



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE EXPORTACIÓN DE NUTRIENTES EN LA CUENCA DEL LAGO LANALHUE, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

LISSETTE SOLANGE MÉNDEZ REYES

Concepción, Chile
2018



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE EXPORTACIÓN DE NUTRIENTES EN LA CUENCA DEL LAGO LANALHUE, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

LISSETTE SOLANGE MÉNDEZ REYES

Profesor Guía: Dr. Roberto Urrutia

Profesor Co Guía: Dr. Mauricio Aguayo

Comisión Evaluadora: Dr. Ana Carolina Baeza

Concepción, Chile
2018



Universidad de Concepción

"Determinación de los coeficientes de exportación de nutrientes de la cuenca del lago Lanalhue, Región del Biobío, Chile."

PROFESOR GUÍA: Dr. ROBERTO URRUTIA PÉREZ

PROFESOR CO - GUÍA: Dr. MAURICIO AGUAYO ARIAS

PROFESOR COMISIÓN: Dra. CAROLINA BAEZA FREER

PROFESOR COMISIÓN: Dr. RICARDO FIGUEROA JARA

CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, diciembre de 2018

Por el desarrollo libre del espíritu

Casilla 160 C - Correo 3 - Fono (56-41) 204072 - Fax (56-41) 2207076 - Ciudad Universitaria - Concepción - Chile - <http://www.eula.cl>

DEDICATORIA

Dedicada a mis padres, hermano, tías y primos por su apoyo incondicional en este proceso y por apañarme siempre a todas las cosas que se me ocurrían, en los malos momentos y por supuesto en los buenos. El camino fue sinuoso pero la recompensa es mayor.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, amigos, profesores y conocidos que fueron parte de este maravilloso y enriquecedor proceso, donde experimente distintas situaciones que me formaron como persona y profesionalmente. Me siento profundamente orgullosa de crecer en esta facultad y esta universidad, no me equivoque cuando escogí esta hermosa carrera ya que encontré mucho más de lo que vine a buscar. Agradezco enormemente el cariño del personal que conforma la facultad y el Centro EULA, por acoger y hacerte parte de la familia. En especial, a don Guillermo, por su disposición y buena onda y al Profesor Mauricio Aguayo, por su paciencia, motivación y confianza.

También me caí muchas veces, pero lo importante es mantener el objetivo y darlo todo. Mi familia y amigos siempre estuvieron ahí y parte de este logro también es de ellos, infinitas gracias. Me llevo los mejores recuerdos, largas horas de estudio y desvelos, muchos viajes y carretes pero sobretodo verdaderas amistades.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	X
1. INTRODUCCIÓN	1
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	3
2.1. Hipótesis	3
2.2. Objetivos	3
2.2.1 Objetivo general:	3
2.2.2 Objetivos específicos:	3
3. ANTECEDENTES.....	5
3.1 Ciclo Hidrológico.....	5
3.2 Cuenca Hidrográfica.....	6
3.3 Cambios de uso de suelo	7
3.4 Ciclos de nitrógeno y fósforo	7
3.5 Procesos de eutrofización y sus consecuencias.....	9
3.6 Contaminación puntual y difusa	100
3.7 Coeficientes de exportación y su importancia	111
3.8 Análisis de bibliografía	133
4. PROBLEMÁTICA.....	133
4.1. Contexto general	133
4.2. Situación en Chile	144
4.2.1 Situación de la Región del Biobío y comuna de Cañete	155
4.2.2 Lago Lanalhue	166
5. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	19

5.1 Cuenca del lago Lanalhue	19
5.2 Clima	200
5.3 Geología y Geomorfología	200
5.4 Hidrografía.....	200
5.5 Vegetación y uso del suelo.....	211
5.6 Ámbito territorial	222
6. METODOLOGÍA	233
6.1 Supuestos:.....	233
6.2 Objetivo I: Caracterizar los diferentes usos del suelo de la cuenca del lago Lanalhue	233
6.3 Objetivo II: Seleccionar microcuencas representativas de los diferentes usos de suelo	299
6.4 Objetivo III: Determinar los coeficientes de exportación de nutrientes para los diferentes usos del suelo.....	32
6.4.1 Obtención de muestras de agua y determinación de caudales.....	322
6.4.2 Estimación de cargas de nutrientes.....	36
6.4.3 Estimación de coeficientes de exportación de nutrientes.....	36
6.5 Objetivo IV: Cuantificar los coeficientes de exportación de nutrientes para los diferentes usos de suelo presentes en la cuenca.....	39
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	400
7.1 Parámetros morfométricos y usos de suelo.....	400
7.2 Objetivo II: Seleccionar microcuencas representativas de los diferentes usos de suelo.....	44
7.2.1 Composición vegetal y caracterización del suelo presente en las microcuencas	46

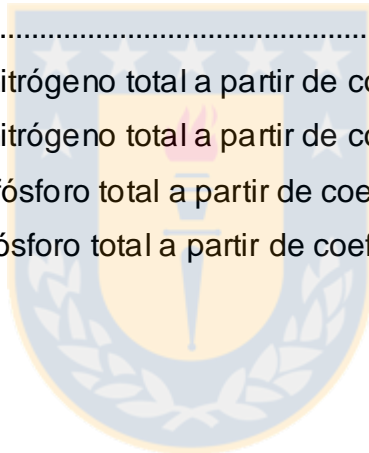
7.2.2	Análisis morfométrico.....	48
7.2.3	Análisis comparativo entre microcuencas.	64
7.3	Obtención de caudales y análisis químico de las muestras	66
7.4	Parámetros físico-químicos	92
7.5	Relación precipitación y escorrentía.....	103
7.6	Estimación de cargas de nutrientes	105
7.7	Coeficientes de exportación de nutrientes	109
7.8	Comparación de coeficientes de exportación.....	112
7.9	Cuantificación de exportación de nutrientes en la cuenca del Lago Lanalhue	9015
8	CONCLUSIONES.....	9520
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	9722
10	ANEXOS	10429



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: División de una cuenca hidrográfica	6
Figura 2: Promedio obtenido para el índice NDVI en el Lago Lanalhue para el período 2000-2017.....	18
Figura 3: Cartografía de la cuenca del Lago Lanalhue, VIII Región del Biobío, Chile	19
Figura 4: Puntos de muestreo en cada microcuenca	30
Figura 5: Esquema para estimar coeficientes de exportación de nutrientes por método de regresión lineal múltiple	38
Figura 6: Usos de suelo de la cuenca del Lago Lanalhue	43
Figura 7: Microcuencas de monocultivo forestal	50
Figura 8: Perfil longitudinal de la microcuenca Los Lirios	51
Figura 9: Cuenca hipsométrica de microcuenca Los Lirios	52
Figura 10: Perfil longitudinal de la microcuenca Hostería	53
Figura 11: Curva hipsométrica de la microcuenca Hostería	54
Figura 12: Microcuencas agropecuarias	55
Figura 13: Perfil longitudinal de la microcuenca Molino	56
Figura 14: Curva hipsométrica de la microcuenca Molino	56
Figura 15: Perfil longitudinal de la microcuenca Molino	58
Figura 16: Curva hipsométrica de la microcuenca Huilquehue	58
Figura 17: Microcuencas de bosque nativo	59
Figura 18: Perfil longitudinal de la microcuenca Quilas	61
Figura 19: Curva hipsométrica de la microcuenca Quilas	61
Figura 20: Perfil longitudinal de la microcuenca Rodal.....	63
Figura 21: Curva hipsométrica de la microcuenca Rodal.....	63
Figura 22: Temperatura registrada para cada microcuenca en el período de estudio	68
Figura 23: pH registrado para cada microcuenca en el período de estudio.....	70

Figura 24: Conductividad registrada para cada microcuenca en el período de estudio	72
Figura 25: Concentración promedio de Nitrógeno total en cada condición de estudio	74
Figura 26: Concentración promedio de Fósforo total para cada condición de estudio	75
Figura 27: Caudal estándar y caudal promedio estándar para cada microcuenca en el período de estudio	77
Figura 28: Diferencia de caudal obtenida para condiciones base y con precipitación.....	79
Figura 29: Carga de Nitrógeno total y Fósforo total promedio en el período de estudio (kg/ha/invierno)	83
Figura 30: Exportación de nitrógeno total a partir de coeficientes obtenidos	92
Figura 31: Exportación de nitrógeno total a partir de coeficientes de bibliografía	92
Figura 32: Exportación de fósforo total a partir de coeficientes obtenidos	93
Figura 33: Exportación de fósforo total a partir de coeficientes de bibliografía	94



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Objetivos y actividades para la determinación de coeficientes de exportación de nutrientes	4
Tabla 2: Coeficientes de exportación de nutrientes para cada uso de suelo reportados en la literatura	12
Tabla 3: Características de la cuenca del lago Lanalhue	22
Tabla 4: Fechas y numero de muestreos realizados para cada microcuenca	31
Tabla 5: Parametros morfométricos de la cuenca del Lago Lanalhue	41
Tabla 6: Superficie y porcentaje para cada categoría de uso de suelo presente en la cuenca del Lago Lanalhue	42
Tabla 7: Características de las microcuencas seleccionadas	45
Tabla 8: Riesgo de erosión potencial en cada microcuenca	47
Tabla 9: Parametros morfométricos obtenidos para cada unidad de drenaje	49
Tabla 10: Números de curva obtenidos para las microcuencas	78
Tabla 11: Coeficientes de exportación de nutrientes calculados en modelo de regresión lineal múltiple	84
Tabla 12: Comparación de coeficientes de exportación de nitrógeno total obtenidos con literatura	89
Tabla 13: Coeficientes utilizados para cuantificar la exportación en la cuenca del lago Lanalhue	90

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Índices de exportación de nutrientes según literatura utilizados en Chile	104
Anexo 2: Metodología para extracción de red hídrica	104
Anexo 3: Modelo para obtener usos de suelo	105
Anexo 4: Modelo para delimitación de microcuencas.....	105
Anexo 5: Tiempos de concentración para cada microcuenca.....	106
Anexo 6: Capacidad de uso de suelo presente en cada microcuenca	106
Anexo 7: Grado de Erodabilidad en cada microcuenca	107
Anexo 8: Carga de nitrógeno y fósforo total para cada microcuenca en el período de estudio.....	107
Anexo 9: Exportación de nutrientes en eventos con precipitación y sin precipitación.....	108
Anexo 10: Temperatura registrada para cada microcuenca en el período de estudio	109
Anexo 11: pH registrado para cada microcuenca en el período de estudio.....	109
Anexo 12: Conductividad registrada para cada microcuenca en el período de estudio	110
Anexo 13: Concentración de nitrógeno total para cada microcuenca registrado en el período de estudio	110
Anexo 14: Concentración de fósforo total para cada microcuenca registrado en el período de estudio	111
Anexo 15: Caudal estándar registrado en eventos con y sin precipitación.....	111
Anexo 16: Caudal estándar registrado en cada microcuenca en el período de estudio	112
Anexo 17: Parámetros físico-químicos de cada microcuenca en eventos sin precipitación.....	113
Anexo 18: Parámetros físico-químicos de cada microcuenca en eventos con precipitación.....	114

Anexo 19: Parámetros físico-químicos de cada microcuenca en todo el período de estudio11515

Anexo 20: Cartografía de orientación al sol de la cuenca del lago Lanalhue 116

Anexo 21: Coeficientes de exportación de fósforo total obtenidos para cada método utilizado 11717

Anexo 22: Reclasificación de usos de suelo para procesamiento en ArcGIS .11818



RESUMEN

El problema de la eutrofización o el exceso de nutrientes en los lagos o embalses es recurrente y se traduce en que una o más de las entradas al cuerpo de agua está produciendo un desequilibrio en el sistema, este desequilibrio puede estar relacionado a descargas puntuales o asociado a la exportación de las coberturas de suelo que rodean el cuerpo de agua, estas fuentes puntuales o difusas respectivamente pueden ser cuantificadas para realizar un balance en el lago que permita establecer la causa del estado trófico.

El presente estudio propone evaluar las fuentes difusas asociadas a los usos de suelo de bosque nativo, plantaciones forestales y cultivos agrícolas a través de la determinación de los coeficientes de exportación de nutrientes en la cuenca del lago Lanahue ubicado en la VIII región de Chile, además, de establecer una comparación en relación a los coeficientes obtenidos y cuantificar a que uso de suelo corresponden las mayores exportaciones de nutrientes. Esto se realizó a través de la delimitación de microcuencas representativas de cada uso, obteniendo muestras de escorrentía y concentraciones de nutrientes de nitrógeno total y fósforo total en el punto de cierre de las microcuencas en eventos sin precipitación y con precipitación para considerar el factor de variabilidad hidrológica y con una frecuencia de cuatro muestreos en un período de 4 meses establecido como estación de invierno.

Los coeficientes de exportación de nutrientes fueron calculados mediante tres metodologías y los resultados indican mayores coeficientes de exportación para usos de suelo agropecuarios, en segundo lugar, monocultivo forestal y en tercer lugar bosque nativo para los nutrientes de nitrógeno total y fósforo total. Finalmente, la cuantificación de la exportación responde a los mismos resultados presentados anteriormente donde el uso agropecuario representa un 70% y 63% de las exportaciones para nitrógeno total y fósforo total respectivamente, lo cual se debe al impacto de la utilización de fertilizantes, deposiciones de animales y características de las zonas de cultivo, de bajas pendientes y densidades de drenaje menores que se refleja en valores de exportación más altos y que puede influir directamente en el estado eutrófico que presenta el lago Lanalhue, por lo tanto, la utilización de coeficientes de exportación permite estimar valores representativos de la cuenca en estudio para futuros balances de nutrientes en el lago.



1. INTRODUCCIÓN

Los cauces están siendo sometidos a una presión cada vez mayor de residuos y desechos de todo tipo proveniente de las distintas actividades ejercidas por los humanos, generando una situación de riesgo para la salud y con un alto nivel de afectación a las aguas y los ecosistemas. Las transformaciones del paisaje a escala local y regional en el país evidencian consecuencias ecológicas y sociales, Chile ha desarrollado una importante economía basada en 2,6 millones de hectáreas de plantaciones forestales establecidas con especies de crecimiento rápido. Esta expansión forestal tiene el potencial de reducir la escorrentía y afectar los usuarios que se encuentran aguas abajo (Iroumé, 2013). En general, la actividad silvoagropecuaria provoca efectos no deseados o externalidades negativas y ha desencadenado la erosión de suelos, reducción de fertilidad, inundaciones y transporte de sedimentos, entre otras. (Muñoz, 2017). Uno de los problemas más frecuentes que afectan la calidad del agua se atribuye al exceso de nutrientes, que se evidencia en los cuerpos lacustres y corresponde a la eutrofización. La eutrofización es el problema más extendido de la calidad del agua en los Estados Unidos y en muchas otras naciones (Carpenter et al., 1998). El exceso de nutrientes como el nitrógeno se mueve por escorrentía superficial y flujo subterráneo hacia esteros, ríos, lagos y océanos (Peterson et al., 2001) afectando la calidad de los recursos. En los lagos de Chile se evidencia una acelerada eutrofización relacionada con los cambios de uso de suelo y actividades productivas que modifican el ecosistema, como el lago Budi, Lanalhue, y Vichuquén (Contreras, 2010). El lago Lanalhue se encuentra ubicado en VIII Región del país y pertenece a los denominados lagos Nahuelbutanos, se desarrollan actividades turísticas y en su zona adyacente predominan los suelos forestales, este lago ha presentado procesos de eutrofización a lo largo del tiempo lo que ha conllevado a la preocupación científica sobre el nivel de intervención que presenta el lago y la implementación de herramientas y medidas que permitan evaluar el estado trófico del lago.

Una clave vital para el manejo de la eutrofización de los lagos y los embalses ha sido el desarrollo de modelos que relacionan las concentraciones de nutrientes del cuerpo de agua, con aspectos de la calidad del agua que son considerados importantes y dignos de preservar (Smith, 1998). Entre los modelos de balance de nutrientes utilizados se destaca los propuestos por Vollenweider (1968) y Dillon & Rigler (1974) para la estimación de la concentración de nutrientes en los lagos basado en el principio de conservación de la masa a través de la determinación de fuentes difusas y puntuales presentes en el ecosistema. Las cargas que ingresan a los lagos se dividen en directas o difusas, sin embargo, la determinación de cargas desde fuentes difusas son las más difíciles de evaluar, ya que están afectadas por numerosos factores variables en el espacio y en el tiempo (Oyarzun, Campos, & Huber, 1997).

Para cuantificar las fuentes difusas la determinación de los coeficientes de exportación de nutrientes permite realizar una estimación representativa de la cantidad exportada por cada uso de suelo presente en la cuenca hidrográfica. Esto se consigue a través de un balance de nutrientes donde se identifiquen las cargas entrantes y salidas que permita determinar la situación actual y proponer medidas de gestión que sean evaluadas y aplicadas por las autoridades competentes para evitar el deterioro de los recursos y la calidad de vida de la población.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. Hipótesis.

En este estudio se plantea la hipótesis que el uso de coeficientes de exportación en base a la literatura no permite estimar correctamente (subestima o sobrestima) los aportes reales desde la cuenca, por lo que la obtención de los coeficientes de exportación permitiría una mejor estimación de la carga de nutrientes en el lago.

2.2. Objetivos.

2.2.1 Objetivo general:

Cuantificar la exportación de nutrientes para diferentes usos de suelo en la cuenca del lago Lanalhue, VIII Región, Chile.

2.2.2 Objetivos específicos:

1. Caracterizar los diferentes usos del suelo de la cuenca del lago Lanalhue.
2. Seleccionar microcuencas representativas de los diferentes usos de suelo.
3. Determinar los coeficientes de exportación de nutrientes para los diferentes usos del suelo.
4. Cuantificar la exportación de nutrientes para los diferentes usos de suelo presentes en la cuenca.

En relación a los objetivos específicos se determinaron las actividades asociadas a cada uno, como se presenta en la tabla 1:

Tabla 1: Objetivos y actividades para la determinación de coeficientes de exportación de nutrientes.

Objetivos	Actividades
I. Caracterizar los diferentes usos del suelo de la cuenca del lago Lanalhue.	<ul style="list-style-type: none"> • Delimitación de la cuenca hidrográfica a través de SIG. • Definir los usos de suelo presentes a través de coberturas y herramientas de SIG.
II. Seleccionar microcuencas representativas de los diferentes usos de suelo.	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar las áreas con mayor porcentaje de cada uso de suelo y delimitar microcuencas. • Establecer puntos y frecuencia de muestreo.
III. Determinar los coeficientes de exportación de nutrientes para los diferentes usos del suelo.	<ul style="list-style-type: none"> • Obtención de muestras de agua y determinación de caudales. • Análisis químico del agua. • Estimación de los coeficientes de exportación. • Análisis estadístico de los coeficientes de exportación de nutrientes.
IV. Cuantificar las exportaciones de nutrientes para cada categoría de uso presente en la cuenca del lago Lanalhue.	<ul style="list-style-type: none"> • Comparar los coeficientes obtenidos con los presentes en literatura. • Cuantificar las exportaciones para los usos de suelo de plantaciones forestales, bosque nativo y uso agropecuario en la cuenca.

Fuente: Elaboración propia

Para efectos de esta investigación se consideró un período de estudio de 4 meses de muestreo correspondiente a los meses de invierno, además, se espera que ocurran variaciones mínimas en el uso de suelo que para el propósito de este estudio se asumen estables.

3. ANTECEDENTES

3.1 Ciclo Hidrológico.

El ciclo hidrológico se inicia con la evaporación del agua en los océanos, el vapor de agua resultante del proceso anterior es transportado por las masas de aire en movimiento hacia los continentes. Bajo condiciones meteorológicas adecuadas el vapor se condensa para formar nubes, las cuales a su vez dan origen a las precipitaciones. De esta precipitación no toda llega a la superficie ya que una fracción se evapora durante su caída y otra es retenida por intercepción, ya sea por la vegetación existente, edificios, carreteras. Del agua que alcanza la superficie del terreno, una parte queda retenida en los huecos e irregularidades del terreno (almacenamiento en depresiones) y en su mayoría vuelve a la atmósfera por evaporación.

Otra parte del agua que llega al suelo circula sobre la superficie (lluvia en exceso) y se concentra en pequeños surcos que luego integran arroyos, los cuales posteriormente desembocan en ríos conocido como escurrimiento superficial lo que conduce las aguas a los lagos, embalses y mares, donde se evapora o bien, se filtra en el terreno. Una tercera parte de la precipitación penetra bajo la superficie del terreno (infiltración) y va rellenando los poros y fisuras. Si el agua infiltrada es abundante, una fracción desciende hasta recargar el agua subterránea, en cambio, cuando el volumen infiltrado es pequeño, el agua queda retenida en la zona no saturada, de donde vuelve a la atmósfera por evaporación o por transpiración de la vegetación presente (evapotranspiración). Con la gravedad, tanto el escurrimiento superficial como el agua subterránea se mueve hacia las zonas bajas y con el tiempo integran el escurrimiento total de un río para fluir hacia los océanos. (Campos, 1998). Este escurrimiento conlleva el arrastre de sedimentos y elementos químicos, los contenidos de materiales en suspensión en los cauces están estrechamente relacionados con los caudales, arrastre de sedimentos y procesos

erosivos de la red de drenaje (Iroumé et al., 2013), esto contribuye en el balance de nutrientes en los cuerpos de agua, impactando su composición y balance.

3.2 Cuenca hidrográfica.

Las definiciones de cuenca hidrográfica son variadas, Reyes (2010) propone que “Una cuenca hidrográfica es el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red natural con una o varias corrientes superficiales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente al mar”, Heras (1972) define la cuenca hidrográfica o de drenaje, considerado en un punto dado de su curso, al área limitada por el contorno en el interior del cual el agua precipitada corre por su superficie, se encuentra y pasa por un punto determinado del cauce.



Figura 1: División de una cuenca hidrográfica.

Fuente: Manual de Manejo de Cuencas (s,f)

Por su tamaño geográfico, las cuencas pueden ser grandes, medianas o pequeñas, pueden dividirse en espacios definidos por la relación entre el drenaje superficial y la importancia que tiene con el curso principal. El trazo de la red hídrica es fundamental para delimitar los espacios en que se puede dividir la cuenca. A un curso principal llega un afluente secundario, comprende una subcuenca, luego si al curso principal de una subcuenca llega un afluente terciario, este comprende una microcuenca, además, de las quebradas que son cauces menores.

3.3 Cambios de uso de suelo.

El cambio de uso y cobertura del suelo altera considerablemente el balance energético de la tierra y los ciclos biogeoquímicos, lo cual contribuye al cambio climático y la provisión de servicios ecosistémicos del suelo. (PengSong et al., 2018). Existe una estrecha relación entre la cobertura de suelo y la calidad de agua al profundizar en la contaminación asociada a los recursos hídricos. La disminución de la vegetación provoca un incremento en las tasas de sedimentos en suspensión, nitrógeno y fósforo total en el escurrimiento de las aguas superficiales, principalmente en los lugares que son intensivamente dedicados a la agricultura o pastoreo (Heathwaite et al., 1990), además, de la actividad agrícola se destaca la conversión de bosques nativos a plantaciones exóticas de rápido crecimiento, donde la sustitución de vegetación nativa se asocia con la tala de ésta, ocasionando un impacto sobre la calidad de las aguas de los cuerpos superficiales de agua cercanos, por medio de la remoción de la biomasa, erosión del suelo y la mineralización acelerada del nitrógeno (Oyarzun et al., 2007), también se tiene el componente asociado a la fertilización de estos suelos que altera significativamente la química del agua en arroyos y ríos. Por lo tanto, el análisis de la cantidad de nutrientes que impacta los cuerpos de agua asociado a los cambios y alteraciones de los usos del suelo, en especial el nitrógeno y fósforo, son de mucha importancia para poder gestionar de manera eficaz las cuencas hidrográficas, para evitar los procesos de eutrofización. (Vighi et al., 1991).

3.4 Ciclos de nitrógeno y fósforo.

Los elementos se comportan de distintas maneras en el ecosistema; en el caso del nitrógeno, la principal fuente de nitrógeno se encuentra en la atmósfera como N_2 del aire y este debe ser fijado por microorganismos de vida libre o simbióticos. La fijación biológica de N_2 resulta en la formación de compuestos orgánicos nitrogenados, los cuales ingresan directamente a la planta o deben ser

mineralizados. En las capas superficiales del suelo el nitrógeno suele estar presente en forma orgánica como consecuencia de la descomposición de residuos de animales y plantas y mediante el proceso de mineralización éste es transformado biológicamente a nitrógeno amoniacal. El nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos y terrestres puede estar en diferentes formas de acuerdo a su estado de oxidación y son los procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación ocurridos en estos ecosistemas los principales responsables de los cambios de un estado de oxidación a otro. El uso intensivo de fertilizantes nitrogenados sobre el suelo ha ocasionado un aumento significativo en la presencia de nitrógeno inorgánico en las capas inferiores del suelo y en cuerpos de agua superficiales como consecuencia de los fenómenos de percolación y escurrimiento. (Claros, 2012).

Para el caso del fósforo, este elemento proviene de las apatitas y depósitos de fosfato natural de donde es liberado a través de procesos de meteorización, lixiviación, erosión y extracción industrial como fertilizante. Los aportes de fósforo por precipitación son, en general bajos exceptuándose las precipitaciones en sitios cercanos a fuentes contaminantes o muy afectadas por las quemas (Sequera et al., 1991), los microorganismos presentes en el suelo pueden apropiarse del fósforo soluble y transformarlo en complejos orgánicos insolubles. El fósforo soluble procedente de fertilizantes o en forma natural en el suelo es convertido rápidamente a formas menos disponibles por el proceso de fijación, haciendo que se mueva muy poco en la mayoría de los suelos dando como resultado que una pequeña parte sea perdida por lavado. (Biavati, s.f)

El ingreso de fósforo en los cuerpos de agua ha aumentado de manera notable en los últimos tiempos a consecuencia del uso creciente por el hombre y de la recuperación ineficaz, del fósforo para abonos agrícolas o con fines industriales. La reducción de las entradas de fósforo en muchos ecosistemas acuáticos productivos provoca la reducción cuantitativa del ciclo del fósforo y un decremento relativamente rápido de la capacidad productiva del sistema (Wetzel, 2001). Un factor importante

a considerar es el intercambio de fósforo entre los sedimentos y el agua, la eficiencia de la inmovilización de fósforo en los sedimentos y la rapidez de los procesos que regeneran el fósforo del agua están relacionados con una serie de factores físicos, químicos y metabólicos. (Wetzel, 1981).

La productividad y dinámica de los ecosistemas terrestres está limitada a la disponibilidad de nutrientes. Para las plantas la disponibilidad de nitrógeno (N) es el principal limitante en la productividad de los cultivos que junto con el fósforo (P) determinan el crecimiento vegetal. Para incrementar la disponibilidad de estos nutrientes y mejorar la productividad de los cultivos se introducen al suelo fertilizantes químicos, aunque su utilización es crítica para la producción de alimentos, hoy en día se ha convertido en una práctica costosa y que acarrea serias consecuencias ambientales (Vitousek et al., 1997).

3.5 Procesos de eutrofización y sus consecuencias.

Una de las maneras para representar el estado de un sistema acuático es a través de su estado trófico, este concepto se explica por la alteración de la productividad, donde el término eutrofización se entiende como el proceso que presentan algunos sistemas acuáticos dado por el aumento de fósforo y nitrógeno desde la cuenca de drenaje, que se manifiesta en una intensa proliferación y acumulación excesiva de microalgas y plantas superiores (Ryding & Rast, 1992). Si bien a escala geológica todos los lagos tienden a la eutrofización como un estado natural, la intervención antrópica puede acelerar este proceso.

En el proceso de eutrofización el compartimiento más sensible a las entradas alóctonas de nutrientes es el fitoplancton; frente a un incremento en el aporte de nutrientes estos sistemas reaccionan en cadena aumentando la biomasa fitoplanctónica (Margalef, 1983) especialmente el grupo de las algas verde azules o cianobacterias, que corresponden a las algas más primitivas que se conocen, tienen la capacidad de aumentar su abundancia significativamente con respecto a la

concentración original, generando las denominadas floraciones algales (Wetzel, 2001), lo que provoca la disminución de la transparencia, disminución del oxígeno disuelto y mortalidad de fauna. El proceso de eutrofización se acelera cuando las bajas concentraciones de oxígeno propician la aparición de bacterias anaeróbicas que producen sustancias como ácido sulfúrico y amoníaco (Ministerio del Medio Ambiente, 2011) en estos estados críticos la biota desaparece y se presenta una significativa disminución de las condiciones ambientales normales.

El estado trófico puede aumentar por aportes internos y externos, la carga interna se genera como resultado de la descomposición y retención de nutrientes en el sistema lacustre expresadas como sedimentos, mientras que los suministros externos de nitrógeno y fósforo a los ecosistemas acuáticos provienen de una amplia variedad de fuentes, incluidas las aguas subterráneas, fluviales y atmosféricas (Smith et al., 1999). La suma de estas tres fuentes puede denominarse fuentes externas.

3.6 Contaminación puntual y difusa.

La contaminación de los recursos hídricos conlleva una serie de consecuencias negativas que resultan en una alteración de la calidad y disponibilidad del recurso, las descargas contaminantes pueden provenir de dos tipos; los originados por fuentes fijas, es decir, cuando existen sitios puntuales de descarga, generalmente continuas y los originados por fuentes no fijas; cuando existe una multiplicidad de pequeñas fuentes de descarga, cuyos aportes no son localizados ni continuos y cuyo acceso a los cursos o cuerpos de agua es por derrame o filtración a través de los suelos. Esta última denominada contaminación difusa directamente relacionada con actividades agrícola y silvícolas y trae consigo una lista de impactos ambientales negativos. (González, 2007). La escorrentía a partir de zonas agropecuarias y ciudades es la mayor fuente de fósforo (P) y nitrógeno (N) que entra a los ríos, lagos y aguas costeras, además, de la generada desde zonas de pastoreo y cría de ganado. En la actualidad, los ingresos no puntuales son la mayor fuente

de contaminación de agua en los EE.UU. Se estima que alrededor de 72% a 82% de lagos eutróficos podrían requerir control de ingresos no puntuales de fósforo para lograr los estándares de calidad de agua, incluso si los ingresos puntuales fueran reducidos a cero. (Carpenter, 1998).

3.7 Coeficientes de exportación y su importancia.

La contaminación puede provenir de fuentes puntuales fáciles de cuantificar o de fuentes no puntuales o difusas, donde la magnitud de los cambios en las aguas de una cuenca depende del aporte desde las áreas cultivadas, de la localización de las aguas y del tiempo transcurrido (González et al., 2007). Los coeficientes de exportación representan la tasa de cargas de contaminantes por área, que a menudo se recomienda como una forma de estimar las cargas de fuentes no puntuales (Reckhow et al., 1980). Las fuentes difusas se pueden estimar mediante coeficientes de exportación de nutrientes, que expresan tasas de nitrógeno y fósforo exportado para cada área de origen en la cuenca en relación a los usos de suelo (Liu et al., 2009). El uso de coeficientes de exportación para estimar cargas de nutrientes se basa en que dado un régimen climatológico y usos de suelo se exportaran cantidades de nutrientes a un cuerpo de agua durante un ciclo anual o a más largo plazo. Aunque los valores de los coeficientes de exportación se informan ampliamente en fuentes de literatura, teniendo en cuenta la extensa variabilidad en el espacio y tiempo de las características de la tierra, clima y prácticas de manejo (por ejemplo, suelos, pendientes, riegos, prácticas de labranza, precipitación y escorrentía, etc.), son necesarias estimaciones específicas de sitio y período de coeficientes de exportación para la predicción precisa de contaminantes de fósforo y nitrógeno. (Lu et al., 2012), por lo cual se requiere desarrollar regional o localmente coeficientes de exportación específicos para estimar las cargas de nutrientes en los cuerpos de agua. (Shrestha et al., 2008).

El primer modelo para su determinación fue desarrollado en América del Norte en 1970 y principalmente usado para estimar la relación entre uso de suelo y

eutrofización de los lagos (Reckhow and Simpson, 1980). Luego diversos autores han desarrollado coeficientes de exportación para sitios específicos como Rast y Lee (1983), Loehr (1989), Frink (1991), Mcfarland (2001) y Shretsha (2008). Se evidencia una notoria diferencia de valores entre las zonas de estudio reportadas a nivel nacional (Anexo 1) y mundial, lo cual permite comprender el alto rango de variabilidad de los coeficientes de exportación de nutrientes, donde las diferencias tienen un amplio rango con respecto a distintas zonas en estudio para un mismo nutriente.

Tabla 2: Coeficientes de exportación de nutrientes para cada uso de suelo reportados en la literatura.

Uso de suelo	N total (kg/ha/año)	P total (kg/ha/año)	Fuente
Bosque	38	0,90	Shretsha et al., 2008 Japón
	0,6	0,20	Mcfarland et al., 2001 EE.UU
	2,4	0,10	Frink et al., 1991, EEUU
	6,7	0,64	Oyarzun et al., 1997 Chile
Agricultura	52,5	0,36	Shretsha et al., 2008 Japón
	5,4	1,04	Mcfarland et al, 2001 EE.UU
	7,6	0,54	Frink et al., 1991, EEUU
	11,34	0,93	Oyarzun et al., 1997 Chile
Urbano	6,9	0,18	Shretsha et al., 2008 Japón
	10	2,23	Mcfarland et al., 2001 EE.UU
	13,4	1,7	Frink et al., 1991, EEUU

Fuente: Extraído de Frink et al., 1991; Oyarzun et al., 1997; Mcfarland et al., 2001 y Shretsha, 2008.

3.8 Análisis de bibliografía.

Los estudios anteriores analizados en el mundo coinciden con los autores presentados en la tabla anterior, donde se destaca que algunos poseen un alto número de microcuencas en estudio y un mayor rango de estudio que permite caracterizar mejor las variables en el tiempo. Por ejemplo, Shretsha, (2008) analizó 10 microcuencas por un período de 5 años para usos de bosque, agrícolas y urbanos. En Chile, se registran los estudios realizados en el sur por Oyarzun, (1997) donde se han estudiado cuencas de la cordillera de la costa y del lago Rupanco, con usos de suelo ganaderos, agrícolas y de bosque nativo, Cárdenas, 2007 presenta registros de bosque nativo y plantaciones forestales. Las principales limitaciones de estos estudios reconocen la dificultad en la obtención de coeficientes donde se presentan usos de suelo heterogéneos la influencia de actividades antrópicas y las restricciones de tiempo y presupuesto para monitorear la calidad del agua a escalas espaciales y temporales que permitan tener un mayor número de registros y variabilidad.

4. PROBLEMÁTICA

4.1. Contexto general.

El manejo de los recursos hídricos a nivel mundial es una situación cada vez más crítica, debido a una serie de factores como el aumento de la población, actividad antrópica, políticas económicas, distribución del recurso y factores climáticos que han condicionado su calidad, cantidad, flora y fauna presente asociada al recurso. Entre estos factores, el crecimiento de la población humana ha planteado demandas cada vez mayores tanto a los ecosistemas acuáticos como terrestres y se estima que entre un tercio y la mitad de la superficie de la tierra se ha transformado; hemos

cambiado drásticamente el mundo mediante la limpieza de tierras, la agricultura, la silvicultura, la ganadería, urbanización y alteración de los ciclos hidrológicos (Vitousek *et al.*, 1997). Estos cambios en el uso de suelo de las cuencas hidrográficas sin una planificación territorial acertada han desencadenado una serie de consecuencias que alteran el adecuado funcionamiento del medio y su capacidad para soportar alteraciones. Se presentan requerimientos de plantas de tratamiento para sostener a la población y mayores descargas reguladas y no reguladas a los esteros, también se destaca la instalación de industrias que necesitan el aprovechamiento de fuentes de agua como arroyos para su funcionamiento, mediante la captación y descarga de efluentes, disminuyendo la calidad del recurso y se enfrentan graves problemas de contaminación asociados a metales pesados, patógenos, materia orgánica persistente, nutrientes y pesticidas, de manera global.

El problema más común con respecto a la calidad del agua es el exceso de nutrientes principalmente fósforo y nitrógeno, que deteriora considerablemente los usos benéficos del agua, sociales, ambientales y económicos (Programa Mundial de la Evaluación de los Recursos Hídricos, 2009). Debido a esto se requiere con urgencia la adopción de medidas, políticas y planes de gestión que permitan regular la actividad antrópica y la disponibilidad del agua para consumo humano y para sostener los servicios ecosistémicos de un lugar.

4.2. Situación en Chile.

La presión ejercida sobre los recursos hídricos se ha intensificado en proporción a la actividad productiva y económica como estrategia de desarrollo, esta estrategia se basa fuertemente en la promoción de las exportaciones de materia prima como el cobre, las frutas, la madera y su pulpa, el salmón y el vino, todas ellas grandes demandantes de agua en su proceso productivo y que, además, gran parte de ellas son producidas en las cuencas fluviales más pobres del país (FAO, 2015) donde se concentra la demanda de agua para el sector silvoagropecuario, este sector

productivo conformado por las actividades agrícolas, ganaderas y forestales representa un 73% de las extracciones consuntivas de agua (MOP, 2012). Lo anterior relacionado con los cambios de uso de suelo para sostener las actividades descritas anteriormente lo cual conlleva a un aporte de metales, pesticidas y fertilizantes con altas concentraciones de fósforo y nitrógeno. El nitrato es considerado el principal contaminante de los ecosistemas acuáticos y es característico de fuentes difusas por actividades agrícolas y el uso intensivo de fertilizantes (Oyarzun & Huber, 2003), que alteran la calidad del agua a través de la contaminación de esteros, ríos y lagos.

Para sostener las actividades productivas del país se ha transformado el paisaje significativamente y las principales causas de transformación del paisaje en el centro y sur del país fueron en un inicio la habilitación de terrenos para la agricultura, y, posteriormente, la expansión de las plantaciones forestales incentivadas por un fuerte subsidio estatal. En el centro sur de Chile el avance de las plantaciones forestales, explica gran parte de los cambios en las últimas décadas. El 40.1 % del incremento neto ocurrió sobre terrenos agrícolas, el 38.3 % ocupando áreas cubiertas por matorrales y el 21.1 % reemplazando el bosque nativo (Aguayo, 2009).

Según Lara et al. (1996), extensas superficies de bosque habrían sido sustituidas por plantaciones en distintas regiones del país transformándose en una de las principales causas de destrucción de estos ecosistemas.

4.2.1 Situación de la Región del Biobío y comuna de Cañete.

La región del Biobío corresponde a la octava región de Chile y se ubica en la zona centro-sur del país, cuenta con una superficie de 37.068 km² y una población estimada al año 2006 de 1.982.649 habitantes, se compone por las provincias de Arauco, Biobío, Concepción (INE, 2002). El clima presente se define como mediterráneo con una franja longitudinal, pero al interior se presenta una influencia

mediterránea lluviosa (CNCA, 2015). La región destaca por su gran variedad de atractivos turísticos, variedad de playas y lagos.

Los primeros cambios en las coberturas vegetacionales ocurren con la demanda de trigo producida por la fiebre del oro de California y Australia, el cual generó una exagerada degradación de los suelos cordilleranos, también en la cordillera de la costa, ubicada al sur del río Biobío, se desarrollaron las primeras plántulas de *Pinus radiata*, con el objetivo de controlar el proceso degradativo de los suelos y de satisfacer los requerimientos de madera de las faenas mineras de Lota alcanzando su máxima expresión en el siglo XX. (Cisternas et al., 1999).

En la ciudad de Concepción se encuentra un sistema de cinco lagos urbanos, se conoce que la gestión de estos lagos ha sido deficiente debido a que la cuenca de los lagos urbanos de Concepción ha sido alterada por el progresivo cambio en los usos y coberturas del suelo producto del crecimiento urbano (Almanza Marroquin *et al.*, 2016).

Las dos comunas cercanas al lago Lanalhue corresponden a la comuna de Cañete y Contulmo. En la comuna de Contulmo, destacan dos ecosistemas lacustres, que son lagos Lanalhue y Lleu-Lleu, los cuales se localizan en zonas de valles de la Cordillera de Nahuelbuta. Desde el punto de vista de intervención antrópica, a diferencia de otros sistemas lacustres, el Lago Lanalhue es el más impactado junto a la laguna Chica de la comuna de San Pedro de la Paz. (Fuentelba et al., 2010) debido a descargas irregulares, plantas de tratamiento y cambios en las coberturas vegetales que aumentan el nivel de nutrientes del lago.

4.2.2 Lago Lanalhue.

Entre los ecosistemas acuáticos continentales presentes en el país, se encuentran el sistema de lagos del altiplano, el sistema de lagunas hipersalinas de la segunda región, el sistema de lagos nord-patagónicos o araucanos, el sistema de lagos de

la isla de Chiloé, el sistema de lagos magallánicos o patagónicos y el sistema de lagos costeros de la región centro sur denominados como “Lagos Nahuelbutanos” (Parra et al., 2003). Este último conformado por seis cuerpos lenticos, entre ellos, el lago Lanalhue por estar inserto en un dominio geográfico común en el valle de la cordillera de Nahuelbuta, donde se desarrolla una intensiva actividad turística y recreativa e intervención forestal, la acumulación gradual de nutrientes, se ha acelerado en el lago Lanalhue por causas antrópicas relacionadas con el mal uso del suelo, el incremento de la erosión y por la descarga de aguas servidas domésticas (Gobierno Regional del Biobío, 2014).

Los problemas asociados a la eutrofización se han registrado durante varios años donde las comunidades han manifestado su preocupación debido a la proliferación de la planta *Egeria densa* o Luchecillo, planta acuática con crecimiento rápido y capacidad de reproducción vegetativa muy alta reportada particularmente en las áreas litorales y ribereñas del lago Lanalhue, donde en esta última adquiere características de planta invasora (MMA & Centro EULA, 2018) afectando directamente el turismo de la zona y el desarrollo local. Por lo tanto, surge la necesidad de evaluar los tipos de descarga al lago, ya sea de tipo puntual por efluentes de aguas servidas sin tratamiento como cargas difusas provenientes de la actividad agrícola y forestal. Se requiere de un enfoque integrado y complejo que considere las actividades que se desarrollan en la cuenca mediante la determinación de los coeficientes de exportación de nutrientes y de los usos de suelo presentes en la cuenca para obtener un estado acertado y representativo de la condición actual del sistema lacustre.

La figura 2 representa la tendencia al aumento de la eutrofización del lago Lanalhue entre los años 2000-2017 en base al procesamiento de imágenes satelitales del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) para los satélites TERRA y AQUA, “fue creado para capturar imágenes de la atmósfera, océano y superficie transmitiendo datos en 36 bandas, que van desde el espectro visible

hasta el infrarrojo térmico con resoluciones espaciales de 250, 500, 1000 metros.” (Instituto Espacial Ecuatoriano, s.f.), “MODIS fue diseñado por un equipo interdisciplinario de científicos con vasta experiencia en sensores remotos y ha dejado una gran experiencia y conocimiento en la comunidad científica” (Mas, 2011). Entre los distintos productos que ofrece la base de datos, se encuentra el Índice NDVI o Índice de vegetación de diferencia normalizada, definido como “un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y es particularmente sensible a la cobertura vegetal” (Departamento Provincial de Aguas, s.f). Se obtuvo los valores de NDVI cada 16 días en un período de 2000-2017 lo que permitió establecer una clara tendencia en aumento caracterizando la vegetación presente asociada a la clorofila en el lago para cada estación del año, lo cual coincide con el estado eutrófico que este tiene.

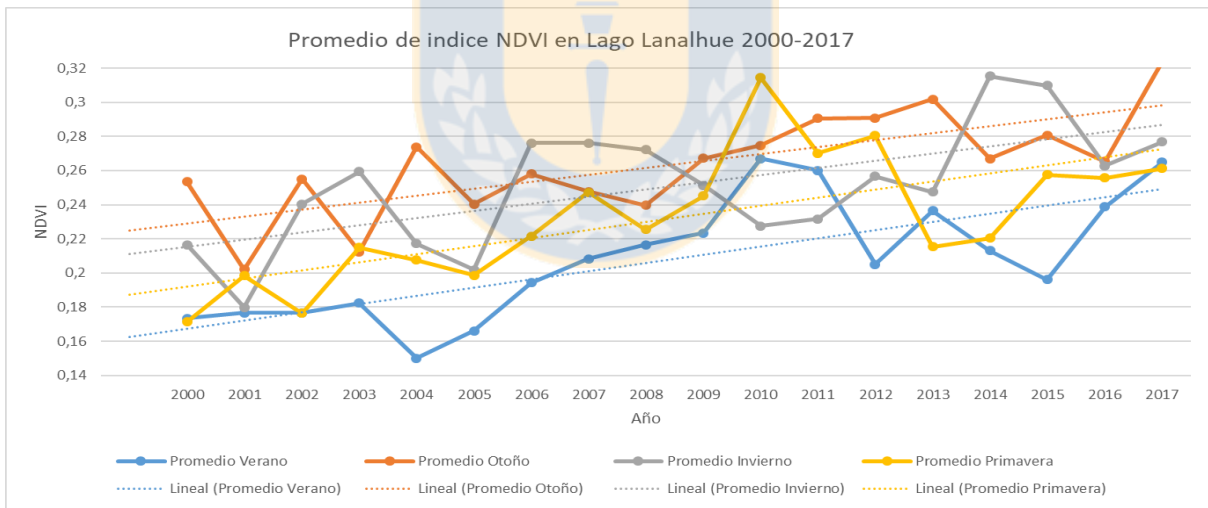


Figura 2: Promedio obtenido para el índice NDVI en el Lago Lanalhue para el período 2000-2017.

Fuente: elaboración propia en base a Imágenes Satelitales MODIS

5. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

5.1 Cuenca del lago Lanalhue.

El presente estudio comprende la cuenca del lago Lanalhue (Figura N°1), el cual se encuentra ubicado en 37° 55' (S) y 73° 19' (N) tiene una superficie de 31,9 km² y su cuenca un área de 325,9 km². La cuenca está localizada en la provincia de Arauco (VIII Región, Chile) y en medio de las comunas de Cañete y Contulmo, en la vertiente occidental de la cordillera de Nahuelbuta entre los ríos Lebu y Paicaví. Corresponde a uno de los sistemas lacustres costeros de mayor tamaño en la región y con influencia de la zona litoral marina. Su origen es tectónico debido a que, en el Pleistoceno, la plataforma de Arauco habría funcionado como una zona de deformación co-sísmica, donde movimientos de emersión y solevantamiento de las terrazas costeras lo cual obstruyó el drenaje natural y conformó el actual lago.

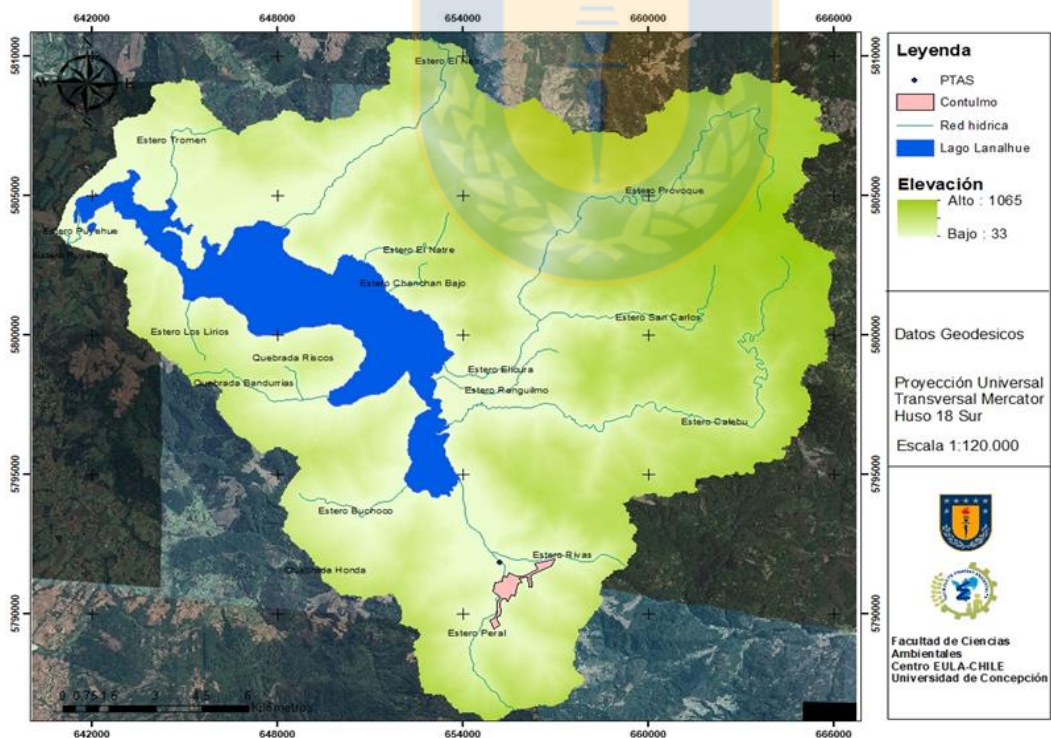


Figura 3: Cartografía de la cuenca del Lago Lanalhue, VIII Región del Biobío, Chile.

Fuente: elaboración propia en base a Modelo de elevación Digital.

5.2 Clima.

La cuenca presenta un clima templado húmedo de costa occidental, con influencia mediterránea (Fuenzalida, 1971). La precipitación anual varía entre los 1200 mm a 1500 mm, con precipitaciones presentes durante todos los meses del año. El máximo de temperatura se registra en el mes de febrero alcanzando en promedio los 18°C y un mínimo en el mes de julio de 9°C. De acuerdo a la clasificación climática de Wladimir Köppen corresponde a Cbf que es un clima marítimo de costa occidental. (Centro EULA, 2018).

5.3 Geología y Geomorfología.

Con respecto a los componentes geológicos, la cuenca se compone de cinco grandes unidades, asociados a la cordillera de Nahuelbuta, en sus vertientes sur y norte respecto al lago. Los materiales más antiguos predominan en la vertiente sur, asociados a Silúrico-Carbonífero-Pérmico y en la vertiente norte, donde prevalecen materiales del Paleozoico-Triásico (Centro EULA, 2018). La cuenca lacustre está conformada por rocas cristalinas y metamórficas, la franja más cercana al litoral, se estructura en rocas sedimentarias clásticas y sedimentos de origen marino, fluvial y eólico. (Parra et al., 2003). La geomorfología de la provincia de Arauco presenta dos grandes unidades de relieve costero: cordillera de Nahuelbuta y Planicie litoral, modeladas en niveles de terrazas y campos de dunas. (Gobierno Regional del Biobío, 2014).

5.4 Hidrografía.

La alimentación principal la recibe en sus riberas nororiental, oriental y suroccidental a través de los esteros Tromen, El Natri, Elicura, Ranquildo y El Peral, respectivamente y desagua a través del estero Puyehue. La red de drenaje se

caracteriza por distintos patrones y densidades de canales, debido al control geológico y estructural del área. (Parra et al., 2003). En la plataforma terciaria, se observa un patrón de drenaje paralelo, esto se debe a una adaptación de los cursos fluviales a los lineamientos estructurales, aquí la densidad de drenaje es gruesa debido a la permeabilidad de las rocas lo que permite el desarrollo de valles encajonados (Ferraris y Bonilla, 1981).

En el área de interés se identifican 18 grandes compartimentos hidrográficos, configurados por el relieve y la red topográfica de drenaje, destacando 14 que están directamente asociados a las microcuencas de drenaje de cada uno de los ríos y esteros presentes en la cuenca, dos sectores de planicies ubicadas en el desagüe del lago y a los dos elementos hídricos de mayor relevancia: el lago Lanalhue y su estero de desagüe. (MMA & Centro EULA, 2018).

5.5 Vegetación y uso del suelo.

La zona de estudio forma parte de la Ecorregión Valdiviana que corresponde al único bosque templado lluvioso de Sudamérica y el tercero más grande del mundo, actualmente es uno de los 34 sitios prioritarios o hot spots en materia de biodiversidad a nivel global. (MMA & Centro EULA, 2018). La cordillera de Nahuelbuta se caracteriza por contener alta riqueza específica respecto al bosque templado de Chile, debido a que se encuentra inserta en una transición climática que permite la convergencia de formaciones vegetales provenientes de climas mediterráneos y templados lluviosos (Villagrán & Hinojosa, 1997). Con respecto a la cuenca del lago Lanalhue, en la parte más alta todavía existen especies de Roble y Raulí. A su vez, en las quebradas más profundas se observan remanentes de vegetación nativa, con especies de Olivillo, Peumo, Boldo, Avellano, Litre, Maqui y Canelo (Parra et al., 2003). Hacia el borde costero, es posible encontrar vegetación nativa asociada a los cursos de agua y/o lugares de difícil ocupación, con pequeños bosquetes con especies como Peumo (*Cryptocaria alba*), Boldo (*Peumus boldus*),

Meli (*Amomyrtus meli*), Bollén (*Kagenekia oblonga*), Avellano (*Gevuina avellana*) y Maqui (*Chusquea maqui*) (Gobierno Regional del Biobío, 2014). En la tabla siguiente se representa las áreas respectivas para la cuenca y el lago Lanalhue, donde se destaca el uso relacionado al turismo y el grado eutrófico en el cual se encuentra.

Tabla 3: Características de la cuenca del lago Lanalhue.

Ecosistema acuático	Superficie(km ²)		Uso actual	Grado trófico
	Cuenca	Lago		
Lago Lanalhue	328	31,9	Turismo	Eutrófico

Fuente: Proyecto análisis de riesgos de desastres y zonificación costera, Región del Biobío. Expediente comunal Contulmo. Centro EULA; M.M.A; C.R.U.B; GORE del Biobío, 2014 a partir de Parra et al., 2003.

5.6 Ámbito territorial.

Con respecto a los asentamientos urbanos presentes, se destaca que un 50% de la superficie del lago Lanalhue, pertenece a la comuna de Cañete y su principal uso el turismo. El otro 50% pertenece a la comuna de Contulmo. En la cuenca del lago solo se presenta esta última que posee un área de 961,5 Km² y una población de 5838 habitantes (INE, 2002). La principal actividad económica de la zona corresponde a la agricultura, ganadería, caza y silvicultura, comercio, hoteles y restaurantes y en menor proporción actividades de transporte, almacenamiento y comunicaciones (BCN, 2015).

El patrimonio urbano y arquitectónico se concentra en el área urbana de Contulmo; básicamente corresponde a una Zona de Conservación Histórica (ZHC) que incluye un conjunto de 37 construcciones patrimoniales. Con respecto al patrimonio cultural indígena, los principales sitios de significación cultural mapuche de la cuenca del

lago Lanalhue se localizan en el valle del Elicura, 10 km al norte de la localidad de Contulmo, donde existen tres localidades; Calebu, San Ernesto y Elicura. (Centro EULA, 2018).

Contulmo se abastece desde dos fuentes superficiales del tipo barreras. Las captaciones se abastecen desde los esteros Contreras y El Peral respectivamente y la disposición final de los efluentes del sistema de alcantarillado de aguas servidas de Contulmo considera la descarga actual y futura al estero El Peral, aguas debajo de la planta de tratamiento. (Municipalidad de Contulmo, 2015).

6 METODOLOGÍA

6.1 Supuestos:

- ❖ No se considera deposición atmosférica.
- ❖ El período de estudio fue establecido como estación de invierno (3 meses).
- ❖ Las concentraciones con valores bajo el límite de detección se consideraron con el valor límite de 0,01 mg/L.
- ❖ Las coberturas de uso de suelo sobre 70% son representativas para toda la microcuenca, por lo tanto, las categorías menores no se consideran parte de las exportaciones.

6.2 Objetivo I: Caracterizar los diferentes usos del suelo de la cuenca del lago Lanalhue.

- ❖ **Delimitación de la cuenca hidrográfica a través de SIG.**

Para delimitar la cuenca del lago Lanalhue se utilizó un Modelo de Elevación Digital (DEM) de la región del Biobío con tamaño de celda de 12,5mx12,5m proveniente del satélite ALOS PALSAR y facilitado por el Proyecto de Ordenamiento Territorial de la Cuenca del Lago Lanalhue. Se aplicaron las herramientas del sistema de información geográfica ArcGIS 10.1 de relleno, dirección y acumulación de flujo con una condicional de 100 celdas. Se proyectó al sistema de coordenadas WGS 1984 UTM Zona 18 Sur y se recortó a la zona de estudio para obtener la red hídrica y delimitar la cuenca del lago (Anexo 2).

❖ **Parámetros morfométricos**

Con el objetivo de caracterizar los procesos hidrológicos de cada microcuenca se calcularon los parámetros morfométricos, todas las operaciones se realizaron mediante el programa de información geográfica ArcGIS 10.1 de la siguiente manera:

- Área y perímetro de la cuenca: Mediante la utilización de la herramienta de cálculo de geometría se obtuvo la superficie en las unidades respectivas.
- Elevaciones: Las elevaciones fueron calculadas a través de estadística zonal mediante la utilización del modelo de elevación digital de la cuenca en estudio, lo cual permite calcular valores promedios, mediana, máximo y mínimo.
- Largo del cauce principal: Con la utilización de las capas de dirección de flujo y la herramienta longitud de flujo se obtuvo el largo del cauce principal expresado en las unidades correspondientes.

- Índice de compacidad (IC): Este índice compara el perímetro de una cuenca con el perímetro de un círculo con igual superficie que la cuenca. Se utiliza la siguiente fórmula para calcular este factor:

$$IC = 0,282 * \frac{Pcca}{\sqrt{Acca}}$$

La clasificación para cada parámetro obtenida de la Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas (2010), se tiene que:

1. IC= 1,00 - 1,25: Cuenca redonda a oval redonda
2. IC = 1,25 - 1,50: Cuenca de oval redonda a oval oblonga
3. IC = 1,50 - 1,75: Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga

- Índice de Circularidad (Kc): Este índice permite comparar el área de la cuenca con el área de un círculo cuyo perímetro es igual al perímetro de la cuenca. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$Kc = 4 * \pi * \frac{Acca}{Pcca}$$

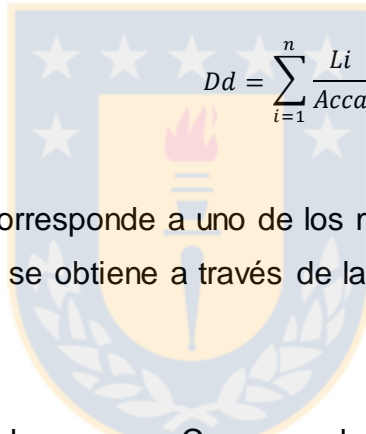
- Factor de Forma de Horton (Kf): Corresponde a la razón entre el ancho medio de la cuenca (B) dividido por su largo a través del cauce principal hasta la divisoria (L). Manifiesta la tendencia de la cuenca hacia las crecidas. Cuando Kf es similar a 1, representa una cuenca redondeada, cuando Kf es bajo, se caracteriza una cuenca alargada sujeta a crecientes de menor magnitud.

$$Kf = \frac{B}{L} , \quad B = \frac{Acca}{L} \quad \text{luego,} \quad Kf = \frac{Acca}{L^2}$$

- Razón de elongación (Re): Es la razón existente ente el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma. La fórmula propuesta es la siguiente:

$$Re = 1.128 * \frac{\sqrt{Acca}}{L}$$

- Densidad de drenaje: Este parámetro mide la capacidad de drenaje de la cuenca y relaciona el área de la cuenca y el largo total de los cauces. Generalmente presenta valores entre 0,5 y 3,5 km/km².



$$Dd = \sum_{i=1}^n \frac{Li}{Acca}$$

- Orden de Strahler: Corresponde a uno de los métodos de jerarquización de una red de drenaje y se obtiene a través de la herramienta clasificación de arroyos.
- Pendiente media de la cuenca: Corresponde al grado de inclinación del terreno, expresado en porcentaje, donde se tiene que el proceso de degradación al cual se ve sometida una cuenca hidrográfica, al igual que el caudal máximo están influenciados por la configuración topográfica (Gaspari et al., 2012). Se calculó utilizando el Modelo de Elevación digital de la cuenca y las herramientas de ArcGIS. 10.1.
- Pendiente media del cauce: A través del método de elevaciones extremas con los valores de altura máxima, altura mínima y la longitud del cauce principal se calcula la pendiente media del cauce como sigue:

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} * 100$$

- Tiempo de concentración El tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca. Se calculó a través de los métodos propuestos en el Manual de Carreteras, de acuerdo a las siguientes formulas.

1. Normas españolas:

$$T_c = 18 * \frac{L^{0,76}}{S^{0,19}}$$

2. California Culverts Practice (1942):

$$T_c = 57 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385}$$

3. Giandotti:

$$T_c = 60 * \frac{4A^{0,5} + 1,5L}{0,8Hm^{0,5}}$$

- Donde, A= Área de la cuenca (km²); L= Longitud del cauce (km);
Hm= Diferencia de nivel en metros ente la cota media de la cuenca y la salida.
- Perfil Longitudinal del cauce: A través de la extensión ArcHydro 10.1 se obtiene el cauce principal de la cuenca para luego, con el modelo de elevación digital interpolar el cauce con las alturas y finalmente en la barra de 3D Analyst obtener el grafico de perfil de alturas.

- Curva hipsométrica: La curva hipsométrica indica el porcentaje de área de la cuenca o bien la superficie de la cuenca que existe por encima de cierta cota determinada. De acuerdo a esto, se utilizó el modelo de elevación digital de cada microcuenca y se reclasificó para un número de 20 clases, luego a través de estadística zonal como tabla se obtiene el área entre curvas para una altura determinada, lo que permite procesar los datos en Excel y obtener los gráficos que representan la distribución acumulada de las elevaciones en la cuenca.
- Curva Numero (CN): El Servicio de Conservación de Suelos (SCS) desarrolló un método empírico para el cálculo de la transformación lluvia-escorrentía, que surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo en varios estados y para distintas condiciones de humedad antecedente. Para estandarizar estas curvas, se definió un número adimensional de curva (CN), tal que $0 \leq CN \leq 100$. Para superficies impermeables, $CN=100$; para superficies naturales $CN < 100$ y superficies sin escurrimiento $CN=0$. (Segovia et al., 1999). Esto se calculó a través de sistemas de información geográfica de acuerdo a los datos presentes en el catastro de clases de suelo del CIREN (2010) y los porcentajes de usos de suelo en la base de datos de CONAF (2015).

❖ **Definir los usos de suelo presentes a través de coberturas y herramientas de SIG.**

Para caracterizar los diferentes usos de suelo presentes en la cuenca, se descargó una capa proveniente del Sistema de Información Territorial de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) del año 2015, la cual fue recortada a la zona de estudio a través de ArcGIS 10.1 (Anexo 3). Se presentan los siguientes usos de suelo; Bosque Mixto, Bosque Nativo, Matorral, Monocultivo Forestal,

Renoval Bosque Nativo, Sin vegetación, Terrenos Húmedos, Urbano y Uso Agropecuario.

6.3 Objetivo II: Seleccionar microcuencas representativas de los diferentes usos de suelo.

Para la delimitación de microcuencas se supuso un porcentaje de representatividad para el uso de suelo mayor o igual al 70% y se utilizaron los mismos procedimientos que para la delimitación de la cuenca del lago (Anexo 4).

❖ Identificar las áreas con mayor porcentaje de cada uso de suelo y delimitar microcuencas

La mayoría de las cuencas hidrográficas se componen generalmente de una variedad de diferentes usos de suelo. Las microcuencas seleccionadas deben presentar usos de suelo relativamente homogéneos para lograr coeficientes de exportación representativos (Oyarzun et al., 1997). La proporción de los principales usos del suelo sobre cada sitio de monitoreo se puede determinar mediante la superposición del mapa de uso del suelo en la red de drenaje generada utilizando herramientas de análisis espacial (Shrestha et al., 2008). Por lo cual se analizó el mayor porcentaje de uso de suelo presente en las microcuencas a través de sistemas de información geográficos mediante una cobertura de suelos de la octava región procedente de la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2015), se delimitaron las microcuencas respectivas posterior al análisis visual de la red hídrica y los usos de suelo y las herramientas presentes en sistemas de información geográfica y la utilización de ModelBuilder en ArcGIS 10.1.

❖ Establecer puntos de muestreo

Los puntos de muestreo deben ser seleccionados de acuerdo a las microcuencas representativas de los usos de suelo, que en este seminario corresponden a 2 definidas para cada uso de suelo; uso agropecuario, plantaciones forestales y bosque nativo (figura 6). Para seleccionar los sitios de muestreo, se consideró excluir sitios que están fuertemente influenciados por fuentes puntuales en las cuencas. Los puntos de muestreo se establecen en base a los siguientes criterios:

1. Alto porcentaje de la categoría de uso.
2. Baja influencia de fuentes puntuales para efectos de obtención de muestras.
3. Cercanía a la red vial por efectos de obtención de muestras.
4. Punto de cierre de las microcuencas.

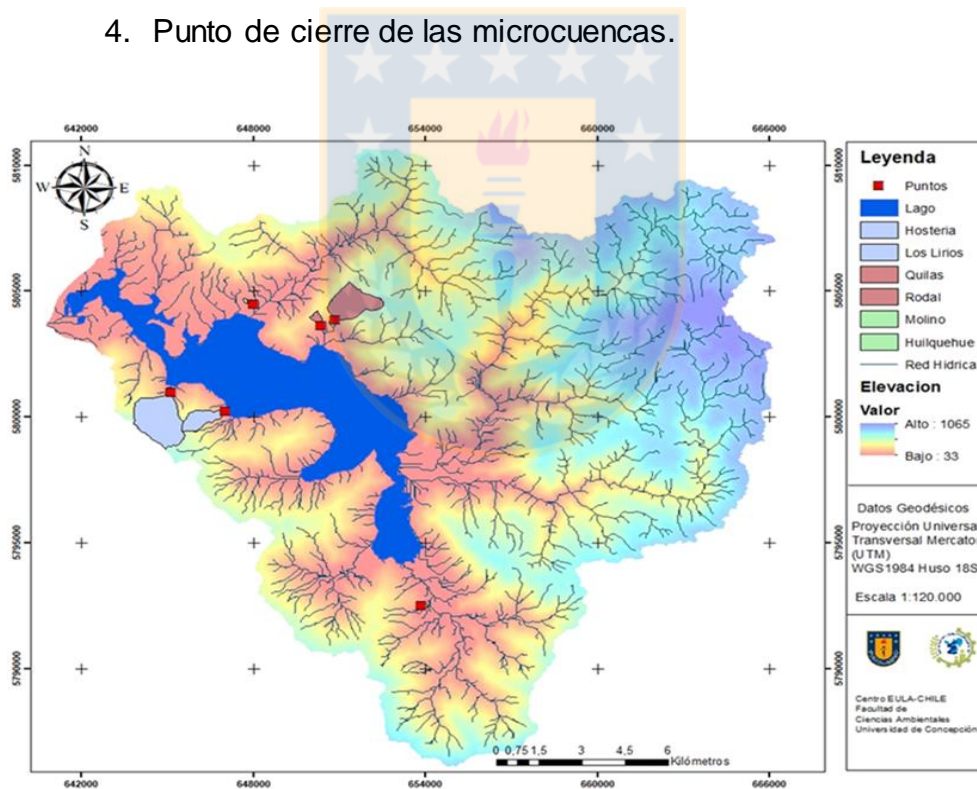


Figura 4: Puntos de muestreo en cada microcuenca.

Fuente: elaboración propia.

❖ **Frecuencia de muestreo:**

Se requiere información durante el cual la calidad de agua puede variar, así, las muestras deben extraerse en los períodos que representaran adecuadamente la calidad y sus variaciones” (Nch 411/1 of 1996). En este estudio se debe evaluar si la intensidad de precipitación afecta en el aporte de nutrientes por lo cual los muestreos se deben establecer en condiciones de lluvia y días soleados, pero no se consideran aportes por deposición atmosférica o mediciones directas en la precipitación. Se realizaron cuatro mediciones, dos eventos sin precipitación y dos con precipitación, donde algunas microcuencas presentan solo 3 muestreos, pero todas poseen ambas condiciones de estudio como se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4: Fechas y numero de muestreos realizados para cada microcuena.

N° de muestreo	Fecha de muestreo	Condición de precipitaciones	Promedio diario de precipitación
1	3 de Mayo 2018	No	-
2	24 de Mayo 2018	No	-
3	8 de Junio 2018	Si	17 mm
4	3 de Agosto 2018	Si	22,9 mm

Uso de suelo	Microcuena	N° de muestreos realizados
Monocultivo Forestal	Los Lirios	1-2-3-4
	Hostería	1-2-3-4
Agropecuario	Molino	2-3-4
	Huilquehue	2-3-4
Bosque Nativo	Quilas	1-2-3-4
	Rodal	2-3-4

Fuente: elaboración propia

Las mediciones se realizaron en base a lo descrito por (Mcfarland et al., 2001). Se debe combinar los flujos de descarga con mediciones discretas de las concentraciones de nutrientes tomadas durante eventos de tormenta y flujo de base para proporcionar cargas acumuladas masivas de TP y TN para cada sitio de muestreo para el período de estudio. En relación a esto se realizaron dos muestreos en condiciones sin precipitación y dos muestreos con precipitación de acuerdo a lo especificado en la tabla anterior.

Las mediciones se realizaron de acuerdo a lo presentado en la NCh 411/3 2014 sobre Calidad de agua y muestreo y se realizaron en el punto de cierre de las microcuencas.

6.4 Objetivo III: Determinar los coeficientes de exportación de nutrientes para los diferentes usos del suelo.

6.4.1 Obtención de muestras de agua y determinación de caudales.

Para realizar un análisis adecuado se requiere información durante el cual la calidad de agua puede variar, así, las muestras deben extraerse en los períodos que representaran adecuadamente la calidad y sus variaciones (Nch 411/1 of 1996).

❖ Muestras de agua:

1. Medición: En cada punto de medición se consideró la obtención de la muestra de agua en duplicado, llenando completamente el envase y cerrado, de tal manera que no quede aire sobre la muestra, lo cual limita la interacción de la fase gas y la agitación durante el transporte conservada en envases de 1 litro previamente marcados y cebados.

2. Identificación: Los recipientes que contienen las muestras se marcan en forma clara y durable, con la siguiente información; fecha, hora y ubicación de muestreo, descripción y nombre de la persona a cargo de la muestra.
3. Transporte: Los recipientes deben ser protegidos y sellados con el objetivo de evitar deterioro, pérdida de su contenido y posibles contaminaciones. Las muestras se transportan enfriadas con la ayuda de bolsas de hielo.
4. Almacenamiento: Las muestras fueron almacenadas en las cámaras de frío pertenecientes al laboratorio del Centro EULA.

- Caudales: Los puntos de medición de caudal se establecen según la red hídrica de las microcuencas seleccionadas y la información comparada en terreno. Se midió con un correntómetro marca Global Water, modelo FP111 instalados en el cauce principal de las microcuencas. Según la metodología descrita en Ven te Chow *et al* (1994), el caudal en un río se calcula utilizando las mediciones de velocidad y profundidad en una línea de marcación extendida a través de la corriente.

$$Q = \sum_{i=1}^n V_i * d_i * \Delta w_i$$

Donde Q es el caudal, V_i es la media de las velocidades a cierta profundidad, Δw_i corresponde al ancho de una sección de la corriente y d_i es la profundidad.

Una vez obtenidos los caudales se debe estandarizar los datos dividiendo los caudales por el área de cada microcuenca.

$$Q_{estandar} = \frac{Q_{calculado}}{A}$$

❖ Análisis físico-químico:

Los parámetros de pH, temperatura y conductividad son medidos en terreno a través de la utilización de un conductímetro y peachimetro portátil.

El análisis químico de las muestras se realizó en laboratorio según los métodos descritos en la tabla N°3, descritos en Standard Methods. (APHA, 2012).

- Determinación de Nitrógeno Total
 1. Se realizó a través del método de lectura por espectrofotometría visible el cual está basado en la oxidación alcalina de 100 a 110°C con sulfato de todos los compuestos nitrogenados a nitrito en presencia de cadmio tratado con sulfato de cobre e introducido en la columna de vidrio. El nitrito producido de esta manera es determinado por diazotización con sulfamnilamida y acomplejamiento con N-(1-naftil)-etilidiamina dihidrocloruro para formar un compuesto fuertemente coloreado que es medido colorimétricamente.
 2. Tratamiento de la muestra: En un frasco de vidrio con tapa resistente a alta temperatura se agregan 50 ml de muestra, luego se agregan 10 ml de reactivo oxidante y se lleva a autoclave por 30 minutos a una temperatura de 100 a 110°C para luego dejar enfriar a temperatura ambiente.
 3. Preparación de las columnas: Lavar las columnas con 200 ml de solución diluida de EDTA-NH₄Cl, activar la columna pasando a través de ella 100 ml de solución estándar para columnas. Descartar los primeros 50 ml, los siguientes 50 ml se deben recoger en un matraz Erlenmeyer para posteriormente agregar 2 ml de reactivo color y mezclar. Entre 10 min y 2 horas medir la concentración en espectrofotómetro a 543nm y registrar la concentración de cada columna para luego lavar con solución diluida. Con el objetivo de obtener el factor de la columna de cadmio.

4. Reducción en columna de cadmio: Se agregan 10 ml de buffer de borato y se lleva a 100 ml (factor de dilución 2), pasar las muestras por las columnas descartar los primeros 50 ml y recibir los siguientes 50 ml, lavar cada columna con solución diluida de EDTA-NH₄Cl entre cada muestra para evitar contaminación.
5. Desarrollo y medición de color: Agregar 2 ml de reactivo color y mezclar en 10 min y 2 horas después, medir la concentración en espectrofotómetro a 543 nm.

Determinación del Fósforo Total

El método de digestión de ácido sulfúrico – ácido nítrico recomendado en el Standard Methods y el método de espectrofotometría, para esto se tomaron 50 ml de muestra y se mezclaron con una porción diluida de 50 ml en un frasco de digestión para posteriormente añadir 1 ml de ácido sulfúrico concentrado y 5 ml de per sulfato de potasio, se calienta en equipo autoclave durante 30 minutos bajo una presión que va de los 98 KPa hasta 137KPa.

Luego de este proceso se enfría hasta temperatura ambiente y se agrega una gota de solución indicadora de fenolftaleína para neutralizar a un color rosa pálido con NaOH 1M, luego se llevan a 100 ml en matraces aforados con agua mili-Q. Una vez enrasadas las muestras, se transvasan una alícuota de 50 ml a un Erlenmeyer de 125 ml.

Determinación espectrofotométrica: Se adiciona a cada muestra 8 ml de reactivo combinado y se agita para luego dejar desarrollar color al menos 10 minutos. Antes de 30 minutos se leen en el espectrofotómetro a 880 nm. Se obtendrá la curva de calibración del equipo y se informaran los resultados que resulten menores al límite de detección. Cada lote de muestras se analizó un blanco y se evaluó un estándar tratados en paralelo a las muestras.

6.4.2 Estimación de cargas de nutrientes.

Según las fechas de muestreo presentadas en la tabla 4, el período de estudio concuerda con la estación de invierno, por lo cual para efectos de temporalidad se establecerán cargas correspondientes a esta estación.

La carga de material transportado durante un período de tiempo específico es función de la concentración del contaminante y el flujo de descarga, el cual es usualmente medido a intervalos. Las cargas de nutrientes para cada sitio se sumarán para el período de evaluación para obtener una carga acumulativa durante el período de estudio y se seleccionara los promedios de los datos disponibles obtenidos. (Shrestha y Kazama, 2008).

6.4.3 Estimación de coeficientes de exportación de nutrientes.

Se establece el supuesto que solo se consideran las categorías de uso de suelo; monocultivo forestal, bosque nativo y uso agropecuario, donde las categorías menores son despreciables.

❖ Regresión lineal múltiple

Para aislar la contribución de carga de diferentes fuentes de estas áreas de drenaje heterogéneas, se usaron técnicas de regresión múltiple para desarrollar los coeficientes de exportación de nutrientes para los principales usos de suelo en la cuenca basada en procedimientos descrito por Hodge y Armstrong (1993). La variable dependiente fue la carga anualizada de nutrientes en cada sitio por hectárea, mientras la variable independiente fue la fracción del área de drenaje sobre cada sitio representado por cada uso del suelo. (McFarland y Hauck, 2001).

El análisis de regresión lineal es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación entre variables, puede usarse para explorar y cuantificar la relación entre una variable dependiente o criterio (Y) y una o más variables llamadas independientes o predictoras (X1, X2, Xn). Para este estudio los coeficientes resultantes de los modelos de regresión múltiple definen la exportación optimizada en todos los sitios para cada categoría de uso de suelo en el período de tiempo evaluado. Todos los modelos de regresión múltiple se desarrollarán usando un cero interceptado forzado, por lo tanto, dando una carga de cero cuando todas las variables independientes son iguales a cero.

$$L_i = B_1X_{i,1} + B_2X_{i,2} + \dots + B_nX_{i,n} + E_i$$

- i = los sitios individuales utilizados en el modelo de regresión;
- L_i = la carga promedio mensual o anualizada en el sitio i en por hectárea para el período de tiempo (kg / ha / año o kg / ha / mes);
- B_1 a B_n = el coeficiente de exportación para n usos de suelo (kg / ha / año o kg / ha / mes);
- $X_{i,1}$ a $X_{i,n}$ = la fracción del área de suelo sobre el sitio i representado por n tipos de suelo;
- E_i = El error aleatorio asociado con la diferencia entre el valor medido y las cargas previstas que no se explica por el modelo para el sitio i .

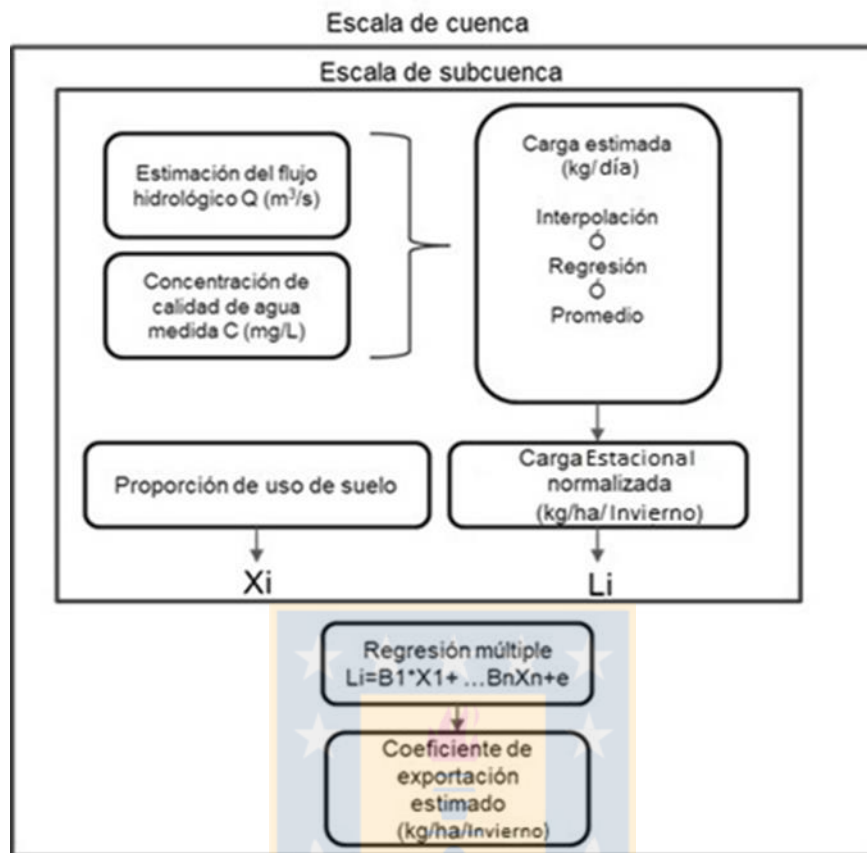


Figura 5: Esquema para estimar coeficientes de exportación de nutrientes por método de regresión lineal múltiple.

Fuente: Shrestha et al., 2008

La figura anterior representa un esquema para la metodología a utilizar en el presente estudio y que relaciona la concentración de nutrientes y el flujo de descarga para a través de medias, normalizar las cargas de nutrientes y con modelos de regresión múltiple obtener los coeficientes de exportación de nutrientes.

❖ **Media de cargas de nutrientes en el período de estudio.**

Los valores obtenidos de nitrógeno total y fósforo total exportados por cada microcuenca fueron calculados combinando la descarga promedio de agua para el

período con la concentración de nitrógeno y fósforo promedio, la exportación entonces fue obtenida dividiendo el nitrógeno total y fósforo total exportado ponderado a la estación de invierno coincidente con el período de estudio y asociado a 92 días, luego el valor fue normalizado por el área de la cuenca respectiva (kg/ha/invierno), según lo reportado por Oyarzun (1997), Oyarzun (2007) y Clesceri (1986). Estos valores fueron promediados entre las microcuencas de un mismo uso de suelo para obtener finalmente coeficientes para uso de monocultivo forestal, agropecuario y bosque nativo.

❖ **Diferencia entre cargas de nutrientes antes y después de eventos de tormenta**

Para obtener los coeficientes de exportación a través de la diferencia de carga de nutrientes, se calculó la concentración media de todas las muestras de nutrientes analizadas durante el período de muestreo por el flujo promedio, dividido por el área de la microcuenca para los eventos sin precipitación y con precipitación por microcuenca (kg/ha/invierno). La diferencia entre estas dos condiciones que representa el arrastre de nutrientes, lo cual está condicionado a la cantidad e intensidad de precipitación, intercepción y condiciones del suelo. La pérdida de nutrientes dependerá de la cantidad de suelo erosionado y la concentración inicial de nutrientes. Finalmente se promedió para cada uso de suelo (Monocultivo forestal, uso agropecuario y bosque nativo) obteniendo los coeficientes de exportación para nitrógeno total y fósforo total. Esta metodología se presenta como una propuesta para la medición de coeficientes de exportación de nutrientes.

En el presente estudio se aplicaron estas metodologías con el objetivo de comparar los alcances de cada una y determinar cuál es la más adecuada en este caso.

6.5 Objetivo IV: Cuantificar los coeficientes de exportación de nutrientes para los diferentes usos de suelo presentes en la cuenca.

Para cuantificar la exportación de nutrientes en la cuenca del lago Lanalhue con respecto a las categorías de uso de suelo en estudio, se relacionaron los coeficientes de exportación de nutrientes calculados en (kg/ha/invierno) con las superficies en hectáreas correspondientes a cada uso; monocultivo forestal, bosque nativo y uso agropecuario. De esta manera se obtiene un valor de exportación en kg/invierno para nitrógeno total y fósforo total.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Parámetros morfométricos y usos de suelo.

Para caracterizar los diferentes usos de suelo y los elementos presentes, primero se obtuvieron los parámetros morfométricos de la cuenca en estudio con el objetivo de comprender mejor las relaciones existentes y el comportamiento de la cuenca. Según Maidment (1992), una de las herramientas más importantes en el análisis hídrico es el estudio de las características morfométricas, dado que permite establecer parámetros de evaluación del funcionamiento del sistema hidrológico de una región y también como análisis espacial en el manejo y planificación de los recursos naturales. Al mismo tiempo, pueden proporcionar conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio y realizar comparaciones entre distintas cuencas hidrográficas.

Tabla 5: Parámetros morfométricos de la cuenca del Lago Lanalhue.

Cuenca del Lago Lanalhue		
Tipo de cuenca	Endorreica	
Area (km ²)	359,6	
Perímetro (km)	137	
Elevación máx. (msnm)	1063	
Elevación mín. (msnm)	33	
Largo del cauce principal (km)	40,9	
Suma de los cauces (km)	3933,2	
Densidad de drenaje	2,59	
Índice de compacidad	2,03	
Índice de circularidad	0,24	
Factor de forma de Horton	0,21	
Razón de elongación	0,52	
Pendiente media de la cuenca (m/m)	25,18	
Orden de red hídrica	5	
Tiempo de Concentración (min)	Giandotti	453,43
	California Culverts Practice	286,72
	Normas españolas	163,67

Fuente: elaboración propia.

El área calculada de la cuenca del lago Lanalhue corresponde a 359,6 km² y un perímetro de 137 km, en el cual la elevación máxima corresponde a 1063 msnm y mínima de 33 msnm y el largo del cauce principal corresponde a 40,9 km. Con respecto a la forma de la cuenca, el índice de compacidad tiene un valor de 2,03 lo cual demuestra que es mayor a 1,75 asociado a una cuenca oval a rectangular alargada, en relación al factor de forma de Horton, posee un valor de 0,21 cercana a la forma cuadrada con salida lateral. Con respecto a la densidad de drenaje de 2,59 es relativamente alta donde mayor porcentaje de la precipitación escurre a la salida de la cuenca con un tiempo de concentración promedio de 5 horas.

Con la utilización de información correspondiente al Catastro de Bosque Nativo de la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2015) y la observación en terreno se

caracterizaron los usos de suelo presentes en la cuenca del lago Lanalhue. En la tabla N°6 se disponen las superficies ocupadas para cada categoría, donde se destaca que el 43,09% corresponde a la actividad forestal ligada a las especies de pino radiata y eucalipto y asociado a las empresas forestales (Forestal Mininco y Forestal Arauco), a su vez este uso se relaciona con otras intervenciones y acciones sobre el territorio, como es la construcción de caminos y el transporte de materias primas hacia los centros industriales de transformación (Centro EULA, 2018), la segunda categoría con mayor porcentaje de uso corresponde al renoval de bosque nativo con un 22,47% asociado principalmente a zonas de alta pendiente y difícil acceso, el uso agropecuario con un 8,84% principalmente localizado en zonas bajas y de valles para el cultivo de hortalizas y papas, el porcentaje correspondiente a uso urbano corresponde a la zona de Contulmo y finalmente los usos de cuerpos de agua y terrenos húmedos que corresponden a humedales presentes y el lago Lanalhue.

Tabla 6: Superficie y porcentaje para cada categoría de uso de suelo presente en la cuenca del Lago Lanalhue.

Uso de suelo	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Bosque Mixto	765,92	2,13
Bosque Nativo	1786,8	4,98
Matorral	2806	7,82
Monocultivo forestal	15464	43,09
Renoval Bosque Nativo	8064	22,47
Sin vegetación	24,2	0,07
Terrenos húmedos	295,3	0,82
Urbano	183,15	0,51
Uso agropecuario	3171	8,84
Cuerpos de agua	3330,2	9,28
Total	35892	100

Fuente: Catastro de Bosque Nativo CONAF, 2015.

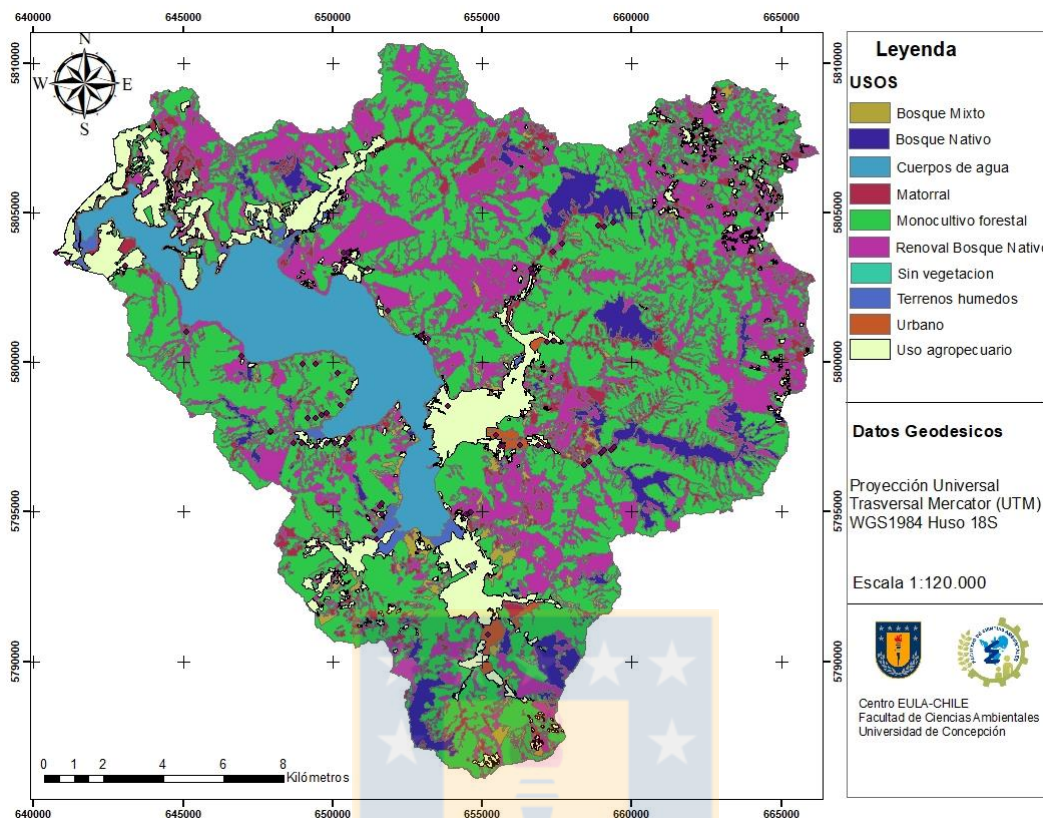


Figura 6: Usos de suelo de la cuenca del Lago Lanalhue.

Fuente: elaboración propia en base a registros de CONAF

La cuenca ha sufrido cambios importantes de uso de suelo, donde las principales consecuencias ha sido la conformación de un paisaje altamente fragmentado, con bosques y hábitats nativos que han sido reducidos, aumentando su aislamiento y propiciado su vulnerabilidad a la destrucción (Echeverría et al., 2006), dado que a mediados del siglo XX, se explotaron bosques de raulí, coigue y araucaria en la Cordillera de Nahuelbuta, sobreviviendo solo aquellas poblaciones ubicadas a gran altitud o en zonas de difícil acceso (Centro EULA, 2018), el aumento de las plantaciones forestales y la creación de densas redes de caminos desplazaron bosques y matorrales nativos (Pauchard et al., 2011). La agricultura también es un sector importante dentro de la cuenca dado que son comunes las chacras de papas,

acompañadas siempre de cereales y huerta, cultivadas con un sistema de siembra con rotación. Esto se observa bastante en el Valle de Elicura. Uno de los rubros más importantes es el cultivo de papas. Según el Censo Agropecuario del año 2007, en la comuna de Contulmo se cultivó papa en 201 explotaciones agropecuarias Mapuche, con una superficie total sembrada, a ese año, de 1.602,6 hectáreas (Centro EULA, 2018).

De lo anterior se demuestra que la cuenca se encuentra altamente intervenida por plantaciones forestales con un área equivalente a 15464 hectáreas, mientras que el uso agrícola representa 3171 hectáreas y el área de bosque nativo de 9850 hectáreas.

7.2 Objetivo II: Seleccionar microcuencas representativas de los diferentes usos de suelo.

Mediante el uso de sistemas de información geográfica ArcGIS 10.1, con utilización del modelo de elevación digital y verificación en terreno de la red hídrica se delimitaron microcuencas con un porcentaje mayor al 70% de cada tipo de uso de suelo en la cuenca del lago. Las unidades de drenaje seleccionadas representan las 3 categorías de uso de suelo con mayor intervención en la cuenca. Se seleccionaron 2 unidades de drenaje por cada categoría de uso de suelo; plantaciones forestales, bosque nativo y uso agropecuario. Las microcuencas seleccionadas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 7: Características de las microcuencas seleccionadas.

Uso de suelo	Nombre	x	y	% Monocultivo forestal	%Renoval bosque nativo	%Uso agropecuario
Monocultivo Forestal	Los lirios	645110	5801000	75%	20%	-
	Hostería	647025	5800223	82%	17%	-
Uso agropecuario	Molino	653837	5792508	-	7%	70%
	Huilquehue	647998	5804480	10%	-	90%
Bosque Nativo	Quilas	650856	5803868	0,01%	97%	
	Rodal	650361	5803648	1,4%	90%	-

Fuente: elaboración propia

Con respecto a la tabla anterior se puede afirmar que las superficies representativas delimitadas para cada uso de suelo corresponden a cuencas muy pequeñas con superficies inferiores a 20 km² según la clasificación de Campos (1998), por otro lado, lo propuesto por la Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas (2010), establece que áreas inferiores a 5 km² reciben el nombre de unidades de drenaje dado que presentan áreas inferiores a 5 km². “Las investigaciones hidrológicas han puesto de manifiesto que existe una diferencia significativa entre una cuenca pequeña y una grande. En una cuenca pequeña la cantidad y distribución del escurrimiento son influenciadas principalmente por las condiciones físicas del suelo y cobertura, sobre las cuales el hombre tiene algún control” (Campos, 1998). Además, según V.T Chow, (1994) una cuenca pequeña

puede ser definida como aquella que es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración y en la cual predominan las características físicas del suelo con respecto a las del cauce, en este sentido es de gran importancia caracterizar las microcuencas para obtener información esencial de su comportamiento.

7.2.1 Composición vegetal y caracterización del suelo presente en las microcuencas.

Con respecto a la composición vegetal de las unidades seleccionadas se destaca que presentan un 70% de representatividad y otras categorías asociadas como bosque mixto y matorral, las cuales se encuentran en menor porcentaje y para efectos de este estudio se consideran despreciables.

Según la tabla en Anexo 6 anterior y el Servicio Agrícola Ganadero (2011), las microcuencas de monocultivo forestal presentan tipos de suelo de las clases VI y VII, este último en mayor proporción y se caracterizan por ser suelos inadecuados para cultivos y limitado a pasto y forestales, tienen pendientes pronunciadas, susceptibles a severa erosión, pedregosidad, baja retención de humedad, alto contenido de sales o sodio y clima severo. En relación a las microcuencas de uso agropecuario presentan suelos de clase II, III, IV asociado a suelos planos, con ligeras pendientes, de buena permeabilidad en algunos sectores, pero en otra baja capacidad de retención de agua, además en menor porcentaje se presentan suelos de clase VII en ambas microcuencas. En relación a las microcuencas seleccionadas para uso de bosque nativo, ambas poseen clases de suelos VII con pendientes pronunciadas y susceptibles a erosión, en menor porcentaje en la microcuenca Quilas se evidencia suelo de la clase VI, suelos no aptos para laboreo, moderadamente escarpados, texturas finas a muy gruesas y abundante pedregosidad. Se identificó las texturas de suelo para cada microcuenca, las cuales indican el contenido relativo de partículas de diferente tamaño como la arena, limo

y arcilla en el suelo y tiene que ver con la facilidad con la que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra el suelo y lo atraviesa (FAO, s.f).

Las unidades no abarcaban necesariamente la superficie total sino una proporción de cada una, de esta forma se reconocen texturas moderadamente finas para la mayoría de los casos a excepción de la microcuenca Huilquehue que posee textura media y la microcuenca Rodal que no posee información. Las texturas moderadamente finas hacen referencia a una clase textural franco arcillo limosa, franco arcillosa o franco arcillosa arenosa, mientras que las texturas medias se presentan limosa, franca limosa, franca y franco arenosa (SAG, 2011). Las texturas arcillosas dan suelos plásticos y difíciles de trabajar, retienen gran cantidad de agua y de nutrientes debido a la microporosidad y a su elevada capacidad de intercambio catiónico, presentan una permeabilidad baja. La textura limosa presenta carencia de propiedades coloidales formadoras de estructura que impiden la aireación y la circulación del agua. (Gisbert et al.,2010).

Tabla 8: Riesgo de erosión potencial en cada microcuenca.

Uso de suelo	Microcuenca	Riesgo de Erosión Potencial
Monocultivo Forestal	Los Lirios	Severa – Muy severa
	Hostería	Severa
Agropecuario	Molino	Moderada - Muy Severa
	Huilquehue	Moderada
Bosque Nativo	Quilas	Severa – Muy Severa
	Rodal	Severa

Fuente: elaboración propia en base a CIREN, 2010

La información expuesta anteriormente fue recopilada de la base de datos del Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). El modelo se basa en el supuesto que la potencialidad de erosión es independiente del uso y manejo actual del suelo, es decir, el transporte de partículas del suelo son las que tendrían lugar en caso de no existir vegetación alguna como pérdidas máximas o potenciales.

En relación a esto, las microcuencas de monocultivo forestal presentan un riesgo de erosión potencial severa a muy severa similar a lo que ocurre en las microcuencas de bosque nativo, mientras que para el uso agropecuario se establece un riesgo de erosión potencial moderada y muy severa en el caso de la microcuenca Molino.

La erodabilidad del suelo es un índice que indica la susceptibilidad a la erosión y depende de las propiedades de cada suelo, se considera una propiedad dinámica, que cambia según las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo dentro de las cuales se destacan la granulometría, estabilidad de los agregados y contenido de humedad actual del suelo (Gayoso et al., 1999). Todas las microcuencas presentan una susceptibilidad de erosión moderada a baja. (Anexo 7)

7.2.2 Análisis morfométrico.

A continuación, en la tabla 9, se presentan los parámetros obtenidos para cada microcuenca en estudio.

Tabla 9: Parámetros morfométricos obtenidos para cada unidad de drenaje.

Microcuenca	Los lirios	Hostería	Molino	Huilquehue	Quilas	Rodal
Uso de suelo de cuenca	Monocultivo forestal	Monocultivo forestal	Agropecuuario	Agropecuuario	Bosque nativo	Bosque nativo
Área (km ²)	2,69	0,76	0,05	0,02	1,67	0,13
Perímetro (km)	6,76	3,99	1,05	0,81	5,48	1,67
Elevación mín. (msnm)	42	50	36	46	100	81
Elevación máx. (msnm)	580	458	118	69	582	289
Largo del cauce principal (km)	2,70	1,72	0,42	0,24	2,41	0,69
Suma de los cauces (km)	15,17	5,02	0,19	0,02	7,67	0,83
Densidad de drenaje	5,64	6,60	4,03	1	4,59	6,25
Índice de compacidad	1,16	1,29	1,32	1,61	1,19	1,30
Índice de circularidad	0,74	0,60	0,57	0,38	0,70	0,58
Factor de forma de Horton	0,37	0,26	0,28	0,34	0,28	0,27
Razón de elongación	0,68	0,57	0,60	0,66	0,60	0,58
Pendiente media de la cuenca (%)	31,97	28,10	16,85	11,32	41,30	33,10
Pendiente media del cauce m/m	0,19	0,23	0,19	0,09	0,30	0,20
Orden de Strahler	4	3	1	1	4	2

Fuente: Elaboración propia

El análisis de los parámetros morfométricos que se presenta a continuación se realizó en base a la Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas (Reyes et al., 2010) y Procesos del ciclo hidrológico (Campos et al., 1998).

❖ Uso de monocultivo forestal:

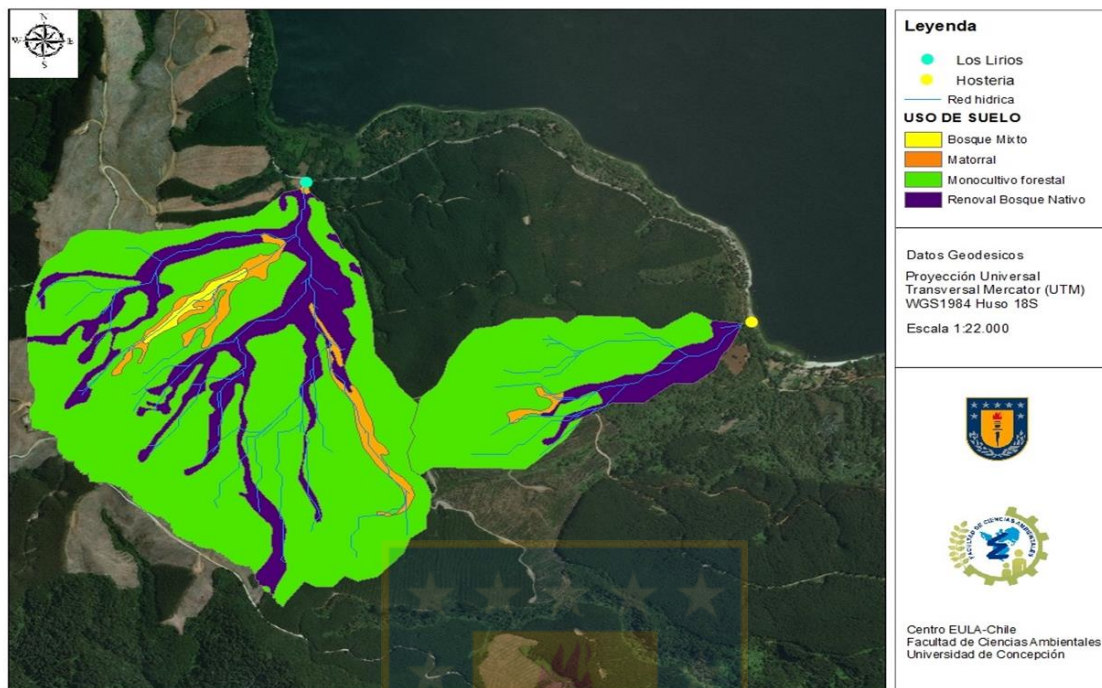


Figura 7: Microcuencas de monocultivo forestal.

Fuente: Elaboración propia en base a CONAF, 2015

Se encuentran camino al Camping Municipal del Lago y Hostería Lanalhue ruta P-702 Lincuyin en medio de predios forestales.

- **Los Lirios:** Representa un área de 2,69 km² y un perímetro de 6,76 km, contiene un 74,72% de plantaciones forestales donde se destaca la presencia de especies como *Pinus radiata* (Pino insigne) y *Eucaliptus globulus* (Eucalipto común) y en menor porcentaje de *Rubus ulmifolius* (Zarzamora) y *Peumus boldus* (Boldo).

La microcuenca tiene una elevación máxima de 580 msnm y mínima de 42m, el cauce principal tiene un largo de 2,70 km. Con respecto a su forma, el índice de compacidad de 1,16 y el índice de circularidad de 0,74 cercano a la unidad representa a una cuenca compacta redonda a oval redonda, la razón de elongación de 0,68 implica una forma más alargada y dado que el factor de forma de Horton es de 0,37 inferior a la unidad demuestra una cuenca alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, en general corresponde a una microcuenca con características ovaladas.

La densidad de drenaje es de 5,64 y un orden 4 que indica un alto grado de ramificación y mientras mayor sea la densidad de drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a condiciones de tormenta por lo está microcuenca tiene un drenaje eficiente relacionada, además, de una pendiente de 31,97% considerada muy fuertemente accidentado según la clasificación propuesta por Ortiz (2004) lo que se traduce en que una mayor proporción de precipitación escurre hasta la salida de la cuenca al tener suelos impermeables y con procesos erosivos, asociado a esto el tiempo de concentración de esta cuenca es bajo y corresponde a un promedio de 26,5 minutos indican que al producirse lluvias de larga duración e intensidad se presenta un riesgo de arrastre de sedimentos intermedio al comparar con su factor de alargamiento. (Montoya et al., 2009).

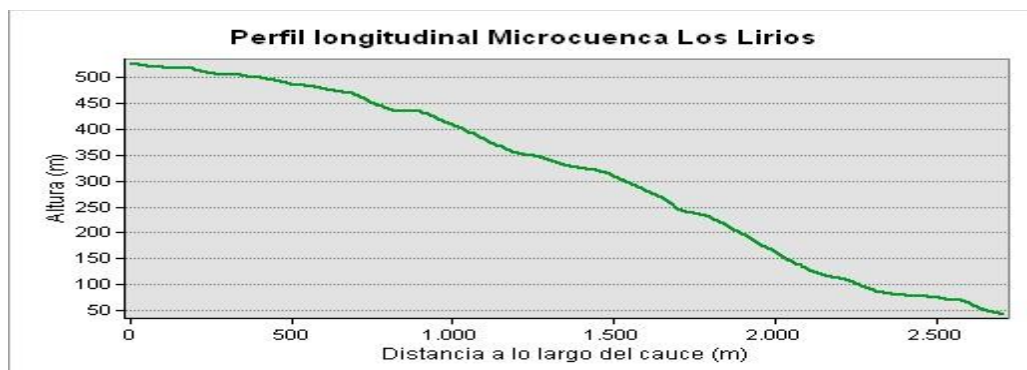


Figura 8: Perfil longitudinal de la microcuenca Los Lirios.

Fuente: elaboración propia en base a ArcGIS 10.1

La pendiente media del cauce corresponde al 19% lo que indica un tramo de pendiente fuerte de nivel accidentado a accidentado medio y velocidades altas que pueden remover cargas de fondo, además, la mayor parte del cauce se concentra en la parte alta y media de la cuenca, donde los límites para cada parte se encuentran a los 400 m.s.n.m y a los 250 m.s.n.m.

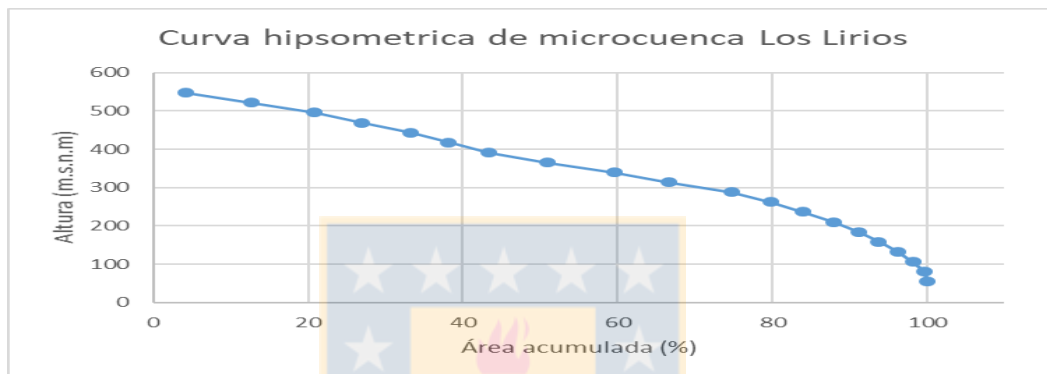


Figura 9: Cuenca hipsométrica de microcuenca Los Lirios.

Fuente: elaboración propia.

La figura anterior representa la curva hipsométrica o el estado de las elevaciones del terreno en función de las superficies correspondientes, en este caso el 60% de la cuenca se sitúa sobre los 340 m.s.n.m, además de acuerdo al ciclo erosivo y del tipo de cuenca se establece que se encuentra en una etapa de equilibrio y se define como una microcuenca geológicamente madura de pie de montaña.

- **Hostería:** Representa un área de 0,76 km² y un perímetro de 3,99 km, donde un 81,78% corresponde a monocultivo forestal que cuenta con especies como *Pinus radiata* (Pino insigne) y *Eucaliptus globulus* (Eucalipto común) y el porcentaje restante a especies nativas como *Peumus boldus* (Boldo) y *Nothofagus obliqua* (Roble).

La cuenca tiene una elevación máxima de 458 msnm y una mínima de 50 msnm, el cauce principal tiene un largo de 1,72 km. En relación a los parámetros de forma se tiene que el índice de circularidad y compacidad son 0,60 y 1,29 respectivamente lo cual conlleva a formas oval oblonga a oval redonda, pero con una razón de elongación de 0,57, lo que es inferior a la unidad, se considera una cuenca más alargada considerando el factor de forma de Horton de 0,26.

Con respecto a la densidad de drenaje se tiene un valor de 6,60 y orden 3 con dos o más tributarios de orden 2 o menor, se tiene un drenaje con una respuesta rápida frente a una tormenta evacuando agua en menos tiempo con ascensos en las corrientes y mayor erodabilidad, además, relacionado con una pendiente media de 28,10% de carácter fuertemente accidentado lo cual caracteriza una cuenca con suelos impermeables y de baja resistencia a la erosión, además de un tiempo de concentración bajo de 17,33 minutos presentado tendencia al arrastre de sedimentos.

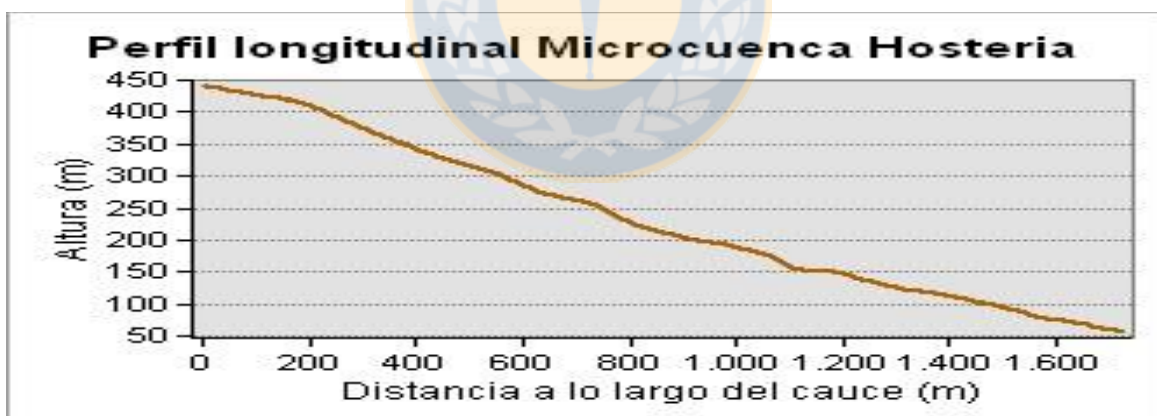


Figura 10: Perfil longitudinal de la microcuenca **Hostería**.

Fuente: elaboración propia en base a ArcGIS 10.1

La pendiente media del cauce tiene un valor de 0,23 muy parecido a la microcuenca Los Lirios, se considera un tipo de terreno accidentado a fuertemente accidentado,

donde los límites de la parte alta, media y baja de la cuenca se distinguen en los 300 m.s.n.m. y a los 150 m.s.n.m.

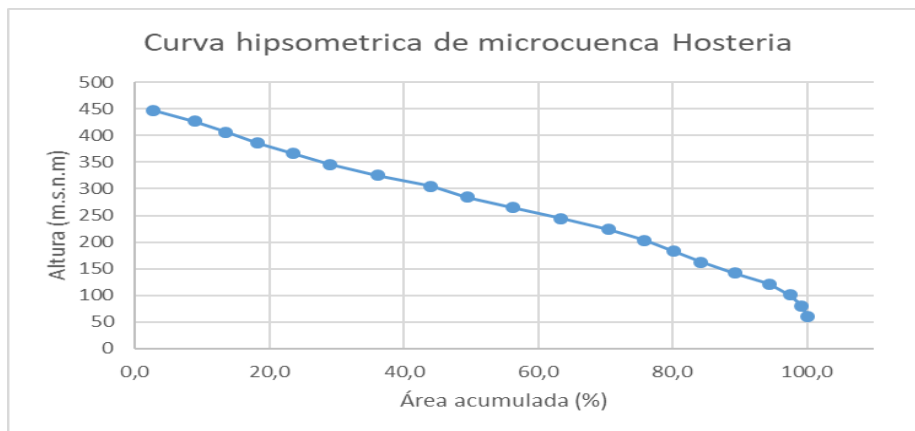


Figura 11: Curva hipsométrica de la microcuenca Hostería.

Fuente: elaboración propia en base a ArcGIS 10.1

En relación a la figura anterior se presenta que un 50% de la superficie de la microcuenca figura sobre los 285 m.s.n.m. y se condiciona con la relación lineal existente y la etapa de madurez en la que se encuentra la microcuenca asociada a una de pie de montaña.

❖ Uso agropecuario:

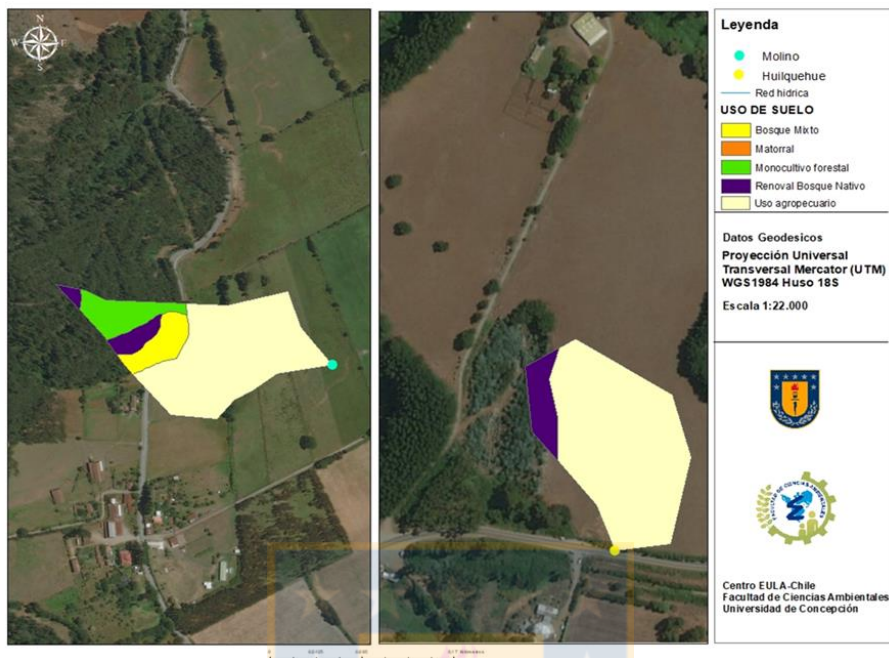


Figura 12: Microcuencas agropecuarias.

Fuente: elaboración propia

- **Molino:** Ubicada entre Contulmo y la Quebrada Buchoco (P-700 Contulmo-Buchoco) representa un área de 0,05 km² y un perímetro de 1,05 km, contiene un 69,64% de suelos agropecuarios con presencia de especies como *Holcus lanatus* (Heno blanco) y *Paspalum dilatatum* (Pasto miel) ambos de uso forrajero. Además, se evidencian especies como *Eucaliptus globulus* (Eucalipto común) y *nothofagus obliqua* (Roble) en menor proporción.

La cuenca tiene elevaciones máximas y mínimas de 118 y 36 msnm respectivamente, su cauce principal tiene un largo de 0,42 km. Los parámetros de circularidad y compacidad con valores de 0,57, 1,32 y respectivamente indican una cuenca con forma oval redonda a oval oblonga, además, el factor de elongación de 0,60 y factor de forma de Horton de 0,28 considerado bajo, representan microcuencas con formas alargadas por lo que se establece una forma oval y con características alargadas.

La densidad de drenaje en esta cuenca corresponde a 4,03 y un orden de 1 lo que implica un drenaje eficiente, bien drenado con altas velocidades de desplazamiento asociado a una pendiente media de 16,85% considerado como relieve accidentado lo cual indica suelos medianamente permeables. El tiempo de concentración en esta cuenca también es bajo de 8,36 minutos asociado a la superficie pequeña.

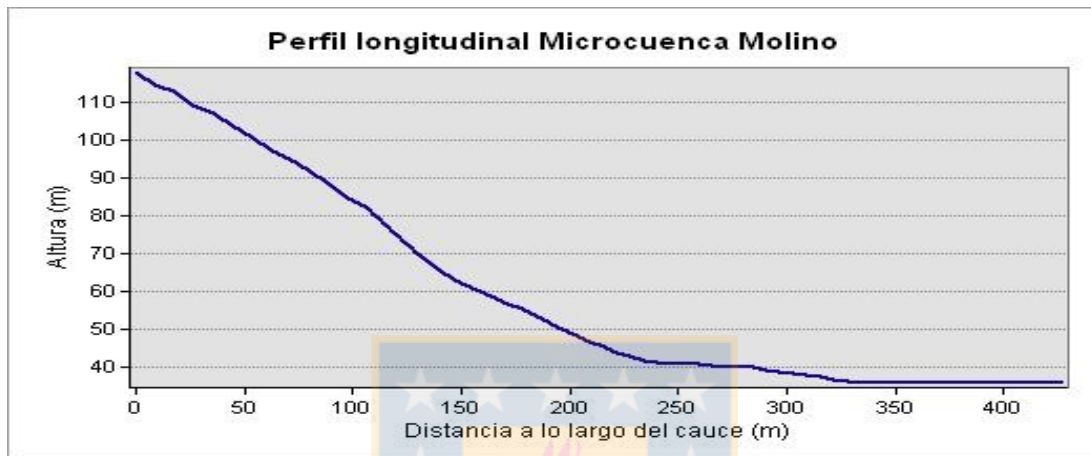


Figura 13: Perfil longitudinal de la microcuenca Molino.

Fuente: elaboración propia en base a ArcGIS 10.1

La pendiente del cauce en esta microcuenca corresponde a 0,19, lo cual se caracteriza como un terreno accidentado a fuertemente accidentado lo cual se representa en el perfil longitudinal propuesto. Los límites de las partes alta, media, y baja de la cuenca se presentan a los 80 m.s.n.m y a los 45 m.s.n.m.

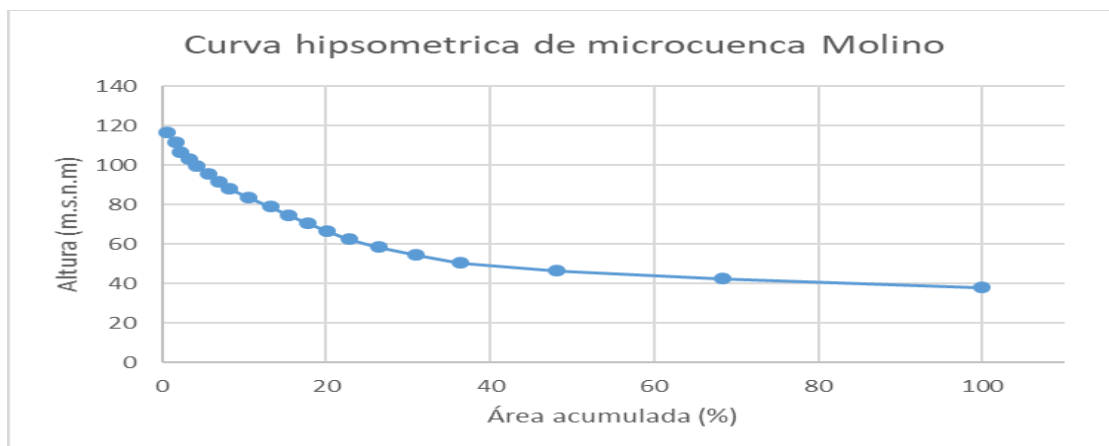


Figura 14: Curva hipsométrica de la microcuenca Molino.

Fuente: elaboración propia en base a ArcGIS 10.1

La curva hipsométrica de la microcuenca Molino presenta la mayor parte de su superficie se encuentra bajo los 50 m.s.n.m. Con respecto a su etapa de madurez se considera una microcuenca erosionada de valle.

- **Huilquehue:** Ubicada en la ruta 160 Tres Pinos-Contulmo, entre el Camping La Pasión y Huilquehue. Representa un área de 0,02 km² y un perímetro de 0,81 km, tiene un 90% de suelo agropecuario, cuenta con la presencia de especies como *Agrostis alba* (), *Holcus lanatus* (Heno blanco), *Paspalum vaginatum* (Chepica del sur) y *Paspalum dilatatum* (Pasto miel) y el porcentaje restante a la especie *Eucaliptus globulus* (Eucalipto común). En esta cuenca se tienen una elevación máxima de 69 msnm y una mínima de 46 msnm, un largo del cauce principal de 0,24 km, uno de los más cortos lo que está asociado a respuestas más rápidas con efectos de precipitación. (Campos, 1998).

Al analizar los parámetros de forma de circularidad de 0,38 está alejado de la unidad, el índice de compacidad de 1,61 indica una microcuenca oval oblonga a rectangular oblonga y el factor de Horton de 0,34 y un factor de elongación de 0,66 se caracteriza una cuenca medianamente alargada, pero con tendencia rectangular.

El valor de 1 en la densidad de drenaje considerada de bajo drenaje o medianamente pobre con un orden de corrientes de 1 y una pendiente de 11,32% caracteriza un relieve medianamente accidentado, refleja un bajo drenaje de la cuenca con alta resistencia a la erosión, y suelos permeables con vegetación donde el tiempo de concentración es de 8,76 minutos asociado principalmente a la pequeña superficie de la microcuenca.

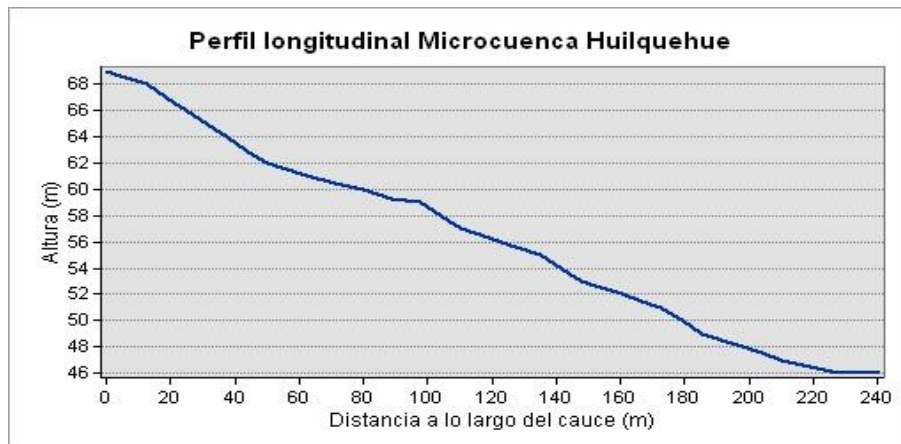


Figura 15: Perfil longitudinal de la microcuenca Molino.

Fuente: elaboración propia en base a ArcGIS 10.1

La pendiente del cauce principal en esta microcuenca corresponde a 0,09, esto indica un tipo de terreno suave a accidentado medio donde los límites de las partes alta, media y baja se visualizan en los 59 m.s.n.m y en los 52 m.s.n.m.

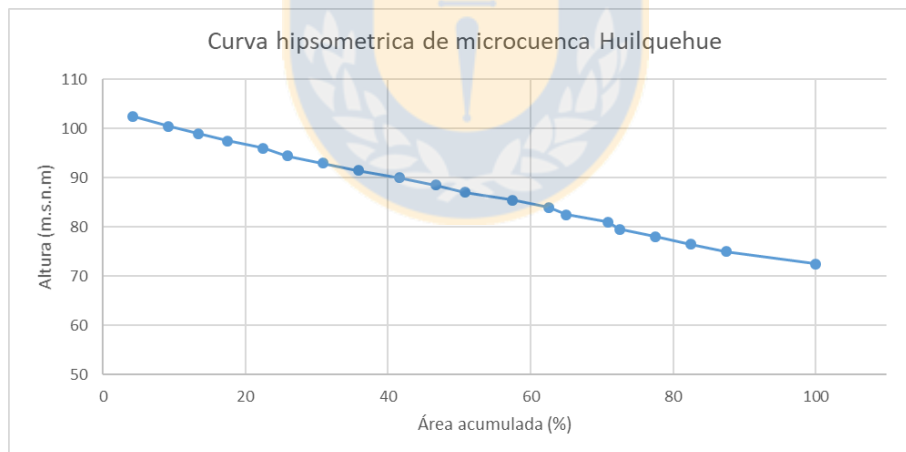


Figura 16: Curva hipsométrica de la microcuenca Huilquehue.

Fuente: elaboración propia en base a ArcGIS 10.1

La curva hipsométrica de la microcuenca Huilquehue representa una elevación mediana de 87 m.s.n.m, se encuentra en la transición de una etapa de desequilibrio geológicamente joven a una etapa de equilibrio geológicamente madura del tipo cuenca de meseta.

Uso de Bosque nativo:

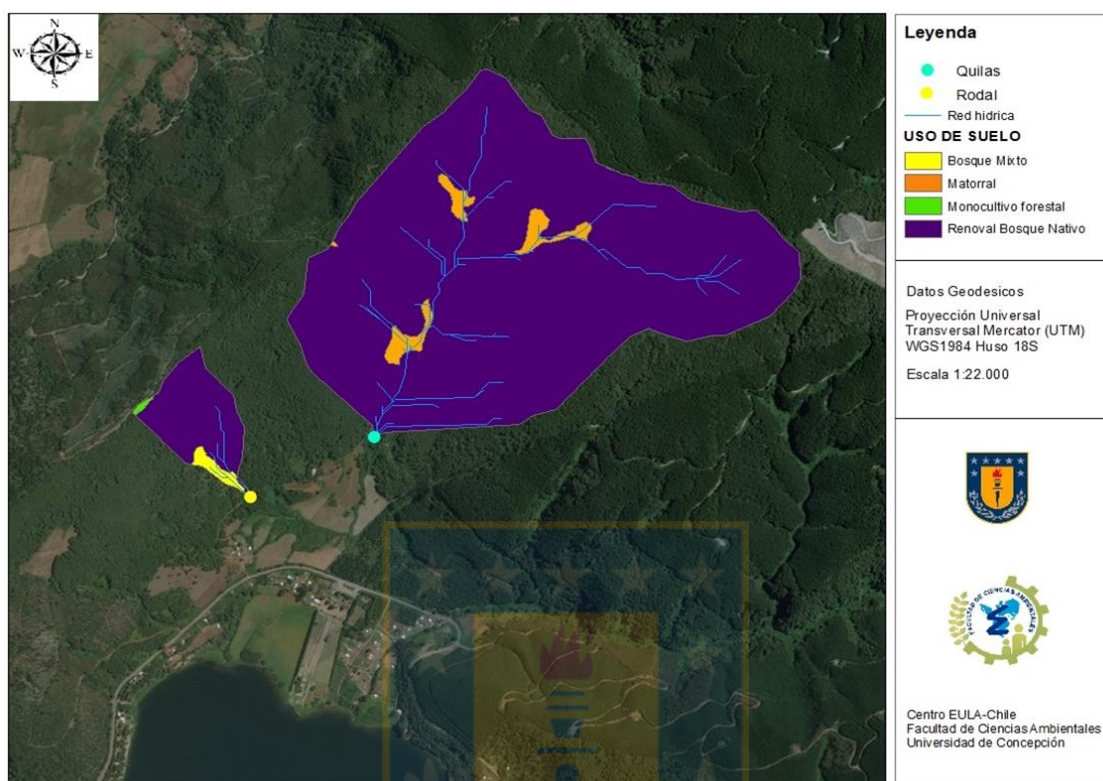


Figura 17: Microcuencas de bosque nativo.
Fuente: elaboración propia

Se encuentran ubicadas en el Fundo Reserva El Natri (km 42 de la carretera P-60 que une Contulmo y Cañete). Se compone por un parche de 310 hectáreas de bosque nativo en la comuna de Contulmo (principalmente renovación de 40 años dominado por roble y coigüe). El Natri tiene un pequeño sendero de un kilómetro y medio y está abierto -gratis- a los visitantes. En el bosque, además, se pueden encontrar especies con problemas de conservación y actualmente existe un Centro de Aves Rapaces. (Montalva, 2015).

Ambas unidades de drenaje poseen mayor porcentaje de bosque nativo asociado a especies como *Nothofagus obliqua* (Roble), *Nothofagus dombeyi* (coigüe), *Acacia*

melanoxylon (Acacia), Peumus boldus (Boldo) y Eucryphia cordifolia (Ulmo) y un menor porcentaje de Pinus radiata (Pino insigne).

- **Quilas:** Con un área de 1,67 km², un perímetro de 5,48 km, un porcentaje de 97,36% de bosque nativo, posee una elevación máxima de 582 msnm y mínima de 100 msnm. El cauce principal tiene un largo de 2,41 km, uno de los más largos entre las microcuencas analizadas.

En relación a la forma de la cuenca se caracteriza por tener valores de compacidad de 1,19 lo que indica que posee una forma redonda a oval redonda, el índice de circularidad de 0,70 cercano a la unidad hace referencia a la cercanía a la forma circular y el factor de Horton de 0,28 inferior a la unidad representa cuencas más alargadas, la razón de elongación tiene un valor de 0,60 lo cual conlleva a que posea características de fuertes pendientes y relieves pronunciados. La densidad de drenaje tiene un valor de 4,59, lo cual representa un alto valor asociado a regiones con presencia de rocas débiles o de suelos impermeables y relieve montañoso, además, tiene un orden de corrientes de 4 muy ramificada. La pendiente media de la cuenca tiene un valor de 41,30% una de las más pronunciadas de las microcuencas en análisis, lo cual caracteriza un tipo de relieve muy fuertemente accidentado con mayores relieves y suelos con vegetación donde el tiempo de concentración corresponde a 23,28 minutos, uno de los más altos de las microcuencas, se asocia principalmente a la forma ovalada de la microcuenca Quilas.

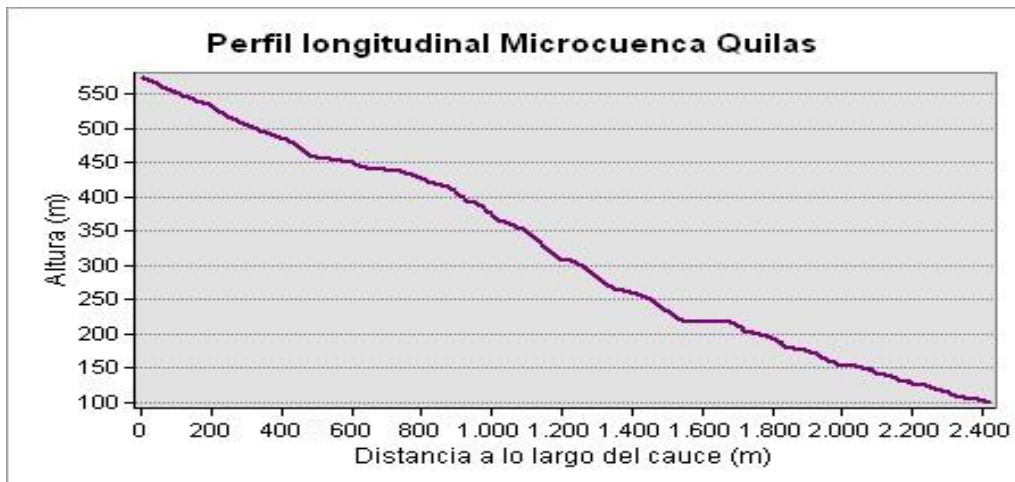


Figura 18: Perfil longitudinal de la microcuenca Quilas.

Fuente: elaboración propia en base a ArcGIS 10.1

La pendiente del cauce principal para esta microcuenca corresponde a 0,30 relacionado a un tipo de terreno fuertemente accidentado a escarpado. Los límites entre las partes alta, media y baja de la cuenca se distinguen a los 450 m.s.n.m y a los 250 m.s.n.m.

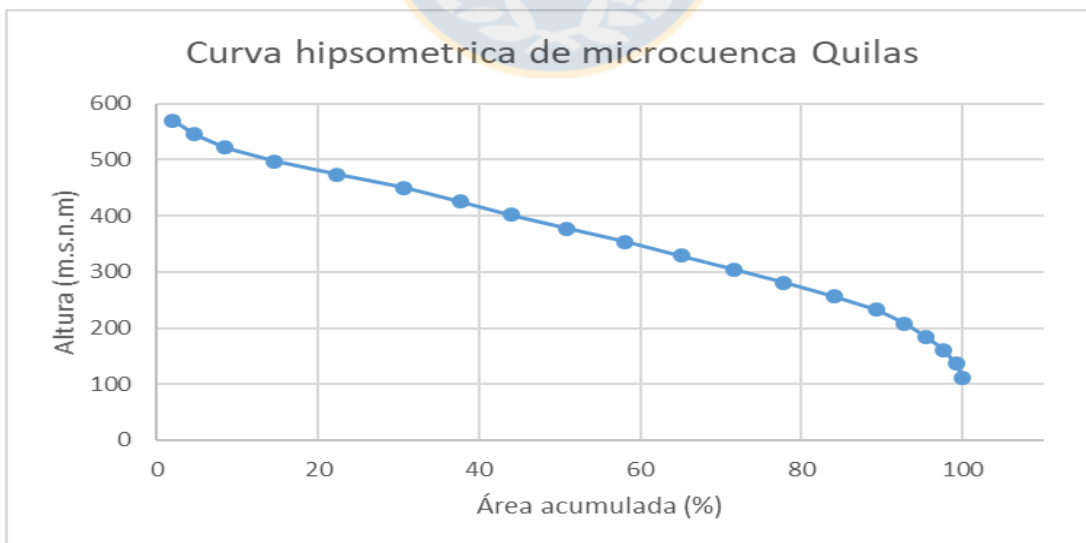


Figura 19: Curva hipsométrica de la microcuenca Quilas.

Fuente: elaboración propia en base a ArcGIS 10.1

La curva hipsométrica de esta microcuenca tiene una elevación mediana de 380 m.s.n.m donde se divide a la cuenca en dos zonas de igual área, es decir, la elevación correspondiente al 50% del área total. Con respecto al ciclo erosivo y el tipo de cuenca, se establece un estado de transición entre una etapa de desequilibrio asociado a una cuenca geológicamente joven y etapa de equilibrio geológicamente madura.

- **Rodal:** Tiene un área de 0,13 km², un perímetro de 1,67 km y un porcentaje de 90,21% posee una elevación máxima de 289 msnm y mínima de 81 msnm. El cauce principal tiene un largo de 0,69 km definido como un río corto, donde se sienten más rápidamente los efectos de la precipitación.

Los índices de compacidad tienen valores de 1,30 representa una cuenca oval redonda a oval oblonga, el índice de circularidad de 0,58 se aleja de la unidad para caracterizar la cuenca como redonda y el factor de Horton de 0,27 se interpreta como una cuenca alargada, con baja susceptibilidad a las avenidas y dado su valor de razón de elongación de 0,58 asociado a fuertes relieves y pendientes pronunciadas.

La pendiente media corresponde a 33,10% con un tipo de relieve fuertemente accidentado, la densidad de drenaje de 6,25 representa un valor alto de drenaje donde existen áreas de rocas débiles y relieve montañoso y tiene un orden 2 de baja ramificación. El relieve montañoso implica escurrimiento mayor asociado a un tiempo de concentración de 9,18 minutos, un tiempo determinado principalmente por el alto valor de pendiente y la superficie pequeña de la cuenca.

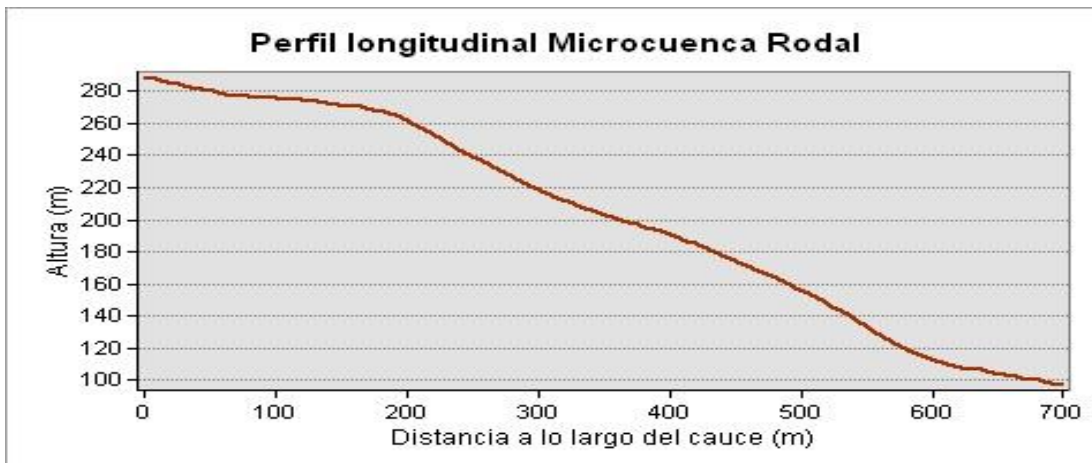


Figura 20: Perfil longitudinal de la microcuenca Rodal.

Fuente: elaboración propia en base a ArcGIS 10.1

La pendiente del cauce principal de la microcuenca Rodal tiene un valor de 0,02, el cual representa un terreno accidentado a fuertemente accidentado, los límites de las partes altas, media y baja de la cuenca se encuentran en las altitudes 260 m.s.n.m y 120 m.s.n.m.

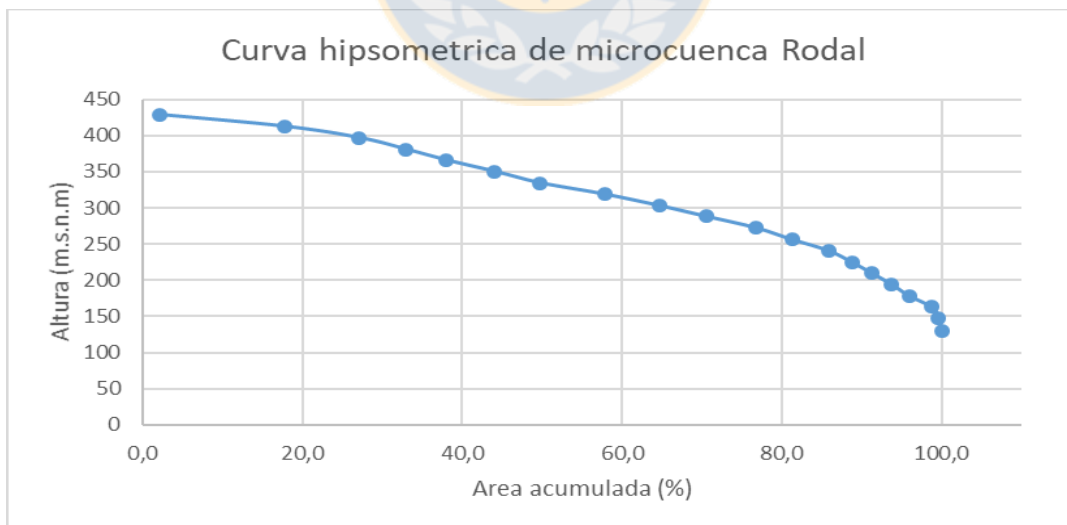


Figura 21: Curva hipsométrica de la microcuenca Rodal.

Fuente: elaboración propia en base a ArcGIS 10.1

La curva hipsométrica de la microcuenca Rodal permite observar que la elevación mediana donde se divide la cuenca en dos zonas de igual área, se encuentra a los 340 m.s.n.m, además con respecto a su ciclo erosivo y tipo de cuenca, está en una fase de transición entre etapa de desequilibrio, cuenca geológicamente joven de meseta a una etapa de equilibrio geológicamente madura de pie de montaña.

7.2.3 Análisis comparativo entre microcuencas.

Entre las microcuencas analizadas se puede definir como cuencas pequeñas, la cuenca con mayor área y perímetro corresponde a Los Lirios del tipo monocultivo forestal, seguida de la microcuenca Quilas del tipo bosque nativo que, además, posee la mayor elevación. “Estadísticamente se ha demostrado que el factor “área” es el más importante en las relaciones entre escorrentía y las características de una cuenca. Esto se puede afirmar por el alto valor de los coeficientes de correlación cuando se grafica escorrentía respecto al área. Pero hay otros parámetros que también tienen su influencia en la escorrentía como la pendiente del canal, la pendiente de la cuenca, la vegetación y la densidad de drenaje.” (Reyes et al., 2010). Con respecto a los parámetros de forma, se establece que “la forma de la cuenca afecta las características de la corriente, en general los escurrimientos de una cuenca de forma casi circular serán diferentes a los de otra, estrecha y alargada de la misma área”. (Campos, 1998), en este sentido, las microcuencas pertenecientes a cada tipo de uso de suelo, tienen características similares en cuanto al índice de compacidad, circularidad, factor de forma y razón de elongación, lo cual permite establecer correlaciones al momento de determinar características de la corriente y escurrimiento.

Con respecto a la densidad de drenaje todas las microcuencas tienen valores altos y eficientes de drenaje excepto la microcuenca Molino, que tiene un valor bajo de longitud total de los cauces dentro de la cuenca y un área pequeña, “la importancia de la densidad de drenaje se manifiesta por los efectos en la formación y rapidez de drenado en escurrimientos normales, además, de proporcionar indicios sobre las condiciones físicas del suelo y la superficie de la cuenca” (Campos, 1998). Estos valores elevados de densidades de drenaje se asocian principalmente a la característica de pendiente media accidentada a muy fuertemente accidentada que tienen las microcuencas lo que conlleva mayores velocidades de escurrimiento y tiempos de concentración menores, inferiores a media hora en todas las microcuencas. (Anexo 5)

Las curvas hipsométricas demostraron ser similares para las microcuencas asociadas al mismo uso de suelo, en el caso de monocultivo forestal ambas pertenecen a microcuencas en fase de equilibrio geológicamente maduras y de pie de montaña, las microcuencas de uso agropecuario difieren en su ciclo erosivo debido a que la microcuenca Molino se encuentra en una fase erosionada de cuenca de valle mientras que Huilquehue en transición entre una cuenca geológicamente joven a una madura al igual que las microcuencas de bosque nativo Quilas y Rodal.

7.3 Obtención de caudales y análisis químico de las muestras.

La obtención de muestras y la medición de velocidad de los cauces principales de cada cuenca se efectuaron en cuatro muestreos correspondientes a las fechas presentadas anteriormente en la tabla N°4 se realizaron cuatro terrenos, pero no todas las microcuencas contienen los mismos muestreos. Las últimas salidas a terreno se realizaron en condiciones de lluvia con motivo de determinar las variaciones existentes y la influencia en la intensidad de la precipitación en el arrastre de nutrientes. Los promedios diarios de precipitación se obtuvieron de la base de datos de la DGA (Dirección General de Aguas) para la estación ubicada en Cañete.

Entre los parámetros físico-químicos medidos se encuentra la temperatura, pH, conductividad y caudal que fueron medidos in situ en el punto de cierre de cada microcuenca, donde los valores encontrados hacen referencia a distintos factores, se tiene que la composición química del agua de un río va a venir determinada por varios factores concretos: la composición y cantidad de precipitación caída en la cuenca, geología de la cuenca y la solubilidad de las rocas o materiales, los suelos, vegetación terrestre, procesos de evaporación, biológicos y finalmente la contaminación o vertidos de origen humano (Toro et al., 2002). Con respecto al análisis de los resultados obtenidos estos se clasificaron en tres escenarios; resultados sin eventos de precipitación, con eventos de precipitación y ambas categorías con el objetivo de analizar la respuesta de las microcuencas frente a distintos escenarios.

Con respecto al anexo los valores obtenidos para las microcuencas de categoría de uso de suelo demuestran valores similares a excepción del parámetro conductividad y concentración de nitrógeno total en las microcuencas Molino y Huilquehue donde se observa una diferencia significativa, en la cual esta última posee valores mucho más altos en comparación a Molino para eventos sin precipitación y con

precipitación. Para las otras microcuencas los valores presentados son relativamente similares en cuanto a los distintos parámetros evaluados.

7.4 Parámetros físico-químicos.

Para el análisis de los parámetros físico-químicos se analizaron promedios, medianas y desviaciones estándar presentadas en los anexos 17,18 y 19.

Temperatura:

Los valores más altos para cada categoría de uso corresponden a la microcuenca Hostería para el uso monocultivo forestal, la microcuenca Molino para el uso agropecuario y la microcuenca Quilas para el uso de bosque nativo. El valor máximo entre todas las microcuencas corresponde a 12,8°C de la microcuenca Hostería (Monocultivo forestal) en un evento sin precipitación y el mínimo corresponde a 8,6°C de la microcuenca HUILQUEHUE (Uso agropecuario) en un evento con precipitación. Borwn, 1970; Gayoso et al, 2000, expone que la radiación solar sobre un cauce es una de las variables más significativas asociadas al aumento térmico de las aguas del cauce, señalando que es la remoción de la vegetación ripariana, más que la cosecha de los bosques de la cuenca, la que afecta más directamente la temperatura del cauce. Con respecto a lo anterior se explica que las microcuencas de monocultivo forestal presenten las temperaturas más altas sin precipitación y con precipitación al no tener vegetación ripariana más densa asociada a su cauce que mantenga las temperaturas relativamente constantes, además se encuentra el factor de la exposición al sol relacionada con la ubicación de las microcuencas, lo cual demuestra que las microcuencas de monocultivo forestal se encuentran ubicadas en la ladera sur del lago Lanalhue y tienen una exposición solar norte-nordeste lo cual está directamente relacionado con las altas temperaturas presentes en estas microcuencas y su mayor exposición al sol durante

el día, en comparación con las otras microcuencas en estudio que se ubican en zonas de menor exposición al sol y por lo tanto poseen temperaturas más bajas como se demuestra en la cartografía de orientación realizada. (Anexo 21)

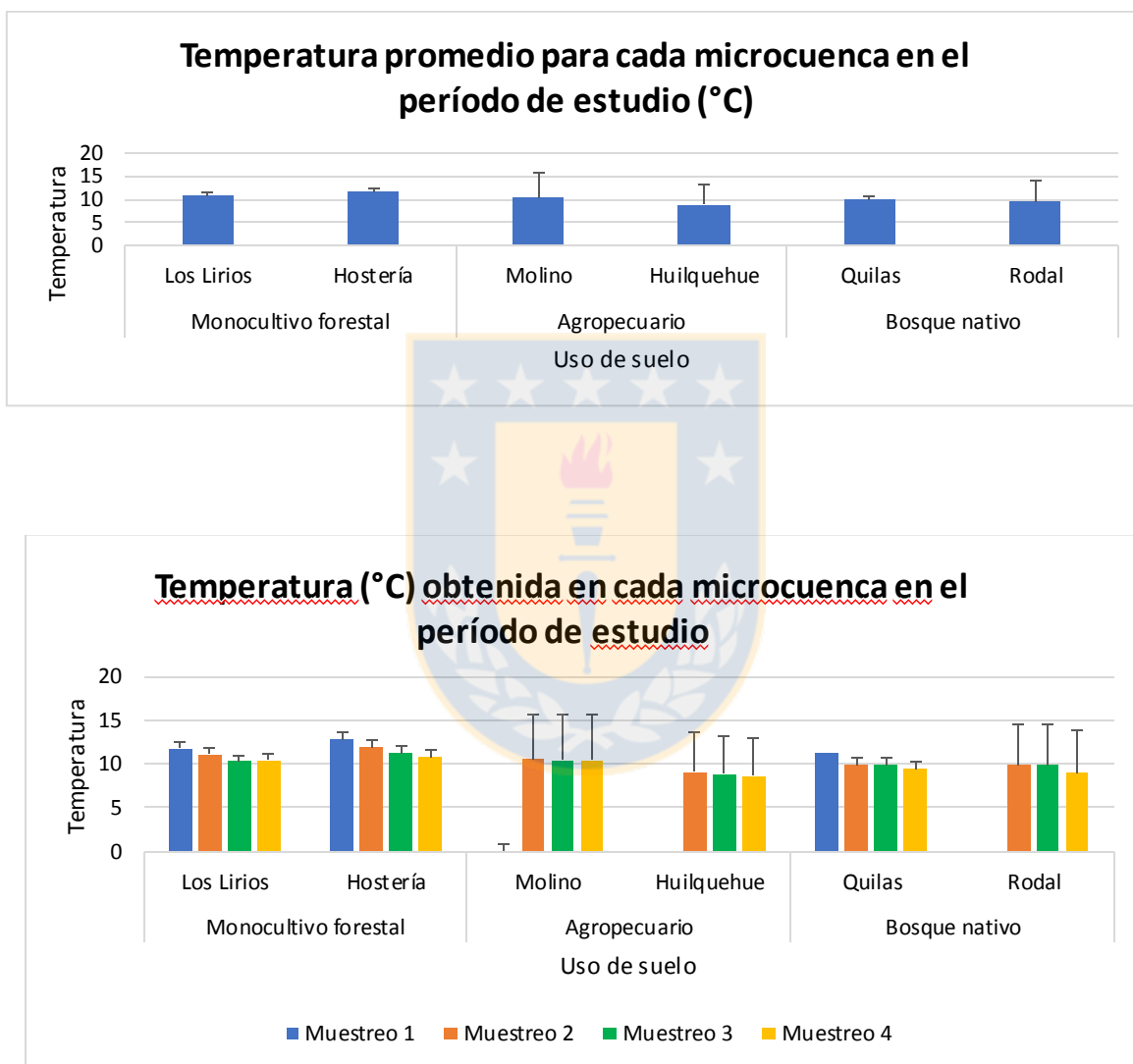


Figura 22: Temperatura registrada para cada microcuenca en el período de estudio.

Fuente: elaboración propia

pH:

Varía entre 6,35 y 8,79, entre los registros más altos del análisis general se encuentran las microcuencas pertenecientes al uso de monocultivo forestal y agropecuario, dado que presentan valores máximos de 8,79 para la microcuenca Hostería y 8,3 para la microcuenca Los Lirios, mientras la microcuenca Molino (Uso agropecuario) presenta un valor máximo de 8,38 y el promedio más alto con un valor de 7,8. En condiciones de precipitación las microcuencas con mayor pH son Hostería (Monocultivo forestal) con 7,91 y Molino (Uso agropecuario) con 7,98. Sin embargo, en condiciones sin precipitación el promedio más alto pertenece a la microcuenca de bosque nativo Quilas. El valor mínimo y promedio más bajo corresponde a la microcuenca Huilquehue (Uso agropecuario) con un valor de 6,35 y 6,6 respectivamente. Muchos procesos en el suelo están influenciados por el ambiente químico y particularmente por el Ph afectando distintos procesos ecológicos como el intercambio y solubilización de nutrientes, actividad de microorganismos y solubilización de minerales, que pueden observarse en las cuencas hidrográficas (Gomez, 2011). En los suelos sometidos a cultivo y que permanecen parte de su ciclo de producción sin vegetación durante el invierno, el exceso de agua percola en profundidad y remueve parte de los nutrientes en solución, además, la relación al efecto de los fertilizantes en la acidez del suelo se debe focalizar en los productos nitrogenados (Rodríguez et al., 1993), lo cual explicaría los valores obtenidos en las microcuencas respectivas cuando existe una baja influencia por deposición atmosférica al considerarse una zona alejada de industrias. Por otro lado, según los resultados obtenidos y considerando el requisito para aguas de riego de las Normas Chilenas Oficiales (Nch 1333-1978) donde estas deben tener un Ph entre 5,5 y 9,0, por lo cual las aguas de estos esteros o ríos son aptas para ese uso.

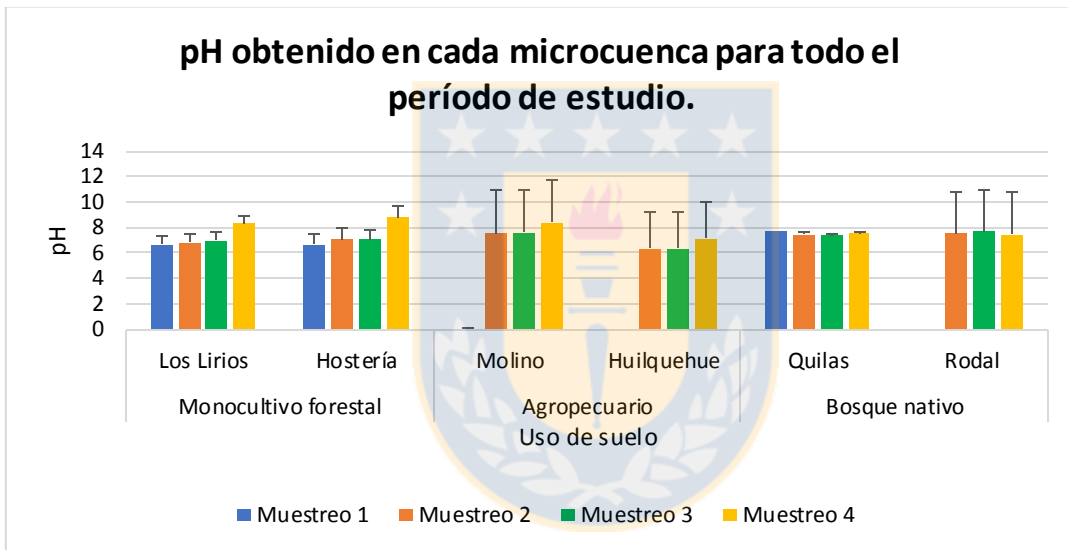
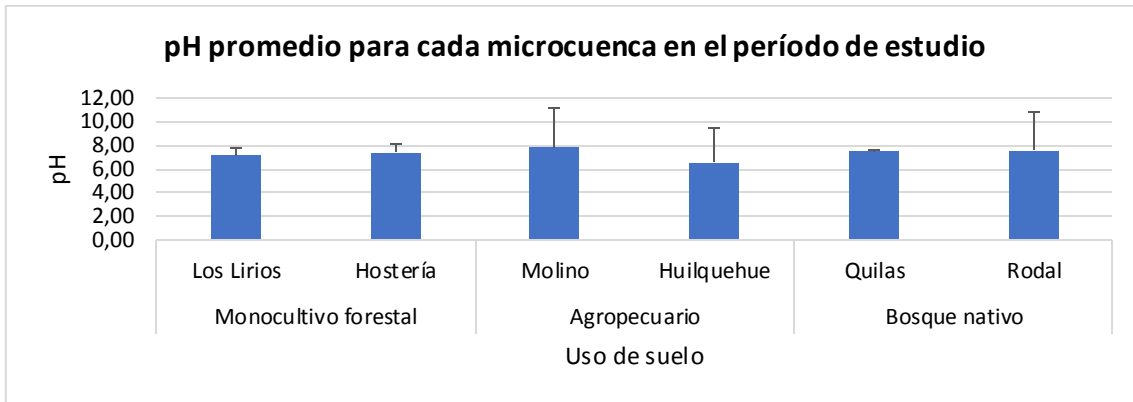


Figura 23: pH registrado para cada microcuenca en el período de estudio.

Fuente: elaboración propia

Conductividad:

Se define como la capacidad que una sustancia pueda conducir la corriente eléctrica, en soluciones acuosas la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad. Los valores obtenidos reflejan bajas conductividades donde el mínimo corresponde a la microcuenca Hostería con un valor de $10,32 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y el valor máximo y promedio más alto corresponde a la microcuenca Huilquehue con un valor de $139,2 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y $90,3 \mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$, sin embargo, existe una tendencia al aumento en eventos con precipitación debido al arrastre de iones y sales presentes en los suelos. La mineralización de las aguas se relaciona entre las distancias al origen del río, provocando una mayor concentración de sales disueltas en las aguas y una estabilización de la composición química de las aguas (Margalef, 1983), aunque otros factores como la vegetación de la cuenca y usos del terreno influyen en los valores de conductividad de las aguas, además, se puede inferir que las microcuencas no presentan alteraciones de fuentes puntuales por lo que los valores se mantienen relativamente constantes.

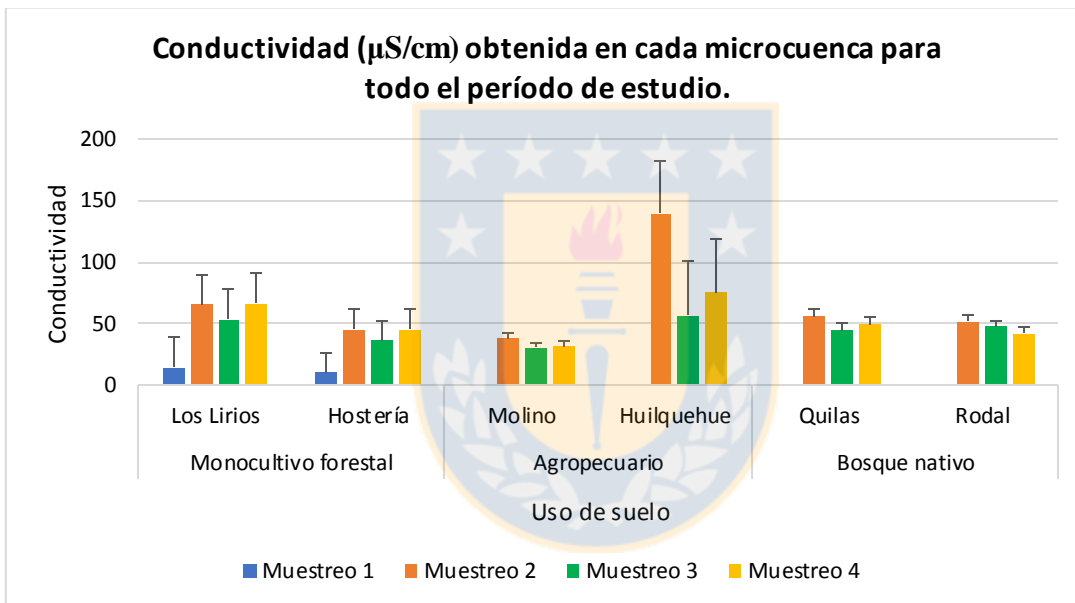
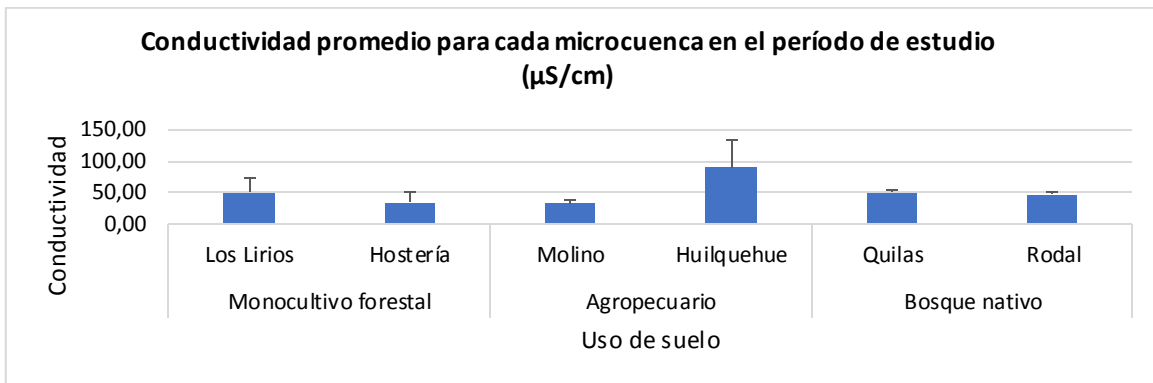


Figura 24: Conductividad registrada para cada microcuenca en el período de estudio.

Fuente: elaboración propia

Nitrógeno total:

Las concentraciones de nitrógeno total exportadas fueron mayores para las microcuencas de uso agropecuario y monocultivo forestal en todo el período de estudio, considerando los valores promedio, la microcuenca Huilquehue obtuvo un valor de 0,40 mg/L seguida de Hostería con 0,24 mg/L. Para las condiciones de precipitación y sin precipitación el valor máximo corresponde a la microcuenca de uso agropecuario Huilquehue. Los valores mínimos obtenidos de todo el período de estudio se asocian a las microcuencas de bosque nativo, para los muestreos realizados en condiciones de precipitación las microcuencas Los lirios (monocultivo forestal), Molino (Uso agropecuario), Quilas y Rodal (Bosque nativo) tienen valores similares, mientras que sin precipitación el comportamiento es parecido pero el uso de bosque nativo tiene valores más bajos. Los resultados presentados corresponden a concentraciones muy bajas Oyarzun et al. (1998) han informado que, en la Cordillera de la Costa del sur de Chile, la deposición atmosférica de nitrógeno inorgánico es muy baja, especialmente para nitrato ($<1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), lo que explicaría las menores concentraciones de amonio y nitrato en estas cuencas hidrográficas, en comparación con cuencas hidrográficas ubicadas en los Andes, sin embargo, las diferencias existentes entre distintas coberturas de uso de suelo se presentan según lo descrito por Oyarzun & Huber (2003) donde la lixiviación de $\text{NO}_3\text{-N}$ de las corrientes de pasto fue el flujo de nitrógeno más importante, debido al impacto de la aplicación de fertilizantes y la producción de ganado. Por lo tanto, en las cuencas agrícolas, la pérdida de N de los suelos está determinada por el suministro principalmente de fuentes externas. En las cuencas boscosas, la lixiviación de N de los suelos probablemente esté determinada por fuentes internas y externas.

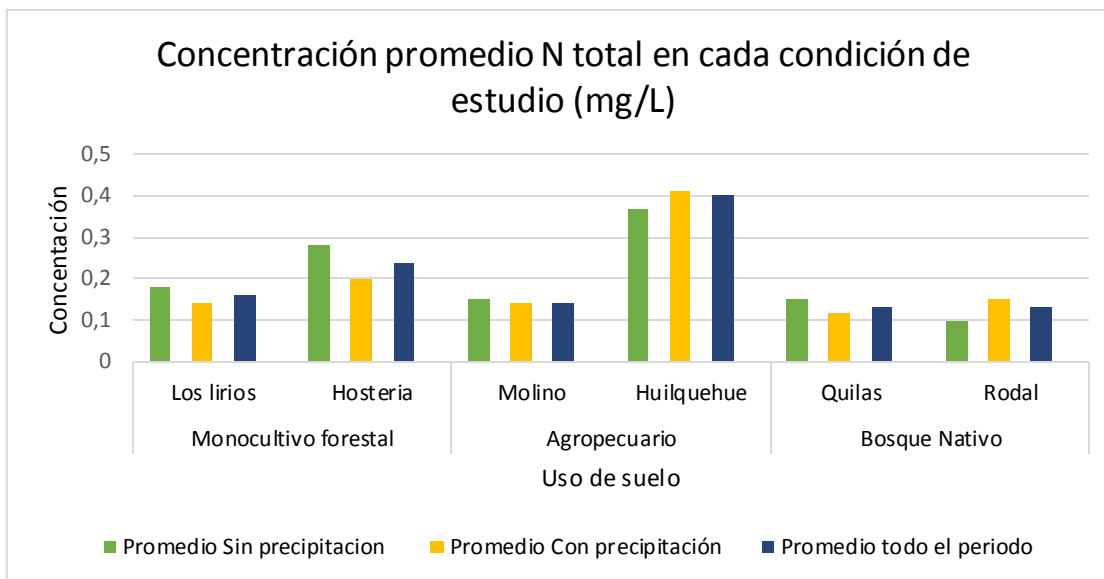


Figura 25: Concentración promedio de Nitrógeno total en cada condición de estudio.

Fuente: elaboración propia.

Fósforo total:

Las concentraciones promedio de fósforo total para el período de estudio corresponden a mediciones muy bajas y donde se demuestran valores mayores para las microcuencas Huilquehue (uso agropecuario), Quilas (Bosque nativo) y Rodal (Bosque nativo), con valores de 0,04 mg/L a 0,05 mg/L mientras que los mínimos aportes en condiciones sin precipitación provienen de las microcuencas de monocultivo forestal y bosque nativo y los máximos valores se obtuvieron en condiciones de precipitación asociado a la microcuenca Quilas (bosque nativo) con un valor de 0,012 mg/L. No hay diferencias significativas en la concentración de fósforo total encontrando los mismos resultados en Cárdenas (2007) donde se sugiere que las fuentes de fósforo están ligadas al sustrato del suelo y, según Rutherford (2004) se puede suponer que la abundancia de fósforo en estos tipos de suelo es más importante que las diferencias de uso de estos.

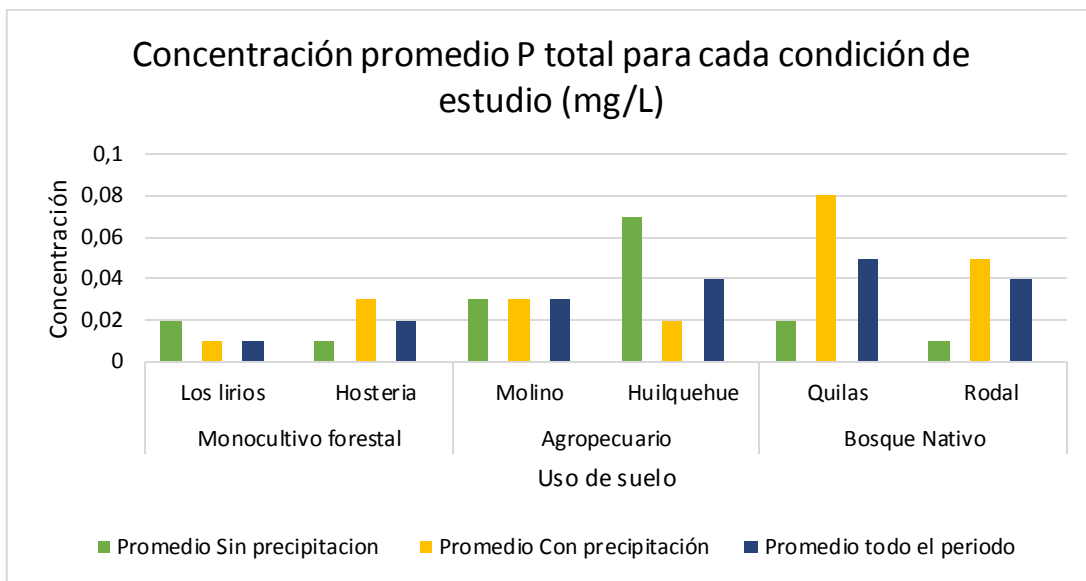


Figura 26: Concentración promedio de Fósforo total para cada condición de estudio.
Fuente: laboración propia.

Caudal

Los valores obtenidos en el período de estudio bajo condiciones sin precipitación, presentan registros menores comparados con las condiciones con precipitación, relacionado a los aportes de lluvia que demuestran un aumento en el caudal base, el cual fue medido en las primeras dos fechas de muestreo. En condiciones de precipitación se presentaron eventos de 17 mm y 22,9 mm, donde los valores más altos corresponden a microcuencas de uso agropecuario, seguido de monocultivo forestal y luego de bosque nativo presentando valores muy bajos. Si se realiza el análisis por microcuenca, es fácil distinguir que la microcuenca Huilquehue posee mayor caudal en todas las condiciones de muestreo y el mayor caudal promedio, esto se puede explicar dado que corresponde a la microcuenca con menor superficie y longitud del cauce más bajo, seguida de la microcuenca del mismo uso de suelo, Molino. Estas superficies poseen suelos que varían de texturas moderadamente finas a medias, destacando suelos franco arcilloso limoso, con

permeabilidad baja, además, la capacidad de uso asociada a cada microcuenca da a entender con baja capacidad de retención de agua y susceptibles a erosión. Con respecto a la comparación que se puede realizar entre el caudal obtenido en microcuencas de uso forestal y bosque nativo reside principalmente en las densidades de drenaje, donde las microcuencas de uso forestal tienen densidades más elevadas con una respuesta más rápida frente a tormentas, además la estacionalidad en que se midieron los parámetros podría influir en los valores obtenidos, según Lara (2009) las diferencias más grandes entre caudal/precipitación y cubiertas de bosque nativo o plantaciones forestales ocurrieron en verano, además, la intensidad y cantidad de precipitación es un factor importante a considerar, ya que es el mayor determinante en la variabilidad temporal de los flujos de descarga ya sea mensual, estacional o mensual (Little, 2009).



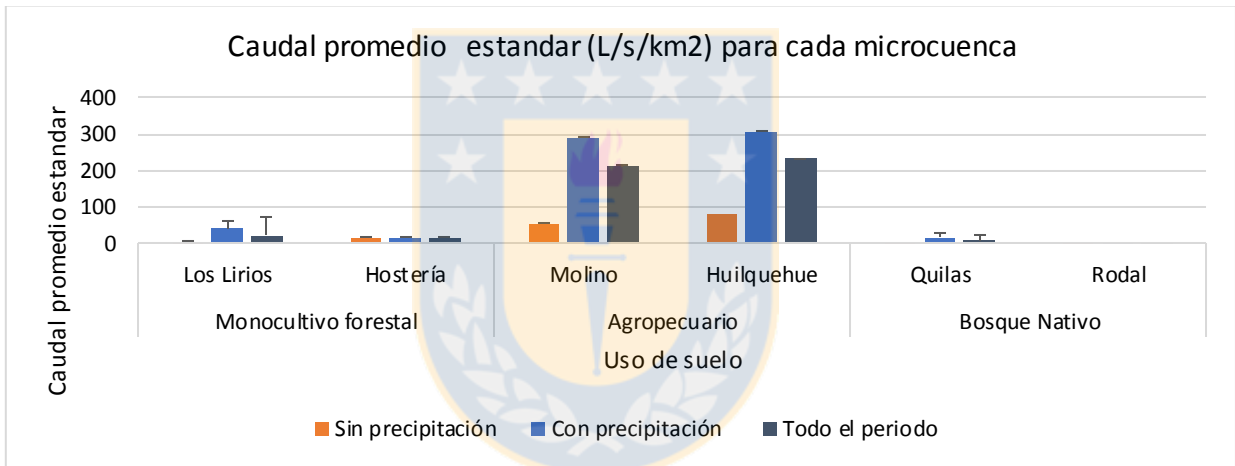
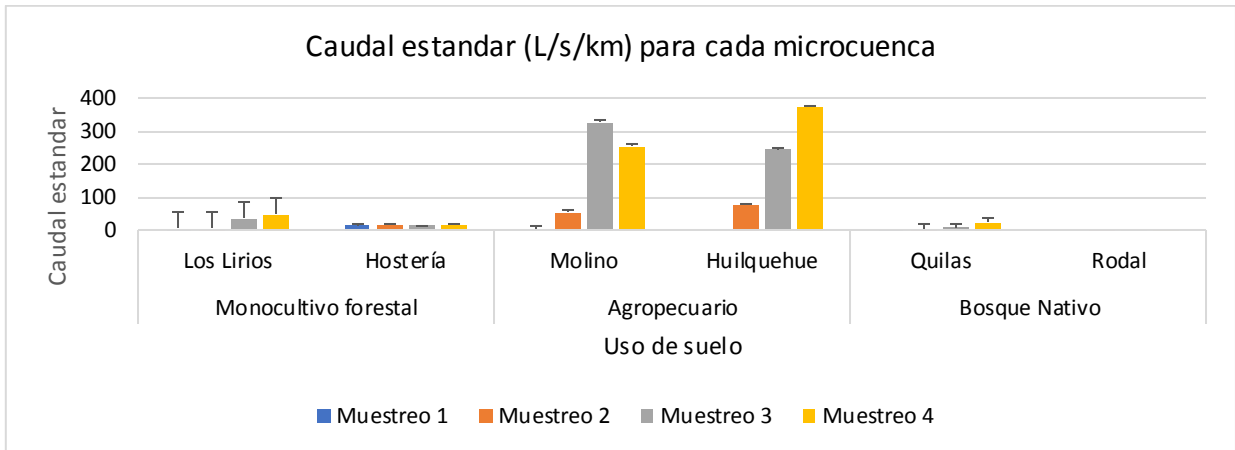


Figura 27: Caudal estándar y caudal promedio estándar para cada microcuenca en el período de estudio.

Fuente: elaboración propia

7.5 Relación precipitación y escorrentía.

En un evento de precipitación, una parte de lo que llega a la superficie es retenido o interceptado por la vegetación existente. Donde los factores que se deben tener en consideración son los siguientes; características de la precipitación (intensidad, volumen de la precipitación y lluvia antecedente), condiciones climáticas, tipo y densidad de vegetación y período del año. Para esto es necesario contar con métodos que permitan inferir comportamientos de las escorrentías a partir de otras variables. Uno de los métodos más utilizados es el del número de curva, propuesto por el USSCS (López 1998), el cual permite estimar escorrentías directas o precipitaciones efectivas a partir de información de precipitaciones (Pizarro,2006). La metodología del número de curva considera como variables en su determinación: La precipitación para un período de tiempo, el complejo suelo-cobertura vegetal y la condición de humedad antecedente. Para este caso se consideraron condiciones normales de humedad y con respecto al análisis de suelos realizado anteriormente la mayoría de las microcuencas pertenece a la clase C y solo una a la clase B. El número de curva para cada microcuenca fue calculado a través de sistemas de información geográfica asignando un número en relación al uso de suelo existente.

Tabla 10: Números de curva obtenidos para las microcuencas.

Uso de suelo	Microcuenca	CN	Coefficiente de escorrentía promedio
Monocultivo forestal	Los Lirios	72	0,18
	Hosteria	71	0,072
Uso agropecuario	Molino	80	1,31
	Huerquehue	76	1,32
Bosque Nativo	Quilas	71	0,067
	Rodal	71	0,015

Fuente: elaboración propia en base a tablas SCS (Anexo 22)

La Curva Número (CN) igual a 1 indica que toda la lluvia infiltra y un CN = 100 representa el escurrimiento total de la precipitación. Esto se lleva a las condiciones de cálculo de la Curva Número, los altos implican escorrentías elevadas (= infiltraciones bajas; = laderas degradadas) en cambio, números de curva bajos aseguran altas tasas de infiltración, baja escorrentía superficial y escasa erosión hídrica. (Servicio Geológico Colombiano, 2017). Con respecto a esto se encontraron valores mas altos en las microcuencas de uso agropecuario, relacionado con lo obtenido para los valores de caudal, esto explicaria una menor capacidad de infiltración por parte de estos suelos, donde el valor maximo obtenido para la curva numero demostraria suelos altamente saturados donde todo lo que precipita, escurre. Las microcuencas de los usos forestal y bosque nativo presentan valores relativamente similares siendo menor el de bosque nativo.

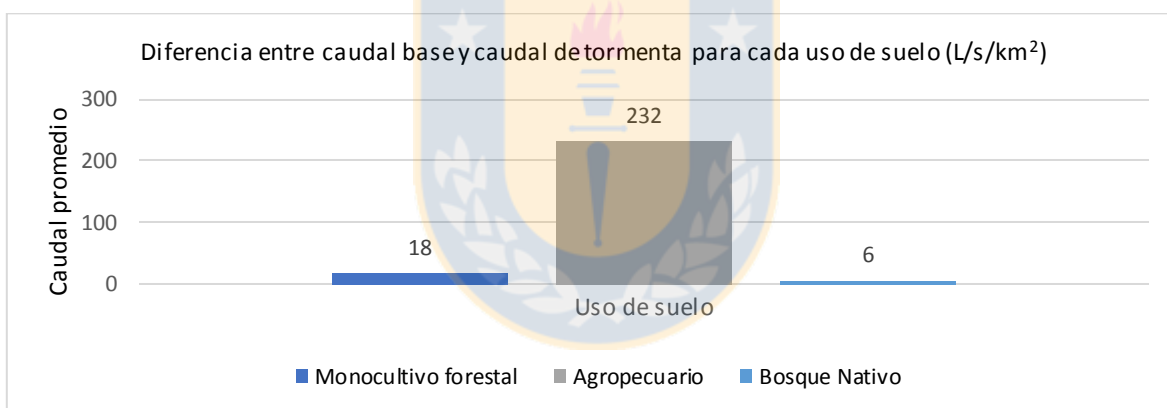


Figura 28: Diferencia de caudal obtenida para condiciones base y con precipitación.

Fuente: elaboración propia.

Se estimó el caudal base con el promedio de las mediciones realizadas en eventos sin precipitación y el caudal de flujo o de tormenta en los eventos donde se registraron precipitaciones de 17 mm y 22,9 mm, para obtener una diferencia que permita predecir la capacidad de infiltración y el grado de intercepción que tienen las microcuencas. La mayor diferencia se encontró en las microcuencas de uso

agropecuaria, asociada a una menor intercepción o mayor grado de humedad y saturación de los suelos, mientras que las menores diferencias provienen de las microcuencas de uso forestal y bosque nativo demostrando una correlación con los valores de número de curva obtenidos en el análisis anterior.

7.6 Estimación de cargas de nutrientes.

La estimación de cargas de nutrientes exportada para cada microcuenca se realizó en base a la expresión general de la carga contaminante, multiplicando la concentración medida en el punto con el caudal respectivo calculado. En relación a lo anterior se obtuvieron los resultados presentados en los gráficos del Anexo 8 que expresan las cargas de nutrientes de nitrógeno y fósforo para cada salida a terreno y, además, los valores promediados en condiciones con y sin precipitación con el objetivo de analizar el aumento o disminución de las cargas. Los resultados demuestran que los valores más altos se identificaron bajo condiciones de precipitación y principalmente asociado al último muestreo donde la precipitación promedio fue de 22,9 mm/día mayor a la condición anterior de precipitación de 17 mm/día. Las microcuencas que presentaron los registros más altos corresponden a las de uso agropecuario Molino y Huilquehue, donde esta última obtuvo los valores máximos para nitrógeno y fósforo, seguido de las microcuencas de monocultivo forestal y bosque nativo, estas últimas con valores significativamente más bajos. La condición de la cubierta vegetal influye directamente en la descarga de nutrientes, así como también la cantidad y la intensidad de precipitación, se espera un mayor deterioro con el avance del cambio climático, ya que los eventos de precipitaciones extremas más frecuentes y la intensidad de las precipitaciones pueden causar una erosión desproporcionadamente alta (Yang et al., 2003).

Las características de los suelos identificados para cada microcuenca son relativamente parecidos según la información obtenida desde el CIREN (2010) presentando suelos con textura moderadamente fino a intermedio, destacando clase textural franco arcillo limosa, franco arcilloso o franco arcillosa arenosa, según Jonson (1979) se tiene un comportamiento del suelo con permeabilidad intermedia y almacenamiento de nutrientes entre bajo a medio, con respecto al riesgo de erosión potencial las microcuencas de monocultivo forestal y bosque nativo presentan un riesgo similar que varía desde severa a muy severa, sin embargo, Banfield (2018) señala que existe una mayor erosión en las plantaciones forestales donde se presenta contenido de grava y arena, menor contenido orgánico y grosor medio de la capa de hojarasca que en suelos de bosque nativo. Las microcuencas de uso agropecuario tienen un riesgo moderado a muy severo, lo cual permite indicar que estas microcuencas presentan una carga mayor de nutrientes asociado al hecho de la aplicación de fertilizantes y la presencia de animales, relacionado con lo establecido por Drewry (2006) que, en cuencas dominadas por la agricultura, predominan las descargas de nitrógeno y fósforo por fuentes difusas en los ríos. El nitrógeno del suelo está frecuentemente presente en la materia orgánica del suelo y no está disponible para la absorción o lixiviación de la planta, a menos que esté mineralizado, las cantidades de nitrato pueden acumularse en los años de drenaje del agua y en los lugares desplazados posteriormente, lo que contribuye a mayores pérdidas de nitrógeno. Las pérdidas de nitrógeno a los cursos de agua pueden ser a través del suelo natural P (denominado no incidental) y el aumento de la fertilidad del suelo a través de adiciones al suelo de fertilizantes, estiércol o estiércol (incidental). Lo anterior relacionado con el bajo Ph que presentan las microcuencas de uso agropecuario, donde la acidificación del suelo es favorecida por la aplicación de ciertos fertilizantes. (Ginés, 2002).

Con respecto a las diferencias encontradas entre microcuencas de plantaciones forestales y bosque nativo, se presentan valores menores para estas últimas, principalmente por la capacidad de retención de las coberturas de bosque nativo, ya que las condiciones de riesgo de erosión, capacidad de uso y erodabilidad son similares, este resultado concuerda con lo obtenido por Cárdenas (2007) donde la retención anual de nitrógeno y fósforo total fue mayor en la cuenca con bosque nativo, comparada con las cuencas con plantaciones exóticas y las tendencias de fósforo total no observaron tendencias claras con respecto al aumento o disminución de estas durante el período de estudio, sin embargo, se presentó un pico de exportación a un evento puntual en la microcuenca Quilas, en general, Novotny (2002) señala que la interceptación total por una planta individual se relaciona directamente con la cantidad de follaje (su área de superficie por unidad de área de superficie del suelo) y su carácter y orientación. Alrededor de 1,2 a 1,8 mm de precipitación puede ser interceptado por pastos y arbustos densos, esto podría explicar menores concentraciones de nutrientes. Por otro lado, durante la descomposición de la materia orgánica pueden llegar a diferenciarse tres fases para la liberación de nutrientes: una inicial de rápida liberación de componentes solubles, en la que dominan los procesos de lavado, seguida por una fase de inmovilización, y finalmente una fase de liberación neta. Esta liberación puede tomar varios caminos dependiendo de diferentes factores como la humedad, la temperatura, la disponibilidad de nutrientes en el suelo, la especie, la edad y, fundamentalmente, la calidad de la hojarasca (concentraciones de N y P; relaciones C/N y N/P; contenido de lignina, taninos, etc.) (Castellanos-Barliza et al., 2011), lo cual explicaría una liberación rápida de fósforo para el último muestreo de la microcuenca Quilas que influye directamente el valor final obtenido.

Cabe destacar que, las microcuencas de monocultivo forestal presentan vegetación de ribera, las zonas ribereñas proporcionan funciones de regulación natural para la cantidad de agua, así como problemas de calidad del agua, representan zonas de amortiguamiento entre el medio ambiente terrestre y acuático y, por lo tanto, tienen

un impacto importante en el balance hídrico y la dinámica de las aguas subterráneas, así como en la contaminación de nutrientes dentro de la llanura aluvial (Krause et al., 2008). En general se tiene que la composición química del agua de un río va a venir determinada por varios factores concretos: la composición y cantidad de precipitación caída en la cuenca, geología de la cuenca y la solubilidad de las rocas o materiales, los suelos, vegetación terrestre, procesos de evaporación, biológicos y finalmente la contaminación o vertidos de origen humano los cuales pueden influir directamente en las cargas de nutrientes obtenidas.

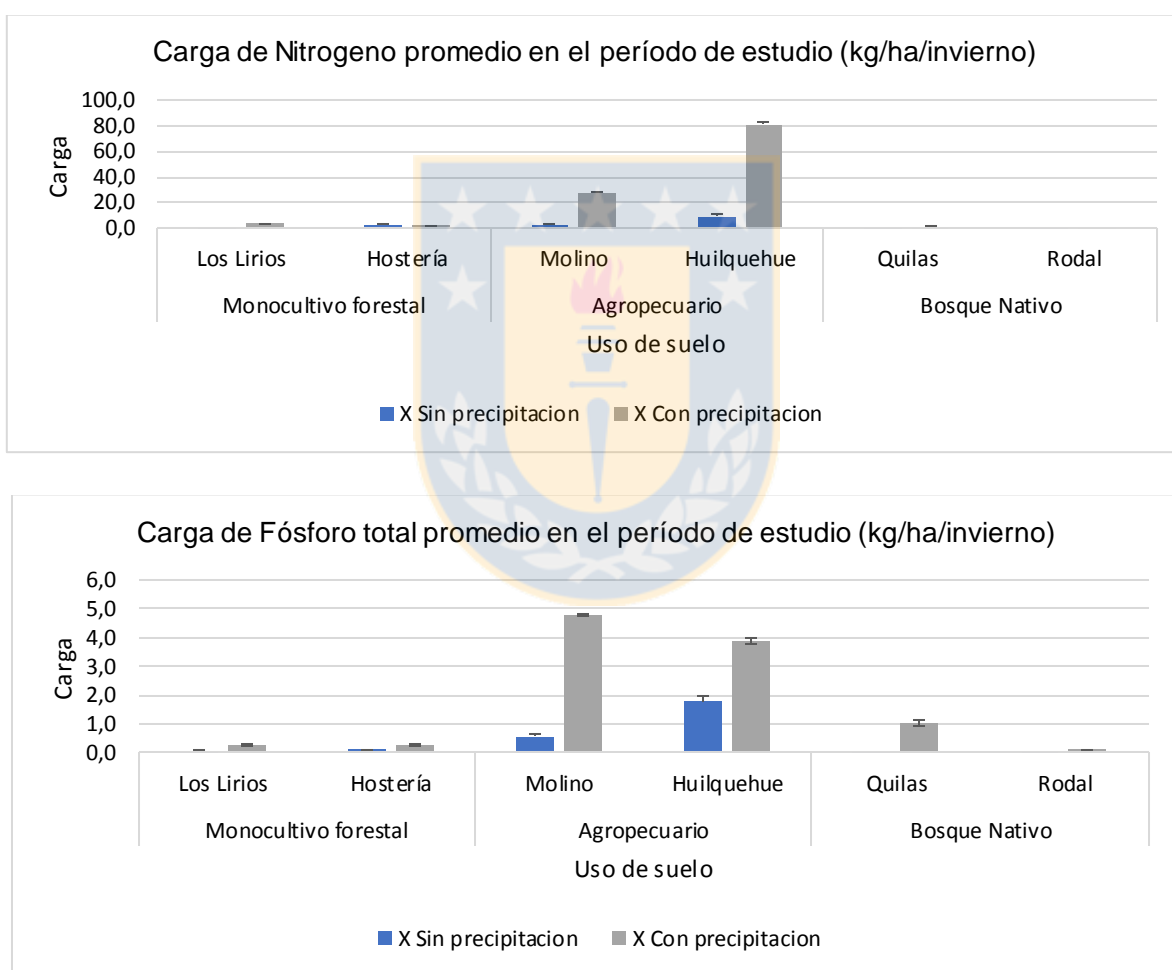


Figura 29: Carga de Nitrógeno total y Fósforo total promedio en el período de estudio (kg/ha/invierno).

7.7 Coeficientes de exportación de nutrientes.

Los coeficientes de exportación de nutrientes para nitrógeno y fósforo se calcularon a través de regresión lineal múltiple con un cero intercepto y analizando las diferencias entre la condición basal sin precipitación y después del evento de tormenta para establecer el arrastre por efectos de la lluvia medidos en un período de cuatro meses estableciendo una unidad de tiempo como la estación de invierno.

1. Regresión lineal múltiple

Se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple para obtener los coeficientes de exportación de nutrientes para cada uso de suelo utilizando las cargas de nutrientes y las fracciones de uso de suelo en cada microcuenca. Los resultados obtenidos demostraron valores mayores de exportación para el uso de suelo agropecuario en ambos nutrientes, mientras que, entre los usos de bosque nativo y monocultivo forestal, los coeficientes de exportación de nitrógeno total no varían significativamente mostrando valores similares, no así en el caso de fósforo total donde los coeficientes de exportación calculados fueron mayores en el uso de monocultivo forestal, como se presenta en el siguiente gráfico:

Tabla 11: Coeficientes de exportación de nutrientes calculados en modelo de regresión lineal múltiple.

Uso de suelo	Coefficiente de Nitrógeno total (kg/ha/estación de invierno)	Coefficiente de Fósforo total (kg/ha/estación de invierno)
Monocultivo forestal	1,80	0,022
Agropecuario	2,68	0,884
Bosque Nativo	2,05	0,413

Los coeficientes se calcularon con un nivel de confianza del 95% para ambos nutrientes. En el modelo obtenido en la regresión lineal múltiple de nitrógeno total, se obtuvo un coeficiente de correlación múltiple es de 0,821 mientras que de R

cuadrado de 0,673 por lo cual un 67,3% de la variabilidad de Y, las cargas de nutrientes pueden ser explicadas por las variables predictoras, en este caso la fracción de uso de suelo. La variable de la carga de nitrógeno total muestra una correlación significativa con la fracción de uso de suelo agropecuario de 0,765 estadísticamente significativa al 0,05. La tabla resumen del ANOVA demuestra si existe o no relación significativa entre las variables, de esta manera existe probabilidad igual a cero ($p= 0.0001$), donde las variaciones en la variable carga de nutrientes se explican significativamente por el conjunto de efectos predictivos identificados.

Para el modelo resultante del análisis de fósforo total, se obtuvo un coeficiente de correlación múltiple de 0,887 y un R cuadrado de 0,787, lo cual explica que un 78% de la variabilidad pueden ser explicadas por las variables introducidas, es decir, la relación existente entre la carga de nutrientes y la fracción de uso de suelo con una significancia ($p=0,0001$) en el test ANOVA, sin embargo, la significancia para los coeficientes de exportación de fósforo para uso de bosque nativo y monocultivo forestal que arroja el modelo son mayores a 0,05 y presentan valores negativos, por lo cual se aplicó la metodología que explica en Mcfarland (2001) para estos casos, utilizando el valor promedio de cargas de nutrientes entre las microcuencas menos impactadas con valores de 0,022 kg/ha/estación en monocultivo forestal y 0,041 kg/ha/estación para bosque nativo. El coeficiente de exportación de uso agropecuario tiene un $p= 0,0001$ y un $R^2=0,781$ por lo cual se consideró aceptable.

2. Carga promedio normalizada

Las concentraciones de nutrientes promedio obtenidas fueron combinadas con el flujo de descarga promedio y normalizada por el área respectiva de cada microcuenca en estudio (kg/ha/invierno). Los resultados demuestran valores mayores para las microcuencas de uso agropecuario para ambos nutrientes, donde la mayor exportación corresponde a la microcuenca

Huilquehue, seguida de Molino y Hostería, mientras que la exportación más baja corresponde a la microcuenca Rodal.

Para el uso de suelo agropecuario se presentan valores de 3,8 kg/ha/invierno y 0,35 kg/ha/invierno para nitrógeno y fósforo total respectivamente, en segundo lugar, se encuentran el uso de monocultivo forestal con coeficientes de 0,299 kg/ha/invierno y 0,022 kg/ha/invierno para nitrógeno total y fósforo total respectivamente y los valores más bajos presentados corresponden al uso de bosque nativo como 0,055 kg/ha/invierno y 0,036 kg/ha/invierno para nitrógeno y fósforo total.

3. Diferencias entre condición basal y de tormenta

Se promediaron las cargas normalizadas para cada condición y se obtuvieron los coeficientes para cada microcuenca y uso de suelo con las diferencias existentes entre cada condición (basal y de tormenta) relacionados con las cargas de nutrientes observadas. De acuerdo a esto, se tienen los mayores valores para el uso agropecuario en ambos nutrientes (nitrógeno y fósforo), donde la mayor exportación de nitrógeno fue de la microcuenca Huilquehue y la menor para la microcuenca Rodal de uso bosque nativo. Para el caso del fósforo, la mayor exportación corresponde a la microcuenca de uso agropecuario Molino y la menor exportación se encontró en la microcuenca de uso bosque nativo, Rodal.

Los coeficientes de exportación para nitrógeno total mayores corresponden a 6,06 kg/ha/invierno para el uso agropecuario, luego para el uso de monocultivo forestal se obtuvieron valores de 0,12 kg/ha/invierno y los coeficientes obtenidos para el uso de suelo de bosque nativo, fue de 0,048 kg/ha/invierno. En el caso de los coeficientes de exportación de fósforo total, el mayor valor es de 0,39 kg/ha/invierno

para uso agropecuario, 0,023 kg/ha/invierno para uso forestal y 0,066 kg/ha/invierno para bosque nativo, siendo este último ligeramente mayor a las plantaciones forestales, esto asociado a las densidades de drenaje y tipos de suelo presentes, además, de la vegetación ripariana presente en las microcuencas de plantaciones forestales que disminuyen la concentración de nutrientes que llega a los cauces y el estado del bosque nativo asociado a bosques renovales que sufrieron una alteración antrópica anterior. Los gráficos se presentan en el Anexo 9.

7.8 Comparación de coeficientes de exportación.

1. Comparación de metodologías

Se puede inferir que para la utilización de coeficientes de exportación por el método de regresión lineal múltiple es posible estimar los coeficientes de exportación de nutrientes, tiene la ventaja de considerar el aporte de cada uso de suelo presente en las microcuencas en estudio pero el modelo se limita a la cantidad de información relacionada con la cantidad de microcuencas en estudio, números de muestreos y un período de estudio más amplio para obtener diferentes condiciones, Shretsha (2008) establece que las descargas de ríos deben ser muestreadas frecuentemente en intervalos de días y continuamente, además según Mcfarland (2001) se requieren de 30 o más sitios de muestreo para proveer un adecuado nivel de análisis de regresión para estimar coeficientes de exportación de nutrientes, sin embargo, se debe usar el máximo número de sitios posibles. Por lo tanto, se requiere mayor información que permitan ampliar el rango de estudio ya que al tener solo cuatro valores por microcuenca dificulta la relación temporal y el ajuste en la regresión lineal múltiple.

En este sentido el cálculo de coeficientes de exportación asociado a la carga promedio normalizada y a eventos pre y post precipitaciones consigue un enfoque representativo de la escurrentía superficial del lugar y el arrastre de nutrientes, lo cual puede dar una aproximación más exacta de los procesos hidrológicos y el movimiento de nutrientes en las microcuencas estudiadas para el período de estudio estimado, pero se tiene la limitación asociada a los porcentajes de uso de suelo inferiores que suponen microcuencas homogéneas a un uso en específico al considerar microcuencas con un porcentaje representativo.

2. Comparación con literatura

Según los coeficientes de exportación de nutrientes del hemisferio norte encontrados en literatura para nitrógeno total, se evidencian claras diferencias entre los coeficientes obtenidos y los propuestos en literatura, donde al aproximar los valores a un período anual, los valores más cercanos corresponden a los obtenidos por Oyarzun, (1997) y Clesceri, (1986) para el caso de regresión lineal múltiple, en el otro método de diferencia basal se encuentran valores más cercanos a Mcfarland, (2001) y Reckhow, (1980).

Tabla 12: Comparación de coeficientes de exportación de nitrógeno total obtenidos con literatura.

Uso de suelo	Nitrógeno total (kg/ha/invierno)			Literatura (kg/ha/año)	Fuente
	Método				
	Regresión lineal	Carga promedio normalizada	Diferencia en condición basal		
Monocultivo forestal	1,80	0,29	0,12	1,56	Cardenas et al 2007
Bosque Nativo	2,05	0,055	0,04	2,33	Clesceri et al 1986
				6,7	Oyarzun et al 1997
				0,6	Mcfarland et al 2001
				38	Shretsha, 2008
				2,86	Reckhow et al 1980
Agropecuario	2,68	3,79	6,06	16,53	Reckhow et al 1980
				6,69	Clesceri et al 1986
				11,34	Oyarzun et al 1997
				5,4	Mcfarland et al 2001
				52,5	Shretsha et al 2008

Fuente: elaboración propia en base a revisión bibliográfica

En relación a los coeficientes de exportación de fósforo total se obtuvo una mayor aproximación a los coeficientes obtenidos por Shretsha, 2008 y Reckhow, 1980 para la regresión lineal múltiple y para la diferencia de condición basal se presentan valores más cercanos a Mcfarland, (2001) como se presenta en la tabla 21, Anexos.

7.8 Cuantificación de exportación de nutrientes en la cuenca del Lago Lanalhue.

Para medir la exportación de nutrientes en la cuenca se consideró los valores obtenidos por la metodología del promedio de cargas normalizada por el área en la estación de invierno, debido a que los valores de regresión lineal múltiple requieren de un mayor número de muestreos para ser validados y la metodología de diferencias antes y después de eventos de precipitación solo se presenta como una propuesta para estimar coeficientes de exportación de nutrientes. De esta manera las mayores exportaciones de nitrógeno total provienen de los suelos agropecuarios con 12036 kg/invierno para nitrógeno total concentrando el 70% de las exportaciones, seguido de las plantaciones forestales con 4622 kg/invierno y finalmente bosque nativo en menor proporción, sin embargo, para el caso del fósforo total las diferencias son más estrechas, donde se presenta igualmente una mayor exportación para el uso agropecuario con 63% de las exportaciones y representa 1097 kg/invierno, seguida de los suelos de monocultivo forestal con 343 kg/invierno y finalmente el uso de bosque nativo con 292 kg/invierno, con valores relativamente similares.

Tabla 13: Coeficientes utilizados para cuantificar la exportación en la cuenca del lago Lanalhue.

Coeficientes de exportación por método de carga promedio normalizada (kg/ha/invierno)		
Uso de suelo	Nitrógeno Total	Fosforo Total
Monocultivo forestal	0,290	0,022
Bosque Nativo	0,055	0,036
Uso agropecuario	3,790	0,340

Se tiene que a pesar que el uso agropecuario representa solo un 8,84% de la cuenca, las cargas de nutrientes son mayores posiblemente a la aplicación de fertilizantes, las bajas densidades de drenaje y pendientes medias que hacen más lento el escurrimiento en las microcuencas. Por otro lado, las menores diferencias encontradas en la exportación de fósforo total entre bosque nativo y monocultivo forestal, se puede deber a lo sensible que son los datos al tener un bajo número de muestreos, en el cual se registró un pick en la exportación de nutrientes para las microcuencas de bosque nativo lo cual influyo directamente en los resultados encontrados, además, se puede atribuir el hecho de que son bosques de renoval en su mayoría, por lo cual el estado juvenil puede influir en la retención de nutrientes. Para el caso de monocultivo forestal se destaca la influencia de la vegetación de ribera presente en los cauces de estas microcuencas que actúa como buffer para disminuir los nutrientes que llegan a los cuerpos de agua.

Además, se cuantificó la exportación con valores obtenidos de bibliografía, propuestos por Cárdenas, 2007 y Oyarzun, 1997 en el sur de Chile, con el objetivo de comparar las diferencias de obtener exportaciones utilizando coeficientes propios de las zonas en estudio y coeficientes de otros lugares. Los resultados demuestran que para ambos nutrientes los panoramas son distintos al comparar las exportaciones para nitrógeno total se tiene que existe la misma relación con respecto a la mayor exportación por uso agropecuario pero menores diferencias entre bosque nativo y plantaciones forestales al utilizar valores bibliográficos, mientras que los valores experimentales demuestran una mayor influencia del uso agropecuario en la cuenca, lo cual representaría mejor la situación actual del lago Lanalhue, como se presenta en el siguiente gráfico.

Exportación de Nitrogeno total por uso de suelo en la cuenca del Lago Lanalhue con coeficientes obtenidos (Kg/Invierno)

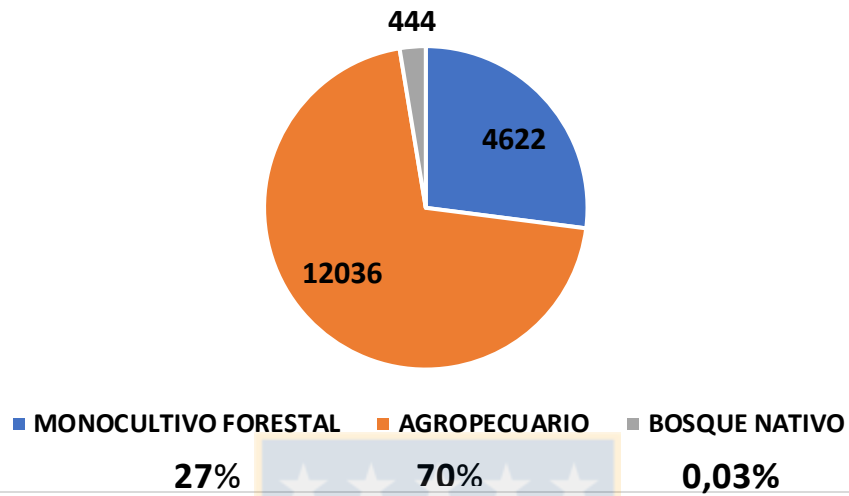


Figura 30: Exportación de nitrógeno total a partir de coeficientes obtenidos.
Fuente: elaboración propia

Exportación de Nitrogeno total por uso de suelo en la cuenca del Lago Lanalhue con coeficientes de literatura (Kg/Invierno)

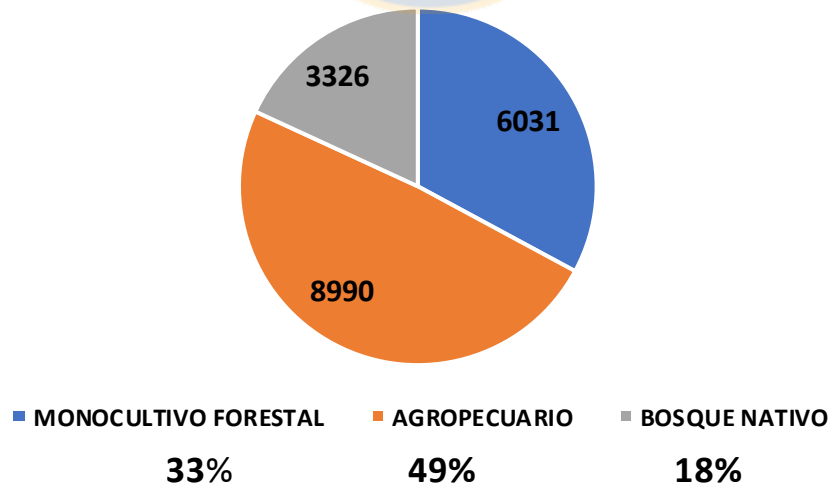


Figura 31: Exportación de nitrógeno total a partir de coeficientes de bibliografía.
Fuente: elaboración propia

En el caso de fósforo total, las diferencias son mayores dado que se presenta una mayor exportación para el uso de monocultivo forestal, luego bosque nativo y finalmente uso agropecuario al cuantificar la exportación con coeficientes de bibliografía mientras que con los coeficientes calculados existe una mayor exportación para el uso agropecuario, monocultivo forestal y finalmente bosque nativo, lo cual indica una mejor aproximación y relación lógica entre exportaciones por uso de suelo.

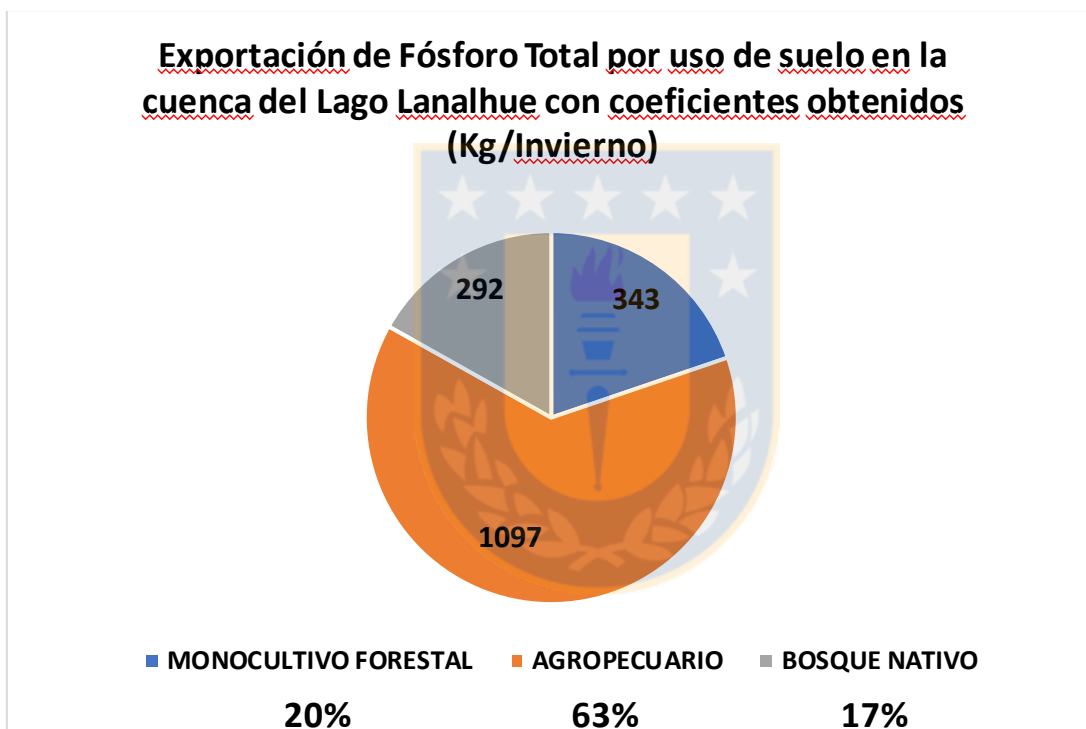


Figura 31: Exportación de fósforo total a partir de coeficientes obtenidos.
Fuente: elaboración propia

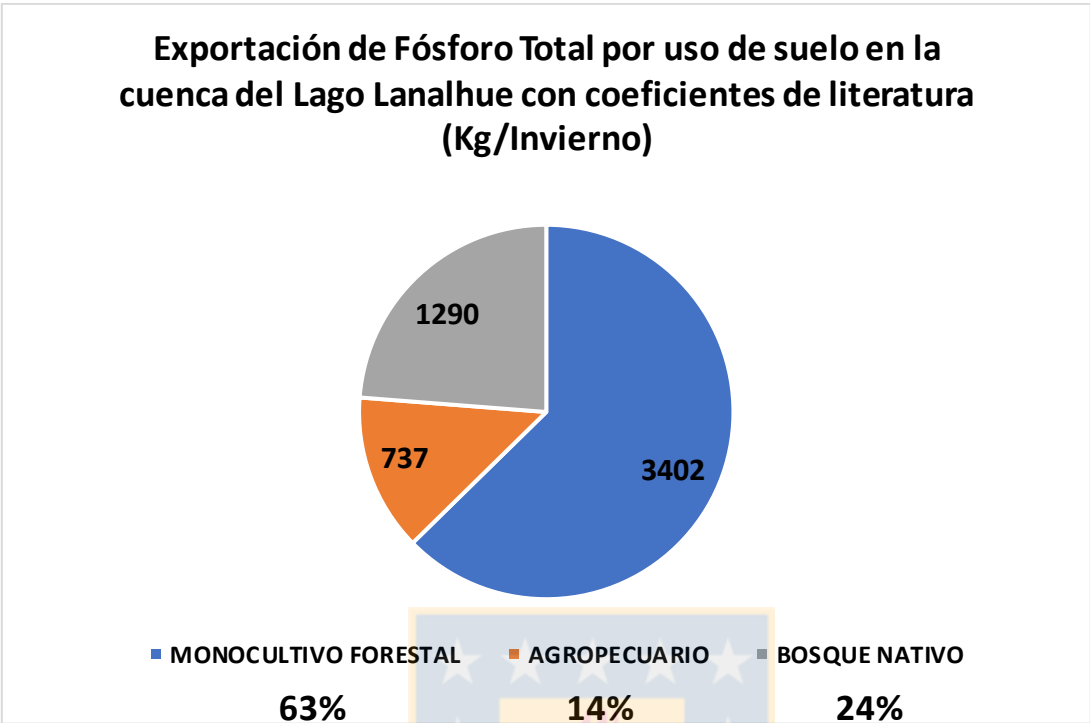


Figura 32: Exportación de fósforo total a partir de coeficientes de bibliografía.

Fuente: elaboración propia

De esta manera, se aprueba la hipótesis de que la utilización de coeficientes de exportación de nutrientes obtenidos de literatura pueden subestimar o sobreestimar la carga real de nutrientes en los cuerpos lacustres, por lo tanto, se recomienda realizar estudios propios de la cuenca en estudio.

7 CONCLUSIONES

Las microcuencas que presentaron los registros más altos de cargas de nutrientes corresponden a las de uso agropecuario Molino y Huilquehue, donde esta última obtuvo los valores máximos para nitrógeno y fósforo, seguido de las microcuencas de monocultivo forestal y bosque nativo, estas últimas con valores significativamente más bajos y con estrechas diferencias, debido a factores como, la intercepción, humedad, disponibilidad de nutrientes del suelo, la vegetación de ribera y topografía de las microcuencas forestales.

Para utilizar el modelo de regresión lineal múltiple se requieren muestreos continuos que reflejen la variabilidad estacional de la exportación de nutrientes y una mayor cantidad de estaciones, sin embargo, la utilización de regresión lineal múltiple tiene la ventaja de considerar el aporte de cada uso de suelo presente en las microcuencas. El cálculo de coeficientes de exportación con el método de carga promedio normalizada y la consideración de eventos pre y post precipitaciones permite obtener un enfoque representativo de las descargas asociadas a escorrentía superficial y el arrastre de nutrientes, lo cual puede establecer una aproximación real de los procesos hidrológicos de la cuenca y la circulación de nutrientes, pero se limita a la obtención de microcuencas representativas donde no se consideran los porcentajes menores de categorías de usos de suelos. Con estas metodologías (carga normalizada y diferencias en la condición basal) se encontró una relación lógica de exportación asociado a las categorías de uso de suelo y al comparar con literatura presentan mayor similitud.

La cuantificación de nutrientes realizada con los coeficientes de exportación obtenidos con la carga promedio normalizada por el área permitió establecer que las mayores exportaciones corresponden al uso agropecuario para nitrógeno total y fósforo total a pesar de que representa un porcentaje menor de 8,84% en la cuenca, lo cual se debe principalmente por la zonas de baja pendiente, menores densidades de drenaje y mayor carga de nutrientes asociado a la aplicación de contaminantes

externos como la utilización de fertilizantes y las deposiciones de animales. La influencia de esta categoría es fundamental en las exportaciones y se encuentra relacionada principalmente con la ubicación de estos suelos muy próximos al lago donde existe una menor distancia con el traslado de nutrientes y se podría considerar un factor importante en el estado de eutrofización en el cual se encuentra actualmente el lago. La utilización de coeficientes de exportación de bibliografía puede variar la cuantificación de nutrientes en cantidad y en proporción de exportación por uso de suelo, por lo tanto, se requiere el desarrollo modelos que permitan determinar coeficientes de exportación, incluyendo vínculos biogeoquímicos entre cambios en las propiedades del paisaje en cuencas hidrográficas y ecosistemas a escalas regionales y globales.

Debido a lo anterior la aplicación de coeficientes de exportación propios de las zonas de estudio permiten evaluar eficientemente las cargas de contaminantes por área en una cuenca hidrográfica y realizar una aproximación certera de las condiciones que caracterizan el lugar incluyendo variables como tipo de suelo, geología, vegetación y procesos hidrológicos específicos. Para esto es importante contar con recursos para desarrollar un programa de muestreo que permita incluir distintos escenarios y variaciones meteorológicas con el objetivo de implementar herramientas de planificación territorial y potenciar el desarrollo de proyectos de investigación fundamentales para establecer el estado ambiental, proponer medidas de gestión que sean evaluadas y aplicadas a la realidad del ecosistema.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguayo, M., Pauchard, A., Azocar, G. & Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82, 361-374., De Base de datos.
- Almanza Marroquin, V., Figueroa, R., Parra, O., Fernandez, X., Baeza, C., Yanez, J., & Urrutia, R. (2016). Bases limnológicas para la gestión de los lagos urbanos de Concepción, Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(2), 313–326. <https://doi.org/10.3856/vol44-issue2-fulltext-12>.
- Alonso-Sanchez, H.. (2014). Identificación de curva de escurrimiento en tres microcuencas del río Coatán, Chiapas, México. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 4, . , De Base de datos.
- APHA., AWWA., & WPCF. (1975) Standard methods for examination of water and wastewater, 14th edition. American Public Health Association.
- Biavati, G. & Estrada, J.. (). El fósforo en la planta y en el suelo. 2018, de Growhow Sitio web: <http://www.horticom.com/pd/imagenes/55/871/55871.pdf>
- Biblioteca Nacional del Congreso. (s.f). Clima y vegetación región del Biobío. 2017, de Sitio web: <http://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region8/clima.htm>
- Biblioteca Nacional del Congreso. (2002). Reportes comunales. 2017, de Instituto Nacional de Estadísticas INE Sitio web: http://reportescomunales.bcn.cl/2012/index.php/Contulmo#Poblaci.C3.B3n_tot_al_2002_y_proyecci.C3.B3n_2012_INE
- Cardenas, P.. (2007). CAMBIOS EN LA EXPORTACIÓN Y RETENCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO CAUSADO POR LA CONVERSIÓN DE BOSQUE NATIVO A PLANTACIONES FORESTALES EN MICROCUENCAS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA EN EL SUR DE CHILE . Universidad Austral de Chile, . , De Base de datos.
- Carpenter, S.R., Bolgrien, D., Lathrop, R.C., Stowe, C.A., Reed, T., Wilson, M.A., (1997). Ecological and economic analysis of lake eutrophication by nonpoint pollution. *Australian Journal of Ecology* 23, 68±79.
- Centro EULA. (2018). Programa de Ordenamiento y Gestión Territorial para la cuenca del Lago Lanalhue.
- Consejo Nacional de Cultura y las Artes. (2015). Región del Biobío síntesis regional.

2017, de Departamento de Estudios Sitio web:
<http://www.cultura.gob.cl/wpcontent/uploads/2015/08/InformeBiob%20C3%ADo-final.pdf>

Contreras, M (2010). Calidad de aguas y contaminación: etapa diagnóstico. Informe preparado para el diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Santiago, Chile.

Cisternas, M., Martínez P., Oyarzún, C. & Debels, P.. (1999). Caracterización del proceso de reemplazo de vegetación nativa por plantaciones forestales en una cuenca lacustre de la Cordillera de Nahuelbuta, VIII Región, Chile. Revista Chilena de Historia Natural, 72, 661-676. , De Base de datos.

Claros, J.. (2012). ESTUDIO DEL PROCESO DE NITRIFICACIÓN Y DENITRIFICACIÓN VÍA NITRITO PARA EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE CORRIENTES DE AGUA RESIDUAL CON ALTA CARGA DE NITRÓGENO AMONÍACAL. Universidad Politécnica de Valencia , , , De Base de datos.

Chow, Ven Te; Maidment, David R.; Mays, Larry W.. (1994). Hidrología aplicada. : McGraw-Hill.

Clesceri, N. Curran, S and Sedlak R.. (1986). Nutrient loads to Wisconsin Lakes; Part 1. Nitrogen and phosphorus export coefficients.. Water Resources Bulletin, 22, . , De Base de datos.

Departamento Provincial de Aguas. (s.f). Índice NDVI. 2018, de Gobierno de Argentina Sitio web: <http://www.dpa.gov.ar/clima/informes/NDVI.pdf>

Drewry, J.J, Newham, L.T.H., Greene, R.S.B, Jakeman, A.j, Crocke, B.F.W. (2006). A review of nitrogen and phosphorus export to waterways: context for catchment modelling. Marine and Freshwater Research, 57, 757-774. , De Base de datos.

Dillon, P.J; Rigler, F.H (1974). A test of simple budget model predicting the phosphorus concentration in lake water. J. Fish. Res Board Can 31:1771-1778

Donoso, C. & A, Lara. (1996) Utilización de los bosques nativos en Chile: pasado, presente y futuro. En: Armesto JJ, C Villagrán & MK Arroyo (eds) Ecología de los bosques nativos de Chile: 363-387. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.

Echeverría C, D Coomes, J Salas, JM Rey-Benayas, A Lara et al. (2006) Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. Biological Conservation 130: 481-494.

- FAO. (1997). Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/W2598S/w2598s00.htm#Contents>
- FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Informe Sobre Temas Hídricos no. 38*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>
- FAO. (2015). America del sur, centroamerica y el caribe. Retrieved from http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/chl/indexesp.stm
- Ferrais, F., Bonilla, R., (1981). Arauco-Lebu. Mapas Geológicos Preliminares de Chile. IGG N°6.
- Frink, C.. (1991). Estimating Nutrient Export to Estuaries. *Journal of Environmental Quality*, 20, 717-724.
- Fuentealba, C., Figueroa, R., Gonzalez, F., & Palma, M. (2010). Variabilidad genética local del bivalvo dulceacuícola *Diplodon chilensis* (Gray 1828) proveniente de tres lagos Nahuelbutanos. *Gayana*, 74(2), 113–124. <https://doi.org/10.4067/10.4067/S0717-65382010000200005>
- Fuenzalida, H. (1971). *Clima: Geografía económica de Chile*. Texto refundido. Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile. 99-152.
- Gaspari, F.J. (2012). MORFOMÉTRICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAUCE GRANDE, BUENOS AIRES, ARGENTINA.
- Gayoso, J. & Alarcon, D. (1999). *Guía de Conservación de Suelos Forestales*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Gayoso, J. 2000. *Mejores prácticas para un manejo forestal sustentable*. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Programa Producción Forestal y Medio Ambiente. 7 p
- Ginés, I., Mariscal-Sancho, I. (2002). Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo. Universidad Politécnica de Madrid, , , De Base de datos.
- Gisbert, J., Asencio, S., & Moreno, H.. (2010). . En *La textura de un suelo* (). Universidad Politécnica de Valencia: .
- Gobierno Regional del Biobío. (2014). *PROYECTO ANÁLISIS DE RIESGOS DE DESASTRES Y ZONIFICACIÓN COSTERA, REGIÓN DEL BIOBIO*.
- Gonzalez, S.. (2007). Contaminación difusa de las aguas. INIA Tierra Adentro, , 21 Instituto Espacial Ecuatoriano. (s.f).
- Heathwaite, A.L. (1990). PREDICTING THE EFFECT OF LAND USE ON STREAM

WATER QUALITY IN THE UK . Sediment and Stream Water Quality in a Changing Environment: Trends and Explanati, , . , De Base de datos.

Hodge, T, Armstrong, L.. (1993). Use of a Multiple Lineal Regression Model to Estimate Stormwater Pollutant Loading". Journal of Water Management Modeling.

Instituto de Fomento Pesquero IFOP. (2014). Evaluación del estado ambiental de los lagos utilizados para actividades de acuicultura en la zona sur austral de Chile .

Iroumé, A, Palacios, H.. (2013). Afforestation and changes in forest composition affect runoff in large river basins with pluvial regime and Mediterranean climate, Chile.. Journal of Hidrology, 505, 113-125.

Johnes, PJ (1996). Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach. Journal of Hidrology 183.

Liu, R., Yang, Z., Shen, Z., Yu, S. L., Ding, X., Wu, X., & Liu, F. (2009). Estimating Nonpoint Source Pollution in the Upper Yangtze River Using the Export Coefficient Model, Remote Sensing, and Geographical Information System. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 135(9), 698–704. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2009\)135:9\(698\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:9(698))

Mcfarland, A & Hauck, M (2001) DETERMINING NUTRIENT EXPORT COEFFICIENTS AND SOURCE LOADING UNCERTAINTY USING IN-STREAM MONITORING DATA. Journal of the american water resouces association. vol 31 N°1.

Maidment. (1992). Handbook of Hidrology. New York: McGraw-Hill.

Mardones, M (1999) Contribucion al conocimiento geomorfologico de las cuencas hidrograficas de los lagos Lanalhue y Lleulleu. Revista geografica de Chile Terra Australis, 44:87-106.

Margalef, R. 1983. Limnología. Ediciones Omega, S.A., Barcelona. 1010 p

Ministerio del Medio Ambiente. (2011). Análisis General De Impacto Económico Y Social Del Anteproyecto De Normas Secundarias De Calidad Ambiental Para La Proteccion De Las Aguas Del Lago Villarrica, 75.

Montalva, S. (2015, 6 de septiembre) LOS PARQUES EMERGENTES que hay que conocer en Chile. Economía y Negocios [en línea]. Recuperado de

<http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=180042> [2018, 25 de mayo].

Montoya, Y & Montoya, B. (2009). CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA LOS ANDES, EL CARMEN DE VIBORAL, ANTIOQUIA-COLOMBIA. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8, . , De Base de datos.

MOP. (2012). *Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012 - 2025*, 40. Retrieved from http://www.mop.cl/Documents/ENRH_2013_OK.pdf

Municipalidad de Contulmo. (2015). Estudio de factibilidad sanitaria, 1–6. Retrieved from http://www.contulmo.cl/wp-content/uploads/2017/10/Plan_Regulador_Comunal/DOCUMENTOS_PLAN_REGUALDOR_-_EAE-PATRIMONIO/MEMORIA_PRC/PRC_Contulmo_Factibilidad_Sanitaria_Abril_2017.pdf

Novotny, W.. (2002). *Water Quality: Diffuse Pollution and Watershed Management*.

Oyarzun, C. E., Campos, H., & Huber, A. (1997). Exportación de nutrientes en microcuencas con distinto uso del suelo en el sur de Chile (Lago Rupanco , X Región). *Revista Chilena de Historia Natural*, 70, 507–519.

Parra, O., Valdovinos, C., Urrutia, R., Cisternas, M., & Habit, E. (2003). Caracterización y tendencias tróficas de cinco lagos costeros de Chile Central, 22, 51–83.

Pauchard, A., García, R., Langdon, B., & Fuentes, N. (2011). The Invasion of Non-Native Plants in Chile and their Impacts on Biodiversity: History, Current Status, and Challenges for Management. En: *Biodiversity Conservation in the Americas: Lessons and Policy Recommendations*. Figueroa E. Editorial FEN-Universidad de Chile, Santiago Chile. pág 133-165.

Peterson, BJ, . (2001). Control of Nitrogen Export from Watersheds by Headwater Streams. *Science*, 292, 86-90.

Programa Mundial de la Evaluación de los Recursos Hídricos WWAP. (2009). La contaminación del agua sigue creciendo a nivel mundial. Retrieved from <http://www.unesco.org/new/es/naturalsciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-15-water-pollution/>

Reckhow, K.H., Beaulac, M.N., Simpson, J.T., 1980. Modeling Phosphorus Loading and Lake Response under Uncertainty: a Manual and Compilation of Export Coefficients. U.S. Environmental Protection Agency, Clean Lake Section, Washington, D.C. EPA 440/5-80-011, June 1980, 214.

- Reyes, A., Ulises, F., Carvajal Y. (2010). Guía básica para la caracterización morfológica de cuencas hidrográficas. Universidad del Valle. Programa Editorial
- Rodríguez, N, Ruz, E & Chavarría, J. (1993). PRINCIPIOS BASICOS DE ACIDEZ DEL SUELO. IPA Quilamapu, 57., , De Base de datos.
- Ryding SO & W Rast (1992). El control de la eutrofización en lagos y pantanos. Editorial Piramide S.A., UNESCO, Madrid, España. 375 pp.
- Segovia, María A. - Hang, María V.. (). Estimación del Valor del Número de Curva (CN) a Través de Imágenes Satelitales Landsat5-tm. Departamento de Hidráulica - Facultad de Ingeniería - UNNE, , . , De Base de datos.
- Seitzinger, S. & Harrison, J. (2005). Sources and delivery of carbon, nitrogen and phosphorus to the coastal zone: An overview of Global Nutrient Export from Watersheds (NEWS) models and their application. Global Biogeochemical cycles, 19.
- Servicio Agrícola Ganadero SAG. (2016). Pauta para estudio de suelos., 2018, De Base de datos.
- Servicio Geológico Colombiano - Universidad Industrial de Santander. (2017). SUSCEPTIBILIDAD POR COBERTURAS DE LA TIERRA. En Amenazas Geológicas().
- Shretsha,S., Kazama, F., Newham, L.T.H., Babel M.S., Clemente, R.S., Ishidaira, H, Nishida, K., Sakamoto, Y.(2008) Catchment scale modelling of point source and non-point source pollution loads using pollutant export coefficients determined from long-term in-stream monitoring data. Journal of Hydro-environment research 2.
- Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater , marine , and terrestrial ecosystems, 100.
- Toro, M, Robles, S \$ Aviles, J. (2002). Calidad de las aguas de los ríos mediterráneos del proyecto GUADALMED. Características físico-químicas.. Asociación Española de Limnología, , . , De Base de datos.
- Urrutia, R., Cisternas M., Araneda, A., Retamal, O., Parra, O., Mardones, M. (2000) Caracterización morfológica y sedimentológica de cinco lagos costeros en la VIII región, Chile. Revista Geografica de Chile Terra Australis.
- Vighi M, S Soprani, P Puzzarini & G Menghi (1991) Phosphorus loads from selected watersheds in the drainage area of the Northern Adriatic sea. Journal of Environmental Quality 20: 439-444

- Villalobos, L., Parra, O., Grandjean, M., Jaque, E., Woelfl, S., & Campos, H. (2003). A study of the river basins and limnology of five humic lakes on Chiloé Island. Estudio de la cuenca y limnología en cinco lagos húmicos de la Isla Chiloé.
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenko, J., Melillo, J.M., (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277, 494-499.
- Vollenweider, R.A., (1968). Scientific fundamentals of stream and lake eutrophication, with particular reference to nitrogen and phosphorus. OECD Tech. Rep. DAP/DST/IS. Organization for Economic Co-operation and Development, Paris.
- Wetzel, R. (2001) *Limnology: Lake and River Ecosystems*. Edition, 3, illustrated.
- WWAP, (2009) La contaminación del agua sigue creciendo a nivel mundial obtenido de: <http://www.unesco.org/new/es/naturalsciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-15-water-pollution>
- Xiao-Peng Song, Matthew C. Hansen, Stephen V. Stehman, Peter V. Potapov, Alexandra tyukavina, eric F. Vermote & John r. townshend. (2018). Global land change from 1982-2016. *Nature*, 550, 639. , De Base de datos.
- Yang, D., Kanae, S., Oki, T., Koike, T., Musiake, K., 2003. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrol. Process.*

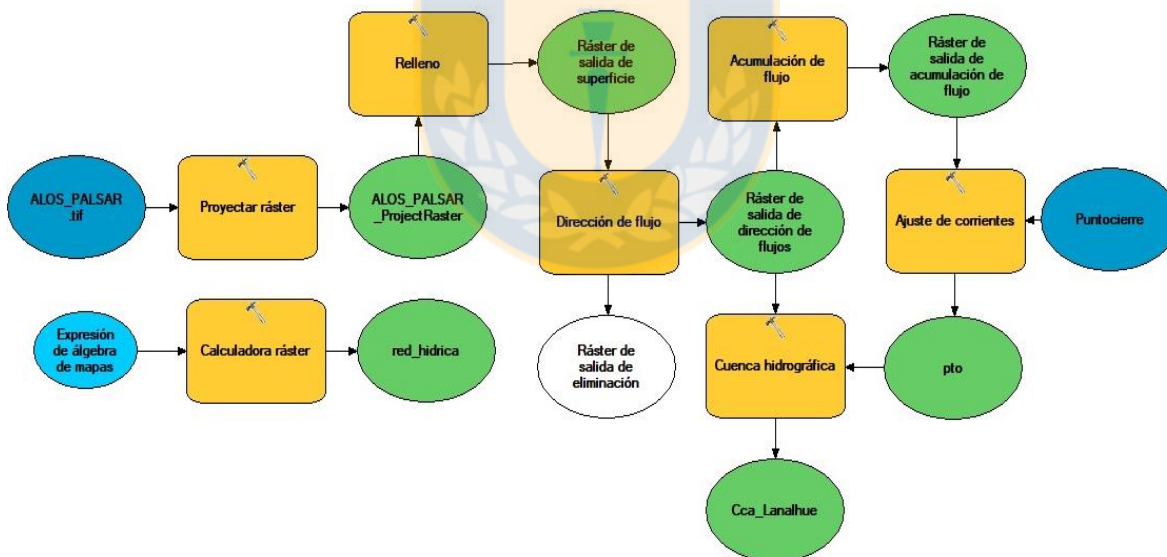
9 ANEXOS

Anexo 1: Índices de exportación de nutrientes según literatura utilizados en Chile.

Usos de suelo	N total ug/L	P total ug/L
Agricultura	314,7	28,7
Bosque Nativo	67,3	4,9
Cuerpos de agua	95,6	8,6
Humedales	95,6	8,6
Matorral	180,0	15,1
Nieve	67,8	67,3
Plantación	225,8	12,0
Praderas	318,6	27,4
Suelo desnudo	67,8	67,3
Urbano	452,0	-

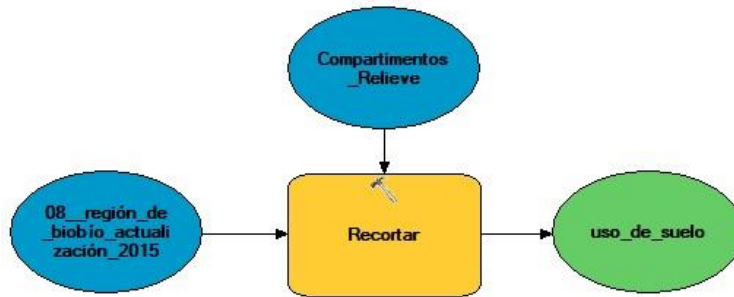
Fuente: Extraído de Evaluación del estado ambiental de los lagos utilizados para actividades de acuicultura en la zona sur austral de Chile (2014)

Anexo 2: Metodología para extracción de red hídrica.



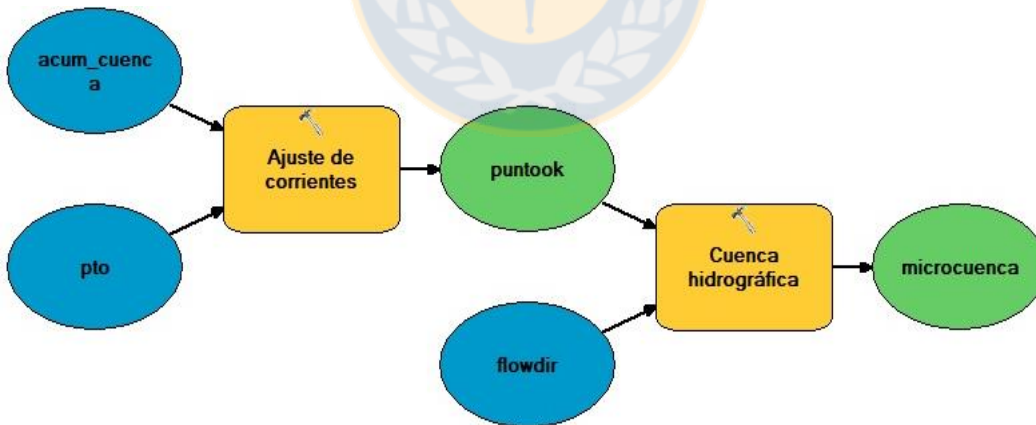
Fuente: elaboración propia en base a Model Builder ArcGIS 10.1

Anexo 3: Modelo para obtener usos de suelo.



Fuente: Model Builder en base a Arcgis 10.1

Anexo 4: Modelo para delimitación de microcuencas.

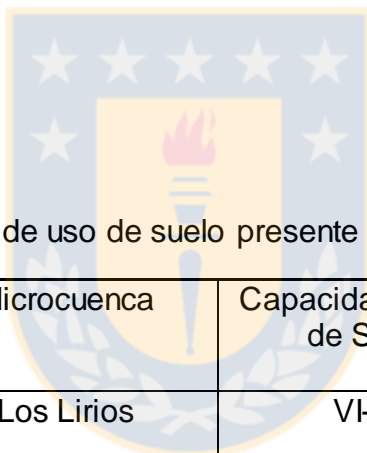


Fuente: elaboración propia en base a ModelBuilder ArcGIS 10.1

Anexo 5: Tiempos de concentración para cada microcuenca.

Tiempo de concentración	Giandotti (min)	California Culverts Practice (1942) (min)	Normas españolas (min)	Promedio (min)
Los lirios	48,51	15,94	14,00	26,15
Hostería	31,85	10,53	9,61	17,33
Molino	17,85	3,83	3,41	8,36
Huilquehue	20,47	3,27	2,55	8,76
Quilas	42,43	14,59	12,83	23,28
Rodal	18,21	4,75	4,58	9,18

Fuente: “elaboración propia en base a Manual de carreteras



Anexo 6: Capacidad de uso de suelo presente en cada microcuenca.

Uso de suelo	Microcuenca	Capacidad de uso de Suelo	Textura del suelo identificable
Monocultivo Forestal	Los Lirios	VI-VII	Moderadamente fina
	Hostería	VII	Moderadamente fina
Agropecuario	Molino	II-III-VII	Moderadamente fina
	Huilquehue	IV-VII	Media
Bosque Nativo	Quilas	VI-VII	Moderadamente fina
	Rodal	VII	-

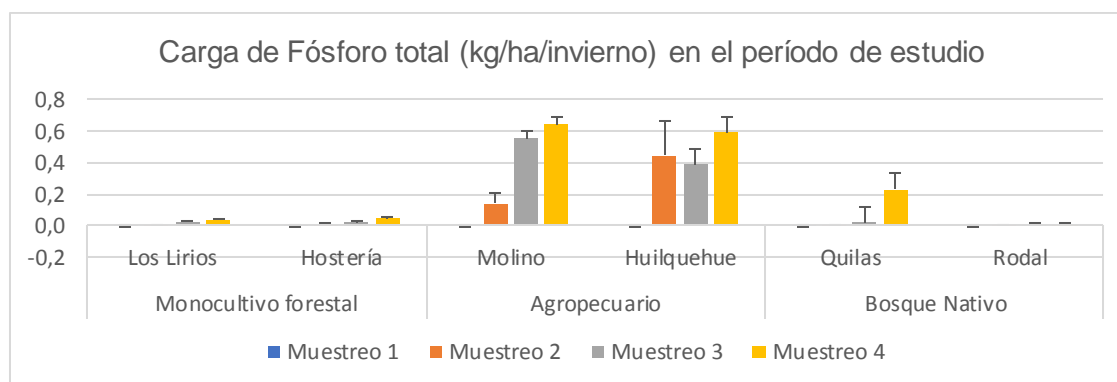
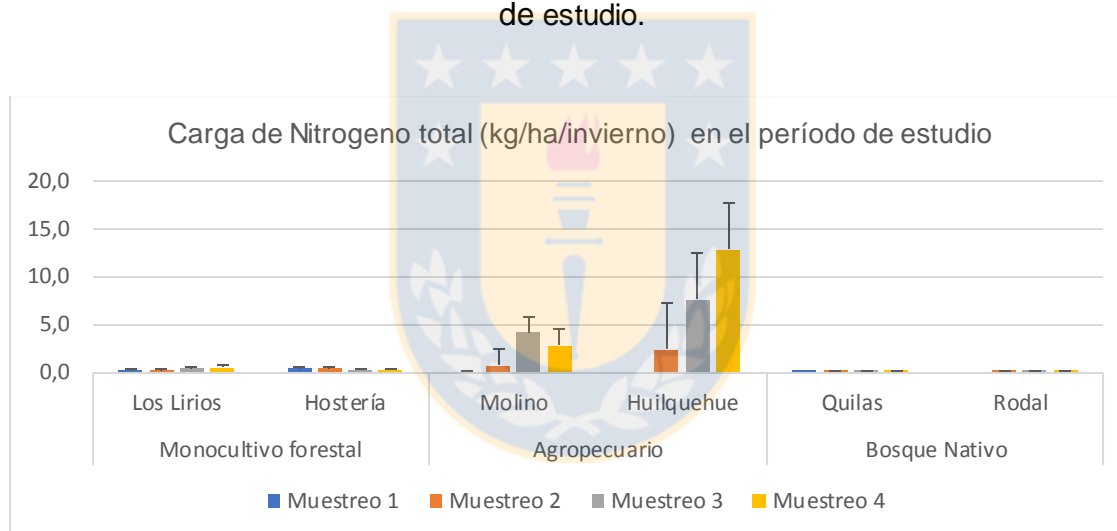
Fuente: elaboración propia en base a información CIREN (2014)

Anexo 7: Grado de Erodabilidad en cada microcuenca.

Uso de suelo	Microcuenca	Tipo de roca predominante	Grado de Erodabilidad
Monocultivo Forestal	Los Lirios	Metamórfico	Moderado
	Hostería	Metamórfico	Moderado
Agropecuario	Molino	Metamórfico	Moderado
	Huilquehue	Sedimentos Marinos	Muy bajo
Bosque Nativo	Quilas	Metamórfico	Moderado
	Rodal	Metamórfico	Moderado

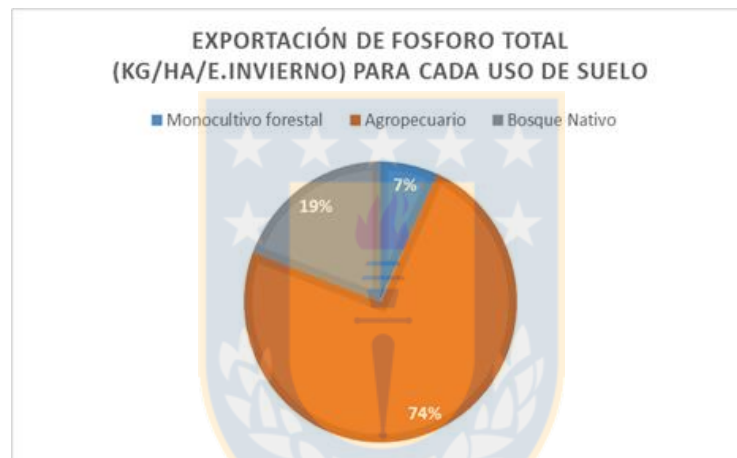
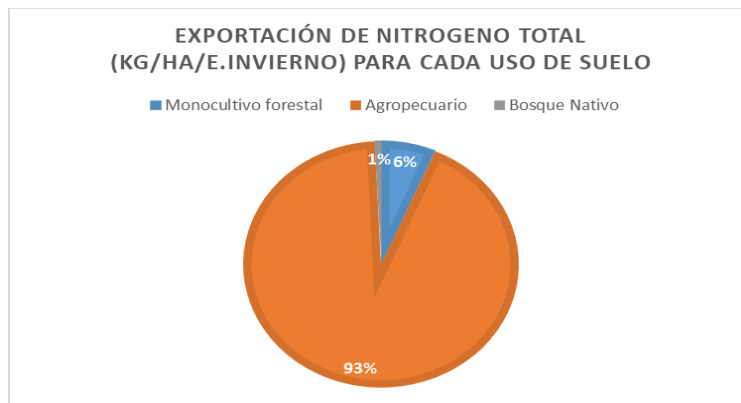
Fuente: elaboración propia en base a IDE, 2017

Anexo 8: Carga de nitrógeno y fósforo total para cada microcuenca en el período de estudio.



Fuente: elaboración propia

Anexo 9: Porcentaje de exportación de nutrientes por metodología de carga promedio en eventos con precipitación y sin precipitación.



Fuente: elaboración propia

Anexo 10: Temperatura registrada para cada microcuenca en el período de estudio.

Microcuenca		Temperatura (°C)				
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Promedio
Monocultivo forestal	Los Lirios	11,8	11,1	10,3	10,4	10,9
	Hostería	12,8	11,9	11,2	10,8	11,675
Agropecuario	Molino	-	10,5	10,4	10,4	10,44
	Huilquehue	-	9,1	8,8	8,6	8,83
Bosque nativo	Quilas	11,3	9,8	9,8	9,4	10,07
	Rodal	-	9,8	9,8	9,0	9,53

Fuente: elaboración propia

Anexo 11: pH registrado para cada microcuenca en el período de estudio.

Microcuenca		pH			
		Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
Monocultivo forestal	Los Lirios	6,64	6,85	6,95	8,30
	Hostería	6,67	7,06	7,03	8,79
Agropecuario	Molino	-	7,51	7,57	8,38
	Huilquehue	-	6,35	6,35	7,12
Bosque nativo	Quilas	7,69	7,47	7,36	7,53
	Rodal	-	7,50	7,71	7,46

Fuente: elaboración propia

Anexo 12: Conductividad registrada para cada microcuenca en el período de estudio.

Microcuenca	Conductividad			
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
Los Lirios	14,18	65,5	53,5	66,0
Hostería	10,32	45,0	36,5	45,0
Molino		38,0	30,7	31,0
Huilquehue		139,2	56,8	75,0
Quilas		55,9	44,1	49,0
Rodal		51,8	47,7	42,0

Fuente: elaboración propia

Anexo 13: Concentración de nitrógeno total para cada microcuenca registrado en el período de estudio.

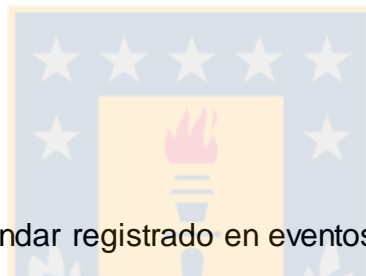
Microcuenca	Nitrógeno (mg/L)			
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
Los Lirios	0,24	0,11	0,15	0,13
Hostería	0,27	0,28	0,22	0,18
Molino	-	0,15	0,15	0,13
Huilquehue	-	0,37	0,39	0,43
Quilas	0,18	0,11	0,16	0,07
Rodal	-	0,10	0,15	0,14

Fuente: elaboración propia

Anexo 14: Concentración de fósforo total para cada microcuenca registrado en el período de estudio.

Microcuenca	Fósforo (mg/L)			
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
Los Lirios	0,01	0,02	0,01	0,01
Hostería	0,01	0,01	0,02	0,03
Molino	-	0,03	0,02	0,03
Huilquehue	-	0,07	0,02	0,02
Quilas	0,01	0,02	0,03	0,12
Rodal	-	0,01	0,06	0,04

Fuente: elaboración propia



Anexo 15: Caudal estándar registrado en eventos con y sin precipitación.

Microcuenca		Caudal (L/s)							
		Sin precipitación				Con precipitación			
		Muestr eo 1	Muestr eo 2	Prome dio	Q estánd ar (L/s/K m ²)	Muestr eo 3	Muestr eo 4	Prome dio	Q estánd ar (L/s/K m ²)
Monoculti vo forestal	Los Lirios	15	16	15,5	5,76	94,2	131,6	112,9	41,97
	Hostería	12,7	14,3	13,5	17,76	11,3	14,1	12,7	16,71
Agropecu ario	Molino	-	2,8	2,8	56,00	16,4	12,72	14,56	291,2 0
	Huilque hue	-	1,6	1,6	80,00	4,9	7,47	6,185	309,2 5
Bosque Nativo	Quilas	7,6	7,0	7,3	4,37	13,8	40,6	27,2	16,29
	Rodal	-	0,37	0,37	2,85	0,397	0,50	0,448 5	3,45

Anexo 16: Caudal estándar registrado en cada microcuenca en el período de estudio.

Microcuenca		Caudal (L/s)					
Tipo de uso	Nombre	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio	Caudal estándar(L/s/Km ²)
Monocultivo forestal	Los Lirios	15	16	94,2	131,6	64,2	23,87
	Hostería	12,7	14,3	11,3	14,1	13,1	17,24
Agropecuario	Molino	-	2,8	16,4	12,72	10,6	212,00
	Huilquehue	-	1,6	4,9	7,47	4,7	235
Bosque Nativo	Quilas	7,6	7,0	13,8	40,6	17,3	10,36
	Rodal	-	0,371	0,397	0,50	0,43	3,31

Fuente: elaboración propia

Nota: desde aquí en adelante al intentar pegar el título a tabla o figura se DESCONFIGURA, puede ser tema versión de Word. (me paso con otra tesis, favor arreglar. La idea es que tablas o figuras deben quedar en una sola página

Anexo 17: Parámetros físico-químicos de cada microcuenca en eventos sin precipitación.

Uso de suelo	Microcuenca	Sin precipitación	T (°C)	pH	Cond (S*m ⁻¹)	Nt (mg/L)	Pt (mg/L)
Monocultivo forestal	Los Lirios	Promedio	11,45	6,75	39,85	0,18	0,02
		Max.	11,8	6,85	65,5	0,24	0,02
		Min	11,1	6,64	14,2	0,11	0,01
		Desv	0,495	0,148	36,275	0,092	0,007
		Mediana	11,45	6,75	39,85	0,18	0,02
		N	2	2	2	2	2
	Hostería	Promedio	12,4	6,87	27,65	0,28	0,01
		Max.	12,8	7,06	45	0,28	0,01
		Min	11,9	6,67	10,3	0,27	0,01
		Desv	0,636	0,276	24,537	0,007	0,000
		Mediana	12,4	6,87	27,65	0,28	0,01
		N	2	2	2	2	2
Agropecuario	Molino	Promedio	10,5	7,51	38	0,15	0,03
		Max.	10,5	7,51	38	0,15	0,03
		Min	10,5	7,51	38	0,15	0,03
		Desv	0	0	0	0	0
		Mediana	10,5	7,51	38	0,15	0,03
		N	1	1	1	1	1
	Huilquehue	Promedio	9,1	6,35	139,2	0,37	0,07
		Max.	9,1	6,35	139,2	0,37	0,07
		Min	9,1	6,35	139,2	0,37	0,07
		Desv	0	0	0	0	0
		Mediana	9,1	6,35	139,2	0,37	0,07
		N	1	1	1	1	1
Bosque nativo	Quilas	Promedio	10,6	7,58		0,15	0,02
		Max.	11,3	7,69		0,18	0,02
		Min	9,8	7,47		0,11	0,01
		Desv	1,061	0,156		0,049	0,007
		Mediana	10,6	7,58		0,15	0,02
		N	2	2	2	2	2
	Rodal	Promedio	9,8	7,5	51,8	0,1	0,01
		Max.	9,8	7,5	51,8	0,1	0,01
		Min	9,8	7,5	51,8	0,1	0,01
		Desv	0	0	0	0	0
		Mediana	9,8	7,5	51,8	0,1	0,01
		N	1	1	1	1	1

Fuente: elaboración propia

Anexo 18: Parámetros físico-químicos de cada microcuenca en eventos con precipitación.

Uso de suelo	Microcuenca	Con precipitación	T (°C)	pH	Cond (S*m ⁻¹)	Nt (mg/L)	Pt (mg/L)
Monocultivo forestal	Los Lirios	Promedio	10,35	7,62	59,7	0,14	0,01
		Max.	10,4	8,3	66	0,15	0,01
		Min	10,3	6,95	53,5	0,13	0,01
		Desv	0,071	0,955	8,839	0,014	0,000
		Mediana	10,35	7,625	59,75	0,14	0,01
		N	2	2	2	2	2
	Hostería	Promedio	11	7,91	40,75	0,2	0,03
		Max.	11,2	8,79	45	0,22	0,03
		Min	10,8	7,03	36,5	0,18	0,02
		Desv	0,283	1,245	6,010	0,028	0,007
		Mediana	11	7,91	40,75	0,2	0,025
		N	2	2	2	2	2
Agropecuario	Molino	Promedio	10,4	7,98	30,85	0,14	0,03
		Max.	10,4	8,38	31	0,15	0,03
		Min	10,4	7,57	30,7	0,13	0,02
		Desv	0,000	0,573	0,212	0,014	0,007
		Mediana	10,4	7,98	30,85	0,14	0,03
		N	2	2	2	2	2
	Huilquehue	Promedio	8,7	6,74	65,9	0,41	0,02
		Max.	8,8	7,12	75	0,43	0,02
		Min	8,6	6,35	56,8	0,39	0,02
		Desv	0,141	0,544	12,869	0,028	0,000
		Mediana	8,7	6,74	65,9	0,41	0,02
		N	2	2	2	2	2
Bosque nativo	Quilas	Promedio	9,6	7,45	46,5	0,12	0,08
		Max.	9,8	7,53	49	0,16	0,12
		Min	9,4	7,36	44	0,07	0,03
		Desv	0,283	0,120	3,536	0,064	0,064
		Mediana	9,6	7,45	46,5	0,12	0,08
		N	2	2	2	2	2
	Rodal	Promedio	9,4	7,59	44,9	0,15	0,05
		Max.	9,8	7,71	47,7	0,15	0,06
		Min	9	7,46	42	0,14	0,04
		Desv	0,566	0,177	4,031	0,007	0,014
		Mediana	9,4	7,59	44,9	0,15	0,05
		N	2	2	2	2	2

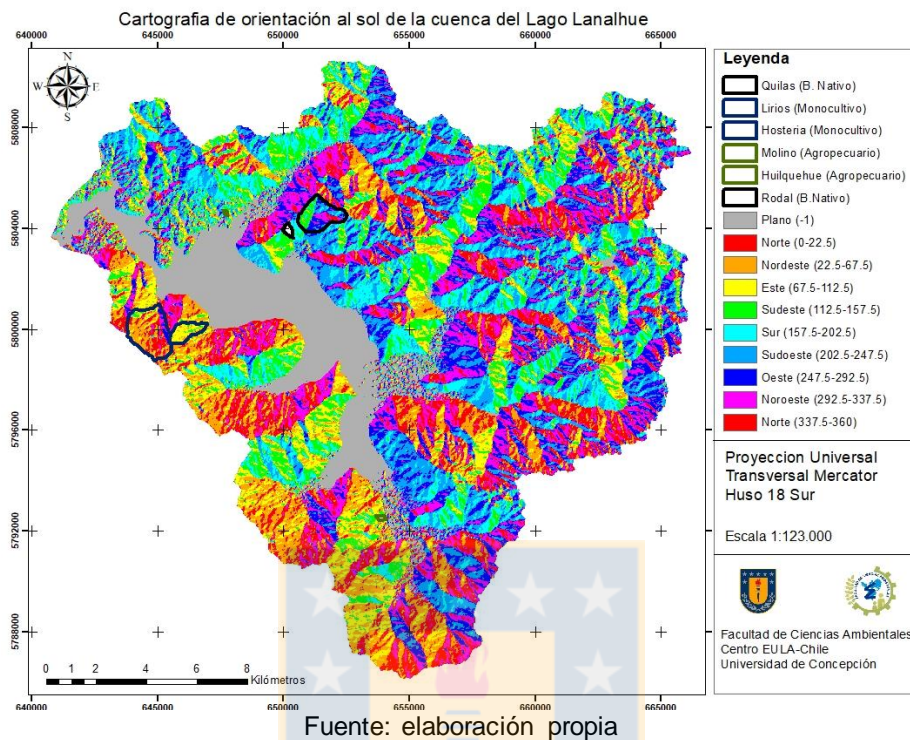
Fuente: elaboración propia

Anexo 19: Parámetros físico-químicos de cada microcuenca en todo el período de estudio.

Uso de suelo	Microcuenca	Todas las muestras	T (°C)	pH	Cond (S*m ⁻¹)	Nt (mg/L)	Pt (mg/L)
Monocultivo forestal	Los Lirios	Promedio	10,9	7,2	49,8	0,16	0,01
		Max.	11,8	8,3	66	0,24	0,02
		Min	10,3	6,64	14,18	0,11	0,01
		Desv	0,698	0,653	24,436	0,057	0,005
		Mediana	10,75	6,9	59,5	0,14	0,01
		N	4	4	4	4	4
	Hostería	Promedio	11,7	7,4	34,2	0,24	0,02
		Max.	12,8	8,79	45	0,28	0,03
		Min	10,8	6,67	10,32	0,18	0,01
		Desv	0,877	0,824	16,420	0,046	0,010
		Mediana	11,55	7,05	40,8	0,25	0,02
		N	4	4	4	4	4
Agropecuario	Molino	Promedio	10,4	7,8	33,2	0,14	0,03
		Max.	10,5	8,38	38	0,15	0,03
		Min	10,4	7,51	30,7	0,13	0,02
		Desv	5,217	3,404	4,131	0,072	0,014
		Mediana	10,4	7,57	31	0,15	0,03
		N	3	3	3	3	3
	Huilquehue	Promedio	8,8	6,6	90,3	0,4	0,04
		Max.	9,1	7,12	139,2	0,43	0,07
		Min	8,6	6,35	56,8	0,37	0,02
		Desv	4,421	2,878	43,287	0,200	0,030
		Mediana	8,8	6,35	75	0,39	0,02
		N	3	3	3	3	3
Bosque nativo	Quilas	Promedio	10,1	7,5	49,7	0,13	0,05
		Max.	11,3	7,53	55,9	0,18	0,12
		Min	9,4	7,36	44,1	0,07	0,01
		Desv	0,838	0,119	5,930	0,050	0,051
		Mediana	9,8	7,5	49	0,14	0,03
		N	4	4	4	4	4
	Rodal	Promedio	9,5	7,6	47,2	0,13	0,04
		Max.	9,8	7,71	51,8	0,15	0,06
		Min	9	7,46	42	0,1	0,01
		Desv	0,566	3,274	4,920	0,068	0,028
		Mediana	9,8	7,5	47,7	0,14	0,04
		N	3	3	3	3	3

Fuente: elaboración propia.

Anexo 20: Cartografía de orientación al sol de la cuenca del lago Lanalhue.



Anexo 21: Coeficientes de exportación de fósforo total obtenidos para cada método utilizado.

Uso de suelo	Fósforo total (kg/ha/invierno)			Literatura (kg/ha/año)	Fuente
	Método				
	Regresión lineal	Carga promedio normalizada	Diferencia en condición basal		
Monocultivo forestal	0,022	0,022	0,023	0,88	Cardenas et al.,2007
Bosque Nativo	0,041	0,036	0,066	0,11	Clesceri et al.,1986
				0,64	Oyarzun et al 1997
				0,20	Mcfarland et al., 2001
				0,90	Shretsha, 2008
				0,24	Reckhow et al., 1980
Agropecuario	0,884	0,346	0,40	1,13	Reckhow et al 1980
				0,262	Clesceri et al.,1986
				0,93	Oyarzun et al 1997
				1,04	Mcfarland et al.,2001
				0,36	Shretsha et al., 2008

Fuente: elaboración propia

Anexo 22: Reclasificación de usos de suelo para procesamiento en ArcGIS.

Clasificación original		Reclasificación	
Numero	Descripción	Numero	Descripción
11	Agua a cielo abierto	1	Agua
90	Humedales leñosos		
95	Humedales herbáceos emergentes		
21	Poblados espacios abiertos	2	Residencial media
22	Poblados de baja densidad		
23	Poblados de mediana densidad		
24	Poblados de alta densidad		
41	Bosques secos	3	Bosque
42	Bosques verdes		
43	Bosques mixtos		
31	Tierra fértil	4	Agricultura
52	Arbustos matorrales		
71	Pastizales/herbáceas		
81	Pasto/heno		
82	Cultivo		

Fuente: elaboración propia en base a SCS y Sitio Web AguaySIG
<https://www.aguaysig.com/2017/01/calcular-numero-de-curva-con-arcgis.html>

