



Universidad de Concepción



**FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES**

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD HÍDRICA DE LA CUENCA DEL RÍO MUCO ANTE FUTUROS ESCENARIOS DE EXPANSIÓN FORESTAL

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

SEBASTIÁN ANDRÉS HORMAZÁBAL MADRID

Profesor Guía: Dr. Mauricio Aguayo Arias

Profesor Co-Guía: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza

Concepción, Chile

2020



**“ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD HÍDRICA DE LA CUENCA DEL RÍO MUCO
ANTE ESCENARIO DE EXPANSIÓN FORESTAL”**

PROFESOR GUÍA: DR. MAURICIO AGUYAO ARIAS

PROFESOR COMISIÓN: DR. PEDRO ARRIAGADA SANHUEZA

PROFESOR COMISIÓN: DRA CAROLINA BAEZA FREER



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, mayo 2020



100 AÑOS
DE
DESARROLLO
LIBRE DEL
ESPÍRITU

Por el desarrollo libre del espíritu

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

INDICE GENERAL

Índice de Figuras	iii
Índice de Tablas	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
1. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	1
1.1 Disponibilidad y Vulnerabilidad Hídrica en Chile	1
1.1.1 Cambio Climático	6
1.1.1.1 Tendencias observadas y proyecciones	6
a) Proyecciones para la temperatura.....	6
b) Proyecciones para la precipitación	7
c) Proyecciones para el caudal.....	8
1.2 Usos de suelo	10
1.2.1 Cambios de uso de suelo	10
1.2.2 Situación en Chile y relación con los recursos hídricos	13
1.2.3 Plantaciones Forestales en la Región de la Araucanía.....	20
1.3 Modelación Hidrológica.....	21
1.3.1 Clasificación de modelos hidrológicos	22
1.3.2 Modelación hidrológica distribuida	25
2. HIPÓTESIS.....	28
3. OBJETIVOS.....	28
3.1 Objetivo general.....	28
3.2 Objetivos específicos	28
4. METODOLOGÍA	29
4.1 Área de estudio	29
4.1.1 Antecedentes climáticos.....	32
4.1.2 Antecedentes Hidrológicos.....	34
4.1.3 Usos de Suelo.....	35
4.2 Pruebas Estadísticas.....	36
4.2.1 Prueba de Tendencia de Mann-Kendall.....	36

4.2.2	Prueba de Homogeneidad de Petit.....	37
4.3	Modelo Swat	37
4.3.1	Fase terrestre	38
Clima	40
Hidrología	40
4.3.2	Fase de enrutamiento.....	42
4.4	Calibración y validación	42
4.4.1	Datos de entrada	42
a)	Datos Meteorológicos.....	43
b)	Datos espaciales.....	45
4.4.2	Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT	49
4.4.3	Indicadores de Bondad de Ajuste	53
4.5	Escenarios de expansión forestal.....	55
4.6	Cálculo de la vulnerabilidad hídrica	60
5.	RESULTADOS	63
5.1	Análisis de tendencia y homogeneidad	63
5.1.1	Precipitación	63
5.1.2	Caudal	67
5.2	Calibración y validación del modelo hidrológico	71
5.2.1	Calibración	71
5.2.2	Validación.....	74
5.3	Escenarios de expansión forestal.....	76
5.3.1	Análisis y cuantificación de cambios en la cuenca.....	76
5.3.2	Factores forzantes del cambio de uso de suelo y modelo de regresión logística	77
5.3.3	Futuros escenarios de expansión forestal	78
5.4	Vulnerabilidad Hídrica de la cuenca.....	82
5.4.1	Efectos temporales y espaciales de una expansión forestal en los caudales futuros de la cuenca.....	82
5.4.2	Vulnerabilidad hídrica de la cuenca.....	85
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
8.	ANEXOS.....	97

Índice de Figuras

Figura 1: Oferta y Demanda Hídrica por Región.	2
Figura 2: Condiciones legales de los ríos en Chile.....	3
Figura 3: Proyecciones de temperatura al año 2100.	6
Figura 4: Proyecciones de precipitación para el año 2100.	8
Figura 5: Pérdidas y Ganancias de la cubierta forestal en los países de Sudamérica durante el periodo 2000-2012.	12
Figura 6: Principales uso de suelo en Chile.	15
Figura 7: Transición de las plantaciones forestales periodo 1986-2011.....	16
Figura 8: Usos de suelo reemplazados por plantaciones forestales.	17
Figura 9: Distribución de las plantaciones forestales por región.....	19
Figura 10: Evolución de las plantaciones forestales en la región de la Araucanía.	20
Figura 11: Clasificación de Modelos Hidrológicos.	23
Figura 12: Tipos de modelos hidrológicos a escala de cuenca.....	24
Figura 13: Cuenca del río Muco.....	29
Figura 14: Curva hipsométrica de la cuenca del río Muco.	30
Figura 15: Estaciones Hidrometeorológicas en la Cuenca del Río Muco.....	31
Figura 16: Climograma ciudad de Lautaro.....	32
Figura 17: Isotermas, Isoyetas y Evapotranspiración para la cuenca del río Muco.	33
Figura 18: Hidrograma Estación río Muco en puente Muco para el periodo 1980-2018...	34
Figura 19: Distribución de los usos de suelo en la cuenca del río Muco.	35
Figura 20: Representación del ciclo hidrológico en el modelo SWAT.....	39
Figura 21: Distribución temporal datos CFSR global base (1989 – 2013).....	44
Figura 22: Distribución temporal datos CHRIPS (1981 – 2015).....	45
Figura 23: Modelo de elevación digital (DEM).	45
Figura 24: Tipos de suelo cuenca del río Muco.	46
Figura 25: Usos de suelo año 2011.	48
Figura 26: Subcuencas generadas por el modelo para la cuenca del río Muco.....	51
Figura 27: Esquema metodológico para calibración y validación del modelo SWAT.	52
Figura 28: Esquema metodológico expansión forestal.	56
Figura 29: Metodología para el cálculo de la vulnerabilidad hídrica.....	62
Figura 30: Tendencia y diagramas de cajas de la variable de precipitación.....	64
Figura 31: Prueba de homogeneidad para la variable de precipitación.....	66
Figura 32: Tendencia y Homogeneidad caudal.	68
Figura 33: Análisis de sensibilidad de los parámetros con influencia en el modelo.....	71
Figura 34: Serie de caudales para el periodo de calibración.....	74
Figura 35: Serie de caudales para el periodo de validación.	75
Figura 36: Variación temporal de los usos de suelo para los años 1986, 2001, 2011, 2041.	80
Figura 37: Distribución espacial de los usos de suelo.	81
Figura 38: Variación espacial del caudal medio, considerando escenario de expansión forestal.	82

Figura 39: Variación estacional del caudal.	83
Figura 40: Vulnerabilidad hídrica espacial ante un escenario de expansión forestal.	85
Figura 41: Categoría de Vulnerabilidad por subcuenca.....	86

Índice de Tablas

Tabla 1: Estudios de reducción de caudal sobre cuencas chilenas.....	9
Tabla 2: Efecto de distintos componentes de la vegetación en el ciclo hidrológico.	14
Tabla 3: Descripción de modelos hidrológicos matemáticos.....	23
Tabla 4: Modelos (semi) Distribuidos utilizados en estudios a nivel nacional.	26
Tabla 5: Estaciones Hidrometeorológicas de la DGA presentes (o con influencia) en la cuenca del río Muco.	31
Tabla 6: Variables de entrada utilizados en la modelación de la cuenca del río Muco.....	43
Tabla 7: Tipos de suelos presentes en la cuenca del río Muco.....	47
Tabla 8: Usos de suelo presentes en la cuenca asociados a la base de datos del modelo SWAT.....	48
Tabla 9: Parámetros que influyen la simulación de flujo en SWAT.	50
Tabla 10: Límites de desempeño de medidas de bondad de ajuste.....	54
Tabla 11: Variables independientes ingresadas al modelo de regresión logística para el periodo 1986-2001.....	59
Tabla 12: Categoría del índice de vulnerabilidad.	61
Tabla 13: Resumen pruebas estadísticas datos de precipitación.	67
Tabla 14: Resumen pruebas estadísticas datos de caudal.	70
Tabla 15: Parámetros de SWAT modificados durante la calibración.....	72
Tabla 16: Valores de los indicadores de bondad de ajuste para calibración y validación. 73	
Tabla 17: Variación temporal de los usos de suelo presentes en la cuenca (1986 - 2001).	76
Tabla 18: Parámetros de la regresión logística ajustados para la expansión forestal (**= P<0,01).	78
Tabla 19: Cambio en la superficie (ha) de los principales usos de suelo.....	79
Tabla 20: Percentiles y porcentaje de variación.....	84

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia a mis padres Carlos y Anita por siempre acompañarme y animarme a estudiar esta carrera, a mis tatas por cuidarme y acogerme en su hogar durante estos años, a mis hermanos, a mi hijo Jorge Ignacio por alegrar mis días, por ser mi motivación para seguir adelante, a Scarleth por todo su amor y compañía entregado en todos estos años. A mis amigos que a lo largo de este proceso siempre estuvieron ahí para aliviar la carga de la tesis.

De igual forma agradecer a los profesores que me acompañaron en mi proceso de tesis, a mi profesor guía por su apoyo y la confianza depositada en mi para el desarrollo de este trabajo, a mi profesor co-guía por su disposición y apoyo durante la elaboración de la tesis, a mi comisión por sus consejos y comentarios, espero haber cumplido con todas sus expectativas durante este proceso.

RESUMEN

En Chile existe una variación latitudinal en la disponibilidad de agua, influenciada principalmente por las variables climáticas, las cuales han presentado una tendencia al aumento para el caso de la temperatura y una tendencia a la disminución en el caso de las precipitaciones. Sumado a esto el territorio nacional ha sido sometido a grandes cambios en los usos de suelo donde terrenos agrícolas, praderas y matorrales han sido reemplazados por plantaciones forestales (Heilmayr et al., 2016), empleadas para la producción de madera, diversos estudios realizados han identificado el efecto negativo que presentan las plantaciones forestales sobre el recurso hídrico tanto a la escala de cuenca como de subcuencas.

El presente estudio se realizó en la cuenca del río Muco, subcuenca del río Imperial, donde se aplicó el Test de Tendencia de Mann-Kendall para analizar tres series de datos, correspondientes a precipitación (datos de los registros de la DGA y la base de datos CHRIPS) y de caudal. Donde se encontraron tendencias negativas en las tres series revisadas en forma anual, a través de la prueba de Pettit las series de precipitación resultan ser series homogéneas, mientras que los datos de caudal presentan un quiebre en sus datos presentando una serie no homogénea.

De igual forma se calibró y validó el Modelo Hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tools), a partir de registros históricos presente en la estación fluviométrica ubicada en la cuenca, utilizando el software estadístico Xlstat, utilizando los cambios ocurridos entre los años 1986-2001 se elaboró un uso de suelo para la cuenca, se determinaron las variables espaciales que modelan la expansión forestal y se proyectó un uso de suelo al año 2041. Los resultados

obtenidos muestran que las variables más influyentes en la modelación de expansiones forestales son: Presencias (Bosque Nativo, Plantaciones forestales y Terrenos agrícolas) y la pendiente. Bajo el escenario de expansión forestal utilizando el modelo hidrológico mostró una reducción del caudal medio de hasta un 1%, en términos espaciales la reducción llega hasta una 17% en 2 subcuencas, mientras que la mayor reducción en términos estacionales se presenta en los meses de verano, por su parte la vulnerabilidad de la cuenca frente a una expansión forestal sufre un leve aumento en la zona media baja llegando a la categoría de moderada en 4 subcuencas de ésta.

1. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

1.1 Disponibilidad y Vulnerabilidad Hídrica en Chile

El agua es esencial para la vida y el bienestar humano y su demanda va en aumento. Muchas personas en todo el mundo ya viven en condiciones de escasez de agua y, con la concentración cada vez mayor de la población en las zonas urbanas, el suministro de agua en el futuro y la disponibilidad es un problema sensible a nivel mundial. (Stehr et al., 2010).

En la actualidad, existe una competencia por el uso múltiple del agua, debido principalmente a las demandas poblacionales, energéticas y agrícolas. En algunos países, principalmente los más desfavorecidos, existen incipientes políticas nacionales de desarrollo de los recursos hídricos y faltan legislaciones de aguas que ayuden a establecer nuevos marcos institucionales para su gestión. (Martínez & Villalejo,2018).

La demanda de agua podría dispararse durante los próximos años según un informe publicado por la Organización de Naciones Unidas (ONU), que prevé un aumento de la demanda en un 50%, antes de 2030. (UnWater,2018).

Puesto que a nivel nacional se presenta una frágil situación del recurso hídrico, aproximadamente un 76% de la superficie chilena se encuentra afectada por sequía y un total de 110 acuíferos en el país se encuentran actualmente con una demanda comprometida superior a su recarga. (Fundación Chile, 2018). En la Figura 1 se presenta la oferta y demanda hídrica por región en el territorio nacional.

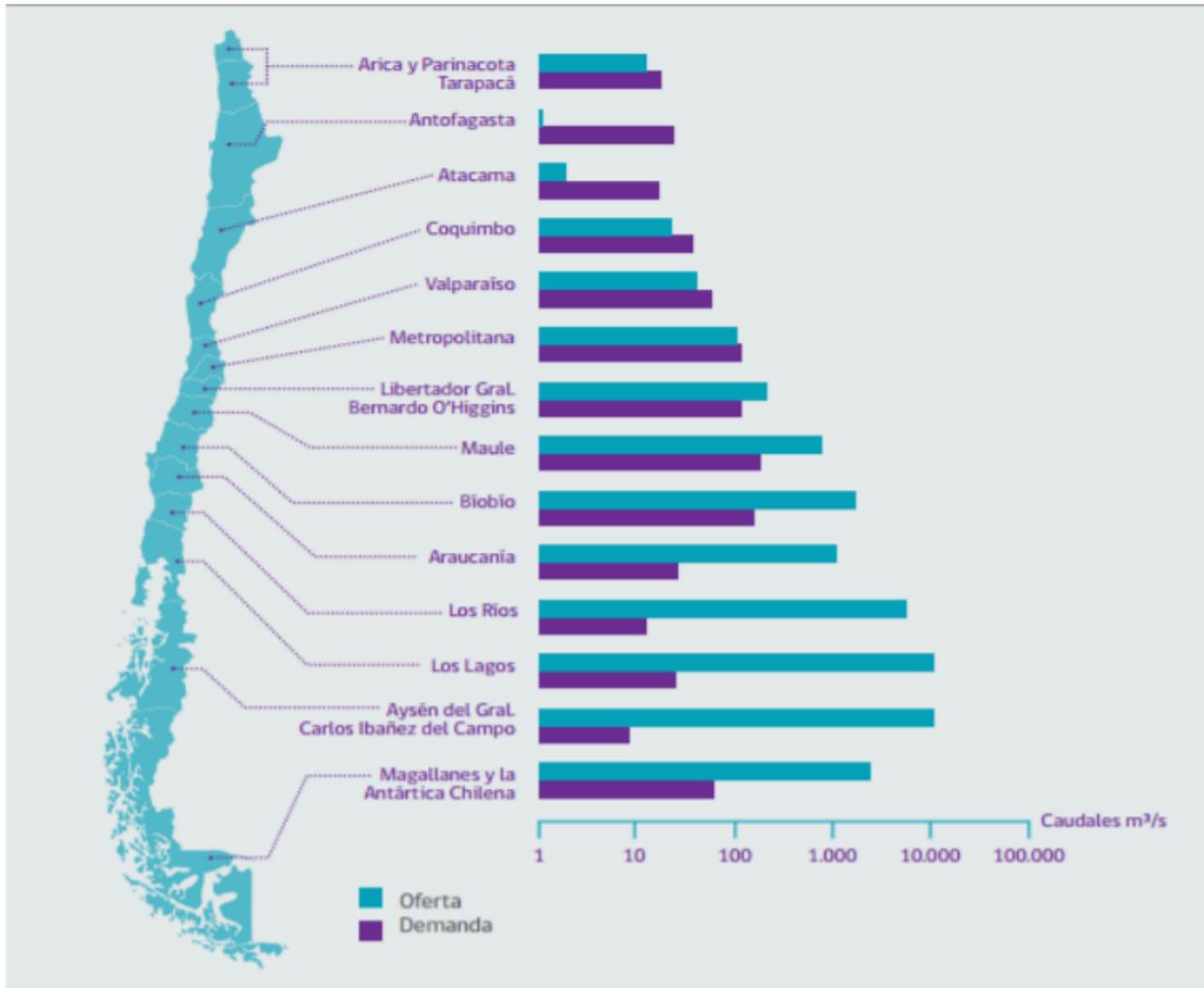


Figura 1: Oferta y Demanda Hídrica por Región.

Fuente: MMA, 2011.

Se puede observar que desde la región Metropolitana hacia el norte, existe una relación negativa entre la Disponibilidad hídrica y la demanda, esto debido a la baja cantidad de precipitaciones caídas principalmente en la zona norte (entre 600 y 200 mm/año) y demanda hídrica de las principales actividades productivas presentes en la zona, como lo son la minería y la industria, así como también el uso municipal. (Valdés-Pineda et al., 2014). Hacia el sur de la región Metropolitana se aprecia una relación favorable entre disponibilidad y demanda, esto debido al gradiente positivo

de precipitaciones (Valdés-Pineda et al., 2014), relación que aumenta en forma significativa entre las regiones de la Araucanía y Aysén.

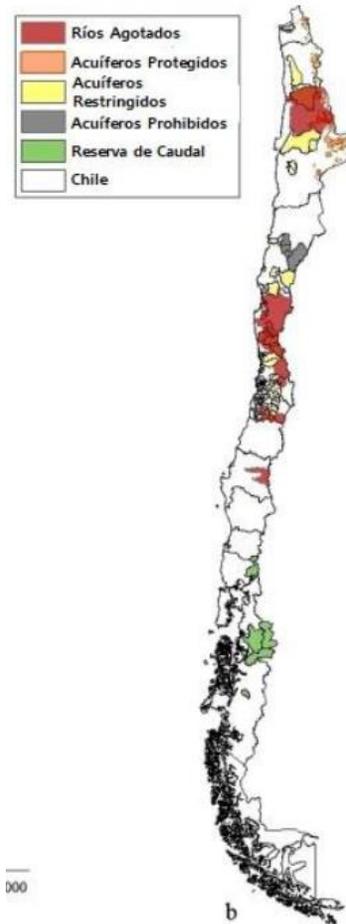


Figura 2: Condiciones legales de los ríos en Chile.

Fuente: Valdés-Pineda et al (2014).

La concesión excesiva de derechos de aguas las relaciones negativas entre la demanda y la oferta hídrica, han provocado agotamientos en la disponibilidad hídrica, tanto de tipo superficial y subterránea. Como se puede apreciar en la Figura 2, se ha detectado la existencia de acuíferos protegidos (color naranja) en donde se prohíbe la explotación (ubicados principalmente entre la región de Arica y Parinacota los cuales sustentan las actividades agrícolas y ganaderas de las

comunidades locales, en color amarillo destacan los acuíferos restringidos, los cuales se refieren principalmente a áreas en donde existe un gran riesgo de agotamiento y de vulnerabilidad a la calidad de agua, por lo tanto solo se pueden constituir derechos de tipo temporal, mientras que en color plomo destacan los acuíferos prohibidos, en donde ya no es posible la extracción del recurso pues existe un agotamiento del acuífero o la calidad de agua ya no es la adecuada para su uso.

En el caso de las aguas superficiales existen 11 declaraciones de agotamiento (color rojo) en donde ya no se pueden constituir nuevos derechos de extracción de agua de tipo permanentes, ubicados principalmente entre la zona norte (82%) y centro de Chile, en donde se destacan los ríos Lía, Elqui, Limarí y los nacimientos de los ríos La Ligua, Aconcagua, Mapocho e Itata. Alcanzando una superficie total de 76.131 Km² (DGA, 2016). Se espera que las declaraciones de agotamiento en el territorio nacional aumenten en el futuro, debido principalmente a la influencia del calentamiento global sobre el régimen de las precipitaciones. (Pineda et al., 2014).

De igual forma la zona antes mencionada se encuentra en la zona donde existe una mayor brecha hídrica, esto según el estudio realizado por Fundación Chile (2018), esta situación de brecha hídrica se espera que aumente en un 80% al año 2030. Y debido a esta situación Chile es uno de los 30 países con probabilidades de sufrir un riesgo hídrico al año 2025.

Debido a todo lo mencionado surge la necesidad de analizar la vulnerabilidad hídrica de las cuencas hidrográficas. El concepto de vulnerabilidad es definido actualmente como “La condición en la cual los asentamientos o actividades humanas, se encuentran en peligro, en virtud de su proximidad a una amenaza o exposición a un

evento de riesgo (fenómeno natural)". Por esta razón reducir la "vulnerabilidad" implica reducir el "riesgo" y reducir el "riesgo" implica reducir la probabilidad de posibles "desastres" (FAO,2005). Por otra parte, instituciones como el Departamento de Asuntos Humanitarios de las Naciones Unidas (DHA por sus siglas en inglés) consideran la vulnerabilidad de un sistema con un grado de pérdida (rango entre 0% a 100%) resultado de un fenómeno potencialmente dañino (Espinoza, 2011) así la vulnerabilidad de un sistema está determinada por la habilidad de un sistema para anticiparse, resistir y recobrase de un evento es específico. Distintos estudios de vulnerabilidad advierten efectos de escasez de agua en sistemas más frágiles y sus consecuencias en el ciclo hidrológico. (Vicuña et al., 2008; Abraham, 2008 Ravindranath et al., 2011; Jyrkama et al., 2005; Takeuchi, 2009; Espinosa, 2011).

El análisis de vulnerabilidad en las cuencas hidrográficas corresponde a un estudio de diagnóstico el cual aporta información básica y estratégica para el plan de gestión integral del recurso hídrico. La vulnerabilidad de dichos sistemas se determina a través de los indicadores del régimen hidrológico y calidad del agua en base a los criterios de FAO para aguas de riego. (García, 2016).

La vulnerabilidad se puede abordar evaluando la susceptibilidad de los sistemas hídricos para conservar y mantener su régimen hídrico actual y determinando la vulnerabilidad de los sectores usuarios del recurso, ante la amenaza de cambios sustanciales en el régimen hidrológico. (Salazar, 2008).

Existen dos grandes factores que estos al incrementarse pueden aumentar la vulnerabilidad hídrica: estos son el Cambio Climático y las actividades antrópicas. (Como el cambio de uso de suelo) (García, 2016).

1.1.1 Cambio Climático

1.1.1.1 Tendencias observadas y proyecciones

a) Proyecciones para la temperatura

Las proyecciones para la temperatura muestran un aumento de ésta en todo el país, siendo mayor en la zona norte. Se espera un aumento entre 0,5°C – 2°C para las zonas Sur y Austral, mientras que en la zona norte y altiplánica se espera un aumento de 1,5°C a 4°C (MMA, 2017). La Figura 3 presenta las proyecciones esperadas en el territorio nacional para el periodo de 2070-2100.

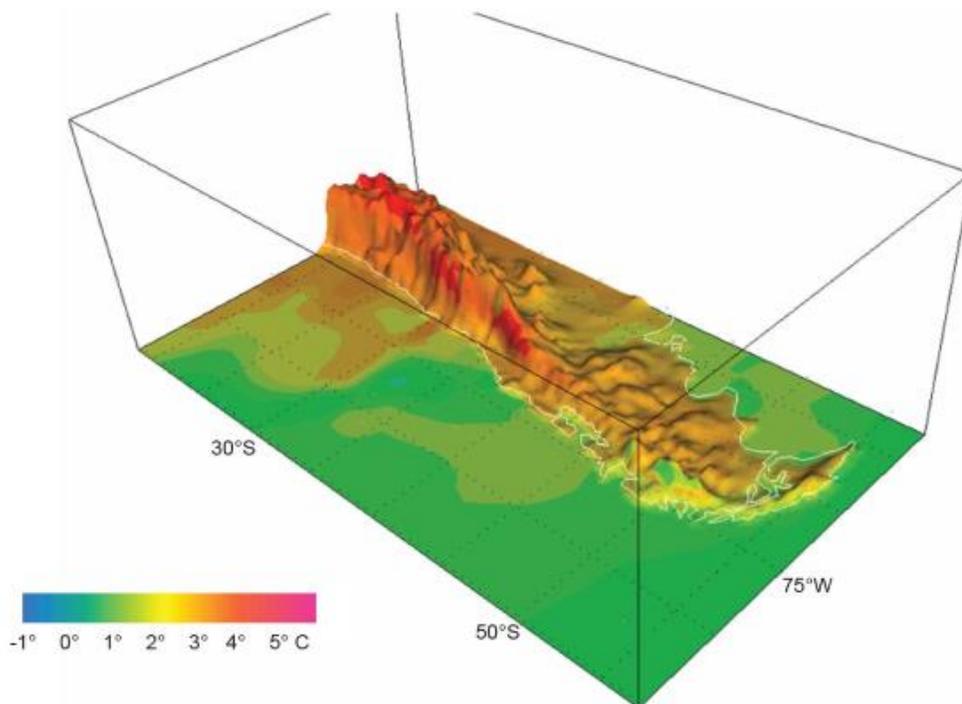


Figura 3: Proyecciones de temperatura al año 2100.

Fuente: Garreaud (2011).

b) Proyecciones para la precipitación

Se espera al año 2030 que la precipitación disminuya entre un 5 -15% para la zona comprendida entre los ríos Coquimbo y Aysén, así mismo se espera que este escenario se intensifique al año 2050 entre la zona comprendida entre Mataquitos y Aysén. Mientras que para la zona norte se espera que se intensifiquen los eventos de lluvias extremas esto principalmente en la zona cordillerana. (MMA, 2017).

La Figura 4 presenta las proyecciones para la precipitación en todo el territorio nacional. En ella se puede observar que las mayores reducciones se esperan para las regiones del Biobío y Los Lagos para el año 2100, esta reducción puede llegar hasta un 50% con respecto a las precipitaciones registradas actualmente en ambas regiones. (Garreaud,2011).

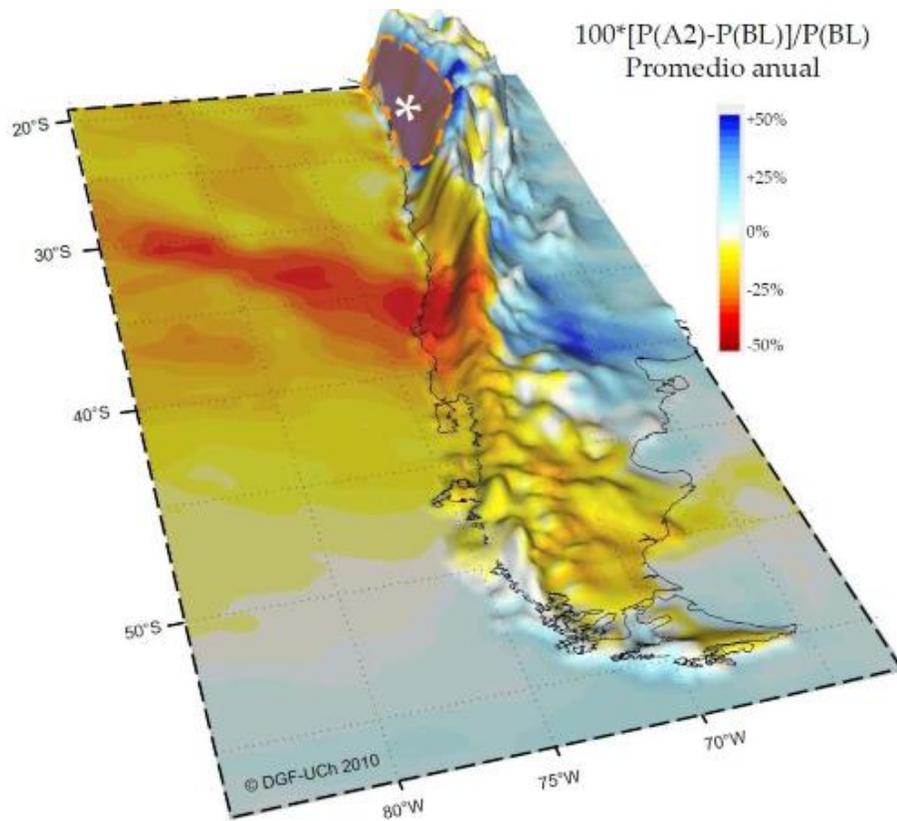


Figura 4: Proyecciones de precipitación para el año 2100.

Fuente: Garreaud (2011).

c) Proyecciones para el caudal

Debido a las proyecciones de precipitación y temperatura para el siglo XXI se espera una reducción de los caudales medios mensuales para las cuencas ubicadas entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos (30°S a 42°S) (MMA, 2017), este efecto se intensificaría con las proyecciones de aumento de la elevación de la isoterma 0°C reduciendo así las reservas de agua en cuencas nivales y nivo-pluviales, afectándose de esta manera la disponibilidad hídrica en periodos de estiaje. (CEPAL, 2016). En la zona austral del país, se espera un leve aumento en los caudales medios mensuales. (MMA, 2017).

La Tabla 1 presenta diferentes estudios realizados en distintas cuencas del territorio nacional en donde se modeló la respuesta hidrológica de diferentes cuencas chilenas frente a los cambios esperados en el clima. Considerando el escenario más crítico, es decir, una reducción de hasta un 60%, las mayores reducciones para el caudal se presentan en las cuencas de los ríos Malleco-Vergara (-81%), Illapel, (-52%), Limarí (-46%) y la cuenca del río Lonquimay (-65%), esta última además presenta influencia del aumento de la isoterma 0°, esto provoca la reducción de los depósitos de nieve en las zonas cordilleranas, afectando de esta forma la esorrentía. (Raggletti,2016).

Tabla 1: Estudios de reducción de caudal sobre cuencas chilenas.

Cuenca	Reducción para el escenario de cambio climático más crítico	Fuente
Río Limari	-45%	Vicuña et al., 2010
Río Illapel	-31.6% a -51.8%	RHMA, 2010
Río Aconcagua	-20.1% a -43.5%	RHMA, 2010
Río Maipo Alto	-10% a -21%	Migliavacca et al., 2015
Río Maule Alto	-38.3%	CEPAL, 2012
Río Laja	-36.6%	CEPAL, 2012
Río Duqueco	-24.9%	Riquelme, 2018
Río Malleco-Vergara	-80.96%	Stehr, 2008
Río Lonquimay	-65%	Stehr, 2008
Río Cautín	-12.8% a -29.6%	RHMA, 2010

Fuente: Elaboración Propia a partir de las fuentes mencionadas.

1.2 Usos de suelo

1.2.1 Cambios de uso de suelo

Es sabido que la superficie terrestre juega un rol fundamental en los ciclos biofísicos y biogeoquímicos, donde los flujos de energía y materia que componen los hábitats se ven afectados por el cambio a gran escala del territorio. (Foley et al., 2005; Grimm et al., 2008). El crecimiento de la población a nivel global ha producido un aumento en la ocupación y transformación del territorio, siendo los cambios en las coberturas vegetales y el uso humano de los suelos una de las alteraciones ambientales más importantes de los últimos años. (Foley et al., 2005; Díaz et al., 2006; Grimm et al., 2008; Harvey & Pilgrin, 2011). El cambio de cobertura y uso de suelo es a veces considerado uno de los principales conductores del cambio climático, llegando a ser considerado en algunos casos como más influyente en la conservación de los ambientes naturales, ya que dentro de sus impactos provocan grandes cambios en el ciclo del carbono, en la regulación del clima, ciclo de nutrientes y en el ciclo hidrológico (Esparza, 2017). El área boscosa, por ejemplo, disminuyó en 1.500.000 Km² entre los años 2000 y 2012 (Hansen et al., 2013), convirtiéndose principalmente en tierra para cultivo o pastizales debido a acciones antrópicas. (Tsegaye et al., 2010).

La superficie de América Latina y el Caribe (ALC) posee un área total de bosque de la que asciende a 935,5 millones de hectáreas, lo cual corresponde al 46,4% de la superficie total en la región y la que al mismo tiempo corresponde a un 23,4% de la superficie forestal del mundo. De este valor un 7% se encuentra representado en la Zona conocida como Cono Sur, un 9% se encuentra en la zona de centro América y un 1% en todo lo que comprende el Caribe, mientras que el 83% del área de

bosque de la región se encuentra comprendida en la Amazonia. (FAO, 2017). Al 2000, la superficie forestal alcanzaba los 10.5 millones de hectáreas. (46% eucaliptus y 45% pino) (FAO 2012).

En Sudamérica se ha experimentado un rápido cambio en los usos de suelo, principalmente por la disminución de la cubierta boscosa en la mayoría de los territorios. Los bosques tropicales, templados y húmedos han sido sometidos a presiones principalmente de tipo antrópicas, en países como Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Paraguay y Perú, la agricultura y matorrales han sustituido principalmente al bosque nativo, generando importantes pérdidas en cubierta forestal (Hansen et al., 2013), como se observa en la Figura 5 Paraguay, Bolivia, Argentina y Brasil lideran la pérdida de área boscosa, mientras que Chile y Uruguay presentan ganancias en su cobertura forestal de un 3% y un 10% respectivamente, esto debido a la expansión de plantaciones forestales para la exportación de madera.

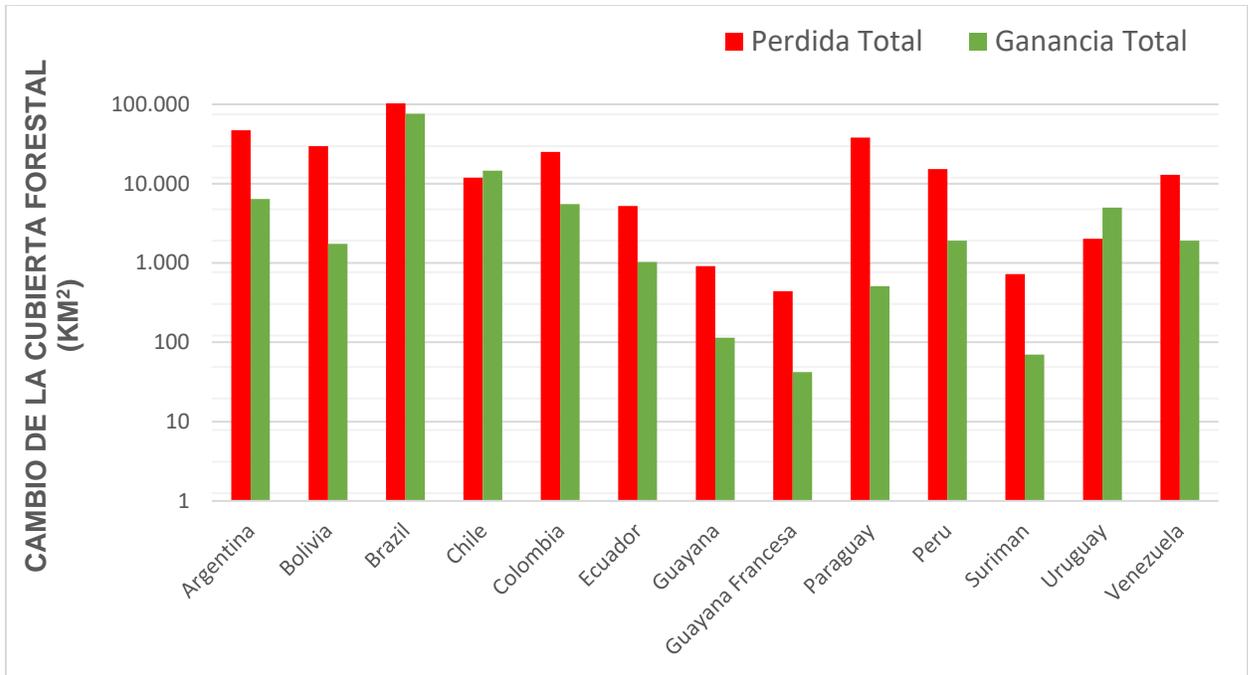


Figura 5: Pérdidas y Ganancias de la cubierta forestal en los países de Sudamérica durante el periodo 2000-2012.

Fuente: Elaboración propia a partir de Hansen et al., (2013).

El reemplazo que ha afectado la diversidad de bosques de Sudamérica, principalmente a las grandes extensiones de la selva amazónica en Brasil, puede traer consecuencias en la circulación atmosférica y los ciclos climáticos regionales, pues la pérdida acelerada de los bosques podría conducir a una atmósfera mucho más seca, la cual provocará cambios sustanciales en las precipitaciones, generando una reducción de la lluvia en toda el área deforestada del Amazonas, la cual podría influir en la circulación climática regional. (SWANN, 2015).

1.2.2 Situación en Chile y relación con los recursos hídricos

En Chile los patrones generales en el uso del territorio están principalmente influenciados por la topografía y el clima, por lo general los terrenos agrícolas se emplazan dentro del valle central mientras que la silvicultura se ve mayormente establecida en la Cordillera de la Costa y de Los Andes. De norte a sur la vegetación natural cambia de bosques esclerófilos y arbustos, a bosques templados más densos y expansivos. Sin embargo, este territorio ha estado sometido a intensos cambios en la cobertura del suelo, en donde el bosque nativo y matorrales se han vistos afectados por la expansión poblacional, agrícola y el reemplazo por plantaciones exóticas de rápido crecimiento (Aguayo, 2007; Lara et al., 2012; Nahuelhual et al., 2012; Miranda et al., 2015), utilizada principalmente para la producción industrial de madera. (Armesto et al., 2010).

La cubierta forestal a lo largo de los distintos flujos de agua proporciona funciones tanto directas e indirectas en el mantenimiento de la provisión de agua (Little et al., 2015). Dentro de estos múltiples servicios ecosistémicos que se encuentran relacionados con el agua, se encuentra incluido el suministro de agua, la regulación de los caudales, el apoyo a la función de los ecosistemas acuáticos y la provisión de valores de recreación y servicios (Jones et al., 2016). También se ha demostrado que los bosques ribereños filtran pesticidas, sedimentos y nutrientes que son transportados por lluvia, escorrentía y procesos de flujo de aguas subterráneas. (Little et al., 2015).

Pueden existir importantes interacciones entre la cubierta forestal y la escorrentía (Little et al., 2015). En la Tabla 2 se presenta un resumen de algunas de las funciones reguladoras que cumplen los bosques dentro del ciclo hidrológico.

Tabla 2: Efecto de distintos componentes de la vegetación en el ciclo hidrológico.

Hojarasca/ pasto	Raíces	Copas
Disminución de la energía cinética de la lluvia	Mayor infiltración	Disminución de la energía cinética de la lluvia
Aumento de la resistencia al flujo superficial	Aumento de la calidad de agua	Disminución de la erosión por salpicadura
Mayor tiempo de circulación y retención superficial del agua en la ladera	Mayor estabilidad del suelo	Mayor intercepción de la lluvia, menor cantidad de agua al alcance del suelo
Menor capacidad erosiva del flujo superficial	Menor humedad del suelo por transpiración	Disminución de la escorrentía

Fuente: Elaboración propia según Pizarro (2013).

El cambio de uso de suelo generado por la expansión forestal se ha cuantificado en periodos de raleo, se ve un aumento considerable en los caudales, mientras que durante el crecimiento de estas especies se ve una disminución de la escorrentía (Webb, 2009; Webb & Kathuria, 2012; Webb, Kathuria, & Turner, 2012; Iroumé & Palacios, 2013).

Al año 2017 la superficie cubierta de Bosques representa el 23,3% del territorio nacional con 17,6 millones de ha y es así como se representa en la Figura 6, de éstas el Bosque Nativo alcanza 14,41 millones de ha, lo que representa el 81,5% de los recursos forestales del país. Actualmente las plantaciones forestales cubren

una superficie aproximada de 3,08 millones de ha, equivalentes al 4,07% del total de bosques de Chile. Estas plantaciones corresponden a especies exóticas y de rápido crecimiento de los géneros *Pinus* y *Eucalyptus*.

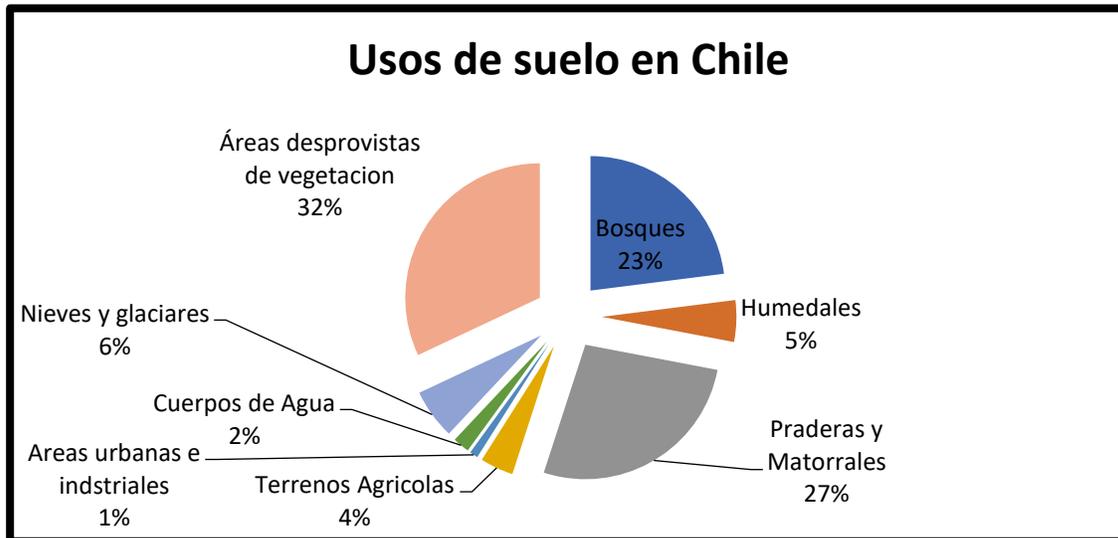


Figura 6: Principales uso de suelo en Chile.

Fuente: Conaf (2016).

Las modificaciones más importantes del cambio de suelo, se debe a las actividades agrícolas y forestales, siendo estas últimas las que han tenido una ganancia mayor de hectáreas en los últimos años esto según el estudio realizado por Echeverría et al (2006) donde las plantaciones a nivel nacional tenían una ganancia de 627 mil ha y las hectáreas de bosque nativo perdían un cantidad igual a 184 mil ha, esta pérdida equivale a una tasa de 3,64% al año y que fue ratificado por Aguayo et al (2009).

La industria forestal en Chile es actualmente la segunda industria de mayor importancia, la cual representa un 3,1% del Producto Interno Bruto (PIB),

convirtiéndose así en el sexto exportador de celulosa y el mayor exponente de chips de madera en todo el mundo. (Armesto et al., 2010).

Heilmayr et al (2016) estudió la transición de las plantaciones forestales entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos durante los períodos 1986-2001 y 2001-2011, dejando en evidencia que el avance de estos ejemplares ha ocurrido principalmente en la zona centro sur del país (como se puede apreciar en la Figura 7), experimentando un rápido crecimiento durante los periodos de estudio. (4,3% y 2,2% anual respectivamente).

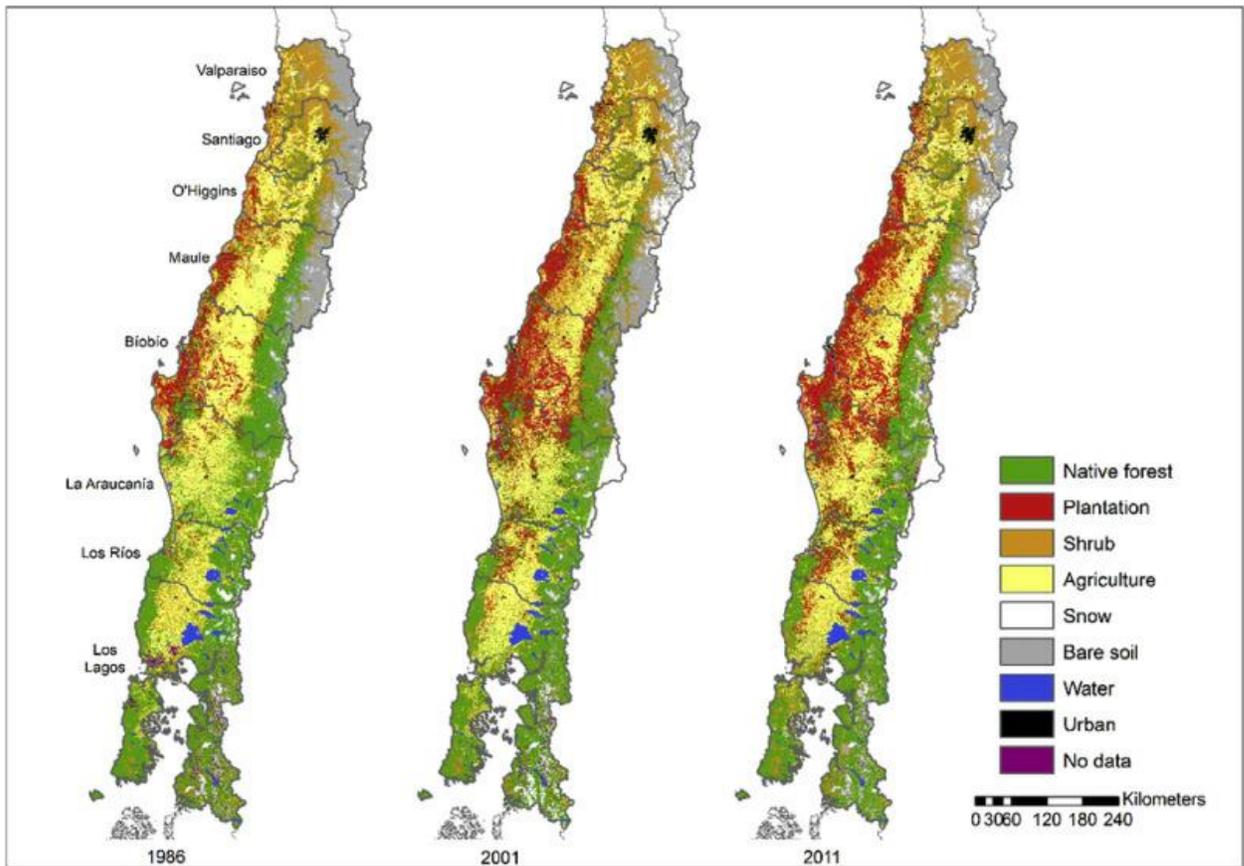


Figura 7: Transición de las plantaciones forestales periodo 1986-2011.

Fuente: Heilmayr et al., 2016.

En la Figura 8 se muestra los usos de suelo reemplazados por las plantaciones forestales entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos. En ella se puede observar que los terrenos agrícolas, arbustos y bosque nativo fueron las principales coberturas reemplazadas con un 45%, 31% y 23% respectivamente, los cambios se concentraron principalmente en la región del Maule, Biobío y la Araucanía.

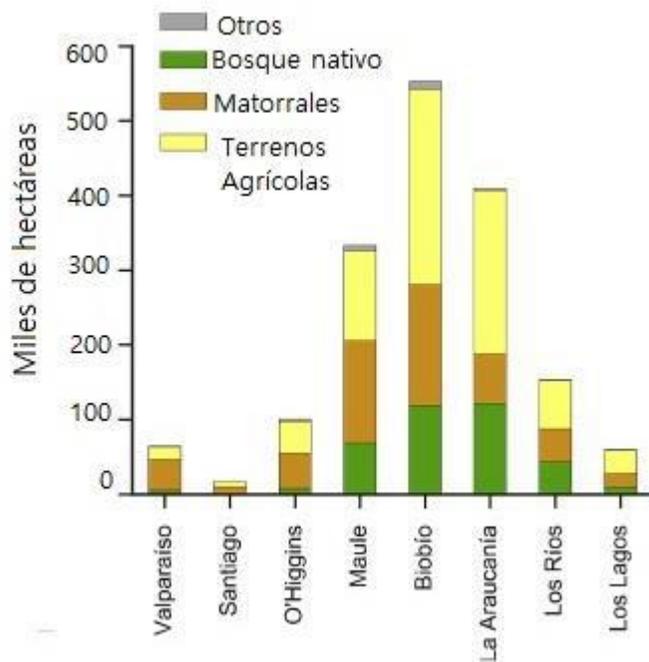


Figura 8: Usos de suelo reemplazados por plantaciones forestales.

Fuente: Heilmayr et al., 2016.

Las especies más utilizadas en las plantaciones forestales se encuentran el *Pinus Radiata* y *Eucaliptus Globulus*, las cuales tienen un efecto negativo sobre el balance hídrico, debido al alto consumo de agua de las plantaciones jóvenes de *Pinus Radiata* la cual registra un incremento sostenible en el tiempo en un 80% más que el consumo de agua por parte de una pradera, ésta pérdida de agua es atribuida a

las mayores tasas de evaporación e intercepción y a las menores tasas de percolación de agua por parte de las plantaciones forestales. (Huber et al., 2008).

Huber et al (2010) observaron que las plantaciones de *Pinus Radiata* y *Eucaliptus Globulus* interceptan alrededor de un 17% y un 11% de la lluvia caída respectivamente, las tasas de evapotranspiración varían entre un 64-65% para *Pinus radiata* y entre 70-76% para *Eucaliptus glóbulos*, generando una escorrentía equivalente a un 33% y 23% en relación con la precipitación caída.

Al estudiar el cambio de bosque nativo a plantaciones de rápido crecimiento, diversos estudios cuantifican una correlación negativa entre la escorrentía y el % de área poblada por plantaciones forestales. (Little et al., 2009; Lara et al., 2009). El mejor ejemplo son cuencas con superficies menores a 2000 ha y que se encuentran cubiertas por más del 20% de su superficie con plantaciones forestales. (CORMA, 2015). La respuesta que tienen las cuencas hidrológicas de pequeña escala (< 10 km²) ante cambios en la cobertura del suelo se encuentran ampliamente estudiada y sus impactos bien documentados (Aguayo et al., 2016). Distintas investigaciones en cuencas que van de 700 a 25,000 km² de tamaño no han encontrado cambios moderados en la escorrentía anual a pesar de los grandes cambios en la composición del bosque. (Iroumé & Palacios, 2013).

Se ha estudiado qué en época estival como invernal, distintas micro-cuencas con cobertura vegetal de bosque nativo presentan mayor caudal que las plantaciones forestales y a su vez las micro-cuencas con *Pinus radiata* contienen mayor caudal que las con cobertura de *Eucalyptus globulus* (Alarcón, 2014). De igual forma un estudio realizado por Álvarez et al (2019) evidencio que un aumento

de las plantaciones forestales en 10.000 ha puede disminuir el caudal desde un 2.2% a un 7.2%, dependiente esto de 3 factores los cuales son: Condiciones climáticas, área de la cuenca y uso de suelo reemplazado por las plantaciones forestales.

La forestación masiva de estas especies exóticas se debe principalmente al subsidio entregado por el estado a partir de la entrada en vigencia del Decreto de Ley 701 en 1974, perteneciente al Ministerio de Agricultura, el cual tiene por objeto regular la actividad forestal en suelos de aptitud preferentemente forestal y en suelos degradados e incentivar la forestación (Decreto de ley 701, 1974, Ministerio de Agricultura). Esto desencadenó que durante 1980-1997 se reforestaron 822.428 ha (FAO, 2010) concentrándose un 88% entre las regiones del Maule y Los Lagos. Actualmente las plantaciones forestales abarcan 2.8 millones de hectáreas equivalente al 17% total de los bosques de Chile (INFOR, 2019) ubicándose el 17% en las regiones del Biobío, La Araucanía y el Maule como se puede apreciar en la

Figura 9

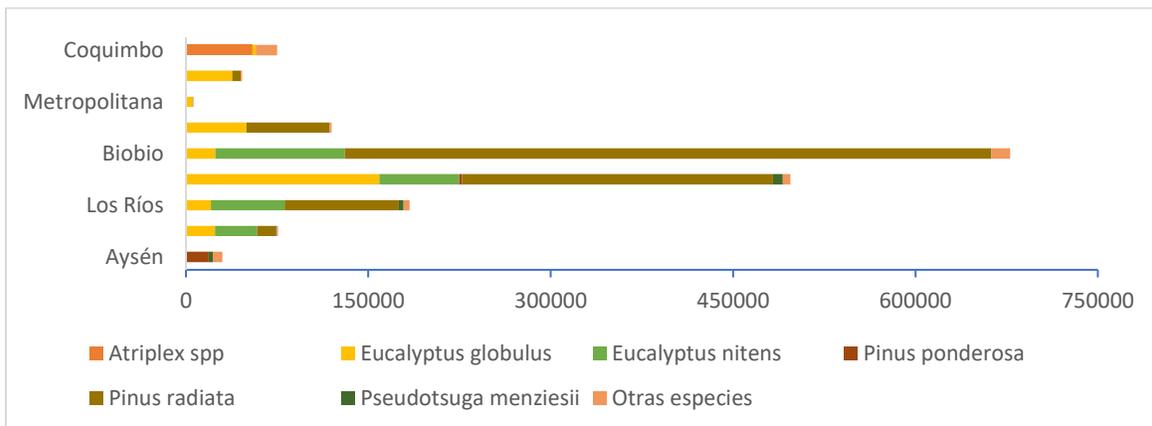


Figura 9: Distribución de las plantaciones forestales por región.

Fuente: INFOR (2019).

1.2.3 Plantaciones Forestales en la Región de la Araucanía

La región de la Araucanía actualmente presenta la tercera mayor proporción de plantaciones forestales del país siendo precedida por las regiones del Maule y Biobío. La superficie plantada de la región equivale actualmente a 482.113 ha lo que equivale al 15% de la superficie regional. De la superficie plantada de la región esta se encuentra compuesta por un 53% de *Pinus radiata*, 44%% de especies de eucalipto (ODEPA, 2019) Las plantaciones de especies de pino establecidas en la región corresponde a un 19,4 del total del país (ODEPA, 2019). La región es la tercera región con la mayor cantidad de plantaciones siendo precedida por las regiones del Maule y Biobío. La Figura 10 muestra la evolución de las plantaciones forestales en la región, se puede observar un gran incremento en los últimos años, equivalentes a un 15,3%.

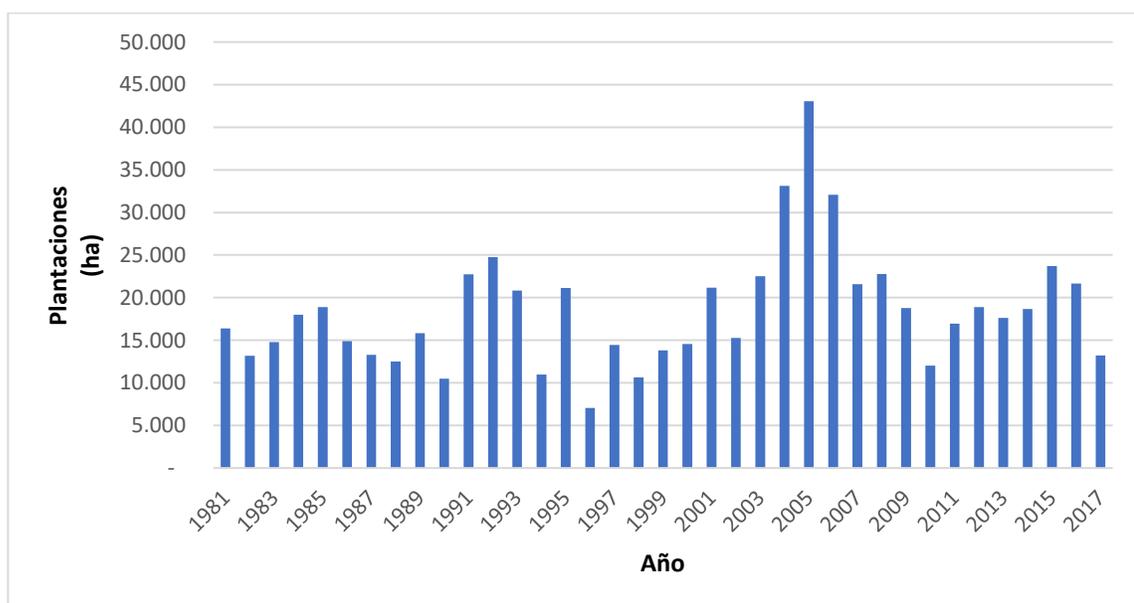


Figura 10: Evolución de las plantaciones forestales en la región de la Araucanía.

Fuente: CONAF, 2017.

La generación de caudales, a diferentes escalas espaciales y temporales puede ser visto generalmente como una compleja interacción de factores terrestres tales como la geomorfología de las cuencas hidrográficas, el tipo de suelo, la vegetación y uso de suelo, con los factores atmosféricos (como lo son la precipitación, temperatura, humedad del aire, el viento, etc.) y la variabilidad espacial y temporal de las variables antes mencionadas. (Ward & Trimble,2003).

Gran parte de las plantaciones forestales se encuentran en cuencas con superávit hídrico donde el 85% del caudal llega al mar. Los problemas son principalmente a niveles de microcuencas debido a que estas cuencas presentan un mayor déficit hídrico. Las plantaciones forestales como ejemplo las de *Eucalyptus globulus* consume aproximadamente entre 600-1000 milímetros al año. (CORMA, 2017).

Existen diversas opiniones al respecto del real impacto que ocasionan las cubiertas forestales en el régimen hidrológico y en la magnitud de la erosión (Huber et al., 2010; Little et al., 2015). Farley et al (2005) y Jackson et al (2005) documentaron que en regiones donde ocurre un proceso de expansión forestal de rápido crecimiento ocurren reducciones de la producción de agua, esto revela implicaciones políticas claras en relación con el uso de suelo.

1.3 Modelación Hidrológica

Los modelos buscan efectuar representaciones del mundo real en forma simple y menos compleja, su elaboración se basa en un esquema teórico que podrá predecir la respuesta de un sistema a ciertas variables (Sorooshian et al., 2008). En el ámbito de la hidrología los modelos se utilizan para poder entender los procesos hidrológicos que ocurren a nivel de las cuencas, tales como la esorrentía

superficial, evapotranspiración, interceptación, entre otros, para así poder predecir el comportamiento de estos procesos en diferentes escalas espaciales, basados en diferentes parámetros que definen las características del sistema (Ponce, 1989). En un modelo de escorrentía, generalmente los principales datos de entrada son la precipitación y temperatura atmosférica, mientras que la escorrentía se transforma en la variable de salida del modelo. (XU, 2002).

1.3.1 Clasificación de modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos pueden ser clasificados y una primera clasificación fue realizada por Singh, 1989 y esta se puede observar en la Figura 11. Esta clasificación divide los modelos hidrológicos entre simbólicos y materiales. Los modelos materiales o modelos físicos son una representación de un sistema real a una escala más reducida; pero donde se conservan las propiedades de este (Por ejemplo: simuladores de lluvia, cuencas experimentales, entre otros). Por su parte los modelos simbólicos o conocidos de igual forma como modelos formales, corresponden a una abstracción matemática de una situación ideal donde se preservan las propiedades estructurales importantes de ese sistema (Xu,2002). En esta última categoría, los modelos matemáticos permiten expresar el comportamiento del sistema por medio de un conjunto de ecuaciones matemáticas donde se relacionan las variables de entrada o de salida (Chow,1988). Dado que los modelos físicos son caros y de una aplicación limitada y los simbólicos se presentan flexibles, rápidamente disponibles y comparativamente son más económicos en su utilización, su uso se ha masificado para el modelado de cuencas. (Ponce, 1898).

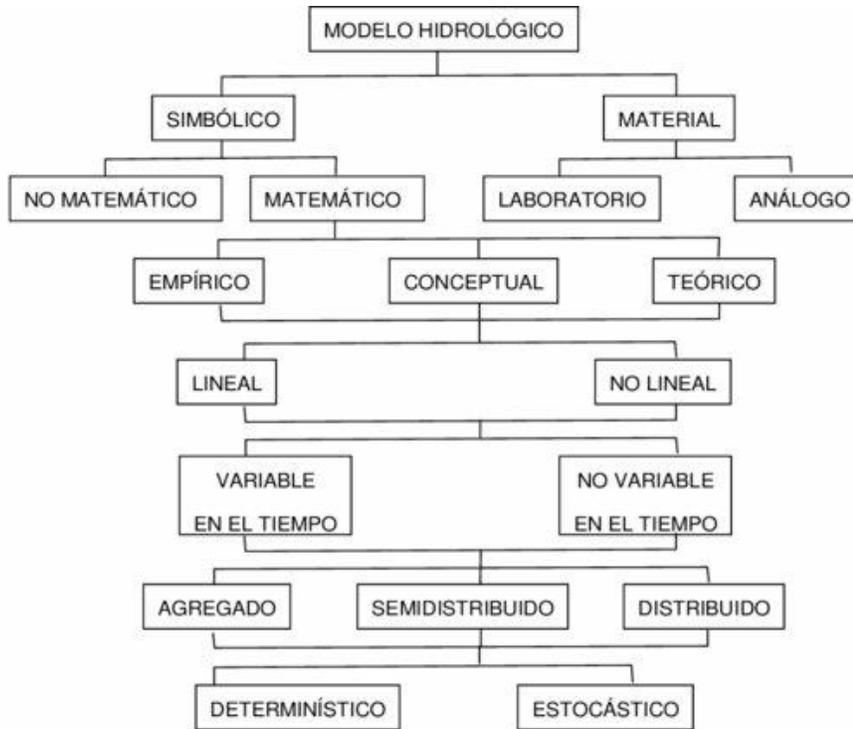


Figura 11: Clasificación de Modelos Hidrológicos.

Fuente: Singh (1989).

En la Tabla 3 se presenta un resumen de las principales características de las diferentes clasificaciones de los modelos matemáticos expresados en la Figura 11.

Tabla 3: Descripción de modelos hidrológicos matemáticos.

1	Empíricos	Denominados de caja negra, contienen parámetros que pueden tener un pequeño significado directo y pueden ser estimados solo por mediciones simultáneas de entrada y salidas.
	Teóricos	Llamados también de caja blanca o físicamente basados tienen una estructura lógica similar al sistema real y reproducen las leyes físicas que gobiernan el fenómeno simplificado.
	Conceptuales	Son un intermedio entre los modelos empíricos y teóricos, consideran leyes físicas; pero de una forma simplificada.
2	Lineales	Son formulas en términos de ecuaciones y procesos lineales.
	No lineales	Están formulados en términos de ecuaciones y procesos no lineales.
3	Continuos en el tiempo	Los parámetros del modelo y la relación de entrada-salida permaneces contantes en el tiempo.

	Variables en el tiempo	Los parámetros y la relación entrada-salida varían en el tiempo.
	Agregados	Los parámetros no varían espacialmente dentro del sistema hidrológico. La respuesta de la cuenca solo es medida a la salida de ésta sin tener en cuenta las respuestas de las subcuencas individuales.
4	Distribuidos	Los parámetros varían espacialmente dentro del sistema hidrológico.
	Semidistribuidos	Son una combinación de modelos agregados y distribuidos en los que se divide el sistema hidrológico en subunidades o subcuencas que son tratadas como unidades homogéneas o agregadas.
5	Determinísticos	Se denomina modelo determinístico si las variables del sistema se consideran libre de variación aleatoria, es decir, una entrada siempre produce una misma salida, por lo que no se puede ajustar una distribución de probabilidad.
	Estocásticos	Se considera un modelo estocástico cuando las variables son parcialmente y se puede ajustar unas distribuciones de probabilidad.

Fuente: Xu (2002); Chow (1988) y Ponce (1989).

La representación gráfica de los modelos agregados y distribuidos se presenta en la Figura 12.

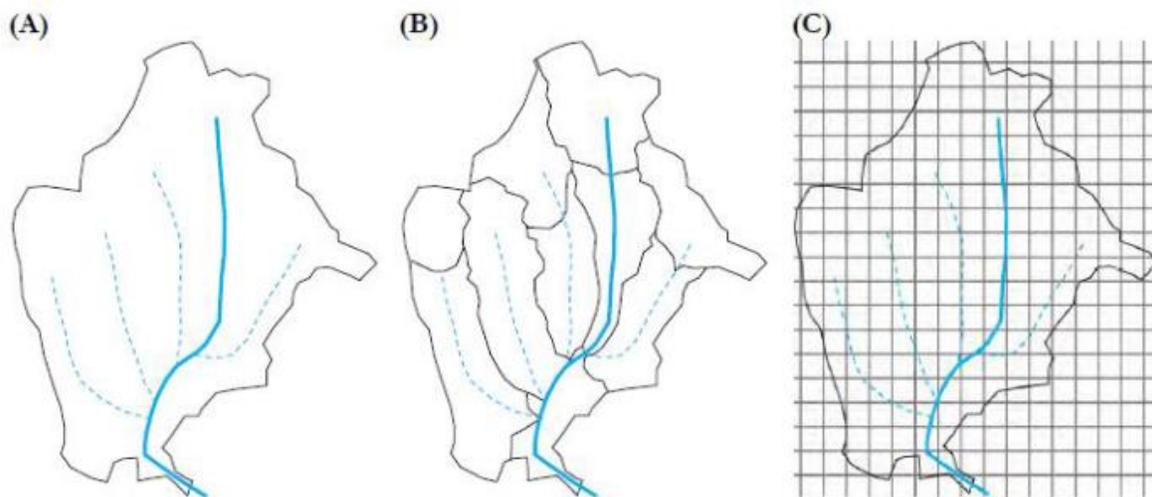


Figura 12: Tipos de modelos hidrológicos a escala de cuenca.

Fuente: CRAHI (2019).

En el caso de los modelos agregados o agrupados (Figura 12-A), toda la cuenca hidrográfica se considera una sola unidad en la que no se tiene en cuenta la variabilidad espacial, por lo tanto, solo se puede obtener un resultado promedio al modelar el caudal.

Los modelos semi-Distribuidos (Figura 12-B) y distribuidos (Figura 12-C) se distribuyen en el espacio dividiendo toda la cuenca en pequeñas unidades, generalmente subcuencas o celdas cuadradas, de modo que los parámetros, entradas y salidas pueden variar espacialmente, obteniendo así un resultado para cada subcuenca o celda, el cual es influido por las características y procesos físicos que ocurren en cada celda.

Cuando se requiere conocer la respuesta de una cuenca frente a forzantes como el cambio climático y los cambios de los usos de suelo, los modelos semi-Distribuidos y distribuidos son los más capacitados para predecir y conocer los efectos que ocurrirán en la vulnerabilidad hídrica del sistema (Beven, 1984; Yang et al, 2000; Stehr, 2008; Gayathri et al, 2015).

1.3.2 Modelación hidrológica distribuida

Para una correcta generación de escurrimiento y su temporalidad se deben privilegiar aquellos modelos hidrológicos que tengan una base física, que resuelvan los flujos hidrológicos característicos más relevantes de una cuenca (infiltración, evaporación, flujo subsuperficial, flujo base, etc.) y que resuelvan la ecuación del balance hídrico de la cuenca (ERIDANUS, 2016). Es en este contexto, cuando se quiere realizar simulaciones a futuro para evaluar, por ejemplo, los efectos del cambio climático o uso de suelo, los modelos distribuidos se presentan como una opción esencial

(Stehr,2008). Estos modelos permiten examinar por partes los efectos de estos cambios en el correcto contexto espacial (Beven,2001), además, representan de manera más precisa el sistema hidrológico al considerar la variabilidad espacial y las entradas de los parámetros del modelo.

En la Tabla 4 se presentan los principales modelos hidrológicos distribuidos utilizados para estudios en Chile, junto a las variables de entrada mínimas que requiere cada modelo.

Tabla 4: Modelos (semi) Distribuidos utilizados en estudios a nivel nacional.

Tipo de modelo	Meteorológica	Pluviométricas	Topográfica y suelo
NRECA	PP mensual nivel cuenca ETP mensual nivel cuenca	-	Área de la cuenca (DEM o IGM)
GR4J	Pp Diaria media nivel de cuenca E Diaria nivel de cuenca	Q Diario (Calibración)	Área de la cuenca (DEM o IMG) calibración de parámetros
MPL	PP mensual E mensual	Q mensual (Calibración)	Área, tipo de suelo (Tasa de infiltración, calibración parámetros)
SWAT	PP mensual (diaria) distribuida en la cuenca T mensual (diaria) distribuida en la cuenca	Q mensual (calibración)	HRU (Mapas de uso de suelo y tipo de suelo), Topografía (DEM o IGM)
WEAP	PP mensual (diaria) T espacialmente distribuida	Q mensual (Calibración)	DEM o curvas de nivel, uso y tipo de suelo
SACRAMENTO	Bandas de Pp diaria Bandas de E	Q medio Diario (calibración)	Área de la cuenca (DEM, IGM), curva de nivel, uso y tipo de suelo

Fuente: UNTEC (2012).

En el desarrollo de este estudio se decidió utilizar el modelo semi distribuidos SWAT para evaluar el efecto que tendrían futuros escenarios de expansión forestal en la vulnerabilidad hídrica cuenca del río Muco, esto debido a que es una herramienta que ha sido utilizada en estudios de efectos de cambio de uso de suelo a nivel mundial y local como son los trabajos de Aguayo et al (2016), Espinoza (2011) y Espinoza (2016) y además este modelo presenta ventajas las cuales se presentan a continuación:

- El modelo es bastante flexible y puede ser utilizado en un amplio rango de condiciones medioambientales (Arnold et al., 2005).
- Integración de un modelo a escala de cuenca con SIG que provee un enlace mejorado en el manejo de cuencas (Orville et al., 2014).
- El modelo está bien documentado sobre ecuaciones y los algoritmos que utiliza, además posee un completo manual de usuario que describe las distintas entradas y salidas (Orville et al., 2014).

2. HIPÓTESIS

El aumento de la cubierta forestal en la cuenca del Río Muco, provocará un aumento sustancial en su vulnerabilidad hídrica

3. OBJETIVOS

Para evaluar la hipótesis presentada se plantean los siguientes objetivos:

3.1 Objetivo general

Evaluar la vulnerabilidad hídrica de la cuenca del Río Muco frente a escenarios de expansión forestal.

3.2 Objetivos específicos

- 1) Analizar la tendencia de caudal y precipitación de los últimos 30 años.
- 2) Estimar el efecto de la actual situación forestal sobre la disponibilidad hídrica.
- 3) Analizar la vulnerabilidad de la cuenca ante 3 escenarios de expansión forestal.

4. METODOLOGÍA

4.1 Área de estudio

La cuenca del río Muco (Figura 13) se ubica en la latitud XX, se encuentra administrativamente emplazada en la región de la Araucanía, entre las comunas de Lautaro, Vilcun y Curacautín con un 43%, 11% y 6% de su superficie comunal respectivamente. Corresponde a una subcuenca del río Imperial. Posee un área de 651 Km², lo que la clasifica como una cuenca de meso escala.

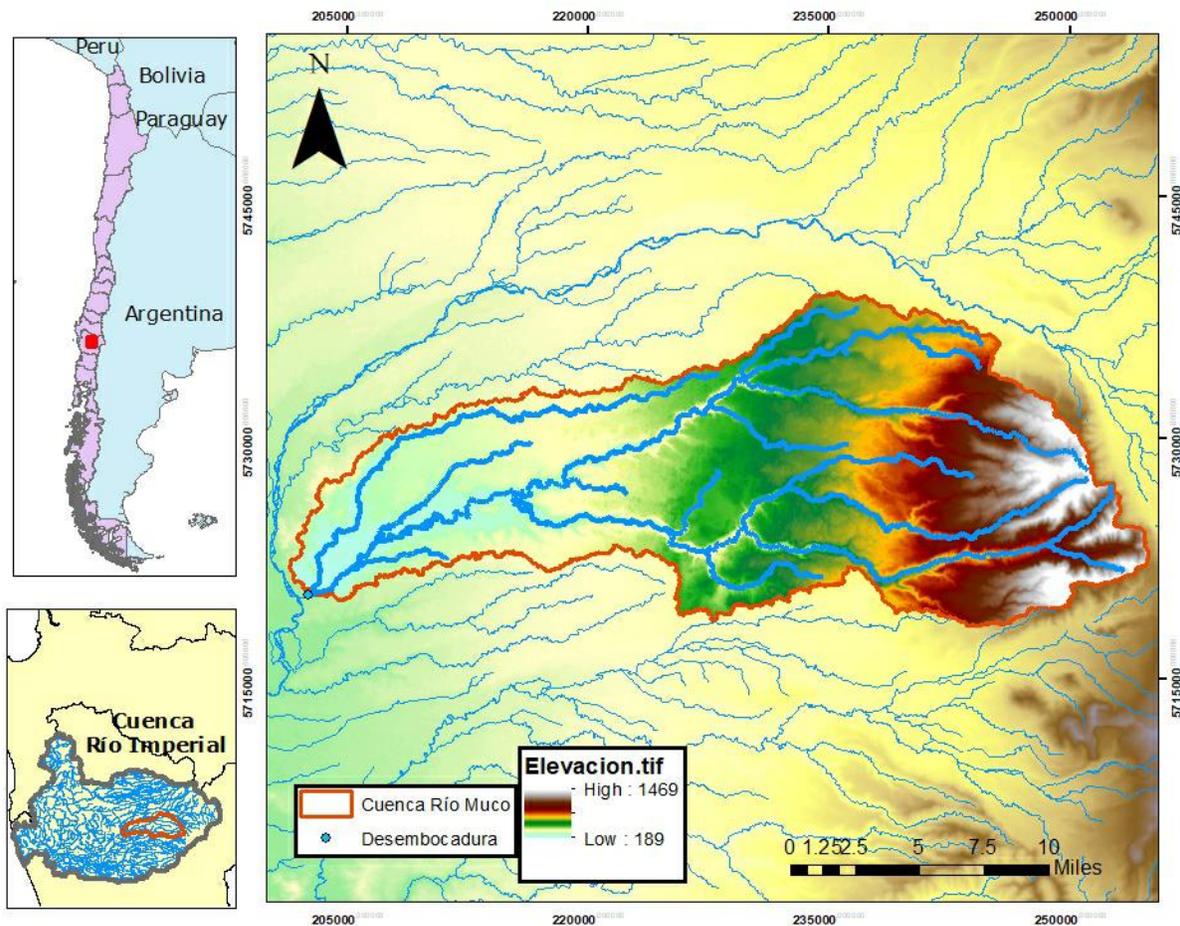


Figura 13: Cuenca del río Muco.

Fuente: Elaboración propia a partir de ArcMap.

Entre sus principales afluentes se destacan principalmente pequeños esteros y ríos, dentro de los cuales se puede destacar el río Trueno, río Collin y el estero Dollinco. La curva hipsométrica de la cuenca se observa en la Figura 14, e indica que corresponde a una cuenca de edad media.

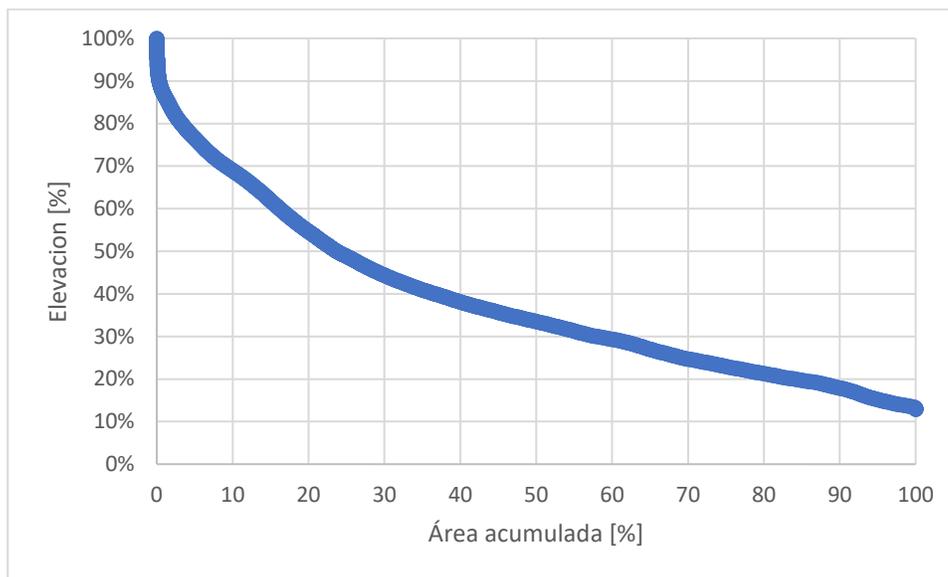


Figura 14: Curva hipsométrica de la cuenca del río Muco.

Fuente: Elaboración propia en base al Modelo Digital de Elevación.

La Tabla 5 muestra las estaciones meteorológicas y fluviométricas presentes y con influencia en la cuenca, la estación fluviométrica Río Muco en puente Muco se ubica en la parte baja de la cuenca, mientras que las estaciones meteorológicas se distribuyen en toda el área de estudio, estas son presentadas en la Figura 15.

Tabla 5: Estaciones Hidrometeorológicas de la DGA presentes (o con influencia) en la cuenca del río Muco.

Nombre estación	Tipo de Variable	UTM E	UTM N	Inicio de Registro	Fin de registro	Cantidad de Datos
Río Muco en puente Muco	Caudal	727105	5723721	1980	Vigente	100%
Río Collin en Codahue	Caudal	745112	5725695	1995	Vigente	78%
Malalcahuello	Precipitación	275698	5738799	1988	Vigente	95%
Cherquenco	Precipitación	760775	5714193	1987	Vigente	96%
Curacautín	Precipitación	247258	5740563	1970	Vigente	99%
Quillen	Precipitación	728005	5739450	1959	Vigente	99%
Rari Ruca	Precipitación	760947	5739450	1991	Vigente	96%
Vilcun	Precipitación	741760	5715756	1965	Vigente	99%
Lautaro	Temperatura	722862	5732790	1953	Vigente	86%
Malalcahuello	Temperatura	275698	5738799	1988	Vigente	95%

Fuente: Elaboración propia a partir de registro de la DGA.

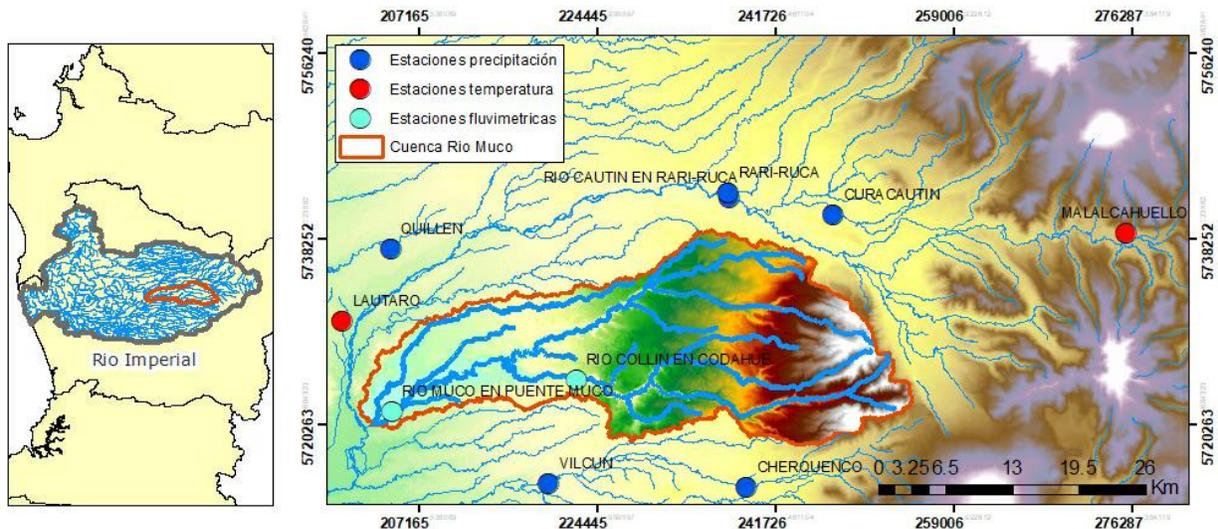


Figura 15: Estaciones Hidrometeorológicas en la Cuenca del Río Muco.

Fuente: Elaboración propia con datos DGA.

4.1.1 Antecedentes climáticos

La clasificación de Köppen para la región de la Araucanía, más específicamente en la ciudad de Lautaro, define un clima cálido y templado con lluvias invernales (Csb). El registro meteorológico para la ciudad de Lautaro (Figura 16) indica que la temperatura promedio es de 11,9°C pudiendo llegar a 17,4°C en los meses de verano y a 7,2°C en los meses de invierno. Mientras que la precipitación anual puede llegar a 1.383 mm. (Climate-Data, 2019).

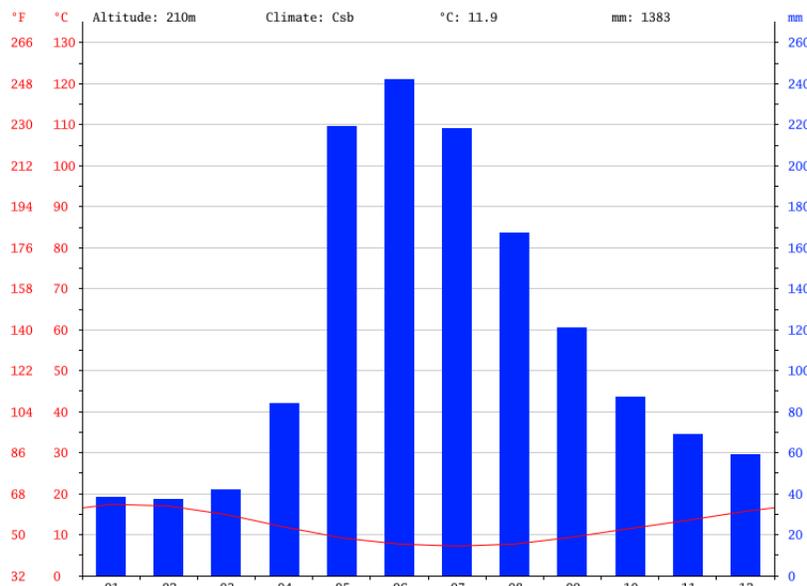


Figura 16: Climograma ciudad de Lautaro.

Fuente: Climate-Data.

La Figura 16 muestra que el mes más seco corresponde a febrero con 37mm de lluvia y el mes más lluvioso corresponde a junio donde se perciben 242mm, existe una diferencia de 205mm entre los meses más seco y los meses más lluviosos. De igual forma las temperaturas a lo largo de todo el año 10,2°C entre los meses más cálidos (Enero – Febrero) y los meses más fríos (junio).

Según el balance hídrico de Chile (1987) las temperaturas y precipitaciones correspondientes al área de estudio varían entre 8°C-10°C y 1.600-4.000 mm/años respectivamente, mientras que las tasas de evapotranspiración se concentran entre los 500-600 mm/año (Figura 17). También se puede observar que las precipitaciones aumentan con la altura, mientras que la temperatura y evapotranspiración disminuyen con esta.

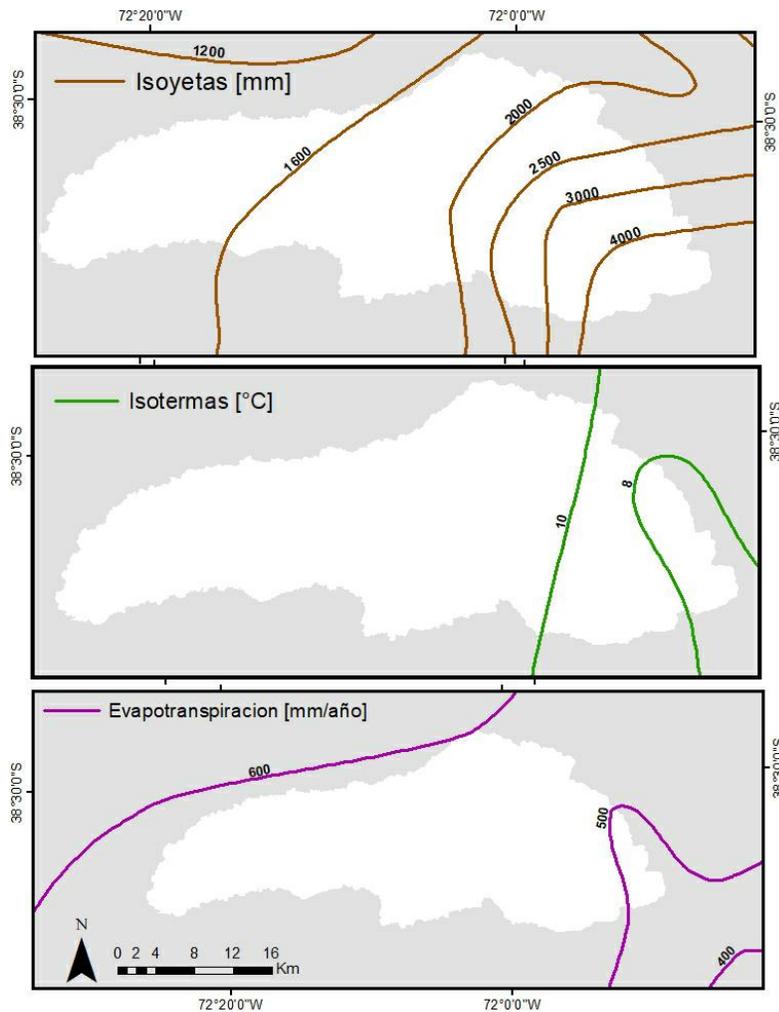


Figura 17: Isotermas, Isoyetas y Evapotranspiración para la cuenca del río Muco.

Fuente: Balance Hídrico de Chile (1987).

4.1.2 Antecedentes Hidrológicos

La cuenca del río Muco posee un régimen hidrológico de carácter pluvial, los mayores de valor caudal ocurren en los meses en los que la precipitación aumenta (junio, julio, agosto), mientras que los caudales de menor valor se presentan los periodos de estiaje, como se puede observar en la Figura 18 el Hidrograma llega a su máximo en el mes 7 (correspondiente a Julio), presentando caudales menores en los meses de enero a marzo los cuales corresponden a meses de verano.

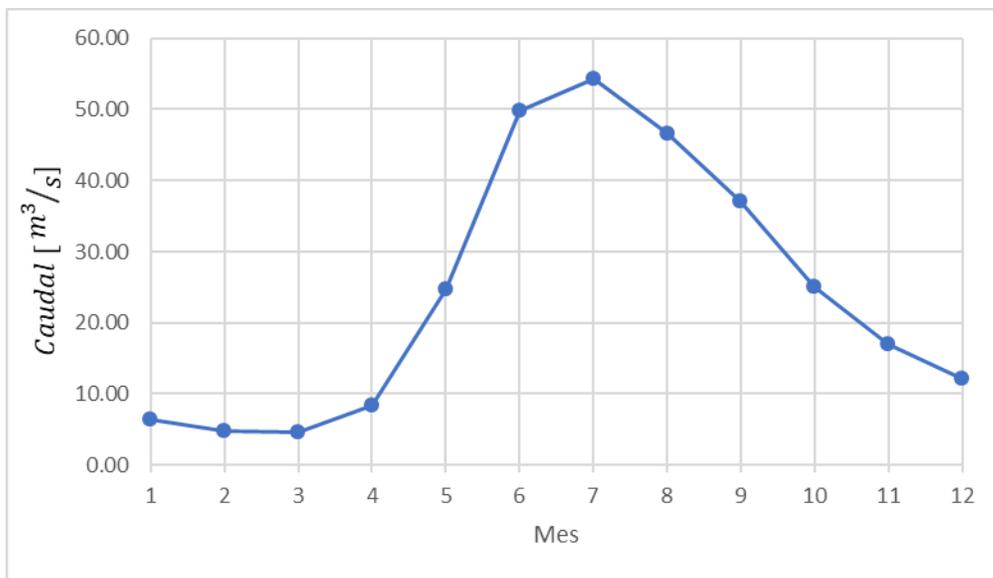


Figura 18: Hidrograma Estación río Muco en puente Muco para el periodo 1980-2018.

Fuente: Elaboración propia a partir de registros DGA.

El promedio anual para la estación río Muco en puente Muco es de $X m^3/s$, mientras que el caudal máximo de la cuenca se da en periodos estivales llegando a hacer $45.97 m^3/s$, por otro el caudal en periodos de estiaje se reduce a $5.33 m^3/s$, existiendo una variación de m^3/s .

4.1.3 Usos de Suelo

Los principales usos de suelos corresponden a: terrenos agrícolas (28%), Plantaciones forestales (14%) emplazadas principalmente en la parte baja de la cuenca; Bosque nativo (35%) el cual se encuentra distribuido en la zona alta de cuenca. La Figura 19 muestra los usos de suelo presentes en la cuenca.

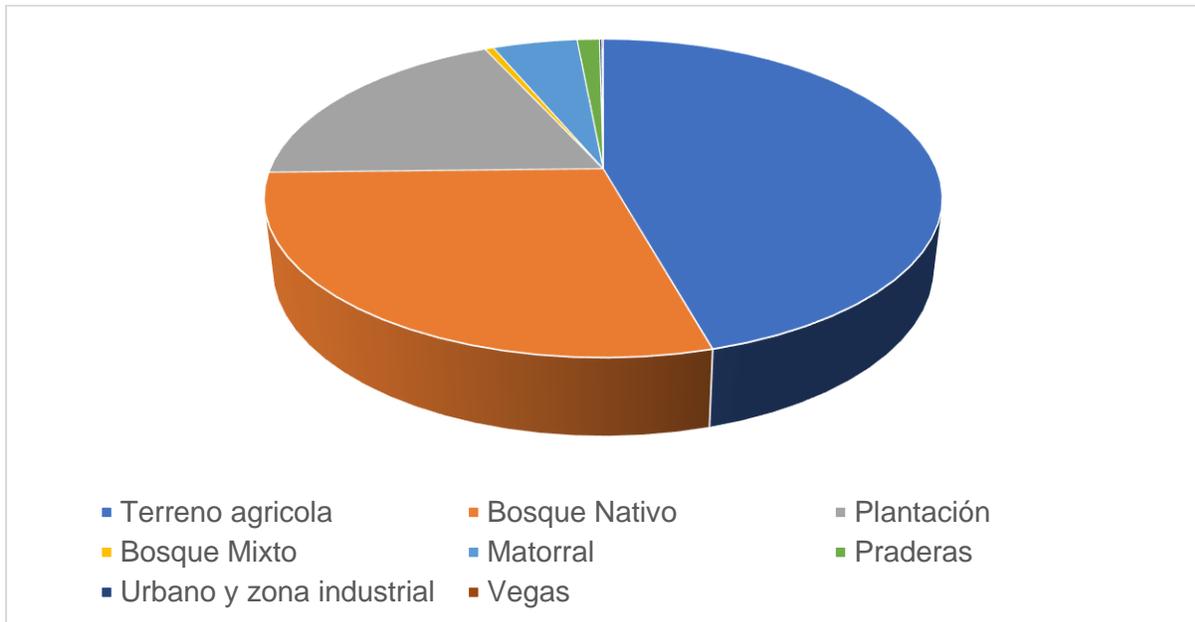


Figura 19: Distribución de los usos de suelo en la cuenca del río Muco.

Fuente: Elaboración propia en base al catastro de vegetación público de la CONAF (2014).

Por lo tanto, se puede determinar que el uso de suelo presente en la cuenca corresponde a terrenos silvoagropecuarios, esto se ve influenciado en gran medida por el clima templado mediterráneo, que predomina en el área de estudio.

4.2 Pruebas Estadísticas

4.2.1 Prueba de Tendencia de Mann-Kendall

Para poder analizar las tendencias se utilizarán datos de la estación de precipitación Vilcun de la DGA, estación fluviométrica río Muco en el puente Muco y los datos disponibles en la Base de datos de precipitación CHRIPS estos datos serán evaluados con la prueba estadística de Mann-Kendall (MK). Esta prueba corresponde a una prueba no paramétrica, permite comparar y ordenar las tendencias de una serie de tiempo valor por valor (Gonzales & Muños, 2013), evaluando si los valores tienden a aumentar o disminuir con el tiempo.

Esta prueba considera la hipótesis de estabilidad de la serie temporal. Siendo así la sucesión de la serie temporal detona la deformación independiente y la distribución de la probabilidad de permanecer a esta misma.

La ec.1 representa la estadística de la prueba MK

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(y_j - y_i)$$

ec. 1

Donde:

$$\text{sign}(y) = \{+1 \ x > 0; 0 \ x = 0; -1 \ x < 0$$

La presencia de autocorrelación positiva dentro de la serie puede aumentar la probabilidad de detección de tendencia, cuando en efecto esa no existe, mientras que la autocorrelación negativa tiende a disminuirla. (Yue et al., 2004).

Para poder corregir este efecto se utilizó la corrección presentada por Yue et al (2002), en donde se presenta una técnica de pre-blanqueo la cual remueve la correlación serial sin alterar la tendencia presente en la serie de datos. Esta técnica

se aplicó en las series de datos estaciones Verano (Ene-Mar), Otoño (Abr-Jun), Invierno (Jul-Sep) y Verano (Oct-Dic).

4.2.2 Prueba de Homogeneidad de Petit

Se aplicó el test de Petit el cual corresponde a una prueba no paramétrica, la cual es utilizada para el análisis de la rotura de series o cambios en la media, para verificar la homogeneidad de la serie.

Su hipótesis nula corresponde a que los datos son homogéneos, mientras que su hipótesis alternativa es que hay una fecha en la que hay un cambio en los datos.

Ambas pruebas (tendencia y homogeneidad) fueron evaluadas utilizando el software estadístico XLStat en su versión 2015, el cual es compatible con el programa Excel.

4.3 Modelo Swat

SWAT (Soil and Water Assessment Tools) es un modelo hidrológico continuo, semidistribuido y físicamente basado y desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estado Unidos (USDA) a principios de la década de los 90', como una herramienta para predecir el impacto de las prácticas de manejo de suelo en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas en cuencas grandes y complejas con variedad de suelo, uso de tierra y condiciones de manejo sobre un tiempo prolongado (Neitsch,2005). Los componentes principales del modelo incluyen clima, hidrología, temperatura y propiedades de suelo, crecimientos de plantas, nutrientes, pesticidas, patógenos y manejo de tierra, (Arnold,2010).

El modelo SWAT divide a la cuenca en subcuencas las que, a su vez, están fragmentadas en múltiples Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), donde cada HRU está compuesta por el mismo tipo de suelo, uso de suelo y pendiente.

El ciclo hidrológico, que se presenta como la herramienta principal del proceso en SWAT, este se encuentra dividido en dos fases: la fase terrestre, que controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas que vierten en el canal principal de las distintas subcuencas y la fase de enrutamiento corresponde a la que controla el movimiento del agua y demás componentes a través de la red hidrológica de la cuenca hasta su desembocadura. (Arnold,2010).

4.3.1 Fase terrestre

Esta fase controla la cantidad de agua que llega al canal principal de cada subcuenca como se puede apreciar en la Figura 20 y, se estima por la ecuación del balance hídrico (ec.2), la cual determina el contenido final de agua en el suelo.

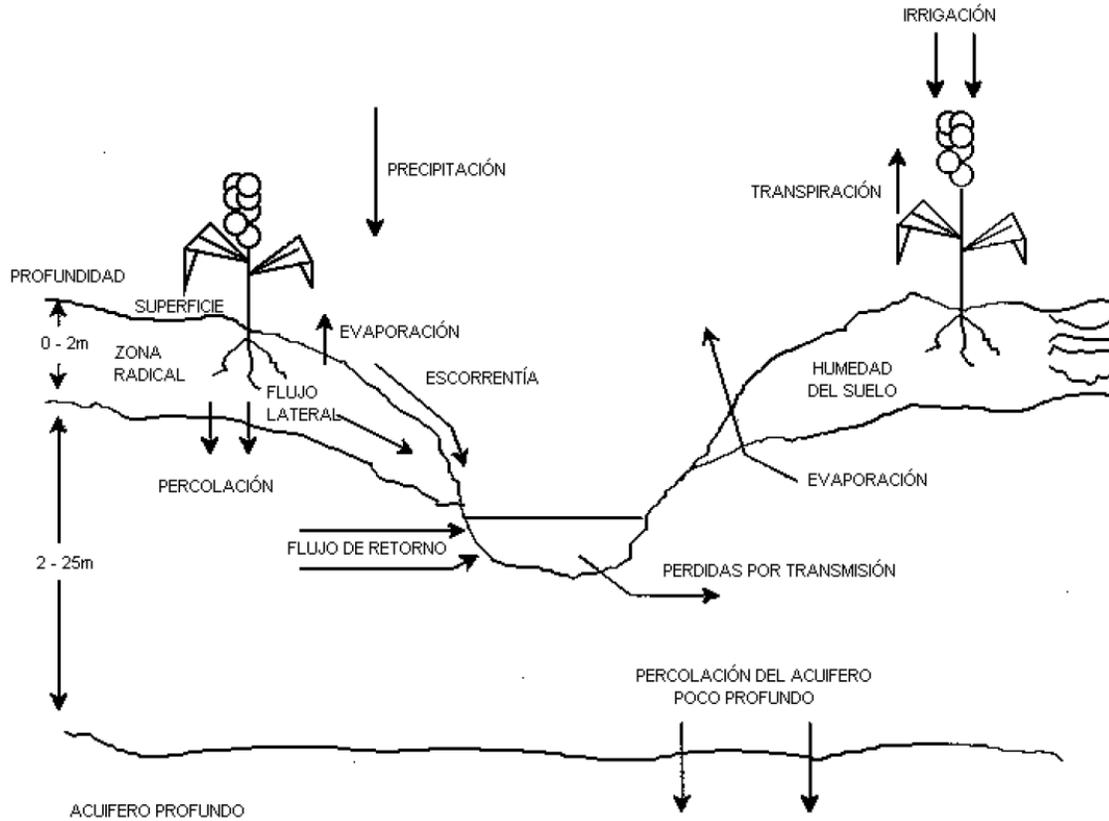


Figura 20: Representación del ciclo hidrológico en el modelo SWAT.

Fuente: Neitsch et al (2009).

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_d - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{ec. 2}$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm), SW_0 es el contenido inicial de agua en el suelo en un día i (mm), R_d es la cantidad de precipitación en un día i (mm), Q_{surf} es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día i (mm), E_a es la cantidad de evapotranspiración en un día i (mm), W_{seep} es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i (mm) y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en un día i (mm).

Los procesos más importantes de la fase terrestre del modelo hidrológico son:

Clima

El clima proporciona los aportes de humedad y energía que controlan y determinan la importancia de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Las variables meteorológicas mínimas de entrada para el modelo son las precipitaciones diarias, temperaturas máximas/mínimas del aire, velocidad del viento y radiación solar.

Hidrología

- Evapotranspiración

La evapotranspiración en el modelo considera la evaporación de ríos y lagos, superficies vegetales, suelos, transpiración de las plantas y sublimación de las superficies de hielo y nieves. Existen diferentes métodos con los cuales se puede determinar esta variable, tales como el método de Penman- Montetih, Priestly-Taylor o el método de Hargreaves. El primer método necesita de radiación solar, temperaturas medias y extremas, humedad relativa y velocidad de viento como datos de entrada, el segundo corresponde a un método empírico simplificado que no requiere de las variables de velocidad de viento, mientras que el método de Hargreaves sólo necesita como datos de entrada las variables de la radiación solar y temperaturas medias extremas.

- Escorrentía

La escorrentía simulada para cada HRU en forma de volumen de escorrentía superficial. El volumen de escorrentía superficial es calculado mediante el método Curva Numero (SCS, 1972), el cual es un modelo empírico que estima la escorrentía superficial para varios tipos y usos de suelo.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{día} - Ia)}{(R_{día} - Ia + S)} \quad \text{ec. 3}$$

Donde el Q_{surf} es el exceso de precipitación o escorrentía acumulada, $R_{día}$ la precipitación del día en unidades de longitud (Ia) es la abstracción inicial, es decir la precipitación que no genera escorrentía debido a la retención superficial o la infiltración, S es el parámetro de retención de agua del suelo, el cual varía espacialmente debido a cambios en el suelo, usos de suelo, pendiente y temporalmente debido al contenido de agua en el suelo, este parámetro se estima por:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad \text{ec. 4}$$

Donde CN es el número de curva para el día. Generalmente la abstracción inicial es cercana a $0.2S$ y la ecuación para el volumen de escorrentía queda como:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{día} - 0.2S)^2}{(R_{día} + 0.8S)} \quad \text{ec. 5}$$

De esta manera la escorrentía superficial ocurre solo cuando $R_{día} > Ia$, siendo esta ecuación función de la permeabilidad del suelo, uso de suelo y condiciones de agua en el suelo.

Los peak de escorrentía superficial, es decir, los mayores valores del caudal, son calculados con una modificación del método racional, el cual incorpora la escorrentía peak como una función de la proporción de la precipitación que cae mientras la subcuenca alcanza su tiempo de concentración.

4.3.2 Fase de enrutamiento

Una vez que el modelo determina los volúmenes de caudal que fluyen al cauce principal de cada subcuenca, se distribuyen por toda la red hídrica hasta el punto de salida. Al efectuar este movimiento el agua, el modelo considera la pérdida de esta debido a procesos tales como evapotranspiración, transmisión a través del lecho del cauce o por algún tipo de uso antrópico. El flujo de agua que recorre la cuenca también es complementario por la lluvia caída directamente sobre el cauce o también por descargas puntuales. La conducción del agua se puede efectuarse a través del método de Muskingum y el método de almacenamiento variable, utilizando el primer método en este estudio.

4.4 Calibración y validación

4.4.1 Datos de entrada

Para realizar la calibración y validación del modelo Swat para el área de estudio se utilizó la interfaz SIG del software ArcGis 10.4. Se utilizó el complemento ArcSwat versión 2012, el cual requiere como entradas los datos que se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Variables de entrada utilizados en la modelación de la cuenca del río Muco.

	Entrada	Descripción	Fuente
Meteorológicas	Temperaturas extremas	Temperaturas mínimas y máximas diarias registradas para la cuenca para el periodo 2002-2013	CFSR global base. Disponible en: https://globalweather.tamu.edu
	Precipitaciones	Precipitación diaria para la cuenca para el periodo 2002-2013	CHIPRS. Disponible en: http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/
Espaciales	DEM	Modelo de elevación digital de la cuenca con una resolución de 12.5x12.5 m	Alos Palsar, Disponible en: https://vertex.daac.asf.alaska.edu/
	Tipo de Suelo	Capa de tipo de suelo de la cuenca	Ciren (2002)
	Uso de Suelo	Capa de uso de suelo de la cuenca del año 2011	Heilmayr et al (2016)

Fuente: Elaboración propia con base en las referencias mencionadas.

La humedad relativa, velocidad del viento y radiación fueron generados por el modelo.

a) Datos Meteorológicos

Dado que la información de temperaturas extremas y de precipitación de las estaciones de la DGA no presentaban una distribución que represente el comportamiento espacial de estas variables en la cuenca, sumado a que la información faltante debe de ser completada (considerando que el modelo no acepta carencia de registros) aumentando de esta forma la incertidumbre del modelo, se decidió utilizar la base de datos de Temperatura elabora por Climate Forecast

System Reanalysis (CFSR global base) y la base de datos de precipitación CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station).

La base de datos de temperatura cuenta con registro desde el año 1989 hasta el año 2014, se encuentra en un formato de texto compatible con el formato de entrada de datos del programa. Se puede observar en la Figura 21 el desempeño de esta base de datos comparándola con el registro disponible para una estación con influencia en la cuenca, esta base de datos presenta una subestimación en las temperaturas mínimas del área de estudio.

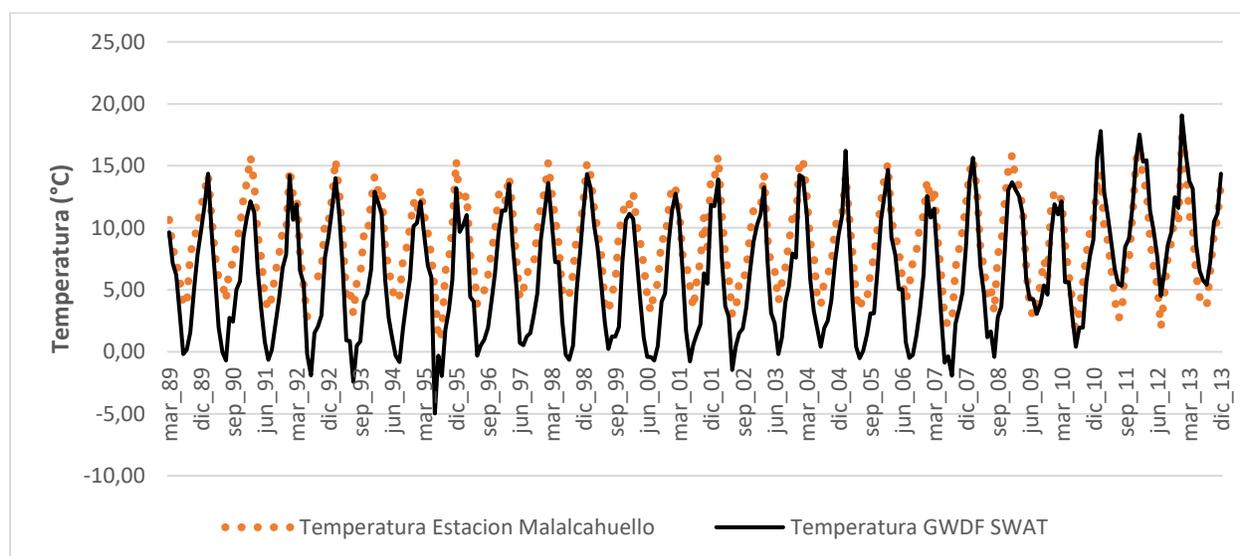


Figura 21: Distribución temporal datos CFSR global base (1989 – 2013).

Fuente: Elaboración Propia.

Mientras que la base de datos CHIRPS consiste en registros de precipitación diaria desde 1981 hasta la fecha en un formato raster con una resolución de 0.05° y cuyo desempeño en Chile fue analizado por Zambrano et al (2017). Se puede observar en la Figura 22 el desempeño de esta base de datos para una estación con influencia en la cuenca.

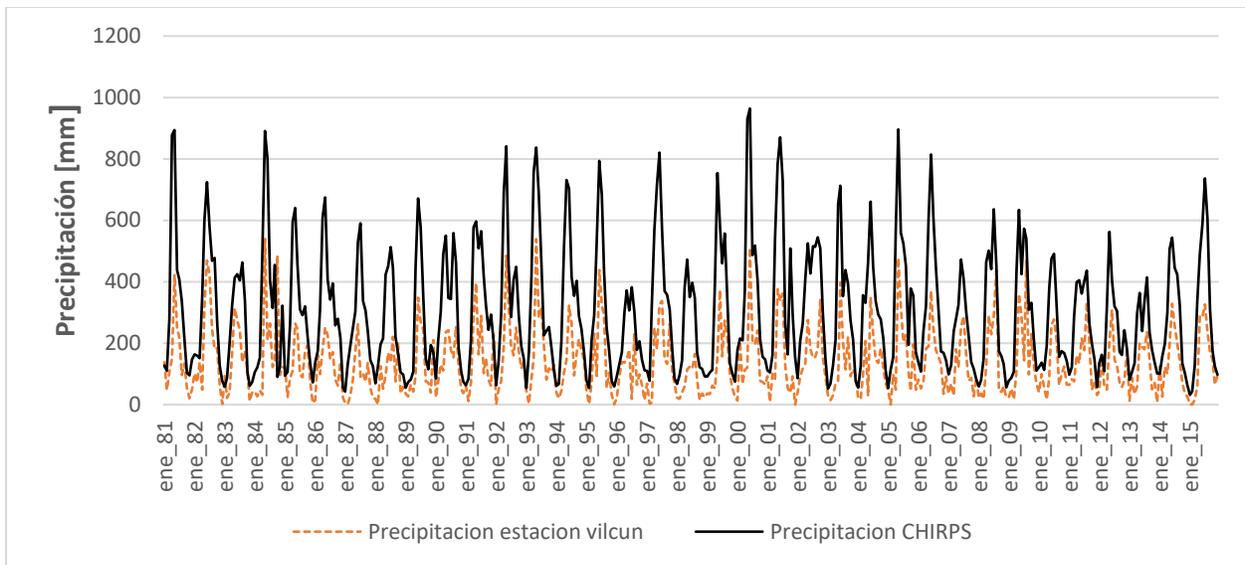


Figura 22: Distribución temporal datos CHIRPS (1981 – 2015).

Fuente: Elaboración Propia.

b) Datos espaciales

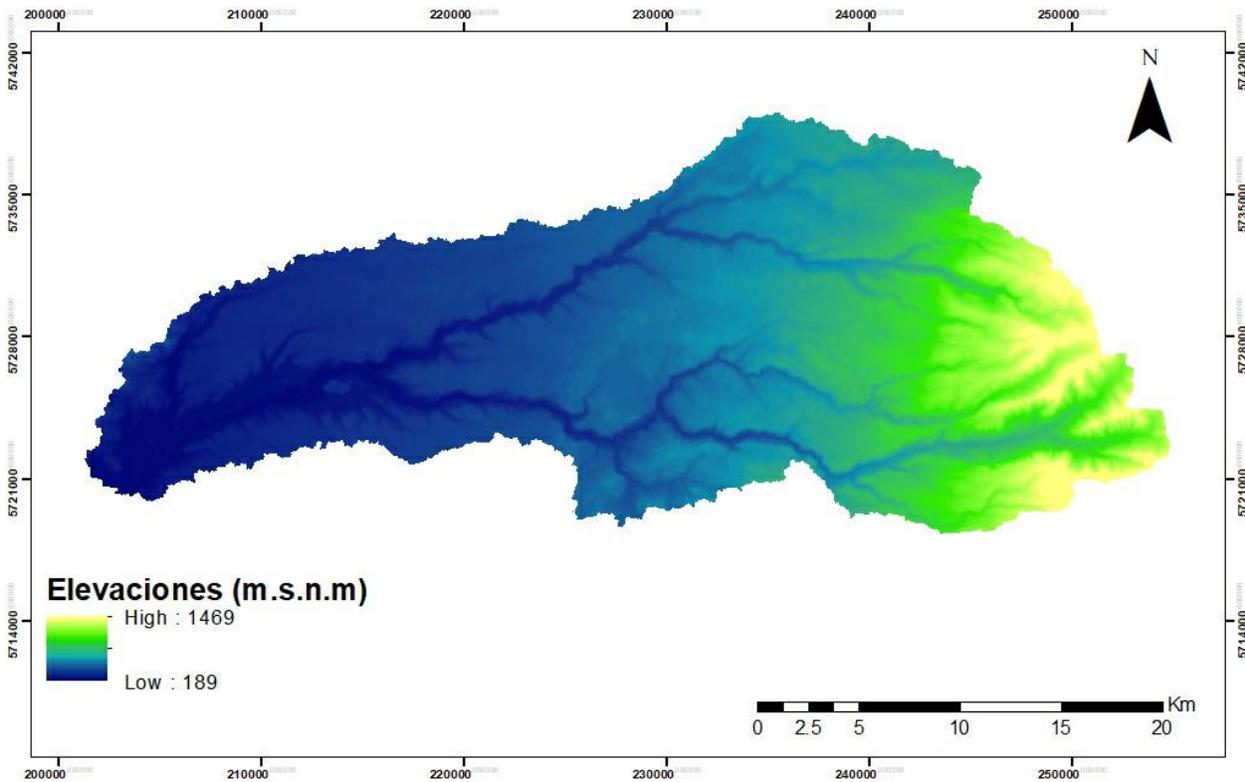


Figura 23: Modelo de elevación digital (DEM).

Fuente: Elevación propia a partir de DEM.

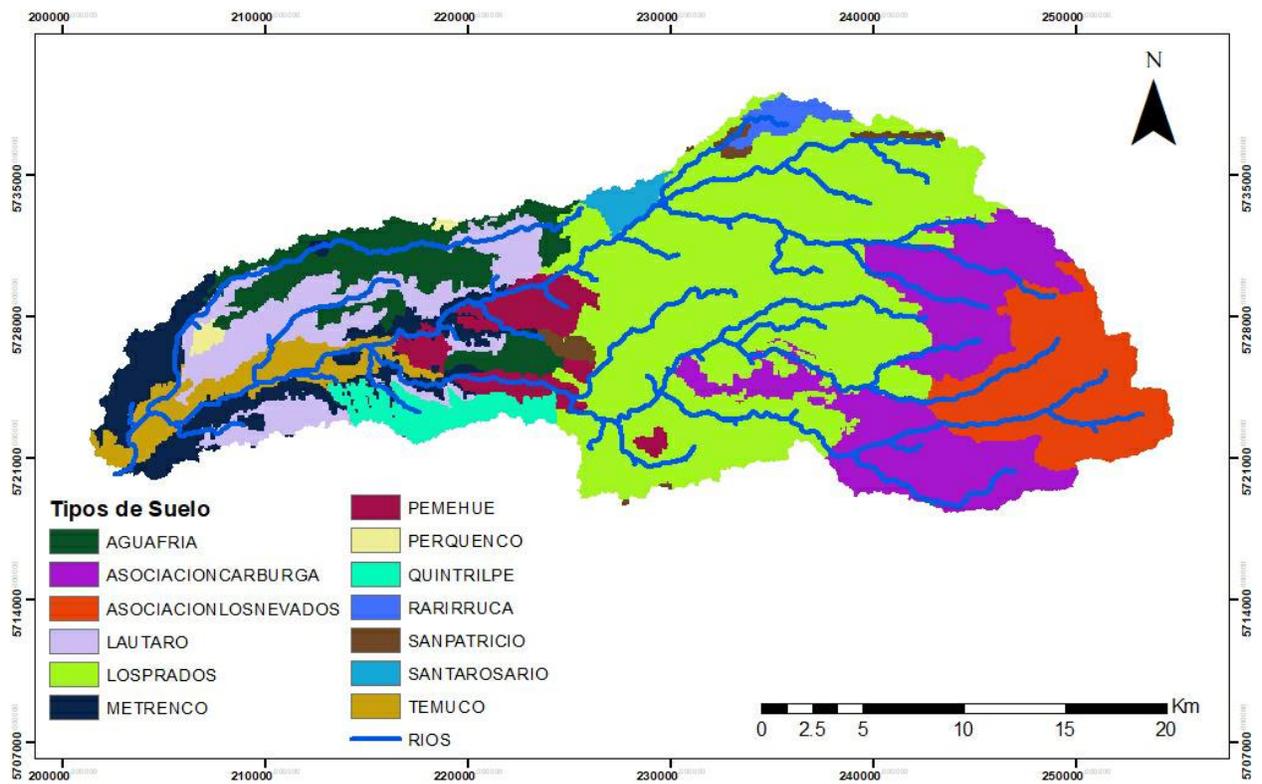


Figura 24: Tipos de suelo cuenca del río Muco.

Fuente: CIREN (2002).

Tabla 7: Tipos de suelos presentes en la cuenca del río Muco.

Suelo	Descripción	Drenaje	Permeabilidad	Escurrimiento superficial
Agua Fría	Suelo ligeramente profundo, con buen arraigamiento hasta 40 cm, formado por depositación aluvial de cenizas volcánicas sobre un conglomerado volcánico muy meteorizado.	Moderado	Moderada	Lento
Asociación Caburga	Suelo de textura superficial franco limosa y color pardo oscuro.	Bueno	Moderada	Muy Rápido
Asociación Los Nevados	Suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas, moderadamente profundos.	Excesivo	Moderadamente rápida	Muy Rápido
Lautaro	Son suelos. Ligeramente profundos, de origen aluvial; textura superficial franco limosa.	Moderado	Moderadamente lenta	Lento
Los Prados	Se presenta en forma de depósitos de cenizas volcánicas sobre planos fluvioglaciares.	Bueno	Moderada	Moderado
Metrenco	Son suelos profundos formados por cenizas volcánicas muy antiguas sobre planos remanentes.	Bueno	Moderada	Rápido
Pemehue	Son suelos profundos, formado por cenizas volcánicas.	Bueno	Moderada	Rápido
Quintrilpe	Son suelos que se presentan en forma de depósitos de cenizas volcánicas sobre planos fluvioglaciares.	Imperfecto	Moderada	Lento
Rarirruca	Son suelos profundos, formados por depositación de cenizas volcánicas, en posición de terrazas remanentes, poseen texturas franco limosa.	Bueno	Moderada	Rápido
San Patricio	Suelos evolucionados a partir de cenizas volcánicas depositadas sobre antiguas terrazas aluviales.	Moderado a imperfecto	Moderada	-----
Santa Rosario	Suelos formados por depósitos de cenizas volcánicas sobre gravas y piedras en planos depositacionales fluvioglaciares.	Imperfecto	----	Lento
Temuco	Suelos ligeramente profundos, de origen aluvial, en posición de terraza reciente, de textura superficial franco limosa.	Bueno	Moderada	Lento

Fuente: CIREN (2002).

Tabla 8: Usos de suelo presentes en la cuenca asociados a la base de datos del modelo SWAT.

Uso de suelo	Uso SWAT asociado	Código SWAT
Bosque Nativo	Mixed Forest	FRST
Bosque de Renoval	Forest-Deciduous	FRSD
Plantación Forestal	Eucaliptus	EUCA
Matorral	Range Shrubland	RNGB
Matorral	Range Grasses	RNGE
Terreno Agrícola	Agricultural Land Generic	AGRL
Ciudades y centro urbanos	Urban Medium Density	URML
Pradera	Winter Pasture	WPAS
Cuerpos de aguas	Water	WATR
Bosque Achaparrado	Emergent/ Herbaceous Wetlands	SWRN

Fuente: elaboración propia en base a Neitsch et al. (2009).

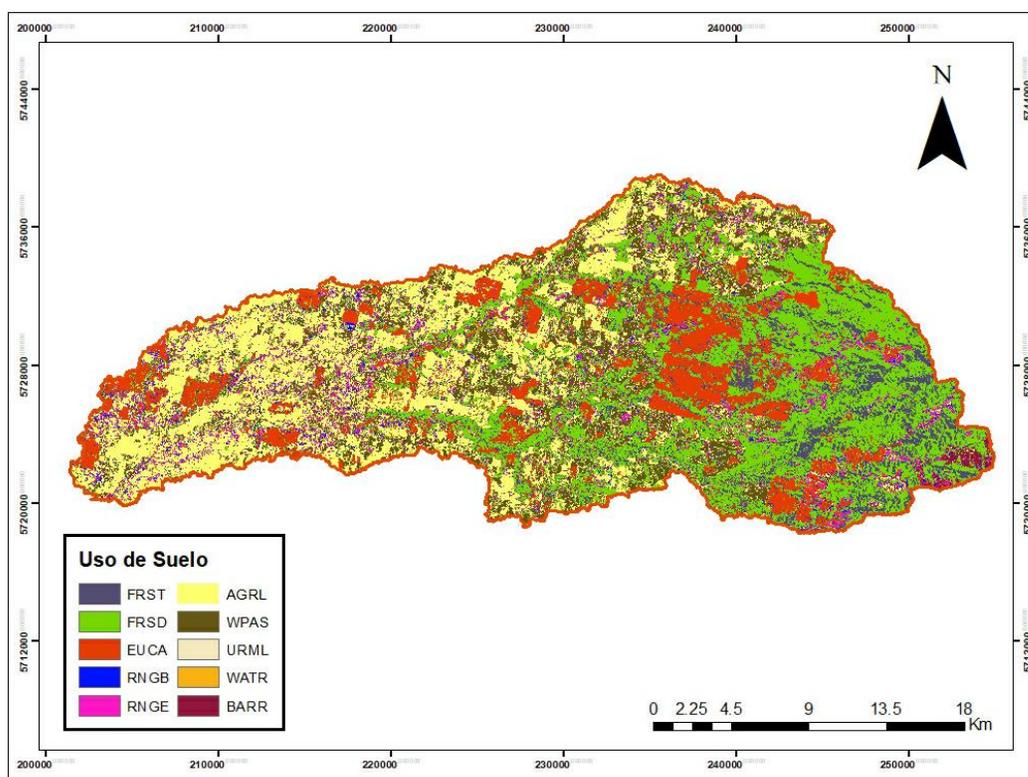


Figura 25: Usos de suelo año 2011.

Fuente: Heilmayr et al (2016).

Se generó una base de datos de tipos de suelo para ser ingresada al modelo SWAT utilizando información disponible para la cuenca en el estudio agrologico de CIREN (2002) (Figura 24 y Tabla 7). De igual forma los usos de suelos presentados por Heilmayr et al (2016) se homologaron a los registrados en el modelo (Figura 25 y Tabla 8).

4.4.2 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT

El análisis de sensibilidad para los distintos parámetros del modelo se realizó utilizando el software SWAT-CUP, descrito por Abbaspour et al (2004), Rouholahnejad et al (2012) y Arnold et al (2010). Este corresponde a un programa automático que se une al set de archivos de texto de salida de SWAT. Van Liew et al (2015) sugiere que la utilización de este tipo de programas, específicamente para el modelo utilizado, se convierte en una herramienta poderosa, que ahorra trabajo y que puede ser usada para reducir substancialmente la frustración y la subjetividad que caracteriza la calibración manual. Se seleccionó el algoritmo SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting versión 2), el cual corresponde a un proceso semiautomático que determina la sensibilidad de los parámetros y sus rangos óptimos para el área de estudio. La sensibilidad se estima a través de un proceso iterativo utilizando el test-P para cuantificar la sensibilidad. Los valores cercanos a 1 indican una baja sensibilidad, por el contrario, valores cercanos a cero indican una mayor sensibilidad. (Abbaspour et al., 2007; Abbaspour et al., 2015).

En el caso de este estudio se utilizó cómo función objetivo el criterio de Kling Gupta (KGE), realizando un número de 500 iteraciones. La Tabla 9, muestra los parámetros calibrados para la cuenca del río Muco.

Tabla 9:Parámetros que influyen la simulación de flujo en SWAT.

Parámetro	Descripción	U	Min	Max
ALPHA_BF	Coeficiente de recesión del flujo de base	Días	0	1
GW_DELAY	Tiempo de retardo del agua subterránea	Días	1	500
GW_REVAP	Capacidad de mover agua desde un acuífero superficial	-	0.01	0.2
GWQMN	Profundidad de agua en el acuífero superficial	Mm	0	5000
OV_N	Coeficiente de Manning	-	0.1	0.3
SFTMP	Temperatura de caída de nieve	°C	-5	5
SOL_AWC	Capacidad de disponible	%	-0.3	2
CN2	Curva Numero	\$	0	100
SLSUBBSN	Pendiente de subcuenca	%	-0.5	1

Fuente: Cibir et al. (2010).

La calibración se realizando a escala mensual, dejando los primeros 3 años de registro como un periodo de calentamiento (warm – up period). En la Figura 26 se aprecia la división de subcuencas generadas por el modelo para la cuenca del rio Mucó, donde la subcuenca 90 coinciden en su desembocadura con una estación fluviométricas de la DGA que presenta registros de caudal para realizar este proceso.

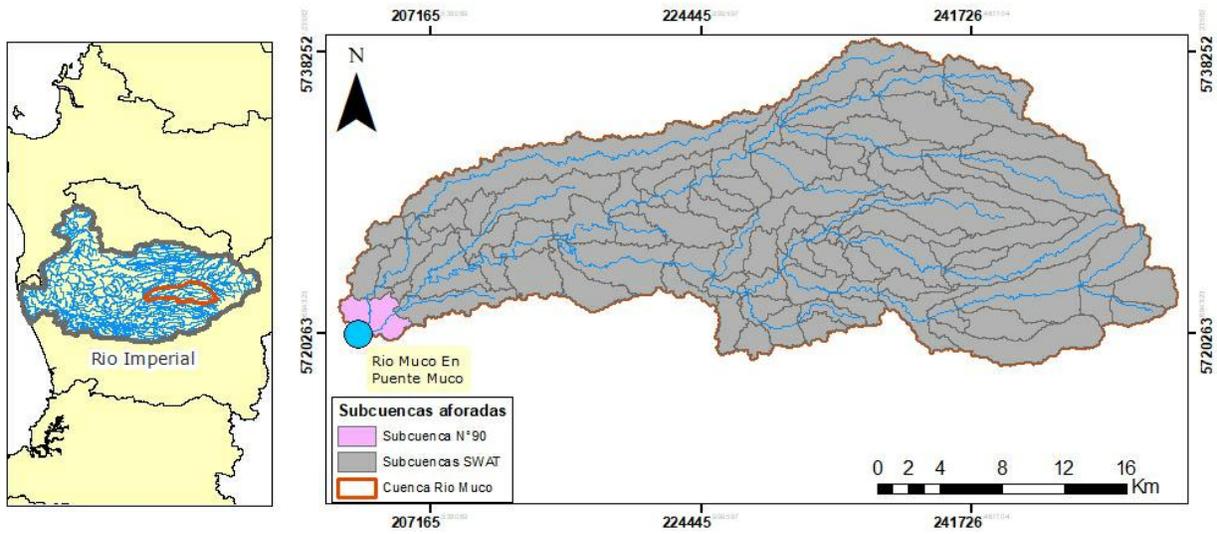


Figura 26: Subcuencas generadas por el modelo para la cuenca del río Muco.

Fuente: Elaboración propia con base ArcSwat.

El periodo considerado para la calibración fue entre los años 2005-2008, mientras que el proceso de validación se efectuó entre los años 2009-2013. La Figura 27 muestra el esquema del proceso de calibración y validación.

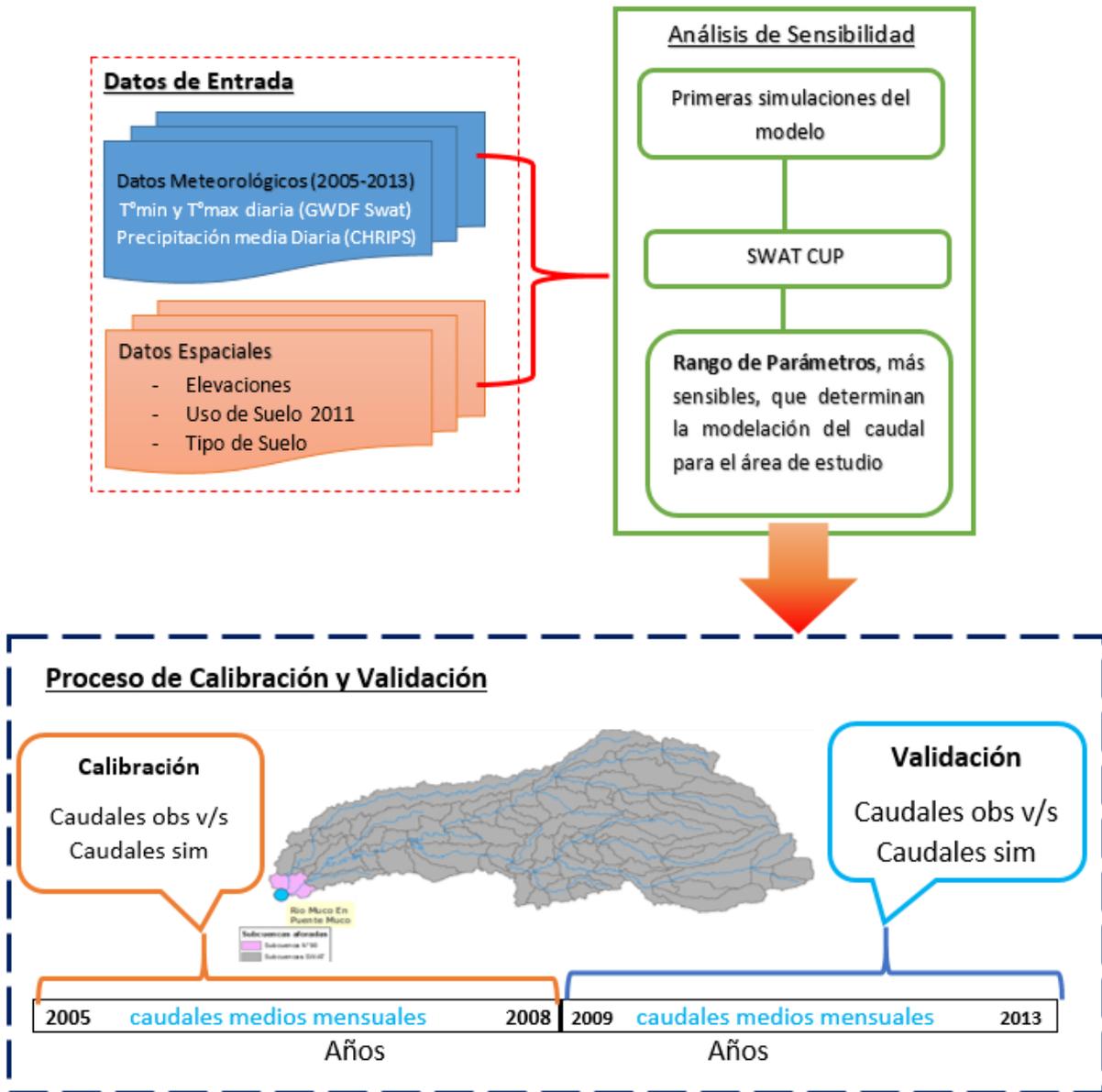


Figura 27: Esquema metodológico para calibración y validación del modelo SWAT.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.3 Indicadores de Bondad de Ajuste

Para medir el desempeño del modelo se utilizaron 3 indicadores de bondad de ajuste que se describen a continuación, Moriasis et al (2007), para la simulación de caudal los cuales se describen a continuación:

- **Coeficiente de determinación (R^2):** Indica la proporción de la variación de los datos observados explicada por el modelo. Tiene un rango de 0-1, siendo los valores cercanos a 1 los que tienen una menor varianza del error y los valores sobre 0.5 son considerados aceptables.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - \underline{Y_{obs}})(Y_i \text{ sim} - \underline{Y_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - \underline{Y_{obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ sim} - \underline{Y_{sim}})^2}} \right]^2 \quad \text{ec. 6}$$

- **Porcentaje de BIAS (PBIAS):** Establece si la media de la tendencia de los datos simulados es mayor o menor a la de los datos observados. Su valor óptimo es 0, mientras que valores muy negativos indican una subestimación del modelo y valores muy positivos indican una sobreestimación.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - Y_i \text{ sim})}{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs})} * 100 \quad \text{ec. 7}$$

Para las ecuaciones (6,7) $Y_i \text{ obs}$ corresponde a la i-esima observación para el componente evaluado, $Y_i \text{ sim}$ es la i-esima simulación y n corresponde al número total de datos observados.

- **Índice de Kling Gupta (KGE):** Es una optimización de la función de eficiencia de Nash-Sutcliffe y permite que las subestimaciones de los caudales peak no sean tan graves en comparación al indicador NSE. (Gupta et al, 2009).

ec. 8

$$KGE = [1 - ED]$$

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$$

ec. 9

Donde ED es la distancia euclidiana desde el punto ideal; r corresponde al coeficiente de correlación lineal entre los datos simulados y los observados; β es la razón entre la media de la simulación y la media de los valores observados, representando así el sesgo; γ corresponde a la razón entre la desviación estándar de los datos simulados en comparación con los datos observados.

Los correspondientes criterios para la evaluación del desempeño del modelo, según los indicadores de bondad de ajuste mencionados anteriormente se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10: Límites de desempeño de medidas de bondad de ajuste.

Indicadores	Muy Bueno	Bueno	Satisfactorio	No Satisfactorio
R²	R ² >0.80	0.70≤R ² ≤0.80	0.60≤R ² ≤0.70	R ² ≤0.60
PBIAS (%)	PBIAS<±10.0	±10≤PBIAS≤±15	±15≤PBIAS≤±25	PBIAS>±25
KGE	0.75<KGE≤1. 0	0.65<KGE≤0.75	0.5<KGE<0.65	KGE<0.5

Fuente: Moriasis et al. (2007); Gupta et al (2009).

4.5 Escenarios de expansión forestal

La modelación de escenarios futuros usos de suelo se efectuó comparando la dinámica espacial de los cambios ocurridos en el periodo 1986 al 2001, y se proyectó un escenario futuro considerando una expansión forestal para la cuenca. Para ello se utilizaron las capas temáticas elaboradas por Heilmayr et al (2016) para los años mencionados.

Se identificaron las variables y factores que determinan la ubicación de los diferentes usos de suelo (presentados en la Tabla 11), las relaciones entre la ocurrencia de una expansión forestal (variable dependiente) y los factores forzantes (variables independientes) utilizando un modelo de regresión logística (ec.10), según lo propuesto por distintos autores (Aguayo et al., 2016; Miranda et al., 2015; Nahuelhual et al., 2012; Aguayo, 2008; Echeverría et al., 2007; Mellado, 2019). Este proceso se llevó a cabo utilizando los softwares ArcGIS 10.4.

$$P(y = 1 | x) = \frac{e^{\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i}}{1 + e^{\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i}} \quad \text{ec. 10}$$

Para llevar a cabo la expansión forestal la metodología utilizada se sintetizo en la Figura 28, donde los distintos pasos realizados se explicarán a continuación:

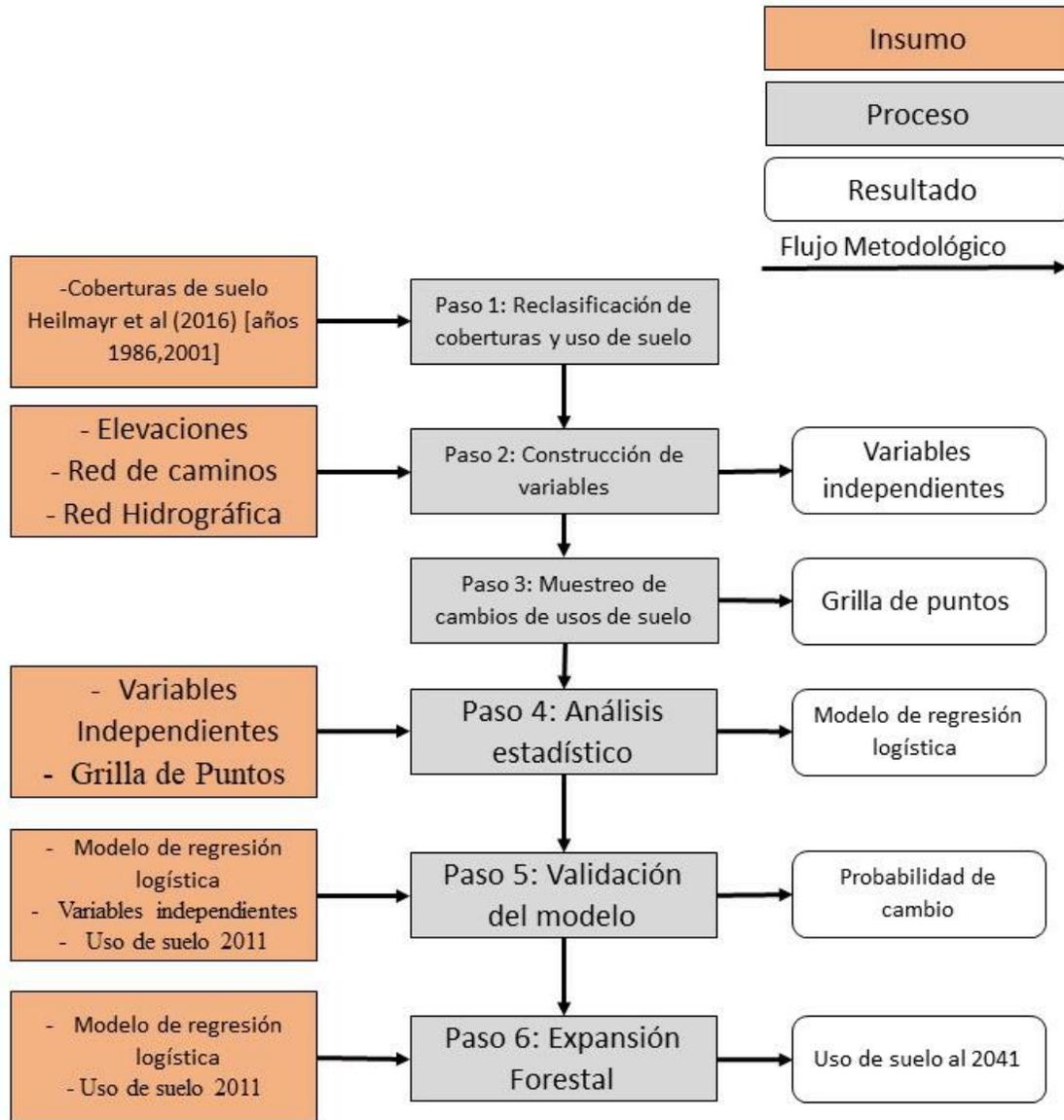


Figura 28: Esquema metodológico expansión forestal.

Fuente: Elaboración Propia.

Paso 1: Reclasificación de coberturas y usos de suelo.

Para la descripción de las coberturas de uso de suelo se utilizaron las capas elaboradas por Heilmayr et al (2016), para los años 1986 y 2001. Esta información fue reclasificada asignando los valores de Bosque nativo (Al bosque nativo y bosque de renoval), Plantación Forestal, Terrenos Agrícolas, Uso de suelo urbano y otros

usos, finalmente se genera un nuevo archivo Shp para ambas capas con los nuevos valores.

Paso 2: Construcción de variables.

Con las coberturas de suelo ya reclasificadas se generan las variables de Presencias y Distancias utilizando las herramientas de Arcgis Distancia de Euclidiana y Estadística Focal (con un radio de 500), respectivamente. De igual forma se utiliza un Modelo de elevación digital obtenido del Sensor Alos para construir la variable de pendientes. Finalmente utilizando los archivos shp de carreteras y red hidrográfica y utilizando la herramienta de Distancia Euclidiana se construyeron las variables de distancia respectivas.

Paso 3: Muestreo de usos de suelo.

Utilizando la cobertura del año 2001 se extrajeron los polígonos que correspondían a plantaciones forestales, desde la cobertura del año 1986 se extrajeron los polígonos correspondientes a los de terrenos agrícolas y praderas, utilizando la herramienta de geoprocésamiento "Clip", se recortaron los polígonos de plantación del año 2001 en función de los obtenidos del año 1986. Luego con la herramienta Creación de red, se crea una malla de puntos cada 250 metros, con los polígonos que cambiaron de terreno agrícola o pradera a plantación, se seleccionaron los puntos que están dentro de los parches de polígonos más representativos, a estos puntos se les asigna el valor de 1. Para finalizar se utilizan los usos de suelo de terrenos agrícolas y praderas del año 1986 y se comparan con los mismos usos de suelo del año 2001 para ver en que polígonos no ocurrieron cambios, seleccionando

así los puntos más representativos y asignándoles el valor 0, finalmente se unen en un solo archivo SHP los puntos con valor 1 y valor 0.

Paso 4: Análisis estadístico.

Con el conjunto de variables independientes (obtenidas en el paso 2) y la Grilla de puntos obtenidos en el paso anterior, se utiliza la herramienta de Extracción de valores múltiples a puntos, se extraen los valores de cada variable independiente a los puntos de la grilla. Se exportan los datos a una tabla Excel y utilizando el complemento estadístico Xlstat se calcula la ecuación de la regresión logística.

Paso 5: Validación del Modelo

Utilizando la ecuación de regresión logística obtenida en el paso anterior y utilizando las variables independientes se elaboró el uso de suelo futuro al año 2011, utilizando el cambio histórico ocurrido (1986-2001), para el proceso de validación se reclasificaron de probabilidad y comparando con el uso de suelo del año 2011 generado por Heilmayr et al (2016). Con esto se buscaba encontrar la probabilidad de cambio que mejor se ajustara al modelo para que no se expandieran otros usos de suelo que no fueran plantación forestal, siendo en este caso seleccionada una probabilidad de 0,6.

Paso 6: Expansión forestal

Con los parámetros obtenidos por medio del modelo de regresión logística se utilizaron para simular un escenario de expansión forestal al año 2041, generando un uso de suelo intermedio al año 2026, esto debido a que el modelo de regresión logística lograba expandir 15 años al futuro.

En la Tabla 11 se presentan las variables independientes que fueron confeccionadas en SIG, indicando de donde se obtuvieron los archivos tipo Sharpefile de ciudades, caminos y usos de suelo.

Tabla 11: Variables independientes ingresadas al modelo de regresión logística para el periodo 1986-2001.

Variables independientes	Descripción	Fuente
Elevaciones	Modelo de elevación digital DEM.	Sensor Alos Palsar. Disponible en https://vertex.daac.asf.alaska.edu/
Distancia a caminos	Distancia euclidiana promedio a caminos pavimentados.	IDE – Chile Disponible en http://www.ide.cl/download/capas.html
Distancia a ríos	Distancia euclidiana promedio a la red hídrica.	IDE – Chile Disponible en http://www.ide.cl/download/capas.html
Distancia a bosque nativo	Distancia euclidiana promedio a el bosque nativo.	Heilmayr et al (2016)
Distancia a plantaciones	Distancia euclidiana promedio a las plantaciones forestales.	Heilmayr et al (2016)
Distancia a terrenos agrícolas	Distancia euclidiana promedio a los terrenos agrícolas.	Heilmayr et al (2016)
Distancia a zonas urbanas	Distancia euclidiana a los principales centros urbanos.	Heilmayr et al (2016)
Presencia de plantaciones	Variable dicotómica, con valor igual a 1 para la presencia del uso de suelo forestal y valor 0 para los otros usos de suelo.	Heilmayr et al (2016)
Presencia de terrenos agrícolas	Variable dicotómica, con valor igual a 1 para la presencia del uso agrícola y valor 0 para los otros usos de suelo.	Heilmayr et al (2016)
Presencia de bosque nativo	Variable dicotómica, con valor igual a 1 para la presencia del uso de suelo correspondiente al bosque nativo y valor 0 para los otros usos de suelo.	Heilmayr et al (2016)

Pendientes	Variable correspondiente al resultado de la reclasificación del DEM.	Sensor Alos Palsar. Disponible en https://vertex.daac.asf.alaska.edu/
-------------------	--	---

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Cálculo de la vulnerabilidad hídrica

Para calcular la vulnerabilidad hídrica de la cuenca frente a un escenario de expansión foresta, se calculó un índice de vulnerabilidad (ec.11). Este índice fue utilizado por Espinoza (2011) para evaluar la vulnerabilidad de una cuenca frente a un escenario de expansión suelo agrícola para la cuenca del río Limarí.

Este índice de vulnerabilidad se compara la diferencia existente del caudal mensual histórico vs el caudal mensual obtenido en el escenario planteado en las distintas subcuencas del área de estudio. La clasificación empleada para categorizar este índice se encuentra recomendada por la Organización de Naciones Unidas (IDEAM, ONU, MDGIF, 2009), la cual corresponde a una adaptación de la metodología propuesta por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (IDEAM).

$$IV = \frac{(S - E)}{S} * 100 \quad \text{ec. 11}$$

Donde S corresponde al periodo de Línea de Base en donde se considerará el periodo con el uso de suelo actual de la cuenca (1995-2013); E son los valores de caudal obtenidos con el escenario de expansión forestal generado.

El índice obtenido por subcuenca representa la posición de cada área en función de la vulnerabilidad, los indicadores utilizados y su porcentaje para su evaluación se identifican en la Tabla 12.

Tabla 12: Categoría del índice de vulnerabilidad.

Categoría	Porcentaje	Significado
Bajo	< 10%	No se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico, en términos de cantidad de agua.
Moderado	10 - 20%	La disponibilidad de agua se puede convertir en un factor limitador del desarrollo. Se debe implementar un mejor sistema de monitoreo, desarrollar proyecciones de recurso a corto y largo plazo.
Medio	20 - 40%	La oferta hídrica llega al máximo para atender en forma adecuada la demanda hídrica. Es necesario el ordenamiento territorial de la cuenca e implementar corrección inmediata en la reglamentación de las corrientes y usos de agua. Es menester asignar prioridades a los distintos usos y prestar particular atención a los ecosistemas acuáticos para que reciban el aporte hídrico requerido para su existencia.
Alto	> 40%	Existe fuerte presión sobre el recurso hídrico, denota una urgencia máxima en intervenir y controlar la oferta y demanda. Es insuficiente la oferta hídrica para atender la demanda de agua por sectores productivos y se restringe el desarrollo económico. Se requiere fuerte inversión económica para mejorar la eficiencia del sistema en los sectores productivos y abastecimientos de agua potable.

Fuente: Espinoza, 2011.

La Figura 29 presenta el resumen de la metodología aplicada para el cálculo de la vulnerabilidad.

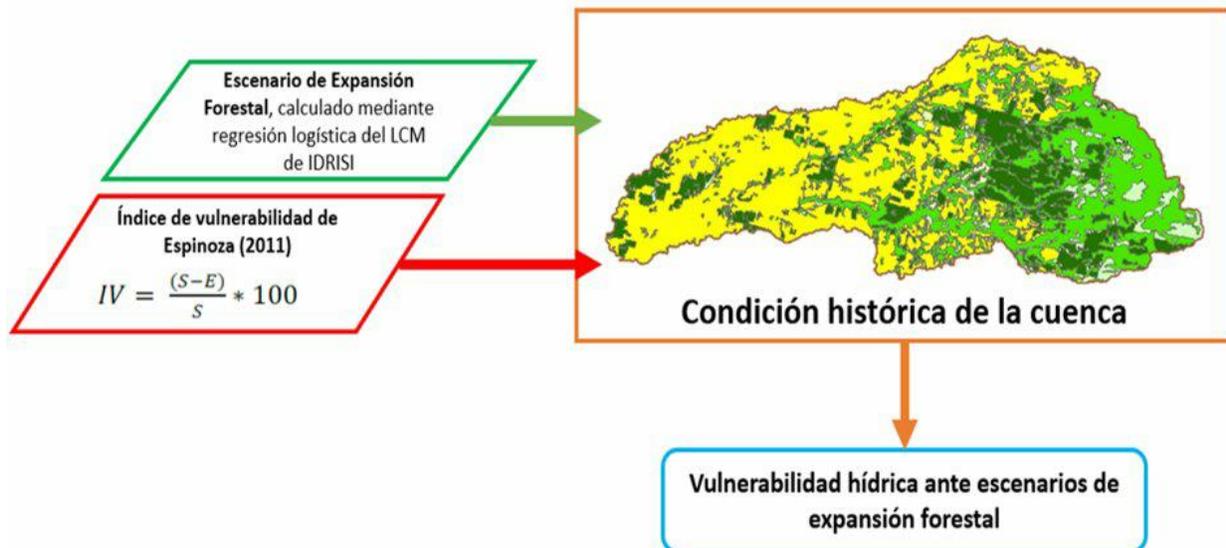


Figura 29: Metodología para el cálculo de la vulnerabilidad hídrica.

Fuente: Elaboración propia.

Para efectuar este estudio se contemplaron los siguientes supuestos:

- Los usos de suelo de la cuenca debieron ser agrupados y homologados a la base de datos del modelo SWAT, esto debido a que el modelo no incluye los usos de suelo locales.
- No se consideran las proyecciones de Cambio Climático para el área de estudio.
- No existen el otorgamiento de nuevos derechos de agua los cuales se encuentran disponibles en la red hidrométrica de la DGA.
- Para la expansión forestal al año 2041 se mantuvieron como constantes las variables de Distancia a Carreteras, Elevaciones, Pendientes, Distancias a Ríos.

5. RESULTADOS

5.1 Análisis de tendencia y homogeneidad

5.1.1 Precipitación

La Figura 31 muestra el comportamiento anual para la variable de precipitación junto a los diagramas de caja correspondientes que ilustran la variabilidad de los datos en el periodo de 1981 – 2016 para las series de datos de la DGA (específicamente en la estación Vilcun) y para la Base de Datos CHRIPS. Ambas series de datos presentan una tendencia decreciente, el estadístico S de ambas series así lo confirma (Figura 31), de igual forma los valores P muestran que las tendencias identificadas son significativas para un intervalo de confianza del 95%.

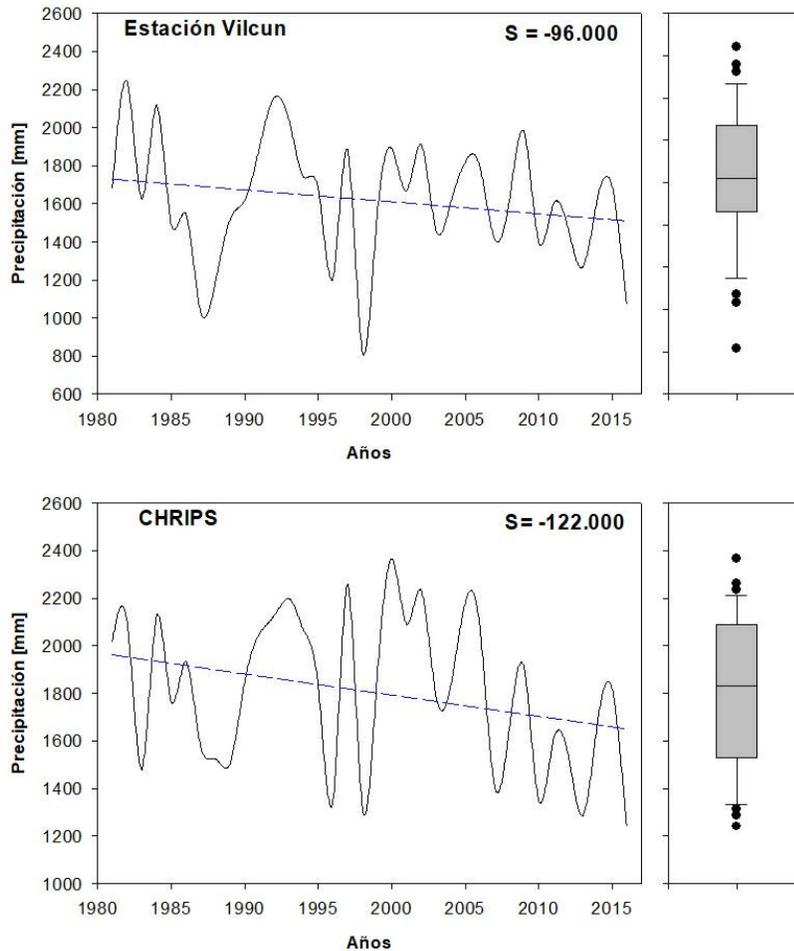


Figura 30: Tendencia y diagramas de cajas de la variable de precipitación.

Fuente: elaboración propia.

Los análisis de tendencia realizados de forma estacional para la estación Vilcún (Anexo 3), para las épocas de verano y otoño, se obtiene un valor S de -52.000, -124.000 respectivamente, lo que representa una tendencia significativa al decrecimiento. Por otro lado, la serie de datos correspondiente a la época de invierno, obtuvo un valor S de 127.000, cuyo valor representa una tendencia significativa al aumento. Sin embargo, para la serie de datos de la época de primavera, se obtuvo un valor S de -27.000 lo que representa una tendencia significativa al decrecimiento, sin embargo, el Valor de P es de 0,331 lo que es

mayor al alfa establecido para la prueba de Mann-Kendall por tanto se debe aceptar la hipótesis nula (la cual dice que no existe una tendencia en la serie).

Por su parte las tendencias de la base de datos CHRIPS realizado en forma estacional (Anexo 4) para las precipitaciones correspondientes a los periodos de verano y otoño se obtuvo un valor S de -107.000 y -119.000 respectivamente, estos valores representan una tendencia significativa al decrecimiento de la serie, de igual sus Valores-P son menores al alfa establecido y, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, existiendo de esta forma una tendencia en la serie al descenso. Por su parte las series de datos de invierno y primavera, sus valores S respectivamente fueron de 23.000, 16.000. Lo que significaría que las series tendrían una tendencia al aumento; pero comparando los Valores P de las series respectivas con el alfa, estos valores fueron mayor al nivel de significancia (0.272 y 0.721 respectivamente) y, por lo tanto, se debe de aceptar la hipótesis que no existe una tendencia en la serie de datos.

En la Figura 32 se ilustran las pruebas de homogeneidad realizadas, en ellas se ilustran que en ambas series de datos en forma anual no presentan un quiebre en sus datos si no que corresponden a series homogéneas.

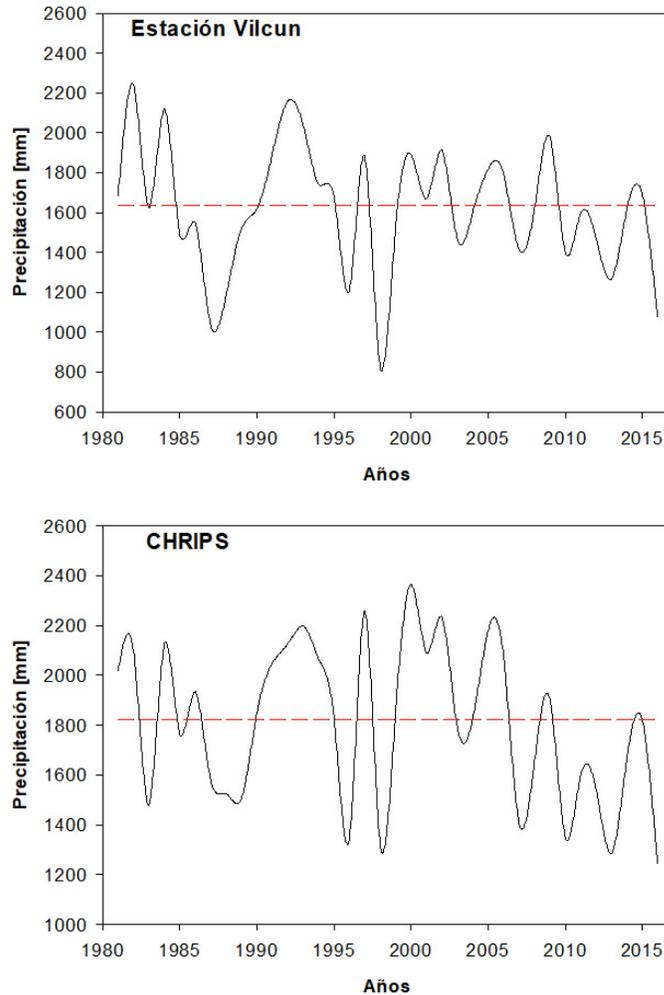


Figura 31: Prueba de homogeneidad para la variable de precipitación.

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte las pruebas de Pettit aplicadas a las 4 series de datos (tanto de la serie CHRIPS y DGA), se obtuvieron Valores-P mayores al nivel de significancia establecido y, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de la prueba, es decir, las series de datos corresponden a series homogéneas.

Realizando la comparación en los datos de precipitación obtenidos por la estación Vilcun de la DGA y la Base de Datos CHRIPS, se puede observar que 2 de las 4 series revisadas (verano y otoño), están representadas de buena forma por la Base

CHRIPS tomando como referencia los datos de la DGA, esto se evidencia a través de Zambrano et al (2017) quien comprobó que esta base de datos es la mejor para simular los datos de precipitación en el territorio nacional.

La Tabla 13 presenta un resumen de las pruebas estadísticas realizadas para la variable de precipitación.

Tabla 13: Resumen pruebas estadísticas datos de precipitación.

Prueba Serie/Estadístico	Mann-Kendall				Pettitt		
	S	P	Sen	Tendencia	T	P	Homogeneidad
Anual – DGA	-96	0,0003	-6,812	Si	2006	0,159	Si
Verano DGA	-52	0,071	-0,89	Si	1993	0,966	Si
Otoño DGA	-124	< 0,0001	-4,188	Si	2006	0,106	Si
Invierno DGA	127	< 0,0001	4,783	Si	1998	0,1474	Si
Primavera DGA	-27	0,331	-0,718	No	1990	0,6904	Si
Anual CHRIPS	-122	0,005	-9,731	Si	1984	0,5262	Si
Verano CHRIPS	-107	< 0,0001	-3,474	Si	1993	0,9624	Si
Otoño CHRIPS	-119	0,001	-11,83	Si	2006	0,1068	Si
Invierno CHRIPS	23	0,272	0,809	No	1998	0,1446	Si
Primavera CHRIPS	16	0,721	0,71	No	1990	0,6826	Si

Fuente: Elaboración propia a partir de Xlstat.

5.1.2 Caudal

La Figura 33 muestra el comportamiento anual para la variable de caudal junto al diagrama de caja correspondiente que ilustra la variabilidad de los datos en el periodo de 1981 – 2017 para las series de datos de la estación fluviométrica río Muco en puente Muco. La serie a primera vista presenta una tendencia negativa siendo confirmada por el estadístico S (Figura 33), sin embargo, valores P muestran que la tendencia identificada no es significativa para un intervalo de confianza del 90%.

La prueba de homogeneidad realizada a la serie de datos (Figura 33 – b) en forma anual presenta un valor t de 1995, lo que significaría que en ese año la serie de datos sufre un cambio en los datos y que no es una serie homogénea, siendo esto confirmado por el valor p obtenido en esta prueba para un valor de significancia del 95%.

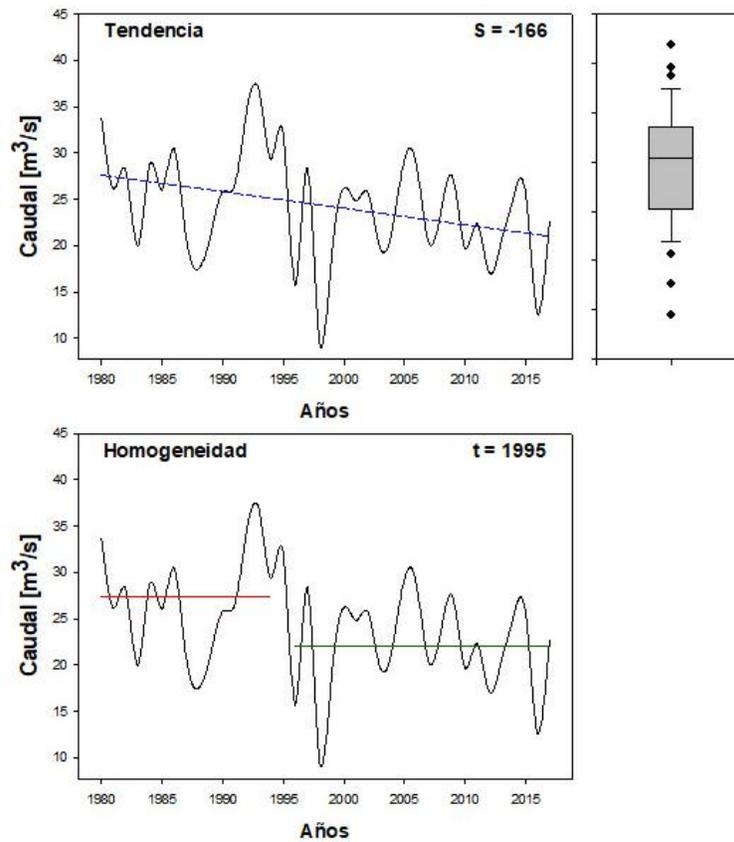


Figura 32: Tendencia y Homogeneidad caudal.

Fuente: Elaboración propia en Xlstat.

Los análisis de tendencia realizados en forma estacional (Anexo 5), se puede observar qué en las series de datos de verano y otoño, los valores obtenidos fueron respectivamente -94 y -209, significando que ambas series presentan una tendencia

al descenso en los datos, esto igual es apoyado por los Valores-P, los cuales son menores al valor alfa establecido para este análisis.

Por su parte la serie de caudales correspondientes al invierno, presenta un valor S de 55, el cual representa una tendencia positiva, esto igual se ve apoyado por el Valor-P el cual tiene de 0,024 y debido a que es mejor al nivel de significancia se rechaza la hipótesis nula.

La última serie de caudales analizada corresponde a la del periodo de primavera, cuyo valor S corresponde a -33 lo que a primera impresión sería una tendencia negativa; pero debido a que el Valor-P obtenido para esta serie de datos es menor al nivel es mayor al nivel de significancia debido a esto es que no existe una tendencia en la serie de datos.

De las pruebas de homogeneidad aplicadas, se puede observar que 3 de las 4 series (verano, invierno y primavera) son completamente homogéneas, mientras que la serie correspondiente a otoño presenta un Valor-P de 0.030 el cual es menor al valor de significancia aplicado en la prueba de Pettit, significando que existe un año en el que hay un quiebre en la serie, para este caso corresponde al año 1997, en ambas tendencias (1980-1996 y 1997-2015) se presentan dos tendencias de negativas.

Las series de caudales revisadas presentan las mismas tendencias que las series de precipitación de la estación Vilcun, siendo las series que presentaban una tendencia las mismas en ambas (verano, otoño e invierno), siendo verano y otoño

tendencias negativas e invierno presentando una tendencia positiva, de igual forma la serie de primavera en ambos casos no presentan tendencia en sus datos.

La Tabla 14 presenta el resumen de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt, a las cuales se aplicó para los datos de caudal de la estación río Muco en puente Muco.

Tabla 14: Resumen pruebas estadísticas datos de caudal.

Prueba Serie/Estadístico	Mann-Kendall				Pettitt		
	S	P	Sen	Tendencia	T	P	Homogeneidad
Anual	-166	0.14	-0.178	No	1995	0.045	No
Verano	-94	0,003	-0.021	Si	2007	0.454	SI
Otoño	-209	<0,0001	-0.506	Si	1997	0.030	NO
Invierno	55	0,024	0.096	Si	2004	0.783	SI
Primavera	-33	0,269	-0.051	No	1994	0.546	SI

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Calibración y validación del modelo hidrológico

5.2.1 Calibración

El análisis de sensibilidad implementado para la calibración del modelo en base a los distintos parámetros obtenidos por literatura (Tabla 9), arrojó una combinación de 8 parámetros que son los más sensibles ($P\text{-value} \leq 0,5$) para la modelación de flujo en el área de estudio (Figura 34).

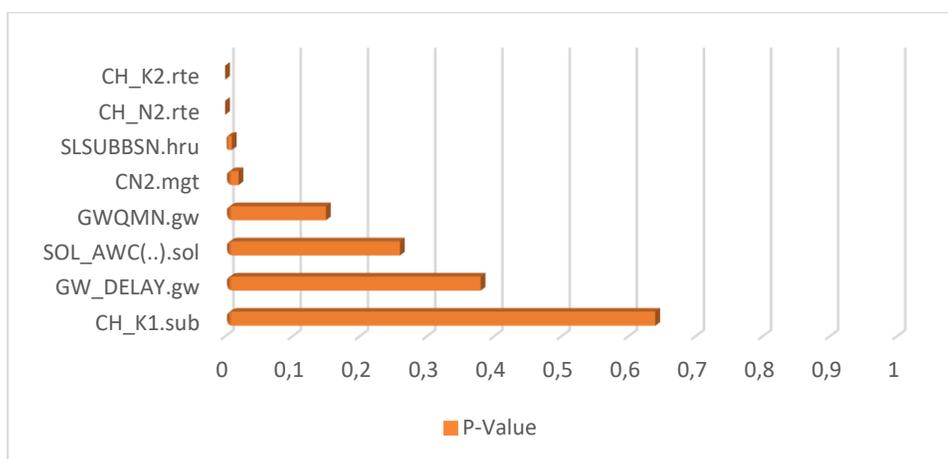


Figura 33: Análisis de sensibilidad de los parámetros con influencia en el modelo.

Fuente: Elaboración propia a partir de SWATCUP (2019).

Se encontró una gran sensibilidad en los que tienen relación con el cauce principal (CH_K2, CH_N2), siendo con el primero el más sensible el parámetro relacionado con la conductividad hidráulica efectiva del aluvión en el cauce principal, la cual es utilizada por el modelo para calcular las tasas de pérdidas por trasmisión, el segundo parámetro más sensible corresponde al CH_N2 (correspondiente al) el cual posee relevancia al momento de calcular. El tercer parámetro más sensible corresponde a la longitud promedio de la pendiente (SLSUBBSN), el cual también

se relaciona con la cantidad de flujo generado y el tiempo de concentración. (Cibin et al., 2010). Como cuarto parámetro más sensible de encuentra la curva número (CN2) el cual determina la escorrentía y, por lo tanto, posee una influencia directa en la cantidad de flujo generado en cada URH. Se encontró sensibilidad en los parámetros de aguas subterránea (GWQMN.gw, GW_Delay.gw) ya que estos parámetros poseen influencia sobre los niveles de recarga del acuífero superficial y subterráneo influyendo, por lo tanto, en la modelación del flujo base de escorrentía, en este caso para la modelación en la cuenca del río Muco estos parámetros se incrementaron aumentando el flujo superficial, disminuyendo así el flujo subterráneo. Como último parámetro más sensible se destaca el parámetro Sol_AWC el cual tiene relación con la cantidad de agua disponible en el suelo, lo que significa que influye en el proceso de infiltración para cada subcuenca, esto debido a que el aumento de este parámetro está relacionado con una mayor evapotranspiración del suelo, para este estudio se decide aumentar en 2.0 (200%) con el fin de reducir la sobreestimación de los caudales.

La tabla 15 muestra el valor final de los parámetros modificados durante el proceso de calibración.

Tabla 15: Parámetros de SWAT modificados durante la calibración.

Parámetro	Método	Modificación
GWQMN	Reemplazo	2890,25
GW_DELAY	Reemplazo	7,47
SLSUBBSN	Reemplazo	21,35
CH_K1	Reemplazo	49,57
CH_N2	Reemplazo	0,01
CH_K2	Reemplazo	15,36
CN2	Porcentaje	CN2i * 0,7
SOL_AWC	Porcentaje	SOL_AWCi * 2,0

Fuente: Elaboración Propia.

La tabla 16 muestra los valores de los indicadores de bondad de ajuste para el punto de control del modelo calibrado y validado, se destaca que para el periodo de calibración (2005 – 2008) los indicadores muestran un “Muy Buen” desempeño del modelo. El valor del KGE indica que el modelo puede reproducir satisfactoriamente a variabilidad y temporalidad de la serie de caudales, mientras que el R2 indica que los datos simulados por el modelo poseen una buena capacidad predictiva. En el caso del PBIAS este posee un valor positivo lo que indica una sobrestimación de los valores de caudal.

La Figura 35 muestra la serie de caudales simulados y observados para el periodo de donde se puede apreciar que los caudales simulados representan de buena forma los caudales base, caudales medios y tiempos de concentración, se presentan una leve sobreestimación en los caudales peak, principalmente en los años 2005 y 2006.

Tabla 16: Valores de los indicadores de bondad de ajuste para calibración y validación.

		Calibración		Validación	
		Valor	Desempeño	Valor	Desempeño
Sub 90	R ²	0,84		0,73	Bueno
	KGE	0,83	Muy Bueno	0,78	Muy Bueno
	PBIAS (%)	+9,3		-5,7	

Fuente: Elaboración propia.

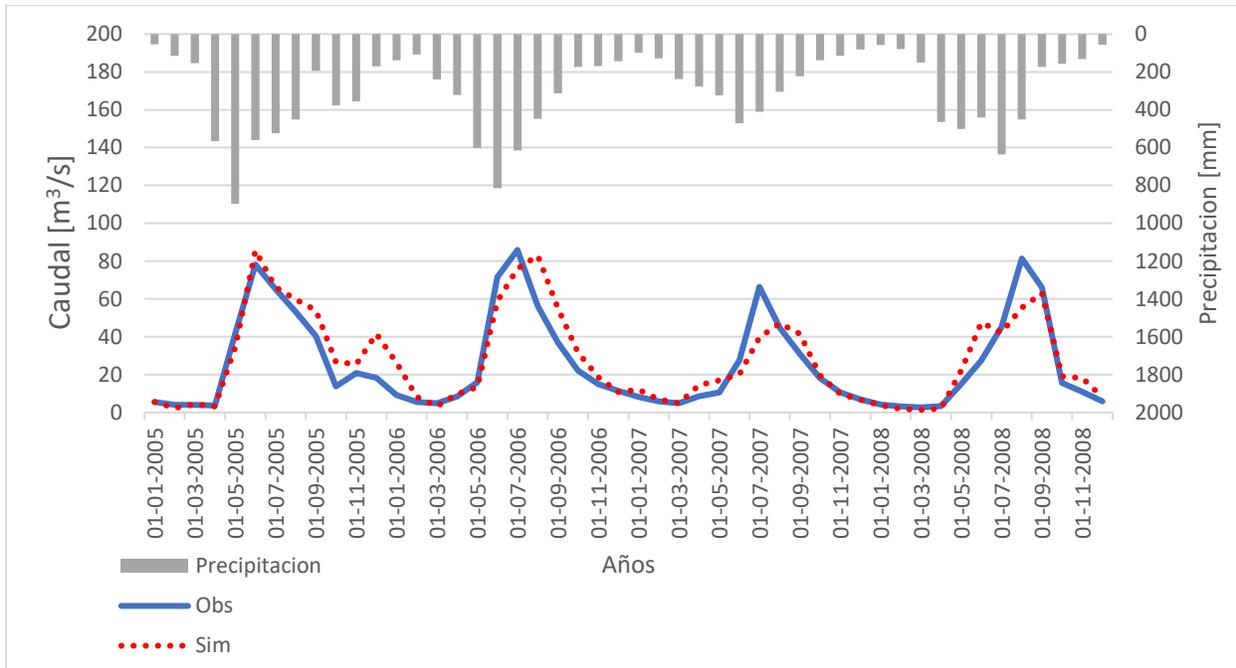


Figura 34: Serie de caudales para el periodo de calibración.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Validación

En el caso del periodo de validación (2009 - 2013), el desempeño del modelo es de “Bueno” y “Muy Bueno” dependiendo del indicador, el R^2 indica que los datos simulados poseen una buena capacidad predictiva. El valor obtenido para el KGE en este periodo indica que el modelo puede reproducir satisfactoriamente a variabilidad y temporalidad de la serie de caudales. En el caso del PBIAS se obtiene un valor negativo, sugiere que existe una subestimación de los datos simulados en relación a los datos observados esto se traduce o que se debe principalmente a la que base de datos de precipitación (CHRIPS) subestima los máximos de precipitación caída, lo que se traduce en la incapacidad del modelo para generar los

peak de escorrentía reales, además según Borah & Bera, 2003 y Borah et al., 2007 el modelo SWAT posee poca capacidad para predecir los caudales máximos.

La Figura 36 muestra la serie de caudales simulados y observados, se aprecia que el modelo al igual que para el periodo de calibración pudo reproducir de buena forma los caudales base, caudales medios y tiempos de concentración, no pudiendo llegar a los máximos de escorrentía, principalmente en los años 2011 y 2013, sin embargo, la subestimación es menor en comparación al periodo de calibración.

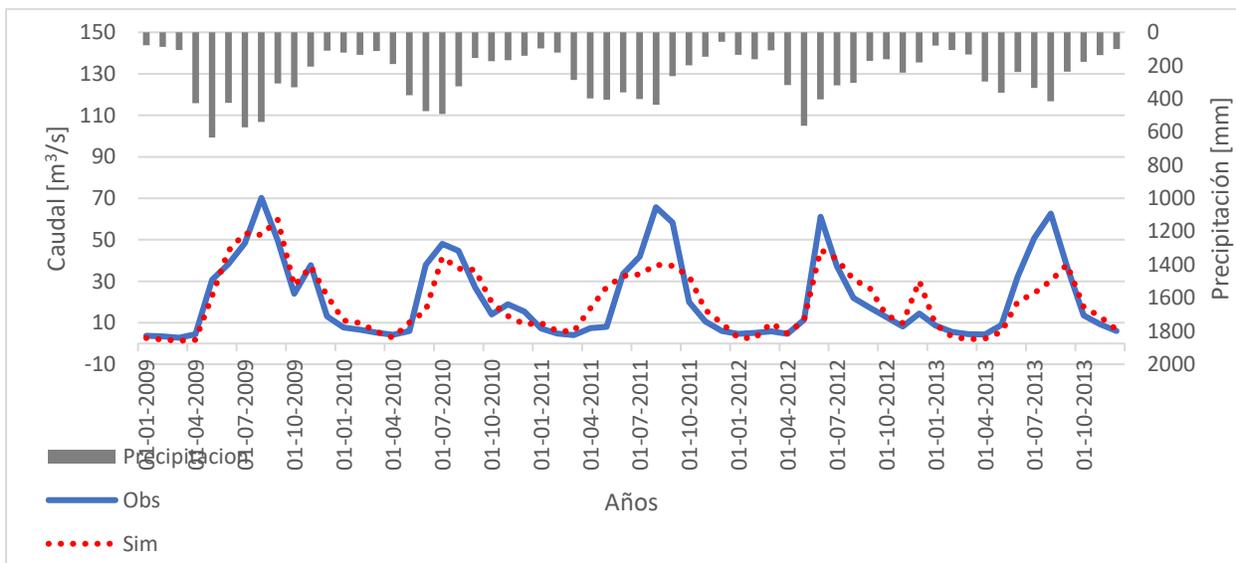


Figura 35: Serie de caudales para el periodo de validación.

Fuente: Elaboración propia.

5.3 Escenarios de expansión forestal

5.3.1 Análisis y cuantificación de cambios en la cuenca

Al cuantificar los cambios ocurridos en el uso de suelo entre el periodo 1984-2001 (Tabla 18), se puede observar un aumento en las coberturas de plantaciones forestales (6%) y en los terrenos agrícolas (aumento de 7%) siendo esta última la segunda mayor cobertura en ambos periodos (pasando de un 21% en el año 1986 a un 28% en el año 2001). Por su parte los matorrales y praderas presentaron una disminución de un 3% en sus coberturas, lo que puede entender que estos usos de suelo hayan dado paso a las plantaciones forestales y terrenos agrícolas. El bosque nativo sufrió una disminución de un 10%

Tabla 17: Variación temporal de los usos de suelo presentes en la cuenca (1986 - 2001).

Usos de suelo	1986		2001		% de cambio
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	
Terrenos Agrícolas	13.360,06	21%	18.309,54	28%	+7%
Bosque Nativo	31.369,10	48%	25.073,74	38%	-10%
Plantaciones Forestales	572,13	1%	4.858,33	7%	+6%
Matorrales	10.063,16	15%	8.424,8	13%	-2%
Praderas	8.935,64	14%	7.090,2	11%	-3%
Centros urbanos	0,01	0%	0,23	0%	0%

Fuente: Elaboración propia a partir de las capas generadas por Heymair et al (2016).

Se aprecia también que durante el periodo de análisis de las coberturas (15 años aproximadamente) el uso de suelo ocupado por distintos centros urbanos sufrió un leve incremento en su área, evidencian que la zona de estudio corresponde a una cuenca con un desarrollo forestal y agrícola por sobre el aumento de industrias o crecimiento urbano.

5.3.2 Factores forzantes del cambio de uso de suelo y modelo de regresión logística

Los parámetros de regresión logística $\beta(i)$ determinan cuales variables proporcionan el aumento (signo + en el parámetro) o lo restringen (signo – en el parámetro) el avance del uso de suelo de tipo forestal. Se puede observar en la Tabla 19 que el avance de las plantaciones forestales se encuentra fuertemente determinado por la Pendiente, Distancia al Bosque Nativo, Presencia de Bosque Nativo, Distancia a centros urbanos y la Presencia de Terrenos Agrícolas.

El avance de las plantaciones forestales se encuentra limitado principalmente por las variables de elevación ($\beta(i) = - 0,00258079$), esto debido a que a mayores alturas se restringe el establecimiento de plantaciones forestales (Aguayo et al., 2016), de igual manera la distancia al bosque nativo es la segunda variable que limita el avance de las plantaciones, esto se relaciona a la explicación de la variable de elevación, debido a que a mayor altura es más difícil el poblamiento de plantaciones nativas.

Por su parte la variable de Presencia de Bosque Nativo ($\beta(i) = 16,12272000$) es la que favorece la expansión forestal esto debido a que ofrecen condiciones de sitio favorables para su establecimiento; principalmente, un suelo de aptitud preferentemente forestal (Aguayo et al., 2016), Por otra parte, los parámetros de distancia demuestran que la actividad forestal se desarrolla cerca de plantaciones previamente establecidas debido a que estas áreas presentan facilidades de infraestructura básica tales como caminos y centros de acopio (Aguayo et al., 2016; Mellado, 2019).

Tabla 18: Parámetros de la regresión logística ajustados para la expansión forestal (**= P<0,01).

Variables	$\beta(i)$	Error estándar	Wald a)	P
Elevaciones	-0,00258079	0,002	0,949	0,330
Pendiente	0,08444837	0,0266	10,070	**
Distancia al bosque nativo	-0,00702084	0,0017	16,411	**
Presencia de bosque nativo	16,12272000	3,721	18,778	**
Distancia plantaciones forestales	0,00043447	0,0003	1,826	0,177
Presencia plantaciones forestales	0,68309854	10,660	0,004	0,949
Distancia Terrenos Agrícolas	0,00635709	0,0042	2,229	0,135
Presencia terrenos agrícolas	11,52320796	3,941	8,548	**
Distancia a ríos	0,00029646	0,0002	1,413	0,235
Distancia a caminos	0,00049103	0,0002	5,206	0,023
Distancia centros urbanos	-0,00017945	4×10^{-5}	18,727	**

Fuente: Elaboración propia, a partir de Xlstat (2019).

5.3.3 Futuros escenarios de expansión forestal

Los cambios ocurridos en el periodo 1984-2001 y la regresión logística permitieron la proyección del uso de suelo forestal hacia el año 2041 (Figura X). La Tabla 20 muestra el cambio histórico y futuro en los usos de suelo. Se puede apreciar que las plantaciones forestales aumentan de un 1% al año 1986 a un 14% al año 2011 y alcanzando a cubrir un 22% de la cuenca al año 2041. Este aumento de las plantaciones se produce por la disminución de algunos usos de suelo principalmente de los Terrenos agrícolas los cuales al año 2011 abarcaban un 28% y disminuyen a un 26% en el 2041, de igual forma los matorrales pasan de ocupar un 8% a un 5% de la cuenca. Diversos usos de suelo también disminuyen en menor medida pasando de un 15% a un 12%.

Tabla 19: Cambio en la superficie (ha) de los principales usos de suelo.

	1986		2001		2011		2041	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Terrenos Agrícolas	13.360,06	21%	18.309,54	28%	18.028,4	28%	16.710,70	26%
Bosque Nativo	31.369,10	48%	25.073,74	38%	22.842,3	35%	22.920,90	35%
Plantaciones Forestales	572,13	1%	4.858,33	7%	8.923,47	14%	14.444,50	22%
Matorrales	10.063,16	15%	8.424,8	13%	5.326,73	8%	3.183,68	5%
Otros Usos	8.935,74	14%	7.090,43	11%	9.704,52	15%	7.885,91	12%

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 36 muestra la distribución temporal de las coberturas de suelo donde se puede apreciar que las plantaciones forestales pasan de poblar un total de 8.923,47 ha al año 2011 a un total de 14.444,50 ha, con una ganancia neta de 5.521,03 ha al año 2041.

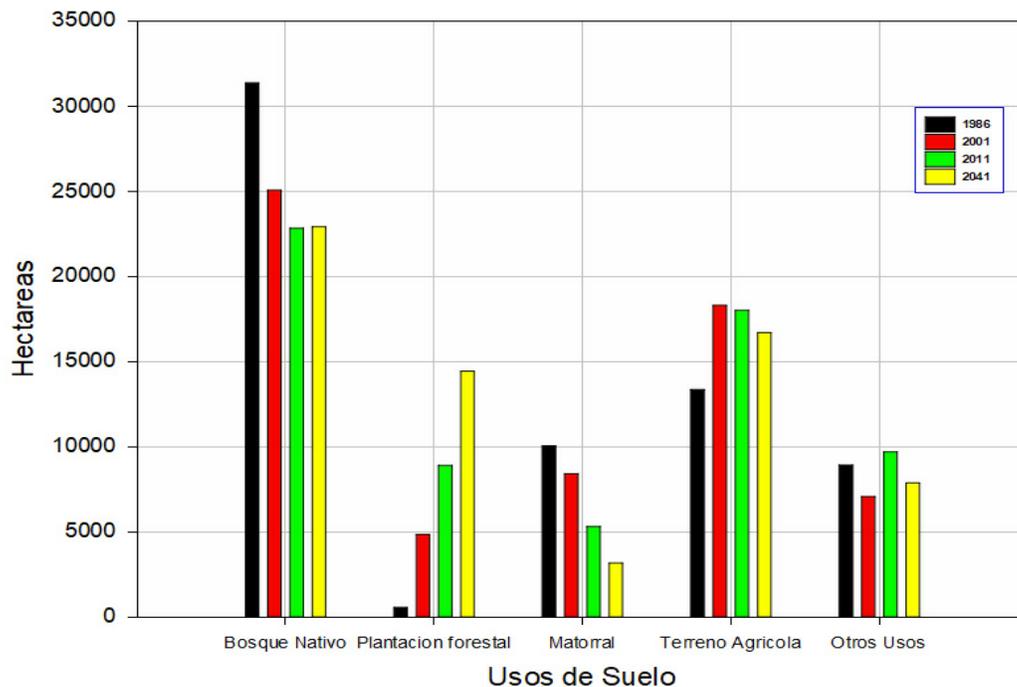


Figura 36: Variación temporal de los usos de suelo para los años 1986, 2001, 2011, 2041.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en las Figuras 36 y 37 que los usos de suelo de terrenos agrícolas y matorrales son las principales coberturas reemplazadas por plantaciones forestales en una menor medida las coberturas agrupadas en otros usos (praderas, cuerpos de agua, suelo urbano). La cobertura con una mayor presencia en los años 1986, 2001, 2011 corresponde al bosque nativo, esta misma cobertura es la de mayor presencia en el año 2041 esto debido a que se trabajó bajo la Ley N° 20.283 del Ministerio de Agricultura en donde se prohíbe el reemplazo de especies nativas por plantaciones exóticas.

De igual forma se puede apreciar en la Figura 37 que el modelo regresión logística utilizado para la expansión del uso de suelo forestal logra reproducir la dinámica de cambio de suelo que presento entre los periodos 2001-2011.

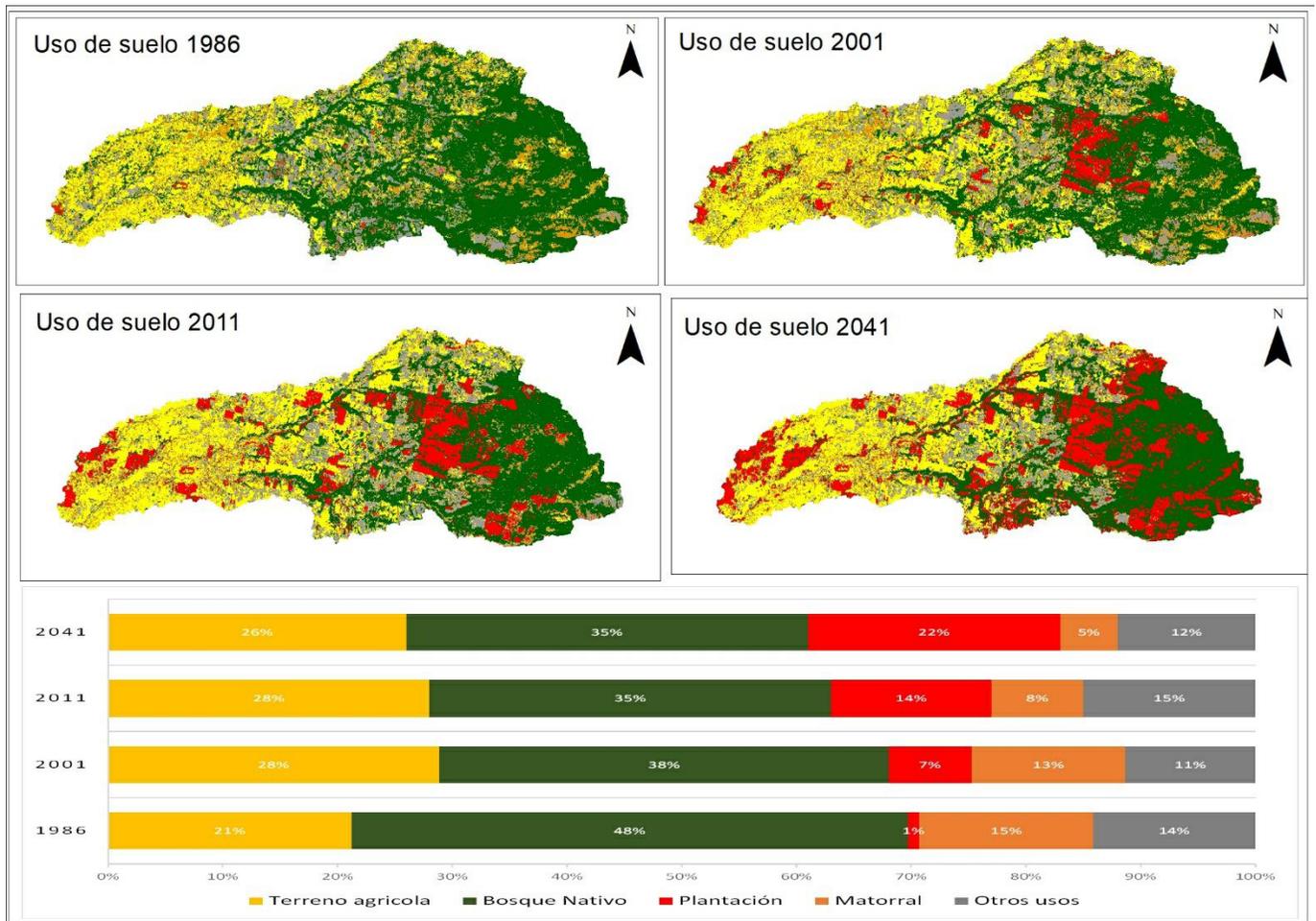


Figura 37: Distribución espacial de los usos de suelo.

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Vulnerabilidad Hídrica de la cuenca

5.4.1 Efectos temporales y espaciales de una expansión forestal en los caudales futuros de la cuenca

Al realizar una comparación de los caudales en el periodo de línea base (2000-2013) v/s los caudales futuros (2014-2043) bajo el escenario de una expansión forestal se presentan variaciones espaciales en toda la cuenca. Las principales reducciones de caudal se presentan en la parte media y baja de la cuenca (color más oscuro), además del estero el tambor, parte centro sur de la cuenca. Por su parte en la zona alta (nacimientto del río Muco) no se prevén importantes reducciones de caudal, debido a que el avance del uso de suelo forestal no logró poblar esos sectores, por ende, se mantuvo el uso de suelo correspondiente al bosque nativo, el cual posee una correlación positiva en cuanto a su presencia y la producción hídrica. (Lara et al., 2009).

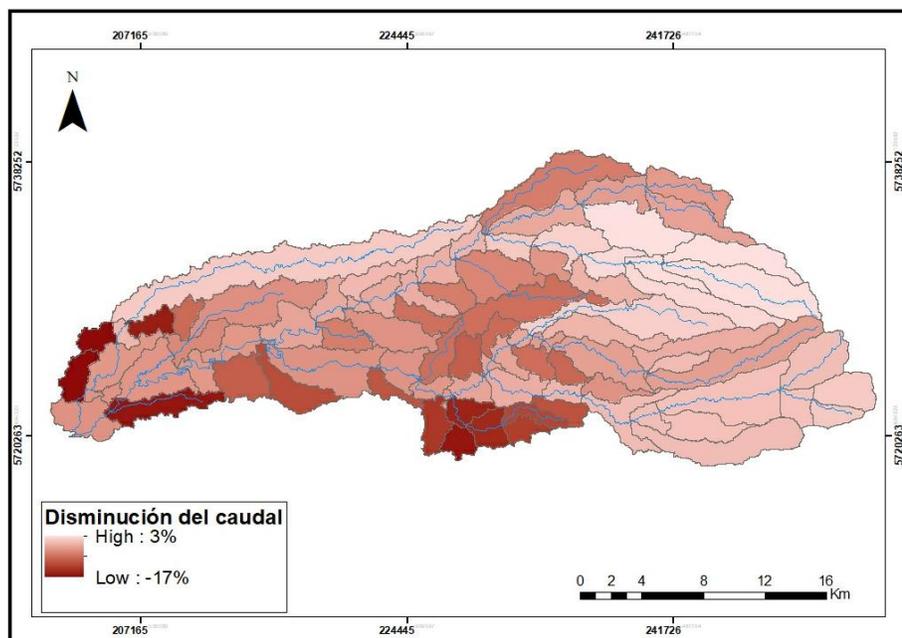


Figura 38: Variación espacial del caudal medio, considerando escenario de expansión forestal.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 39 muestra la variación estacional del caudal provocada por la expansión del uso de suelo forestal, medidas en la estación fluviométrica Río Muco en puente Muco. (Subcuenca 90). La reducción anual es un 1%, en el caso estacional la reducción de las estaciones de invierno y primavera es de un 9% y 10% respectivamente, mientras que se puede observar que la mayor reducción ocurre en los meses de verano en los cuales alcanza un 16%, siendo esto producido a que estos meses son los de mayor estiaje dentro de la zona de estudio.

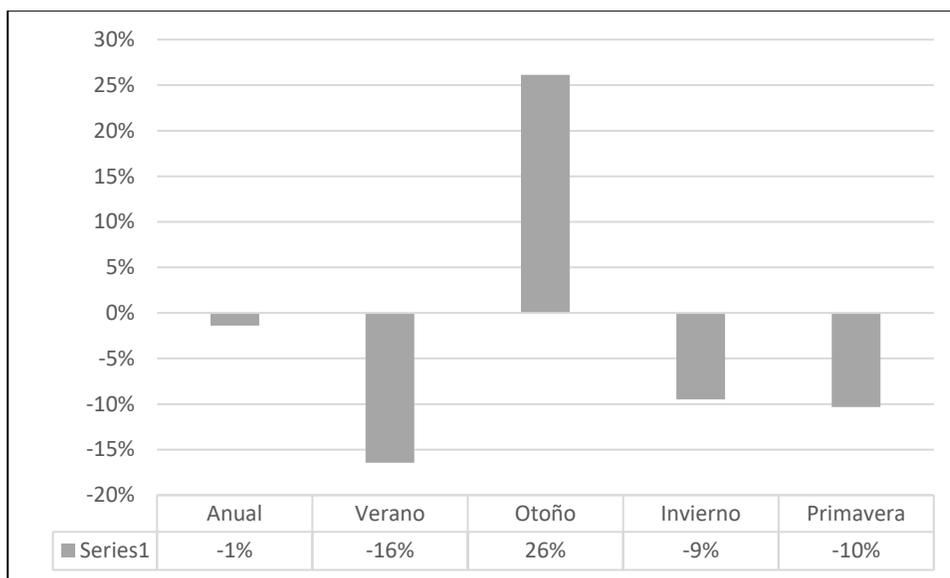


Figura 39: Variación estacional del caudal.

Fuente: elaboración propia.

Al cuantificar las variaciones de los percentiles (Tabla 20) para la estación fluviométrica, la mayor reducción recae sobre los percentiles bajos (P5, P10, P15), con una variación que va desde un -0,90 a un -7,84 afectando así los caudales medios mensuales que poseen un porcentaje de excedencia de un 80% y 90%, estos caudales corresponden a los más frecuentes en los periodos de estiaje. Caso

contrario se presenta en los percentiles correspondientes a los caudales medios (P50 – P60) donde se aprecia que existirá un aumento en la disponibilidad hídrica de hasta un 3%.

Tabla 20: Percentiles y porcentaje de variación.

Percentil	% de Variación
P5	-1.76
P10	-7.84
P15	-0.90
P20	-2.03
P25	-1.41
P30	-4.31
P35	-2.59
P40	0.03
P45	-2.19
P50	0.14
P55	3.23
P60	3.01
P65	-4.05
P70	-6.32
P75	-1.93
P80	-1.88
P85	-3.41
P90	-0.26
P95	2.43

Fuente: Elaboración propia.

Esta reducción cuantificada en los percentiles más bajos es consistente con lo mencionado por Little et al., 2009, Huber et al., 2010 y Mellado, 2019 quienes han evidenciado que el efecto de las plantaciones forestales sobre la disponibilidad de agua recae principalmente a los caudales mínimos, generando déficit hídrico en épocas estivales.

5.4.2 Vulnerabilidad hídrica de la cuenca

La vulnerabilidad hídrica de la cuenca del río Muco ante la expansión de uso de suelo forestal en distintas zonas de ésta, la Figura 40 muestra la distribución espacial de los índices de vulnerabilidad por subcuenca, que la mayor vulnerabilidad al año 2041 se aprecia en la parte baja y media de cuenca (mismas zonas con mayor reducción de caudal) donde la mayor vulnerabilidad se presenta en la zona perteneciente al estero el tambor.

Por su parte la zona alta de la cuenca presenta índices de vulnerabilidad menores a 0% esto debido a que esa zona no presenta una disminución de caudal, sino que presenta una presencia constante del bosque nativo.

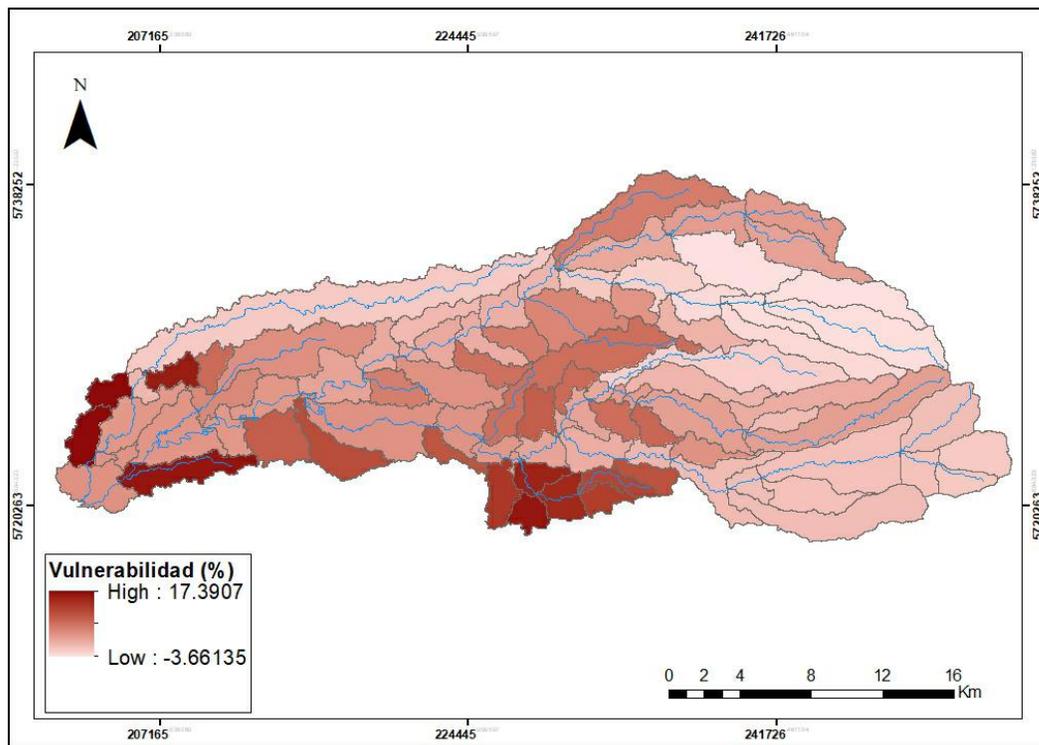


Figura 40: Vulnerabilidad hídrica espacial ante un escenario de expansión forestal.

Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 42 presenta las categorías de los índices de vulnerabilidad propuestos por Espinosa et al, 2011 (Tabla 12) donde se aprecia que la gran mayoría de las subcuencas presentan una categoría de bajo (<10%), 4 subcuencas presentan una categoría moderada, esto quiere decir, que la disponibilidad del recurso hídrico se puede convertir en un factor limitador del desarrollo sea de tipo humano o productivo.

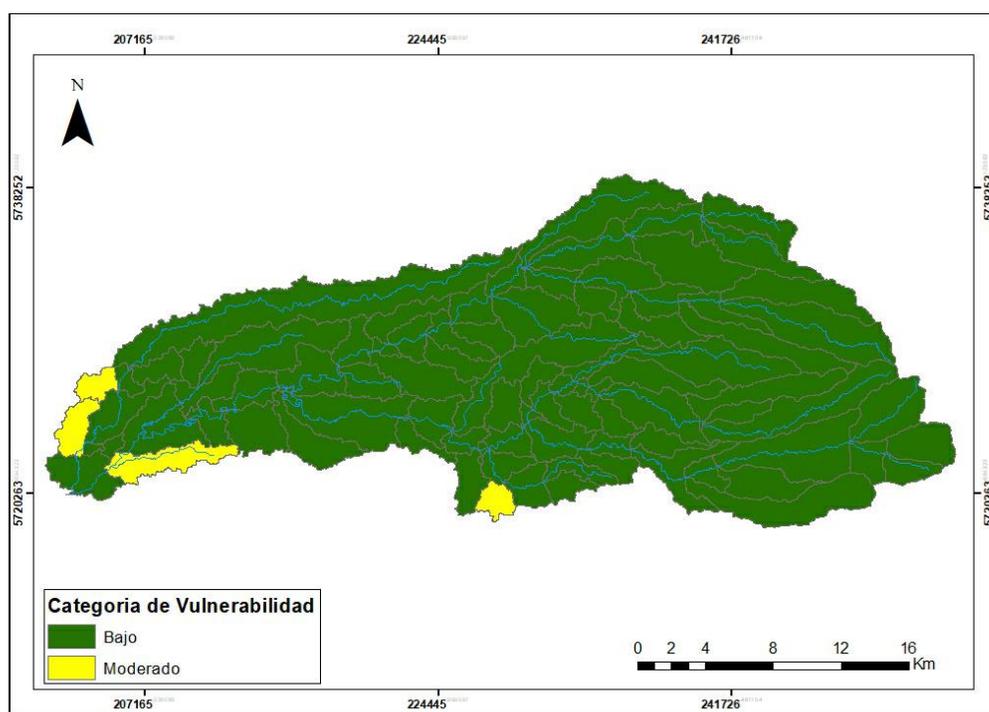


Figura 41: Categoría de Vulnerabilidad por subcuenca.

Fuente: Elaboración propia.

Por esta razón si se asume que la variabilidad climática durante el periodo 1986-2013 se mantendría similar al periodo 2014-2043 con el incremento de superficie de Plantaciones Forestales en un 8%, algunas modalidades de producción y desarrollo tienen el potencial de aumentar la vulnerabilidad. Por esta razón se necesitan medidas de corrección para que el desarrollo sostenible pueda contribuir a reducir

esa vulnerabilidad. Sin embargo, es importante señalar que el tiempo de adaptación de un sistema a nuevas condiciones será mayor si las medidas de corrección son pausadas, la rapidez con que el sistema pueda reaccionar, puede considerarse como una medida de capacidad adaptativa, un caso extremo se considera cuando el sistema no puede adaptarse o las medidas correctivas tardaron mucho tiempo, por lo cual, todo el sistema tenga que cambiar o definitivamente extinguirse. (Conde 2003).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizaron los análisis de tendencia en 3 series de datos (Precipitación estación Vilcun DGA, Precipitación base de datos CHRIPS, Caudal estación río Muco en puente Muco), en donde se apreció que las 3 series presentan una tendencia decreciente, mientras que en las pruebas de homogeneidad realizadas los datos de precipitación resultan ser series homogéneas, por su lado los datos de caudal presentan un quiebre en su serie ocurriendo este cambio en el año 1995.

Se calibró y validó el modelo hidrológico Swat en base a los caudales medio mensuales, utilizando la cobertura de Heilmeyer et al. (2016) al año 2011 para la cuenca del río Muco, obteniendo un desempeño Bueno y Muy Bueno, para los periodos de calibración y validación. Esto indica que el modelo logra reproducir la serie de caudales y su variabilidad, transformándose así el modelo SWAT en una herramienta útil al momento de simular los caudales utilizando capas elaboradas a partir de imágenes satelitales.

Utilizando una metodología de muestreo y un análisis estadístico con el software Xlstat se logró generar un escenario de expansión forestal al año 2041, utilizando el análisis de los cambios ocurridos para el periodo 1986-2001. A través del modelo de regresión logística se estimaron los factores forzantes del cambio (variables independientes) que poseían influencia en la expansión de las plantaciones forestales, en donde las variables de Presencias (Bosque Nativo, Plantaciones forestales y Terrenos agrícolas), siendo los terrenos agrícolas y las praderas los principales usos de suelo que fueron reemplazados por las plantaciones forestales. Por otro lado, la distancia al bosque nativo junto a las elevaciones son las principales

variables que restringen el avance de las plantaciones forestales en la cuenca del río Muco.

Con la expansión forestal al año 2041 el caudal medio mensual sufrirá una variación de hasta un 1,3% a la salida de la cuenca, estacionalmente en verano (meses más secos) se produciría la mayor disminución con un 10%, especialmente las mayores reducciones de caudal se producen en la parte media de la cuenca con un 17%, principalmente en el estero el Tambor. Debido a esto la serie de caudales medios mensuales para la cuenca se verá afectado principalmente en los percentiles 5, 10, 15 siendo la mayor reducción en el percentil 10 con un valor de 7,84%.

En los análisis de vulnerabilidad la cuenca no sufre grandes aumentos en su categoría de vulnerabilidad, siendo la mayor clasificación de Moderada en 4 subcuencas ubicadas en la parte media de la cuenca, esto quiere decir que es necesario de tomar medidas de precaución porque el recurso hídrico se puede convertir en un limitante del desarrollo tanto humano como productivo.

Recomendaciones para trabajos futuros:

- Incluir en los análisis de vulnerabilidad los escenarios posibles de cambio climático, considerando la reducción de la precipitación como el aumento de la temperatura.
- Realizar una combinación de las bases de datos climáticas utilizadas en la modelación (CHRIPS y CFSR) con los datos locales de las estaciones meteorológicas de la DGA con el fin que las subestimaciones de los máximos de precipitación y mínimos de temperatura sean menores, con el fin de

mejorar la capacidad del modelo Swat para la predicción de los caudales máximos.

- Se recomienda realizar una modelación de cambio de uso de suelo considerando factores de protección del bosque nativo, para realizar una comparación entre ambos escenarios.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaspour, K., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*.
- Abraham, E. (20028). Asociación española de ecología terrestre, tierras secas, desertificación y recursos hídricos. *Ecosistemas*.
- Agricultura, M. d. (1974). *Decreto de Ley 701*. Santiago, Chile.
- Aguayo, M., Wiegand, T., Azócar, G., Wiegand, K., & Vega, C. (2007). Revealing the Driving Forces of Mid-Cities Urban Growth Patterns Using Spatial Modeling: a Case Study of Los Ángeles, Chile. *Ecology and Society*.
- Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G., & Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*.
- Aguayo, M., Stehr, A., & Link, O. (2016). Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala frente a futuros escenarios de expansión forestal. *Revista de Geografía Norte Grande*.
- Alarcón Martínez, P. (2014). *Análisis comparativo de caudales en micro-cuencas con bosque nativo y plantaciones forestales de Pinus radiata y Eucalyptus globulus en la cordillera de Nahuelbuta, región del Biobío*. Universidad de Concepción.
- Álvarez-Garretón, C., Lara, A., Boisier, J., & Galleguillos, M. (2019). The Impacts of Native Forests and Forest Plantations on Water Supply in Chile. *Forests*.
- Armesto, J., Manuschevich, D., Mora, A., Smith-Ramirez, C., Rozzi, R., Abarzúa, A., & Marquet, P. (2010). From the Holocene to the Anthropocene: A historical framework for land cover change in southwestern South America in the past 15,000 years. *Land Use Policy*.
- Arnold, J., & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*.
- Arnold, J., Allen, P., Volk, M., Williams, J., & Bosch, D. (2010). Assessment of different representations of spatial variability on SWAT model performance. *Trans. ASABE*.
- Beven, K., Kirkby, M., & Schofield, N. (1984). Prueba de un modelo de pronóstico de inundaciones con base física (modelo) para tres captaciones del Reino Unido. *Revista de Hidrología*.

- Borah, D., & Bera, M. (2003). *Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases*. Trans. ASAE.
- Borah, D., Arnold, J., Modeling, B., Krug, C., & Liang, X. (2007). *Storm Event and Continuous Hydrologic Modeling for Comprehensive and Efficient Watershed Simulations Storm Event and Continuous Hydrologic Modeling*.
- Chow, V. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Series in Water Resources.
- Cibin, R., Sudheer, K., & Chaubey, I. (2010). Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. *HYDROLOGICAL PROCESSES*.
- CIREN. (2002). *Estudio Agrológico, Descripción de suelos Materiales y Símbolos, IX Región*. Centro de Información de Recursos Naturales.
- CONAF. (2014). *Catastro de Vegetación*. Corporación Nacional Forestal.
- Conde, C. (2003). *Cambio y Variabilidad Climáticos. Dos Estudios de Caso en México*. México: Tesis Doctoral. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
- CORMA. (2015). *EL AGUA Y LAS PLANTACIONES FORESTALES*. COMITÉ DE AGUA DE CORMA.
- CRAHI. (2 de noviembre de 2019). *Tipos de modelos hidrológicos*. Obtenido de www.crahi.upc.edu/
- Díaz, S., Fargione, J., Chapin, F., & Tilman, D. (2006). Biodiversity Loss Threatens Human Well-Being. *PLoS Biology*.
- ERIDANUS. (2016). *Anexo 4 – Guía Metodológica, Determinación del Impacto del Cambio Climático en el Potencial Esperado de Generación Hidroeléctrica en la cuenca del río Maule*. Santiago, Chile: ERIDANUS, Ingeniería para Recursos hídricos.
- Esparza Vidal, A. (2017). *Impactos del cambio de la cobertura y el uso de suelo en la oferta de servicio ecosistémicos de regulación hídrica en el centro - sur de Chile*. Universidad de Concepción.
- ESPINOSA MARIN, J. (2016). *Evaluación de la Vulnerabilidad Hídrica de una Cuenca del Río El Ángel y Demanda de Agua de la Población en Escenarios de Cambio de Uso de Suelo*. Universidad de Concepción.
- Espinosa, J., Uribe, H., Arumí, J., Rivera, D., & Stehr, A. (2011). VULNERABILIDAD DEL RECURSO HIDRICO RESPECTO A ACTIVIDADES. *Gestión Ambiental*.
- FAO. (2017). *El estado de los bosques y el sector forestal en la región*. Tegucigalpa, Honduras: COMISION FORESTAL PARA AMERICA LATINA Y EL CARIBE.

- Foley, J., DeFries, R., Asner, G., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S., . . . Snyder, P. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science*.
- Fundación Chile. (2018). *Radiografía del Agua: Brechas y riesgos hidrológicos en Chile, Escenarios Hídricos 2030*. Santiago, Chile.
- García, Y. (2016). ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO CON FINES DE RIEGO EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO NARANJO, CUBA. *Revista Geográfica de América Central*.
- Garreaud, R. (2011). Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro*.
- González-Reyes, Á., & Muñoz, A. (2013). Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años. *BOSQUE*.
- Grimm, N., Faeth, S., Golubiewsk, N., Redman, C., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. (2008). Global Change and the Ecology of Cities. *Science*.
- Hansen, M., Potapov, P., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S., Tyukavina, A., . . . Townshend, J. (2014). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *SCIENCE*.
- Harvey, M., & Pilgrim, S. (2011). The new competition for land: Food, energy, and climate change. *Food Policy*.
- Heilmayr, R., Echeverría, C., Fuentes, R., & Lambin, E. (2016). A plantation-dominated forest transition in Chile. *Applied Geography*.
- Huber, A., Iroumé, A., & Bathurst, J. (2008). Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. *Hydrological Processes*.
- Huber, A., Iroumé, A., Mohr, C., & Frêne, C. (2010). Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque*.
- IDEAM, ONU, & MDGIF. (2009). *Indicadores, tendencias y escenarios hidrológicos para el cambio climático, Programa conjunto de integración de ecosistemas y adaptación al cambio climático*.
- INFOR. (2019). *Anuario INFOR, Boletín Estadístico N°168*. Santiago Chile: Instituto Forestal.
- 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 Hydrology*.
- Jones, J., Almeida, A., Cisneros, F., Iroumé, A., Jobbágy, E., Lara, A., . . . Villegas, J. (2016). Forests and water in South America. *Hydrological Processes*.

- Jyrkama, M., Sykes, J., & Normani, S. (2005). Recharge Estimation for Transient Ground Water Modeling. *Ground Water*.
- Lara, A., Little, C., Urrutia, R., McPhee, J., Álvarez-Garretón, C., Oyarzún, C., . . . Arismendi, I. (2009). Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management*.
- Lara, A., Solari, M., Prieto, M., & Peña, M. (2012). Reconstrucción de la cobertura de la vegetación y uso del suelo hacia 1550 y sus cambios a 2007 en la ecorregión de los bosques valdivianos lluviosos de Chile (35° – 43° 30' S). *BOSQUE*.
- Little, C., Cuevas, J., Lara, A., Pino, M., & Schoenholtz, S. (2015). Buffer effects of streamside native forests on water provision in watersheds dominated by exotic forest plantations. *ECOHYDROLOGY*.
- Little, C., Lara, A., McPhee, J., & Urrutia, R. (2009). Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of Hydrology*.
- Martínez, Y., & Villalejo, V. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*.
- Mellado, M. (2019). *Análisis de la disponibilidad hídrica para la cuenca del río Duqueco considerando escenarios de cambio climático y una expansión de las plantaciones forestales hacia el año 2030*. Universidad de Concepción.
- Miranda, A., Altamirano, A., Cayuela, L., Pincheira, F., & Lara, A. (2015). Different times, same story: Native forest loss and landscape homogenization in three physiographical areas of south-central of Chile. *Applied Geography*.
- MMA. (2017). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2017-2022)*. Santiago, Chile: Ministerio de Medio Ambiente.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., & Veith, T. (2007). MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS. *Transactions of the ASABE*.
- Nahuelhual, L., Carmona, A., Lara, A., Echeverría, C., & González, M. (2012). Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south-central Chile. *Landscape and Urban Planning*.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005*.
- ODEPA. (2019). *Región de la Araucanía Información regional 2019*. Santiago, Chile: Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura.

- Pizarro, R. (2013). *Buenas prácticas hidrológico-forestales para la conservación de agua a nivel de cuencas y micro-cuencas, ejemplos prácticos. XXVIII silvotecnica: desarrollando ciencia y buenas prácticas para la gestión sustentable del agua en nuestros bosques*. Chile: CORMA.
- Ponce, V. (1989). *Engineering Hydrology*. Englewood Cliffs. New Jersey.: Prentice Hall.
- Ravindranath, N., Rao, S., Sharma, N., Nair, M., Gopalakrishnan, R., Rao, A., . . . Bala, G. (2011). Climate change vulnerability profiles for North East India. *Current Science*.
- RHMA. (2010). *Análisis de vulnerabilidad de recursos hídricos frente a escenarios de cambio climático para las cuencas de Cautín, Aconcagua, Teno e Illapel. Informe final*. Santiago, Chile: Preparado para CONAMA.
- Riquelme Mora, K. (2018). *Evaluación del efecto del cambio climático en los caudales futuros de la cuenca del río Duqueco*. Universidad de Concepción.
- Singh, V. (1989). *Hydrologic System. Vol.2.Watershed Modelling*. Prentice Hall: Englewood Cliffs, New Jersey.
- STEHR GESCHE, A. (2008). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y DISPONIBILIDAD DE AGUA, BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO, PARA DOS SUBCUENCAS CUENCAS DEL RÍO BIOBÍO INCORPORANDO EL IMPACTO DEL APORTE NIVAL EN LA ZONA CORDILLERANA*. Universidad de Concepción.
- Stehr, A., Debels, P., Arumi, J., Alcayaga, H., & Romero, F. (2010). Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México*.
- TAKEUCHI, K. (2009). Increasing vulnerability to extreme floods and societal needs of hydrological forecasting. *Hydrological Sciences Journal*.
- Tsegaye, D., Moe, S., Vedeld, P., & Aynekulu, E. (2010). Land-use/cover dynamics in Northern Afar rangelands, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.
- UnWater. (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN DEL AGUA*. París - Francia.: Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos.
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J., Olivares, C., Vera, M., . . . Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate. *Journal of Hydrology*.

- Vicuña, S., Garreaud, R., & McPhee, J. (2008). Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt. *Springer*.
- Webb, A. (2009). Streamflow response to Pinus plantation harvesting: Canobolas State forest, southeastern Australia. *Hydrological Processes*.
- Webb, A., & Kathuria, A. (2012). Response of streamflow to afforestation and thinning at Red Hill, Murray Darling Basin, Australia. *Journal of Hydrology*.
- Webb, A., Kathuria, A., & Turner, L. (2012). Longer-term changes in streamflow following logging and mixed species eucalypt forest regeneration: The Karuah experiment. *Journal of Hydrology*.
- Xu, C. (2002). *Textbook of Hydrologic Model*. Uppsala, Sweden.: Department of Earth Science. Uppsala University.
- Yang, D., Herath, S., & Musiak, K. (2000). Comparación de diferentes modelos hidrológicos distribuidos para la caracterización de la variabilidad espacial de captación. *Journal of hidrological*.
- YUE, S., & WANG, C. (2004). The Mann-Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series. *Water Resources Management*.
- Zambrano, F., Wardlow, B., & Tadesse, T. (2017). Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation datasets for drought monitoring in Chile. *Atmospheric Research*.

8. ANEXOS

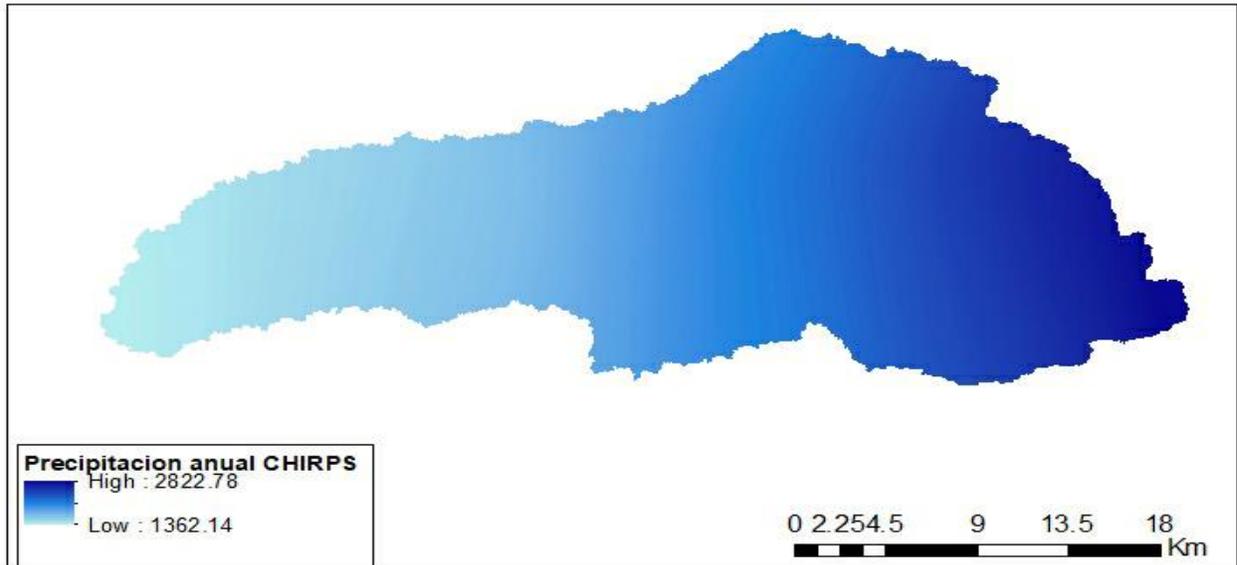


Figura Anexo 1: Distribución espacial de la precipitación anual en la cuenca.

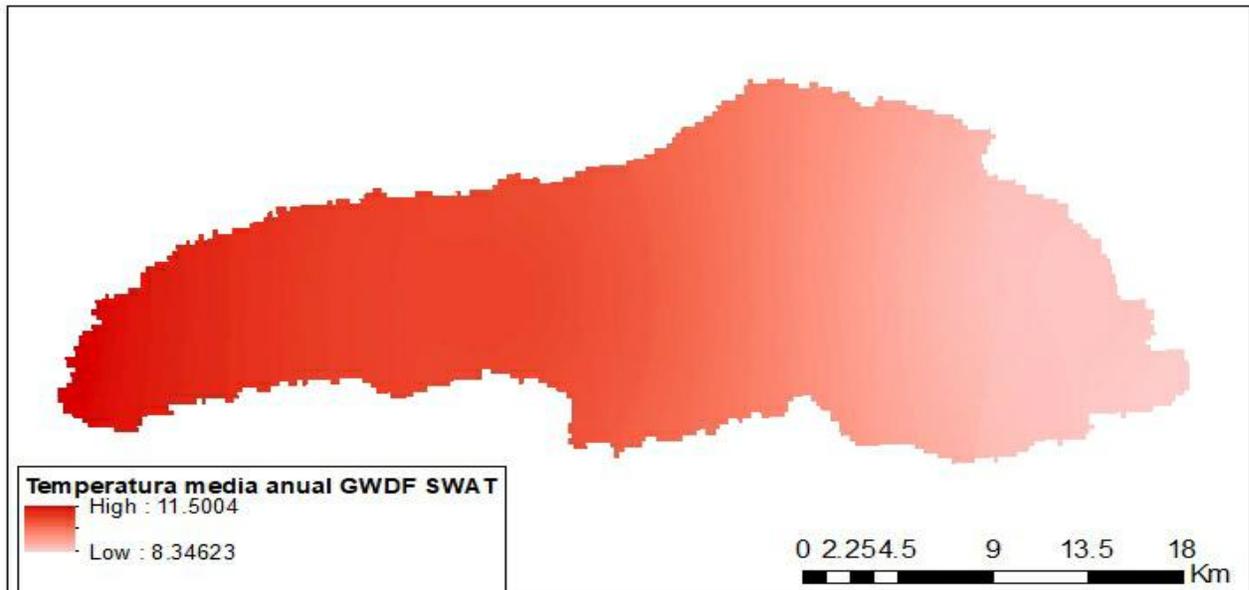


Figura Anexo 2: Distribución espacial de la de temperatura GWSF SWAT.

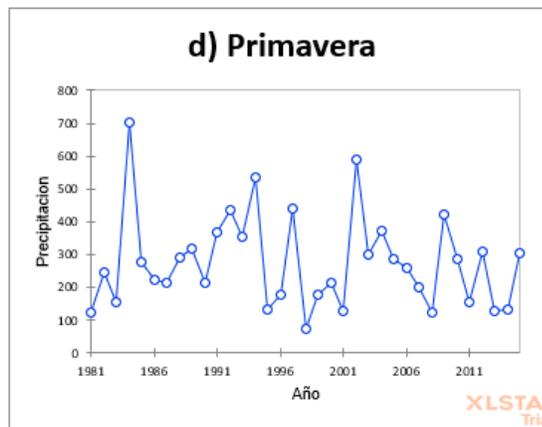
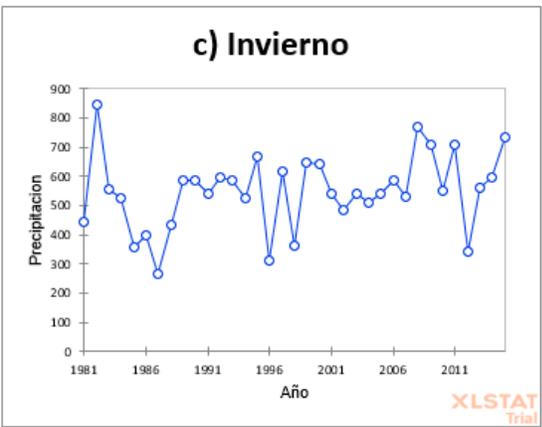
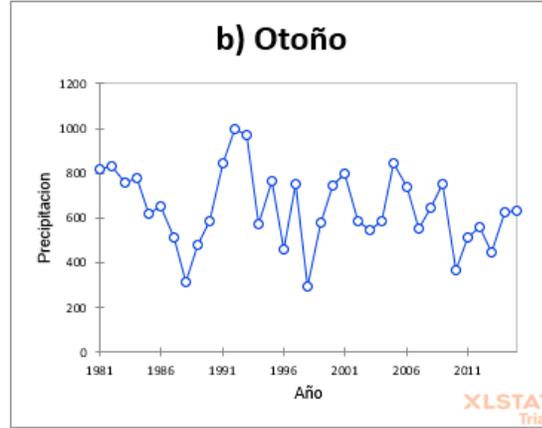
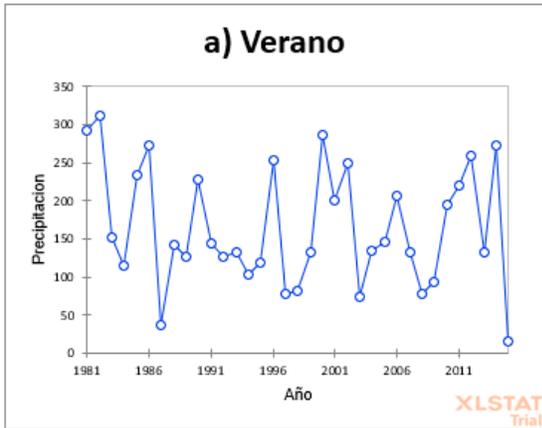


Figura Anexo 3: Tendencia y homogeneidad Estación Vilcun.

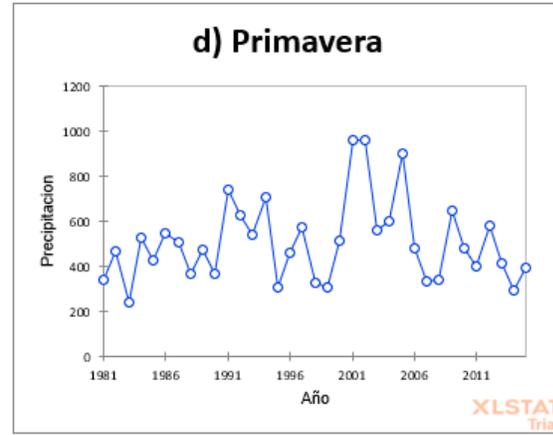
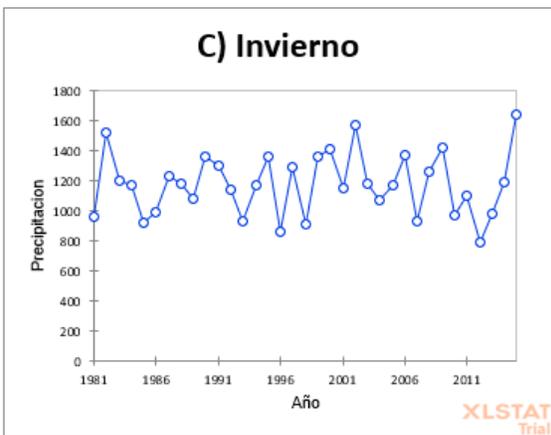
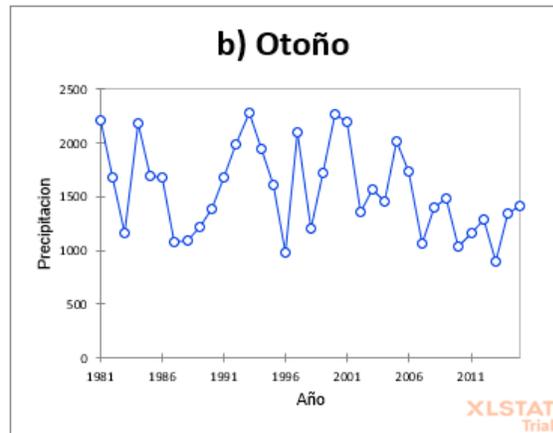
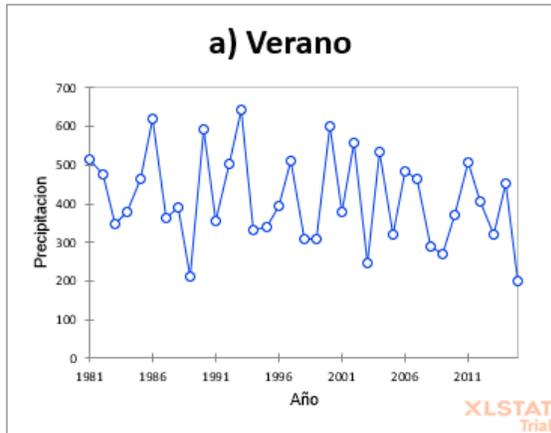


Figura Anexo 4: Tendencia y homogeneidad Estación CHRIPS.

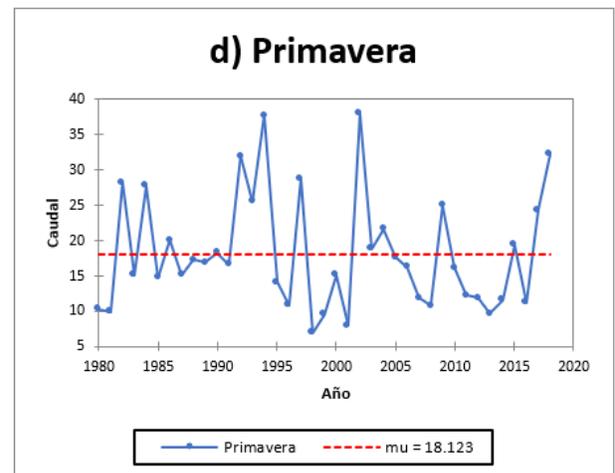
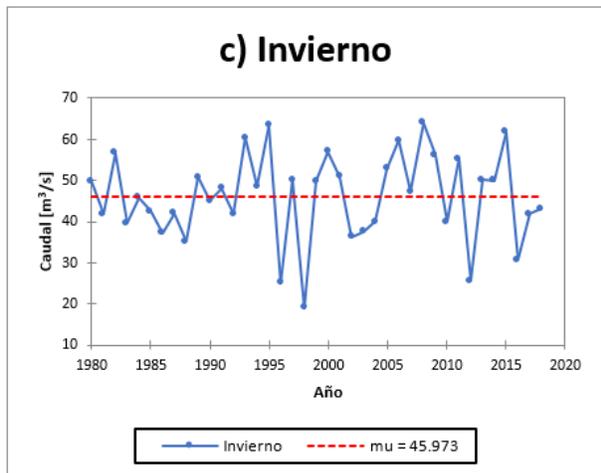
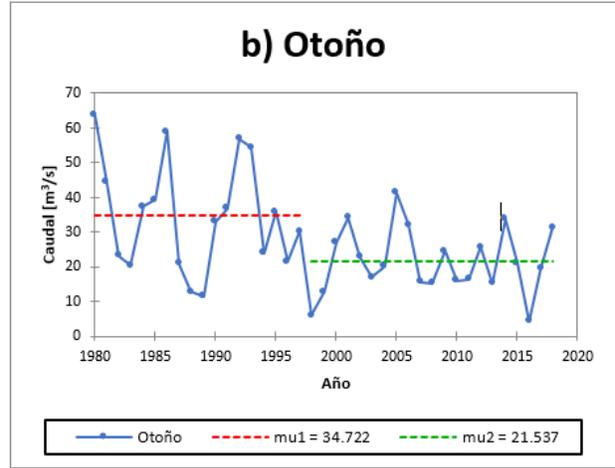
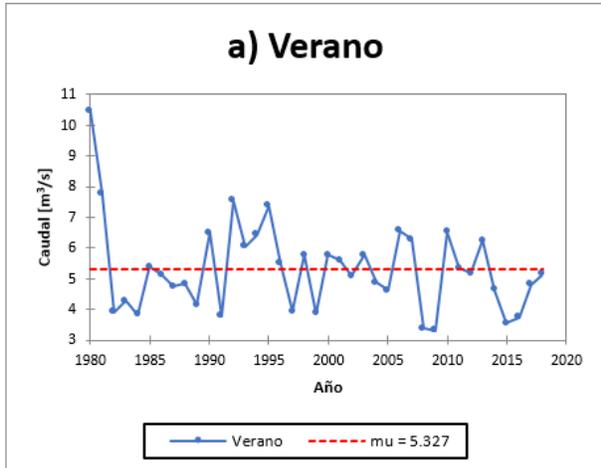


Figura Anexo 5: Tendencia y homogeneidad datos de caudal.

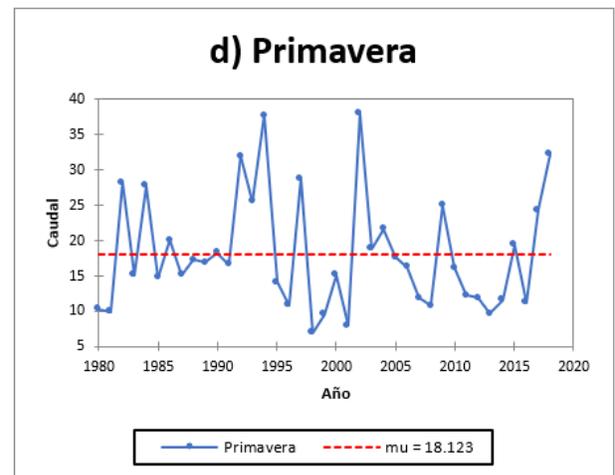
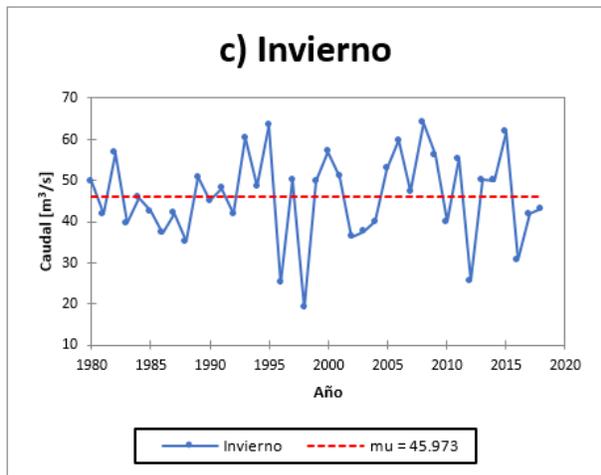
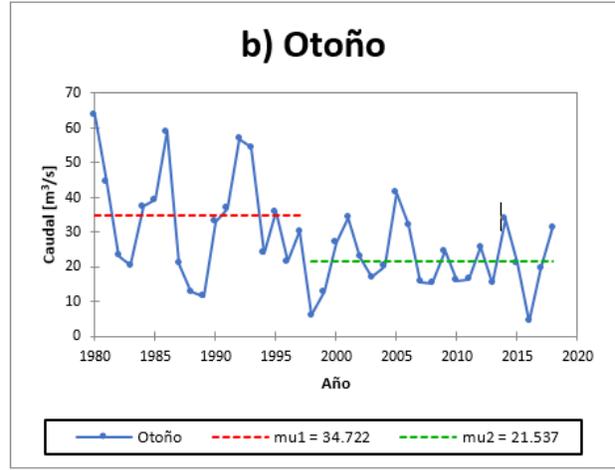
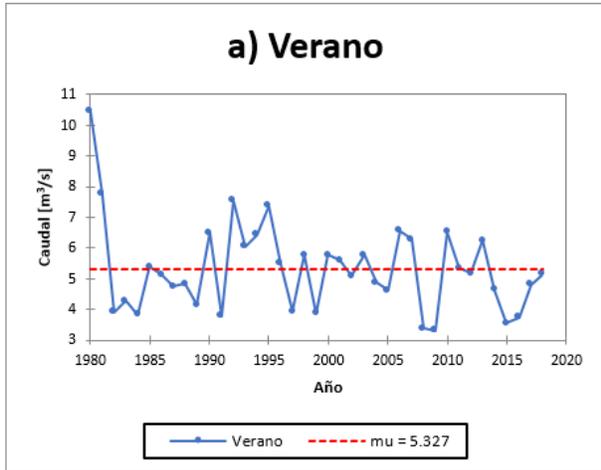


Figura Anexo 6: Tendencia y homogeneidad Caudal.

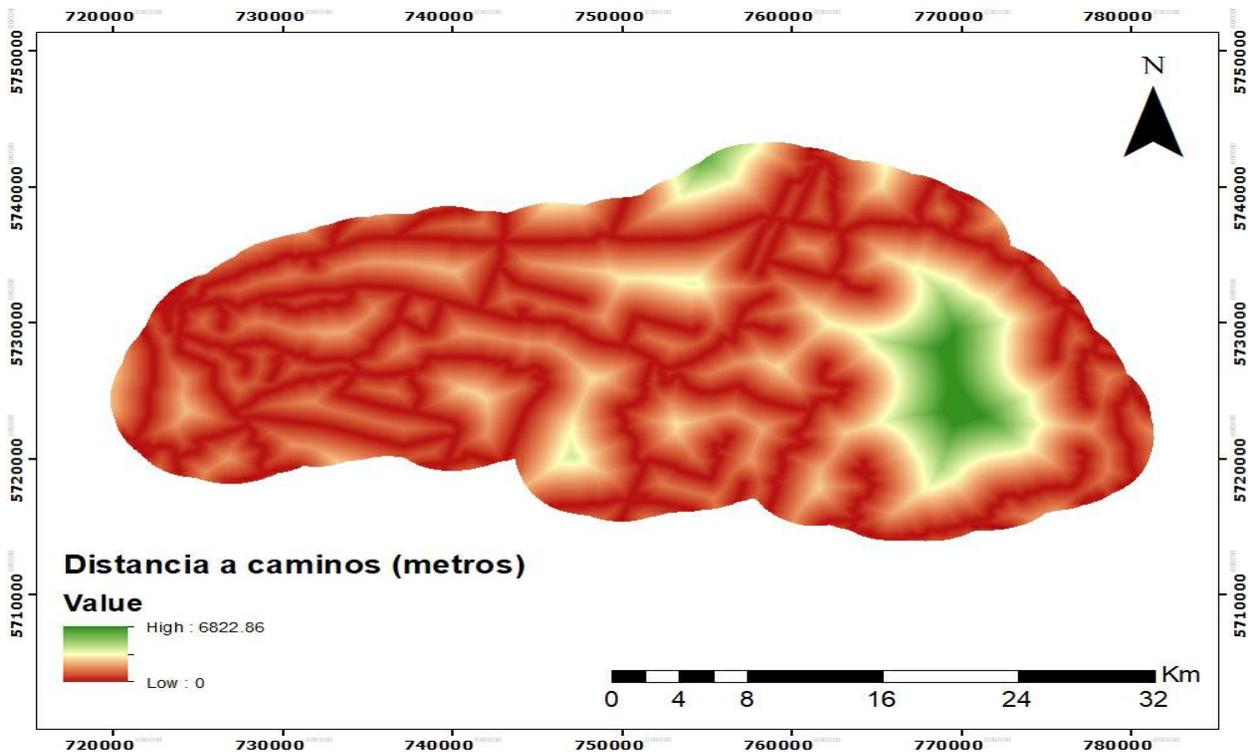


Figura Anexo 7: Distancia a caminos.

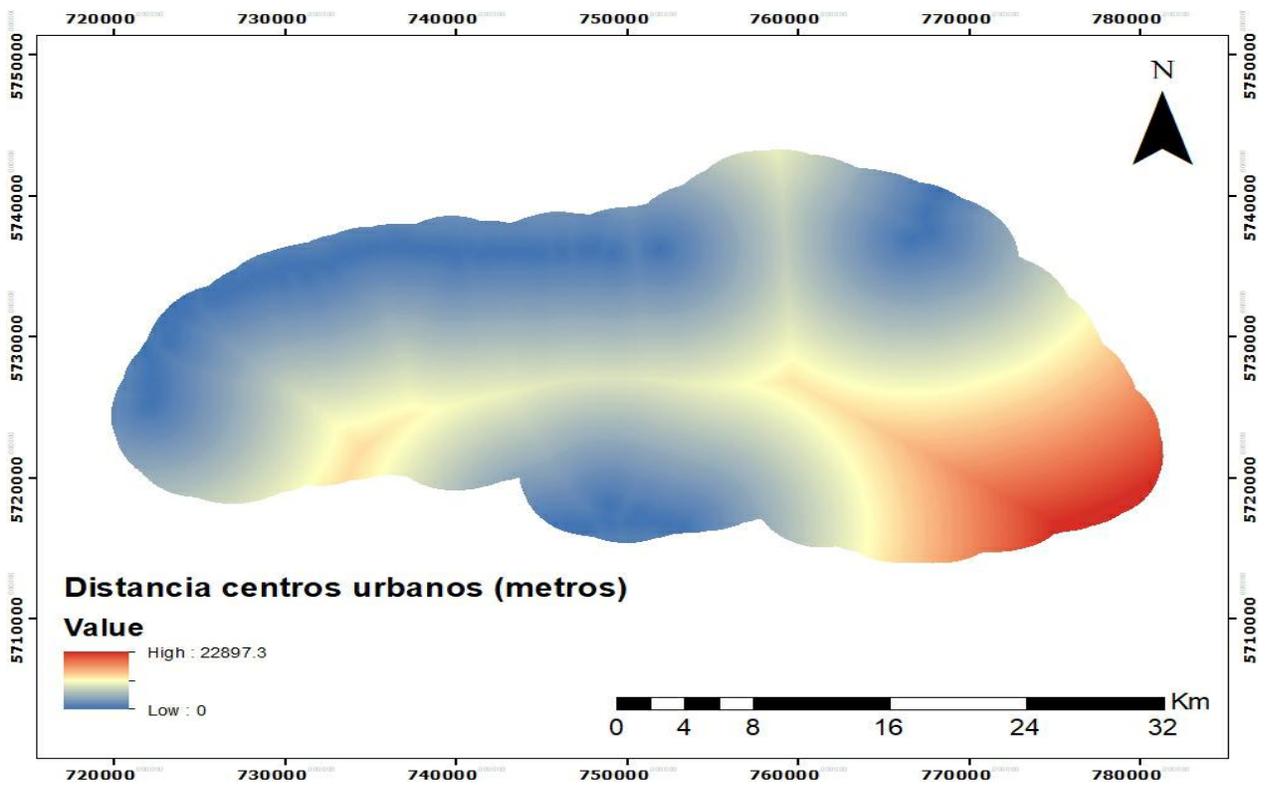


Figura Anexo 8: Distancia a centros urbanos.

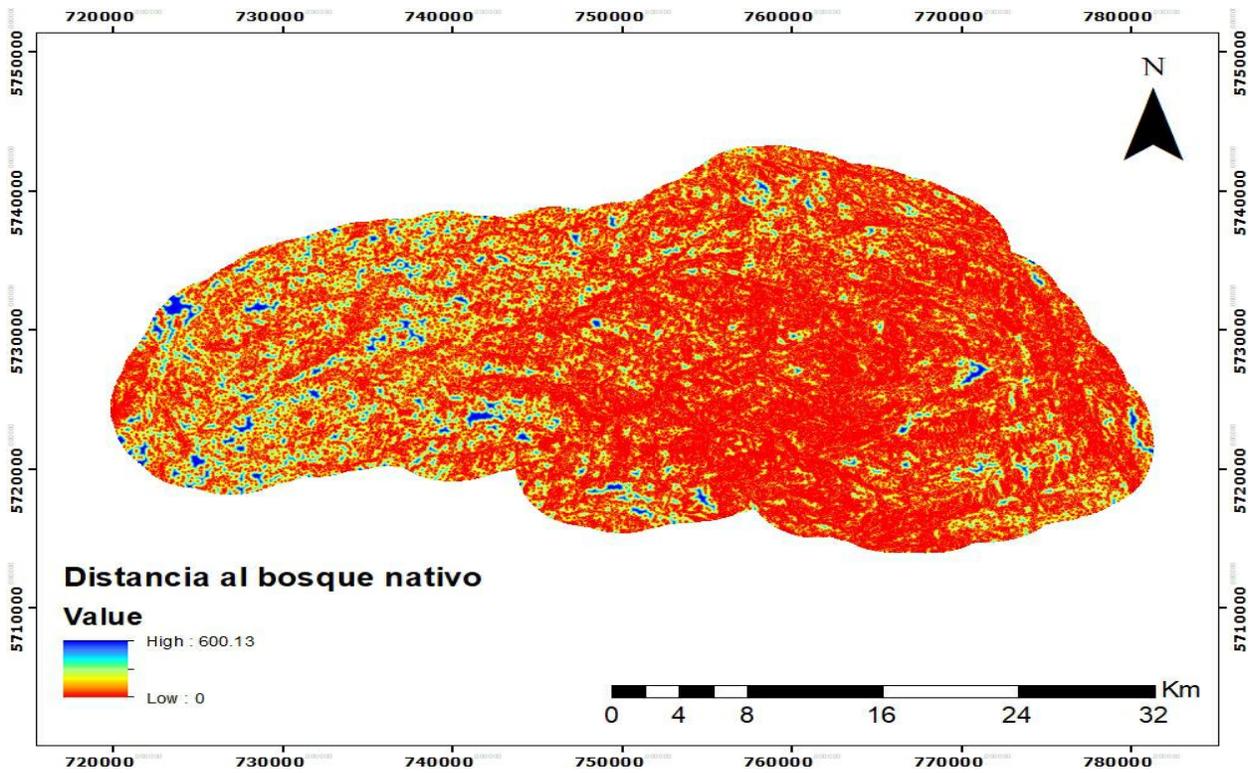


Figura Anexo 9: Distancia al Bosque nativo.

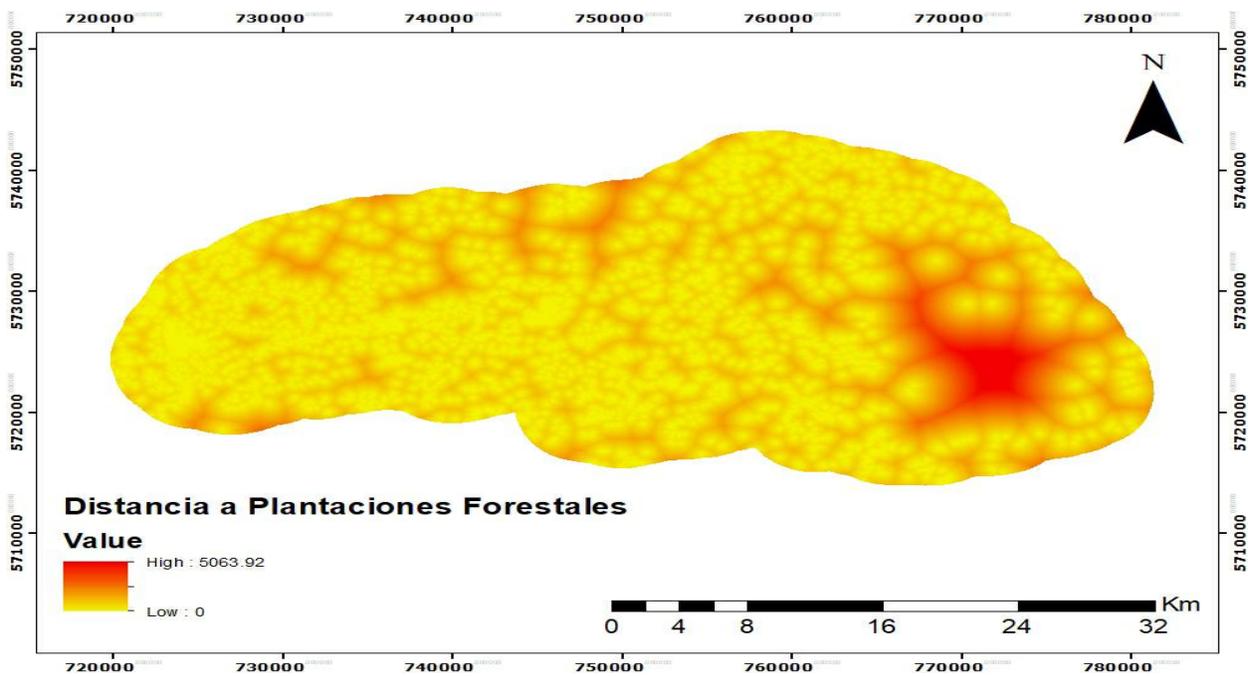


Figura Anexo 10: Distancia a plantaciones forestales.

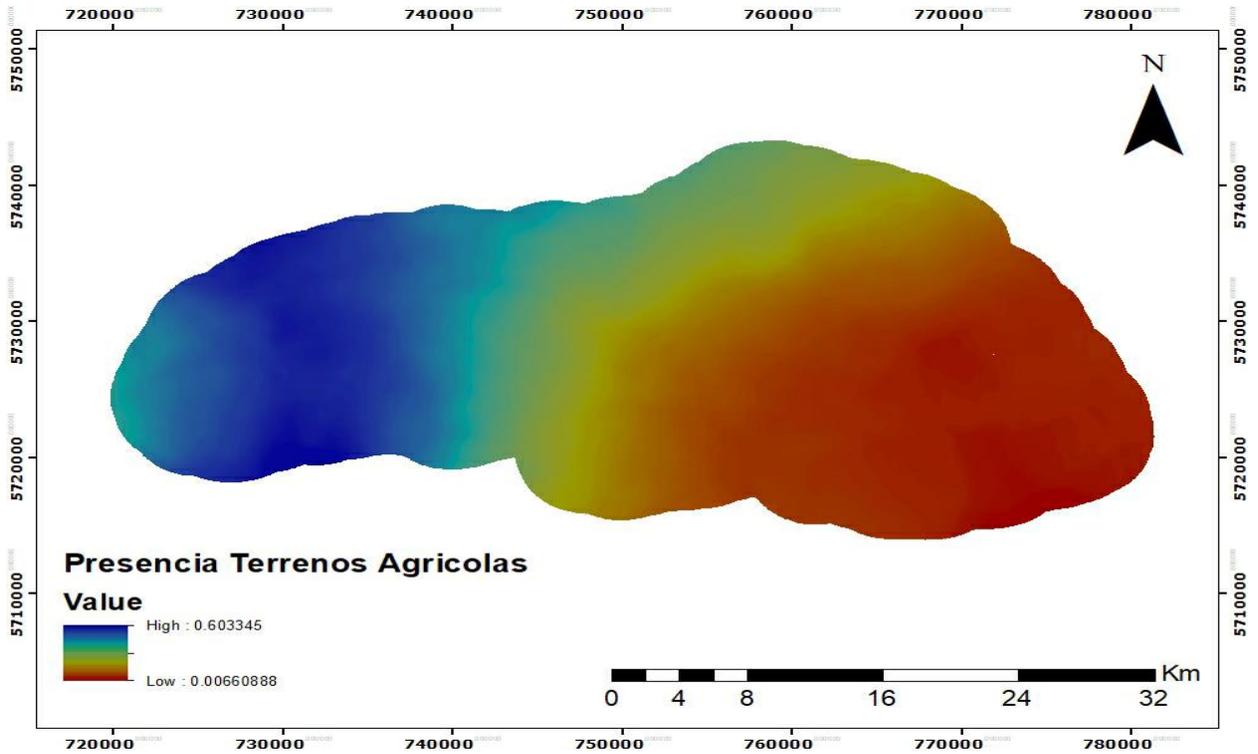


Figura Anexo 11: Presencia de terreno agrícola.

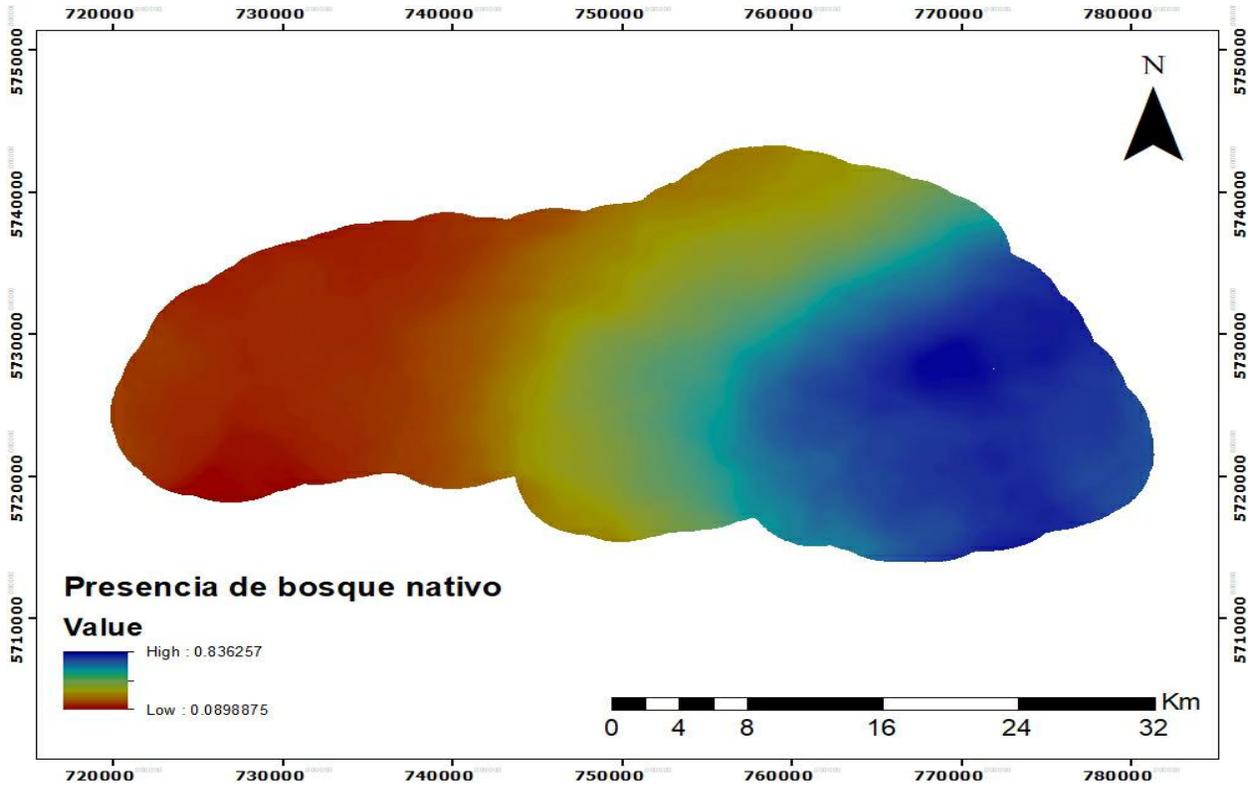


Figura Anexo 12: Presencia de bosque nativo.

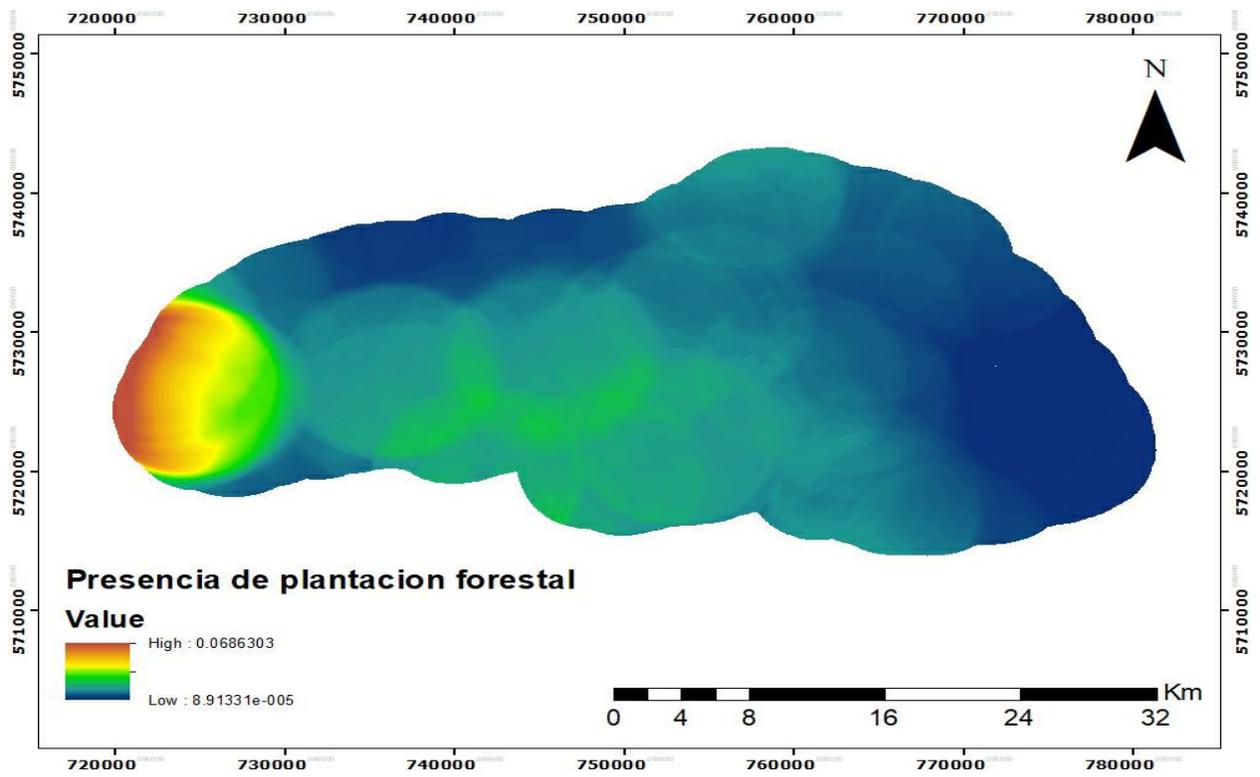


Figura Anexo 13: Presencia de plantaciones forestales.

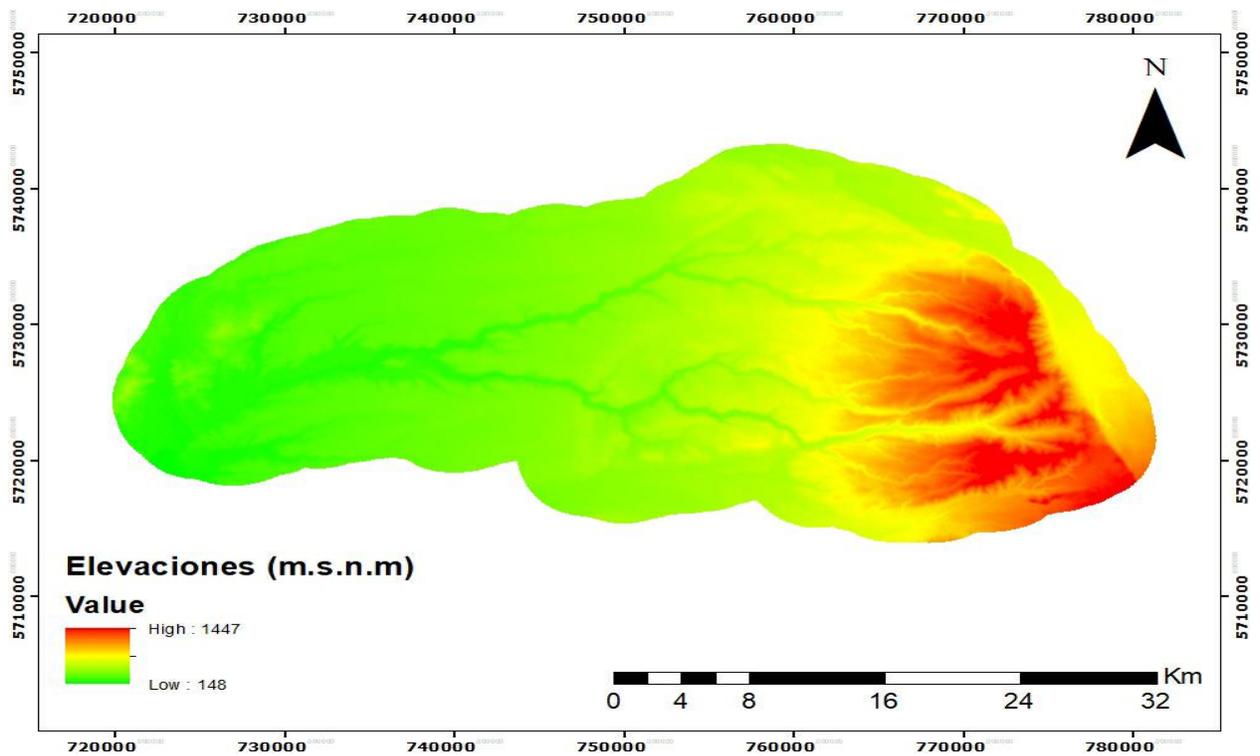


Figura Anexo 14: Elevaciones (metros sobre el nivel del mar).

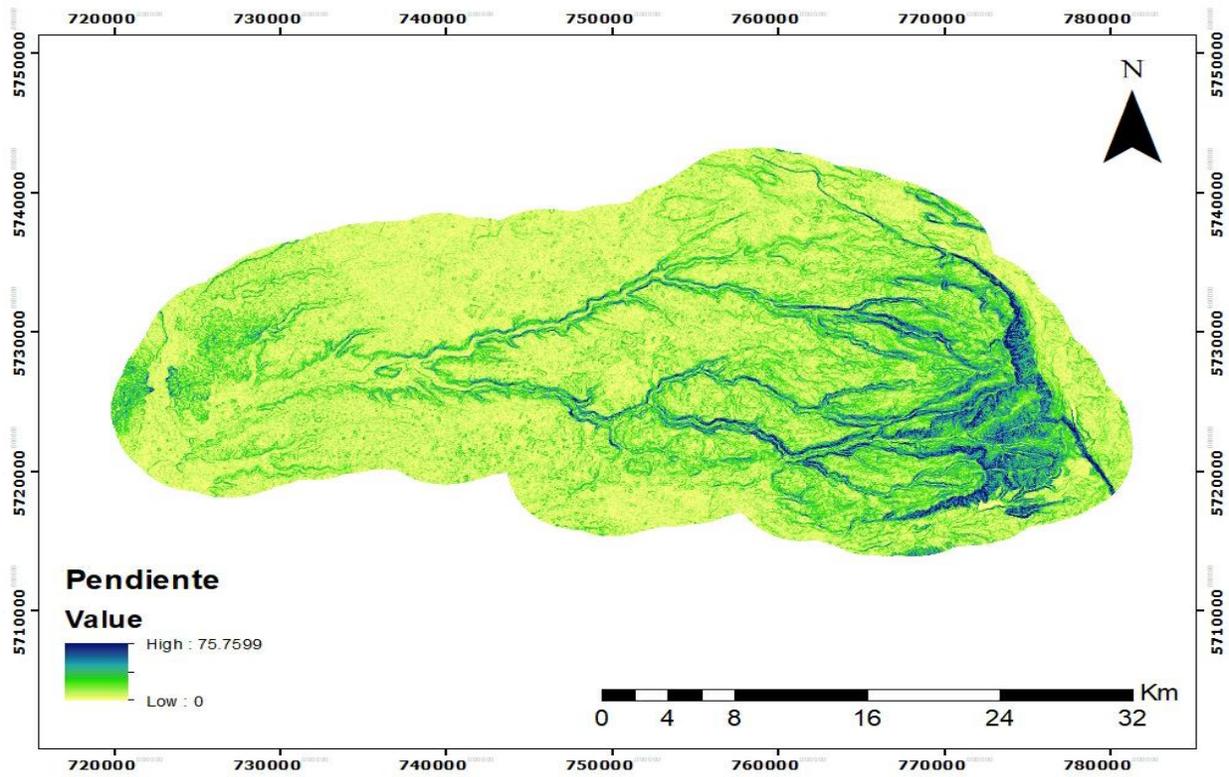


Figura Anexo 15: Pendientes.