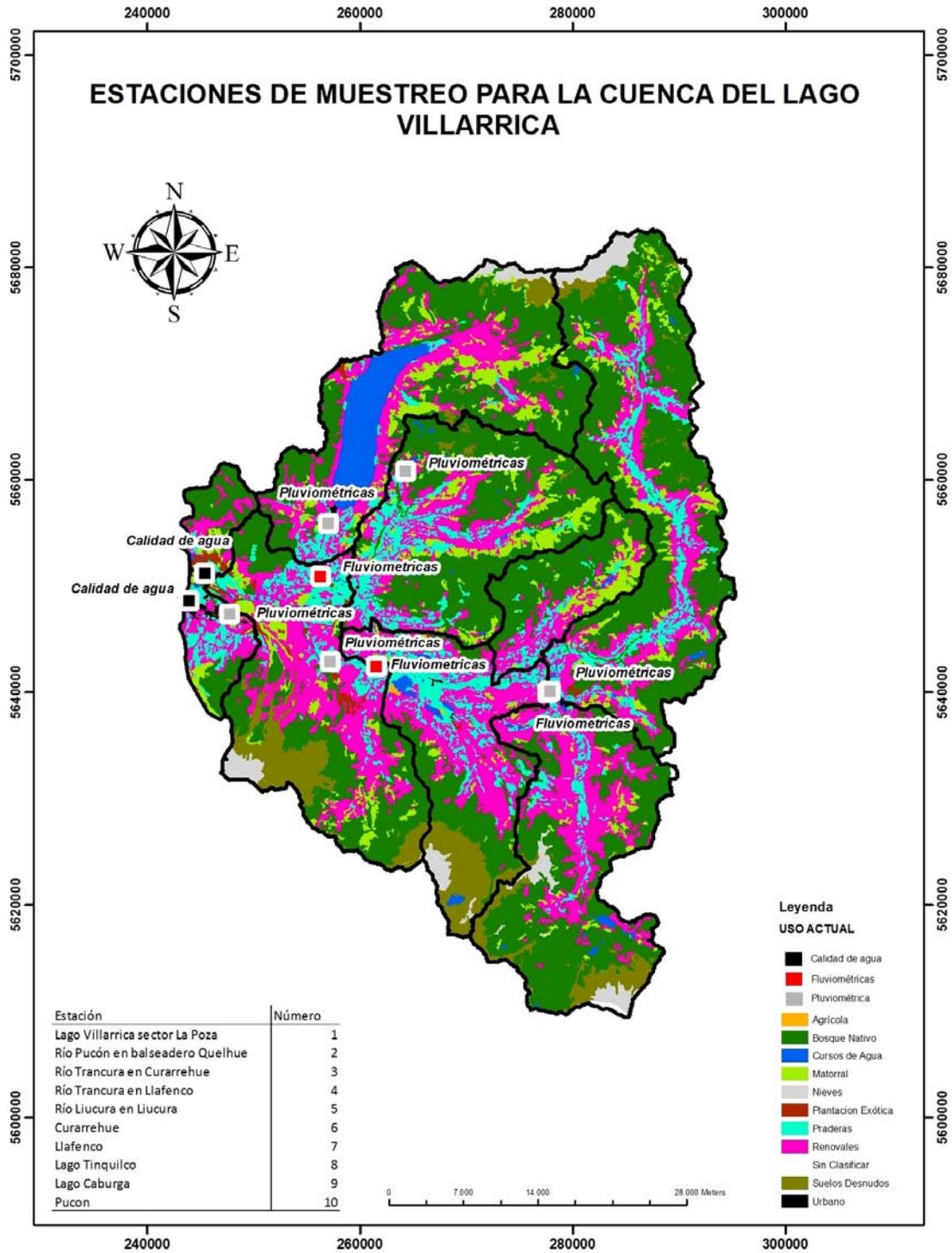


Figura 4. Carta Localización estaciones de monitoreo DGA, subcuenca del Lago Villarrica.

Estos antecedentes fueron requeridos para la calibración y posterior validación del modelo en el módulo hidrológico y de calidad de aguas.

Tanto la información edafológica como hidroclimática fue ingresada directamente en las bases de datos en formato Microsoft Access las cuales son linkeadas al modelo. Todos los análisis estadísticos necesarios para el pre-procesamiento de la información fueron efectuados en los softwares Microsoft Office Excel- 2010, Statgraphics v.16.1.1, XLstat v2009 y el paquete estadístico Crystal Ball.

Una vez recopilada la información necesaria para su ingreso al modelo se efectuó el análisis estadístico previo de ésta, con la finalidad de conocer el comportamiento de los datos recopilados.

### **Análisis Hidrológico.**

El análisis de la información fluviométrica consideró la utilización de las bases de datos de la Dirección General de Aguas de las estaciones Río Trancura antes del río Llafenco, río Liucura en Liucura y río Trancura en Curarrehue. Para el análisis de la información pluviométrica se utilizaron las estaciones del Banco Nacional de Aguas disponibles en las cuencas aportantes y que corresponden a la cuenca alta del Lago Villarrica estas son: Curarrehue, Lago Caburgua, Lago Tinquilco, Llafenco, Pucón y Villarrica. Tanto para la estimación de la estadística descriptiva de la información fluviométrica como pluviométrica, se utilizó XLSTAT-2010. Para la descripción hidrológica se elaboraron los hidrogramas y las funciones de probabilidad para cada estación utilizando Hydrognomon 2010.

### **Análisis datos calidad de agua nutrientes Nitrógeno y Fósforo.**

Para la construcción de las bases de datos de nutrientes (Nitrógeno total y Fósforo Total) que el software de simulación hidrológica SWAT requiere para la etapa calibración del módulo de calidad de agua (nutrientes), se utilizó la data de las estaciones de calidad de agua localizadas en la cuenca del Lago Villarrica. Las bases de datos entregadas por DGA (data desde 1986 a 2010) contienen como parámetros de calidad de agua respecto a

nitrógeno y fósforo mediciones de N-NO<sub>3</sub> (nitrato) y PO<sub>4</sub> (fosfato), por lo cual se estimó una relación entre N-NPO<sub>3</sub> y N Total y PO<sub>4</sub> y P Total sobre la base de datos emanados de mediciones desarrolladas en el marco del estudio Diagnóstico de la calidad de las aguas del lago Villarrica (UACH, 2011).

**Objetivo 2. Implementar y calibrar un modelo hidrológico que incorpore un Sistema de información geográfica (SIG), para predecir los impactos del manejo del suelo y la vegetación en el aporte de agua y nutrientes, considerando las principales subcuencas aportantes al lago Villarrica, tales como Maichin, Palguin y Trancura, para establecer la calibración pertinente del modelo hidrológico seleccionado.**

Las actividades establecidas para el cumplimiento de este objetivo fueron las siguientes:

1. Realizar la calibración del modelo hidrológico para el área en estudio mediante el empleo de mediciones de caudales medios mensuales en la cuenca del Lago Villarrica.
2. Efectuar el ajuste de diversos parámetros físicos e hidrológicos del modelo SWAT, mediante un Análisis de Sensibilidad para obtener una mayor correspondencia entre caudales simulados y medidos en terreno.
3. Realizar la validación modelo hidrológico SWAT para la cuenca del Lago Villarrica, mediante el empleo de una serie de tiempo de precipitaciones diferente a la empleada durante la etapa de calibración.

### **Simulación Hidrológica de la cuenca del Lago Villarrica.**

Para la determinación de la cantidad y calidad de agua disponible como caudales medios mensuales en la cuenca y concentración estacional de nutrientes (N y P), el modelo SWAT realiza simulaciones hidrológicas mediante el uso de balances hídricos, con la finalidad de estimar la escorrentía en un punto determinado de la cuenca, evaluando el aporte-entradas (precipitación, escorrentía proveniente de subcuencas aguas arriba) versus las pérdidas-salidas (evapotranspiración, infiltración, entre otras) en consideración a las condiciones

físicas del suelo (velocidad de infiltración, saturación, entre otros) y a la cobertura vegetal/uso de suelo existente.

La simulación hidrológica comienza al ingresar los inputs requeridos a las bases de datos del modelo SWAT tales como: características de tipos de suelo (User Soil Data Base), base de datos de clima (User Weather Stations) y bases de datos de uso del suelo (Land Cover Data Base).

Como se explicó anteriormente, la información respecto a uso de suelo de la cuenca del Lago Villarrica provino de las coberturas de uso de suelo del Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales de Chile, región de La Araucanía (CONAF *et al.*, 2007).

La información contenida en esta base de datos fue simplificada, 10 clases de uso de suelo (Sistema General de Clasificación de la Vegetación) y luego fue asociada y ajustada a un tipo de uso de suelo predefinido en las bases de datos de SWAT (Land Cover), ello debido la falta de valores locales establecidos para parámetros que describan las características hidrológicas de cada uso de suelo existente en la cuenca (Tabla 5).

Sin embargo, para las clases de uso de suelo Bosque Nativo y Plantaciones Exóticas fue necesaria la creación de nuevas bases de datos (en SWAT), parámetros recopilados mediante revisión bibliográfica (Read & Hill, 1985; Reye-Díaz *et al.* 2005; Zúñiga *et al.* 2006; Veblen *et al.* 1996), consulta a expertos y clases modificadas a partir de Yarrow & Chambel-Leitao (2007) y Yarrow & Chambel-Leitao (2008). En el caso de la categoría Bosque Nativo esta cobertura fue homologada a las características propias del género *Nothofagus spp.* considerando especies perennes, dado que la vegetación nativa existente en la cuenca corresponde al tipo forestal Roble-Raulí-Coigüe, para la clase Plantaciones Exóticas se homologó ésta a las características propias del género *Eucalyptus spp.* ya que actualmente corresponde a la vegetación exótica dominante en la cuenca y producto de sus

características fisiológicas y el potencial de comercialización de su fibra se estima que continuará siendo el cultivo forestal dominante en el área (Paredes 2007).

Tabla 5. Reclasificación de clases de uso/cobertura de suelo.

Categoría Uso de Suelo Catastro CONAF-CONAMA	Categorías de uso/cobertura de suelo (SWAT)
Bosque Nativo Adulto	BNP (adaptación local de FRST)
Bosque Nativo Renoval	BNP (adaptación local de FRST)
Centros Urbanos	URLD (Urban Low Density)
Cursos de Agua	WATR (Water)
Matorral	BROM (Meadow bromegrass)
Nieves	SNOW (Snow)
Pradera	WPAS (Winter Pasture)
Terrenos de Uso Agrícola	AGRL (Agricultural Land Generic)
Plantaciones Forestales	EUCA (Eucalyptus)

Para generar las nuevas clases de uso/cobertura del suelo ha incluir en las bases de datos del modelo SWAT para la cuenca del Lago Villarrica se debió modificar ciertos parámetros fisiológicos relevantes para caracterizar las condiciones locales de crecimiento de estas especies forestales, a continuación la Tabla 6 muestra en detalle la adaptación del modelo efectuada.

Tabla 6. Parámetros modificados en base de datos SWAT para Bosque Nativo y Plantaciones Forestales Exóticas.

Clases SWAT	Categoría de Uso del Suelo	BIO_LEAF	BLAI	RDMX	CHTMX	HVSTI	T_BASE
BNP	Bosque perenne de <i>Nothofagus spp.</i>	0,5	5	2,5	5	0,05	10
EUCA	Plantación Forestal Perenne <i>Eucalyptus spp.</i>	0,3	5,5	4,0	10	0,76	0

Finalmente, se procedió a ingresar todos los datos de entrada requeridos por el modelo (DEM, Red Hídrica, Cobertura de Uso de Suelo, y Tipo de suelo), a partir de los cuales SWAT generó la integración de éstos en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs). Para dar comienzo a la simulación en sí, se deben especificar el período de simulación y el intervalo temporal a utilizar (anual, mensual, diario), con lo cual el software lleva a cabo el procesamiento y entrega de los datos de escorrentía requeridos por subcuenca. En esta instancia es posible cambiar algunos de los parámetros de análisis, como el método de estimación de la evapotranspiración, temperatura de derretimiento de nieves, velocidad del flujo lateral, entre otros.

#### **A) Calibración del Modelo SWAT- módulo hidrológico en la cuenca del Lago Villarrica**

El modelo SWAT incluye diversos parámetros los cuales describen las condiciones hidrológicas y características a través de la cuenca. Durante el proceso de calibración, los parámetros del modelo son sujetos a ajustes, con la finalidad de obtener resultados del modelo que se correspondan mejor con los caudales observados en terreno y medidos en las estaciones fluviométrica que la Dirección General de Aguas tienen en la cuenca.

El rango de los valores de cada parámetro empleados en la etapa de calibración debe ser físicamente plausible (Eckhardt et al. 2005), de modo que el modelo ya calibrado pueda ser aplicado en la evaluación del impacto hidrológico de escenarios de cambio y/o opciones de manejo por ejemplo.

Para la calibración y validación del modelo la serie de tiempo de caudales empleada corresponde a caudales medios mensuales de 3 estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas presentes en la cuenca del Lago Villarrica (Río Trancura en Curarrehue, Río Trancura en Llafenco y Río Liucura en Liucura) empleando éstos como puntos de aforo.

Para la calibración del modelo, se efectuaron alrededor de 400 simulaciones utilizando datos de precipitaciones diarias y temperaturas medias mensuales de 6 estaciones meteorológicas

(Curarrehue, Llafenco, Lago Tinquilco, Lago Caburga, Villarrica y Pucón) empleando una data desde el año 2000 al 2006 como input. Los dos primeros años del periodo de modelación fueron considerados como etapa de “warm up” del modelo.

Los datos de precipitación diaria fueron incorporando de forma progresiva de acuerdo a la necesidad de ir ajustando el desempeño del modelo.

Previo a la etapa de calibración del modelo se llevó a cabo el ajuste de los parámetros físicos e hidrológicos de la cuenca, en base a las consideraciones emanadas del Análisis de Sensibilidad efectuado automáticamente por el modelo para cada estación fluviométrica considerada. Ello con la finalidad de determinar los parámetros para los cuales el modelo resulta más sensible. El listado de los parámetros más sensibles fue determinado empleando un LH-OAT (Latin Hypercube Sampling-One at A Time) aproximación incluida por defecto en el modelo SWAT (Van Griensven et al. 2006) y considerando las modificaciones propuestas por Nietsch et al. (2002). Dichos ajustes se concretaron realizando simulaciones con variaciones no superiores al 10% en la mayoría de los parámetros definidos.

Se implementó un procedimiento automático de calibración denominado “PARASOL” (Parameter Solution Method; van Griensven & Bauwens, 2003) el cual fue aplicado para cada una de las 3 estaciones fluviométricas y 2 de calidad de agua consideradas en el análisis.

Este procedimiento emplea un algoritmo de evolución compleja aleatoria como método de optimización, el cual es un algoritmo de búsqueda global para la minimización de una función única de hasta 16 parámetros (Duan et al. 1992). Los parámetros y el rango de variación considerado en la etapa de autocalibración se muestran en los resultados (Tabla 18). El límite inferior y superior de: GWQMN, GW\_REVAP, ESCO y sol\_z fueron seleccionados considerando valores citados por Van Liew et al. (2005) y el rango de parámetros como rchrg\_dp, CN2 y SOL\_AWC fueron seleccionados considerando como base estudios de

calibración previos desarrollados con SWAT (p.e. Eckhardt et al. 2005, Van Liew et al. 2005, Sirinivasan, 2005).

Posterior a la calibración del modelo y la obtención de resultados satisfactorios para las simulaciones realizadas se efectuó una etapa de validación del modelo en su módulo hidrológico.

### **B) Validación del Modelo SWAT- módulo hidrológico en la cuenca del Lago Villarrica.**

Para la etapa de validación del modelo se empleó una serie de tiempo desde el año 2007 al 2010. En esta etapa es necesario efectuar las simulaciones del modelo con una serie de tiempo diferente a la utilizada en la calibración pues se busca determinar el comportamiento del modelo luego de efectuado el ajuste de parámetros y la calibración de éste.

Del mismo modo que en la etapa de calibración el primer año de la serie de tiempo no es considerado en la evaluación del comportamiento del modelo (estadísticos para determinación del ajuste entre caudales simulados y medidos), pues corresponde al período de adaptación del modelo (warm-up).

Esta etapa de validación se efectuó en las 3 estaciones fluviométricas consideradas en el estudio, pues éstas son, en su conjunto, representativas del comportamiento de la cuenca alta del Lago Villarrica.

Para determinar el grado de ajuste entre los caudales simulados y medidos en los puntos de control, durante las etapas de calibración y validación, el desempeño del modelo fue evaluado a nivel mensual, mediante los siguientes indicadores estadísticos:

1. Comparación gráfica: Se determinó mediante hidrogramas medios mensuales, el grado de ajuste y concordancia entre los caudales simulados y los medidos, mediante un análisis visual.
2. Coeficiente de Determinación-  $R^2$ : Se empleó este indicador para determinar la correlación entre los caudales medidos y los caudales simulado, calculando el porcentaje de variación total explicado por el modelo de regresión empleado.
3. Índice de Eficiencia de la Modelación Nash-Sutcliffe (EF) (Nash & Sutcliffe 1979): Se utilizó este índice ya que permite determinar cómo el diagrama de los valores medidos versus los valores simulados se ajustan a una relación lineal 1:1. Este indicador adimensional ha sido ampliamente utilizado dada su alta sensibilidad para evaluar las diferencias aditivas y proporcionales entre simulaciones y mediciones en modelación de sistemas naturales (Harmel & Smith 2007).
4. El porcentaje de desviación desde los caudales observados (PBIAS): Este indicador permitió determinar la eficiencia en la predicción de los caudales simulados evaluando la capacidad del modelo para describir la distribución de probabilidad de los resultados medidos (Stehr 2008).

Van Liew et al. (2005) especifica los siguientes criterios para interpretar los ajustes alcanzados en la modelación, de acuerdo a los índices antes mencionados:

- a) En el caso de PBIAS, el valor óptimo es cero; valores negativos indican una sobreestimación de los caudales medidos; mientras que valores positivos muestran una subestimación de los caudales medidos. De esta forma, un valor absoluto de PBIAS menor a 20% es considerado como un "buen" desempeño el modelo, valores entre +-20% y +-40% son considerados "satisfactorios" y valores superiores a +-40% son considerados "no satisfactorios".
- b) En el caso de  $R^2$  y EF, el valor óptimo corresponde a uno, valores superior a 0,75 son considerados "buenos", valores entre 0,75 y 0,36 son considerados "satisfactorios" y valores inferiores a 0,36 son considerados "no satisfactorios".

Con la finalidad de obtener mejores ajustes entre los caudales simulados y medidos se identificaron los valores fuera de rango o atípicos para cada simulación, entendiendo como valores atípicos, observaciones que no viene de la misma distribución que el resto de la muestra. El análisis se realizó mediante métodos gráficos (diagrama de caja) y pruebas estadísticas a partir de valores estudiantizados y considerando como dato atípico aquel 3,479 desviaciones estándar por encima de la media de la muestra (Statgraphics 2008).

### **c) Calibración y Validación del Modelo SWAT- módulo de calidad de agua, en la cuenca del Lago Villarrica**

Los nutrientes posibles de modelar en SWAT son el fósforo y el nitrógeno. Cuando se calibra el modulo de nutrientes se debe considerar que cualquier cambio realizado tendrá un efecto en todos los niveles de nutrientes. La calibración de nutrientes consiste en dos etapas: calibración de las cargas de nutrientes y calibración de los procesos de calidad de agua dentro del cauce.

Para la calibración de las cargas de nutrientes (todos los nutrientes) se debió chequear primero que las concentraciones de nutrientes en el suelo fuesen las correctas para cada nutriente en modelación, en el caso de existir fertilización en la cuenca estos valores deben ser incorporados o- como ocurrió en este estudio- deben ser previamente simulados.

Posteriormente se debió calibrar las cargas de nutrientes por cada compuesto específico, en este caso fósforo y nitrógeno total, efectuando la calibración y ajuste de parámetros como el coeficiente de percolación del nitrógeno (de acuerdo a cada una de las series de suelo presentes en la cuenca), modificación del coeficiente de percolación del nitrógeno, ajuste del coeficiente de división del fósforo edáfico, entre otros.

Luego se debió efectuar la calibración de los procesos de nutrientes dentro del cauce, etapa en la cual el modelo SWAT incluye ecuaciones internas (mediante modelo QUAL2E) que modelan los procesos del ciclo de nutrientes dentro del cauce, mediante variables que consideran la calidad de agua dentro de la cuenca y la calidad de agua dentro de los cauces

que controlan estos procesos. Dichos procesos son modelados mediante la información edáfica particular para cada cuenca incluida como inputs del modelo.

En esta etapa se efectúan una serie de simulaciones que permiten calibrar el modelo en su módulo de calidad de agua-nutrientes.

Finalmente, se obtienen como Output Cantidad de Nitrógeno y Fósforo Total transportados por el agua en un período de tiempo dado (kg N/unidad de tiempo y kg P/unidad de tiempo).

Tal como en el módulo de balance hídrico y de caudales, en el caso de la calibración del módulo de calidad de agua-nutrientes, se han considerado puntos de control que permiten determinar el ajuste del modelo entre cantidad de nutrientes simulados por el modelo y aquellos medidos por DGA en esos puntos de control, para ello se empleó una estación e calidad de agua representativas del comportamiento de la cuenca alta del Lago Villarrica, ésta es: Estación Río Pucón en balseadero Quelhue, se empleó una data desde el año 2000 hasta el 2006 para la etapa de calibración.

Luego de efectuados los ajustes necesarios para mejorar el comportamiento del modelo en los dos módulos empleados, se efectuó la validación del modelo empleando una data desde el año 2007 al 2010, al igual que en la etapa de calibración del modelo hidrológico descrita anteriormente, el primer año de simulación y mediciones no es considerada en los estadísticos que miden grado de ajuste entre parámetros modelados y medidos pues modelo considera esta etapa como un “warm-up” (adaptación). Se debe mencionar que los datos de calidad de agua empleados para la calibración y validación de este módulo corresponden a datos estaciones, es decir, 4 mediciones por año (verano, otoño, invierno y primavera), pues esa es la frecuencia de monitoreo con que cuenta el Banco Nacional de Aguas de DGA para los parámetros simulados.

**Objetivo 3. Analizar el efecto de cambios de los usos de suelo de las subcuencas en la respuesta hidrológica en términos de cantidad y calidad de agua generando 3 escenarios de modelación proyectados.**

Las actividades establecidas para el cumplimiento de este objetivo fueron las siguientes:

1. Generación de 3 escenarios de modelación proyectados, considerando una serie de supuestos que permiten establecer estos escenarios:
  - Escenario Actual
  - Escenario Favorable (aplicando medidas de mitigación a la exportación de nutrientes).
  - Escenario Desfavorable (asumiendo aumento de cargas al lago).
2. Realizar un análisis de resultados de los escenarios de modelación indicando principales medidas identificadas y de mayor importancia que pudiera ser desarrollada para la minimización de las cargas de nutrientes en las subcuencas evaluadas.

El desarrollo de este objetivo se realizó a través de un análisis espacial en SIG por medio de coberturas vectoriales bajo el sistema de proyección UTM con Datum WGS-84 relativo al huso 18 Sur extendido. Las coberturas utilizadas correspondieron al Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales de Chile, región de La Araucanía (Conaf et al., 2007) y a las series y clases de suelo de CIREN-CORFO (Centro de Investigación de Recursos Naturales). Basado en dicha información se generaron tres escenarios que permitieron analizar el efecto de cambios en el uso de suelo sobre la respuesta hidrológica y la exportación de nutrientes en las subcuencas seleccionadas. Estos escenarios fueron:

**1. Escenario actual.**

Se consideró como escenario normal el uso actual del suelo (al año 2007), centrado específicamente en los siguientes usos: agrícola, bosque nativo, cursos de agua, matorral, nieves, plantaciones exóticas, praderas, renovales, áreas sin clasificación específica, suelos desnudos y usos urbanos. De las categorías de uso de suelo anteriores, la de mayor superficie en la cuenca corresponde a bosque nativo y plantaciones exóticas seguido de las

praderas como actividad agropecuaria, estos usos son aquellos que se evidencian con mayor probabilidad de sufrir intervención antrópica en el corto y mediano plazo.

## **2. Escenario Favorable.**

Los criterios definidos para el modelamiento del escenario más favorable se sustentaron en que la cobertura boscosa nativa adulta es la responsable de la mejor cantidad y calidad de agua producida en las subcuencas (índices de exportación de nutrientes 65 ugN/L y 5 ugP/L aproximadamente). Para ello se seleccionó a partir de las coberturas vectoriales de CIREN (Series de Suelo, región de La Araucanía) aquellos suelos de la cuenca con clase de capacidad de uso VI, VII y VIII -las dos primeras clases corresponden a suelos de aptitud forestal y la última a suelos de protección- posteriormente estas clases de capacidad de uso fueron forestadas con especies nativas de rápido crecimiento, como aquellas del género *Nothofagus*. Así, al tener suelos desnudos cubiertos de vegetación arbórea sumando a ello la superficie de bosque ya existente se logró dar cobertura forestal al 90% del territorio. Lo cual genera un escenario óptimo para mantener y/o aumentar el caudal y la calidad del agua de la cuenca, en cuanto a exportación de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo Total). Se generó además un área buffer de protección de vegetación en torno a los cursos de agua principal de la cuenca con una equidistancia de 25 metros según la normativa forestal actual (ley 20.283 y Decreto Ley 701), la cual se mantuvo sin modificaciones.

Así este escenario asume la forestación de estas áreas como principal medida de mitigación a la exportación de nutrientes hacia el lago, ello a partir de modificaciones del uso del suelo en la cuenca alta del sistema.

## **3. Escenario Desfavorable.**

El modelamiento de este escenario consideró un crecimiento del 5% de la actividad agropecuaria (praderas y terrenos agrícolas) con una disminución del 3% de la superficie boscosa total y un 2% en suelos de otros usos, para un período acumulado de 10 años. Este escenario se construyó en base a la proyección de cambio de uso de suelo para el área y considerando índices de exportación de nutrientes mayores (Nitrógeno y Fósforo), es decir,

terrenos agrícola con índice de exportación de nutrientes de 300 ugN/L y 30 ugP/L y praderas con 200 ugN/L y 30 ugP/L aproximadamente (en base a revisión bibliográfica desarrollada en el marco del objetivo 1 de este estudio). La superficie total de bosques adultos que alcanzó las 170 mil hectáreas aproximadamente en el “Escenario Favorable”, al cabo de 10 años la superficie disminuyó en 50 mil hectáreas. Este escenario considera también un incremento de la producción de pisciculturas en determinadas subcuencas, así se incrementó el aporte de Nitrógeno en un 15% y el aporte de Fósforo en un 27%, es decir, se incrementó la producción en 5 pisciculturas además de las ya existentes.

### **Aplicación del Modelo SWAT en la cuenca alta del Lago Villarrica.**

Para evaluar y analizar el efecto que el cambio de uso del suelo en las diversas subcuencas genera en la respuesta hidrológica (cantidad y calidad de agua) de la cuenca del lago Villarrica, a partir de estos escenarios de cambio en el uso del suelo, se efectuaron simulaciones con el modelo ya calibrado y validado para la cuenca en estudio, determinando valores de carga de nutrientes (N y P) para cada uno de estos escenarios.

De esta forma, empleando una data meteorológica desde el año 2007 al 2010 de las 6 estaciones presentes en la cuenca se generaron simulaciones de caudales y nutrientes (Nitrógeno y Fósforo Total) para cada una de las subcuencas en estudio. Comparando los resultados obtenidos en cada uno de los tres escenarios (actual, favorable y desfavorable).

Finalmente, a partir de la información generada y los resultados obtenidos en base a las nuevas condiciones propuestas en cada uno de los escenarios proyectados, se determinaron las principales medidas que pudiesen ser aplicadas en el área de estudio para minimizar las cargas de nutrientes de las subcuencas evaluadas. Este análisis se efectuó en base a un panel de expertos (expertos locales), por medio del cual se generó una priorización de las medidas de mitigación propuestas por el equipo consultor, la retroalimentación con expertos locales, fue fundamental para determinar la plausibilidad de las medidas propuestas y la adaptación de éstas a realidad local.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

**Objetivo 1. Recopilar y actualizar la información asociada a las estimaciones de cargas de nutrientes proveniente de fuentes difusas (nitrógeno y fósforo totales) al año 2010 para principales sub-cuencas que integran la cuenca del lago Villarrica.**

En primera instancia se efectuó la revisión de diversos estudios publicados relativos a estimaciones de nutrientes (N y P) asociados a fuentes difusas en la cuenca del lago Villarrica. En la Tabla 1. Base\_datos\_Estudios\_Villarrica.xlsx anexa a este informe se encuentra el detalle de esta base de datos y en formato .pdf se adjunta cada uno de estos estudios disponibles ordenados alfabéticamente por (Autor, año) en la carpeta del mismo nombre.

La base de datos antes citada sigue el formato mostrado a continuación en la Tabla 7, donde cada una de las fuentes de información recopilada ha sido ordenada por autor y de manera cronológica para facilitar las búsquedas de información posterior.

Tabla 7. Ejemplo Base de Datos "Recopilación de información Lago Villarrica 2012".

Autor (es)	Año	Título
Aldana, M., Riquelme, M. & Vidal, M.	1988	Fauna bentónica del Lago Villarrica un análisis taxocenótico y biocenótico en sustratos de arena y fango
Aracena Pérez, Claudia	2003	Comparación del contenido de metales traza en sedimentos de los lagos Villarrica y Calafquén, distrito de los lagos araucanos, centro sur de Chile
Aravena, G., Brevis, P., Contreras, P., Diaz, D., Fuentes, M., Gedda, M., Jense, M., Saavedra, M. y Vargas, A.	1980	Estudio estacional de zooplancton en dos áreas del Lago Villarrica.

En cuanto a la determinación de las principales fuentes difusas y al cálculo del aporte de nutrientes asociados a estas fuentes para cada una de las subcuencas seleccionadas del lago Villarrica, se muestran a continuación los resultados de uso de suelo actual (año 2007) por

cada una de las 9 microcuencas en estudio. Estas microcuencas corresponden a la cuenca alta del Lago Villarrica y fueron delimitadas por el modelo SWAT en su módulo hidrológico en base al Modelo de Elevación Digital de Terreno (DEM) y la red hidrográfica del área.

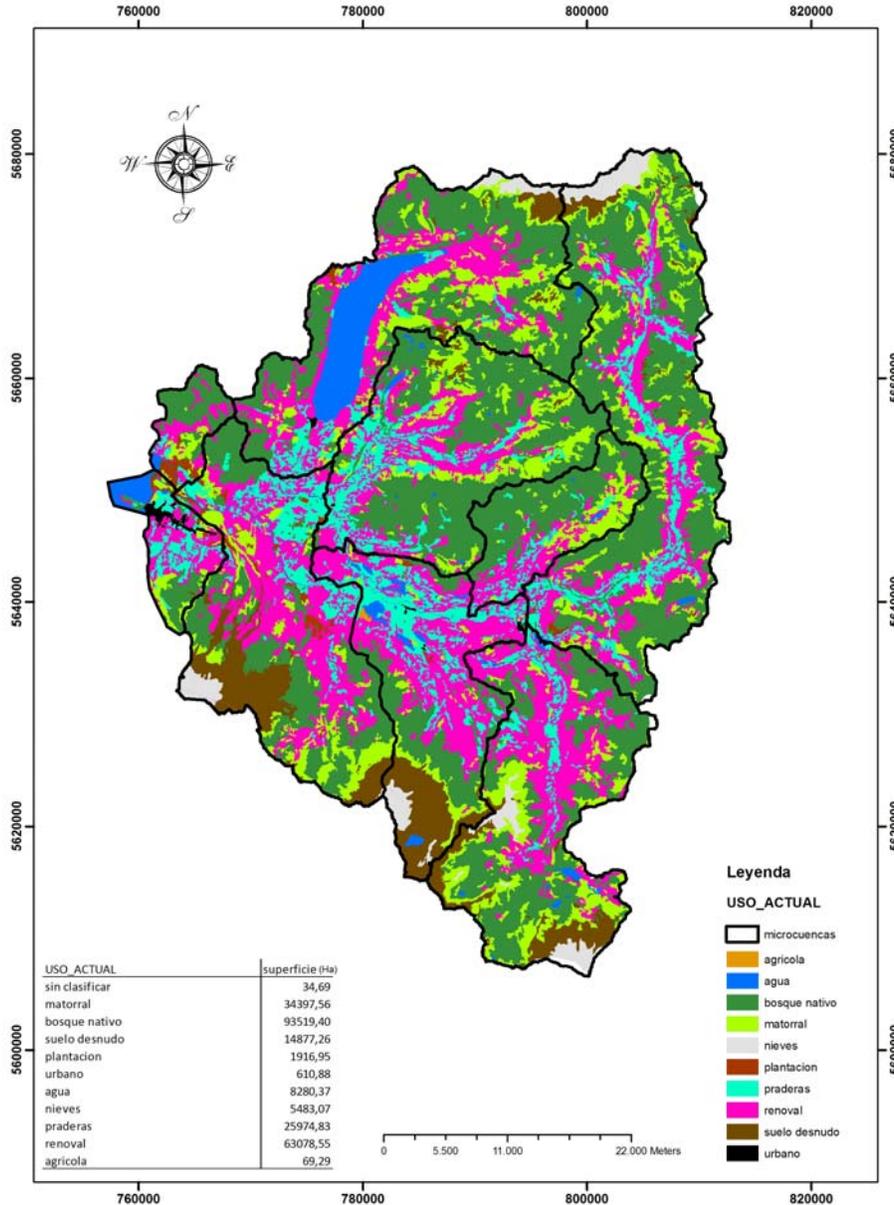


Figura 5. Carta Delimitación de subcuencas altas del sistema Lacustre Villarrica y Uso de Suelo al año 2007.

La Figura 5 muestra la distribución de usos de suelo por cada una de las microcuencas en estudio. Se observa que los usos predominantes de la subcuenca corresponden a bosque nativo adulto (44%) y renoval (26%), le siguen praderas (10%) y matorrales (8%), en menor proporción se presentan uso agrícola (0,1%) y plantaciones exóticas (0,8%).

Luego de delimitadas las principales subcuencas aportantes al lago Villarrica fue analizada toda la información bibliográfica recopilada y actualizada al año 2011, comparado los resultados de carga y exportación de nutrientes por subcuenca obtenidos por este estudio con los resultados obtenidos por investigaciones anteriores para el área (UACH, 2011).

Los índices de exportación de nutrientes utilizados en este estudio y emanados de la revisión bibliográfica realizada se muestran en la Tabla 8. Índices de exportación de nutrientes por categoría de uso de suelo.

Tabla 8. Índices de exportación de nutrientes por categoría de uso de suelo.

Usos suelo	N-tot (ug/L)	P-tot (ug/L)
Agrícola	314.7	28.7
Agua	95.6	8.6
Bosque nativo	67.3	9.8
Matorral	180.0	15.1
Nieve	67.8	67.3
Plantacion	94.8	30.1
Pradera	199.1	35.3
Renoval	73.3	44.0
Suelo desnudo	67.8	67.3

De esta sistematización de información se obtiene que aquellos usos de suelos que generan un mayor arrastre de nutrientes (N total y P total) corresponden a uso agrícola seguido de praderas y matorral, en cambio aquellos usos de suelo con menor índice de exportación de nutrientes corresponden a bosques nativos adultos.

A partir de éstos índices de exportación y del cálculo de caudales medios anuales por subcuenca en estudio, considerando sólo escorrentía (Escorrentía: Caudal Total-Caudal Base), ha sido calculado el aporte de nutrientes fósforo total (P-Total) y nitrógeno total (N-total) expresados en forma de carga de N y P en kg/año para cada subcuenca.

Las Tablas siguientes muestran los resultados de carga de nutrientes anual (N total y P total) por cada una de las 9 subcuencas analizadas. Es importante señalar que estas estimaciones consideran la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones como de los caudales, puesto que el cálculo de caudales medios anuales por subcuenca y división de éstos en escorrentía y caudales base se efectuó mediante la simulación hidrológica de las cuencas aportantes al Lago Villarrica empleando el modelo Soil and Water Assessment Tool (ArcSWAT 2009).

Los cálculos de exportación de nutrientes y caudales de los cuales se extraen estas Tablas resumen se muestran en anexos en formato Microsoft Excel con el título de "Exportación\_nutrientes\_Villarrica.xlsx".

Posterior a la recopilación de información respecto a índices de exportación de nutrientes (nitrógeno y fósforo total), se calcularon las coberturas de uso de suelo bajo los diferentes escenarios propuestos, la metodología de obtención de éstos y los supuestos empleados en su construcción se detallan en el Objetivo 3 de este estudio.

Los escenarios propuestos corresponden a **a) Escenario Actual; b) Escenario Favorable** con un 90% de cobertura, se consideró además un área buffer de protección de vegetación en torno a los cursos de agua principal de la cuenca con una equidistancia de 25 metros según la normativa forestal actual (Ley 20.283 y Decreto Ley 701), la cual se mantuvo sin modificaciones; **c) Escenario Desfavorable:** Crecimiento del 5% de la actividad agropecuaria (praderas y terrenos agrícolas) con una disminución del 3% de la superficie boscosa total y un 2% en suelos de otros usos, para un período acumulado de 10 años. Una disminución de

50 mil hectáreas de bosque y un aumento de 5 pisciculturas con un incremento del 15% aporte de Nitrógeno y un incremental de un 27% de Fósforo. Además mediante simulación con SWAT, se estimaron los caudales asociados a escorrentía superficial para los 3 escenarios. En la Tabla 9 (a, b y c), se muestran las coberturas y caudales para los 3 escenarios.

Tabla 9 (a). Coberturas y Caudales para bajo condiciones del Escenario actual (año 2007).

Uso Actual	Caburga	Liucura	Maichín	Palguín	Pangui	Pucón	Pucón CI	Quelhue	Trancura
Agrícola (ha)						69			
Agua (ha)	5,337	248	151	189	65	856	920	136	378
Bosque nativo (ha)	16,059	16,471	23,327	10,270	6,848	5,030	1,113	2,278	12,123
Matorral (ha)	6,359	5,174	7,389	4,733	1,997	1,410	823	563	5,949
Nieves (ha)	793	10	1,574	897		795			1,414
Plantación (ha)	127	42	147	833		118	177	443	31
Praderas (ha)	1,867	4,595	5,359	4,344	988	5,088	1,509	235	1,989
Renoval (ha)	9,684	6,996	10,083	10,898	2,590	9,743	1,935	1,109	10,041
Sin Clasificar (ha)				17		3			15
Suelo desnudo (ha)	1,121	328	1,128	5,202	11	3,984	50	30	3,024
Urbano (ha)	47	8		5		96	451		4
Area total (Ha)	41,393	33,872	49,157	37,388	12,500	27,192	6,978	4,794	34,968
Q estimado (m3/s)	30,9	24,5	35,0	27,0	9,0	19,0	5,3	3,6	25,1

Tabla 9 (b). Coberturas y Caudales para bajo condiciones del Escenario Favorable.

Uso Actual	Caburga	Liucura	Maichín	Palguín	Pangui	Pucón	Pucón CI	Quelhue	Trancura
Agrícola (ha)									
Agua (ha)	318	176	36	95	64	524	32		270
Bosque nativo (ha)	27,329	24,767	36,737	23,050	9,554	15,576	3,110	3,449	27,319
Matorral (ha)	4,663	3,771	2,744	1,702	1,362	185	315	477	281
Nieves (ha)	793	10	1,591	868		794			779
Plantación (ha)	127	42	481	833		118	133	443	31
Praderas (ha)	1,100	3,627	2,965	1,144	179	1,952	289	205	59
Renoval (ha)									
Sin Clasificar (ha)				10		3			11
Suelo desnudo (ha)	1,121	322	1,067	4,666	11	3,938	6	16	2,812
Urbano (ha)	0					41	188	23	
Area total (Ha)	35,452	32,715	45,620	32,369	11,170	23,131	4,074	4,612	31,562
Q estimado (m3/s)	36,4	30,5	40,2	33,3	10,5	23,4	6,3	4,0	30,2

Tabla 9 (c). Coberturas y Caudales para bajo condiciones del Escenario Desfavorable.

Uso Actual	Caburga	Liucura	Maichín	Palguín	Pangui	Pucón	Pucón CI	Quelhue	Trancura
<b>Agrícola (ha)</b>						5,069	5,000		
<b>Agua (ha)</b>	5,337	248	177	189	65	856	39	66	378
<b>Bosque nativo (ha)</b>	17,645	17,772	24,299	12,152	6,964	10,829	1,216	2,344	16,927
<b>Matorral (ha)</b>		3,873	4,062	2,845	1,881	611	615	497	1,145
<b>Nieves (ha)</b>	793	10	1,592	897		795			1,414
<b>Plantación (ha)</b>	127	42	147	833		118	133	443	31
<b>Praderas (ha)</b>	1,867	9,595	5,359	9,351	5,988	5,088	11,490	8,099	11,989
<b>Renoval (ha)</b>	9,684	6,996	10,083	10,898	2,590	9,743	1,894	1,105	10,041
<b>Sin Clasificar (ha)</b>				17		3			15
<b>Suelo desnudo (ha)</b>	1,121	328	1,084	5,202	11	3,984	21	16	3,024
<b>Urbano (ha)</b>	47	8		5		96	445		4
<b>Area total (Ha)</b>	36,620	38,872	46,802	42,388	17,500	37,192	20,853	12,570	44,968
<b>Q estimado (m3/s)</b>	20,7	16,8	24,3	18,0	5,9	12,6	3,6	2,4	18,4

En las Tablas 10 (a), (b) y (c), se muestran los valores de Nitrógeno y Fósforo Total asociados a la exportación de diferentes usos de suelo y los aportes puntuales asociados a las descargas de pisciculturas para cada escenario. Se puede observar que en el Escenario Actual, la subcuenca de Pucón presentó los mayores aportes, con un máximo de un 115 y 47 toneladas año de Nitrógeno y Fósforo respectivamente, en esta cuenca las 3 pisciculturas presentes aportan el 47% de Nitrógeno y el 50% de Fósforo Total.

Tabla 10 (a) Exportación de Nitrógeno y Fósforo Total para el Escenario Actual (año 2007).

N-tot									
Uso Actual	Caburga	Liucura	Maichín	Palguín	Pangui	Pucón	Pucón CI	Quelhue	Trancura
<b>Agrícola</b>	0	0	0	0	0	479	0	0	0
<b>Agua</b>	12,024	543	324	412	141	1,798	2,101	308	820
<b>Bosque nativo</b>	25,467	25,331	35,200	15,745	10,451	7,441	1,790	3,642	18,495
<b>Matorral</b>	26,972	21,281	29,823	19,409	8,153	5,577	3,540	2,406	24,276
<b>Nieves</b>	1,267	15	2,392	1,386	0	1,185	0	0	2,174
<b>Plantación</b>	283	92	311	1,799	0	245	401	997	66
<b>Praderas</b>	8,757	20,907	23,925	19,704	4,463	22,267	7,180	1,111	8,977
<b>Renoval</b>	16,727	11,718	16,571	18,198	4,305	15,696	3,390	1,930	16,685
<b>Sin Clasificar</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Suelo desnudo</b>	1,790	508	1,714	8,034	17	5,937	81	49	4,647

Urbano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Exportación N-tot Kg/año</b>	<b>93,287</b>	<b>80,394</b>	<b>110,262</b>	<b>84,686</b>	<b>27,530</b>	<b>60,626</b>	<b>18,482</b>	<b>10,442</b>	<b>76,140</b>
<b>Aporte Puntual Pisciculturas</b>	9,935			1,430		54,600			
<b>Total N-tot Kg/año</b>	<b>103,222</b>	<b>80,394</b>	<b>110,262</b>	<b>86,116</b>	<b>27,530</b>	<b>6</b>	<b>18,482</b>	<b>10,442</b>	<b>76,140</b>
<b>P-tot</b>									
Uso Actual	Caburga	Liucura	Maichín	Palguín	Pangui	Pucón	Pucón CI	Quelhue	Trancura
<b>Agrícola</b>	0	0	0	0	0	44	0	0	0
<b>Agua</b>	1,082	49	29	37	13	162	189	39	74
<b>Bosque nativo</b>	3,708	3,689	5,126	2,293	1,522	1,083	261	2,390	2,693
<b>Matorral</b>	2,263	1,785	2,502	1,628	684	468	297	1,697	2,037
<b>Nieves</b>	1,258	15	2,375	1,376	0	1,176	0	1,434	2,158
<b>Plantación</b>	90	29	99	571	0	78	127	595	21
<b>Praderas</b>	1,553	3,707	4,242	3,493	791	3,948	1,273	3,642	1,592
<b>Renoval</b>	10,041	7,034	9,947	10,923	2,584	9,422	2,035	11,388	10,015
<b>Sin Clasificar</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Suelo desnudo</b>	1,777	504	1,702	7,975	17	5,893	80	8,314	4,613
<b>Urbano</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Exportación P-tot Kg/año</b>	<b>21,771</b>	<b>16,812</b>	<b>26,021</b>	<b>28,297</b>	<b>5,611</b>	<b>22,274</b>	<b>4,262</b>	<b>29,499</b>	<b>23,202</b>
<b>Aporte Puntual Pisciculturas</b>	<b>5,590</b>			<b>820</b>		<b>25,150</b>			
<b>Total P-tot Kg/año</b>	<b>27,361</b>	<b>16,812</b>	<b>26,021</b>	<b>29,117</b>	<b>5,611</b>	<b>47,424</b>	<b>4,262</b>	<b>29,499</b>	<b>23,202</b>

Tabla 10 (b) Exportación de Nitrógeno y Fósforo Total para el Escenario bajo condiciones favorables.

<b>N-tot</b>									
Uso Actual	Caburga	Liucura	Maichín	Palguín	Pangui	Pucón	Pucón CI	Quelhue	Trancura
<b>Agrícola</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Agua</b>	717	384	77	207	138	1,102	73	0	585
<b>Bosque nativo</b>	43,341	38,090	55,436	35,339	14,581	23,040	5,002	5,512	41,680
<b>Matorral</b>	19,778	15,511	11,076	6,981	5,560	733	1,355	2,039	1,148
<b>Nieves</b>	1,267	15	2,418	1,341	0	1,183	0	0	1,198
<b>Plantación</b>	283	92	1,022	1,799	0	245	302	997	66
<b>Praderas</b>	5,161	16,502	13,235	5,188	807	8,542	1,377	969	267
<b>Renoval</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Sin Clasificar	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Suelo desnudo	1,790	498	1,622	7,207	17	5,868	11	26	4,322
Urbano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Exportación N-tot Kg/año</b>	<b>72,338</b>	<b>71,092</b>	<b>84,886</b>	<b>58,061</b>	<b>21,104</b>	<b>40,713</b>	<b>8,119</b>	<b>9,543</b>	<b>49,265</b>
<b>Aporte Puntual Pisciculturas</b>	<b>9,935</b>			<b>1,430</b>		<b>54,600</b>			
<b>Total N-tot Kg/año</b>	<b>82,273</b>	<b>71,092</b>	<b>84,886</b>	<b>59,491</b>	<b>21,104</b>	<b>95,313</b>	<b>8,119</b>	<b>9,543</b>	<b>49,265</b>
<b>P-tot</b>									
<b>Uso Actual</b>	<b>Caburga</b>	<b>Liucura</b>	<b>Maichín</b>	<b>Palguín</b>	<b>Pangui</b>	<b>Pucón</b>	<b>Pucón CI</b>	<b>Quelhue</b>	<b>Trancura</b>
Agrícola	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	65	35	7	19	12	99	7	19	53
Bosque nativo	6,311	5,546	8,072	5,146	2,123	3,355	728	5,365	6,069
Matorral	1,659	1,301	929	586	466	62	114	610	96
Nieves	1,258	15	2,400	1,331	0	1,175	0	1,387	1,189
Plantación	90	29	324	571	0	78	96	595	21
Praderas	915	2,926	2,347	920	143	1,514	244	959	47
Renoval	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sin Clasificar	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Suelo desnudo	1,777	495	1,610	7,153	17	5,825	10	7,457	4,290
Urbano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Exportación P-tot Kg/año</b>	<b>12,074</b>	<b>10,347</b>	<b>15,690</b>	<b>15,725</b>	<b>2,762</b>	<b>12,107</b>	<b>1,199</b>	<b>16,394</b>	<b>11,765</b>
<b>Aporte Puntual Pisciculturas</b>	<b>9,935</b>			<b>1,430</b>		<b>54,600</b>			
<b>Total P-tot Kg/año</b>	<b>22,010</b>	<b>10,347</b>	<b>15,690</b>	<b>17,155</b>	<b>2,762</b>	<b>66,707</b>	<b>1,199</b>	<b>16,394</b>	<b>11,765</b>

Tabla 10 (c) Exportación de Nitrógeno y Fósforo Total para el Escenario bajo condiciones desfavorables.

N-tot									
Uso Actual	Caburga	Liucura	Maichín	Palguín	Pangui	Pucón	Pucón CI	Quelhue	Trancura
Agrícola	0	0	0	0	0	35,064	37,601	0	0
Agua	12,024	543	379	412	141	1,798	89	149	820
Bosque nativo	27,982	27,331	36,667	18,630	10,628	16,018	1,956	3,747	25,825
Matorral	0	15,932	16,395	11,664	7,679	2,417	2,646	2,125	4,672
Nieves	1,267	15	2,420	1,386	0	1,185	0	0	2,174
Plantación	283	92	311	1,799	0	245	302	997	66
Praderas	8,757	43,655	23,925	42,414	27,037	22,267	54,668	38,296	54,112
Renoval	16,727	11,718	16,571	18,198	4,305	15,696	3,318	1,923	16,685
Sin Clasificar	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Suelo desnudo	1,790	508	1,647	8,034	17	5,937	34	26	4,647
Urbano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Exportación N-tot Kg/año</b>	<b>68,831</b>	<b>99,793</b>	<b>98,317</b>	<b>102,537</b>	<b>49,808</b>	<b>100,627</b>	<b>100,612</b>	<b>47,262</b>	<b>109,000</b>
Aporte Puntual Pisciculturas	9,935			1,430		54,600			
Nuevas Pisciculturas	3600	3600		0	3600			3600	3600
<b>Total N-tot Kg/año</b>	<b>82,366</b>	<b>103,393</b>	<b>98,317</b>	<b>103,967</b>	<b>53,408</b>	<b>155,227</b>	<b>100,612</b>	<b>50,862</b>	<b>112,600</b>
P-tot									
Uso Actual	Caburga	Liucura	Maichín	Palguín	Pangui	Pucón	Pucón CI	Quelhue	Trancura
Agrícola	0	0	0	0	0	3,198	3,429	0	0
Agua	1,082	49	34	37	13	162	8	39	74
Bosque nativo	4,075	3,980	5,339	2,713	1,548	2,333	285	2,828	3,761
Matorral	0	1,336	1,375	979	644	203	222	1,020	392
Nieves	1,258	15	2,402	1,376	0	1,176	0	1,434	2,158
Plantación	90	29	99	571	0	78	96	595	21
Praderas	1,553	7,740	4,242	7,520	4,794	3,948	9,693	7,839	9,594
Renoval	10,041	7,034	9,947	10,923	2,584	9,422	1,991	11,388	10,015
Sin Clasificar	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Suelo desnudo	1,777	504	1,635	7,975	17	5,893	33	8,314	4,613
Urbano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Exportación P-tot Kg/año</b>	<b>19,874</b>	<b>20,687</b>	<b>25,074</b>	<b>32,094</b>	<b>9,600</b>	<b>26,412</b>	<b>15,757</b>	<b>33,457</b>	<b>30,627</b>
Aporte Puntual Pisciculturas	9,935			1,430		54,600			
Nuevas Pisciculturas	2050	2050		0	2050			2050	2050
<b>Total P-tot Kg/año</b>	<b>31,860</b>	<b>22,737</b>	<b>25,074</b>	<b>33,524</b>	<b>11,650</b>	<b>81,012</b>	<b>15,757</b>	<b>35,507</b>	<b>32,677</b>

Los cambios en los aportes de Nitrógeno y Fosforo total en los tres escenarios se muestran en la Tabla 11, donde se puede observar que respecto a escenario actual, en el escenario favorable hay una reducción del 23% de la carga de nutrientes, en cambio para el Escenario Desfavorable se presenta un aumento de 37% para el Nitrógeno, estos cambios están asociados básicamente a los cambios de uso del suelo en cada una de las subcuencas. Para el Escenario Favorable la reducción del Fósforo Total fue del 21% y para el Escenario Desfavorable el aumento fue de un 38%.

Tabla 11. Resumen de la carga de nutrientes en kg/año de Nitrógeno y Fósforo Total por subcuenca y por cada escenarios.

ESCENARIO	Caburga	Liucura	Maichín	Palguín	Pangui	Pucón	Pucón CI	Quelhue	Trancura	Kg/año de N-TOTAL
Actual	103,222	80,394	110,262	86,116	27,530	115,226	18,482	10,442	76,140	627,815.97
Favorable	82,273	71,092	84,886	59,491	21,104	95,313	8,119	9,543	49,265	481,089.92
Desfavorable	82,366	103,393	98,317	103,967	53,408	155,227	100,612	50,862	112,600	860,756.66

ESCENARIO	Caburga	Liucura	Maichín	Palguín	Pangui	Pucón	Pucón CI	Quelhue	Trancura	Kg/año de N-TOTAL
Actual	27,361	16,812	26,021	29,117	5,611	47,424	4,262	29,499	23,202	209,310.23
Favorable	22,010	10,347	15,690	17,155	2,762	66,707	1,199	16,394	11,765	164,031.14
Desfavorable	31,860	22,737	25,074	33,524	11,650	81,012	15,757	35,507	32,677	289,802.08

Ahora, dado que los análisis de carga y exportación de nutrientes (N-total y P-total) para cada una de las subcuencas aportantes al lago Villarrica son efectuados en base a valores empíricos de índices de exportación de nutrientes calculados en base a estudios realizados en otras cuencas experimentales, estos valores deben ser adaptados a las condiciones locales de la cuenca es estudio, es decir, considerar la variabilidad de éstos de acuerdo a los usos y tipos de suelo, la variabilidad de las precipitaciones (condiciones meterológicas), y caudales. Por tanto, con la finalidad de efectuar un análisis de carga de nutrientes más representativo de la realidad de estas subcuencas se empleó un modelo de simulación hidrológica, el cual permitió además la generación de escenarios de cambio de uso del suelo en el área, evaluando alternativas de manejo y gestión para esta cuenca.

De esta forma se recopilaron y acondicionaron bases de datos de:

- Precipitaciones diarias (período 2000-2010)
- Caudales Diarios y Medios Mensuales (período 2000-2010).
- Concentración de nitrógeno y fósforo total (período 1986-2010).
- Modelo de Elevación Digital de Terreno.
- Cartografía de Uso Actual de Suelo al año 2007.
- Cartografía de series de suelo.

A continuación se efectúa un análisis acabado de la información pluviométrica, fluviométrica y de calidad de agua que fue empleada en la calibración y validación del modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

### **Análisis Información Pluviométrica.**

Las estaciones del Banco Nacional de Aguas disponibles para el análisis de la información pluviométrica en las cuencas aportantes al Lago Villarrica corresponden a: Curarrehue, Lago Caburgua, Lago Tinquilco, Llafenco, Pucon y Villarrica (Tabla 12). Se dispone de información desde el años 2000 al 2010. La información disponible cuenta con aproximadamente 1.800 registros por estación y sólo la estación Caburgua cuenta con 744 observaciones. La estación con mayores precipitaciones diarias corresponde a la estación Lago Tinquilco con 167 mm día. El promedio de precipitaciones osciló entre 5.9 y 9 mm/día. Las distribuciones de frecuencia se concentran en los valores 0, con una clara asimetría positiva y leptocurtosis. Todas las estaciones presentan una clara estacionalidad en la distribución anual de precipitaciones (Figura 6).

Tabla 12. Estadística decriptiva de las estaciones pluviométricas (mm/día) disponibles para este estudio.

<b>Estadística</b>	<b>CURARREHUE</b>	<b>LAGO CABURGUA</b>	<b>LAGO TINQUILCO</b>	<b>LLAFENCO</b>	<b>PUCON</b>	<b>VILLARRICA</b>
Ubicación UTM N [m]						
Ubicación UTM E [m]						
No. de observaciones	1860	744	1860	1860	1860	1860
No. de valores perdidos	96	135	79	66	66	70
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo	148.000	127.000	167.000	132.500	129.500	114.000
Amplitud	148.000	127.000	167.000	132.500	129.500	114.000
1° Cuartil	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mediana	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3° Cuartil	8.000	9.300	9.000	11.000	7.100	7.000
Media	7.636	8.528	8.676	9.013	6.160	5.968
Varianza (n-1)	238.977	278.903	335.776	311.519	148.804	144.382
Coefficiente de variación	2.024	1.957	2.111	1.958	1.980	2.013
Asimetría (Pearson)	3.066	2.686	3.393	2.775	3.050	2.994
Curtosis (Pearson)	12.207	8.674	15.355	9.209	13.198	12.108
Límite inferior de la media (95%)	6.914	7.199	7.824	8.196	5.595	5.411
Límite superior de la media (95%)	8.358	9.857	9.528	9.831	6.725	6.525

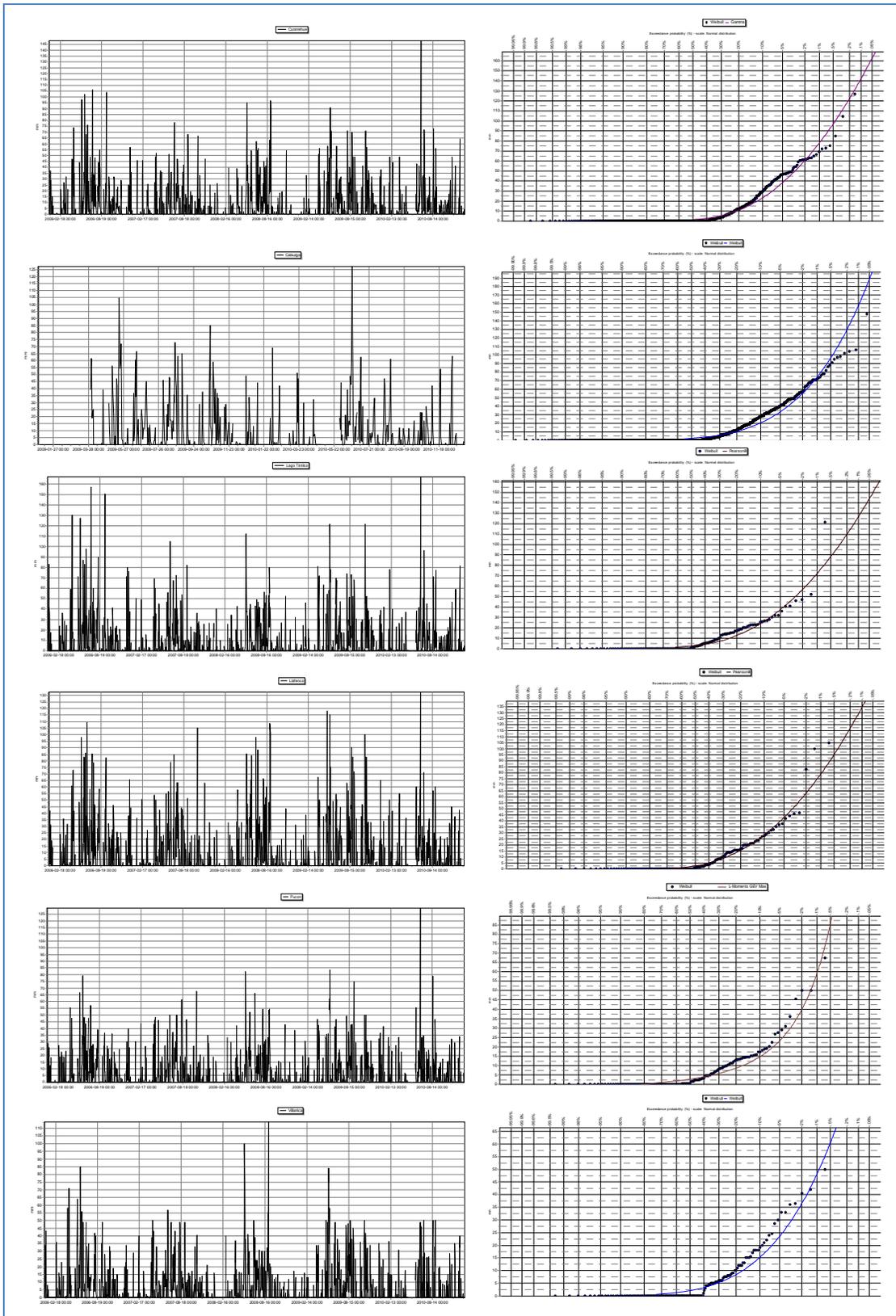


Figura 6. Hietograma y función de probabilidad para las estaciones pluviometricas Curarrehue, Lago Caburgua, Lago Tinguilco, Llafenco, Pucón y Villarrica.

### Análisis Hidrológico.

Para este estudio se cuenta con la información de caudales de las estaciones Río Trancura antes del río Llafenco, río Liucura en Liucura y río Toltén en Villarrica. El resumen estadístico de la data empleada se muestra en la Tabla 13.

Esta base de datos analizada cuenta con un total de 12.214 registros y un 7% de datos perdidos. Los máximos en caudal corresponden a 1224, 462 y 861 respectivamente, con una media de 115, 30.4 y 260 y una desviación estándar de 107.5, 31.3 y 154.5 m<sup>3</sup>/s para las tres estaciones en estudio. La distribución para las tres estaciones es leptocúrtica y asimétrica positiva. Las 3 estaciones presentan una clara estacionalidad con máximos en invierno (Figura 7) y sus funciones de probabilidad se ajustaron a distribuciones logNormal y EV2-Max.

Tabla 13. Resumen estadístico base de datos de cauda m<sup>3</sup>/s para las estaciones de aforo en la cuenca del Cuenca Lago Villarrica.

Estadística	RIO TRANCURA ANTES RIO LLAFENCO	RIO LIUCURA EN LIUCURA	RIO TOLTEN EN VILLARICA
Ubicación UTM N [m]	5642507	5650926	5649908
Ubicación UTM E [m]	261528	256283	738701
No. de observaciones	4092	4092	4030
No. de valores perdidos	218	412	319
Mínimo (m <sup>3</sup> /s)	16.8	4.4	76.3
Máximo (m <sup>3</sup> /s)	1224.0	467.0	861.0
Amplitud (m <sup>3</sup> /s)	1207.2	462.6	784.7
Mediana (m <sup>3</sup> /s)	87.3	22.2	233.0
Media (m <sup>3</sup> /s)	115.5	30.4	260.5
Varianza (n-1)	11554.3	978.1	23860.6
Coeficiente de variación	0.9	1.0	0.6
Asimetría (Pearson)	3.1	4.0	1.2
Curtosis (Pearson)	14.9	29.8	1.1
Límite inferior de la media (95%) (m <sup>3</sup> /s)	112.1	29.4	255.6
Límite superior de la media (95%) (m <sup>3</sup> /s)	118.8	31.4	265.5

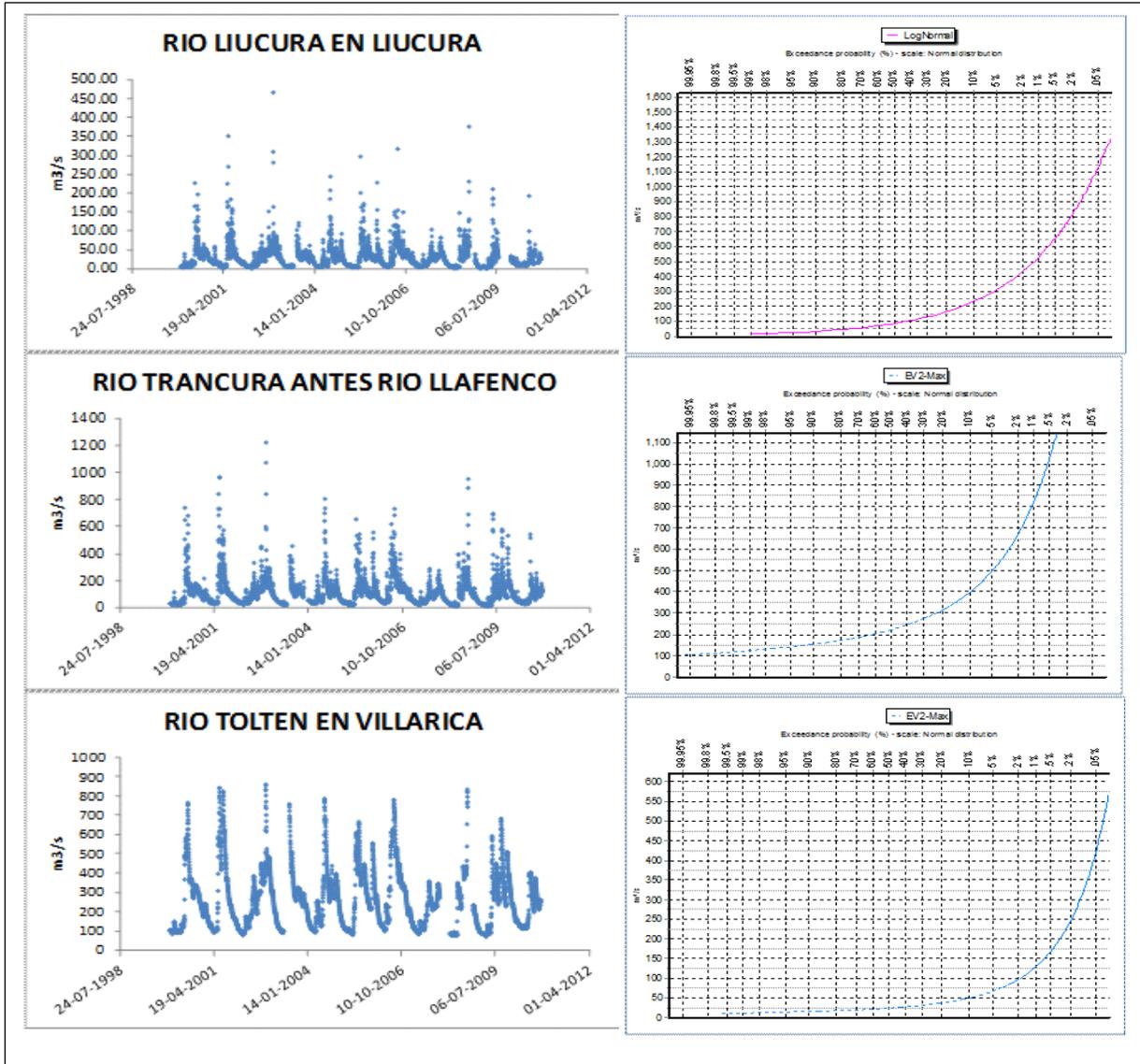


Figura 7. Hidrogramas ( $m^3/s$ ) y sus funciones de probabilidad para las estaciones Río Llafenco, Río Liucura en Liucura y Río Tolten en Villarrica.

### Análisis datos de Calidad de Agua (nutrientes).

En relación a los nutrientes Nitrógeno y Fósforo Total en mg/l, se analizaron los datos desde el año 1986 a 2010 de la Dirección General de Aguas para la estación Río Pucón en Balseadero Quelhue. En esta estación se analizaron 83 registros (Tabla 14), con una media de 0.086 mg de N total y 0.593 mg/l de F total. Los valores máximos corresponden a 0.235 y 4.025 respectivamente. Su distribución no presentó normalidad (Figura 8). La distribución de fósforo presenta mayores variaciones y pulsos que para el caso del nitrógeno.

Tabla 14. Estadística descriptiva de N y P total de estaciones Río Pucón en Balseadero Quelhue.

	Río Pucón en Balsa Quelhue	
	N tot mg/l	P tot mg/l
<b>N° de casos</b>	83	76
<b>Mínimo</b>	0.062	0.006
<b>Máximo</b>	0.235	4.025
<b>Media</b>	0.086	0.593
<b>Error estándar</b>	0.003	0.126
<b>Intervalo inferior de confianza</b>	0.08	0.343
<b>Intervalos superior de confianza</b>	0.093	0.843
<b>Desviación Estándar</b>	0.03	1.095
<b>Varianza</b>	0.001	1.199
<b>Skewness(G1)</b>	2.717	1.926
<b>Curtosis(G2)</b>	8.647	2.354
<b>Normalidad</b>	<0.01	<0.01
Percentil 0.1	0.068	0.012
Percentil 0.2	0.068	0.031
Percentil 0.3	0.068	0.047
Percentil 0.4	0.072	0.055
Percentil 0.5	0.075	0.070
Percentil 0.6	0.081	0.086
Percentil 0.7	0.088	0.186
Percentil 0.8	0.095	0.753
Percentil 0.9	0.114	2.623
Percentil 1	0.235	4.025

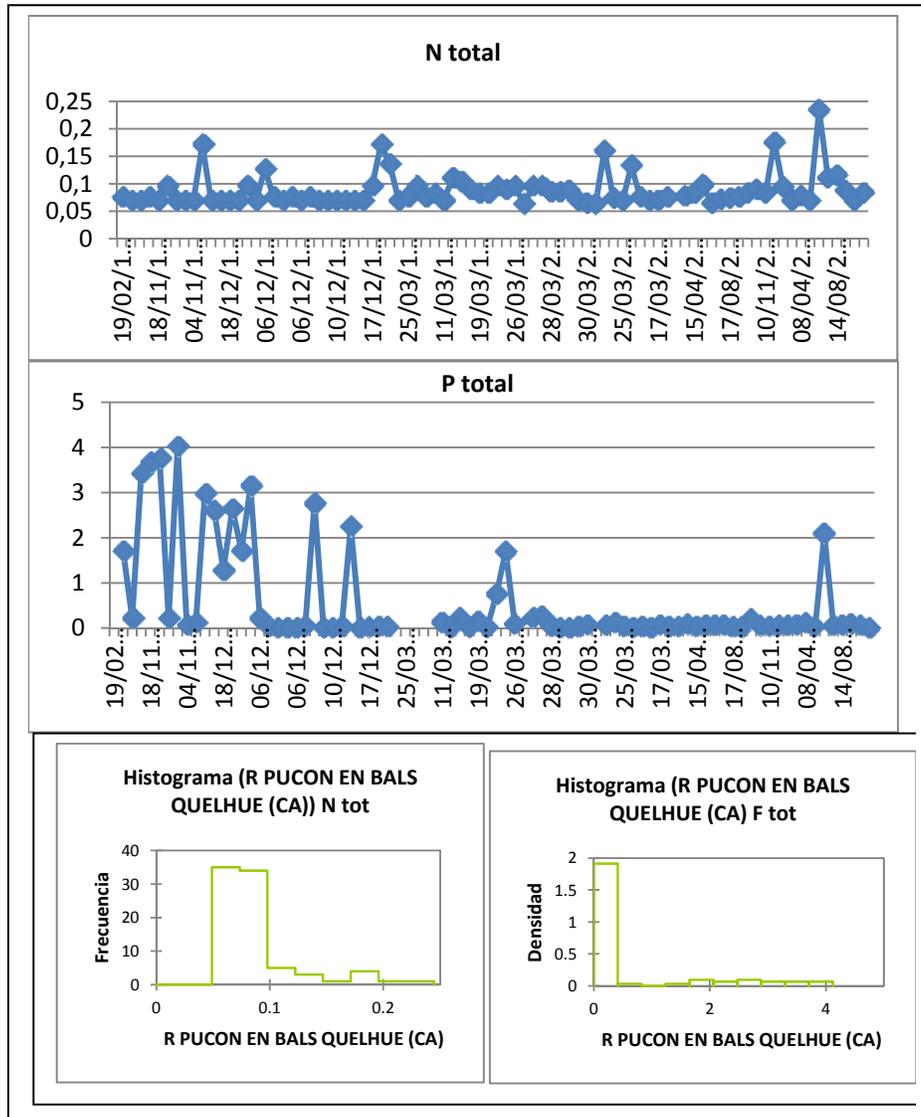


Figura 8. Distribución e Histograma de Nitrógeno y Fósforo total de estaciones Río Pucón en Balseadero Quelhue, Río Toltén en Villarrica y la Poza.

**Objetivo 2. Implementar y calibrar un modelo hidrológico que incorpore un Sistema de información geográfica (SIG), para predecir los impactos del manejo del suelo y la vegetación en el aporte de agua y nutrientes, considerando las principales subcuencas aportantes al lago Villarrica.**

### **Simulación Hidrológica de la cuenca del Río Renaico.**

#### **Selección del Modelo de Simulación Hidrológica.**

La selección de un modelo específico, por lo general, se basa en las preferencias del hidrólogo (de acuerdo al modelo con que se encuentra más familiarizado), en los objetivos buscados (alcances de la investigación), la naturaleza, cantidad y calidad de los datos disponibles y los supuestos requeridos.

De los múltiples modelos de simulación hidrológica existentes se han seleccionado tres de éstos, con la finalidad de compararlos y seleccionar aquel más adecuado a utilizar en la cuenca en estudio, dados los objetivos de este proyecto.

La Tabla 15 detalla los diferentes criterios que fueron considerados al momento de seleccionar el modelo de simulación hidrológica a emplear, ello en base a Stehr (2008) e información recopilada de manuales de uso de los diversos modelos analizados e investigaciones aplicadas.

Tabla 15. Resumen de criterios considerados durante la selección del modelo.

Criterios	HEC-HMS	HSPF	SWAT
<b>Características</b>			
Apropiado a tamaño de cuencas hidrográficas	x	x	x
Incluye aspectos de gestión y agricultura		x	x
Incluye proceso en el curso de agua		x	simplificado
Interacción agua superficial/ subterránea	medio	medio	medio
<b>Utilización / herramienta toma de decisiones</b>			
Utilización frecuente			x
<b>Aplicabilidad</b>			
Disponibilidad (gratuita)	x	x	x
Código abierto		x	x
Manual extensivo	x	x	x
Foro en Internet			x
Soporte gratuito			x
Uso amigable	x		x
Interfaz SIG	x		x

### **Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool).**

A partir de los criterios considerados en la Tabla 15 y el proceso de selección del modelo, se concluyó que el modelo SWAT (Interfaz ArcSWAT) es aquel que se adapta a las necesidades requeridas por este estudio y ha sido exitosamente aplicado en cuencas sudamericanas (Yarrow & Chambel-Leitao 2007, Guzmán et al. 2004, Proaño et al. 2006, Silva 2004), presentando importantes funcionalidades a la escala de trabajo requerida, debido a:

- Que constituye una herramienta de fácil acceso y bien documentada.
- La existencia de adecuados manuales y de una interfaz gráfica ArcSWAT que facilita su utilización como herramienta en la toma de decisiones.
- El modelo es computacionalmente eficiente para operar en meso y macrocuencas en un tiempo de operación razonable.
- El modelo permite, en primera instancia modelar hidrológicamente y luego extender la simulación a aspectos como calidad de agua.
- Numerosos grupos de investigación a nivel mundial utilizan este modelo, lo que ha contribuido al desarrollo y perfeccionamiento del mismo.

- El modelo seleccionado ofrece distintos métodos para el cálculo de la evapotranspiración y la escorrentía superficial, cada una con distintos requerimientos en cuanto a la cantidad de datos de entrada requeridos. Lo que permite adaptar de mejor forma el modelo a las condiciones de datos hidrológicos, meteorológicos y fluviométricos existentes en Chile, comúnmente disponibles sólo a nivel diario.

### **ConFiguración del Modelo.**

La cuenca hidrográfica generada por el modelo tiene un área de 247.027 há y como primer paso en la configuración del modelo de simulación hidrológica se generaron automáticamente las unidades requeridas para el cálculo del balance hídrico (unidades de respuesta hidrológica o HRUs), con este fin, la red hídrica de la cuenca alta del Lago Villarrica fue extraída del modelo de elevación digital (DEM) por medio de técnicas analíticas estándares incluidas en la interfaz gráfica ArcSWAT (ArcGIS 9.3), de esta forma se delimitó un total de 9 subcuencas (incluidos los puntos de aforo que la Dirección General de Aguas ha establecido en la cuenca) como se muestra en la Figura 9.

Para la delimitación de la cuenca en estudio, se utilizó como área mínima de cálculo para el modelo un tamaño de grilla de 50 x 50 m de resolución espacial, ya que esta área generó una adecuada razón entre nivel de detalle/tiempo de cálculo empleado.

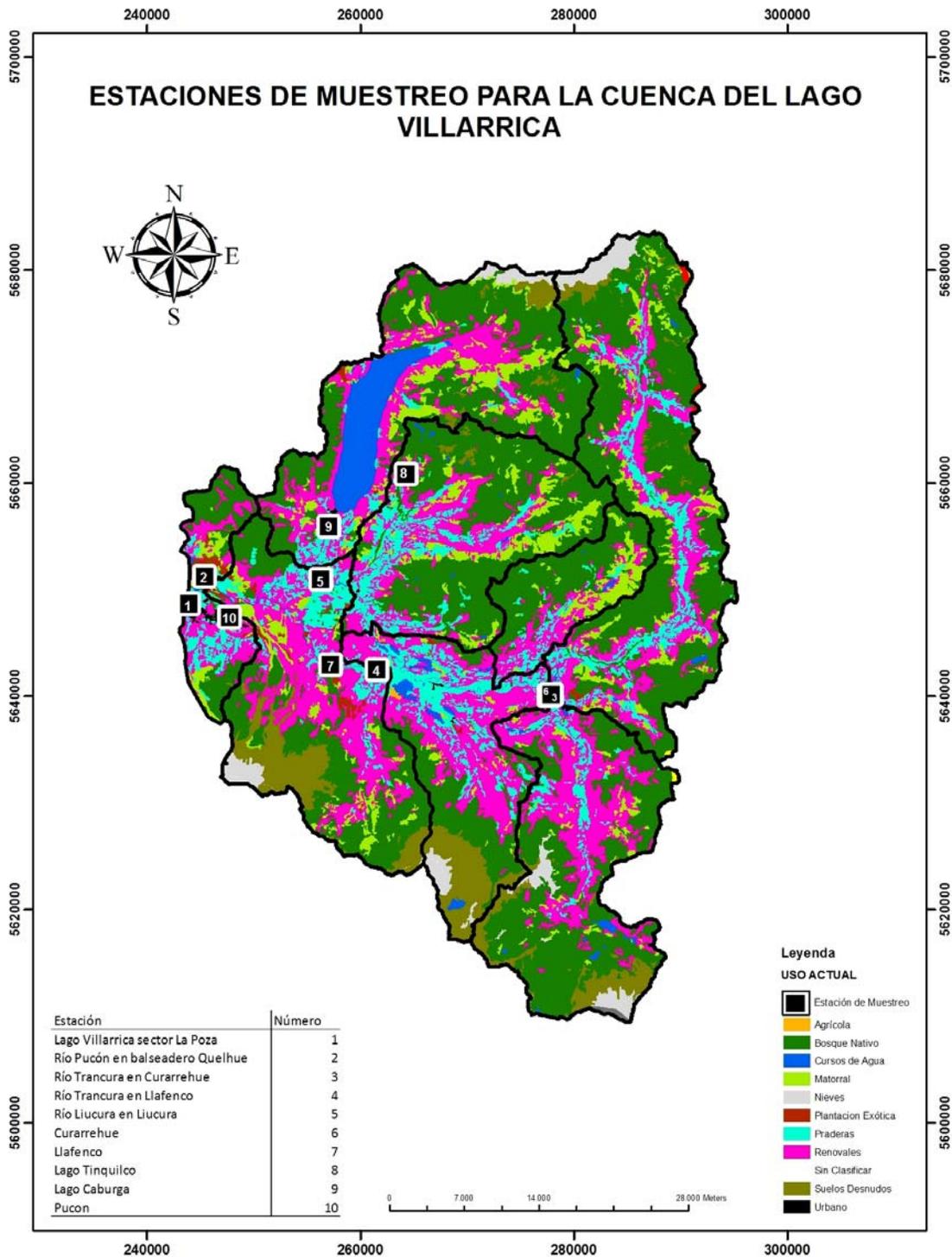


Figura 9. Mapa de distribución de las subcuencas aportantes al Lago Villarrica.

Respecto a las series (tipos) de suelo presentes en la cuenca alta del Lago Villarrica la distribución de éstas se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Distribución de superficies de tipo de suelo total subcuencas aportantes al Lago Villarrica.

Tipo de suelo	Área (ha)	Área (%)
Asociación Caburga	106.690	43,0
Misceláneos	40.610	16,4
Terrazas aluviales	9.796	3,9
No Suelos	7.188	2,9
Asociación Los Nevados	83.740	33,8

La Tabla anterior muestra que las series de suelo que predominan en las cuencas aportantes al Lago Villarrica son los suelos de la serie Caburga seguido de la Asociación Los Nevados. Estos suelos corresponden a la familia de los suelos Andisoles, específicamente los suelos de la serie Caburga (CBG) se ubican en la zona de la Cordillera Andina en altura de entre 600 y 1.400 msnm, son suelos profundos desarrollados a partir de cenizas volcánicas. De textura superficial franco limosa, permeabilidad moderada y topografía de montañas con pendientes de 30 a 50%. Respecto a los suelos de la Asociación Los Nevados tienen similares características puesto que también provienen de cenizas volcánicas, corresponden a suelos moderadamente profundos que se ubican en la zona de la Cordillera Andina a alturas de entre 900 a 1.200 msnm. Presentan una textura superficial franco arenosa y substrato de gravas escoriales. Estos suelos tienen topografía de cerros con pendientes dominantes de 30 a 50%, permeabilidad moderadamente rápida y drenaje excesivo (CIREN, 2002).

Para la etapa de calibración y la posterior validación del modelo, las divisiones de las subcuencas generadas por el modelo y las características edafológicas (Tabla 16 y Figura 10) del sistema se mantuvieron inalteradas. En cambio, las coberturas de uso de suelo fueron modificadas cada vez que se generaron simulaciones para los nuevos escenarios (Escenario actual, favorable y desfavorable). Tal como se describió en la Tabla 5, las categorías de uso de suelo debieron ser modificadas y adaptadas tanto a clases de "tipo de uso/cobertura del

suelo" contenidas en las bases de datos del modelo SWAT -ello debido a la falta de valores locales para parámetros que describan las características hidrológicas de las diferentes categorías de uso de suelo requeridos por el modelo- como aquellas clases de uso de suelo generadas mediante recopilación bibliográfica por este estudio (Tabla 6).

### **A) Calibración del Modelo SWAT- módulo hidrológico en la cuenca del Lago Villarrica**

Para el desarrollo de la calibración del modelo hidrológico se ha empleado como cobertura de uso de suelo la información contenida en el Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales de Chile, región de La Araucanía (CONAF *et al.*, 2007) al año 2007.

A continuación la Tabla 17 y la Figura 11 muestran la distribución de los usos de suelo en la cuenca del Lago Villarrica para el año 2007.

Tabla 17. Distribución de superficies de categorías de uso/cobertura de suelo para el 2007 en la cuenca alta del Lago Villarrica.

Categoría Uso de Suelo	Área (há)	Área (%)
Agrícola	69,3	0.1
Bosque Nativo	107.502,7	43.5
Cursos de Agua	7.355,5	3.0
Matorral	20.302,1	8.2
Nieves	5.501,5	2.2
Plantación Exótica	1.873,4	0.8
Praderas	25.961,2	10.5
Renovales	63.033,1	25.5
Sin Clasificar	34,7	0.0
Suelos Desnudos	14.789,7	6.0
Urbano	604,1	0.2
<b>CUENCA TOTAL</b>	<b>247.027</b>	<b>100</b>

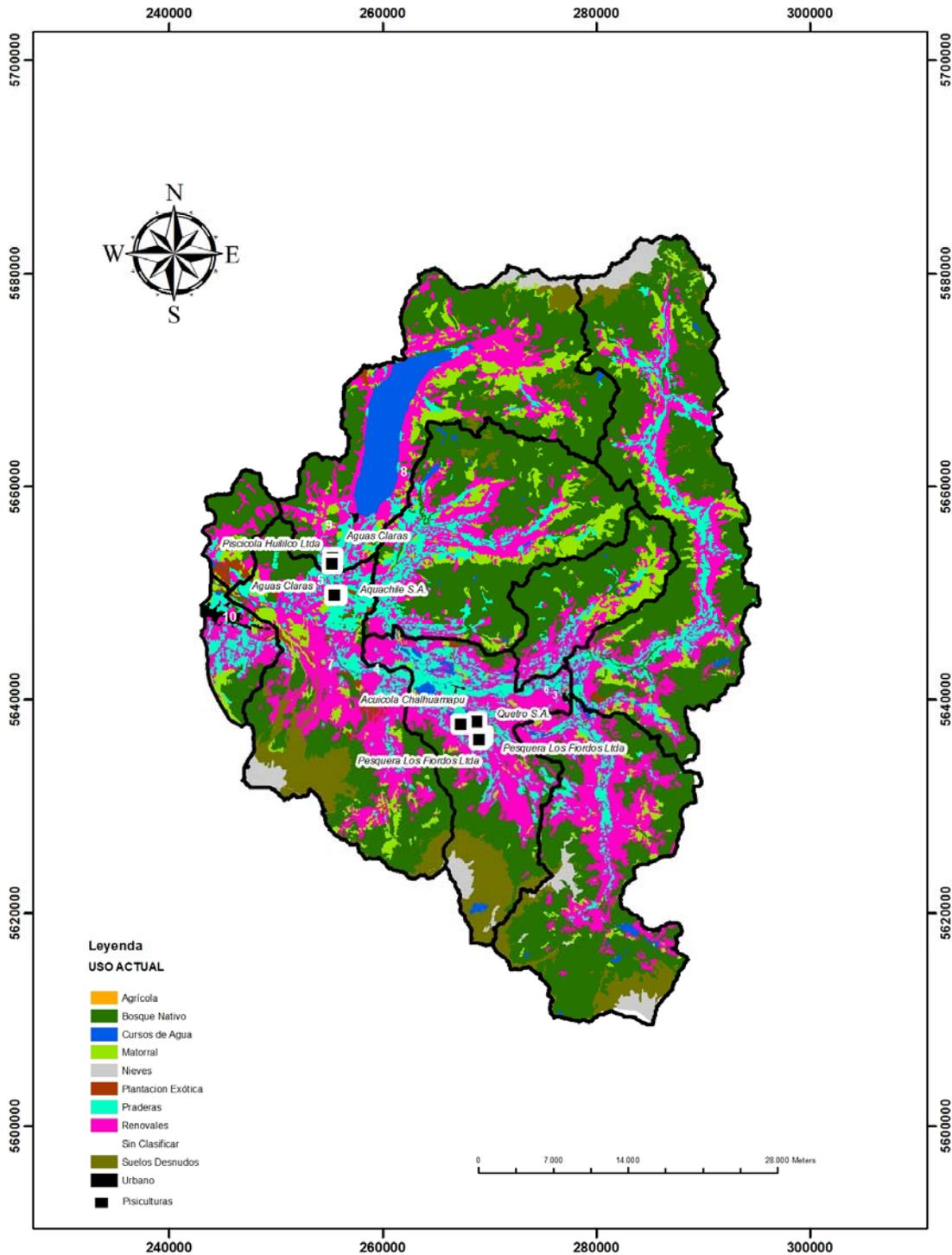


Figura 11. Carta de distribución de uso de suelo en cuenca alta Lago Villarrica al año 2007.

Al analizar los usos de suelo predominante en la cuenca alta del Lago Villarrica se observa que un 43% corresponde a bosque nativo adulto, principalmente en la zona alta de las subcuencas principalmente Maichín, Trancura y Caburga. En cambio las cuencas de Pucón y Palguin son aquellas que presentan mayor extensión de renovales y praderas. Las subcuencas de Palguin y Quelhue son las únicas que muestran al año 2007 plantaciones con especies exóticas de rápido crecimiento, principalmente *Eucalyptus spp.*

Con la integración de la información de tipo y uso de suelo, se generaron 75 Unidades de Respuesta Hidrológica, éstas son combinaciones únicas de uso/tipo de suelo dentro de las subcuencas.

### **Calibración del modelo SWAT.**

El modelo SWAT incluye un amplio número de parámetros los cuales describen las diferentes condiciones y características hidrológicas de la cuenca en estudio.

Durante el proceso de calibración, los parámetros empleados por el modelo fueron ajustados con la finalidad de que los resultados entregados por las simulaciones se correlacionen mejor con las descargas medidas en terreno (puntos de control-estaciones fluviométricas). El rango de valores de cada parámetro usado en el proceso de calibración debe ser físicamente plausible (Eckhardt et al. 2005), de esta forma, el modelo puede ser aplicado posteriormente en etapas de evaluación del impacto de escenarios de cambio y/o diferentes opciones de manejo del suelo.

Las series de datos de caudales medios mensuales provienen de 3 estaciones fluviométricas (Figura 4) localizadas en el área en estudio (Río Trancura en Curarrehue, Río Trancura en Llafenco y Río Liucura en Liucura), estos registros fueron empleados con propósitos de calibración y posterior validación del modelo, procesos que fueron evaluados por medio de simulaciones a nivel mensual.

Previo a la calibración del modelo, fue ejecutado un Análisis de Sensibilidad para cada punto de control, determinando 7 parámetros a los cuales los resultados del modelo son más sensibles, los cuales fueron posteriormente ajustados en la etapa de calibración.

El modelo SWAT determina el ranking de parámetros más sensibles, empleando un LH-OAT (Latin Hypercube Sampling-One at A Time) incorporado desde la versión 2003 del modelo (Van Griensven et al. 2006).

### **Análisis de Sensibilidad.**

El análisis de sensibilidad realizado (Tabla 18) para estudiar los efectos de varios parámetros en la escorrentía, muestra que el Número de Curva (CN\_2), la cantidad de agua necesaria en el subsuelo para que se produzca flujo de retorno (GWQMN) y la fracción de percolación del acuífero profundo (rchrg\_dp) son los tres parámetros más sensibles y con mayor influencia en la regulación de los caudales generados en la cuenca en estudio.

De esta forma, como lo indica el análisis, ambos puntos de control muestran una alta sensibilidad de los resultados a parámetros como el Número de Curva. Por lo anterior, se hace necesario mayores investigaciones con el fin de desarrollar bases de datos locales (nacionales y regionales) para parámetros como éste, ello mediante una combinación de datos medidos localmente (empíricos) y los resultados de la aplicación de modelaciones, que en conjunto puedan mejorar los ajustes del modelo y hacerlo aplicable mayores propósitos prácticos. Especial énfasis se debe dar a la información edafológica, que en el caso de Chile ha sido documentada a nivel regional por el Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN), sin embargo, aún existen escasos antecedentes locales para algunos tipos de suelo menos estudiados y más aún, la actual descripción de los suelos presenta información restringida respecto a propiedades físicas de éstos tales como conductividad hidráulica o capacidad de agua disponible, parámetros frecuentemente

utilizados por los distintos modelos hidrológicos (Yarrow & Chambel- Leitaó 2007; Stehr 2008).

Tabla 18. Ranking de parámetros más sensibles (1= más sensible).

Parámetro	Descripción	Río Trancura /Curarrehue	Río Trancura /Llafenco	Río Liucura /Liucura
CN2	Número de Curva	1	1	2
GWQMN	Cantidad de agua necesaria en el subsuelo para que se produzca flujo de retorno.	2	2	1
rchrg_dp	Fracción de percolación del acuífero profundo.	3	3	3
sol_awc	Cantidad de agua disponible en el suelo (para consumo de vegetales).	4	5	5
sol_z	Profundidad del suelo.	5	4	4
GW_REVAP	Coefficiente de revaporización del agua del subsuelo.	6	6	6
ESCO	Coefficiente de compensación de la evaporación del suelo.	7	7	7

La exactitud de los resultados de la modelación realizada fue evaluada en tres puntos de control de acuerdo a la disponibilidad de información de caudales medidos en la cuenca. Esta evaluación se llevó a cabo por medio de diferentes indicadores estadísticos ( $R^2$ , PBIAS y EF) y por la interpretación visual de las series temporales de caudales medidos versus caudales simulados, tanto para los períodos de calibración como de validación.

## **Calibración del modelo SWAT en la cuenca alta del Lago Villarrica (Uso de suelo año 2007).**

Para efectuar la calibración del modelo, se procedió a realizar aproximadamente 300 simulaciones, variando los parámetros más sensibles determinados con las herramientas de SWAT. Esta etapa de calibración permitió obtener adecuados ajustes entre caudales simulados y medidos, utilizando como criterios de evaluación de calidad indicadores estadísticos y el ajuste a las curvas de descarga medidas.

Para el período de calibración el modelo fue conFigurado en base a datos meteorológicos diarios desde el año 2000 al 2006. Los primeros dos años del período de modelación no son considerados en los análisis estadísticos ya que fueron reservados como etapa de preparación del modelo (model warm-up).

Los resultados obtenidos durante este proceso se muestran en las Figuras 12 y 13 para la estación de Río Trancura en Curarrehue, en las Figuras 14 y 15 para la estación Río Trancura en Llafenco y en las Figuras 16 y 17 los resultados de la calibración en el punto de aforo Río Liucura en Liucura.

A partir del análisis visual de las gráficas (Figuras 12, 14 y 16) se observa que para las tres estaciones fluviométricas consideradas los caudales simulados se aproximan a los caudales medidos en los puntos de control. Sin embargo, en general, los caudales punta son subestimados por el modelo, de las tres estaciones aquella que presenta mayor ajuste entre caudales simulados y medidos corresponde a Río Liucura en Liucura, lo cual puede ser atribuido a la menor cantidad de datos faltantes en esta base precipitaciones diarias para la serie de tiempo analizada. Los gráficos muestran además que la estación con menor ajuste entre caudales simulados y medidos corresponde a Trancura en Curarrehue, el comportamiento menos preciso del modelo en esta estación (pero dentro de los rangos de ajuste satisfactorios) se debe a que las subcuencas aportante (Trancura y Maichín) corresponden a cuencas cordilleranas donde existe escasa representatividad de estaciones

meteorológicas disponibles en el área, a ello se suma el régimen nivo-pluvial de estas subcuencas, debiendo considerar que el modelo empleado requiere mediciones nivales para calibrar de forma adecuada el módulo de derretimiento de nieves, explicando así el menor ajuste mostrado.

Los indicadores estadísticos seleccionados para evaluar la calidad de la modelación (Tablas 19, 20 y 21) muestran que el mejor ajuste corresponde a la estación Río Liucura en Liucura con un Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) e Índice de Eficiencia de la modelación de Nash-Sutcliffe (EF) cercanos a 0,9 y una desviación entre los valores simulados y los medidos de sólo un 4%. Para la estación Río Trancura en Curarrehue los valores de dichos indicadores son relativamente menores (cerca de 0,7), es decir existe un menor ajuste entre caudales simulados y medidos, de igual forma, el indicador PBIAS señala una desviación del 17,3% en el ajuste entre la simulación y los datos medidos.

En general, los resultados obtenidos indican que para ambas estaciones fluviométricas los caudales simulados se ajustan satisfactoriamente a los caudales medidos. Según criterios mencionados por Van Liew et al. (2005), la etapa de calibración muestra un muy buen ajuste y adecuado comportamiento del modelo, con EF superior a 0,75 y PBIAS menor a 20%.

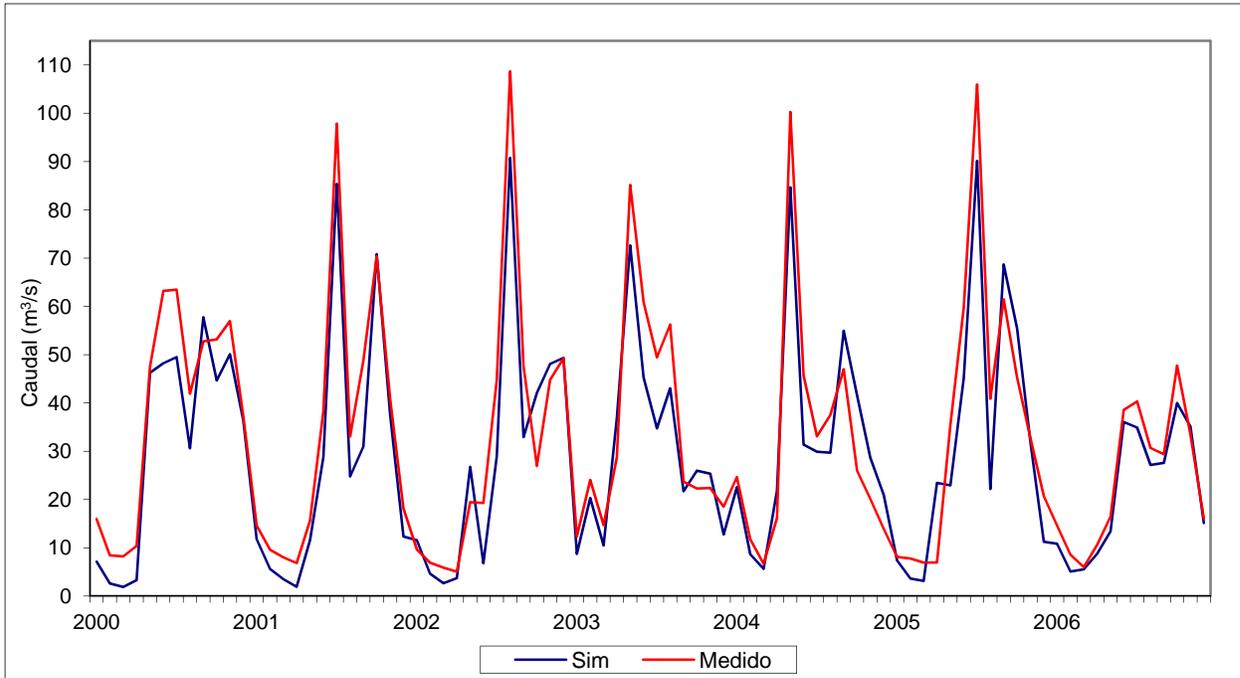


Figura 12. Calibración del modelo, ajustes mensuales para la estación Río Trancura en Curarrehue.

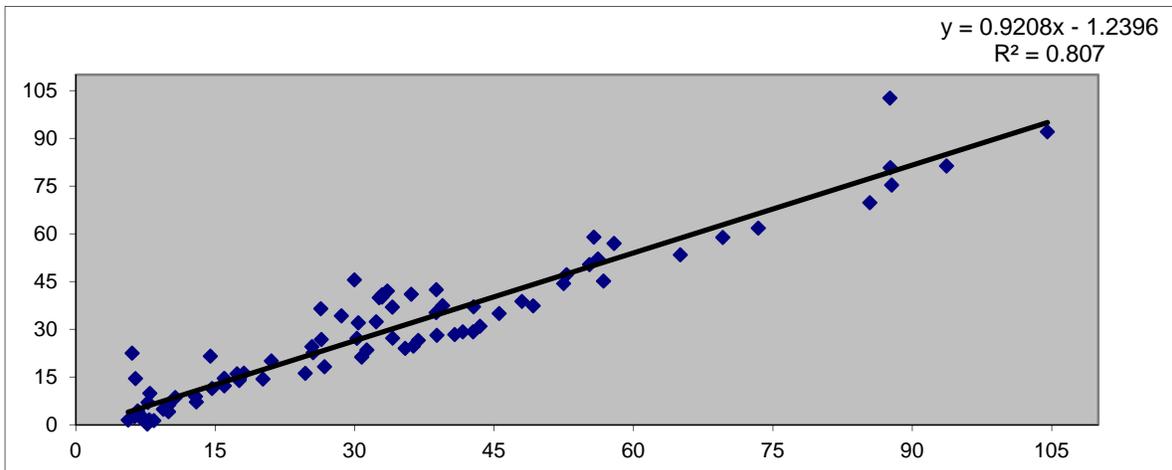


Figura 13. Calibración del modelo, regresión lineal de los resultados mensuales para la estación Río Trancura en Curarrehue.

Tabla 19. Indicadores estadísticos en calibración del modelo, calculados para la estación Río Trancura en Curarrehue.

Índice	Modelación Satisfactoria	Valor Calibración
R <sup>2</sup>	Tender a 1 (>0,75)	0,807
PBIAS	Menor a 20%	17,30%
EF	Tender a 1	0,74

En las Figuras 14 y 15 se muestran los resultados de la calibración del modelo en la estación Río Trancura en Llafenco.

Figura 14. Calibración del modelo, ajustes mensuales para la estación Río Trancura en Llafenco.

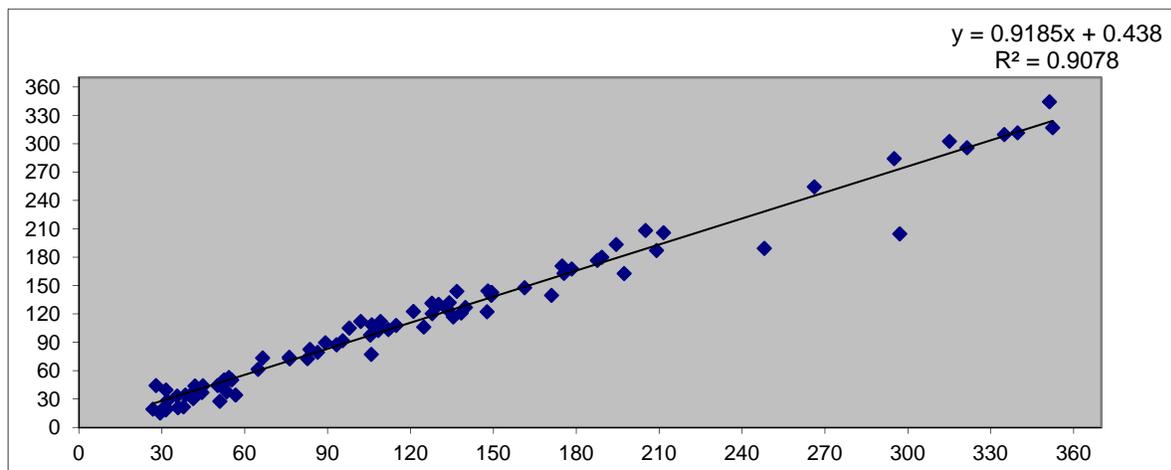
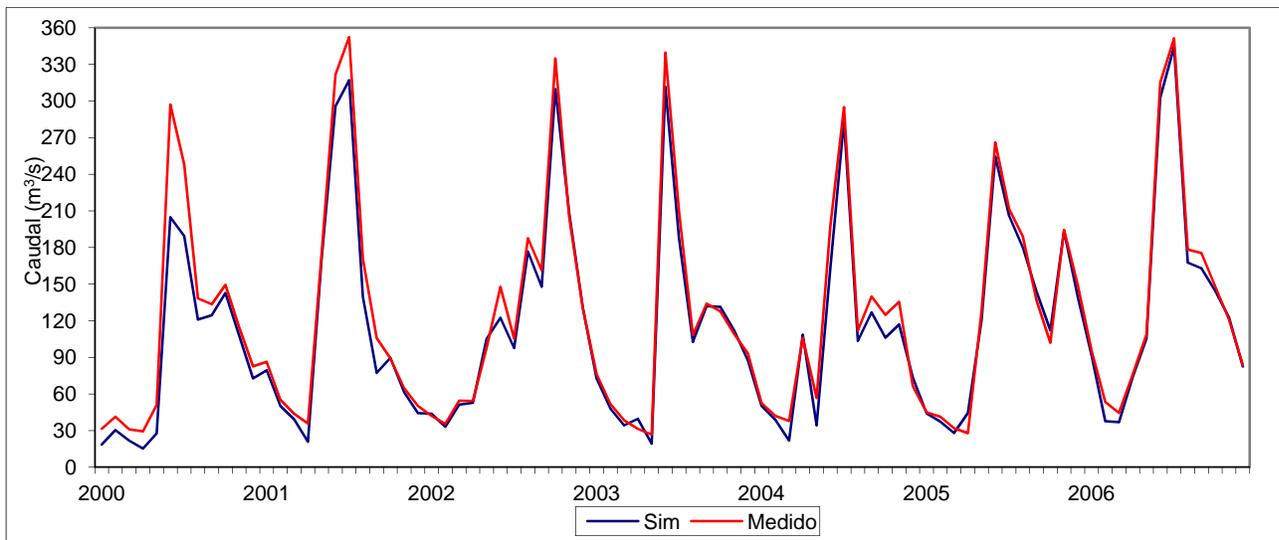


Figura 15. Calibración del modelo, regresión lineal de los resultados mensuales para la estación Río Trancura en Llafenco.

Tabla 20. Indicadores estadísticos en calibración del modelo, calculados para la estación Río Trancura en Llafenco.

Índice	Modelación Satisfactoria	Valor Calibración
R <sup>2</sup>	Tender a 1 (>0,75)	0,9078
PBIAS	Menor a 20%	2,04%
EF	Tender a 1	0,85

En las siguientes Figuras (16 y 17) se muestran los resultados de la calibración del modelo en la estación Río Liucura en Liucura.

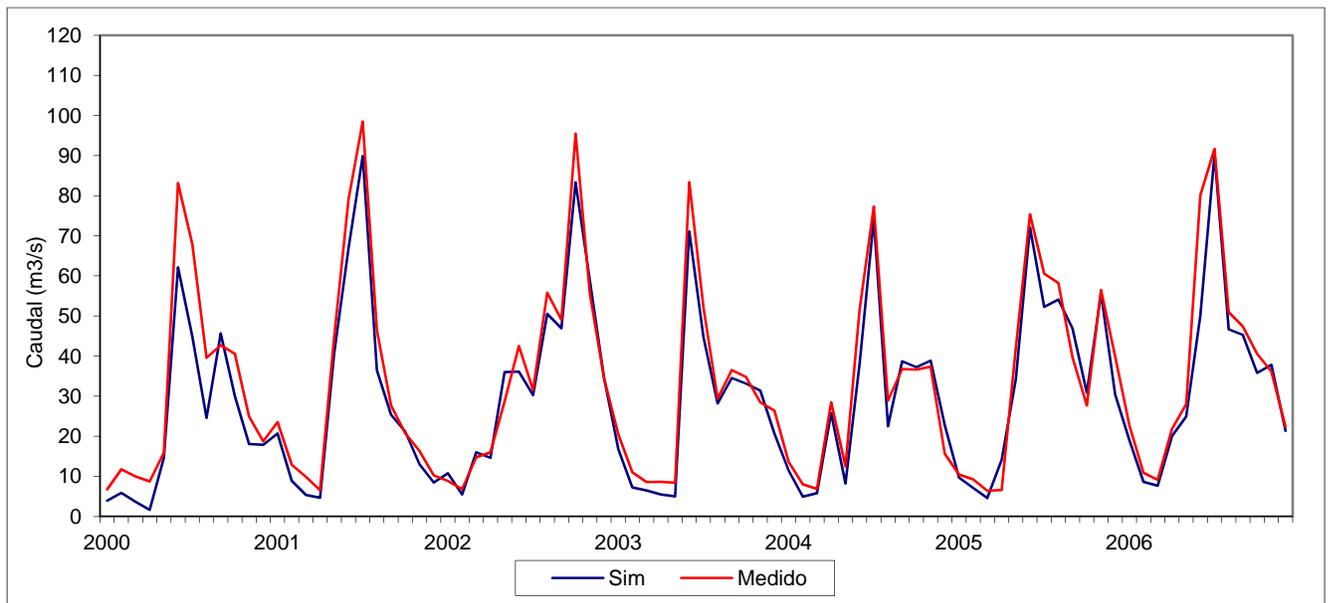


Figura 16. Calibración del modelo, ajustes mensuales para la estación Río Liucura en Liucura.

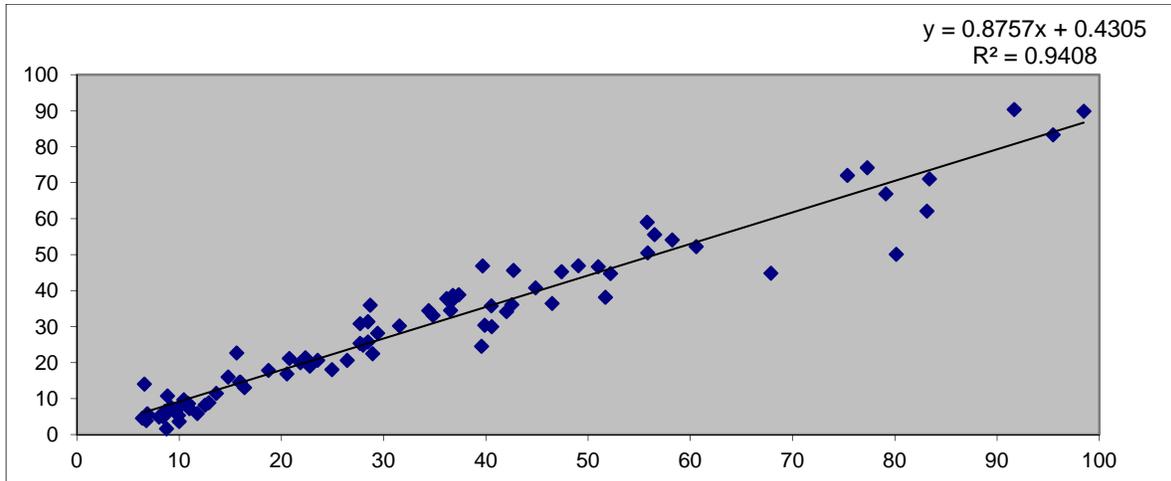


Figura 17. Calibración del modelo, regresión lineal de los resultados mensuales para la estación Río Liucura en Liucura.

Tabla 21. Indicadores estadísticos en calibración del modelo, calculados para la estación Río Liucura en Liucura.

Índice	Modelación Satisfactoria	Valor Calibración
R <sup>2</sup>	Tender a 1 (>0,75)	0,9408
PBIAS	Menor a 20%	4,17%
EF	Tender a 1	0,91

### Validación del modelo SWAT en la cuenca alta del Lago Villarrica (Uso de suelo año 2007).

Luego de calibrado el modelo SWAT para la cuenca alta del Lago Villarrica con un adecuado ajuste entre caudales simulados y medidos, se procedió a validar este modelo para un periodo de tiempo diferente al utilizado durante la etapa de calibración. En este caso la serie de tiempo empleada corresponde a los caudales medios mensuales de las 3 estaciones fluviométricas analizadas en la etapa de calibración empleando una data desde el año 2007 al año 2010.

Por medio de la interpretación visual de las gráficas (Figuras 18, 20 y 22), se observa que, al igual que en el período de calibración, se presenta un ajuste satisfactorio entre caudales simulados y medidos, sin embargo, se muestran también subestimaciones de los caudales

máximos. Unido a ello se observa un mayor ajuste para todas las estaciones en la etapa de validación del modelo en comparación a la etapa de calibración. Se debe considerar que el primer año de cada una de las gráficas corresponde al período de "warm-up" del modelo por lo tanto estos valores no son considerados en el cálculo de los estadísticos de ajuste. El mejor ajuste en la etapa de validación puede ser atribuido a que en este período no se presentan tantos episodios de caudales extremos (tasas de descarga extrema) como si ocurrió durante la calibración.

Al analizar el período de validación se observa nuevamente, que el mejor ajuste de la modelación fue obtenido en la estación Liucura en Liucura donde el Coeficiente de Determinación alcanzó un valor de 0,97 y el Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF) fue de 0,98, ambos valores son considerados como un "buen" ajuste entre caudales simulados y medidos; en el caso del indicador PBIAS este valor nuevamente no superó el 3%, demostrando una escasa desviación entre las mediciones y simulaciones. Los ajustes obtenidos durante esta etapa de validación fueron aún superiores a los observados durante la calibración.

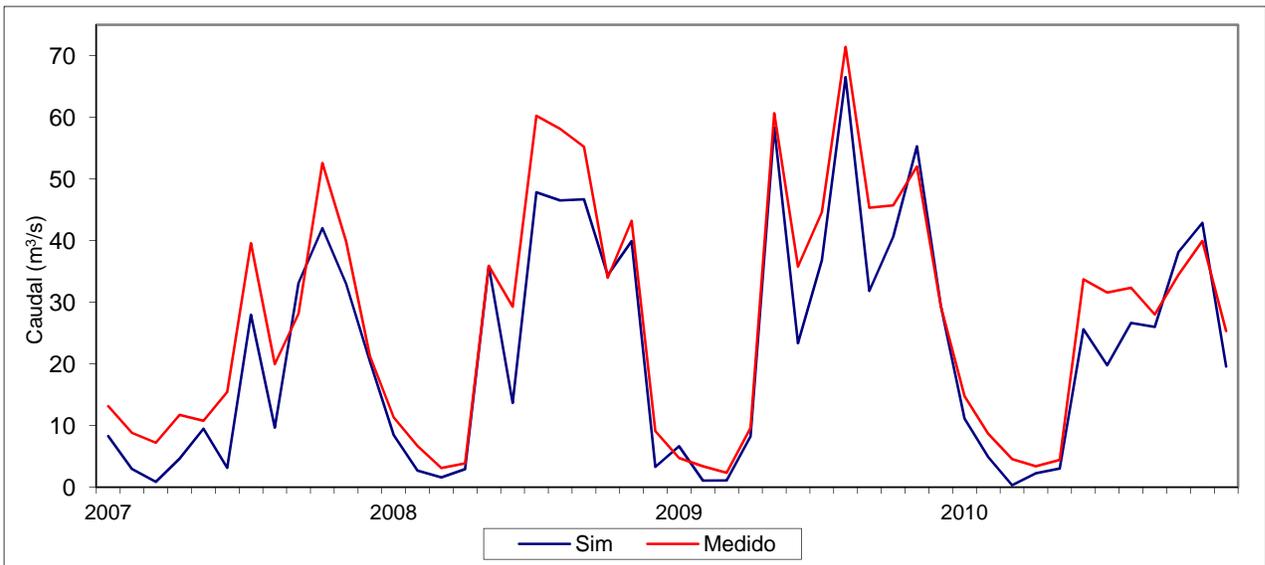


Figura 18. Validación del modelo, ajustes mensuales para la estación Río Trancura en Curarrehue

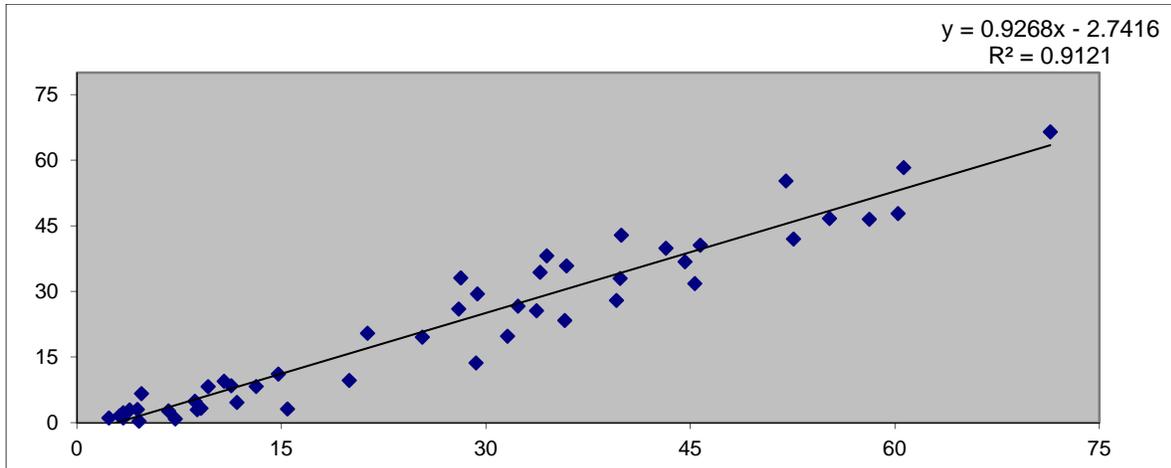


Figura 19. Validación del modelo, regresión lineal de los resultados mensuales para la estación Río Trancura en Curarrehue.

Tabla 22. Indicadores estadísticos en validación del modelo, calculados para la estación Río Trancura en Curarrehue.

Índice	Modelación Satisfactoria	Valor Calibración
R <sup>2</sup>	Tender a 1 (>0,75)	0,9121
PBIAS	Menor a 20%	9,14%
EF	Tender a 1	0,92

Ahora, los resultados para la etapa de validación del modelo en la estación Río Trancura en Llafenco se muestran a continuación.

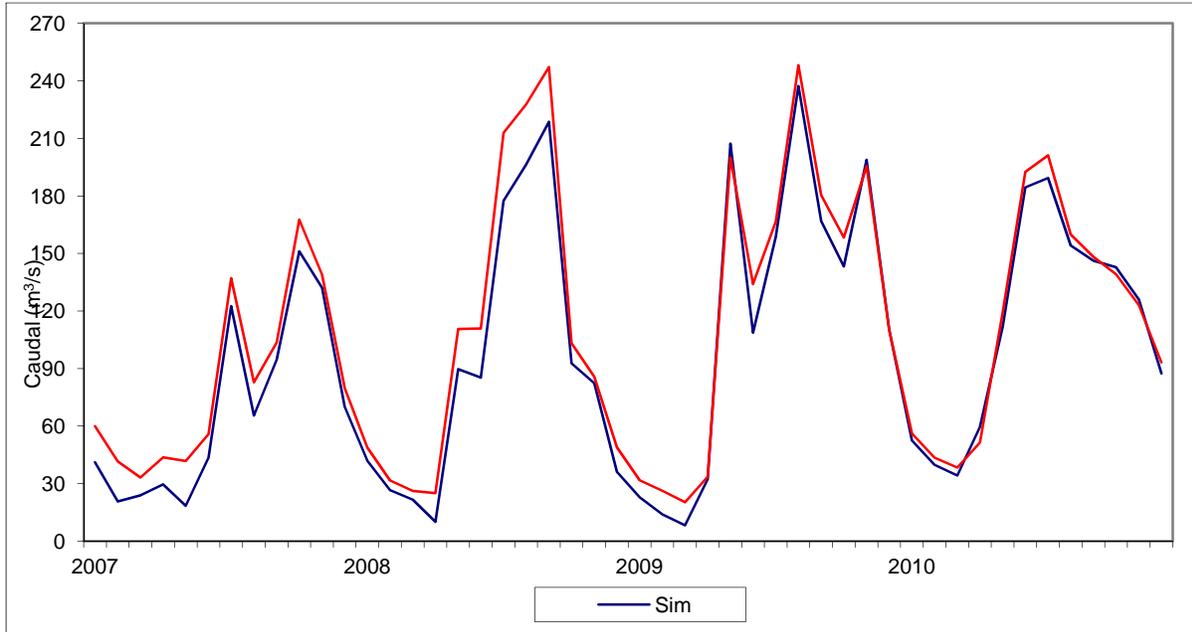


Figura 20. Validación del modelo, ajustes mensuales para la estación Río Trancura en Llafenco.

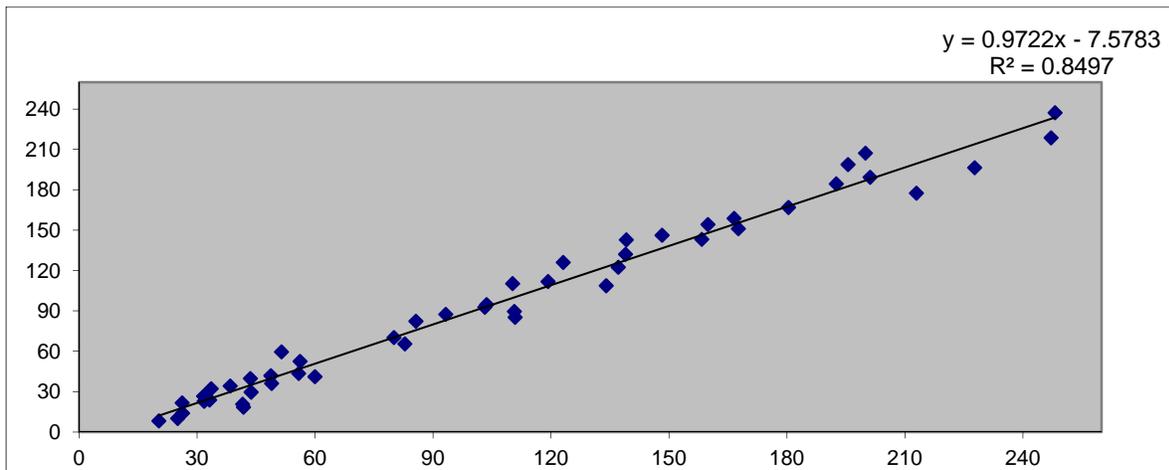


Figura 21. Validación del modelo, regresión lineal de los resultados mensuales para la estación Río Trancura en Llafenco.

Tabla 23. Indicadores estadísticos en validación del modelo, calculados para la estación Río Trancura en Llafenco.

Índice	Modelación Satisfactoria	Valor Calibración
R <sup>2</sup>	Tender a 1 (>0,75)	0,8497
PBIAS	Menor a 20%	9,12%
EF	Tender a 1	0,72

A continuación se muestran los resultados para la etapa de validación del modelo en la estación Río Liucura en Liucura.

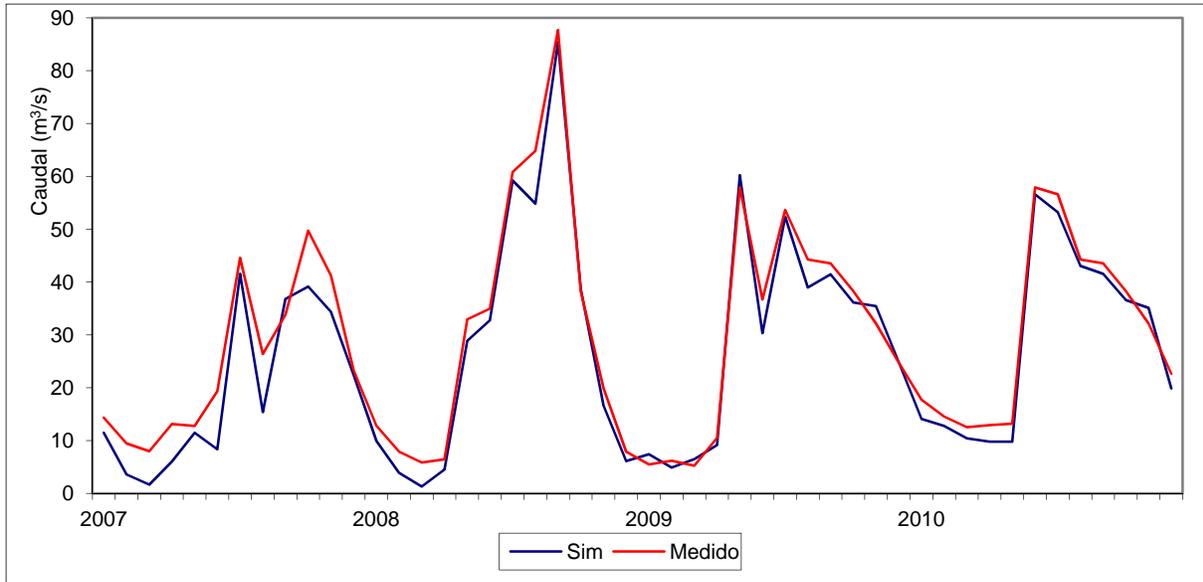


Figura 22. Validación del modelo, ajustes mensuales para la estación Río Liucura en Liucura.

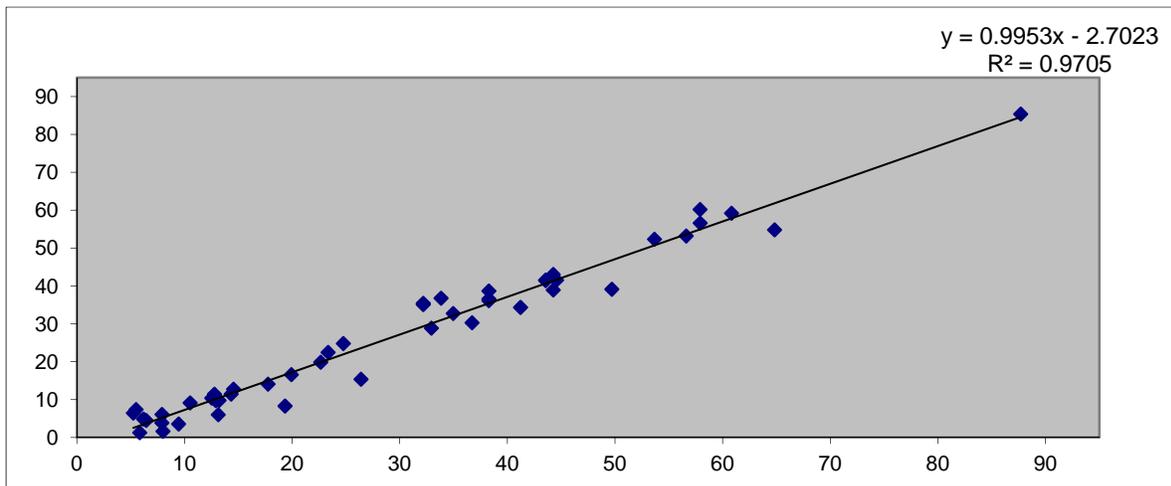


Figura 23. Validación del modelo, regresión lineal de los resultados mensuales para la estación Río Liucura en Liucura.

Tabla 24. Indicadores estadísticos en validación del modelo, calculados para la estación Río Liucura en Liucura.

Índice	Modelación Satisfactoria	Valor Calibración
R <sup>2</sup>	Tender a 1 (>0,75)	0,9705
PBIAS	Menor a 20%	1,17%
EF	Tender a 1	0,98

## Calibración y Validación del Modelo SWAT- módulo de calidad de agua, en la cuenca del Lago Villarrica.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la calibración y validación del modelo SWAT en su módulo hidrológico considerando una estación de calidad de agua que drena el agua de la cuenca alta del Lago Villarrica, siendo el afluente principal del Lago Villarrica, ésta es la estación Río Pucón en balseadero Quelhue.

En el caso de la calibración, se observa en las Figuras siguientes el adecuado ajuste entre Nitrógeno y Fosforo Total simulado y medido, con un valor de  $R^2$  superior a 0.9 de ajuste para ambos compuestos, el resto de los estadísticos analizados también muestran el comportamiento "satisfactorio" del modelo en la simulaciones de estos nutrientes para las cuencas aportantes al lago Villarrica

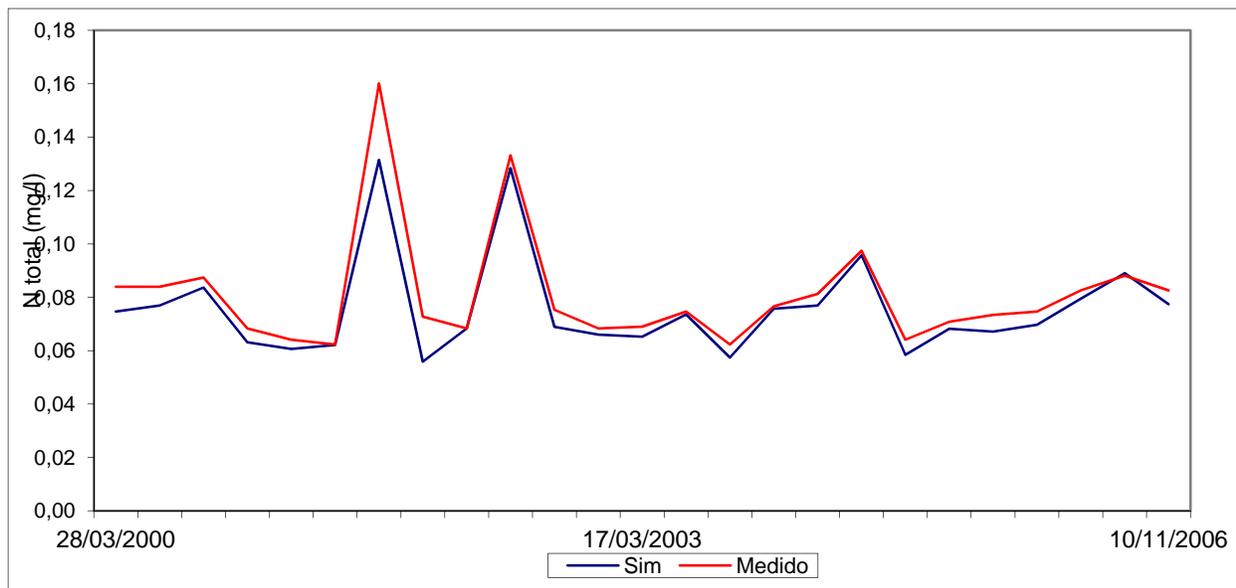


Figura 24. Calibración del modelo, ajustes estacionales Nitrógeno Total (mg/l) para la estación Río Pucón en balseadero Quelhue.

Tabla 25. Indicadores estadísticos en calibración del modelo módulo calidad de agua (Nitrógeno Total), calculados para la estación Río Pucón en balseadero Quelhue.

Índice	Modelación Satisfactoria	Valor Calibración
R <sup>2</sup>	Tender a 1 (>0,75)	0,9389
PBIAS	Menor a 20%	4,14%
EF	Tender a 1	0,90

Se muestran ahora los resultados de la calibración del módulo de calidad de agua del modelo para el parámetro Fósforo Total para la estación Río Pucón en balseadero Quelhue.

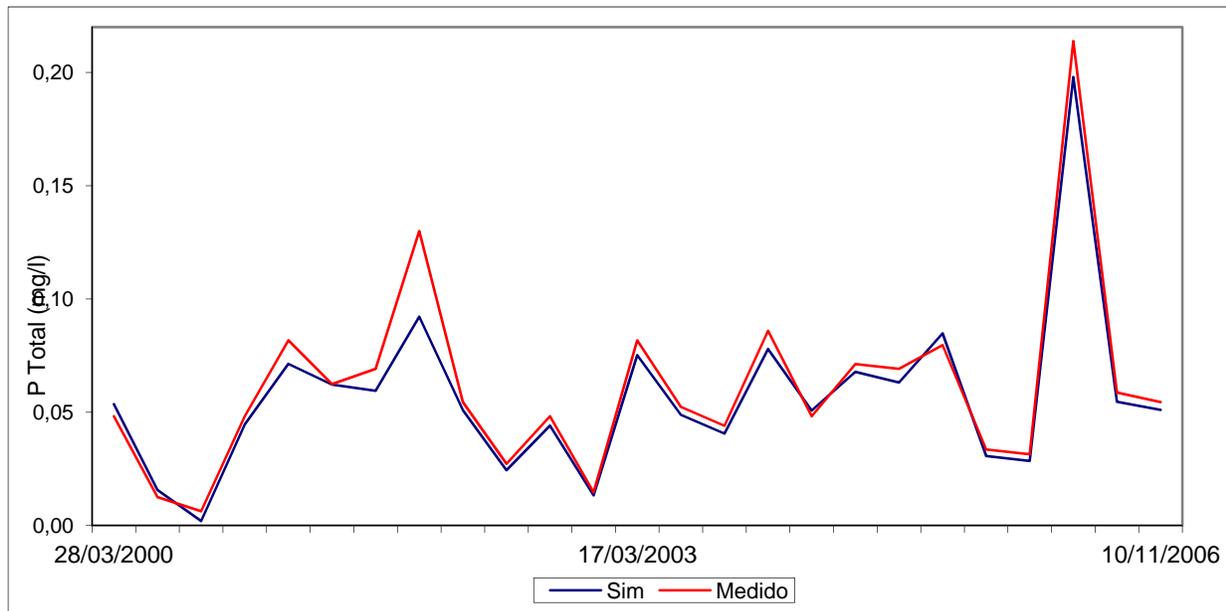


Figura 25. Calibración del modelo, ajustes estacionales Fósforo Total (mg/l) para la estación Río Pucón en balseadero Quelhue.

Tabla 26. Indicadores estadísticos en calibración del modelo módulo calidad de agua (Fósforo Total), calculados para la estación Río Pucón en balseadero Quelhue.

Índice	Modelación Satisfactoria	Valor Calibración
R <sup>2</sup>	Tender a 1 (>0,75)	0,8763
PBIAS	Menor a 20%	8,34%
EF	Tender a 1	0,85

En cuanto a la etapa de validación del modelo SWAT para la cuenca del Lago Villarrica respecto a parámetros Nitrógeno y Fósforo Total, los resultados muestran que el ajuste entre nutrientes medidos y simulados por el modelo es satisfactorio, mostrando mejores ajustes para el caso del nitrógeno total en comparación al fósforo total. Los ajustes obtenidos durante esta etapa de validación fueron aún superiores a los observados durante la calibración, sin embargo el modelo sigue subestimando levemente la simulación de estos nutrientes.

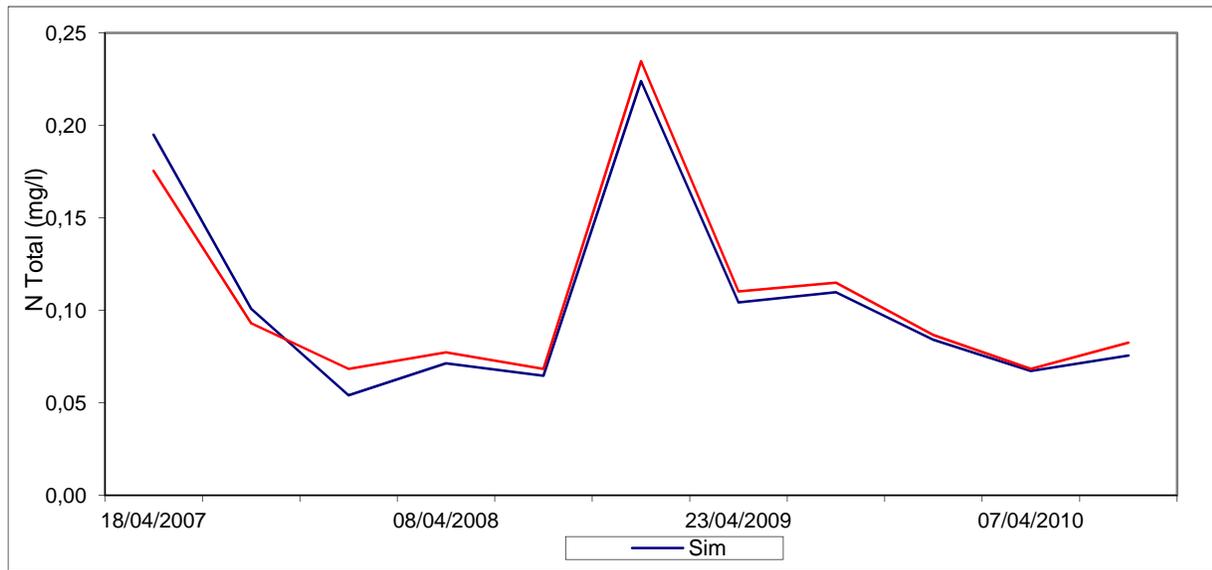


Figura 26. Validación del modelo, ajustes estacionales Nitrógeno Total (mg/l) para la estación Río Pucón en balseadero Quelhue.

Tabla 27. Indicadores estadísticos en validación del modelo módulo calidad de agua (Nitrógeno Total), calculados para la estación Río Pucón en balseadero Quelhue.

Índice	Modelación Satisfactoria	Valor Calibración
R <sup>2</sup>	Tender a 1 (>0,75)	0,9731
PBIAS	Menor a 20%	2,14%
EF	Tender a 1	0,92

A continuación se muestran los resultados para la etapa de validación del módulo de calidad de agua para el Fósforo Total (mg/l).

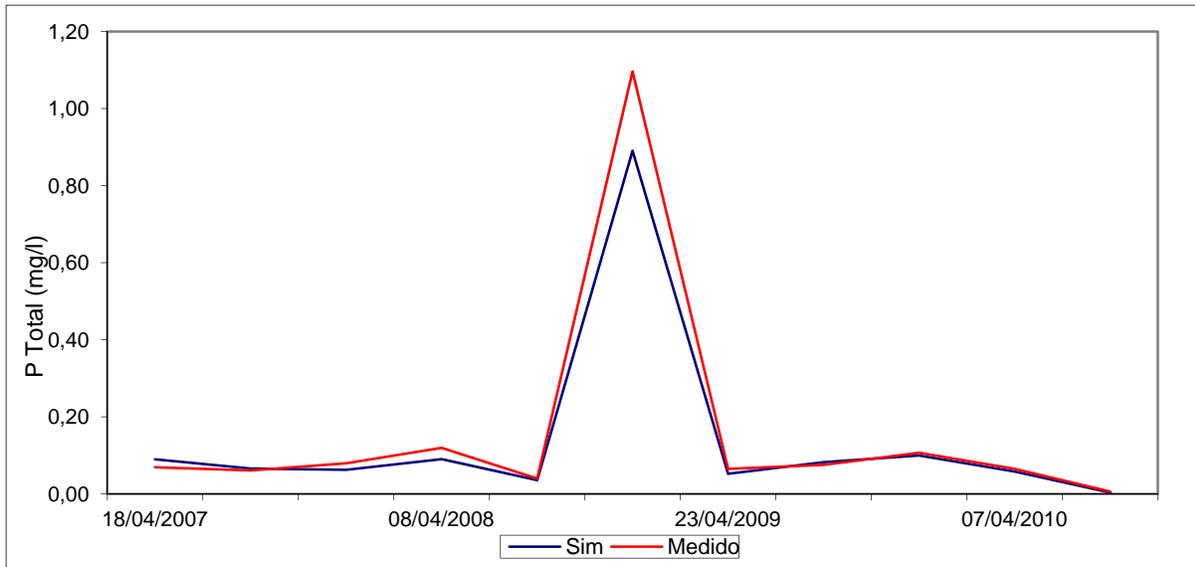


Figura 27. Validación del modelo, ajustes estacionales Fósforo Total (mg/l) para la estación Río Pucón en balseadero Quelhue.

Tabla 28. Indicadores estadísticos en validación del modelo módulo calidad de agua (Fósforo Total), calculados para la estación Río Pucón en balseadero Quelhue.

Índice	Modelación Satisfactoria	Valor Calibración
R <sup>2</sup>	Tender a 1 (>0,75)	0,9871
PBIAS	Menor a 20%	1,07%
EF	Tender a 1	0,97

Los resultados antes expuestos muestran el adecuado comportamiento del modelo SWAT calibrado y validado para las subcuencas aportantes al Lago Villarrica respecto a su módulo hidrológico y de calidad de aguas (nutrientes-nitrógeno total y fósforo total).

Una vez calibrado y validado el modelo es posible aplicar éste a nuevos escenarios permitiendo simular el efecto de estos nuevos usos proyectados sobre el comportamiento hidrológico de las subcuencas en estudio, en cuanto a cantidad y calidad de sus aguas.

**Objetivo 3. Analizar el efecto de cambios de los usos de suelo de las subcuencas en la respuesta hidrológica en términos de cantidad y calidad de agua generando 3 escenarios de modelación proyectados.**

Luego de calibrado y validado el modelo SWAT en su módulo hidrológico y de calidad de agua, el modelo fue aplicado a nuevos escenarios proyectados, los cuales permitieron estimar el efecto e influencia del manejo del suelo y la vegetación en las principales subcuencas aportantes al Lago Villarrica, respecto a la producción de agua, sedimentos y nutrientes. Las siguientes Figuras muestran las distribuciones de uso de suelo de cada uno de los 3 escenarios generados a partir de los supuestos descritos anteriormente en la metodología de este estudio.

**Escenario N°1- Escenario Actual: Uso de suelo de la cuenca alta del Lago Villarrica al año 2007.**

En la Tabla 29 se detalla la superficie de cada uso de suelo para el total de las cuencas aportantes al Lago Villarrica, empleando la cobertura de uso de suelo emanada del Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de la Región de La Araucanía al año 2007.

Tabla 29. Escenario N°1- Escenario Actual: distribución de categorías de uso de suelo al año 2007.

Categoría Uso de Suelo	Área (há)	Área (%)
Agrícola	69,3	0,1
Bosque Nativo	107.502,7	43,5
Cursos de Agua	7.355,5	3,0
Matorral	20.302,1	8,2
Nieves	5.501,5	2,2
Plantación Exótica	1.873,4	0,8
Praderas	25.961,2	10,5
Renovales	63.033,1	25,5
Suelos Desnudos	14.789,7	6,0
Urbano	604,1	0,2

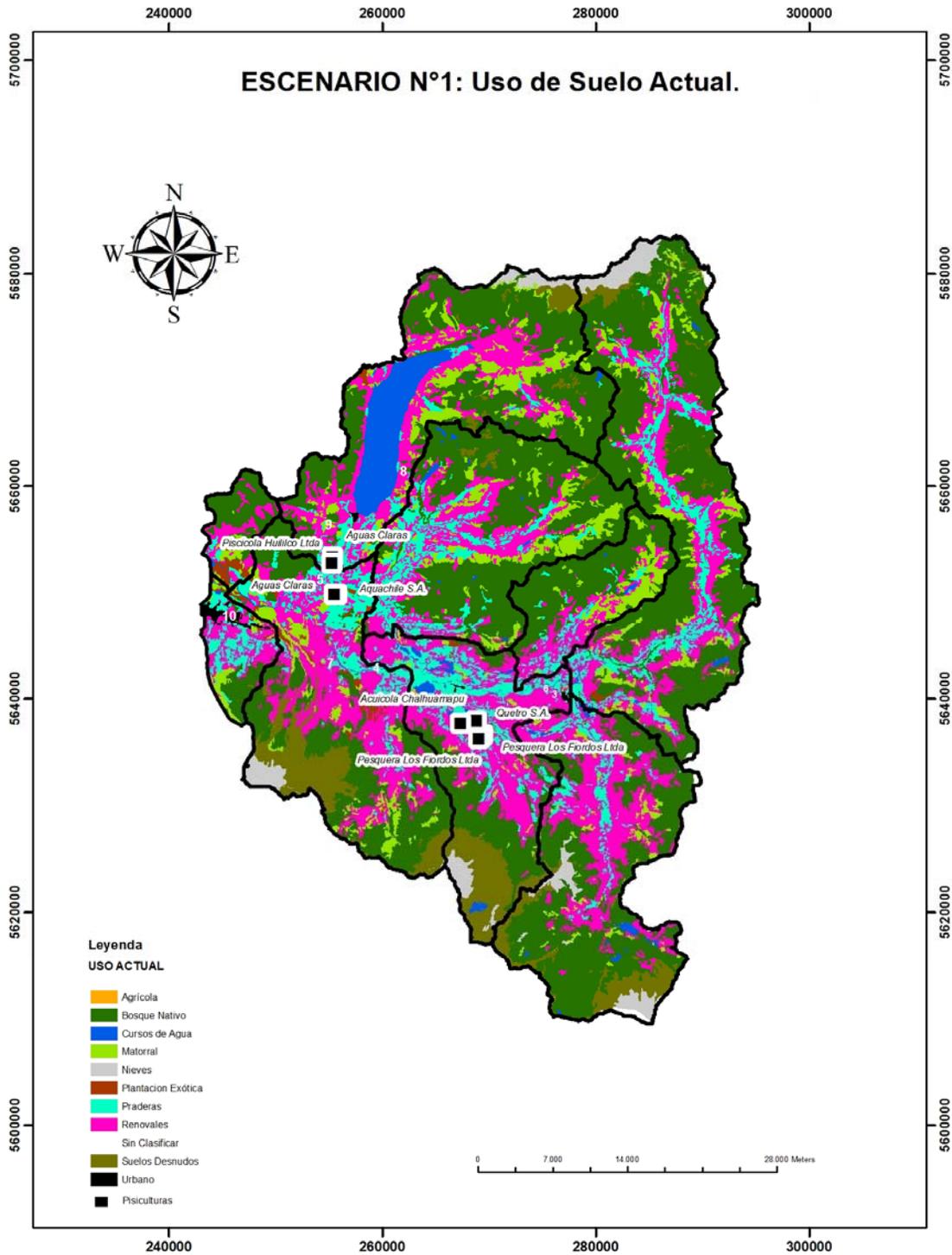


Figura 28. Escenario N°1- Escenario Actual: Distribución de categorías de uso de suelo para la cuenca alta del Lago Villarrica al año 2007.

En este escenario predomina el uso de suelo Bosque Nativo Adulto en un 43.5% de la cuenca, le sigue la categoría de uso Renovales Nativos y Praderas, con un 25.5 y 10.5% de la superficie total de la cuenca respectivamente.

### **Escenario N°2- Escenario Favorable: Forestación de áreas potencialmente forestables.**

La Tabla 30 muestra las distribuciones de uso de suelo del escenario proyectado N°2, donde todas las áreas potencialmente forestables con especies nativas han sido plantadas.

Tabla 30. Escenario N°2- Escenario Favorable: distribución de categorías de uso de suelo.

Categoría Uso de Suelo	Área (há)	Área (%)
Plantación Forestal	2.207,6	1,0
Bosque Nativo	170.891,8	77,4
Suelos Desnudos	13.957,9	6,3
Urbano	229,3	0,1
Matorral	15.501,4	7,0
Nieves	4.834,7	2,2
Praderas	11.520,3	5,2
Cursos de Agua	1.538,4	0,7

En este escenario en comparación al Escenario N°1 se observa un incremento de la superficie de bosque nativo en un 34%. Las áreas que han sido forestadas corresponden principalmente a aquellas cubiertas originalmente por praderas (desde un 10,5% pasaron a ocupar sólo un 5% de la superficie total de la cuenca), renovales y suelo de uso agrícola.

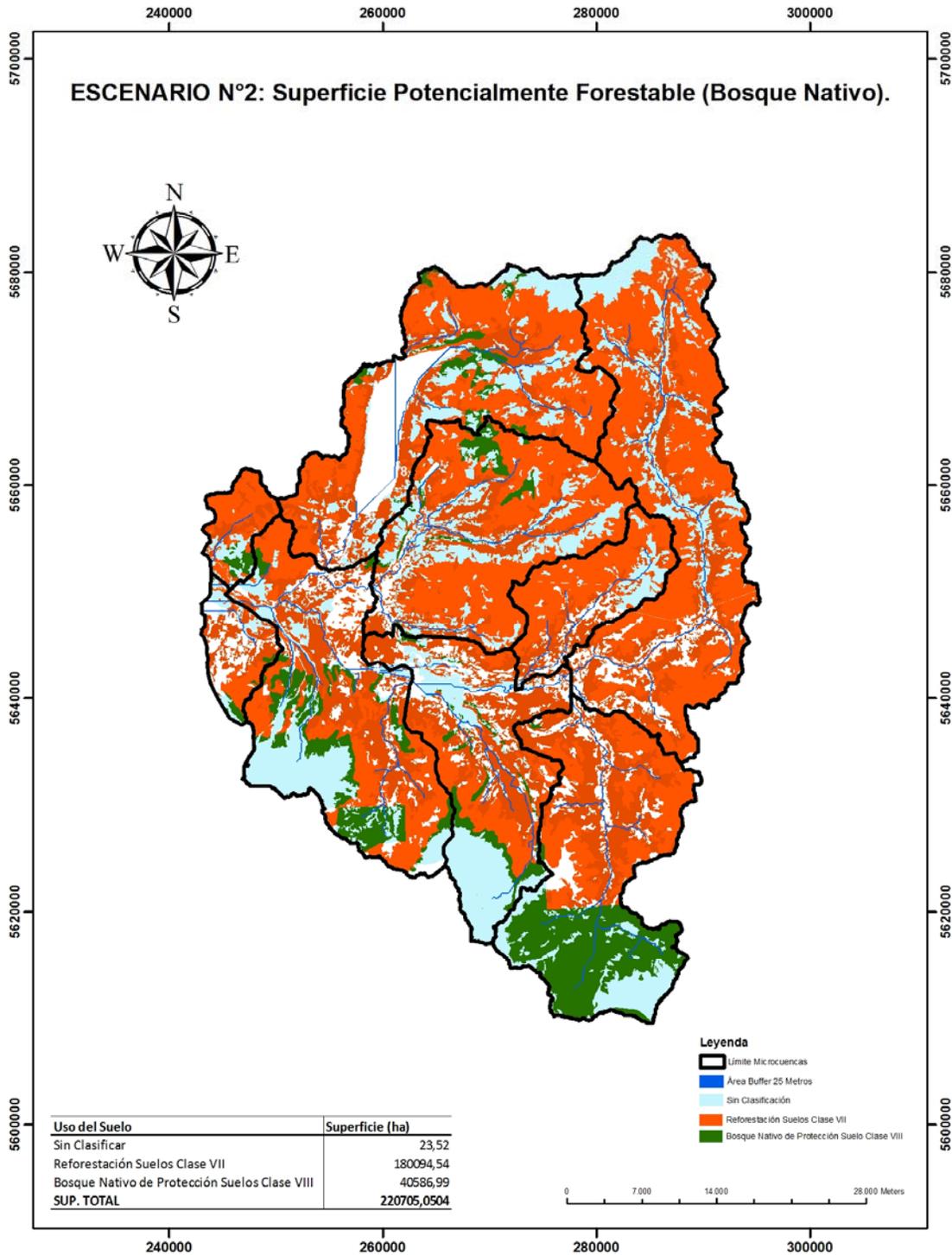


Figura 29. Escenario N°2- Escenario Favorable: Distribución de categorías de uso de suelo para la cuenca alta del Lago Villarrica bajo un escenario de máxima forestación nativa.

### Escenario N°3- Escenario Desfavorable: Forestación de áreas potencialmente forestables.

La Tabla 31 muestra las distribuciones de uso de suelo del escenario proyectado N°3, donde se ha incrementado la actividad agropecuaria (praderas y terrenos agrícolas) en un 5%, en desmedro de otros usos principalmente bosques nativos, para un período acumulado de 10 años, unido a ello se han incrementado la actividad acuícola en un 15% de aporte de Nitrógeno Total y un 27% en el aporte de Fósforo Total.

Tabla 31. Escenario N°2- Escenario Favorable: distribución de categorías de uso de suelo.

Categoría Uso de Suelo	Área (há)	Área (%)
Agrícola	10.069,3	4,1
Bosque Nativo	82.502,7	33,4
Cursos de Agua	7.355,5	3,0
Matorral	20.302,1	8,2
Nieves	5.501,5	2,2
Plantación Exótica	1.873,4	0,8
Praderas	66.961,2	27,1
Renovales	37.033,1	15,0
Suelos Desnudos	14.789,7	6,0
Urbano	604,1	0,2

Este escenario en comparación al escenario actual muestra un incremento de la superficie agrícola (desde un 0,1% a un 4,1%), como también de la superficie cubierta por praderas, que pasa a ser el uso de suelo predominante en la cuenca (desde un 10,5% para el escenario actual a un 27,1% en el escenario desfavorable). La Figura 30 muestra la distribución de uso de suelo para las subcuencas aportantes al Lago Villarrica en este escenario desfavorable.

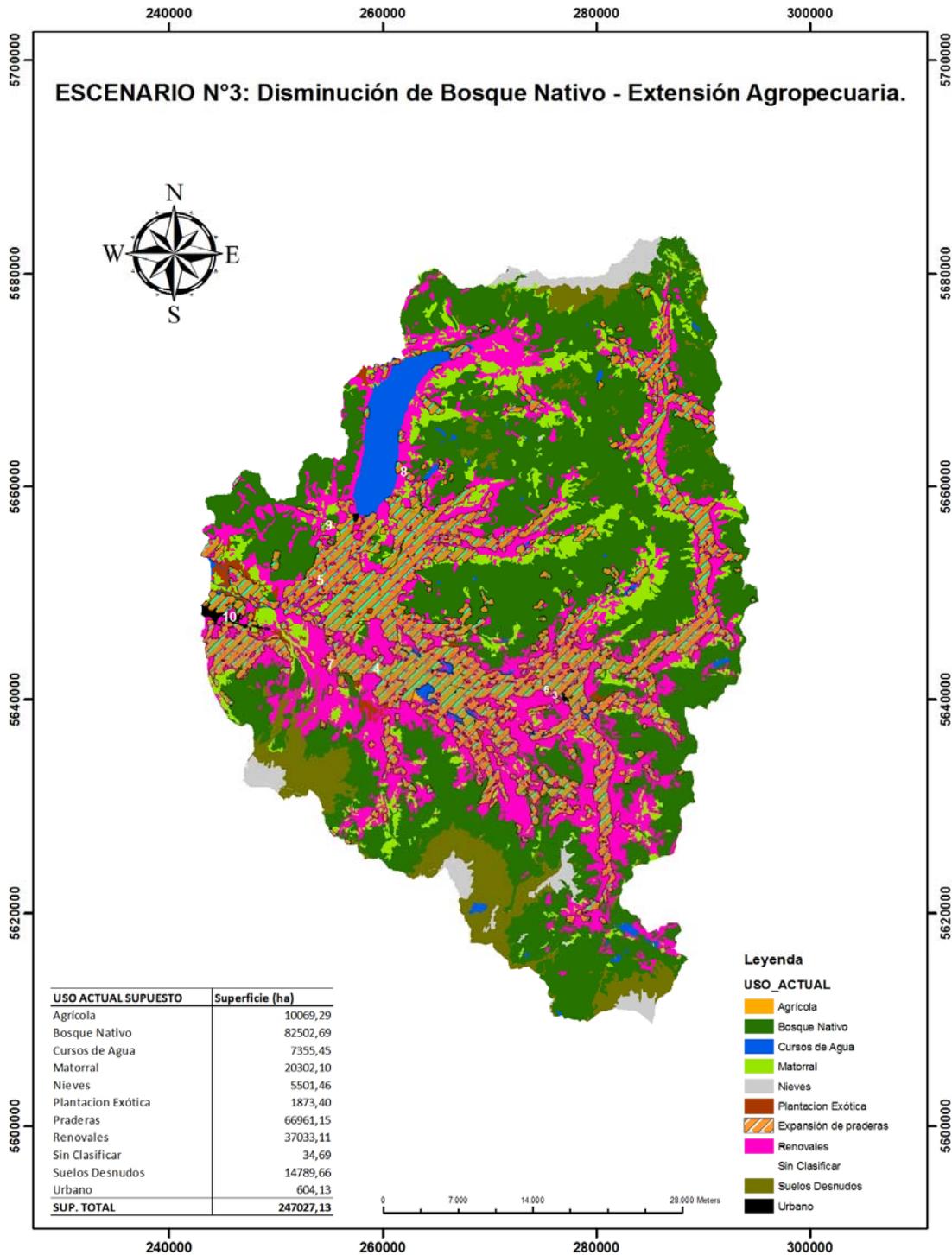


Figura 30. Escenario N°3- Escenario Desfavorable: Distribución de categorías de uso de suelo para la cuenca alta del Lago Villarrica bajo un escenario de deforestación y expansión agropecuaria.

Con la finalidad de determinar la influencia sobre la carga de nutrientes (nitrógeno y fósforo total anual) se efectuaron simulaciones hidrológicas y de nutrientes empleando el modelo SWAT ya calibrado y validado para la cuenca en estudio y se procedió a modificar las coberturas de uso de suelo por cada uno de los 3 escenarios propuestos. Siendo, el escenario N°1 el actual uso de suelo al año 2007, el escenario N°2 un escenario favorable de máxima forestación con especies nativas y el escenario N°3 un escenario desfavorable, es decir, de expansión agropecuaria (praderas y terrenos de uso agrícola). La Tablas 32 y 33 describen la carga anual de nutrientes (Nitrógeno Total y Fósforo Total respectivamente).

Tabla 32. Carga de nitrógeno total anual por subcuenca en estudio. Resultados mediante simulaciones en modelo SWAT (expresados en ton N/año).

Escenario	Caburga	Liucura	Maichín	Palguín	Pangui	Pucón	Pucón_El_Claro	Quelhue	Trancura	Aporte Total
1	93,58	73,74	99,20	79,34	26,06	102,52	16,74	9,66	69,85	570,69
2	73,72	61,42	77,90	50,86	18,82	80,83	7,09	8,35	42,91	421,91
3	81,68	102,14	94,05	101,67	50,63	151,44	96,47	48,88	110,00	836,96

Tabla 33. Carga de fósforo total anual por subcuenca en estudio. Resultados mediante simulaciones en modelo SWAT (expresados en ton P/año).

Escenario	Caburga	Liucura	Maichín	Palguín	Pangui	Pucón	Pucón_El_Claro	Quelhue	Trancura	Aporte Total
1	25.93	16.05	24.38	27.92	5.37	43.39	4.08	27.92	22.22	197.25
2	20.20	9.07	14.42	14.70	2.51	57.45	1.05	15.10	10.27	144.78
3	29.23	22.19	24.77	32.84	11.03	80.09	14.93	34.06	29.98	279.13

A partir de los resultados anteriores es posible concluir que las subcuencas que generan un mayor aporte de Nitrógeno Total anual corresponden a Pucón, Maichín, Caburga, Liucura y Trancura. El patrón descrito se repite en todos los escenarios simulados. El

escenario favorable (escenario 2) de máxima forestación nativa, es aquel que genera una mayor disminución de los aporte de nitrógeno total anual tanto para las subcuencas que presentan mayor extensión de forestación nativa en base a este escenario de cambio, como son Pucón, Palguín y Liucura, como para todas las subcuencas aportantes en su conjunto. De esta forma, bajo un escenario de condiciones favorables se genera una disminución de un 26,1% de la carga de nitrógeno total anual en la subcuenca alta del Lago Villarrica. En cuanto al escenario desfavorable (expansión agropecuaria), los resultados muestran un incremento de la carga nitrógeno total para las subcuencas apostantes al Lago Villarrica en un 46,6% respecto al escenario actual. Sin embargo, cabe destacar que existen subcuencas en las cuales no se genera un gran incremento de la carga anual de nitrógeno pues al generarse este nuevo escenario dichas subcuencas no muestran una marcada sustitución de superficies de bosques nativos por terrenos de uso agrícola y praderas (p.e subcuenca Caburga, Maichín), en cambio, aquellas subcuencas en las cuales bajo este escenario predomina el uso agropecuario, muestran un marcado aumento de la carga de nitrógeno anual, tal es el caso de las subcuencas Trancura, Pucón, Pucón El Claro, Quelhue, Palguín, entre otras.

Para el caso del Fósforo Total anual, las cargas de este nutrientes son menores a las de nitrógeno en todas las subcuencas aportantes al Lago Villarrica, sin embargo, se repite el mismo patrón que en el caso del Nitrógeno, es decir, una disminución del nutriente en el escenario favorable y un aumento bajo las condiciones del escenario desfavorable. En el escenario de máxima forestación nativa se genera una disminución del 25% respecto al escenario de uso de suelo actual y en el escenario desfavorable se observa un aumento cercano al 40% de la carga anual de fósforo aportado por estas subcuencas en su conjunto.

En la Tabla 34, se muestra un resumen de los diferentes métodos empleados en la determinación de carga de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo Total) por subcuenca aportante al Lago Villarrica, donde es posible observar que utiliznado el software de modelación

hidrológica SWAT, es posible obtener estimaciones que se encuentran en órdenes de magnitud similar a aquellos valores teóricos obtenidos mediante el empleo de factores de exportación.

Tabla 34. Comparación entre las cargas totales de Nitrógeno y Fósforo Total estimadas en este proyecto y resultados UACH(2010).

<b>ESCENARIO</b>	<b>Balance Factores de Exportación Ton/año de N-TOTAL</b>	<b>UACH 2010 Ton/año de N-TOTAL</b>	<b>Balance SWAT Ton/año de N-TOTAL</b>
<b>Actual</b>	627,8	738,0	570,69
<b>Favorable</b>	481,1		421,91
<b>Desfavorable</b>	860,8		836,96

<b>ESCENARIO</b>	<b>Balance Factores de Exportación Ton/año de P-TOTAL</b>	<b>UACH 2010 Ton/año de P-TOTAL</b>	<b>Balance SWAT Ton/año de P-TOTAL</b>
<b>Actual</b>	209,3	263,0	197,25
<b>Favorable</b>	164,0		144,78
<b>Desfavorable</b>	289,8		279,13

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.

Las diferencias observadas entre las estimaciones de Nitrógeno y Fósforo Total para el Escenario Actual estimados por UACH (2010), en comparación a los resultados del presente estudio, se relacionan principalmente con los caudales medios mensuales empleados en los diferentes métodos empleados, ya que el estudio antes citado (UACH, 2010) considera para sus cálculos caudales totales y no sólo el caudal asociado a escorrentía superficial (exportación de nutrientes), es decir, el caudal total menos el caudal base. En este sentido, en la estimación mediante factores de exportación realizados en este estudio, se utilizaron los caudales calculados mediante el modelo SWAT para cada una de las subcuencas y para los diferentes escenarios de uso de suelo propuestos. Se decidió desarrollar esta metodología conjunta pues, ha sido bien documentado en las últimas décadas, que cambios en las coberturas de uso de suelo modifican finalmente los caudales asociados a escorrentía. Las diferencias encontradas entre los tres escenarios para las estimaciones realizadas mediante factores de exportación respecto a los cálculos realizados mediante el modelo SWAT, se deben básicamente a que SWAT realiza una subestimación de los aportes de las pisciculturas, ya que sólo se contó con una estación al final de la cuenca para la calibración y validación. En sentido, con la finalidad de mejorar la calidad de la simulación se hace necesario contar con estaciones de control asociadas a las subcuencas que tienen presencia de pisciculturas o en aquellas subcuencas con mayor potencial acuícola. Así, a pesar de que el modelo empleado simula de forma adecuada los caudales y aporte de nutrientes por subcuenca, éste ha subestimado tanto los caudales punta como los pulsos de exportación de sedimentos, ello se debe principalmente a la escasa representación meteorológica e hidroclimática que tiene la zona andina de la cuenca en estudio.

Dentro de las recomendaciones más importantes en relación a las fuentes puntuales está la implementación de las Normas de Calidad Secundaria, estimación de capacidad de carga por cuenca. En particular se recomienda evaluar la asignación de cargas de emisión (TMDL) para las pisciculturas de la subcuenca Pucón, ya que el aporte neto anual alcanza un 47% del Nitrógeno y el 50% de Fósforo Total, en este sentido es necesario evaluar los factores de

conversión utilizados en la proyección de producción presentados en las Declaraciones y Estudios de Impacto Ambiental.

Respecto a los aportes difusos, las recomendaciones se relacionan principalmente a la mantención de las zonas de protección ripiarana y que actúan como un área buffer de protección en torno a los cursos de agua (25 metros a cada orilla según la normativa forestal actual). Por otra parte es requiere generar los incentivos adecuados que permitan la reforestación y forestación con bosque nativo siempreverde de las áreas identificadas como potencialmente forestables (escenario 2-favorable) y la disminuir en las áreas de mayor exportación de nutrientes a los cauces aquellos usos de suelo de que generan mayor aporte (praderas y terrenos de uso agrícola).

## 7. REFERENCIAS.

ALMOROX J, R DE ANTONIO, A SAA, M CRUZ & J M GASCO (1994). Métodos de estimación de erosión hídrica. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid. España. 150 pp.

ANDREASSIAN V (2004). Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology* 291: 1-27.

ARNOLD J, J WILLIAMS, A NICK & N SAMMONS (1990). A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A & M University Press, College Station, TX.

ARNOLD J, R SRINIVASAN, S NEITSH, C GEORGE, K ABBASPOUR, P GASSMAN, F HUA HAO, A VAN GRIENSVEN, A GOSAIN, P DEBELS, N WON, H SOMURA, V ELLA, L LEON, A JINTRAWET, M REYES & A SOMBATPAINT (editors) (2009). Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Global Applications. World Association of Soil and Water Conservation. Special Publication Nº4.

BROWN A, L ZHANG, T MCMAHON, A WESTERN & R VERTESSY (2005). A review of paired catchments studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation, *Journal of Hydrology* (in press).

CAMPOS A (2005). Modelo Hidrológico integrado a un sistema de información geográfico para una cuenca agroforestal de la VIIIª Región. Trabajo de título presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título de Ingeniero Civil.

CIREN. 2003. Estudio Agrológico de la X Región. Tomos I y II. Centro de Información de Recursos Naturales.

CHOW V, D MAIDMENT & L MAYRS (1994). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Editions. Civil Engineering Series. 537 pp.

CHUVIECO E (2010). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Editorial RIALP. Madrid, España. 566 pp.

CONAF, CONAMA, BIRF, Universidad Austral de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Católica de Temuco. 2007. Proyecto Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile, Santiago, Chile.

JOFRÉ P (2007). Modelling the effects of buffer zones for mitigating forest logging impacts in Chilen Catchments. Resumen presentación en Postgraduate Research Conference- School of Civil Engineering and Geosciences University of Newcastle upon Tyne. 22 de Junio 2007.

NEITSCH S, J ARNOLD, J KINIRY, J WILLIAMS & K KING (2002). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute.

NEITSCH S, J G ARNOLD, J R KINIRY, R SRINIVASSAN & J R WILLIAMS (2005). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2005. Texas, Grassland, Soil and Water Research Laboratory. Temple.

PEZOA L (2003). Recopilación y análisis de la variación de las temperaturas (período 1965-2001) y las precipitaciones (período 1931-2001) a partir de la información de estaciones meteorológicas de Chile entre los 33° y 53° de latitud Sur. Tesis de grado presentada como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia. Chile. 99 pp.

SAXTON K & J RAWLS (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Science Society Am. Journal 70:1569-1578.

STEHR A (2008). Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua, bajo escenarios de cambio climático en dos sub-cuencas del río Biobío incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción. Chile.

STEHR A, P DEBELS, F ROMERO & H ALCAYAGA (2008). Hydrological modeling with SWAT under limited conditions of data availability: evaluation of result from a Chilean case study. Hydrological Science Journal. En: Arnold J, Srinivasan R, Neitsh S, George C, Abbaspour K, Gassman P, Hua Hao F, Van Griensven A, Gosain A, Debels P, Won N, Somura H, Ella V, Leon L, Jintrawet A, Reyes M & Sombatpant (editors) (2009). Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Global Applications. World Association of Soil and Water Conservation. Special Publication N°4.

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE (2010). Diagnóstico de la calidad de las aguas del Lago Villarrica. Informe Final.

READ J & RS HILL (1985) Photosynthetic response to light of Australian and Chilean species of *Nothofagus* and their relevance to the rainforest dynamics. New Phytologist 101: 731-742.

REYES-DÍAZ M, M ALBERDI, F PIPER, LA BRAVO & CORCUERA, L.J. (2005). Low temperature responses of *Nothofagus dombeyi* (Mirb) Blume and *Nothofagus nitida* (Phil.) Krasser, two evergreen species from south central Chile. *Tree Physiology*. 25: 1389-1398.

VEBLEN TT, C DONOSO, T KITSBERGER & AJ REBERTUS (1996) Ecology of southern Chilean and Argentinean *Nothofagus* forests. In: Veblen TT, RS Hill, RJ Yale (eds) *The ecology and biogeography of Nothofagus forests*: 293-353. Yale University Press, New Haven, USA.

ZÚÑIGA R, ALBERDI M, REYES-DÍAZ M, OLIVARES E, HESS S, BRAVO L & L Corcuera (2006). Seasonal changes in the photosynthetic performance of two evergreen *Nothofagus* species in south central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*. 79:489-504.