



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

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

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniero Ambiental

MANUEL ANTONIO MELLADO ESPINOZA

Profesor Guía: M. Sc. Pedro Arriagada Sanhueza

Profesor Co-guía: Dr. Mauricio Aguayo Arias

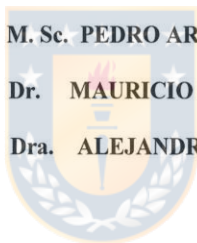
Concepción, Chile

2019



“Análisis de la disponibilidad hídrica para la cuenca del Río Duqueco considerando escenario de cambio climático y una expansión de las plantaciones forestales hacia el año 2030”.

PROFESOR GUÍA: M. Sc. PEDRO ARRIAGADA SANHUEZA
PROFESOR CO-GUÍA: Dr. MAURICIO AGUAYO ARIAS
PROFESOR COMISIÓN: Dra. ALEJANDRA STEHR GESCHE



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, julio 2019



AGRADECIMIENTOS

Particularmente, quisiera agradecer a mi familia, quienes siempre me apoyaron en todo este proceso, especialmente a mis padres Eliana y Manuel y mi hermana Natalia, por su esfuerzo, sacrificio y cariño. A mis tíos Marco y Maritza quienes supieron cobijarme en su hogar las veces que fuera necesario. A mis primos y amigos, quienes supieron sacarme una sonrisa, especialmente cuando este proceso se volvía incierto y complicado.

De igual manera, agradecer también a los profesores que me acompañaron durante la tesis, a mi profesor guía, por su apoyo y confianza durante todo este camino, a mi profesor co-guía, por su disposición y apoyo durante la elaboración de esta tesis, a mi comisión, por siempre estar disponible para prestarme ayuda. De verdad muchas gracias, espero haber cumplido con sus expectativas y de alguna forma tratare de retribuir al mundo todo lo aprendido...

ÍNDICE	
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
RESUMEN.....	vi
1. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	1
1.1 Disponibilidad de agua en Chile	1
1.2. Cambio climático en Chile.	4
1.2.1. Tendencias observadas, proyecciones y su relación con la disponibilidad hídrica.....	4
a) Proyecciones para la temperatura	5
b) Proyecciones para la precipitación.....	6
c) proyecciones para caudales.....	8
1.3 Usos de suelo.....	9
1.3.1 Cambios en los usos de suelo.....	9
1.3.2 Cambio de uso de suelo en Chile y su relación con la disponibilidad hídrica.....	11
1.3.2.1 Plantaciones forestales en la región del Biobío.....	16
1.4 Modelación Hidrológica.	18
2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	22
3. OBJETIVOS.	22
3.1. Objetivo General.....	22
3.2. Objetivos específicos.....	22
4. METODOLOGÍA.....	23
4.1 Descripción del Área de estudio.....	23
4.1.1 Antecedentes climáticos.....	26
4.1.2 Antecedentes hidrológicos	29
4.1.3 Usos de suelo.....	31
4.2 Modelo SWAT.....	32
4.3 Calibración y Validación del Modelo SWAT para diferentes coberturas de uso de la tierra.....	36

4.3.1 Datos de entrada	36
4.3.2 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT	43
4.3.3 Medidas de desempeño para la modelación de caudal.....	46
4.4. Modelación del cambio de usos de suelo.	48
4.4.1 Escenarios Climáticos y de uso del suelo.	52
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
5.1 Calibración y validación del modelo hidrológico	55
5.1.1 Calibración	55
5.1.2 Validación.....	60
5.1.3 Re-validación.....	62
5.2 Escenario futuro de expansión forestal.....	64
5.2.1 Análisis y cuantificación de cambios en el territorio.....	64
5.2.2 Factores forzantes del cambio de uso de suelo y regresión logística	66
5.2.3 Futuro escenario de expansión forestal.....	68
5.3 Disponibilidad hídrica futura para la cuenca	72
5.3.1 Efectos espaciales y temporales de la expansión forestal sobre los caudales futuros de la cuenca.....	72
5.3.2 Efectos espaciales y temporales del cambio climático sobre los caudales de la cuenca.....	76
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	87
7. ANEXOS.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Disponibilidad de agua en Chile.	1
Tabla 2. Estudios de reducción de caudal sobre cuencas chilenas.	9
Tabla 3. Estaciones fluviométricas y meteorológicas ubicadas en el área de estudio..	25
Tabla 4. Datos de entradas al modelo SWAT, utilizados para la modelación de caudal en la cuenca del río Duqueco.....	37
Tabla 5. Estaciones termométricas utilizadas en relleno de datos de temperatura.	39
Tabla 6. Tipos de suelos presentes en la cuenca del río Duqueco.	41
Tabla 7. Usos de suelo presentes en la cuenca asociados a la base de datos del modelo SWAT.	42
Tabla 8. Parámetros SWAT que influyen en la simulación del flujo en el modelo y su rango de perturbación.....	43
Tabla 9. Criterios de evaluación de desempeño recomendadas para modelaciones de flujo a escala mensual.	48
Tabla 10. Variables independientes ingresadas al modelo de regresión logística para el periodo 1994-2015.....	51
Tabla 11. Escenarios climáticos (conservador, intermedio y crítico), determinados en función de la reducción de caudal para la cuenca del río Duqueco.....	52
Tabla 12. Rango o valor final de cada parámetro modificados para las subcuencas durante la calibración.....	56
Tabla 13. Valor del parámetro Curva Numero (CN2), en función de los tipos y usos de suelo presentes en el área de estudio.	57
Tabla 14. Valores de los indicadores de bondad de ajuste para la calibración y validación correspondientes al uso de suelo actual.	58
Tabla 15. Valores de los indicadores de bondad de ajuste para la validación del modelo utilizando el uso de suelo correspondiente al año 1995.....	62
Tabla 16. Variación temporal de los usos de suelo presentes en la cuenca (1994 - 2015).	65
Tabla 17. Parámetros de la regresión logística ajustado para la expansión forestal al año 2035.	67
Tabla 18. Cambio en las superficies de usos de suelo en Hectáreas para los periodos analizados.	68
Tabla 19. Percentiles y su porcentaje de variación con respecto al escenario base. ..	75
Tabla 20. Análisis estadístico para el escenario de expansión forestal y los escenarios del cambio climático.	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre el promedio anual del caudal superficial y la demanda de extracción (m ³ /s) para cada región, las demandas corresponde a los derechos de agua otorgados.....	2
Figura 2. Promedio de déficit o excedente de precipitaciones para los período 1966-1969 y 2010-2014.....	5
Figura 3. Proyección en temperatura para el territorio nacional a fines de siglo (años 2070-2100).....	6
Figura 4. Proyección en precipitación para el territorio nacional a fines de siglo (años 2070-2100).....	7
Figura 5. Pérdidas y Ganancias de la cubierta forestal en los países de Sudamérica durante el periodo 2000-2012.....	10
Figura 6. Transición de las plantaciones forestales en Chile para el periodo 1987-2011.....	13
Figura 7. Usos de la tierra reemplazados por las plantaciones forestales.....	14
Figura 8. Distribución de las plantaciones forestales por región.....	15
Figura 9. Evolución de las plantaciones forestales en la región de Biobío.....	16
Figura 10. Clasificación de modelos hidrológicos.....	19
Figura 11. Tipos de modelos hidrológicos a escala de cuencas.....	21
Figura 12. Mapa Subcuenca del río Duqueco.....	24
Figura 13. Climograma estación Los Ángeles.....	26
Figura 14. Isotermas, Isoyetas y Evapotranspiración para la cuenca del río Duqueco.....	28
Figura 15. Hidrograma estación río Duqueco en Villacura para el periodo 1981-2016.....	29
Figura 16. Hidrograma estación río Duqueco en Cerrillos para el periodo 1981-2016.....	29
Figura 17. Caudal Medio estacional registrado en las estaciones fluviométricas del río Duqueco.....	30
Figura 18. Distribución de los usos de suelo presentes en la cuenca del río Duqueco.....	31
Figura 19. Simulación del ciclo hidrológico en el modelo SWAT.....	33
Figura 20. Registro de precipitaciones CHRIPS y DGA en la cuenca del río Duqueco (Estación meteorológica Los Ángeles).....	38
Figura 21. Modelo de elevación digital (DEM).....	40
Figura 22. Tipos de suelo presentes en la cuenca del río Duqueco.....	40
Figura 23. Usos de suelo año 2015.....	42
Figura 24. Esquema metodológico para la calibración y validación del modelo SWAT.....	45
Figura 25. Metodología para el cambio de uso de suelo (CUS).....	50
Figura 26. Metodología para el cálculo de los caudales medios mensuales futuros para la cuenca del río Duqueco.....	53
Figura 27. Análisis de sensibilidad para los parámetros que influyen la modelación de flujo.....	55

Figura 28. Serie de caudales para el periodo de calibración estación Villacura.	59
Figura 29. Serie de caudales para el periodo de calibración estación Cerrillos.	60
Figura 30. Serie de caudales para el periodo de validación estación Cerrillos.	61
Figura 31. Serie de caudales para el periodo de validación estación Villacura.....	61
Figura 32. Serie de caudales para el periodo de Re-validación estación Cerrillos.....	63
Figura 33. Serie de caudales para el periodo de Re-validación estación Villacura.	63
Figura 34. Variación temporal de las coberturas de suelo para los años 1994, 2015 y 2030.	69
Figura 35. Coberturas temporales de usos de suelo, clasificadas para el modelo hidrológico SWAT.....	71
Figura 36. Variación espacial del caudal medio, considerando escenario de expansión forestal.....	73
Figura 37. Variación estacional del caudal, medida en los puntos de control, subcuenca 25 y subcuenca 29.....	74
Figura 38. Variación espacial del caudal medio, bajo el escenario climático más conservador (E1).	77
Figura 39. Variación espacial del caudal medio, bajo el escenario climático más crítico (E3).....	78
Figura 40. Variación estacional del caudal medio, bajo los escenarios de cambio climático.	79
Figura 41. Hidrograma mensual para el escenario de cambio de uso de suelo (CUS) y los diferentes escenarios de cambio climático (E1, E2 y E3).	82
Figura 42. Variación (%) de percentiles para todos los escenarios, cuantificados a la salida de la cuenca.	83

RESUMEN

En Chile existe una importante variación latitudinal en la disponibilidad de agua, influenciada principalmente por la diversidad de climas presentes en el territorio nacional. Se han observado diferentes tendencias en las principales variables climáticas, un aumento sostenido en el tiempo para el caso de la temperatura atmosférica y una disminución en las precipitaciones; efectos que debido al cambio climático se espera que a futuro sigan en aumento, impactando principalmente la zona centro sur del país. Además, el territorio nacional ha sido sometido a intensos cambios en los usos del suelo, en donde los terrenos agrícolas, matorrales y bosque nativo han sido remplazados por plantaciones forestales de rápido crecimiento empleadas para la producción de madera.

Diversos estudios han cuantificado un efecto negativo en la disponibilidad del recurso hídrico, generado por las plantaciones forestales, sin embargo, no se ha cuantificado en conjunto los efectos futuros provocados tanto por cambio climático y por las expansión de las plantaciones. En este estudio se modeló la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Duqueco, calibrando y validando el modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*) a partir del registro histórico de dos estaciones fluviométricas presentes en la cuenca, para el periodo comprendido entre los años 1986 – 2016 y, con el modelo IDRISI se elaboró un uso de suelo futuro para la cuenca, en base a los cambios ocurridos en los usos de suelo entre los periodos 1994 – 2015.

Los resultados muestran que los patrones espaciales más influyentes en la expansión forestal en el área de estudio son: la presencia previa de plantaciones forestales y terrenos agrícolas, mientras que la presencia de bosque nativo y topografías elevadas e inclinadas limita la expansión forestal. El modelo hidrológico considerando sólo el escenario de cambio de uso de suelo, mostró una reducción porcentual promedio del caudal medio mensual igual a un

3,3%, donde las mayores reducciones podrían llegar a un 10%, cuantificadas en los esteros Cholguahue y Quillaco, mientras que estacionalmente las mayores reducciones ocurrirán en los meses de verano y otoño (6,2% y 5,6% respectivamente). Para el escenario climático más crítico el modelo hidrológico mostró que la reducción en la desembocadura del río Duqueco puede llegar a un 27%, alcanzando un 40% en el río Arilahuen, siendo en la estación de otoño donde se observan las mayores reducciones (30%).



1. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

1.1 Disponibilidad de agua en Chile

Según el banco mundial (2011) la disponibilidad media de agua en Chile es de $53.953 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, superior a la disponibilidad media mundial que alcanza los $6.600 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, sin embargo, esta elevada disponibilidad no se distribuye de forma homogénea en todo el territorio. En la zona norte, donde predominan los climas áridos y semiáridos, la disponibilidad de agua alcanza los $800 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, en la zona central, donde predominan los climas mediterráneos, alcanza los $23.978 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, mientras que en la zona sur y austral, donde dominan los climas templados y húmedos puede llegar hasta $2.933.535 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. En el caso particular de la región metropolitana, región que concentra más del 50% de la población, la disponibilidad hídrica alcanza los $525 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. La Tabla 1 muestra la variación latitudinal de la disponibilidad de agua en el territorio nacional.

Tabla 1. Disponibilidad de agua en Chile.

Región	Disponibilidad $\text{m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$	Región	Disponibilidad $\text{m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$
Arica y Parinacota	854	Maule	23.978
Antofagasta	52	Biobío	21.556
Atacama	208	La Araucanía	49.273
Coquimbo	1.020	Los Ríos	136.207
Valparaíso	801	Aysén	2.993.535
Metropolitana	525	Magallanes	1.959.036
O'Higgins	6.828	<u>Promedio Nacional</u>	53.953

Fuente: Adaptado de Banco Mundial (2011)

Por otro lado, el crecimiento de las actividades económicas y la población han ejercido presiones sobre los recursos hídricos, tanto superficial como

subterráneo, provocando que existan zonas del territorio que hayan sido declaradas en escasez hídrica a pesar de la importante disponibilidad del recurso presente en el país. La Figura 1 muestra la relación entre la demanda y la disponibilidad hídrica, además, de las zonas declaradas en escasez hídrica.

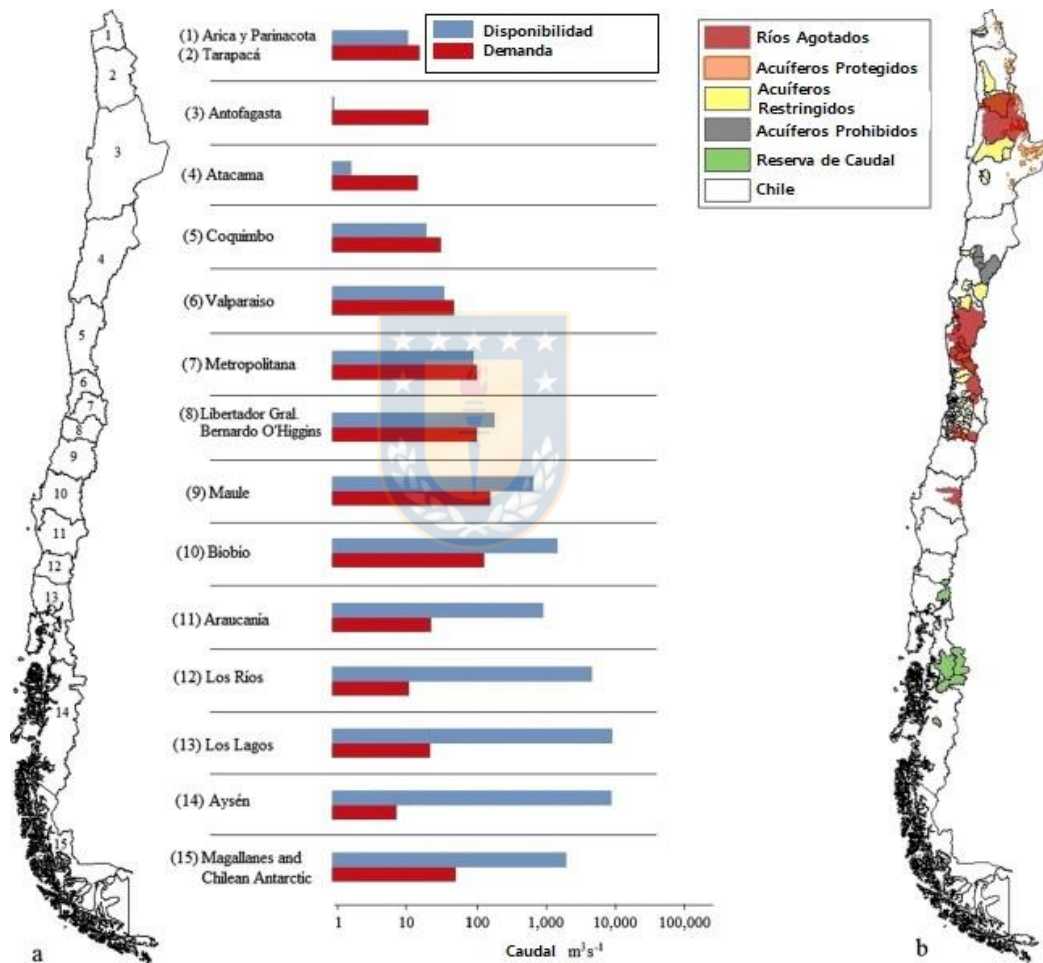


Figura 1. Relación entre el promedio anual del caudal superficial y la demanda de extracción (m^3/s) para cada región, las demandas corresponde a los derechos de agua otorgados.

Fuente: Valdés-Pineda *et al.*, (2014)

Se observa que desde la región metropolitana hacia al norte existe una relación negativa entre la disponibilidad de agua y la demanda, debido a la baja cantidad de precipitación caída principalmente en la zona norte (entre 600 y 200 mm·año⁻¹) y a la fuerte demanda hídrica de las principales actividades productivas de la zona, como 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 la disponibilidad y la demanda, debido al gradiente positivo de precipitaciones (Valdés-Pineda *et al.*, 2014), relación que aumenta significativamente entre las regiones de Araucanía y Aysén.

La concesión excesiva de derechos de aguas y las relaciones negativas entre la demanda y la oferta del recurso hídrico, han provocado agotamientos en la disponibilidad, tanto de tipo superficial y subterránea. Como lo ilustra la Figura 1 b), se ha manifestado 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 agotamientos en ríos (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 destacan el río Loa, río Elqui, río Limarí y los nacimientos del río La Ligua, Aconcagua, Mapocho e Itata. Alcanzando una

superficie total de 76.131 km² (DGA, 2017). Se estima que las declaraciones de agotamiento en el territorio nacional aumentarían en el futuro, debido principalmente a la influencia del calentamiento global sobre el régimen de precipitaciones (Valdés-Pineda *et al.*, 2014).

1.2. Cambio climático en Chile.

1.2.1. Tendencias observadas, proyecciones y su relación con la disponibilidad hídrica.

La variabilidad climática del territorio nacional juega un rol importante en el comportamiento de las variables meteorológicas como la temperatura y precipitación. Para el caso de las temperaturas medias se ha observado un aumento de 0,25°C en las últimas décadas para las zonas del valle central y cordilleranas (Garreaud, 2011), mientras que al sur de la región del Biobío las tendencias señalan una leve disminución (Garreaud, 2017), las temperaturas extremas se han mantenido relativamente constantes a lo largo del territorio, exceptuando el valle central y la pre cordillera en donde se ha observado un aumento entre +0,05 y 0,18°C (CONAMA-DGF, 2006). En general, actualmente las temperaturas han presentado un aumento de 0,5°C-1,5°C en los registros medios y máximos comparados con el periodo 1970 - 2000 (CR2, 2015).

Las precipitaciones en el territorio nacional se han caracterizado por presentar sucesiones de años lluviosos y sequías multianuales, sin embargo, se ha presentado una tendencia de disminución en los últimos 40 años tanto en las zonas costeras como en la zona cordillerana (Bossier *et al.*, 2016; CONAMA-DGF, 2006; Quintana & Aceituno, 2006). Durante el periodo 2010-2015 el 71% de las estaciones meteorológicas ubicadas entre las regiones de Coquimbo y el Biobío presentan un déficit de precipitaciones, este se prolonga hasta hoy y constituye uno de los eventos de sequía más prolongados que se ha registrado, como se observa en la Figura 2 (CR2, 2015).

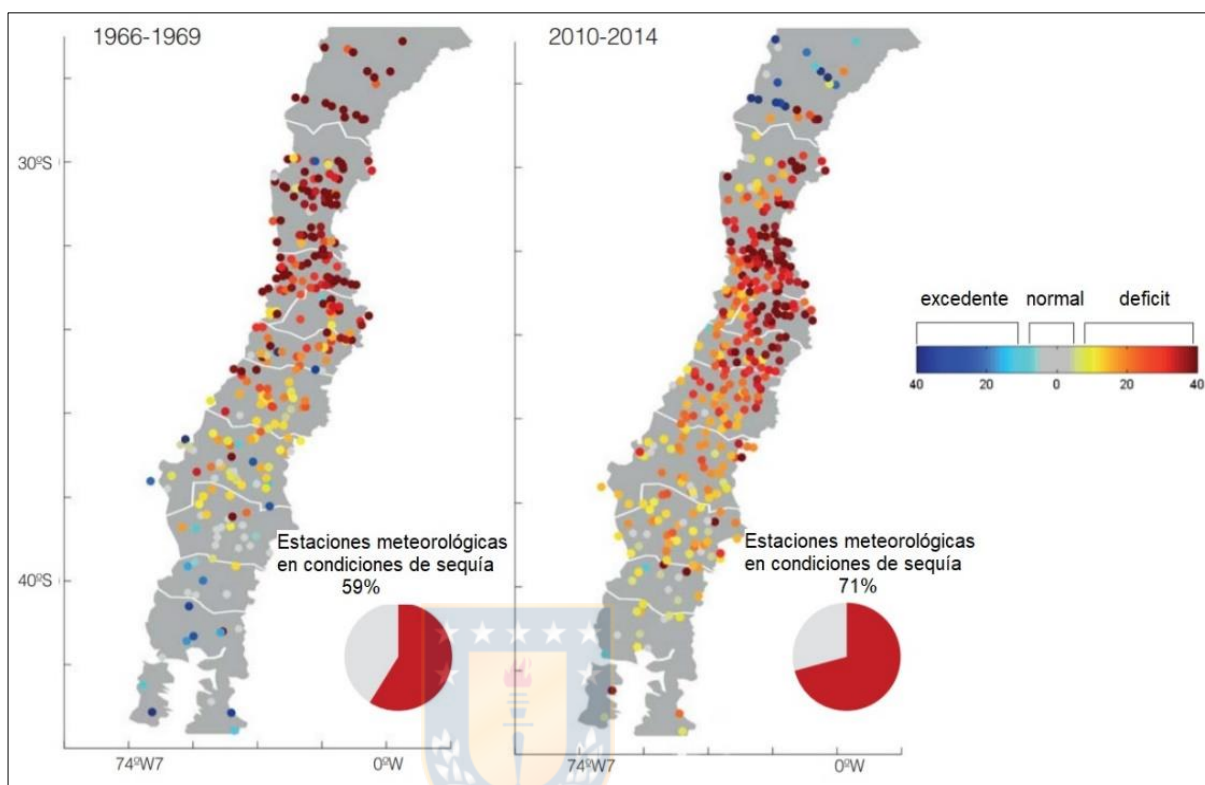


Figura 2. Promedio de déficit o excedente de precipitaciones para los período 1966-1969 y 2010-2014.

Fuente: CR2 (2015)

Este extenso fenómeno de sequía para las zonas que se extiende entre las latitudes 30 - 38°S ha generado una reducción en la disponibilidad de agua en comparación al periodo 2010 - 2014, disminuyendo los caudales medio mensuales hasta un 70% en los ríos de las regiones de Coquimbo y Valparaíso. Más al sur, el porcentaje disminuye a un 25%, mientras que para la zona austral del territorio chileno no se han cuantificado reducciones (CR2, 2015).

a) Proyecciones para la temperatura

Las proyecciones para esta variable muestran un aumento decreciente desde norte a sur en el territorio nacional. Se espera un aumento entre 1,5 a 4°C para la zona norte y el altiplano, mientras que en la zona sur y austral se proyecta

una variación entre 0,5 y 2°C para el periodo 2070 - 2100 (MMA, 2017). La Figura 3 muestra la proyección para la temperatura atmosférica esperada en el periodo 2070 - 2100 para todo el territorio nacional.

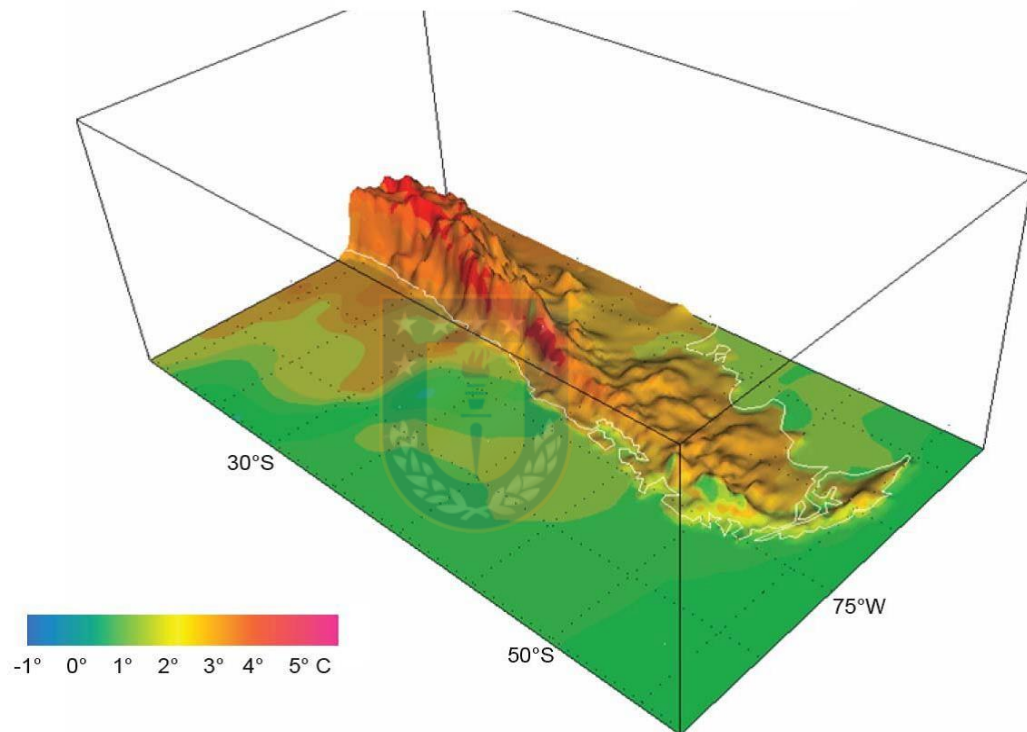


Figura 3. Proyección en temperatura para el territorio nacional a fines de siglo (años 2070-2100).

Fuente: Garreaud (2011)

b) Proyecciones para la precipitación

A futuro se espera que las precipitaciones se reduzcan entre 5 a 30% para el año 2030 en las zonas comprendidas entre Mataquitos y Aysén, esperando que esta reducción aumente hacia fines de siglo (CONAMA-DGF, 2006; MMA,

2014), mientras que para la zona norte se espera una mayor ocurrencia en los eventos de lluvias extremas, principalmente en la zona cordillerana (MMA, 2017). La Figura 4 muestra las proyecciones para la precipitación en todo el territorio nacional. Se observa 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 actuales registradas en ambas regiones (Garreaud, 2011).

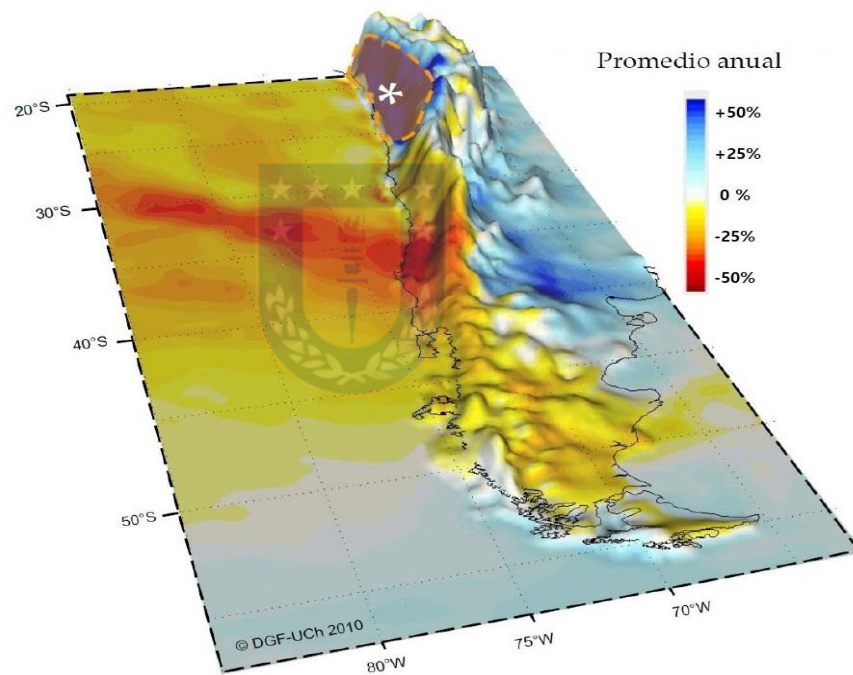


Figura 4. Proyección en precipitación para el territorio nacional a fines de siglo (años 2070-2100).

Fuente: Garreaud (2011)

c) proyecciones para caudales

Los cambios esperados en la temperatura y precipitación en el futuro influenciarán directamente la cantidad y distribución del recurso hídrico. En la zona norte se acrecienta la ocurrencia de periodos de escasez hídrica (MMA, 2017). En el caso de la zona comprendida entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos se proyecta una reducción significativa de los caudales medios mensuales en las cuencas ubicadas, efecto que se intensifica con las proyecciones de aumento de la elevación de la isoterma 0°C reduciendo las reservas de agua en cuencas nivales y nivo-pluviales, afectando directamente la disponibilidad de agua en los periodos de estiaje (CEPAL, 2012b). La zona austral del país se cuantifica un leve aumento en los caudales (MMA, 2017).

La Tabla 2 muestra diversos estudios realizados en el territorio nacional, en los cuales se modeló la respuesta de diferentes cuencas chilenas frente a los cambios esperados en el clima. Considerando el escenario más crítico, es decir, una reducción de precipitación de hasta un 60%, las mayores reducciones de caudal medio anual se esperan la cuenca del río Malleco-Vergara (-81%), Illapel (-52%), Limari (-46%) y la cuenca del río Lonquimay (-65%) esta última influenciada también por el aumento de la isoterma 0°, lo cual provoca la reducción de los depósitos de nieve en las zonas cordilleranas, afectando finalmente la escorrentía.

Tabla 2. Estudios de reducción de caudal sobre cuencas chilenas.

Cuenca	Reducción para el escenario climático más crítico	Fuente
Río Limarí	-45,5%	Vicuña <i>et al.</i> , 2010
Río Illapel	-31,6% a -51,8%	RHMA, 2010
Río Aconcagua	-20,1% a -43,5%	RHMA, 2010
Río Maule Alto	-38,3 %	CEPAL, 2012a
Río Laja	-36,6 %	CEPAL, 2012a
Río Malleco-Vergara	-80,96%	Stehr, 2008
Río Lonquimay	-65%	Stehr, 2008
Río Cautín	-12,8% a -29,6%	RHMA, 2010

Fuente: Elaboración propia en base a referencias



1.3 Usos de suelo.

1.3.1 Cambios en los usos de suelo.

Es sabido que la superficie terrestre juega un rol fundamental en los ciclos biofísicos y biogeoquímicos, en 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 poblacional a nivel global ha producido un aumento en la ocupación y transformación del territorio, siendo los cambios en el tipo de cobertura vegetal y el uso humano de los suelos una de las alteraciones ambientales más importantes de los últimos tiempos (Foley *et al.*, 2005; Diaz *et al.*, 2006; Grimm *et al.*, 2008; Harvey & Pilgrin, 2011). 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 cultivada o pastizales debido a la acción humana (Tsegaye *et al.*, 2010).

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 esencialmente de tipo antrópicas, en países como Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Paraguay y Perú, la agricultura y los matorrales han sustituido principalmente al bosque nativo, generando importantes pérdidas en la cubierta forestal (Hansen *et al.*, 2013), como lo ilustra la Figura 5. Se observa que Paraguay, Bolivia, Argentina y Brasil lideran la pérdida de área boscosa, mientras que Chile y Uruguay presentan ganancias en la cobertura forestal de un 3% y un 10% respectivamente, atribuidas principalmente a la expansión de bosques plantados para la exportación de madera.

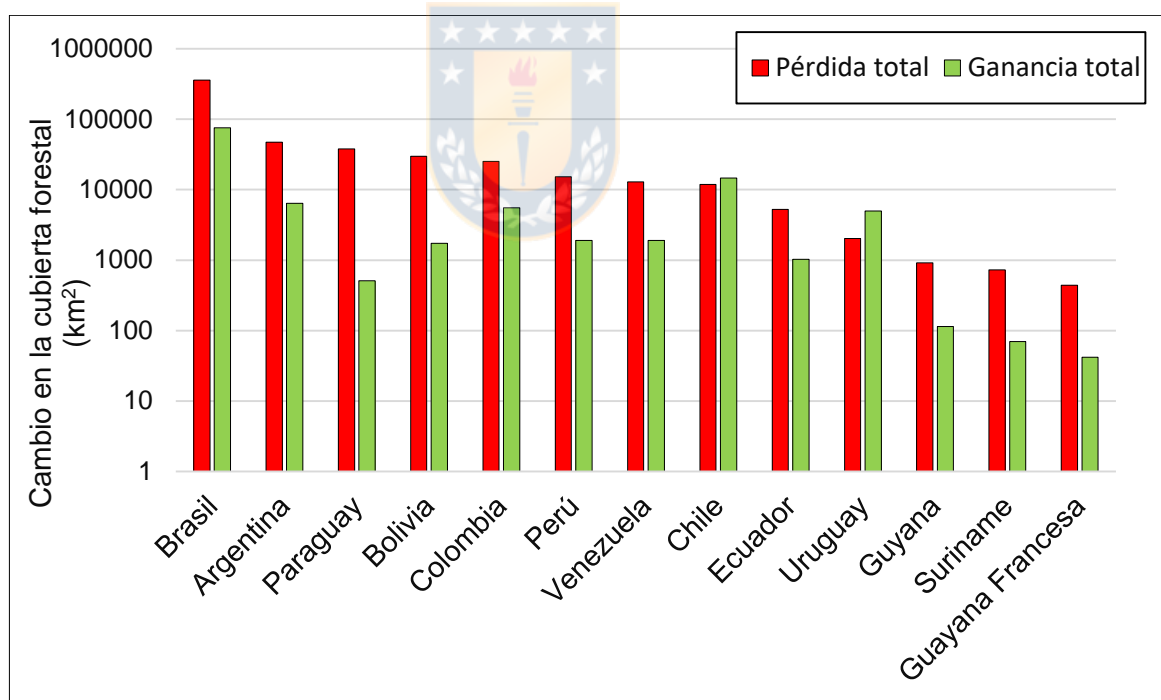


Figura 5. Pérdidas y Ganancias de la cubierta forestal en los países de Sudamérica durante el periodo 2000-2012.

Fuente: Elaborado a partir de Hansen *et al.*, (2013)

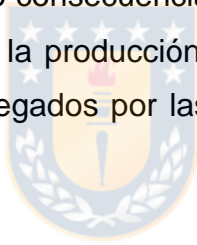
El remplazo que ha afectado a la diversidad de bosques de Sudamérica, principalmente a las grandes extensiones de la selva amazónica en Brasil, puede traer consecuencias en la circulación atmosférica y los ciclos climáticos regionales, pues la pérdida acelerada de los bosques podría conducir a una atmósfera 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).

1.3.2 Cambio de uso de suelo en Chile y su relación con la disponibilidad hídrica

En Chile los patrones generales del uso del territorio están fuertemente 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 de cobertura de suelo, en donde el bosque nativo y matorrales se han visto afectados por la expansión poblacional, agrícola y el remplazo 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).

Las coberturas vegetales poseen un rol fundamental en la disponibilidad de agua de una cuenca hidrográfica, teniendo la capacidad de modificar ciertos componentes del balance hídrico como lo son la evapotranspiración, infiltración y escorrentía (Fohrer *et al.*, 2001). La intervención o remplazo de cubiertas vegetales alteran las reservas de agua, por ejemplo, se ha estudiado que el cambio de uso de suelo atribuidos a ganancias y/o pérdidas en la cobertura

boscosa pueden modificar la distribución de las precipitaciones dentro de una cuenca y la escorrentía superficial (Scott, 2005; Huber *et al.*, 2010; Echeverría, 2008; Germer *et al.*, 2009). En cuanto al cambio de uso de suelo generado por la expansión de plantaciones forestales se ha cuantificado que, en periodos de raleo se ve un aumento considerable en los caudales, mientras que durante el crecimiento de los ejemplares se ve una disminución en la escorrentía (Webb, 2009; Webb & Kathuria, 2012; Webb, Kathuria, & Turner, 2012). Cambios en la composición de las especies forestales, el área basal y las talas explican parcialmente algunos de los cambios en el flujo, sin embargo, este crecimiento de caudales ocurridos en zonas que han sufrido el proceso de deforestación genera una erosión principalmente del territorio ribereño (Webb, 2009; Molina *et al.*, 2012) . Esto trae como consecuencia una acumulación de sedimentos en el recurso hídrico afectando la producción agrícola, ganadera y a los diversos servicios ecosistémicos entregados por las cuencas hidrográficas (Aerts *et al.*, 2011; Amare *et al.*, 2016).



Heilmayr (2016) estudio la transición de las plantaciones forestales entre las regiones de Valparaíso y los Lagos durante los periodos 1986 - 2001 y 2001 - 2011, dejando en evidencia que el avance de estos ejemplares ha ocurrido principalmente en la zona centro sur del país (Figura 6), experimentando un rápido crecimiento durante los dos periodos de estudio (4,3% anual y 2,2% anual respectivamente).

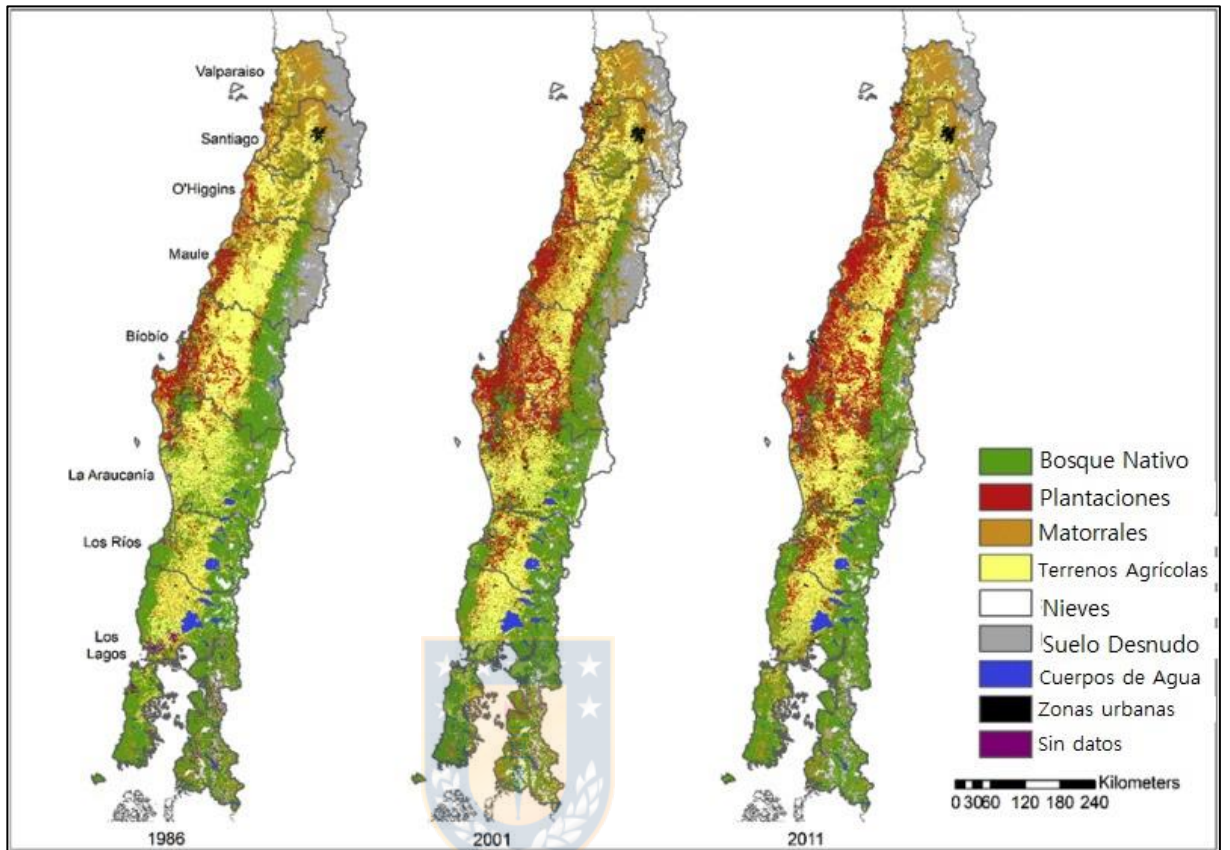


Figura 6. Transición de las plantaciones forestales en Chile para el periodo 1987-2011.

Fuente: (Heilmayr *et al.*, 2016)

La Figura 7 muestra los usos de suelos reemplazados por plantaciones forestales entre las regiones de Valparaíso y los Lagos. Se observa que las tierras agrícolas (45%), arbustos (31%) y bosques nativos (23%) fueron las principales coberturas reemplazadas, cambios concentrados principalmente en la región del Maule, Biobío y la Araucanía.

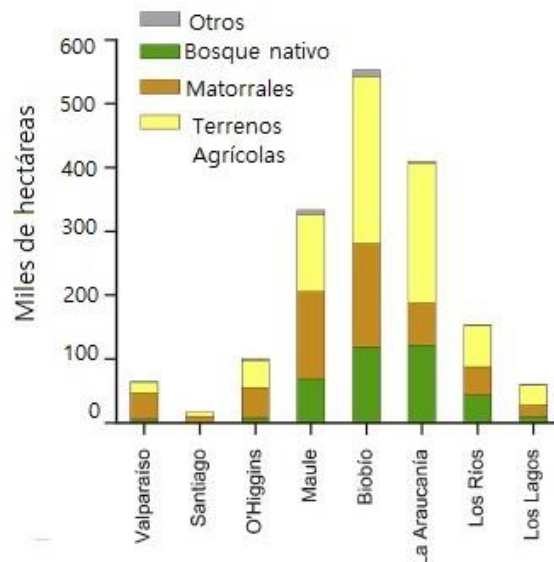


Figura 7. Usos de la tierra reemplazados por las plantaciones forestales.

Fuente: (Heilmayr *et al.*, 2016)

Dentro de las especies exóticas más utilizadas en las plantaciones forestales se encuentran el *pinus radiata* y *eucaliptus globulus*, las cuales tienen un efecto negativo sobre el balance hídrico, pues el consumo de agua por parte de plantaciones jóvenes de *pinus radiata* registra un incremento sostenido en el tiempo, siendo este un 80% más que el consumo de agua por parte de una pradera natural, esta pérdida de agua fue atribuida a mayores tasas de evaporación e intercepción y menores tasas de percolación de agua por parte de las plantaciones forestales (Huber *et al.*, 2008).

Huber *et al.*, (2010) evidenció que las plantaciones de *pinus radiata* y *eucaliptus globulus* interceptan respectivamente alrededor de un 17 % y un 11% de la precipitación caída, sus tasas de evapotranspiración varían entre un 64-65% para el caso de *pinus radiata* y entre 70 – 76% para el caso de *eucaliptus globulus*, generando una escorrentía equivalente a un 33% y un 23 % en relación a 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 poblado por las plantaciones forestales (Little *et al.*, 2009; Lara *et al.*, 2009), donde las mayores reducciones se observan principalmente en los periodos estivales (Huber *et al.*, 2008; Little *et al.*, 2009; Lara *et al.*, 2009; Huber *et al.*, 2010).

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 N° 701 en 1974, esto desencadenó que durante el periodo 1980 - 1997 se reforestaran 822.428 hectáreas (FAO, 2010) concentrándose un 88% entre las regiones del Maule y Los Lagos. Actualmente las plantaciones abarcan 2.8 millones de hectáreas equivalente al 17% del total de bosques de Chile (INFOR, 2018), este 17 % se ubica principalmente en las regiones del Biobío, La Araucanía y el Maule (Figura 8).

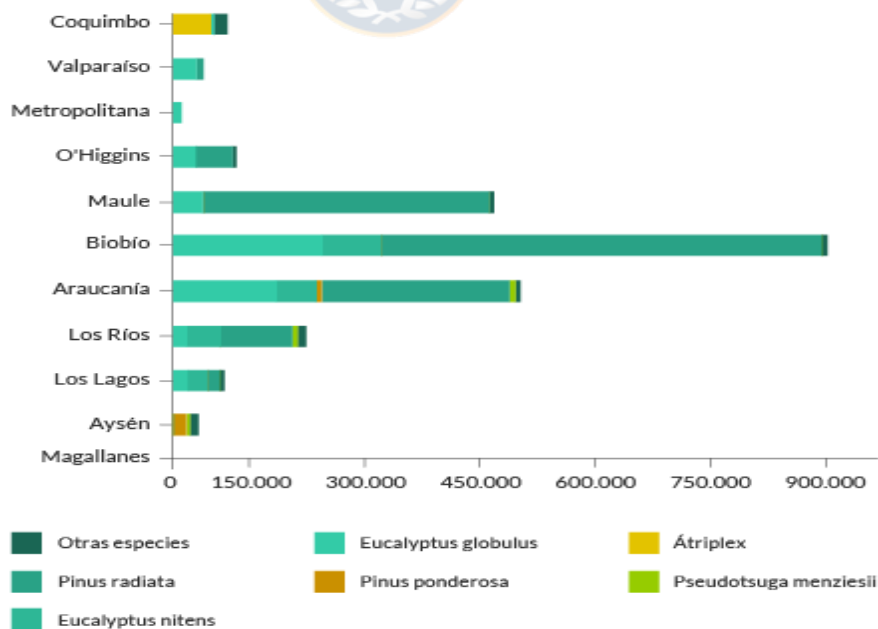


Figura 8. Distribución de las plantaciones forestales por región.

Fuente: INFOR (2018)

1.3.2.1 Plantaciones forestales en la región del Biobío

La región del Biobío actualmente concentra la mayor proporción de plantaciones forestales del país (36,6%), con una superficie plantada que bordea el millón de hectáreas, de las cuales un 65 % corresponde a especies de pino y un 25 % a especies de eucalipto (Odepa, 2018). La mayor parte de estas plantaciones está establecida en terrenos que poseen cierto grado de erosión, distribuyéndose principalmente en la cordillera de la costa y la precordillerana andina. Las plantaciones de pino en la región, equivalentes al 40% del total nacional (Odepa, 2018), se ubican en la parte media y baja de la cuenca del río Biobío, entre la ribera norte del río Laja y el río Duqueco (INFOR, 2018). La Figura 9 muestra la evolución de las plantaciones forestales en la región, se observa un importante incremento en los últimos años, equivalentes a un 10%.

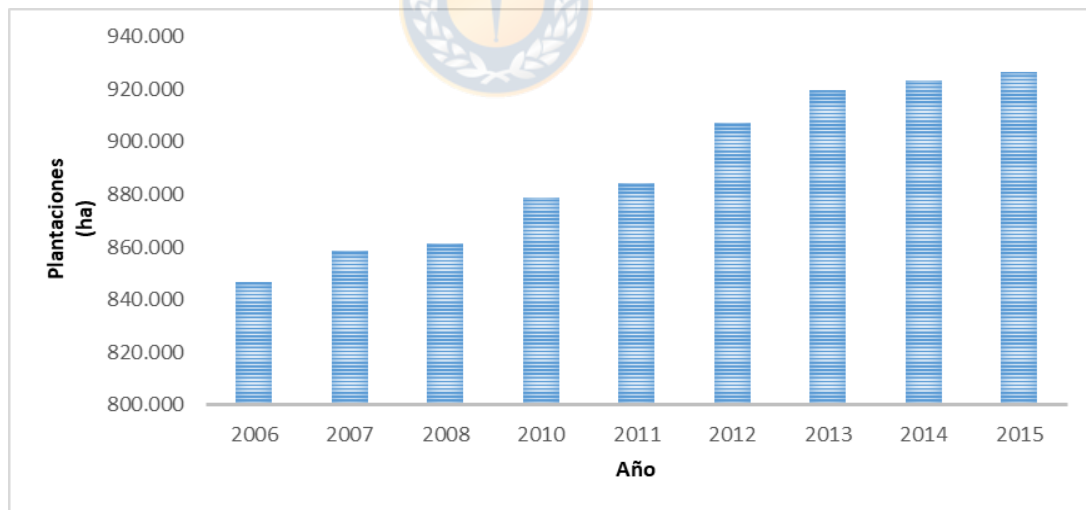


Figura 9. Evolución de las plantaciones forestales en la región de Biobío.

Fuente: INFOR (2016)

En la región existe una importante infraestructura forestal, 5 plantas de celulosa, 5 plantas de tableros de madera y alrededor de 300 aserraderos (INFOR, 2016). Se espera que la industria forestal en la región del Biobío siga en

aumento, debido a la aprobación del proyecto “MAPA” (Mega ampliación Planta Arauco), ubicado en la comuna de Arauco el cual se encuentra en fase de construcción, contemplando un aumento en la producción de celulosa de casi un 100% de su producción actual, alcanzando un total anual estimado de 2.100.000 toneladas de celulosa. Se espera que en el año 2021 este proyecto esté en su etapa de operación, lo cual generará un importante aumento de las plantaciones forestales en la región.

A pesar de las fuertes inversiones realizadas en el sector forestal, existe una carencia de estudios públicos que muestren el efecto que tendrá la expansión de las plantaciones en la región en la disponibilidad del recurso hídrico, sobre todo frente a las reducciones esperadas en los caudales producto del cambio climático. Riquelme (2018), utilizó el modelo hidrológico SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*) para estudiar los efectos del cambio climático sobre la cuenca del Rio Duqueco, encontrando una reducción de un 25,3% en el caudal aportante al rio Biobío para el escenario más crítico, es decir, una reducción de un 20% en las precipitaciones y un aumento de 1 °C en la temperatura. Mientras que para el escenario más favorable (reducción de un 10% para la precipitación y un aumento de 0,5°C en la temperatura) el caudal medio mensual podría reducirse en un 12,6%. Sin embargo, las modelaciones realizadas por Riquelme (2018) no consideraron un escenario de expansión forestal, lo cual podría aumentar las reducciones en la disponibilidad de agua sobre todo en los periodos estivales.

1.4 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 (Beven, 2001). En hidrología los modelos se utilizan para poder entender los procesos hidrológicos que operan a escala de cuenca, tales como escorrentía superficial, evapotranspiración, intercepción, entre otros, para así 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).

Singh (1989) estableció una clasificación para los modelos hidrológicos, en donde básicamente los modelos se dividen en dos tipos (materiales y simbólicos). Los modelos de tipo material corresponden a una representación del sistema real a una escala reducida (como por ejemplo las representaciones de cuencas a escala de laboratorio). Los modelos de tipo simbólico son la representación matemática del sistema (preservando las propiedades estructurales más importantes del sistema a modelar), en donde el conjunto de ecuaciones busca dar respuesta a las relaciones entre las variables de entrada y salida (Chow, 1988). Debido a que una representación física o a escala de cuenca es un trabajo muy costoso y limitado, los modelos de tipo simbólico emergen como una posibilidad más accesible y económica para la modelación, masificándose su uso para el estudio de cuencas bajo diferentes escenarios y variables que afectan el ciclo hidrológico (Ponce, 1989). La figura 10 muestra la clasificación general de los modelos hidrológicos.

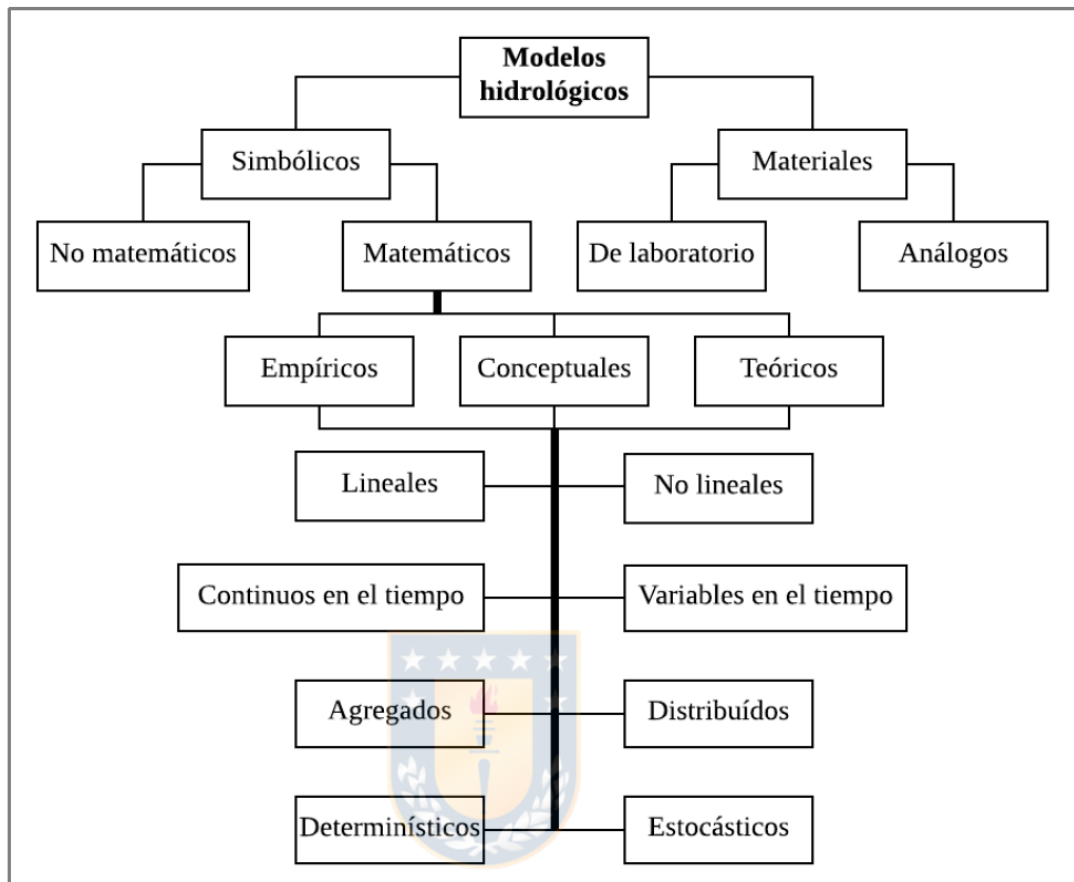


Figura 10. Clasificación de modelos hidrológicos.

Fuente: Singh (1989)

Ponce (1989) define la clasificación de los 3 principales modelos matemáticos:

1. Empíricos o de caja negra: corresponde a los modelos más simples, consisten en una o más ecuaciones algebraicas que contienen uno o más parámetros, que pueden ser determinados por las relaciones entre las entradas y salidas del modelo.
2. Teóricos o de caja blanca: modelos físicamente basados, tiene una estructura lógica similar al sistema real y reproducen las leyes físicas que gobiernan el fenómeno estudiado.

3. Conceptuales: Son modelos que buscan la representación simplificada de los procesos físicos, siendo intermediarios entre los modelos de tipo Empírico y teóricos.

De acuerdo a la escala temporal los modelos pueden clasificarse en:

1. Modelos continuos en el tiempo: Los parámetros del modelo y la relación entradas - salidas permanecen constantes en el tiempo, en donde el objetivo de este tipo de modelos es tener en cuenta el balance hídrico a largo plazo.
2. Modelos variables en el tiempo: Los parámetros y la relación entrada – salidas varían en el tiempo, diseñados principalmente para simular en eventos individuales la transformación de la lluvia en escurrimiento.

Ahora, teniendo en cuenta que los fenómenos hidrológicos pueden variar en las tres dimensiones espaciales, los modelos se tornan mucho más complejos. De acuerdo a Chow *et al.*, (1988) según su variación espacial los modelos estos se pueden clasificar en:

1. Modelos Agregados: En donde el sistema es promediado en el espacio o considerado como un punto único sin dimensiones.
2. Modelos Distribuidos: Considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y las variables del modelo se definen como funciones de las dimensiones espaciales.

La representación gráfica de los modelos agregados y distribuidos se presenta en la Figura 11.

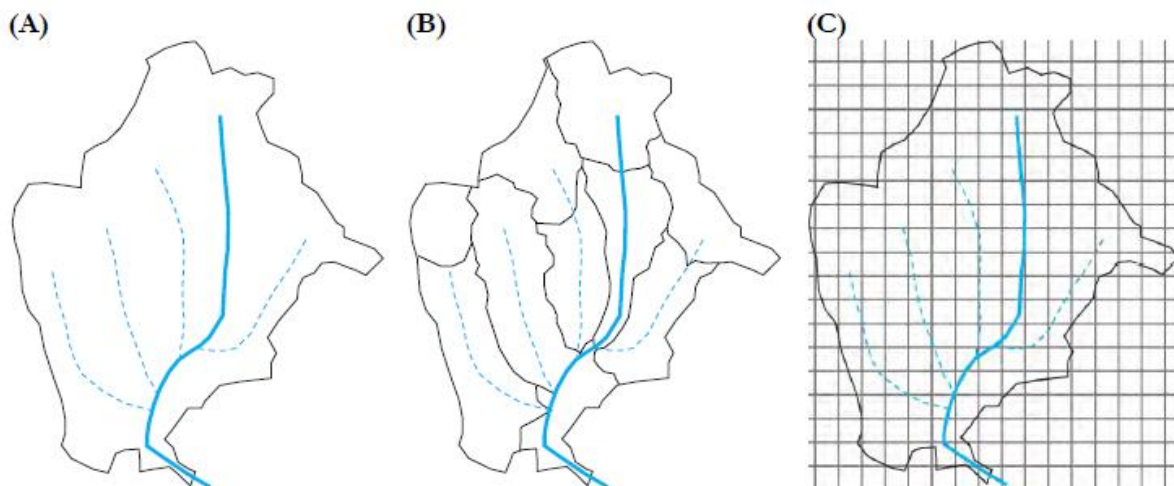


Figura 11. Tipos de modelos hidrológicos a escala de cuencas.

Fuente: CRAHI (2017)

En el caso de los modelos agregados o agrupados (Figura 10-A), toda la cuenca hidrográfica se toma como una sola unidad en la que no se tiene en cuenta la variabilidad espacial y, por lo tanto, solo se puede obtener un resultado promedio al modelar el caudal.

Los modelos semi-Distribuidos (Figura 10-B) y distribuidos (Figura 10-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 un cuencas frente a forzantes como el cambio de los usos de suelo y/o cambio climático, los modelos semi distribuidos y distribuidos son los más capacitados para predecir y conocer los efectos que ocurrirán en la disponibilidad hídrica del sistema (Beven, 1984; Yang *et al.*, 2000; Stehr, 2008; Golmohammadi *et al.*, 2014).

2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.

Debido a la reducción proyectada en los caudales de la cuenca del río Duqueco, ¿Cuánto incrementara el déficit hídrico producto de una expansión forestal?

3. OBJETIVOS.

3.1. Objetivo General.

- Estimar el efecto que producirá una expansión forestal en conjunto con el cambio climático sobre los caudales futuros de la cuenca del río Duqueco.



3.2. Objetivos específicos.

- Evaluar el desempeño del modelo SWAT para la simulación de caudales mensuales bajo diferentes usos de suelo en la cuenca del río Duqueco.
- Generar un posible escenario de expansión forestal para la cuenca del río Duqueco.
- Estimar la disponibilidad hídrica futura para el año 2030 en la cuenca del río Duqueco considerando los cambios esperados en el clima y en el uso del suelo.

4. METODOLOGÍA.

4.1 Descripción del Área de estudio.

La cuenca del río Duqueco se encuentra ubicada en la Región del Biobío, específicamente entre las ciudades de Los Ángeles, Quilleco y Santa Bárbara, pertenece a una Subcuenca del río Biobío con área aportante cercana a los 1.610 km², nace en la vertiente poniente de la sierra velluda, recorre aproximadamente unos 50 km entre cerros y quebradas con fuerte pendiente para luego entrar al valle central de la cuenca en donde escurre con un ancho que va desde los 60 a los 120 m y una longitud del cauce principal cercana a los 120 km, el caudal medio anual obtenido en la estación Villacura es de 64 m³/s (Niemeyer, 1980) , los principales tributarios caen desde la ribera norte en forma de esteros (Cañicura y Quillaco), pero el principal efluente es el río Coreo el cual posee un largo aproximado de 40 km proveniente de una laguna cordillerana (Figura 12).

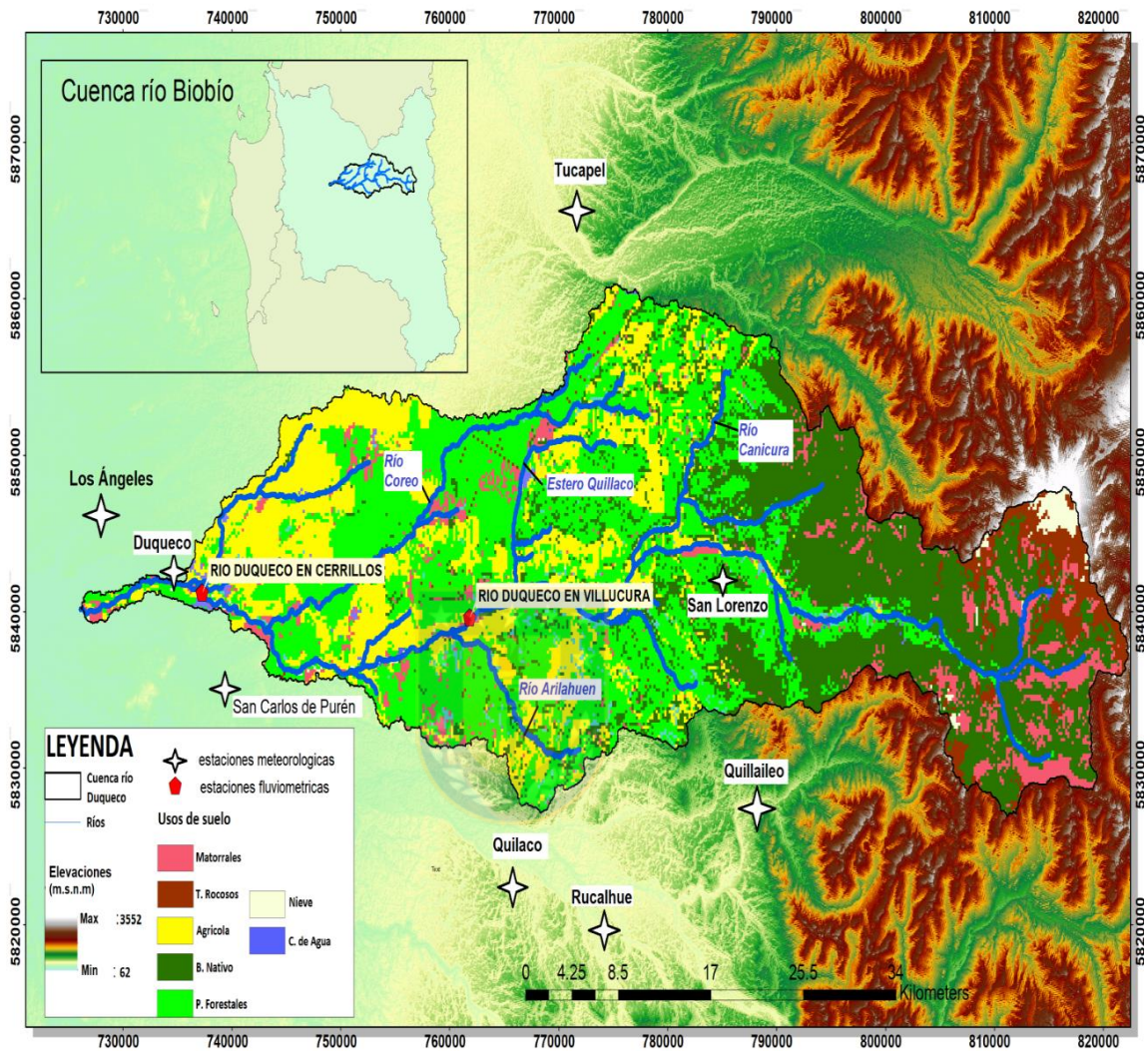


Figura 12. Mapa Subcuenca del río Duqueco.
Fuente: Elaboración Propia en base a IDE – CHILE, 2019

La Tabla 3 muestra las estaciones meteorológicas y fluviométricas presentes en la cuenca, la estación fluviométrica río Duqueco en Cerrillos se ubica en la parte baja, la estación río Duqueco en Villacura se ubica en la parte media de la cuenca, mientras que las estaciones meteorológicas se distribuyen en toda el área de estudio (Figura 12).

Tabla 3. Estaciones Meteorológicas y fluviométricas ubicadas en el área de estudio.

Nombre Estación	Tipo	UTM Este	UTM Norte	Registro temporal de datos
Río Duqueco	Meteorológica	205345	5840337	1962-1988
Río Duqueco en Cerrillos	Meteorológica	207170	5839444	2009-2018
San Lorenzo en Biobío	Meteorológica	255345	5844798	1992-2015
Río Duqueco en Villacura	Fluviométrica	231828	5839514	1966-2018
Río Duqueco Cerrillos	Fluviométrica	207170	5839444	1941-2018

Fuente: Elaboración propia en base a los registros de la DGA.

Actualmente existen 4 centrales hidroeléctricas operativas en la cuenca, en la parte media del cauce principal del río Duqueco se ubica la central “Mampil” de tipo convencional, con una capacidad de generación de 55 MW, hacia el norte se ubica la central de pasada “Los padres” ubicada en el estero Los padres, con una capacidad de generación de 2,2 MW, en la parte media alta del cauce principal se encuentra la central de tipo convencional “Peuchén” con una capacidad de generación igual a 85 MW y en la parte alta de la cuenca se ubica la central de pasada “Lleuquereo” la cual genera 1,8 MW. Además, el desarrollo hidroeléctrico en el río Duqueco sigue en aumento, pues se encuentran 2 centrales aprobadas por el SEA, las cuales corresponden a la “Central Hidroeléctrica las Juntas” y “Ailín” con una capacidad de generación igual a 6,6 MW y 7 MW, las dos centrales son de tipo no convencional y serán ubicadas en la parte alta de la cuenca, en la confluencia del río Duqueco con el estero Quilaquin y en el estero Ailín respectivamente.

4.1.1 Antecedentes climáticos

La clasificación de Köppen para la región del Biobío, específicamente para la ciudad de los Ángeles, define un clima cálido y templado con lluvias invernales (Csb). Presenta inviernos fríos o templados y veranos secos (Rioseco, 2019). Los meses de invierno son mucho más lluviosos que los meses de verano. El registro meteorológico para la estación Los Ángeles (Figura 13) indica que la temperatura promedio es 13,6 °C, pudiendo llegar a 21 °C en los meses de verano y a 8,1 °C en invierno. Mientras que la precipitación anual puede llegar a los 1.207 mm (Climate - Data, 2019)

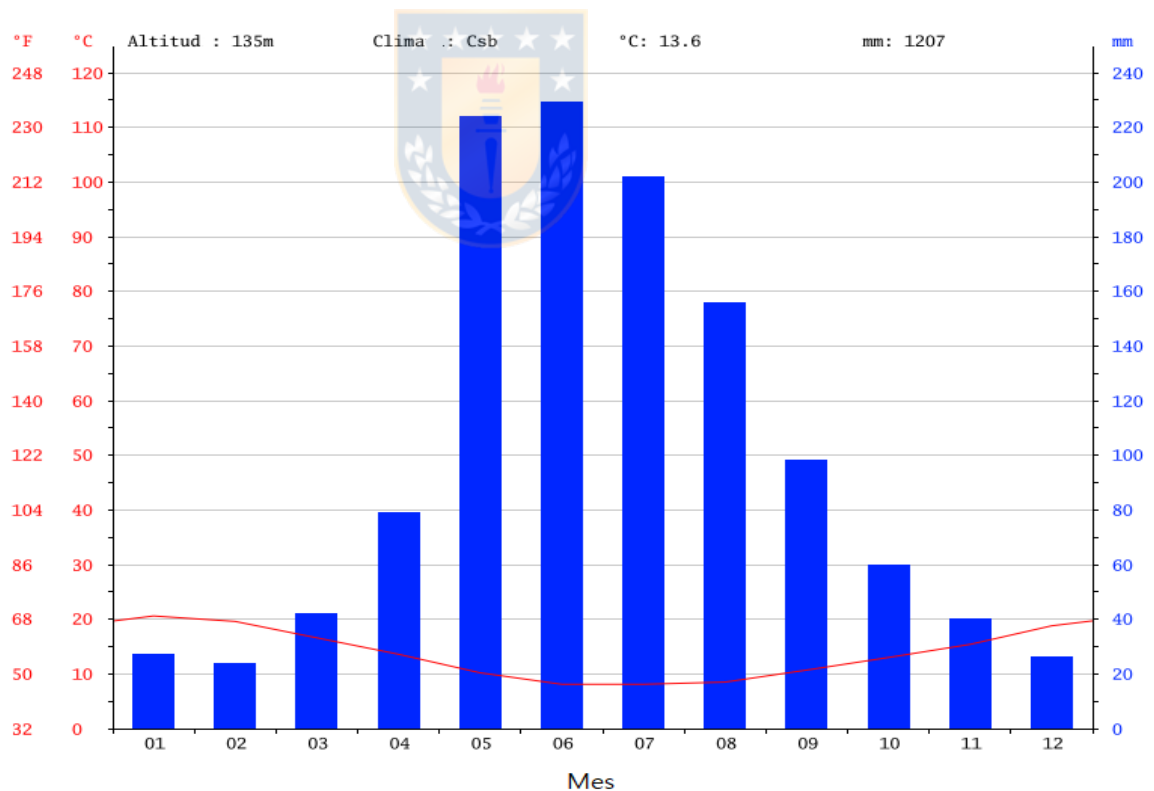


Figura 13. Climograma estación Los Ángeles.

Fuente: Climate-Data (2019)

La Figura 14 muestra que el mes más seco es febrero, con 24 mm de lluvia y el más lluvioso es junio con 230 mm, existiendo una diferencia de 206 mm de precipitación entre los meses más secos (Febrero) y más húmedos (Mayo y Junio). Las temperaturas a lo largo del año varían 12,5°C entre el mes más cálido (Enero) y el mes más frío (Junio).

Según el balance hídrico de Chile (1986) las temperaturas y precipitaciones correspondientes al área de estudio varían entre 4°C - 15°C y 1.200 – 4.000 mm/años respectivamente, mientras que las tasas de evapotranspiración se concentran entre los 400 – 600 mm/año (Figura 14). Además, la precipitación aumenta a mayor altitud, mientras que la temperatura y evapotranspiración disminuyen con esta variable.



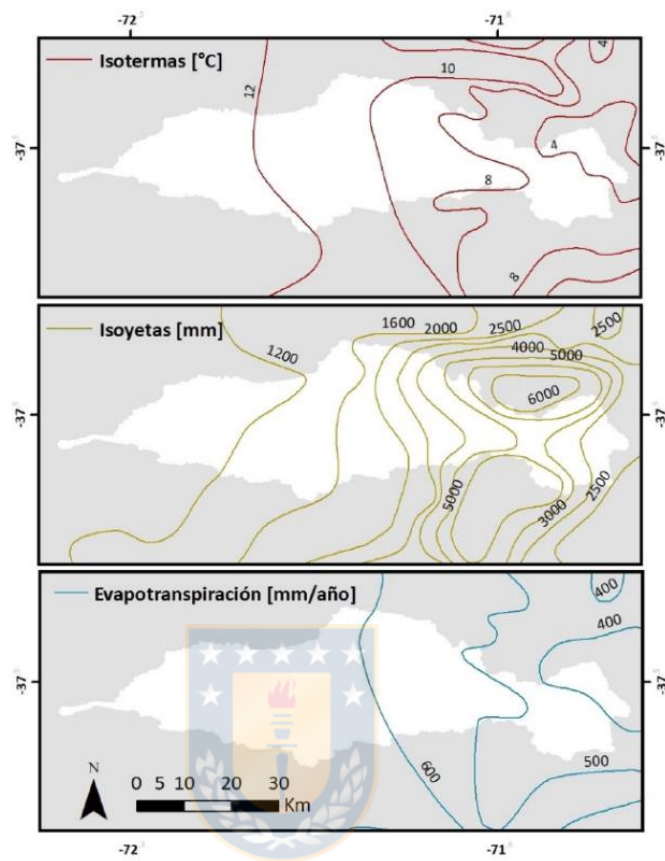


Figura 14. Isotermas, Isoyetas y Evapotranspiración para la cuenca del río Duqueco.

Fuente: Balance Hídrico de Chile (1987)

4.1.2 Antecedentes hidrológicos

La cuenca del río Duqueco posee un régimen hidrológico de carácter pluvial, los caudales mayores ocurren en los meses donde la precipitación aumenta (invierno), mientras que los caudales con menor flujo se presentan en los periodos estivales, como se puede observar en las Figuras 15 y 16. Los caudales registrados en la estación río Duqueco en Cerrillos son mayores debido a que se encuentra ubicada más cerca de la desembocadura.

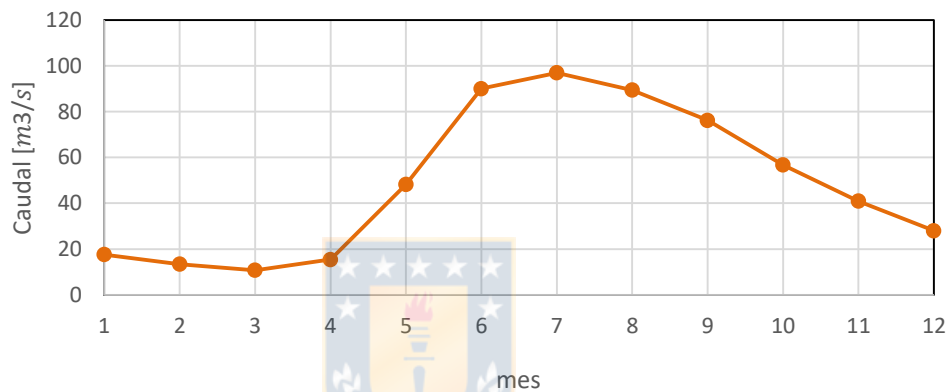


Figura 15. Hidrograma estación río Duqueco en Villacura para el periodo 1981-2016.

Fuente: Datos obtenidos desde DGA (2018)

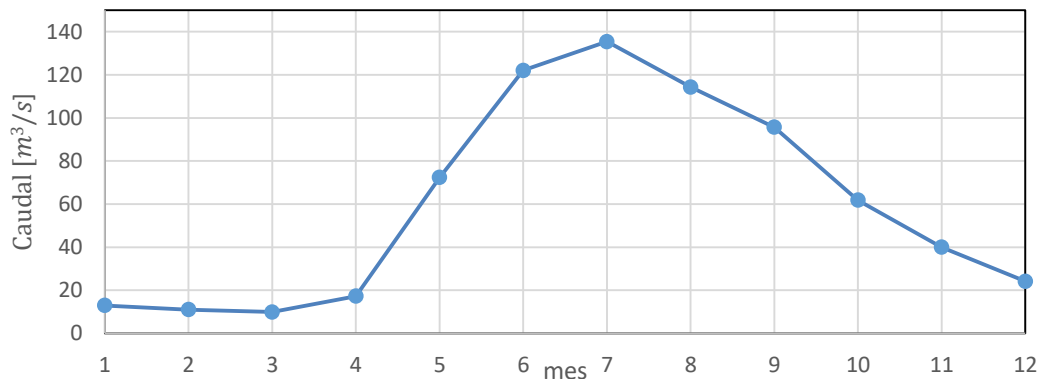


Figura 16. Hidrograma estación río Duqueco en Cerrillos para el periodo 1981-2016.

Fuente: Datos obtenidos desde DGA (2018)

La Figura 17 muestra los caudales medios estacionales registrado por las estaciones fluviométricas presentes en la cuenca, el caudal promedio anual para la estación Villacura es de 60 m³/s mientras que para la estación Cerrillos es de 49 m³/s. Los caudales máximos se presentan en la estación invernal, 124 y 92 m³/s respectivamente. Por otro lado, en los meses de verano el caudal presente en la estación Villacura supera al registrado en la estación Cerrillos, debido a que en estos meses los derechos consuntivos de agua aumentan en el tramo del río Duqueco comprendido entre estas estaciones.

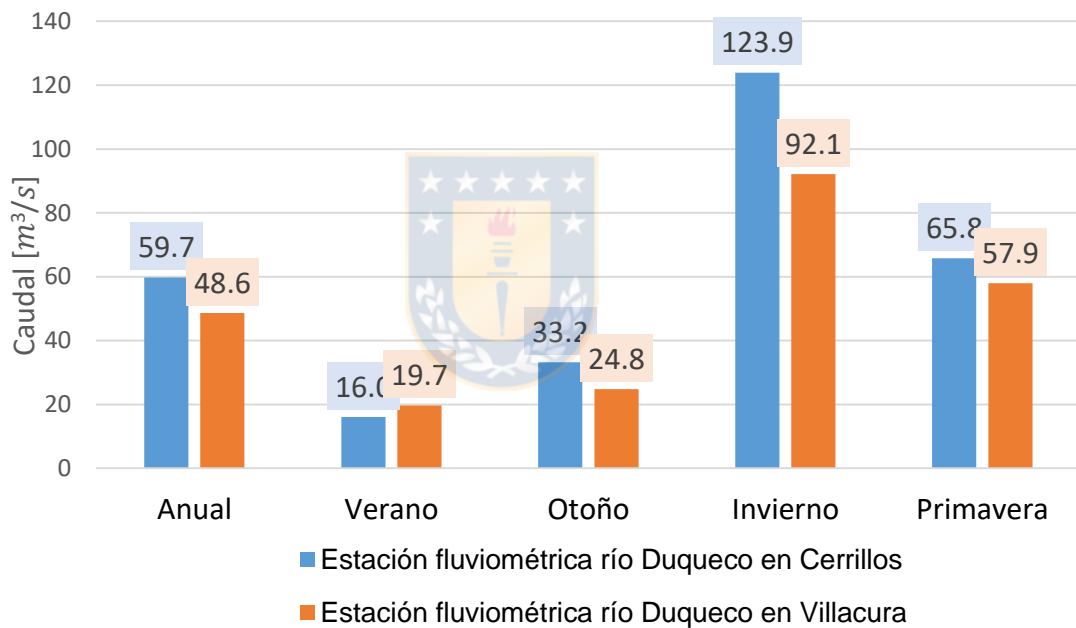


Figura 17. Caudal Medio estacional registrado en las estaciones fluviométricas del río Duqueco.

Fuente: Datos obtenidos desde DGA (2018)

4.1.3 Usos de suelo

La Figura 18 muestra los usos de suelo presentes en la cuenca. Los principales usos de suelos corresponden a: ocupación agrícola (23%), principalmente cultivos de remolacha, trigo y elaboración de ensilaje para alimentación de ganado, ubicados principalmente en la zona baja de la cuenca (comuna de los Ángeles); Plantaciones forestales (38%), emplazadas principalmente en la parte media de la cuenca (Precordillera, comuna de Quilleco); Bosque nativo (24%), el cual se encuentra distribuido en la zona cordillerana media y alta, entre las comunas de Quilleco y Santa Bárbara.

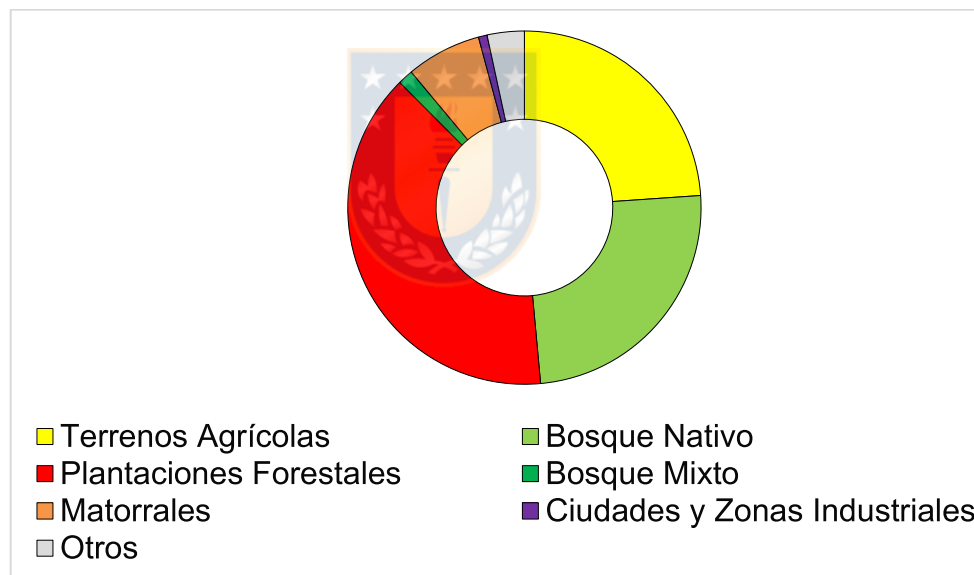


Figura 18. Distribución de los usos de suelo presentes en la cuenca del río Duqueco.

Fuente: Elaboración propia en base al catastro público de CONAF (año 2015), obtenido de IDE – CHILE

Por lo tanto, se puede determinar que el uso de suelo presente en la cuenca corresponde a terrenos en mayor medida silvoagropecuarios, esto influenciado principalmente por el tipo de clima templado mediterráneo, el cual predominante en la zona de estudio.

4.2 Modelo SWAT

SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*) es un modelo hidrológico, semi-distribuido, físicamente basado y con altos niveles de complejidad en sus ecuaciones, fue desarrollado por el departamento de agricultura de los estados unidos (USDA) a principios de los años 90, para cuantificar los efectos que pudiesen tener las prácticas agrícolas sobre el paisaje fluvial. El modelo utiliza las fórmulas establecidas por Neitsch *et al.*, (2005) para estimar los diferentes procesos del ciclo hidrológico (infiltración, evaporación, evapotranspiración, flujo subterráneo, escorrentía superficial, entre otros). Autores como Jha *et al.* 2006; Yang *et al.*, 2010; Golmohammadi *et al.*, 2014; muestran la versatilidad de este modelo para simular la escorrentía bajo diferentes condiciones, sobre todo en aplicaciones relacionadas a los usos de suelo.

Los principales datos de entrada que requiere el modelo son: información climática (precipitaciones, temperaturas extremas, velocidad del viento, radiación solar y humedad) e información espacial (tipos de suelo, usos de suelo y pendientes).

El modelo divide la cuenca en sub-cuencas, las que son divididas en unidades de respuesta hidrológica (URH), donde cada URH corresponde a combinación entre tierra, suelo y pendiente. Mientras mayor sea el número de URH, mayor precisión tendrá el modelo para simular la distribución espacial de la escorrentía en la cuenca de estudio.

La simulación del ciclo hidrológico realizado por el modelo en la cuenca se divide en dos etapas principales:

1. Fase de terrestre

Esta fase controla la cantidad de agua que llega al canal principal de cada sub-cuenca como lo muestra la Figura 19 y, se estima por la ecuación del balance hídrico (ec.1), la cual determina el contenido final de agua en el suelo.

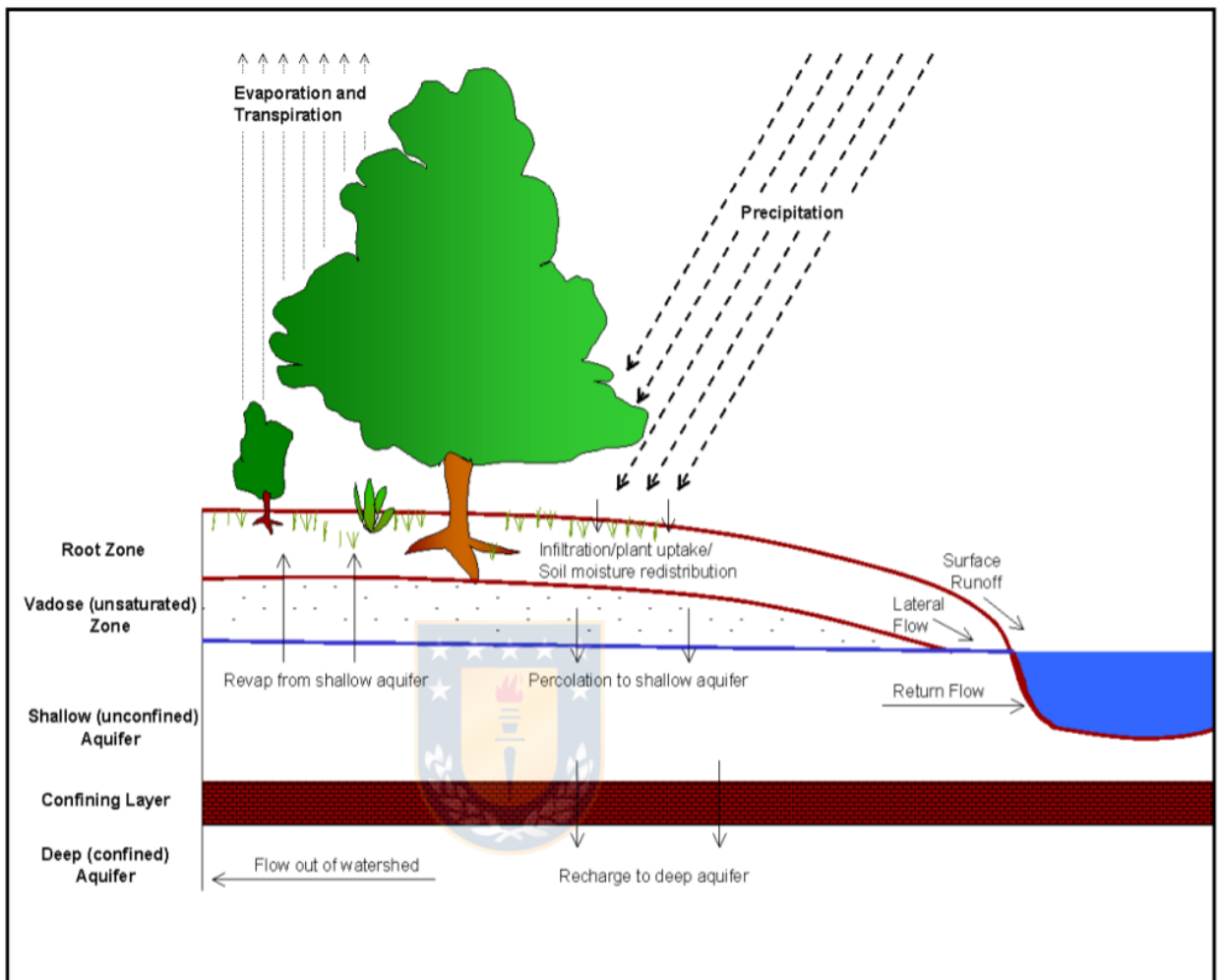


Figura 19. Simulación del ciclo hidrológico en el modelo SWAT.

Fuente: Neitsch *et al.* (2005)

$$SW_t = SW_o + \sum(Rd - Q_{sup} - Ea - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{ec.1}$$

Donde, SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm), SW_o es el contenido inicial de agua en el suelo en un día i (mm), Rd es la cantidad de precipitación en un día i (mm), Q_{sup} es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día i (mm), Ea es la cantidad de evapotranspiración en 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 relevantes para 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 la precipitación diaria, 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 (sólido/gas) de las superficies de hielo y nieves. Existen diferentes métodos con los cuales se puede determinar esta variable, tales como el método de Penman-Monteith, Priestly-Taylor o el método de Hargreaves. El primer método requiere de radiación solar, temperaturas medias y extremas, humedad relativa y velocidad del viento como datos de entrada, el segundo es un método empírico simplificado que no requiere datos de viento, mientras que para el método de Hargreaves sólo se necesita como dato de entrada la radiación solar y temperaturas medias y extremas. Este último método fue el utilizado para determinar la evapotranspiración en la cuenca del río Duqueco, debido a que sólo existen datos consistentes de radiación solar y temperatura.

- **Escorrentía**

La escorrentía es simulada para cada URH en forma de volúmenes 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.

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

Donde 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, y se estima por:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad \text{ec.3}$$

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

$$Q_{surf} = \frac{(R_{día} - 0.2S)^2}{(R_{día} + 0.8S)} \quad \text{ec.4}$$

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 de 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 sub-cuenca alcanza su tiempo de concentración.

2. Fase de enrutamiento

Después que el modelo determina los volúmenes de agua que fluyen al cauce principal de cada sub-cuenca, se distribuyen por toda la red hídrica hasta el punto de salida. Al efectuar este movimiento de 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 complementado 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.

4.3 Calibración y Validación del Modelo SWAT para diferentes coberturas de uso de la tierra.

4.3.1 Datos de entrada

La modelación se efectuó a través de la interfaz SIG del software ArcGIS 10.4.1. El cual posee un complemento del modelo SWAT llamado ArcSWAT (versión 2012), los datos de entrada al modelo son los mencionados en la Tabla 4, los datos meteorológicos correspondientes a humedad relativa, velocidad del viento y radiación, fueron simulados por el modelo debido a la ausencia de estas variables para el área de estudio.

Tabla 4. Datos de entradas al modelo SWAT, utilizados para la modelación de caudal en la cuenca del río Duqueco.

	Variable de entrada	Descripción	Fuente
Datos meteorológicos	Precipitación	Precipitación diaria para la cuenca para el periodo 1984 - 2016	Riquelme (2018), en base a la base de datos global CHRIPS
	Temperaturas extremas	Temperaturas mínimas y máximas registradas en la estación meteorológica Quilaco para el periodo 1984 - 2016	Riquelme (2018), en base a registros de la DGA
Datos Espaciales	DEM	Modelo de elevación digital de la cuenca de resolución 30 x 30 m. (Figura 21)	Satélite SRTM en USGS. Disponible en https://earthexplorer.usgs.gov/
	Tipo de suelo	Capa de los tipos de suelo existentes en la cuenca. (Figura 22)	CIREN (1999)
	Uso de suelo	Capa de usos de suelo de los años 1994 y 2016 para la cuenca, elaboradas por CONAF (Corporación Nacional Forestal) (Figura 23)	IDE – Chile Disponible en http://www.ide.cl/descarga/capas.html

Fuente: Elaboración propia

a) Datos meteorológicos

Debido a que la información de precipitación de las estaciones de la DGA no presenta una distribución que represente el comportamiento espacial de esta variable en la cuenca y existen periodos sin datos (considerando que el modelo no permite periodos sin registros de precipitación) se utilizó la base de datos de precipitación CHIPRS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station*). Esta base de datos posee una resolución temporal diaria desde 1981 – 2016 y espacial de 0,05° (Riquelme, 2018).

La Figura 20 compara los datos de la base de datos global versus las precipitaciones observadas en la estación los Ángeles ubicada en la cuenca del río Duqueco, se aprecia que la base de datos global tiende a subestimar los peak de precipitación.

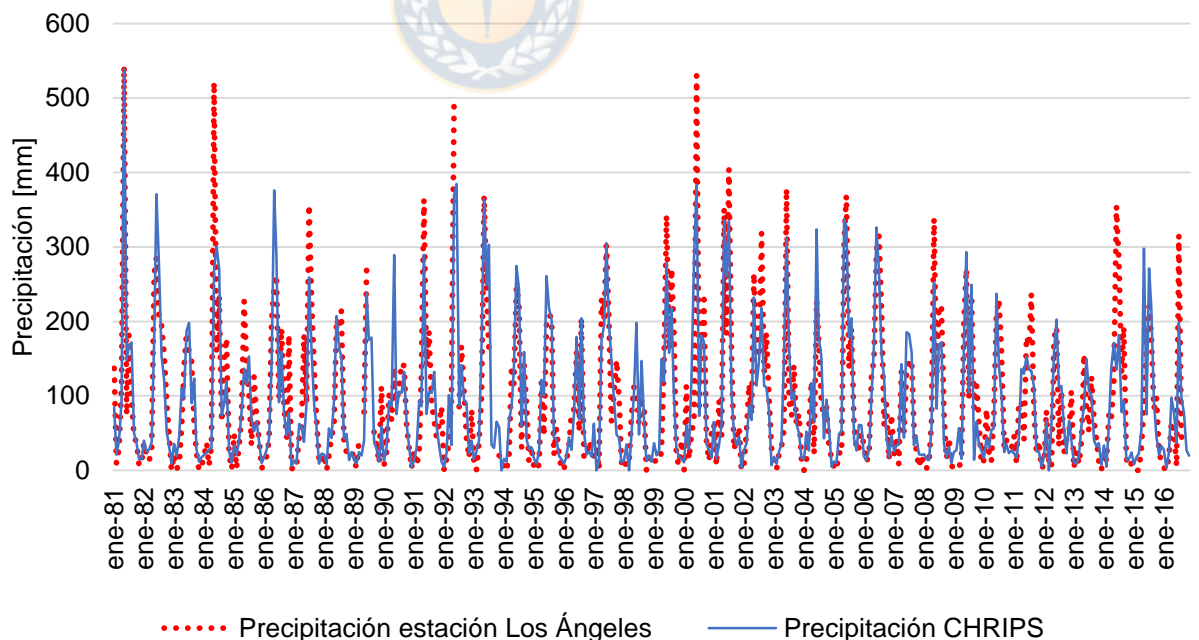


Figura 20. Registro de precipitaciones CHRIPS y DGA en la cuenca del río Duqueco (Estación meteorológica Los Ángeles).

Fuente: Riquelme (2018), en base a registros DGA y CHRIPS

Los datos de temperatura extremas provienen de una única estación con influencia espacial sobre la cuenca (Estación Quillaco), con un registro desde 1948 hasta la actualidad. Donde sólo se consideraron los datos de 1983 al 2016. Además, debido a los vacíos de información presentes en la serie de datos, se utilizó el método del gradiente térmico (Riquelme, 2018), utilizando los registros de las estaciones que se presentan en la Tabla 5 para el relleno de los datos termométricos faltantes.

Tabla 5. Estaciones termométricas utilizadas en relleno de datos de temperatura.

Estación	UTM Este	UTM Norte	Inicio de registro	Fin de registro	Altitud
Diguillín	264442	5916375	Feb – 1965	Vigente	670 msnm
Parque Nahuelbuta	679503	5811757	Nov – 2002	Vigente	1177 msnm
La Punilla	291934	5940438	Abr - 1959	Nov-2011	151 msnm

Fuente: DGA (2018)

b) Datos Espaciales

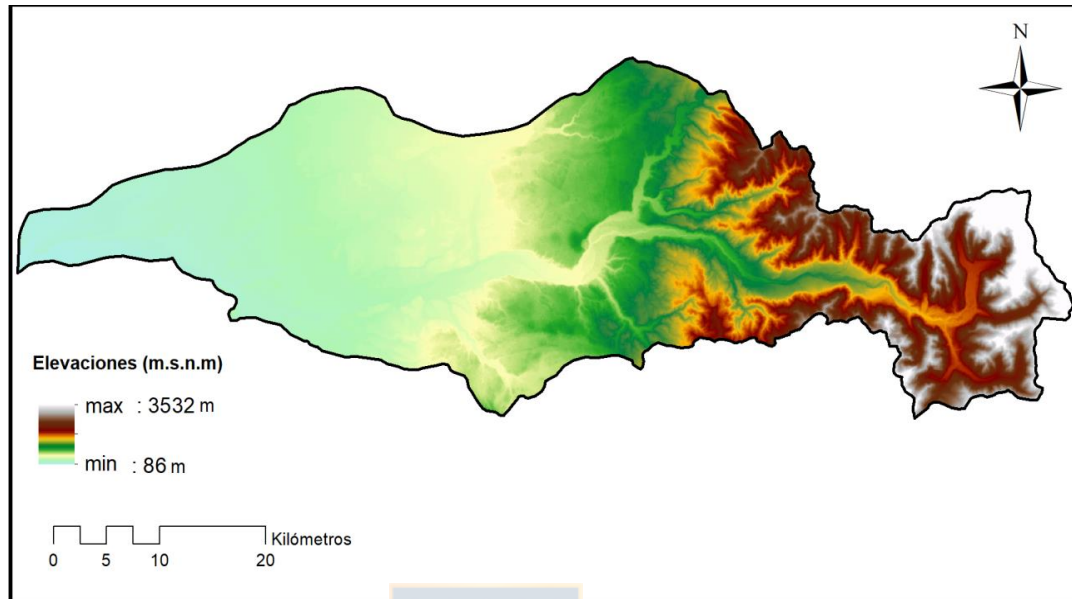


Figura 21. Modelo de elevación digital (DEM).
Fuente: USGS

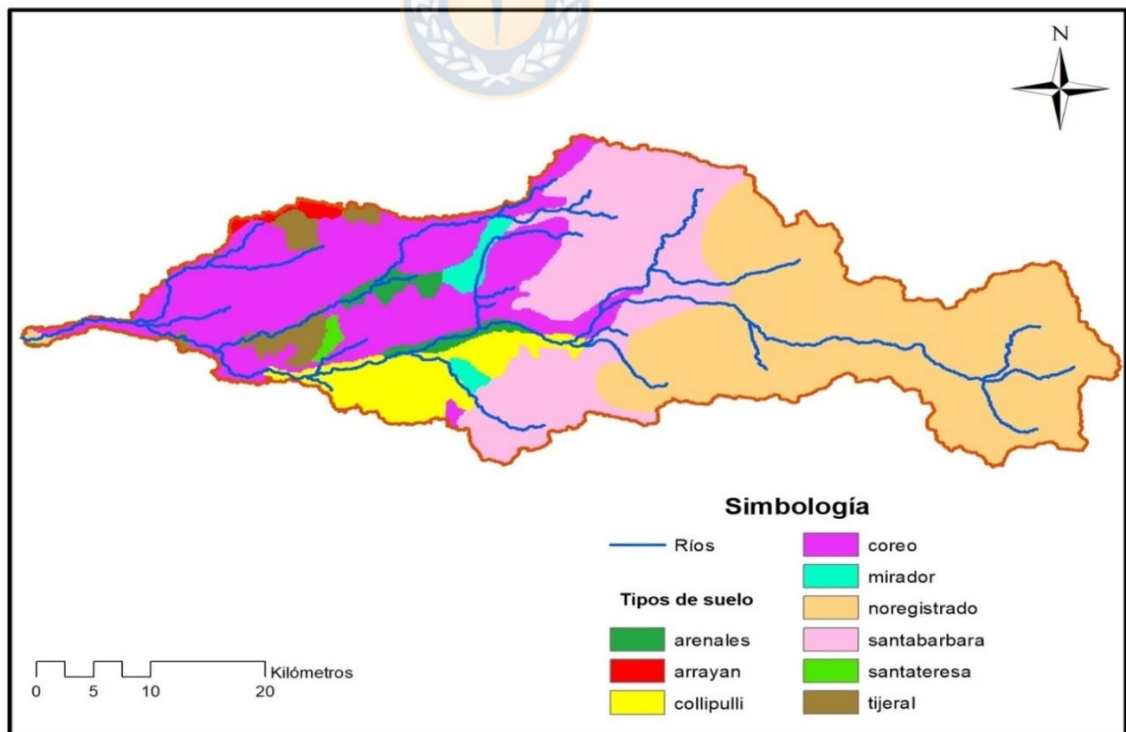


Figura 22. Tipos de suelo presentes en la cuenca del río Duqueco.
Fuente: CIREN (1999)

Tabla 6. Tipos de suelos presentes en la cuenca del río Duqueco.

Suelo	Descripción	Drenaje	Permeabilidad	Escurrimiento Superficial
Collipulli	Suelo originado a partir de cenizas volcánicas, de textura moderadamente fina en superficie y muy fina a medida que se avanza en profundidad	Bueno e imperfecto	Moderada	Moderado
Coreo	Suelo aluvial profundo con texturas gruesas en todo el perfil	Excesivo	Muy rápida	Lento
Mirador	Suelo sedimentado con textura franco arcillosa en superficie y arcillosa en profundidad	Moderado a imperfecto	Lenta	Rápido
Santa Bárbara	Suelos profundos formados de cenizas volcánicas de textura franca en superficie y franco limosa en profundidad	Bueno	Moderada	Moderado
Santa Teresa	Suelo aluvial de textura moderadamente gruesa	Pobre	Moderada	Moderado
Tijeral	Suelo de origen aluvial de textura franco limosa en superficie y franco arcillosa en profundidad	Bueno	Moderada	Moderada
Arenales	Suelo derivado de arenas volcánicas de color negro. Su topografía es casi plana	Bueno a excesivo	Rápida a muy rápida	Lento
Arrayan	Son suelos profundos, bien drenados donde predomina la textura franco limosa	Bueno	Moderada	Lento

Fuente: CIREN (1999)

Tabla 7. Usos de suelo presentes en la cuenca asociados a la base de datos del modelo SWAT.

Uso de suelo	Uso SWAT asociado	Código SWAT
Terrenos Agrícolas	<i>Agricultural Land Generic</i>	AGRL
Bosque Nativo	<i>Forest-Deciduous</i>	FRSD
Plantaciones Forestales	<i>Evergreen Forest</i>	FRSE
Bosque Mixto	<i>Mixed Forest</i>	FRST
Matorrales	<i>Range Shrubland</i>	RNGB
Urbano y zonas industriales	<i>Urban Medium Density</i>	URML
Cuerpos de agua y nieves	<i>Water</i>	WATR
Afloramientos rocosos y otros terrenos sin vegetación	<i>South Western Range</i>	SWRN
Vegas y otros terrenos húmedos	<i>Emergent/Herbaceous Wetlands</i>	WETN

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

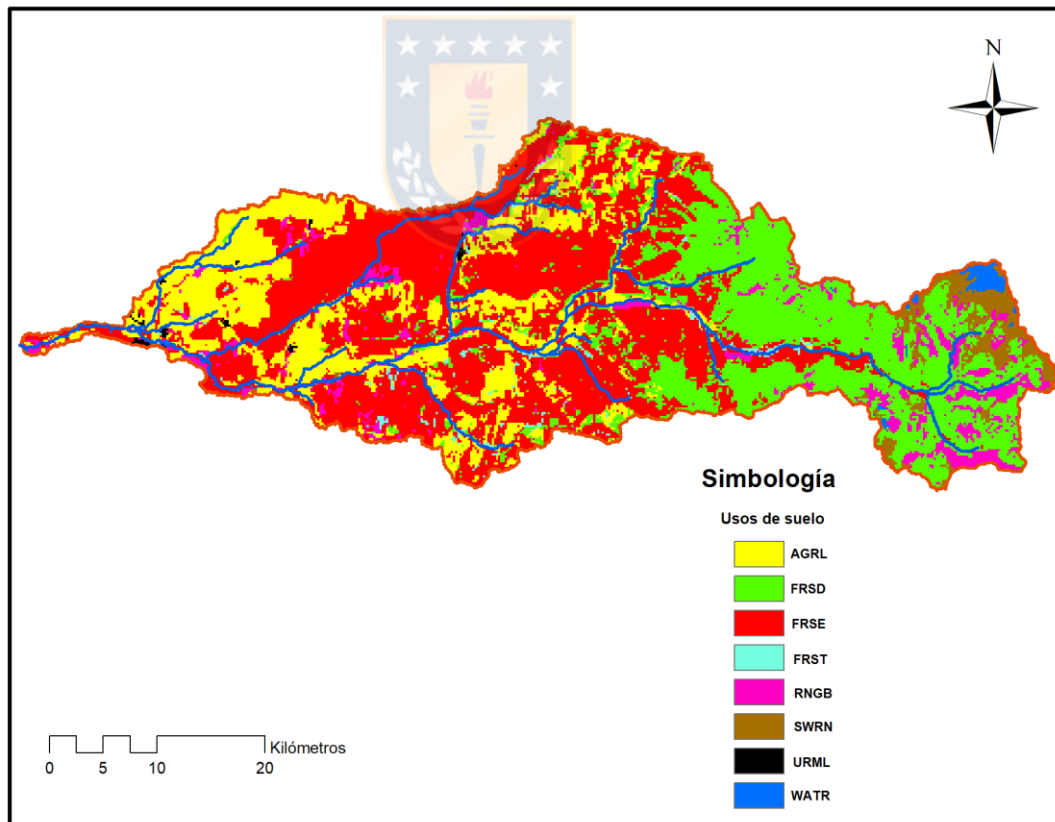


Figura 23. Usos de suelo año 2015.

Fuente: IDE – CHILE, 2019. (Correspondiente al uso de suelo del año 2015 elaborado por CONAF)

4.3.2 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT

El análisis de sensibilidad para los parámetros del modelo se efectuó mediante el software SWAT-CUP, a través del algoritmo SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting versión 2*), el cual es un procedimiento semi-automatizado que determina la sensibilidad de los parámetros y sus rangos más óptimos en el área de estudio. La sensibilidad se estima a través de un proceso iterativo utilizando el test-P para cuantificar la sensibilidad. Valores cercanos a 1 indican una baja sensibilidad, mientras que valores cercanos a cero indican una mayor sensibilidad. (Abbaspour *et al.*, 2007; Abbaspour *et al.*, 2015).

En el caso de este estudio se utilizó como función objetivo el criterio de Kling-Gupta (KGE), realizando un número de 600 iteraciones. La Tabla 8, muestra los parámetros calibrados para la cuenca del río Duqueco.

Tabla 8. Parámetros SWAT que influyen en la simulación del flujo en el modelo y su rango de perturbación.

Parámetro	Descripción (unidad de medida)	Rangos	Proceso
ALPHA_BF	Coefficientes de recesión del flujo base (Día)	0 - 1	Agua Subterránea
CN_2	Curva número (%)	0 - 100	Escorrentía superficial
ESCO	Coefficiente de evaporación del suelo (-)	0,001 - 1	Evapotranspiración
GW_DELAY	Tiempo de retardo del agua subterránea (Día)	1 - 500	Agua subterránea
GW_REVAP	Capacidad de mover agua desde un acuífero superficial (-)	0,02 – 0,2	Agua subterránea
GWQMN	Profundidad de agua en el acuífero superficial (mm)	0 - 5000	Agua subterránea
OV_N	Coefficiente de Manning (-)	0,1 – 0,3	Flujo superficial
SFTMP	Temperatura de caída de nieve (°C)	(-5) – (5)	Nieve

SLOPE	Pendiente (%)	(-0,5) - 1	Escorrentía superficial
SLSUBBSN	Pendiente de Subcuenca (%)	(-0,5) - 1	Escorrentía superficial
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible (%)	(-0,3) - 2	Agua subterránea, Evaporación
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada (%)	(-0,5) - 1	Agua subterránea
SURLAG	Retraso de superficie (Día)	1 - 12	Escorrentía superficial
RCHRG_DP	Fracción de percolación de acuíferos profundos (-)	0 - 1	Agua subterránea
EPCO	Factor de compensación de la absorción de la planta (-)	0 - 1	Evapotranspiración, Flujo superficial
Canmx	Almacenamiento máximo del dosel (mm)	0 - 100	Infiltración, escorrentía superficial y Evapotranspiración

Fuente: Cibin *et al.*, (2012); Hyandy *et al.*, (2018)

La calibración del modelo se realizó a la escala mensual, considerando 3 años de calentamiento (1983 - 1986), en dos puntos de la cuenca del río Duqueco, el primero ubicado en la parte media de la cuenca correspondiente a la estación fluviométrica “Río Duqueco en Villacura”, mientras que el segundo punto está ubicado aguas abajo casi en la salida de la cuenca (estación Río Duqueco en Cerrillos). El periodo considerado para la calibración fue del 2000 al 2016, utilizando el uso de suelo más actual existente para la cuenca (año 2015), mientras que la validación se efectuó desde el 1986 al 1999. Además, se realizó una segunda validación del modelo (revalidación), para el mismo periodo de temporal anterior, pero ahora cambiando el uso de suelo correspondiente al año 1994. La Figura 24 muestra un esquema del proceso de calibración, validación y revalidación.

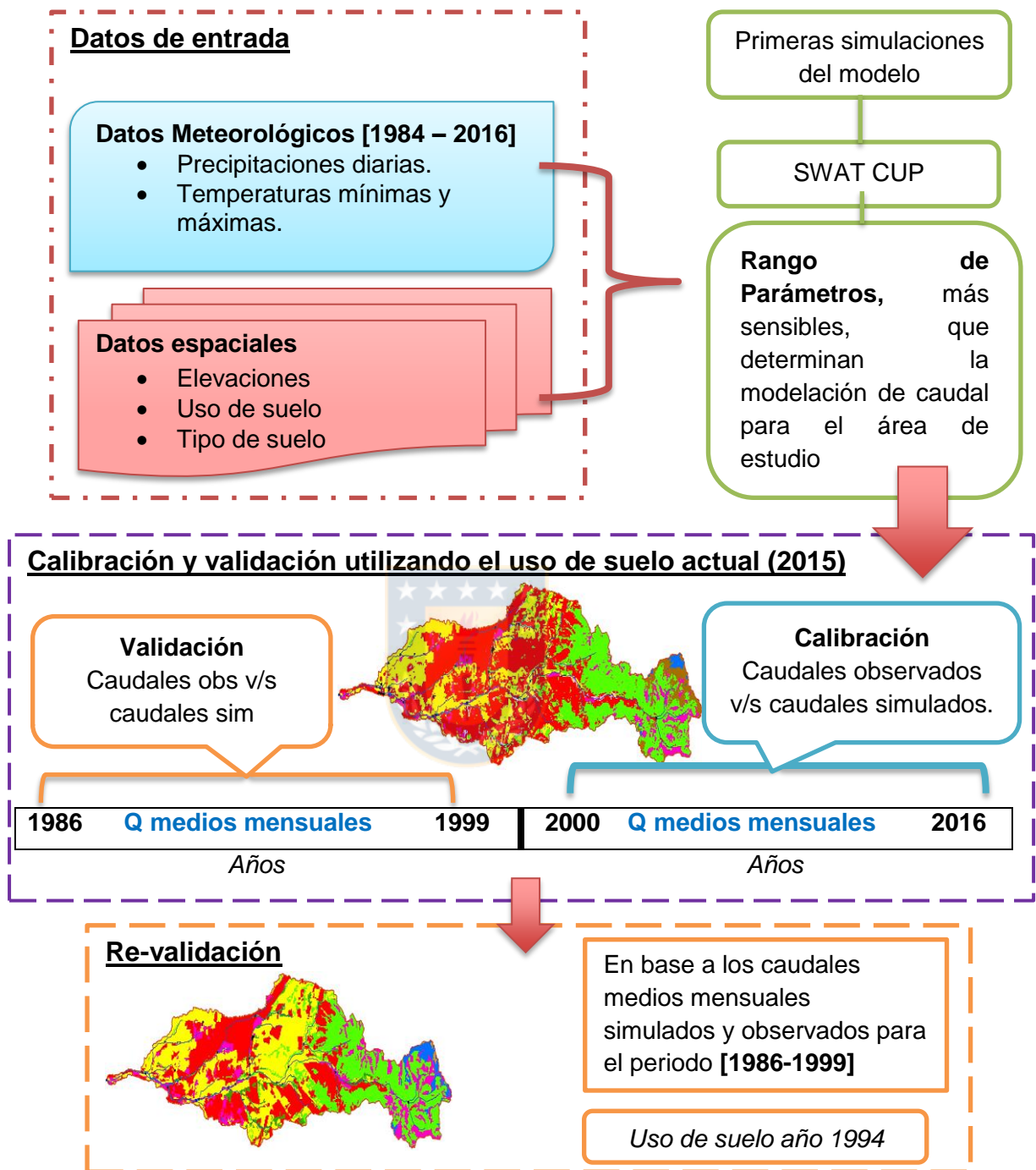


Figura 24. Esquema metodológico para la calibración y validación del modelo SWAT.

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Medidas de desempeño para la modelación de caudal

Para medir el desempeño del modelo se utilizaron los indicadores de bondad de ajuste recomendado por Moriasi *et al.*, (2007) para simulaciones de caudal, los que se describen a continuación:

- **Coefficiente de determinación (R^2):** Indica la proporción de la variación de los datos observados explicada por el modelo. Tiene un rango de 0 – 1, valores más cercanos a 1 indican menor varianza del error y los valores sobre 0,5 son considerados aceptables.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - \bar{Y}_{\text{obs}})(Y_i \text{ sim} - \bar{Y}_{\text{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - \bar{Y}_{\text{obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ sim} - \bar{Y}_{\text{sim}})^2}} \right]^2 \quad \text{ec.5}$$

- **Coefficiente de eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE):** Determina la magnitud relativa de la varianza residual comparada con la varianza de los datos observados.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - Y_i \text{ sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - \bar{Y}_{\text{obs}})^2} \quad \text{ec.6}$$

- **Porcentaje 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.

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

En las ecuaciones (5, 6, 7) $Y_i obs$ corresponde a la i -ésima observación para la componente evaluada, $Y_i sim$ es la i -ésima simulación y n corresponde al número total de datos observados. Explicarlos todos los símbolos en las ecuaciones.

- **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).

$$KGE = [1 - ED] \quad \text{ec.8}$$

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad \text{ec.9}$$

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 ajustes mencionados anteriormente se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Criterios de evaluación de desempeño recomendadas para modelaciones de flujo a escala mensual.

Indicadores	Muy Bueno	Bueno	Satisfactorio
R²	$R^2 > 0,80$	$0,70 < R^2 \leq 0,80$	$0,6 < R^2 \leq 0,70$
NSE	$0,75 < NSE \leq 1,0$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$0,5 < NSE \leq 0,65$
PBIAS (%)	$PBIAS < \pm 10$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
KGE	$0,75 < KGE \leq 1,0$	$0,65 < KGE \leq 0,75$	$0,5 < KGE \leq 0,65$

Fuente: Moriasi et al, (2007); Gupta et al, (2009)

4.4 Modelación del cambio de usos de suelo.

La modelación de escenarios futuros de usos de suelo se efectuó comparando la dinámica espacial de los cambios ocurridos en el periodo 1994 al 2015 y, se proyectó un escenario futuro considerando una expansión forestal en la cuenca. Para ello, se utilizaron las capas temáticas del catastro de usos de suelo elaboradas por CONAF (año 1994 y 2015).

Se identificaron las variables y factores que determinan la ubicación de los diferentes usos de suelos (Tabla 7), las relaciones entre la ocurrencia de una expansión forestal (variable dependiente) y los factores forzantes mencionados en la Tabla 10 (variables independientes x_i) utilizando un modelo de regresión logística (ec.10), según lo propuesto por Aguayo et al. (2016). Este proceso se llevó a cabo utilizando los softwares ArcGIS 10.4 e IDRISI SELVA 2012 utilizando el módulo cambios en el terreno LCM (*Land Change Modeler*), el cual ha sido utilizado por varios autores en la modelación de cambios en el territorio nacional (Aguayo et al., 2016; Miranda et al., 2015; Nahuelhual et al., 2012; Aguayo, 2008; Echeverría et al., 2007).

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

Donde β corresponde a los parámetros de las variables (x_i) que aportan significativamente a la expansión forestal.

La Figura 25 muestra el esquema metodológico utilizado para la elaboración del uso de suelo futuro, partiendo con la confección de las variables independientes en SIG, ingresadas posteriormente al LCM de IDRISI 2012, en donde se analizaron y cuantificaron los cambios ocurridos en el periodo 1994-2015, identificando las transiciones de un estado de uso de suelo a otro (ANEXO 2). Estas transiciones históricas en el uso de suelo se correlacionaron con las variables independientes, para así modelar el potencial de transición hacia el futuro, utilizando la regresión logística. Finalmente se elaboró el uso de suelo futuro utilizando el cambio histórico ocurrido (1994 - 2015) en el uso de suelo forestal y el modelo del potencial de transición, generando una matriz de transición que expresa las probabilidades de cambio en el uso de suelo.

Con el fin de que el cambio de uso de suelo correspondiera solamente a la expansión del uso forestal y no a otros usos de suelo presentes en el área de estudio, se utilizó una probabilidad de cambio igual a 0,6, la cual fue la mayor probabilidad de cambio determinada por el modelo a través de la matriz de transición (ANEXO 3).

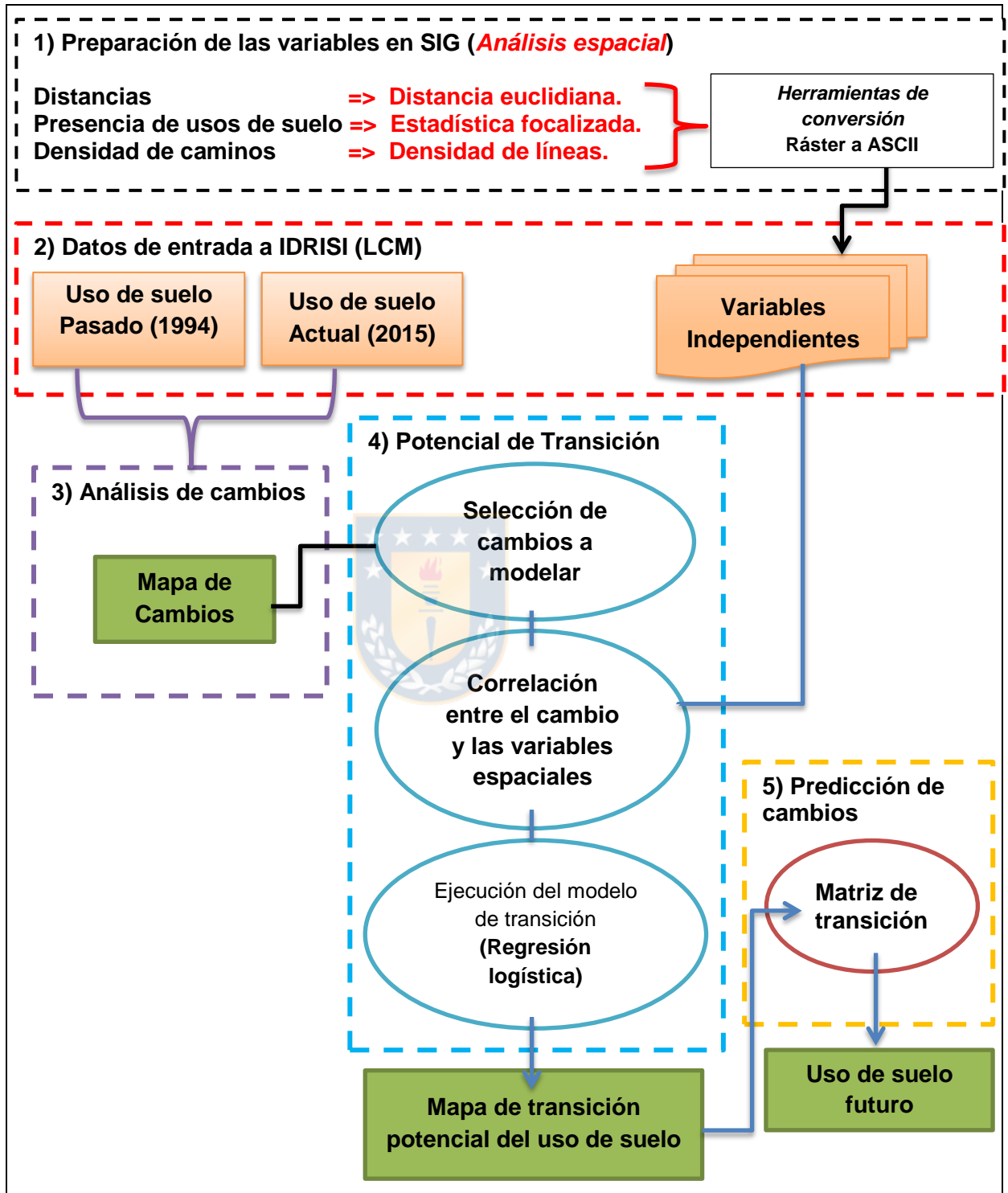


Figura 25. Metodología para el cambio de uso de suelo (CUS).

Fuente: Elaboración propia a partir de Eastman, 2012

La Tabla 10 muestra las variables independientes que fueron confeccionadas en SIG, indicando la fuente de donde se obtuvieron los archivos tipo Shapefile de ciudades, caminos y usos de suelo.

Tabla 10. Variables independientes ingresadas al modelo de regresión logística para el periodo 1994-2015.

Variables independientes	Descripción	Fuente de los archivos tipo raster y shapefile
Elevaciones	Modelo de elevación digital DEM	Sensor SRTM en USGS. Disponible en https://earthexplorer.usgs.gov/
Distancia a caminos	Distancia euclidiana promedio a caminos pavimentados	IDE – Chile Disponible en http://www.ide.cl/descarga/capas.html
Distancia a ríos	Distancia euclidiana promedio a la red hídrica	IDE – Chile Disponible en http://www.ide.cl/descarga/capas.html
Distancia a bosque nativo	Distancia euclidiana promedio a el bosque nativo	IDE – Chile Disponible en http://www.ide.cl/descarga/capas.html
Distancia a plantaciones	Distancia euclidiana promedio a las plantaciones forestales	IDE – Chile Disponible en http://www.ide.cl/descarga/capas.html
Distancia a terrenos agrícolas	Distancia euclidiana promedio a los terrenos agrícolas	IDE – Chile Disponible en http://www.ide.cl/descarga/capas.html
Distancia a zonas urbanas	Distancia euclidiana a los principales centros urbanos	IDE – Chile Disponible en http://www.ide.cl/descarga/capas.html
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.	IDE – Chile Disponible en http://www.ide.cl/descarga/capas.html
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.	IDE – Chile Disponible en http://www.ide.cl/descarga/capas.html
Presencia de bosque nativo	Variable dicotómica, con valor igual a 1 para la presencia del uso de	IDE – Chile Disponible en http://www.ide.cl/descarga/capas.html

	suelo correspondiente al bosque nativo y valor 0 para los otros usos de suelo.	
Pendientes	Variable correspondiente al resultado de la reclasificación del DEM (5 clasificaciones).	Sensor SRTM en USGS. Disponible en https://earthexplorer.usgs.gov/
Densidad de caminos	Densidad de líneas correspondientes a los caminos	Laboratorio de geomática EULA-CHILE universidad de concepción

Fuente: Elaboración propia

4.5 Cálculo de la disponibilidad hídrica hacia el año 2030.

4.5.1 Escenarios Climáticos y de uso del suelo.

Se utilizaron los escenarios climáticos establecidos por Riquelme (2018) (Tabla 11), estos escenarios se determinaron en base las predicciones propuestas más probables a ocurrir en la cuenca del Biobío, basados en la regionalización de modelos climáticos globales (Stehr, 2008; Stehr, 2010b).

Tabla 11. Escenarios climáticos (conservador, intermedio y crítico), determinados en función de la reducción de caudal para la cuenca del río Duqueco.

Escenario	Precipitación [%]	Temperatura [°C]
E1	-10%	+0,5°C
E2	-15%	+0,75°C
E3	-20%	+1,0°C

Fuente: Elaboración propia

La disponibilidad hídrica futura de la cuenca se determina estableciendo un escenario de línea de base (LB) correspondientes a la serie de años (2000 – 2016), el cual contempla el uso de suelo actual de la cuenca. El escenario LB luego es contrastado con las predicciones futuras para el usos de suelo y clima. La Figura 26 muestra de forma simplificada la metodología aplicada para el

cálculo de la disponibilidad hídrica a futuro, el cual se basa en la modificación al escenario LB correspondiente al modelo ya calibrado y validado para diferentes usos de suelo.

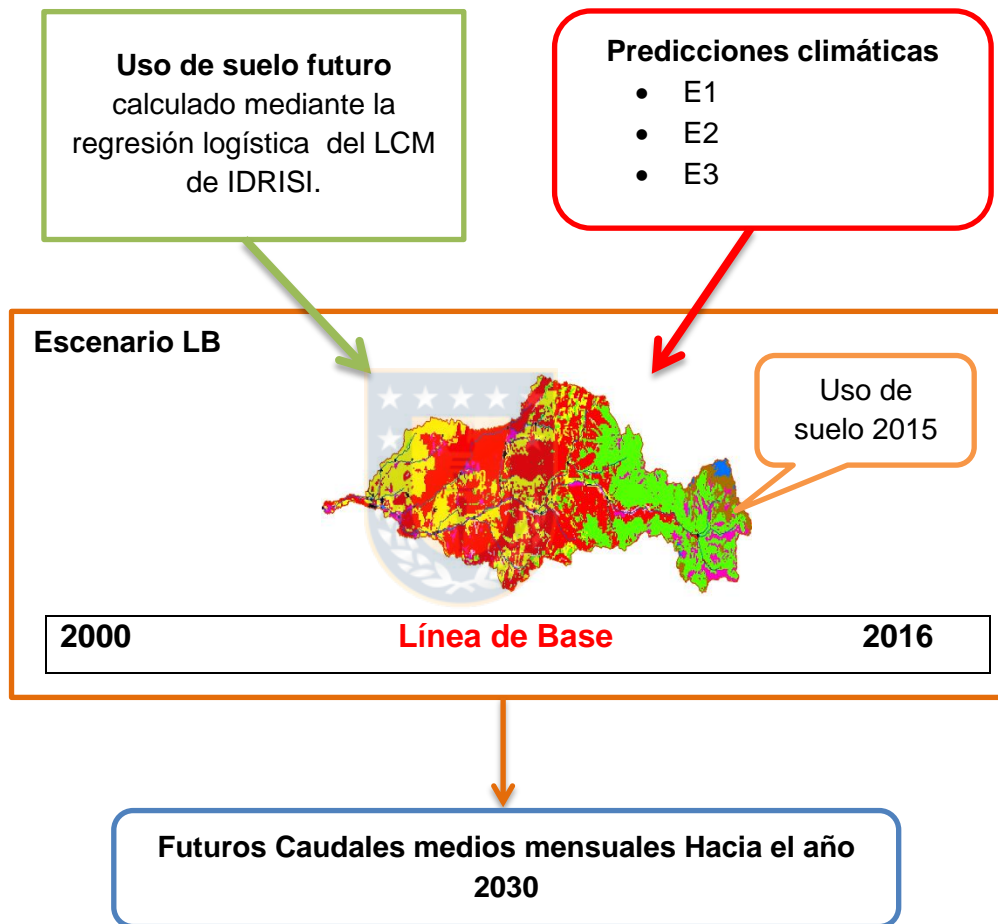


Figura 26. Metodología para el cálculo de los caudales medios mensuales futuros para la cuenca del río Duqueco.

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 existe otorgamiento de nuevos derechos de agua a los que ya están establecidos en la red hidrográfica actualmente.
- No se incorpora nuevas descargas de aguas a la red hidrográfica.
- Los escenarios climáticos corresponden al 4^{to} reporte del IPCC (año 2007).



5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Calibración y validación del modelo hidrológico

5.1.1 Calibración

El análisis de sensibilidad implementado para la calibración del modelo en base a los 16 parámetros obtenidos por literatura (Tabla 8), arrojó que 11 parámetros son los más sensibles ($P\text{-value} \leq 0,5$) para la modelación de flujo en el área de estudio (Figura 27).

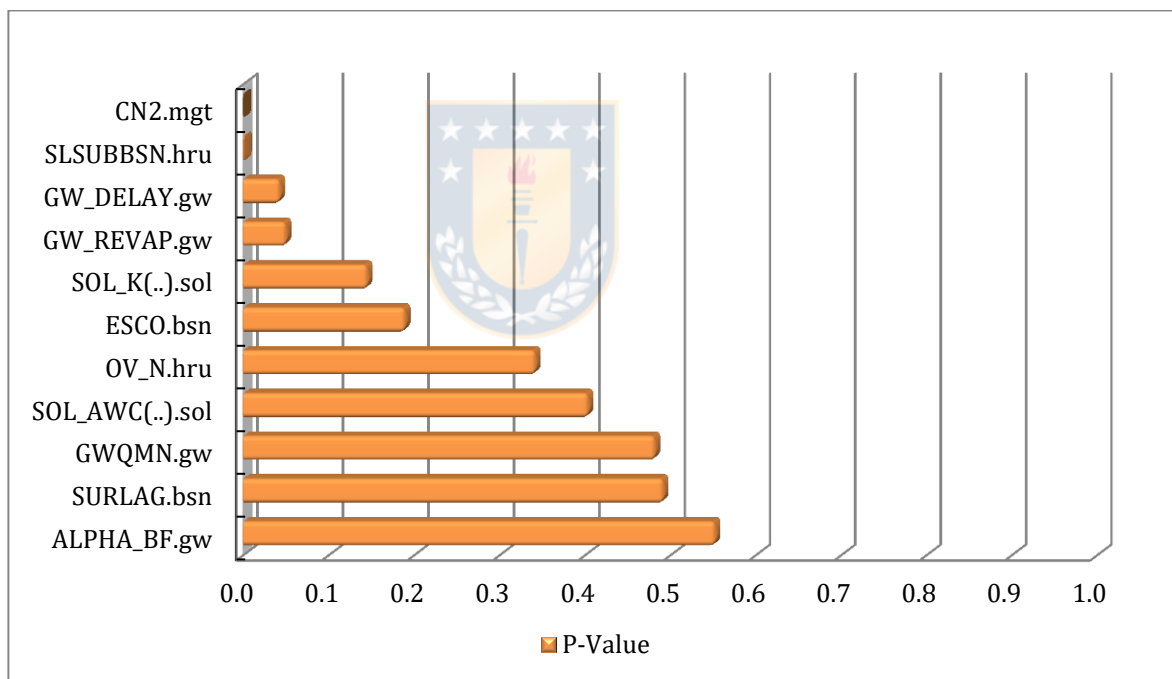


Figura 27. Análisis de sensibilidad para los parámetros que influyen la modelación de flujo.

Fuente: Elaboración propia en base a SWATCUP (2012)

Se encontró una gran sensibilidad en el parámetro CN2 (Curva Numero) el cual determina la escorrentía y, por lo tanto, posee una influencia directa en la cantidad de flujo generado en cada URH. El segundo 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.*, 2012). Se destaca también los parámetros de agua subterránea (GW_DELAY, GW_REVAP, GWQMN y ALPHA_BF) los cuales poseen influencia sobre los niveles de recarga del acuífero superficial y subterráneo influyendo por lo tanto en la modelación del flujo base de escorrentía. Los parámetros de suelo SOL_K y SOL_AWC también resultaron ser sensibles para la generación de flujo, pues estos responden a la conductividad hidráulica saturada y a la cantidad de agua disponible en el suelo, influyentes, por lo tanto, en los procesos de infiltración para cada subcuenca, se destaca que la sensibilidad asociada a estos parámetros es debido a la ausencia de datos de suelo en la parte media - alta de la cuenca, por lo cual el modelo debió generar valores por defecto, los cuales necesariamente deben ser calibrados para acercar los parámetros a los valores observados.

La Tabla 12 muestra el rango o el valor final de cada parámetro modificados para las subcuencas durante la calibración.

Tabla 12. Rango o valor final de cada parámetro obtenido en el proceso de calibración.

Parámetro	Descripción (unidad de medida)	Rangos o valor final de calibración	Aplicación
ALPHA_BF	Coeficientes de recesión del flujo base (Día)	0,525	Toda las Subcuencas
CN_2	Curva número (%)	31 - 92	Toda las Subcuencas
ESCO	Coeficiente de evaporación del suelo (-)	0,5 - 1	Toda las Subcuencas
GW_DELAY	Tiempo de retardo del agua subterránea (Día)	31,6	Toda las Subcuencas
GW_REVAP	Capacidad de mover agua desde un acuífero superficial (-)	0,199	Toda las Subcuencas

GWQMN	Profundidad de agua en el acuífero superficial (mm)	311,025	Toda las Subcuencas
OV_N	Coefficiente de Manning (-)	0,015 – 0,8	Toda las Subcuencas
SLSUBBSN	Longitud promedio de la pendiente de la Subcuenca (%)	SLSUBBSN x 0,6	Toda las Subcuencas
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible (%)	0,001 – 0,475	Subcuencas aguas arriba Sub 25
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada (%)	0,38 – 84,78	Subcuencas aguas arriba Sub 25
SURLAG	Retraso de superficie (Día)	1	Toda las Subcuencas

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el parámetro CN2 (Curva Numero) es función de la permeabilidad del suelo y la cobertura vegetal, además, de ser el parámetro de mayor sensibilidad, se efectuó una calibración, en donde la curva numero toma un valor específico (Tabla 13) dependiendo del grupo hidrológico del suelo y el uso del suelo asociado a la base de datos del modelo SWAT 2012.

Tabla 13. Valor del parámetro Curva Numero (CN2), en función de los tipos y usos de suelo presentes en el área de estudio.

Grupo hidrológico del tipo de suelo	Uso de Suelo							
	FRSE	FRSD	AGRL	RNGB	FRST	WATR	URML	SWRN
A (Coreo, Arenales, Santa teresa)	35	45	62	49	36	92	31	39
C (Arrayan, Santa Bárbara, Tijeral)	55	66	73	69	60	92	59	61
D (Mirador, Collipulli, No registrado)	77	83	84	84	79	92	79	80

Fuente: Elaboración propia a partir de CIREN (1999) y SWAT (2012)

La Tabla 14 muestra los valores de los indicadores de bondad de ajuste para el modelo calibrado y validado en los puntos de control, con el uso de suelo correspondiente al año 2015. Se destaca que para el periodo de calibración (2000 – 2016) los indicadores muestran un “Buen” desempeño del modelo para

la Subcuenca 25 (Estación río Duqueco en Villacura), mientras que para la Subcuenca 29 (Estación río Duqueco en Cerrillos) el desempeño mejora a “Muy Bueno”. Los valores de NSE y KGE indican que el modelo pudo reproducir satisfactoriamente la variabilidad y a la temporalidad de la serie de caudales para ambas cuencas, mientras que el R^2 indica que los datos simulados por el modelo poseen una buena capacidad predictiva. En el caso de PBIAS este muestra valores negativos para ambas subcuencas lo que se traduce en una subestimación de los caudales, lo 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.

Tabla 14. Valores de los indicadores de bondad de ajuste para la calibración y validación correspondientes al uso de suelo actual.

		Calibración		Validación	
		Valor	Desempeño	Valor	desempeño
Sub 25	NSE	0,70	Bueno	0,76	Muy Bueno
	R^2	0,78		0,81	
	RSR	0,54		0,48	
	PBIAS (%)	-13,30		-8,60	
	KGE	0,71		0,77	
Sub 29	NSE	0,80	Muy Bueno	0,82	Muy Bueno
	R^2	0,82		0,85	
	RSR	0,45		0,44	
	PBIAS	-2,50		-1,40	
	KGE	0,74		0,76	

Fuente: Elaboración propia

Las Figuras 28 y 29 muestran la serie de caudales simulados y observados durante la calibración para las dos estaciones fluviométricas, en donde se puede apreciar que para ambos casos el modelo pudo representar de buena forma el caudal base, caudales medio y tiempos de concentración, sin embargo,

se observa la subestimación de los caudales máximos, lo cuales coinciden con las subestimación de la base de datos (CHRISP) especialmente en los años 2001, 2002, 2008 y 2014. Para ambos casos las mayor subestimación del caudal “*peak*” ocurre en el año 2001. A pesar de la subestimación en los caudales máximos, Zambrano *et al.*, 2017 recomienda el uso de esta base de datos global para aplicaciones hidrológicas en lugares con ausencia de datos, ya que posee un amplio registro, una alta resolución espacial y una buena correlación lineal entre la simulación y la precipitación observada.

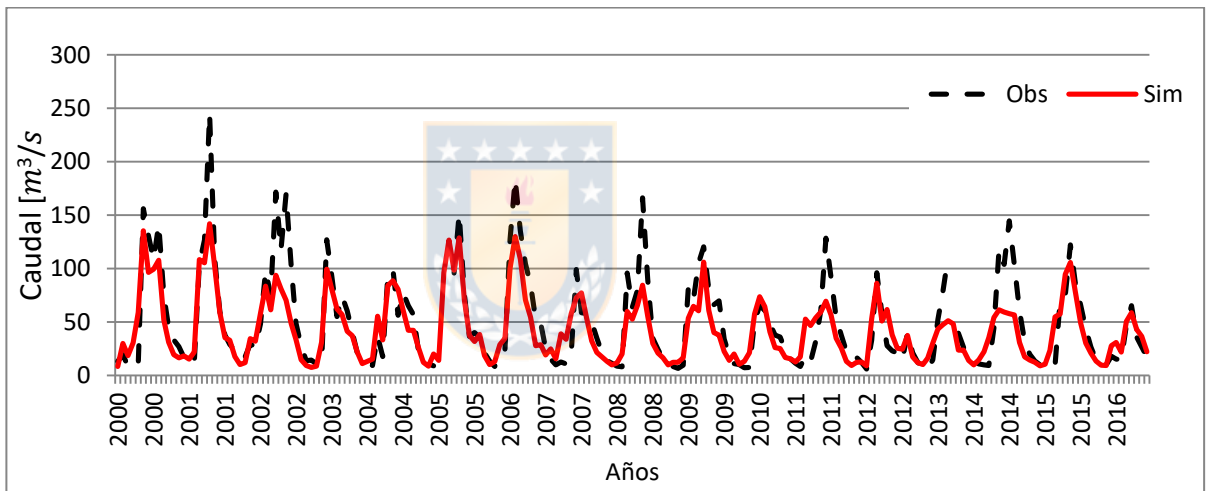


Figura 28. Serie de caudales para el periodo de calibración estación Villacura.

Fuente: Elaboración propia

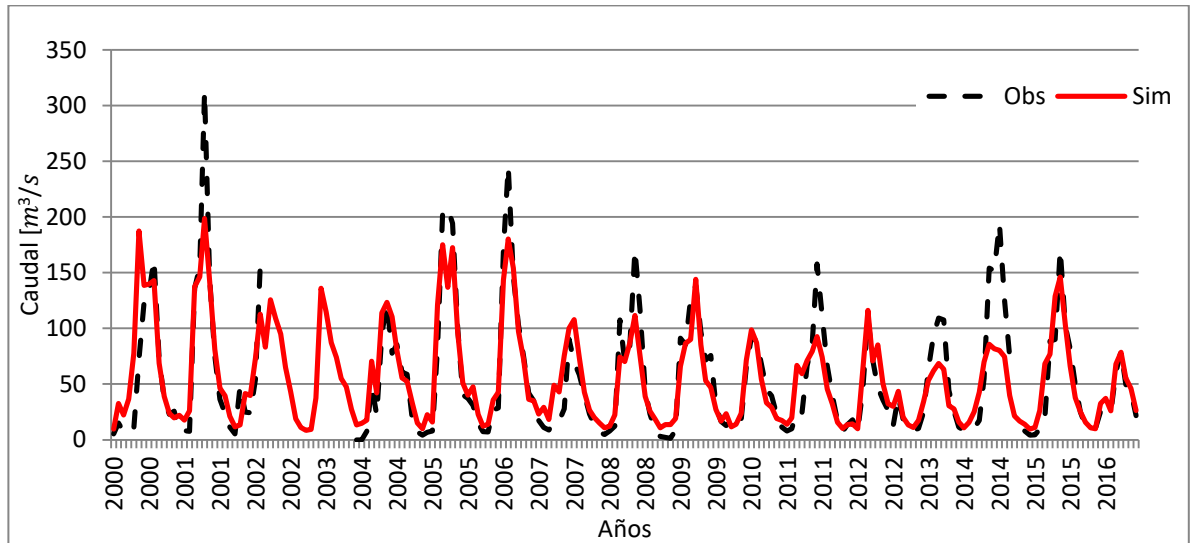


Figura 29. Serie de caudales para el periodo de calibración estación Cerrillos.

Fuente: Elaboración propia



5.1.2 Validación

En el caso de la validación, el desempeño del modelo se considera “muy bueno” para ambas subcuencas (Tabla 14), indicando que se reproduce de buena forma el comportamiento hidrológico de los caudales mensuales.

Para la Subcuenca 25 se aprecia una mejora en el indicador PBIAS en comparación al periodo de calibración, esto se debe a que durante el periodo de validación (1986 - 1999) las subestimaciones de los máximos de precipitación son menores en comparación al periodo de calibración (2000 - 2016), generando así una mejor simulación de los caudales, lo que provoca el cambio de un “buen” a “muy buen” desempeño.

Las figuras 30 y 31 muestran la serie de caudales simulados y observados durante la validación para las dos estaciones fluviométricas. 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 1993, 1996 y 1997, sin embargo, la subestimación es menor en comparación al periodo de calibración.

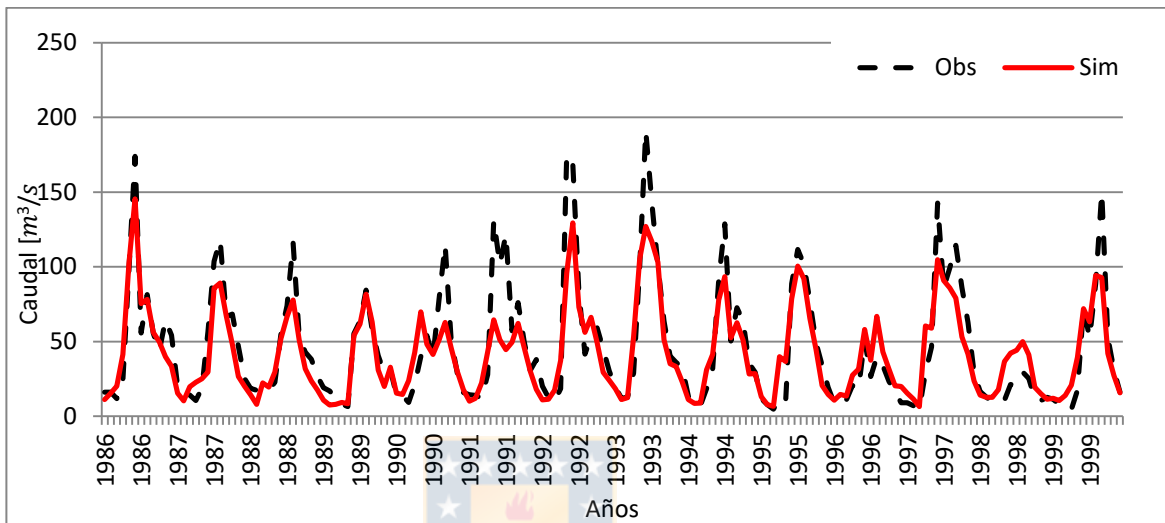


Figura 30. Serie de caudales para el periodo de validación estación Cerrillos.

Fuente: Elaboración propia

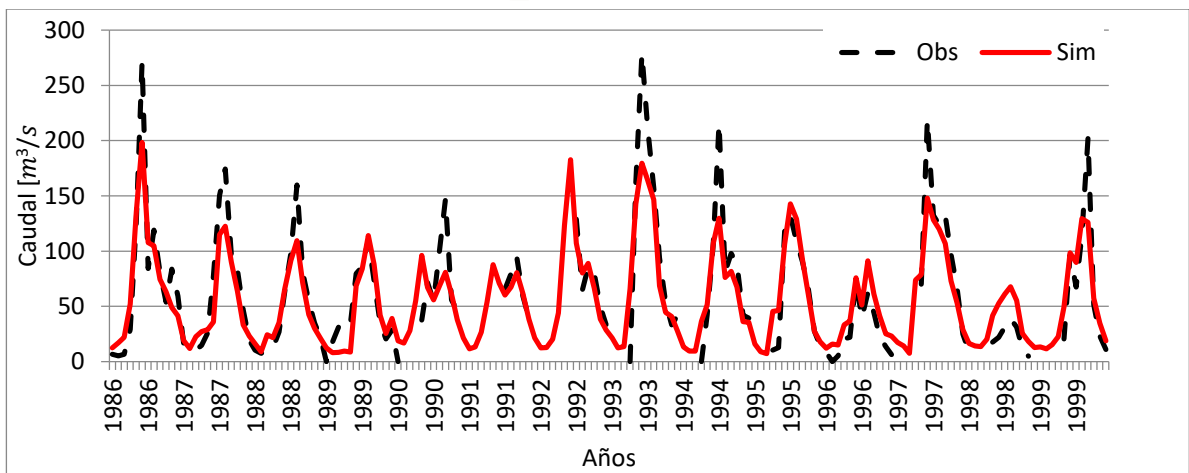


Figura 31. Serie de caudales para el periodo de validación estación Villacura.

Fuente: Elaboración propia

5.1.3 Re-validación

La Tabla 15 muestra el valor de los indicadores de bondad de ajuste resultantes de la revalidación efectuada para la serie de caudales correspondientes a los años 1986 – 1999. Se aprecia un leve mejor ajuste de los indicadores NSE y PBIAS en comparación a la Tabla 14, debido principalmente a la utilización del uso de suelo (año 1994) correspondiente a la serie de caudales observados y la calibración previa sobre todo del parámetro curva número, evidenciando así que el set de parámetros modificados durante la calibración es adecuado para representar los caudales medios mensuales de la cuenca en base a diferentes cambios en los usos de suelo y en consecuencia, es apropiado para evaluar la respuesta hidrológica de escenarios futuros de uso de suelo (Stehr *et al.*, 2010a).

Tabla 15. Valores de los indicadores de bondad de ajuste para la validación del modelo utilizando el uso de suelo correspondiente al año 1995.

		Validación	
		Valor	Desempeño
Sub 25	NSE	0,77	Muy Bueno
	R ²	0,80	
	RSR	0,48	
	PBIAS (%)	-8,00	
	KGE	0,77	
Sub 29	NSE	0,82	Muy Bueno
	R ²	0,85	
	RSR	0,42	
	PBIAS (%)	-0,20	
	KGE	0,76	

Fuente: Elaboración propia

Las Figuras 32 y 33 muestran la serie de caudales simulados v/s la serie de caudales observados para ambas estaciones fluviométricas. Al igual que para el periodo de calibración y validación, el modelo pudo representar de buena forma el flujo base, los caudales medios y tiempos de concentración, sin embargo a pesar del cambio de uso de suelo, el modelo no pudo representar los máximos

de escorrentía debido las subestimaciones de la base de datos de precipitación mencionadas en la calibración y validación.

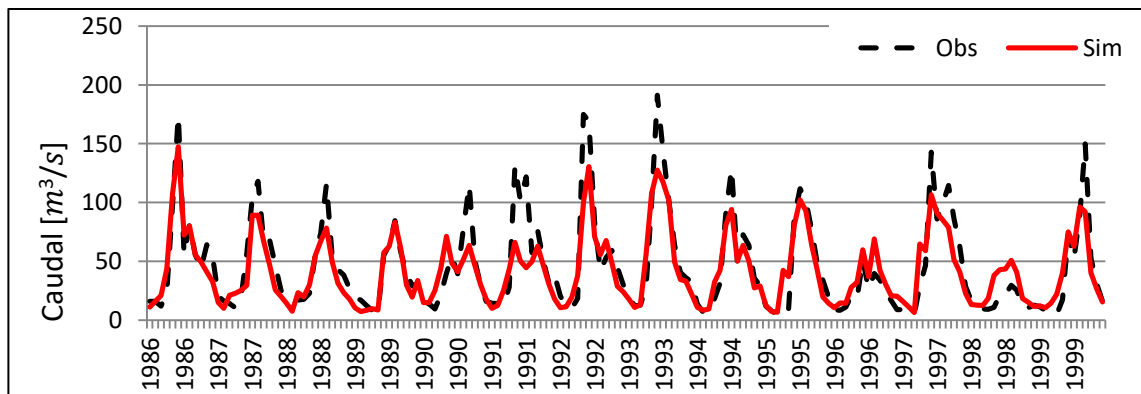


Figura 32. Serie de caudales para el periodo de Re-validación estación Cerrillos.

Fuente: Elaboración propia.

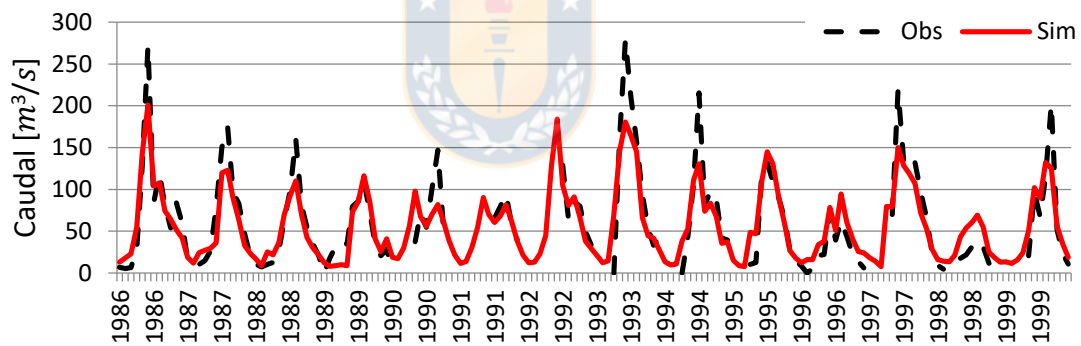


Figura 33. Serie de caudales para el periodo de Re-validación estación Villacura.

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Escenario futuro de expansión forestal

5.2.1 Análisis y cuantificación de cambios en el territorio

Al cuantificar los cambios ocurridos en el uso del territorio entre el periodo 1994 – 2015 (Tabla 16), se detectó un aumento en la cobertura de plantaciones forestales y una disminución de los terrenos agrícolas, pues en el año 1994 un 34% de la cuenca estaba poblada de terrenos agrícolas (siendo esta la cobertura más relevante), mientras que al año 2015 disminuyó a un 23%, debido al aumento de las plantaciones forestales (de un 28% a un 38%). Por otra parte los matorrales y el bosque mixto sufrieron una disminución de un 2,4% y un 0,2% respectivamente. El bosque nativo presentó un aumento de un 0,9 %, lo que se debe principalmente al cambio de metodología utilizada por CONAF para la elaboración de las capas de usos del territorio, pues se evidenció la aparición de polígonos de bosque nativo asociado principalmente a la ribera de los ríos, los cuales no fueron cuantificados en la elaboración de la capa temática más antigua correspondiente al año 1994, así mismo el aumento de un 1.8% para “otros usos de suelo” se debe al aumento de afloramientos rocosos en la parte alta de la cuenca y a nuevas clasificaciones de usos de la tierra encontradas en la capa más actual las cuales corresponden especialmente a “derrumbe sin vegetación”.

Tabla 16. Variación temporal de los usos de suelo presentes en la cuenca (1994 - 2015).

Usos de suelo	1994		2015		% de cambio
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	
Terrenos Agrícolas	58.676	34,29	40.408	23,61	-10,70
Bosque Nativo	40.137	23,46	41.637	24,33	+0,91
Plantaciones Forestales	48.629	28,42	65.919	38,52	+10,13
Bosque Mixto	2.724	1,59	2.370	1,39	-0,22
Matorrales	15.688	9,17	11.621	6,79	-2,40
Ciudades y Zonas Industriales	480	0,28	1.343	0,79	+0,51
Otros	4.782	2,80	7.818	4,56	+1,81

Fuente: Elaboración propia a partir de las capas temáticas de usos de suelo elaborado por CONAF para la región del Biobío, correspondientes al año 1994 y 2015, descargadas desde IDE – CHILE.

Se aprecia también que durante el periodo de análisis de las coberturas (20 años aproximadamente) el uso del territorio ocupado por las ciudades y zonas industriales solo creció un 0,5%, lo cual evidencia que el área de estudio corresponde a una cuenca con un fuerte desarrollo forestal y agrícola por sobre el aumento de industrias o el crecimiento urbano.

5.2.2 Factores forzantes del cambio de uso de suelo y regresión logística

La prueba de Cramer establecida para las variables independientes ingresadas al modelo arroja valores sobre 0,14 y un valor $p < 0,01$, lo cual indica que todas las variables consideradas son útiles para modelar el cambio de uso de suelo (Eastman, 2012). Los parámetros de la regresión logística (β_i) determinan cuáles de estas variables propician el aumento (signo + en el parámetro) o restringen (signo – en el parámetro) el avance del uso de suelo forestal. Se observa en la Tabla 17 que el avance de las plantaciones está limitado principalmente por condiciones topográficas como lo son la elevación y la pendiente, limitado también por la presencia de bosque nativo el cual se ubica espacialmente en la parte alta de la cuenca (sobre los 1600 msnm). Por el contrario, la presencia de plantaciones forestales ($\beta_i = 2,1954$) y la presencia de terrenos agrícolas, favorecen el avance de las plantaciones forestales proporcionando terrenos de fácil acceso para el asentamiento de estos ejemplares.

Los parámetros de distancias demuestran que la actividad forestal se desarrolla de forma contigua a las plantaciones ya establecidas, pues estas áreas presentan ya una infraestructura básica con la cual opera la industria forestal, tales como caminos y centros de acopio (Aguayo *et al.*, 2016), también se aprecia que la distancia a terrenos agrícolas propicia el avance forestal ($\beta_i = 0,01195443$) debido a que estos terrenos están muy próximos entre sí (Figura 35) propiciando a este uso de suelo como el principal a ser remplazado.

El valor de los parámetros de proximidad a centros urbanos es de un orden mucho menor ($\beta_i = 0,00006297$) lo cual indica que esta variable no es muy determinante a la hora de modelar el avance forestal hacia el año 2030 en la cuenca, pues este impulsor del cambio de uso de suelo fue decisivo en el inicio de la expansión forestal en el territorio chileno (1970 – 1990), perdiendo

importancia en los periodos posteriores al año 1990, en donde las plantaciones se expandieron en toda las direcciones y se convirtieron en uso de la tierra dominante (Nahuelhual *et al.*, 2012).

Tabla 17. Parámetros de la regresión logística ajustado para la expansión forestal al año 2035.

Variables independientes	Prueba de Cramer	P valué	Parámetro regresión logística (β_i)
Elevaciones	0,4469	<0,01	-0,00623517
Distancia a caminos	0,3343	<0,01	-0,00020706
Distancia a ríos	0,1743	<0,01	-0,00000553
Distancia a bosque nativo	0,3000	<0,01	0,00017042
Distancia a plantaciones	0,5733	<0,01	-0,00011469
Distancia a terrenos agrícolas	0,4451	<0,01	0,01195443
Distancia a zonas urbanas	0,2453	<0,01	0,00006297
Presencia de plantaciones	0,5969	<0,01	2,19541597
Presencia de terrenos agrícolas	0,4571	<0,01	0,51182556
Presencia de bosque nativo	0,3242	<0,01	-0,14949235
Pendientes	0,1892	<0,01	-0,00545090
Densidad de caminos	0,1553	<0,01	-0,47773361

Fuente: Elaboración propia mediante IDRISI (2012).

5.2.3 Futuro escenario de expansión forestal

Los cambios ocurridos durante el periodo 1994 – 2015 y la regresión logística permitieron la proyección del uso de suelo forestal hacia el año 2030 (Figura 35). La Tabla 18 muestra el cambio historio y futuro en los usos de suelo. Se aprecia que las plantaciones forestales aumentaron desde un 28% en el año 1994, a un 38% en el año 2015, abarcando hacia el año 2030 un 63% de la cuenca. Este aumento en el uso de suelo forestal se produce por la reducción de los terrenos agrícolas los principalmente, disminuyendo desde un 23% (año 2015), a sólo un 3% hacia el año 2030. El bosque nativo, en cambio sufrió reducciones de menor magnitud (2% aproximadamente), reduciéndose desde un 24% a un 22% para el año 2030. En menor medida otros usos de suelo que poblaron las plantaciones corresponden a bosque mixto, el cual paso de ocupar un 1,4% de la cuenca a un 0,8%, los matorrales pasaron de poblar un 6.79% (periodo actual) a un 5,60% para el año 2030. Mientras que las ciudades y zonas industriales se mantuvieron en un mismo orden de magnitud durante el periodo actual y el cambio hacia el año 2030.

Tabla 18. Cambio en las superficies de usos de suelo para los periodos analizados.

Usos de suelo	1994		2015		2030	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Terrenos Agrícolas	59.676	34,29	40.408	23,61	5.009	2,93
Bosque Nativo	41.237	23,46	41.637	24,33	38.133	22,28
Plantaciones Forestales	48.729	28,42	66.919	38,52	108.567	63,43
Bosque Mixto	2.834	1,59	2.370	1,39	1.492	0,87
Matorrales	15.788	9,17	11.621	6,79	9.585	5,60
Ciudades y Zonas Industriales	580	0,28	1.343	0,79	1.203	0,70
Otros	441	0,20	5.741	3,35	6.058	4,18

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 34 muestra el cambio para cada uso de suelo, se aprecia que las plantaciones pasaron de poblar 66.900 a 109.000 ha, con un ganancia neta de 41.000 ha hacia el año 2030. Esta ganancia de más de 41.000 ha en 15 años se considera como un cambio extremo en el uso de suelo, pues se elaboró en base a la mayor probabilidad de cambio establecida en la matriz de transición (ANEXO 3).

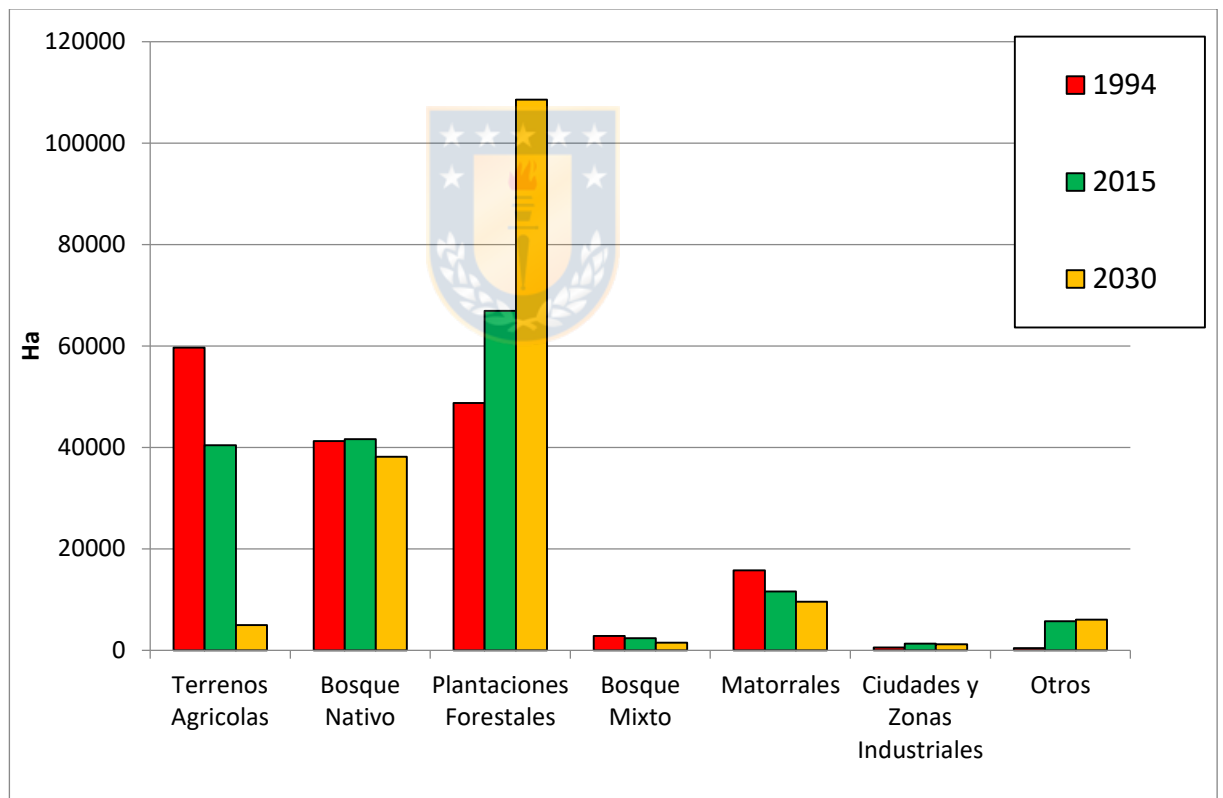


Figura 34. Variación temporal de las coberturas de suelo para los años 1994, 2015 y 2030.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa en la Figura 34 y 35 que los terrenos agrícolas son la principal cobertura de suelo reemplazada por las plantaciones hacia el año 2030 y en menor medida el bosque nativo, los matorrales y el bosque mixto. La cobertura de suelo con mayor persistencia durante los periodos analizados (1994 - 2015 y 2030) corresponde al bosque nativo el cual se mantuvo entre las 41.000 ha durante los primeros años llegando a 38.000 para el año 2030.



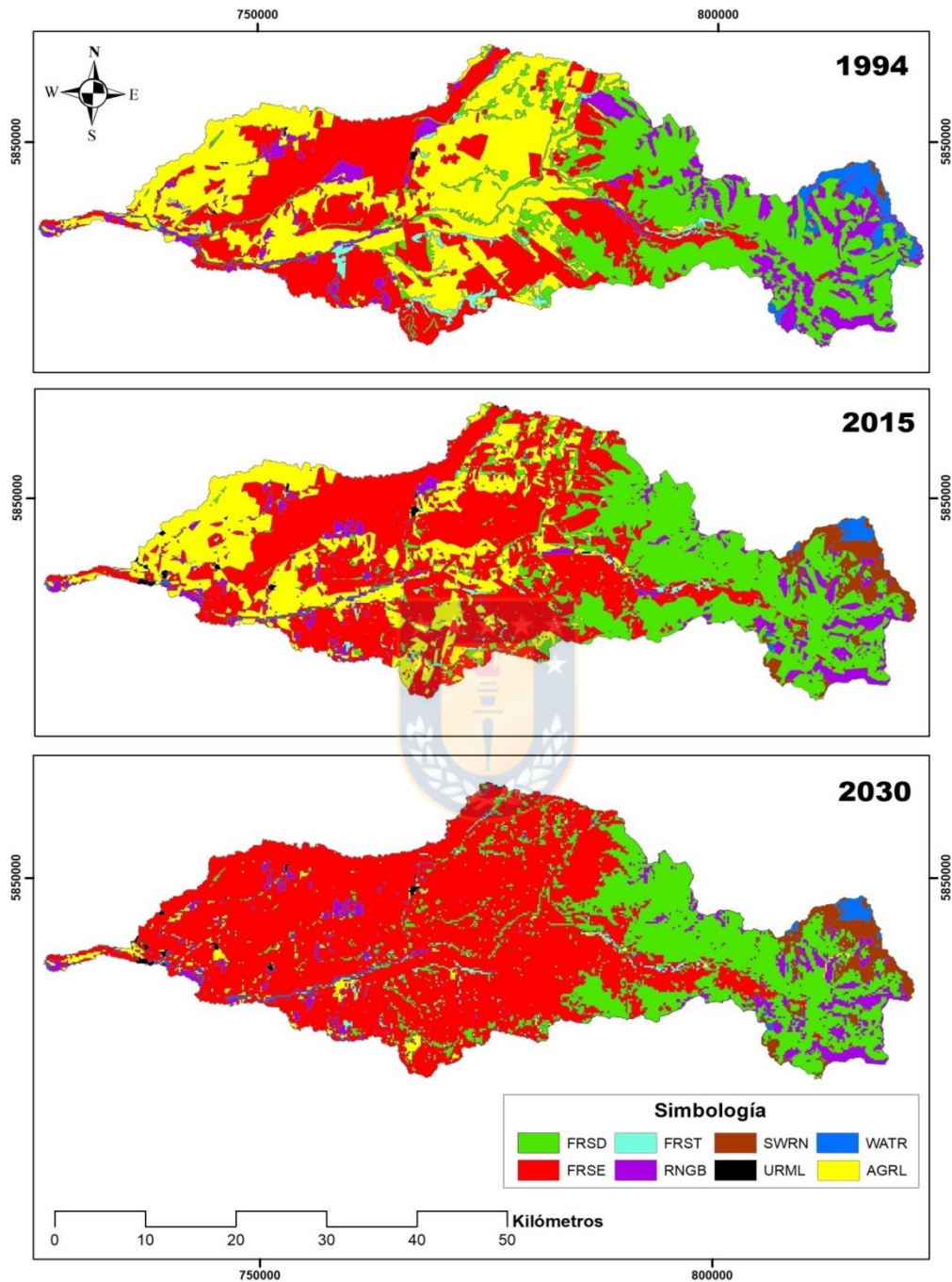


Figura 35. Coberturas temporales de usos de suelo, clasificadas para el modelo hidrológico SWAT.

Fuente: Cobertura 1994 y 2015 obtenidas del catastro vegetal de CONAF. Cobertura 2030 correspondiente al avance futuro de las plantaciones, obtenida mediante la regresión logística.

5.3 Disponibilidad hídrica futura para la cuenca

5.3.1 Efectos espaciales y temporales de la expansión forestal sobre los caudales futuros de la cuenca

Al comparar los caudales del periodo (2000 - 2016) de línea de base (LB) v/s los caudales futuros (2017 - 2030) bajo el escenario de cambio de uso de suelo (CUS), se presentaron variaciones espaciales del caudal en toda la cuenca (Figura 36). La parte media y baja acumulan las mayores reducciones (color rojizo), el estero Cholguahue (bordeando la parte noreste de la cuenca) y el estero Quillaco, presenta las mayores reducciones de caudal cercanas al 10 %. De igual forma la parte alta del Río Canicura y el Río Coreo presentan importantes reducciones de un 8% y 6% respectivamente. El río Arilahuen ubicado en la parte sur oeste de la cuenca presenta reducciones que llegan a un 5%, afectando principalmente el caudal del río Duqueco debido a que es uno de los principales tributarios junto con el Río Coreo, generando así una reducción del caudal en toda la parte media baja de la cuenca debido a la expansión del uso de suelo forestal. Esto es consistente con lo estudiado por Little *et al.*, 2009 quien identificó tendencias negativas significativas en la producción de agua en áreas con influencia de plantaciones forestales. En la parte alta (nacimiento del río Duqueco en la zona cordillerana) 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).

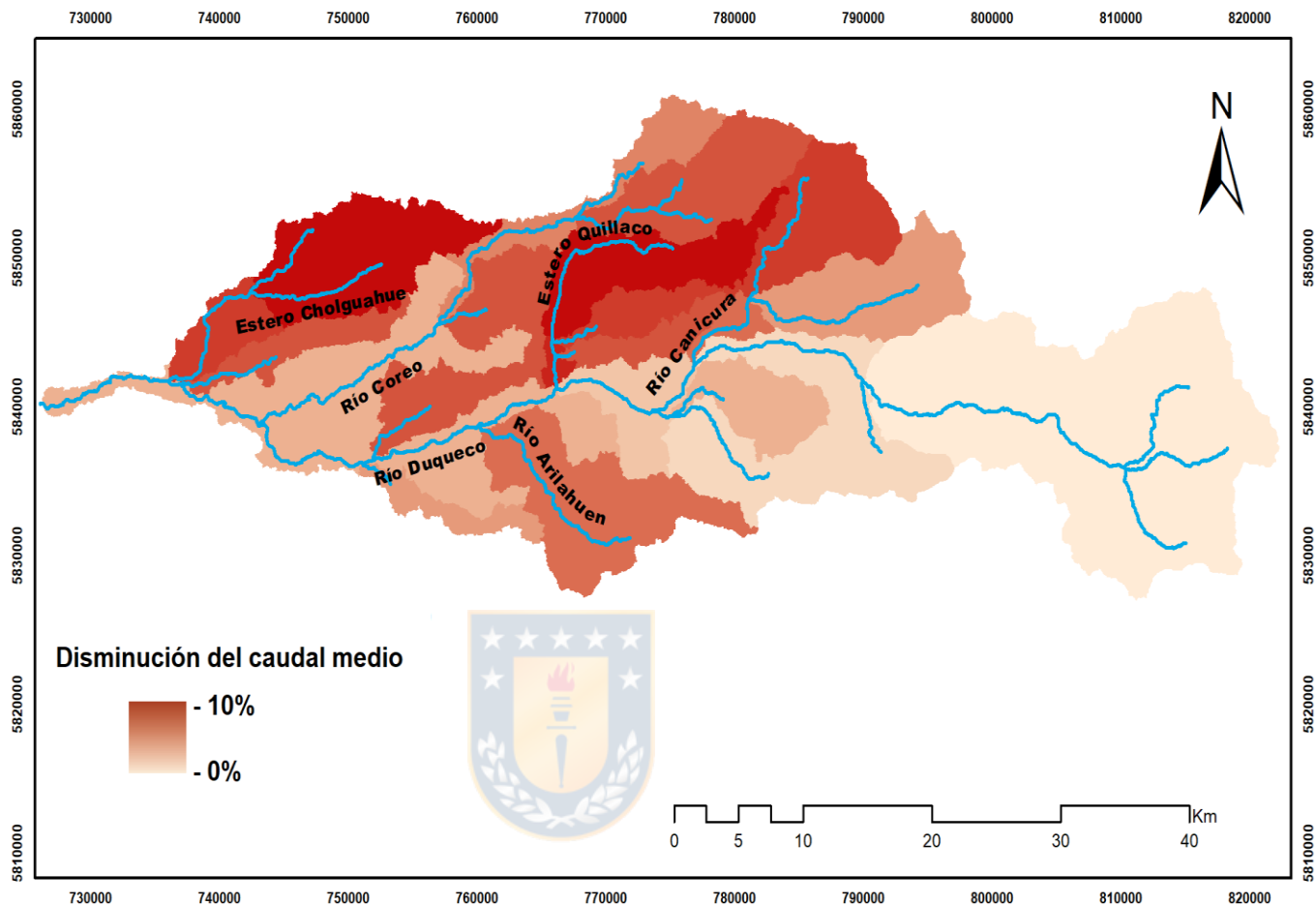


Figura 36. Variación espacial del caudal medio, considerando escenario de expansión forestal.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 37 muestra las reducciones estacionales del caudal provocadas por la expansión del uso de suelo forestal, medidas en las estaciones fluviométricas presentes en la cuenca, Río Duqueco en Villacura (Sub 25) y Río Duqueco en Cerrillos (Sub 29). La reducción anual del caudal para ambas subcuencas es superior al 3%. En el caso estacional se observa que en invierno y primavera las reducciones son de un orden similar, variando entre un 2,5% - 3,3% y 1,5% - 3,2% respectivamente. Para los meses de otoño las reducciones varían entre un 3,5% y un 5,6%. Mientras que en los meses de verano las reducciones

llegan a un 2,6 % (en el caso de la Sub 29) y a un 6,2% para la Sub 25, siendo esta la mayor reducción cuantificada para el caudal medio estacional (Figura 37), la cual se explica ya que la estación fluviométrica ubicada en la Sub 25 recibe directamente el aporte del estero Quillaco, el cual es uno de los que presenta la mayor reducción de caudal debido a la expansión forestal (Figura 36).

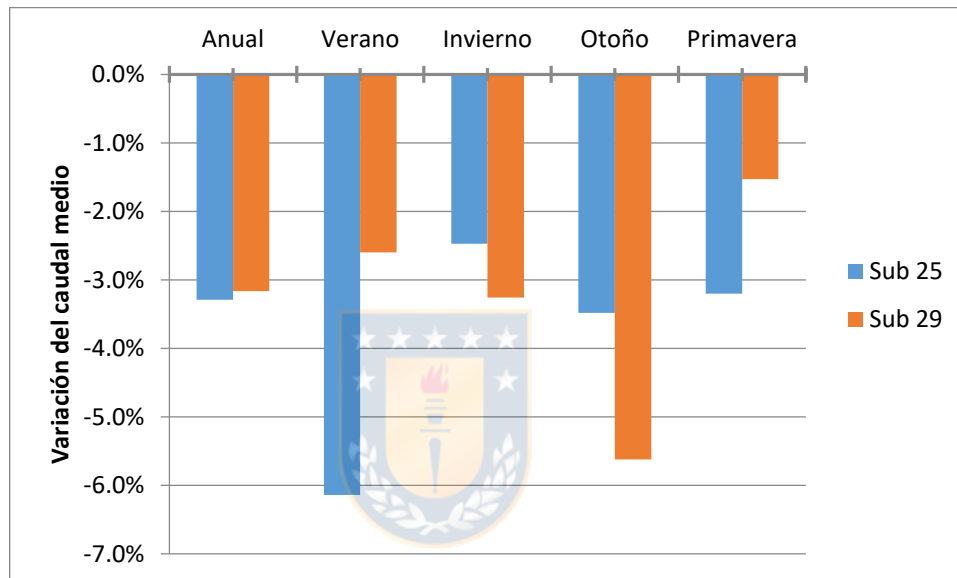


Figura 37. Variación estacional del caudal, medida en los puntos de control, subcuenca 25 y subcuenca 29.

Fuente: Elaboración propia

Al cuantificar la variación de los percentiles (Tabla 19) para ambas estaciones fluviométricas, se observa que los principales porcentajes de variación recaen sobre los percentiles más bajos (P5, P10 y P15), con reducciones que van desde un 10,5 a un 12,5% para el caso de la estación Villacura, mientras que para la estación Cerrillos las reducciones varían entre un 7,7 y 8,5 %, afectando así a los caudales medios mensuales con probabilidad de excedencia igual a 95%, 90% y 85%, los cuales corresponden a los caudales que son más frecuentes en el periodo de estiaje. Además, se observan reducciones en los percentiles correspondientes a los caudales medios (P40 – P60), con valores

máximos de reducción igual a 4,96 % para el P60 en la estación Villacura y 5,38% para el P45 en la estación Cerrillos. Para el caso de los percentiles más altos (correspondientes a los caudales máximos de la serie estudiada) la disminución decrece entre los percentiles 80 Y 95, con montos de reducción que varían entre 2,21% y 1,59% para el caso de la estación Villacura y 3,7 y 1,55% para el caso de la estación Cerrillos.

Tabla 19. Percentiles y su porcentaje de variación con respecto al escenario base.

Percentil	% de variación	
	Villacura (sub 25)	Cerrillos (sub 29)
P5	-10,45	-7,69
P10	-12,50	-7,78
P15	-10,82	-8,55
P20	-4,52	-3,16
P25	-5,15	-0,66
P30	-5,79	-2,41
P35	-4,35	-1,34
P40	-3,94	-3,39
P45	-4,67	-5,38
P50	-3,57	-5,14
P55	-3,69	-2,31
P60	-4,96	-2,24
P65	-2,76	-5,40
P70	-2,89	-4,06
P75	-3,17	-2,95
P80	-2,21	-3,70
P85	-2,42	-2,13
P90	-2,09	-2,68
P95	-1,59	-1,55

Fuente: Elaboración propia

Esta reducción cuantificada en los percentiles más bajos es consistente con lo mencionado por Little *et al.*, 2009 y Huber *et al.*, 2010 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.

5.3.2 Efectos espaciales y temporales del cambio climático sobre los caudales de la cuenca

Los escenarios climáticos simulados muestran reducciones de caudal en toda la zona de estudio, en el caso del escenario más conservador E1 (en donde la precipitación se redujo un 10% y la temperatura se aumentó en +0,5°C) la reducciones de caudal fluctúan entre un 10% y un 23,7% (Figura 38), en donde el estero Arilahuen es el principal afectado, alcanzando la reducción máxima en este escenario (23,7%). El río Coreo, también presenta importantes reducciones del caudal, afectando principalmente el nacimiento de este afluente (reducción de un 18%), llegando a un 15% en la confluencia con el río Duqueco. En la parte alta y media del estero Cholguahue (bordeando la parte noreste de la cuenca) las disminuciones varían entre un 19% y un 15% respectivamente. La parte alta de la cuenca presenta las mínimas reducciones para este escenario, alcanzando hasta un 10%.

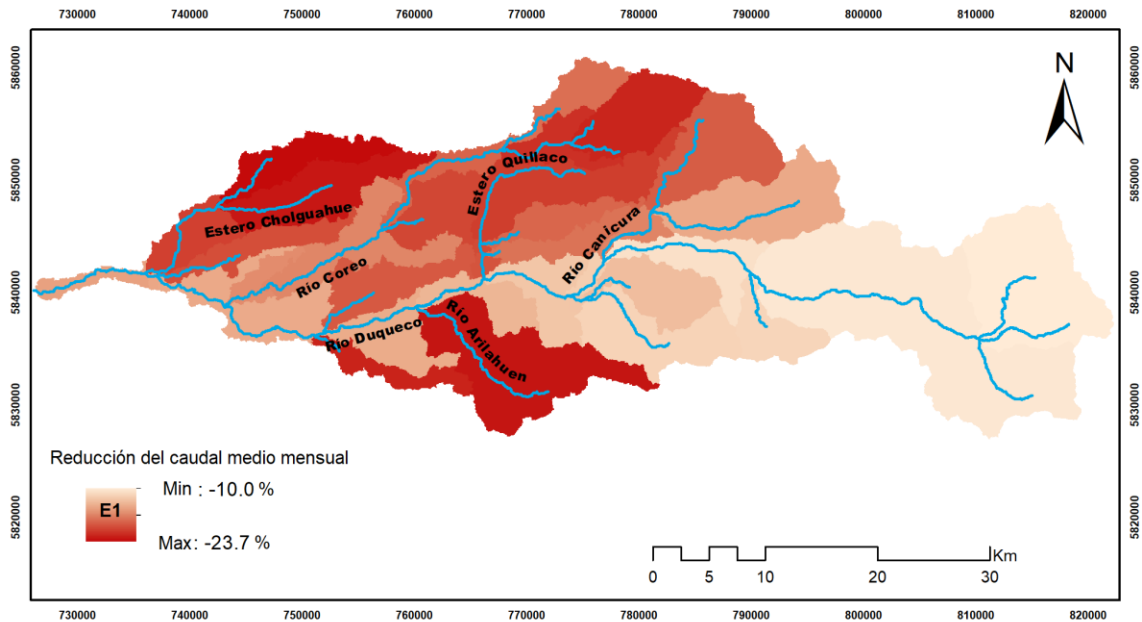


Figura 38. Variación espacial del caudal medio, bajo el escenario climático más conservador (E1).

Fuente: Elaboración propia

Para el escenario de cambio climático más crítico E3 (en donde la precipitación se redujo un 20% y la temperatura se aumentó en +1°C), las reducciones de caudal varían entre 20% y un 40% (Figura 39). Al igual que en E1, el estero Arilahuen concentra las máximas disminuciones para este escenario. La parte alta del río Coreo y el estero Cholguahue también se ven fuertemente afectadas, con disminuciones de caudal sobre el 36% y 32% respectivamente, en menor medida el estero Quillaco presente en la parte media de la cuenca, alcanza reducciones de caudal iguales a un 29%, mientras que el río Canicura evidencia disminuciones sobre un 26% en su nacimiento (sector noreste). Las mínimas reducciones de caudal (al igual que para el escenario E1) se presentan en la parte alta de la cuenca, con reducciones de hasta un 20%.

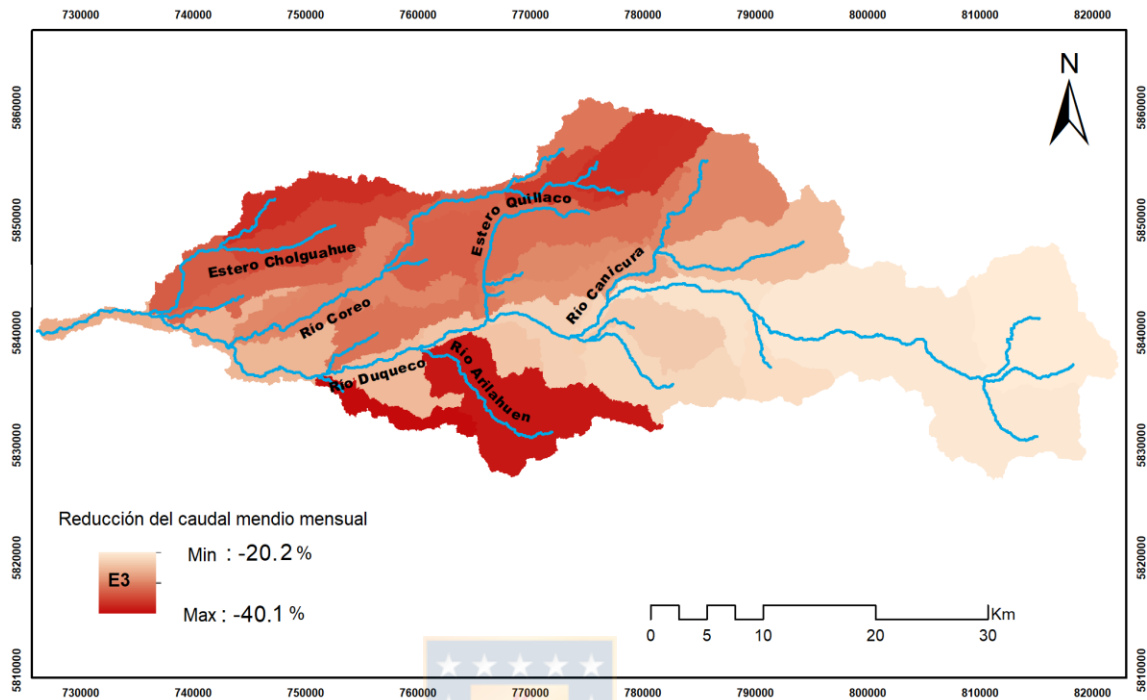


Figura 39. Variación espacial del caudal medio, bajo el escenario climático más crítico (E3).

Fuente: Elaboración propia

La Figura 40 muestra la reducción anual y estacional del caudal medio mensual a la salida de la cuenca para los 3 escenarios de cambio climático analizados. Se observan reducciones que van desde un 15,10% a un 26,64% para los escenarios E1 a E3.

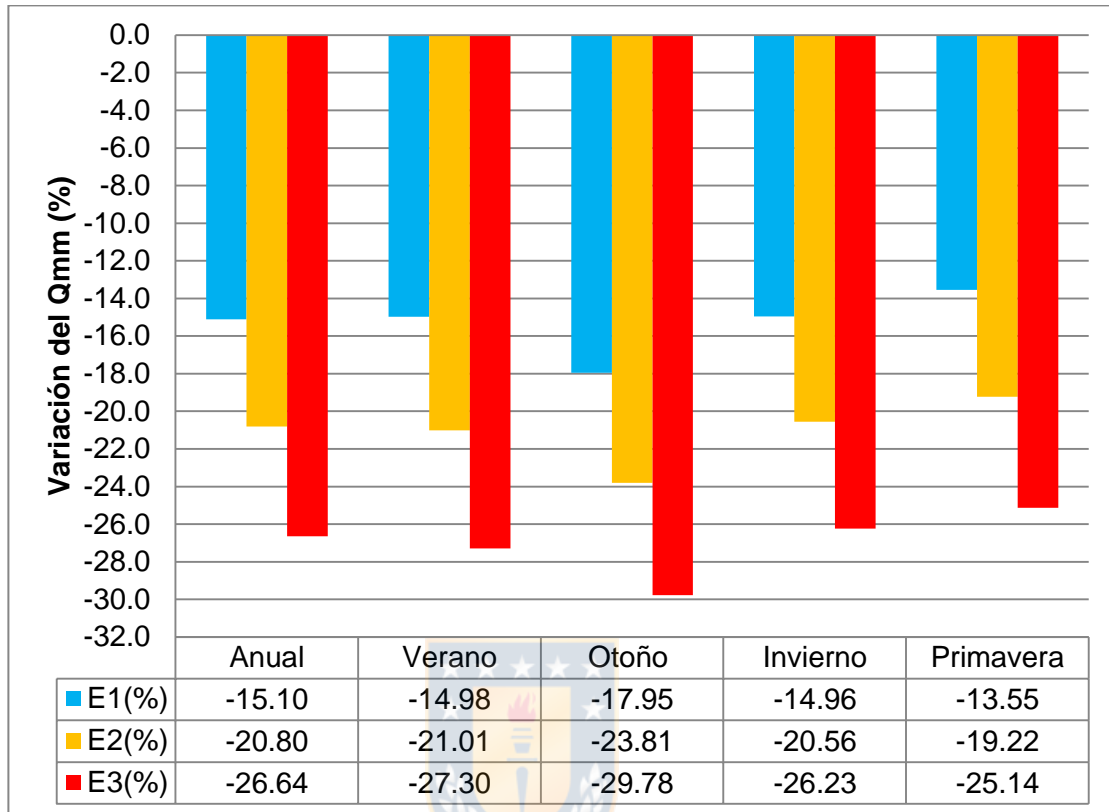


Figura 40. Variación estacional del caudal medio, bajo los escenarios de cambio climático.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los caudales estacionales (Figura 40), se observa que las mayores reducciones ocurren en la estación de otoño, desde 17,95% hasta 29,78% para el escenario más crítico. Los caudales de verano también se verán fuertemente afectados, con reducciones de un 14,98% y 27,30% entre escenarios, siendo estas reducciones mayores a las cuantificadas en el periodo invernal, en donde el caudal puede llegar a variar un 26,23% en el escenario más crítico. La menor reducción estacional en todos los escenarios se observa en primavera, desde 13,55% a 25,14% para el E1 y E3 respectivamente.

5.3.3 Disponibilidad hídrica futura considerando escenarios de cambio climático y expansión forestal

La Tabla 20 presenta la estadística descriptiva del escenario de cambio de uso de suelo (CUS) en conjunto con los escenarios de cambio climático propuestos para la cuenca del río Duqueco. Se observa que para todos los escenarios se proyecta una disminución del caudal medio mensual a la salida de la cuenca. El escenario 3 resulto ser el más crítico con un reducción de -26,6% para el caudal medio mensual, siendo este resultado esperable debido a que las reducciones de precipitación y temperatura son las más altas (- 20% y +1°C respectivamente). Luego el escenario 2 corresponde al segundo escenario más crítico, el cual genero una reducción del caudal medio mensual igual a 20,8%, mientras que el escenario 1 presento una reducción menor igual a 15,1%, debido a que presenta los menores cambios en relación a las variables meteorológicas. En comparación con el escenario CUS el cual solo redujo un 3,3% los caudales medios a la salida de la cuenca considerando un aumento de un 25% en el uso de suelo forestal, los escenarios climáticos generan reducciones mayores, evidenciando que a mayores cambios en la precipitación mayores cambios se generan en el caudal. Sin embargo el 3,3% de reducción generado por la expansión forestal es consistente con lo mencionado por Alvares *et al.*, 2019 quien evidencio que el remplazo de 10.000 ha de plantaciones forestales genera disminuciones en la escorrentía media anual (que varía entre 2,2% y 7,2%), en donde esta reducción depende de factores como el área de la cuenca, las condiciones climáticas y los usos de suelo remplazados por la expansión forestal.

La desviación estándar al igual que el caudal medio exhibe reducciones para todos los escenarios, lo que indica que la variabilidad de caudales se hace menor. Para el CUS esta disminución de la variabilidad es de un 3,2%, mientras

que para el escenario climático más crítico (E3) la desviación estándar puede llegar a variar un 25,1%.

Tabla 20. Análisis estadístico para el escenario de expansión forestal y los escenarios del cambio climático.

Estadísticos	Escenarios				
	LB	CUS	E1	E2	E3
Media	59,92	57,87	50,87	47,46	43,96
Mediana	45,21	43,59	37,79	34,95	32,11
Moda	-	115,90	35,96	33,61	57,67
Desviación estándar	46,93	45,45	40,29	37,74	35,14
Curtosis	0,60	0,58	0,62	0,63	0,64
Mínimo	8,67	8,02	6,88	6,36	5,79
Máximo	216,00	208,50	186,10	174,00	161,00
Variación del caudal medio	-	-3,34 %	-15,10 %	-20,80 %	-26,64 %

Fuente: Elaboración propia

Los máximos de caudal, debido al CUS podrían disminuir de 216 m³/s a 208 m³/s, mientras que para los escenarios climáticos (E1, E2 Y E3) la reducción podría llegar a 186 m³/s, 174 m³/s y 161 m³/s respectivamente. Cuantificándose una reducción del caudal máximo equivalente a un 25.47 % para el escenario más crítico (E3). Los caudales mínimos presentan igualmente una tendencia a la disminución, siendo este mucho menor (7,5%) en comparación al escenario E3 en donde la disminución del caudal mínimo haciende a un 33,2 %.

Los efectos sobre los caudales máximos y mínimos también pueden verse reflejados en el Hidrograma mensual (Figura 41), en donde debido al régimen hidrológico pluvial presente en la cuenca, se espera que la disminución de caudales serán principalmente dependientes de la menor cantidad de precipitación caída. En la Figura 41 se evidencia que en comparación con el CUS, los 3 escenarios climáticos reducen en mayor magnitud los caudales del Hidrograma, generando que estas reducciones sean mucho más influyentes

para todo los meses debido a las disminuciones de precipitación modeladas para toda la cuenca.

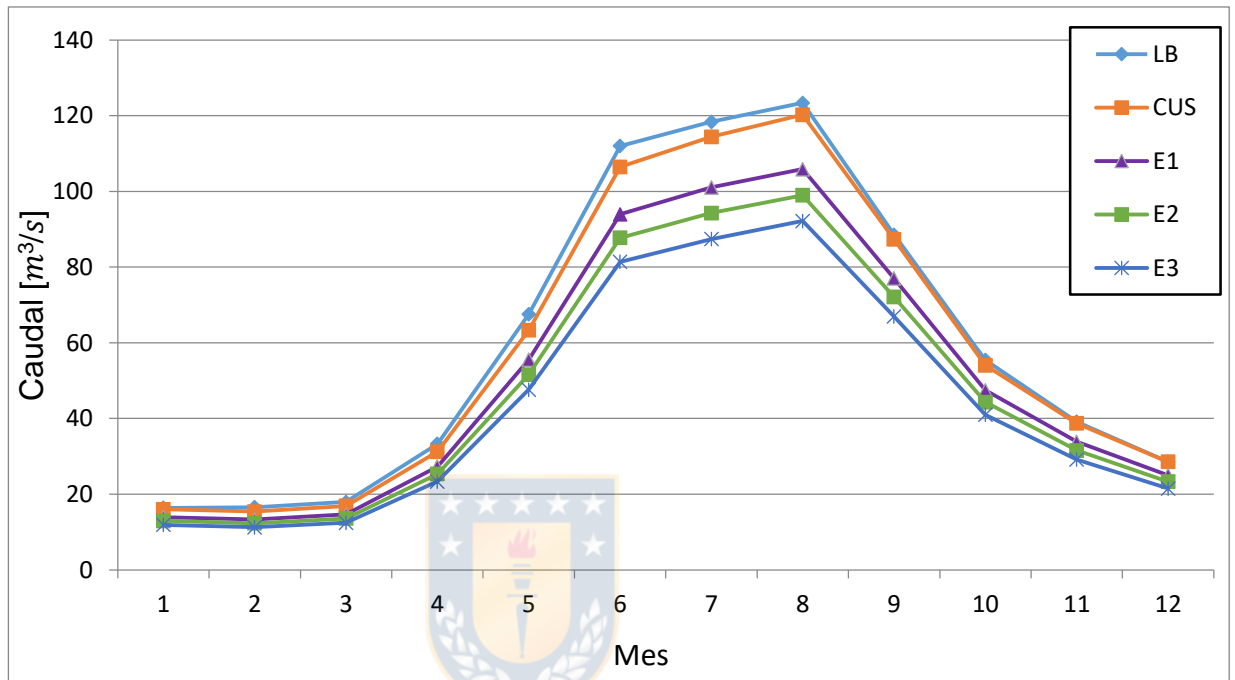


Figura 41. Hidrograma mensual para el escenario de cambio de uso de suelo (CUS) y los diferentes escenarios de cambio climático (E1, E2 y E3).

Fuente: Elaboración propia

Para todos los escenarios julio y agosto (mes 7 y 8) continúan siendo los meses con mayor caudal promedio, mientras que los meses de verano siguen presentando los caudales de menor magnitud. El caudal máximo promedio varía de 123 m³/s (LB) a 120 m³/s para el escenario de CUS, mientras que para los escenarios climáticos el caudal disminuye a 105 m³/s, 99 m³/s y 92 m³/s respectivamente. El caudal mínimo disminuye desde 16,6 m³/s a 15,4 m³/s para el CUS, llegando a 11,25 m³/s para el escenario más crítico (E3).

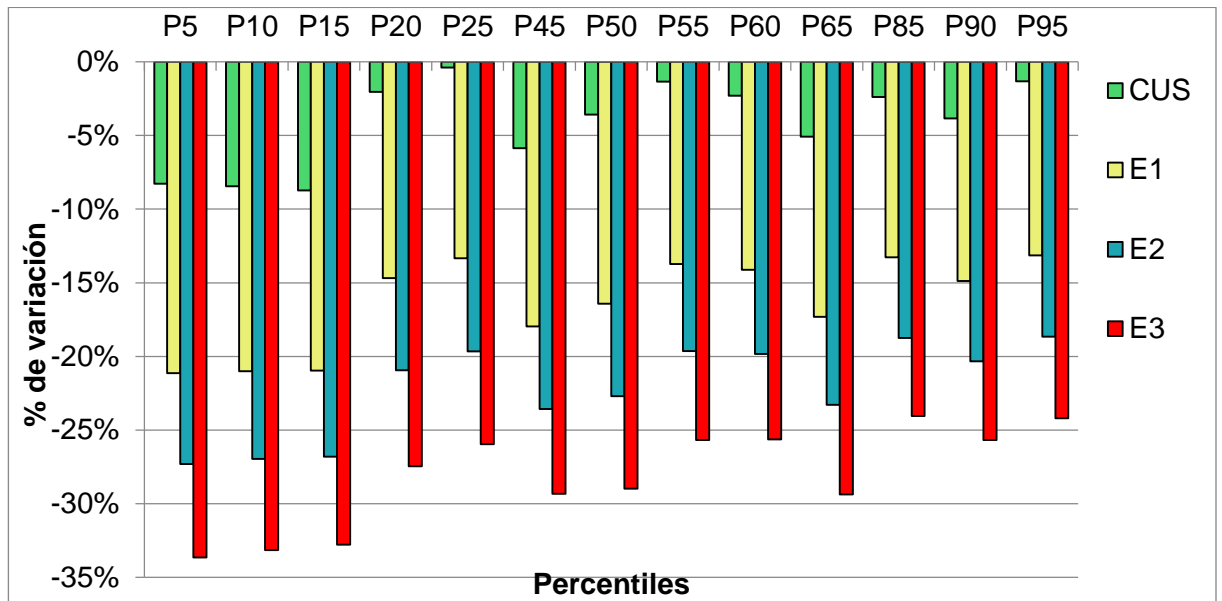


Figura 42. Variación (%) de percentiles para todos los escenarios, cuantificados a la salida de la cuenca.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 42 muestra la variación porcentual de los percentiles a la salida de la cuenca para todos los escenarios modelados. Para el escenario CUS, las reducciones de los percentiles bajos varían entre 7% y 9%, mientras que para los escenarios climáticos las reducciones aumentan, con rangos de cambio entre un 20% y 34% para cada escenario respectivamente, registrándose la mayor reducción para todo los escenarios en el percentil 5. Los percentiles medios (P45, P50, P55, P60 Y P65) presentan la segunda mayor disminución, cuantificada principalmente en los percentiles 45 y 65, cuyas reducciones para el escenario CUS varían entre un 6% y un 5%, llegando a un 18% y 17% en el escenario 1, aumentando a un 22 y 23% en el escenario 2 y a 29% para el escenario más crítico (E3). Para los percentiles mayores la reducción más importante se da en el percentil 90, llegando a un 4%, 15%, 20% y 26% para cada escenario. Al observar el comportamiento de los percentiles de todos los escenarios (medidos a la salida de la cuenca), se aprecia que se mantiene la tendencia de reducción en los percentiles más bajos (P5, P10 Y P15) establecidas anteriormente en la Tabla 19.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se calibró y validó el modelo hidrológico SWAT para caudales medios mensuales y diferentes coberturas de uso de suelo en la cuenca del río Duqueco, obteniendo un “buen” desempeño para el periodo de calibración y un “muy buen” desempeño para el periodo de validación. Esto indica que el modelo reproduce la serie de caudales de la cuenca y su variabilidad, constituyendo una herramienta útil para la simulación de caudales futuros en base a cambios en las condiciones de uso de suelo y clima.

Mediante el modelo IDRISI y su módulo LCM (*Land change modeler*) se logró generar un escenario futuro de expansión forestal para el año 2030 en la cuenca del río Duqueco, en función de los cambios analizados en las coberturas temporales de usos de suelo disponibles para la cuenca (1994 y 2015). A través de la regresión logística se estimaron los patrones espaciales (variables independientes) que influyen la expansión del uso de suelo forestal en la cuenca, en donde la presencia previa de plantaciones forestales y la presencia de terrenos agrícolas emergen como las principales variables que propician la expansión de las plantaciones, siendo este último el principal uso de suelo reemplazado por plantaciones forestales en el escenario futuro. Por otro lado, la presencia del bosque nativo (ubicado espacialmente en la parte alta de la cuenca), así como la elevación y la pendiente son los principales patrones que restringen el avance de las plantaciones en la cuenca.

Debido a la expansión de las plantaciones forestales hacia el año 2030, el caudal medio se verá reducido en un 3,3 % a la salida de la cuenca. Estacionalmente los caudales se verán afectados mayormente en verano y otoño (los meses más secos), con reducciones que llegan a un 6,2% y un 5,6% respectivamente. Especialmente la mayor reducción llega a un 10%, cuantificada en los nacimientos de las subcuencas del estero Cholguahue y el

estero Quillaco (principales subcuencas en donde se produjo la expansión del uso de suelo forestal), debido a esto la serie de caudales medios mensuales cuantificada en las subcuencas 25 y 29 (puntos de control) se verá afectada principalmente en los percentiles 5, 10, 15 Y 20, con reducciones máximas de un 12,5% para el P10 en la subcuenca 25.

Los escenarios climáticos reducen el caudal medio mensual en un 15,1 % (escenario más conservador), mientras que para el escenario más crítico (E3) las reducciones pueden llegar a un 26,6% en la salida de la cuenca. Espacialmente todas las subcuencas presentan reducciones, en donde el estero Arilahuen (ubicado en la parte media - baja) es el principal tributario afectado, con reducciones que alcanzan un 40% para el escenario más crítico, mientras que las subcuencas del estero Cholguahue y Quillaco (principales subcuencas afectadas por el escenario de cambio de uso de suelo), las reducciones para el E3 pueden llegar a un 36% y 29% respectivamente. Estacionalmente los caudales de otoño serán los principales afectados, con disminuciones de hasta un 30% para el escenario más crítico. Los principales percentiles afectados corresponden a los percentiles más bajos (P5, P10 y P15), en donde para el escenario de cambio de uso de suelo la reducción varía entre un 8% y 9%, mientras que para el E3 las reducciones pueden llegar a variar entre un 35% - 36%, evidenciando de esta forma que para todo los escenarios modelados a futuro, los caudales de estiaje serán los principales afectados, aumentando el estrés hídrico que se produce en los meses con menor precipitación.

Recomendaciones para un trabajo futuro:

Efectuar un escalamiento de las predicciones climáticas en base a escenarios de cambio climático más actualizados (RCP), para de esta forma incorporar con mayor exactitud (espacial y temporal) las proyecciones futuras de precipitación y temperatura más probables para la cuenca del río Duqueco.

Efectuar una combinación entre los datos de precipitación de la base global CHRISP y los datos locales de precipitación existentes en las estaciones meteorológicas de la DGA, con el fin de que las subestimación en los montos máximos de lluvia sean de menor magnitud, lo cual podría mejorar la capacidad del modelo SWAT para predecir los montos máximos de caudal.

Incorporar la dinámica de crecimiento de las especies forestales a la hora de modelar el uso de suelo a futuro, con el fin de ver si existen cambios sustanciales en la reducción de caudal atribuido a la edad de las especies.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Abbaspour, K.C., 2015. SWAT-CUP: SWAT Calibration und Uncertainty Programs. A user manual.

Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., Srinivasan, R., 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine thur watershed using SWAT. *J. Hydrol.* 333, 413–430.

Aerts, R., Hundera, K., Berecha, G., Gijbels, P., Baeten, M., Van Mechelen, M., Hermy, M., Muys, B., Honnay, O., 2011. Semi-forest coffee cultivation and the conservation of Ethiopian Afromontane rainforest fragments. *For. Ecol. Manag.* 261, 1034–1041.

Aguayo, M. 2008. El cambio de uso de suelo en el centro-sur de Chile. Comprendiendo su dinámica a través de la modelación espacialmente explícita y explorando sus efectos ambientales en una cuenca hidrológica de mesoescala. Concepción: Tesis Doctorado en Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, 2008.

Aguayo, M.; Wiegand, T.; Azócar, G.; Wiegand, K. and Vega, C. Revealing the driving forces of mid- cities urban growth patterns using spatial modeling: a case study of Los Ángeles, Chile. *Ecology and Society*, 2007, Vol. 12, Nº 1, p. 13. Disponible en Internet: <http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss1/art13/>.

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*, 65, 197–214. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000300010>.

Alvarez-Garretón, C., Lara, A., Boiser, J., Galleguillos, M., 2019. The impacts of native forest and forest plantations on water supply in Chile. *Forests* 2019. Disponible en <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/6/473>.

Amare, D., Mekuria, W., T/wold, T., Belay, B., Teshome, A., Yitaferu, B., Tessema, T., Tegegn, B., 2016. Perception of local community and the willingness to pay to restore church forests in Ethiopia. *For. Trees Liv.* 25 (3), 173–186.

Armesto, J. J., Manushevich, D., Mora, A., Smith-Ramirez, C., Rozzi, R., Abarzúa, A. M., & Marquet, P. A. (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*, 27(2), 148–160. <http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.07.006>.

Banco Mundial, 2011. Diagnóstico de la Gestión de los Recursos Hídricos. Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Región para América Latina y el Caribe. Chile, 88 pp. <http://water.worldbank.org/node/83999> (Consultado el 20 de noviembre 2018).

Beven, K. 2001. *Rainfall – Runoff Modelling: The Primer*, John Wiley and Sons Ltd.

Beven, K.J., Kirkby, M.J., Schofield, N. y etiqueta A.F., 1984. Prueba de un modelo de pronóstico de inundaciones con base física (modelo) para tres captaciones del Reino Unido. *Revista de Hidrología* 69, 119-143.

Boisier, J., Rondanelli, R., Garreaud, R. and Muñoz, F. 2016. Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile, *Geophys. Res. Lett.*43, doi:10.1002/2015GL067265.

Borah, D., and Bera, M. 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. *Trans. ASAE* 46(6): 1553-1566

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.

CEPAL. 2012a. Disponibilidad futura de los recursos hídricos frente a escenarios de cambio climático en Chile. Naciones Unidas. Santiago de Chile. Chile.

CEPAL. 2012b. La economía del cambio climático. Naciones Unidas. Santiago de Chile. Chile.

CHG. Base de datos CHRIPS. Precipitación diaria mundial 0.05°. Recuperado en <http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/> (consultado el 20 de octubre de 2017).

Chow, V. 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Series in Water Resources.

Cibin, R., Chaubey, I., & Engel, B. (2012) Simulated watershed scale impacts of corn stover removal for biofuel on hydrology and water quality. *Hydrological Processes*, 26, 1629–1641.

CIREN. Estudio agrológico VIII Región. Descripción de suelos, materiales y símbolos. Tomos 1 y 2. Centro de información de recursos naturales, Chile.

Climate – Data. Datos meteorológicos para la ciudad de Los Ángeles, región del Biobío. Recuperado de www.climate-data.org/ (consultado el 12 de mayo del 2019).

CRAHI. Tipos de modelos hidrológicos. Recuperado de www.crahi.upc.edu/ (consultado el 10 de octubre del 2018).

CR2, 2015. Report to the Nation: The Central Chile Mega-Drought. Technical report from the Center for Climate and Resilience Research. 30 pp. Santiago-Chile. Available on line at <http://www.cr2.cl/megasequia> (consultado el 9 de junio de 2018).

CONAMA – DGF. 2006. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XX. Informe Final. Santiago. Chile.

DGA (2017), Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.

DGA (1987). Balance Hídrico de Chile, Santiago de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.

DGA, Registros fluviométricos y termométricos en línea. Disponible en <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes> (consultado el 28 de septiembre de 2018).

Díaz S, J Fargione, ISC F. y D Tilman. (2006). Biodiversity Loss Threatens Human Well-Being *PLoS Biology*, 4 (8), 1300-1305.

Eastman, J.R. (2012) IDRISI Selva Tutorial. IDRISI Production, Clark Labs-Clark University, Worcester, 45.

Echeverria, C., Coomes, D., & Newton, A. C. (2007). Spatially explicit models to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile, (April 2008). <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.10.045>.

Echeverria, C.; Huber, A. & Taberlet, F. Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile. *Bosque*, 2008, Vol. 28, Nº 3, p. 271-280.

FAO. (2010b). Global forest resource assessment 2010. United Nations Food and Agriculture Organization.

Fohrer, N., Haverkamp, K., Eckhardt, H., & Frede, G. (2001). Hydrologic Response to land use changes on the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(7–8), 577–582. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464190901000521>.

Foley, J.A., Defries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, C., Ramankutty, N., Snyder, P.K., 2005. Global consequences of land use. *Science* 309 (22), 570–573.

Friedl, M.A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., Huang, X.M., 2010. MODIS collection 5 global land cover: algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing Environ.* 114 (1), 168–182.

Garreaud, R. 2011. Cambio Climático: Bases físicas e impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro (INIA-Chile)*, No. 93. (Mar-Abr 2011), 13-19.

Garreaud, R., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J. y Zambrano-Bigiarini, M. 2017. The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6307-6327.

Germer, S., Neill, C., Vetter, T., Chaves, J., Krusche, A. V., & Elsenbeer, H.(2009). Implications of long-term land-use change for the hydrology and solute budgets of small catchments in Amazonia. *Journal of Hydrology*, 364, 349–363.

Grimm, N.B., Faeth, S.H., Golubiewski, N.E., Redman, C.L., Wu, J.G., Bai, X.M., Briggs, J.M., 2008. Global change and the ecology of cities. *Science* 319 (8), 756–760.

Golmohammadi, G., Prasher, S., Madani, A. and Rudra, R. 2014. Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *Hydrology*, 1, 20-39.

Gupta, HV; Kling, H; Yilmaz, KK ; Martinez, GF. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377:80-91.

Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A.V., Chini, L., Justice, C.O., Townshend, J.R.G., 2013. High-resolution global maps of 21st century forest cover change. *Science* 342 (15), 850–853.

Harvey, M. and Pilgrim, S. (2011). The new competition for land: Food, energy, and climate change. *Food Policy*, 36, Supplement 1 (0), S40-S51.

Heilmayr, R., Echeverría, C., Fuentes, R., and Lambin, E. F. (2016). A plantation-dominated forest transition in Chile. *Applied Geography*, 75, 71–82. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.014>

Huber, A., Iroume, A., and Bathurst, J. (2008). Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. *Hydrological Processes*, 22, 142–148. <http://doi.org/10.1002/hyp>

Huber, A., Iroume, A., Mohr, C., and 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*, 31(3), 219–230. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.020>

Huber, A., and Lopez, D. (1993). Cambios en el balance hídrico provocados por tala rasa de un rodal adulto de *Pinus radiata* (D. Don), Valdivia, Chile. *Bosque*, 14(2), 11–18.

Huber, A., and Trecaman, R. (2000). Efecto de una plantación de *Pinus radiata* en la distribución espacial del contenido de agua del suelo. *Bosque*, 21(1), 37–44. <http://doi.org/10.4067/S0365-28072000000200008>.

Hyandye, C. B., Worqul, A., Martz, L. W., & Muzuka, A. N. N. (2018). The impact of future climate and land use / cover change on water resources in the Ndembera watershed and their mitigation and adaptation strategies. *Environmental Systems Research*. <https://doi.org/10.1186/s40068-018-0110-4>

IDE – CHILE. Datos geoespaciales región del Biobío (usos de suelo, ciudades, caminos). Recuperado de www.ide.cl/ (consulado el 25 de marzo de 2019).

INFOR. 2016. Anuario Forestal Boletín Estadístico N°154. Ministerio de Agricultura, Instituto Forestal, Santiago de Chile.

INFOR. 2018. Anuario Forestal Boletín Estadístico N°163. Ministerio de Agricultura, Instituto Forestal, Santiago de Chile.

IPCC. 2013. Cambio Climático. Bases Físicas. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC. Grupo de trabajo I. España

IPCC. 2014. Cambio Climático. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución al 5to informe del IPCC del grupo de trabajo II.

Iroumé, A., & Palacios, H. Afforestation and changes in forest composition affect runoff in large river basins with pluvial regime and Mediterranean climate, Chile. *Journal of Hydrology*, 2013, Vol. 505, p.113-125.

- Jha, M., Arnold, J., Gassman, P., Giorgi, F. and Gu, R. 2006. Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi river basin streamflows using SWAT. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 42: 997–1015. doi:10.1111/j.1752-1688.2006.tb04510.
- Lara, A., Solari, E., Prieto, L., 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' S). *Bosque (Valdivia)* 33(1) (pp. 13e23).
- 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*, 258(4), 415–424. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.004>
- 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*, 374(1–2), 162–170. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.011>
- 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. 2014. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Santiago. Chile.
- MMA. 2017. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2017-2022). Santiago. Chile.
- Molina, A., Vanacker, V., Balthazar, V., Mora, D., & Govers, G. (2012). Complex land cover change, water and sediment yield in a degraded Andean environment. *Journal of Hydrology*, 472, 25–35.
- Moriasi, D.N. et al., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in Watershed Simulations. *Watershed Simulations* 50 (3), 885–900.
- Nahuelhual, L., Carmona, A., Lara, A., Echeverría, C., & Gonzalez, M. (2012). Land-Cover Change to Forest Plantations: Proximate Causes and Implications for the Landscape in South Central Chile. *Landscape and Urban Planning*, 107(1), 12e20.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J. and Williams, J. 2005. Soil and Water Assessment Tools – Theoretical Documentation. Grassland, Soil and Water Research Laboratory – Agricultural Research Service. Backland Research Center – Texas Agricultural Experiment Station. Temple – Texas, USA.
- Niemeyer, H. 1980. Hoyas hidrográficas de Chile. Octava Región. Preparado para la Dirección General de Aguas.
- ODEPA. 2018. Información regional, región del Biobío. Recuperado de www.odepa.gob.cl/.
- Ponce, V. 1989. Engineering Hydrology. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New Jersey.
- Quintana, J. & Aceituno, P. 2006. Trends and Interdecadal Variability of Rainfall in Chile. Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24–28, 2006, INPE, p. 371–372.

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. Preparado para CONAMA. Santiago de Chile. Chile.

Rioseco, R & Tesser, C. 2019. Cartografía Interactiva de los climas de Chile [en línea]. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Disponible en www.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva.

Riquelme, K. 2018. Evaluación de los efectos del cambio climático sobre los caudales futuros de la cuenca del río Duqueco. Tesis pregrado: Ingeniería Ambiental, Universidad de Concepción, Concepción Chile.

Singh, V. 1989. Hydrologic System. Vol.2.Watershed Modelling. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New Jersey.

Soil Conservation Service (1972). Sección 4: Hydrology in national Engineering Handbook. SCS.

Scott, D. F. (2005). On the hydrology of industrial timber plantations. Hydrological Processes, 19, 4203–4206.

Singh, V. 1989. Hydrologic System. Vol.2.Watershed Modelling. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New Jersey.

Stehr, A. 2008. Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua bajo escenarios de cambio climático para dos subcuencas del río Biobío incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana.

Stehr, A, Aguayo, M., Link, O., Parra, O., Romero, F., & Alcayaga, H. (2010 a). Modelling the hydrologic response of a mesoscale Andean watershed to changes in land use patterns for environmental planning. Hydrology and Earth System Sciences, 1963–1977. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1963-2010>

Stehr, A, Debels, P., Arumi, J. L., Alcayaga, H., & Francisco, R. (2010 b). Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile. Tecnología y Ciencias Del Agua, 1(4), 37–58.

Swann, A. L. S., Longo, M., Knox, R. G., Lee, E., & Moorcroft, P. R. (2015). Agricultural and Forest Meteorology Future deforestation in the Amazon and consequences for South American climate. Agricultural and Forest Meteorology, 214–215, 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.07.006>

Tsegaye, D., Moe, S.R., Vedeld, P., Aynekulu, E., 2010. Land-use/cover dynamics in Northern Afar rangelands, Ethiopia. Agric. Ecosyst. Environ. 139, 174–180.

USGS. Modelos de elevación digital de sensor SRTM. Recuperado en <https://earthexplorer.usgs.gov/> (consultado el 10 de septiembre de 2018).

Valdés-pineda, R., Pizarro, R., García-chevesich, P., Valdés, J., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A and Helwig, B. 2014. Water governance in Chile: Availability, management and climate change. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>.

Vicuña, S., Garreaud, R. and Mcphee, J. 2010. Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile.

Webb, A.A., 2009. Streamflow response to Pinus plantation harvesting: Canobolas State forest, southeastern Australia. *Hydrological Processes* 23,1679–1689.

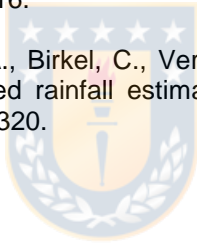
Webb, A. A., & Kathuria A. (2012). Response of streamflow to afforestation and thinning at Red Hill, Murray Darling Basin, Australia. *Journal of Hydrology*, 412-413, 133-140. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.033>.

Webb, A. 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*, 464–465, 412–422. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.034>.

Xu, C. 2002. *Textbook of Hydrologic Model*. Department of Earth Science. Uppsala University. Uppsala. Sweden.

Yang, D., Herath, S., & Musiak, K., 2000. Comparación de diferentes modelos hidrológicos distribuidos para la caracterización de la variabilidad espacial de captación. *Journal of hydrological procedia* 14 (3), 403-416.

Zambrano-Bigiarini, M., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., and Ribbe, L. 2017. Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile, 1295–1320.



7. ANEXOS

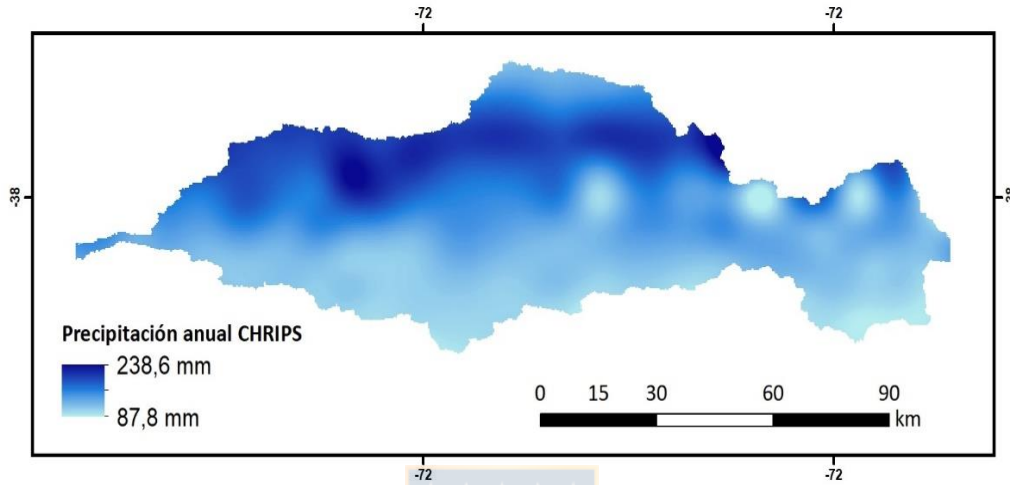


Figura Anexo 1: Distribución espacial de la precipitación anual en la cuenca.

Fuente: Base de datos CHRIPS

Mapa de Cambios 1994 - 2015

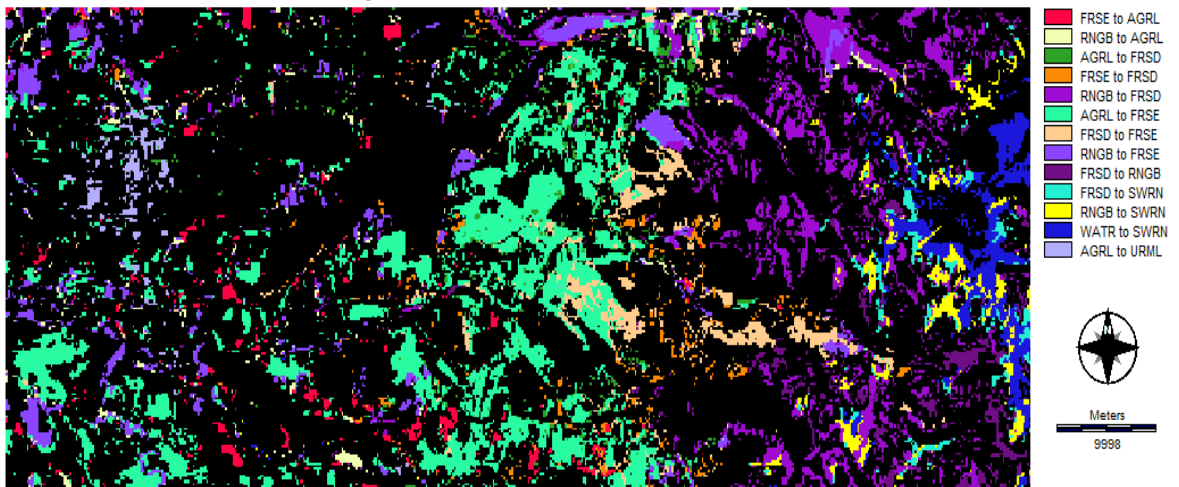


Figura ANEXO 2: Mapa de cambios de los usos de suelo (1994 – 2015).

Fuente: Elaboración propia mediante IDRISI 17.0.

Tabla ANEXO 3: Matriz de transición para el periodo 1994 – 2015.

	AGRL	FRSD	FRSE	FRST	RNGB	SWRN	URML	WATR	WETN
AGRL	0,5998	0,0342	0,6454	0,0053	0,0173	0,0003	0,0212	0,0015	0,0010
FRSD	0,0227	0,7313	0,1092	0,0035	0,0860	0,0411	0,0007	0,0041	0,0014
FRSE	0,0702	0,0460	0,8374	0,0086	0,0290	0,0005	0,0060	0,0017	0,0005
FRST	0,1640	0,3775	0,3685	0,0432	0,0371	0,0035	0,0010	0,0031	0,0020
RNGB	0,0540	0,3734	0,2173	0,0054	0,2260	0,0937	0,0094	0,0163	0,0045
SWRN	0,0086	0,1125	0,0072	0,0004	0,1315	0,6987	0,0094	0,0234	0,0083
URML	0,0432	0,0206	0,0045	0,0031	0,0120	0,0060	0,9053	0,0079	0,0028
WATR	0,0078	0,0849	0,0247	0,0025	0,1011	0,5767	0,0019	0,1942	0,0061
WETN	0,0454	0,3444	0,1347	0,0115	0,0877	0,1180	0,0001	0,1554	0,1090

Fuente: Obtenido de IDRISI 17.0.

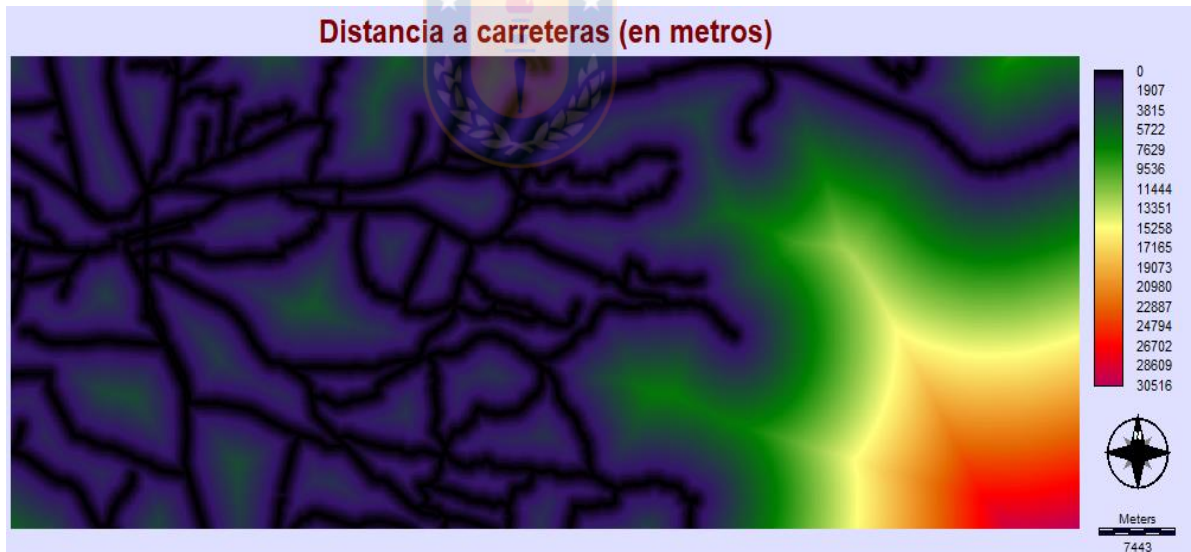


Figura ANEXO 4: Distancia a carreteras.



Figura ANEXO 5: Distancia a zonas urbanas.

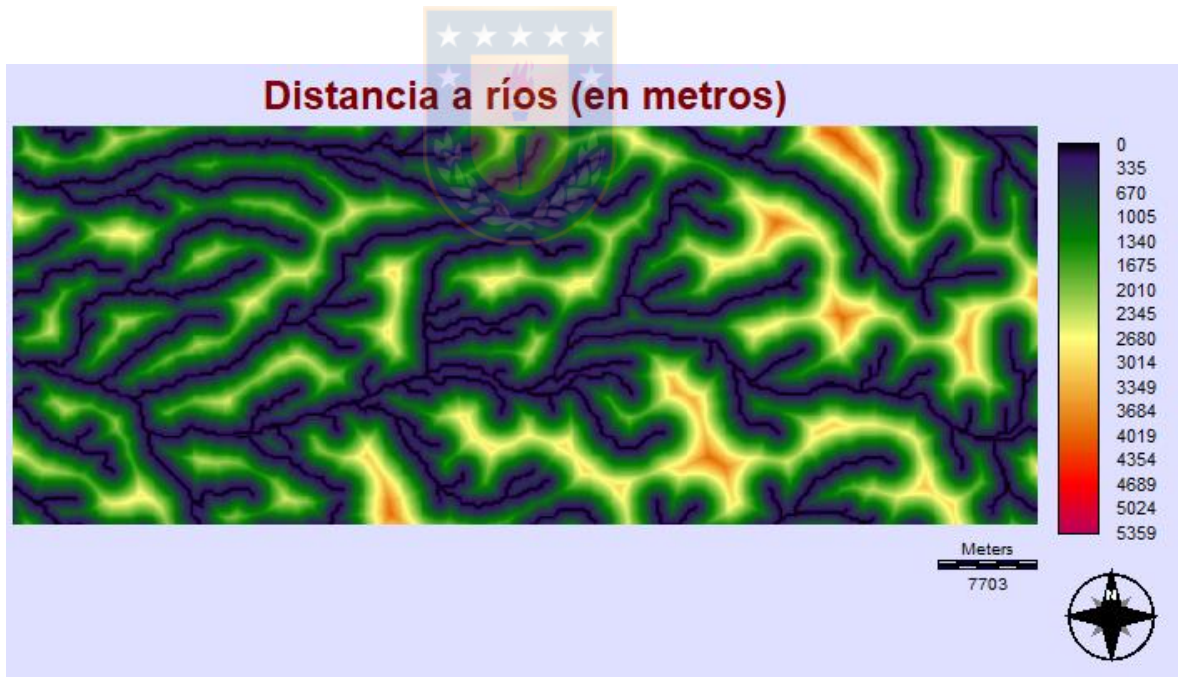


Figura ANEXO 6: Distancia a ríos.

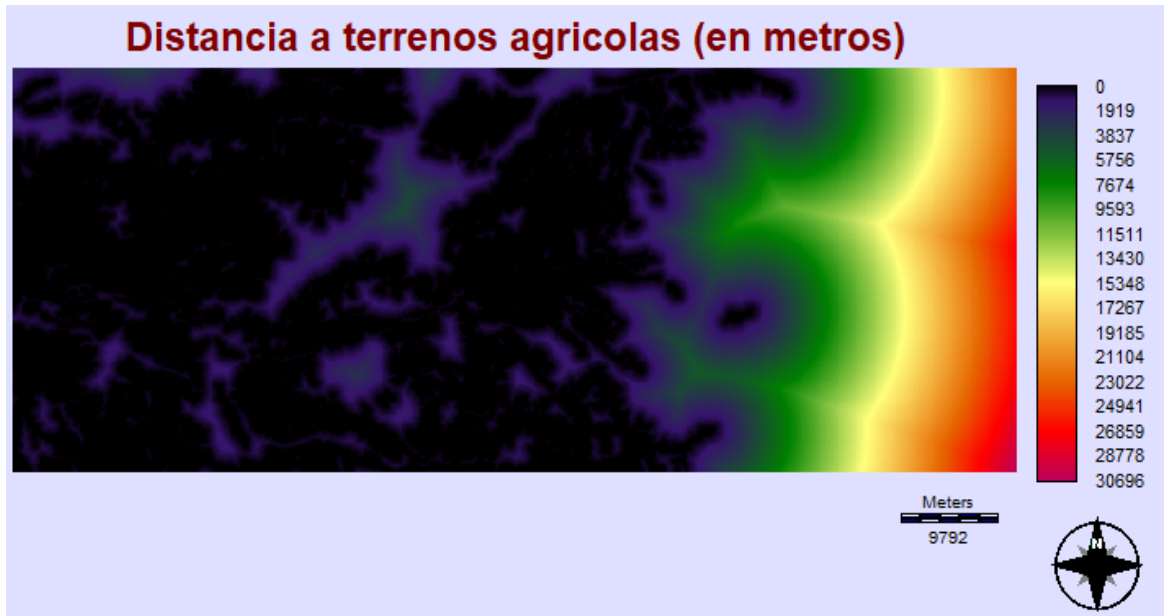


Figura ANEXO 7: Distancia a terrenos agrícolas.



Figura ANEXO 8: Distancia a bosque nativo.

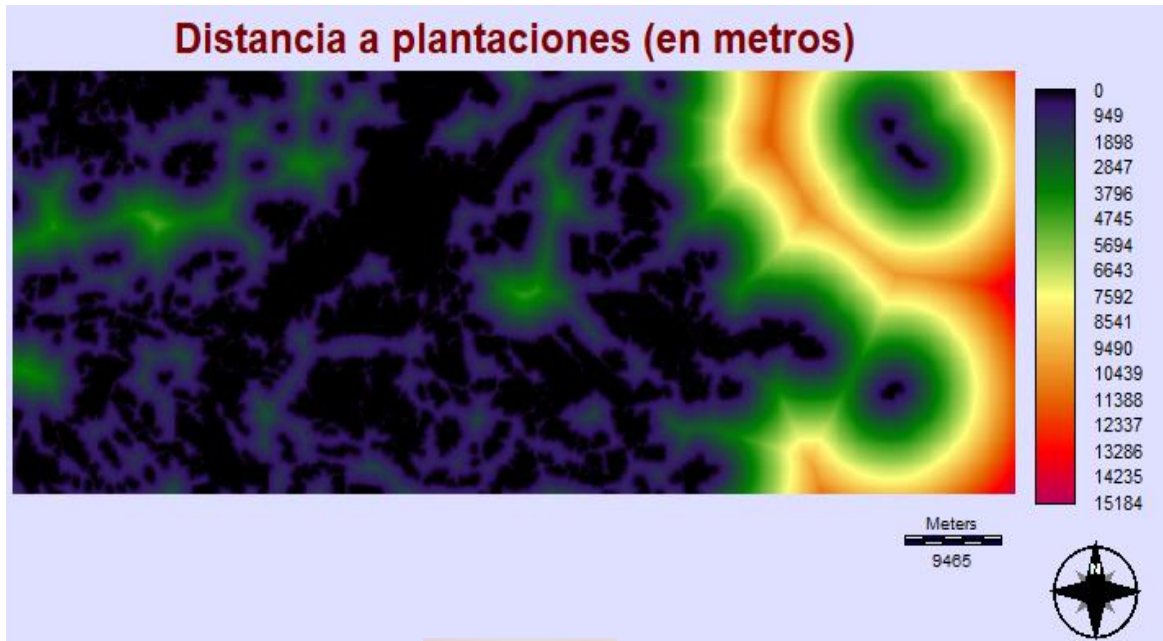


Figura ANEXO 9: Distancia a plantaciones forestales.

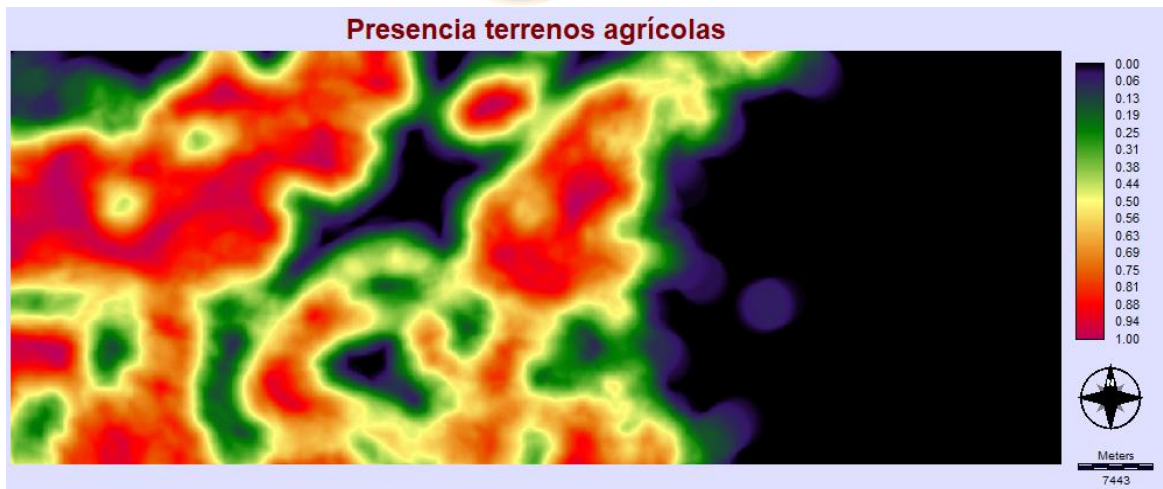


Figura ANEXO 10: Presencia de terrenos agrícolas.



Figura ANEXO 11: Presencia de plantaciones forestales.



Figura ANEXO 12: Presencia de bosque nativo.

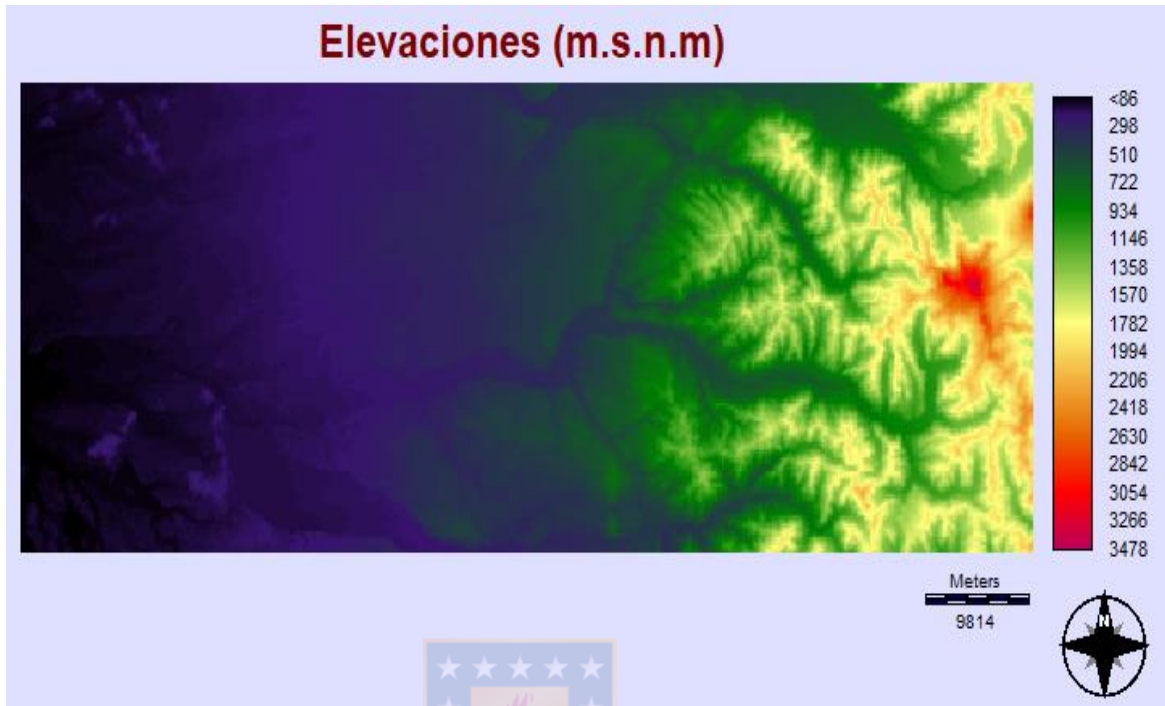


Figura ANEXO 14: Elevaciones (metros sobre el nivel del mar).



Figura ANEXO 13: Densidad de Carreteras.

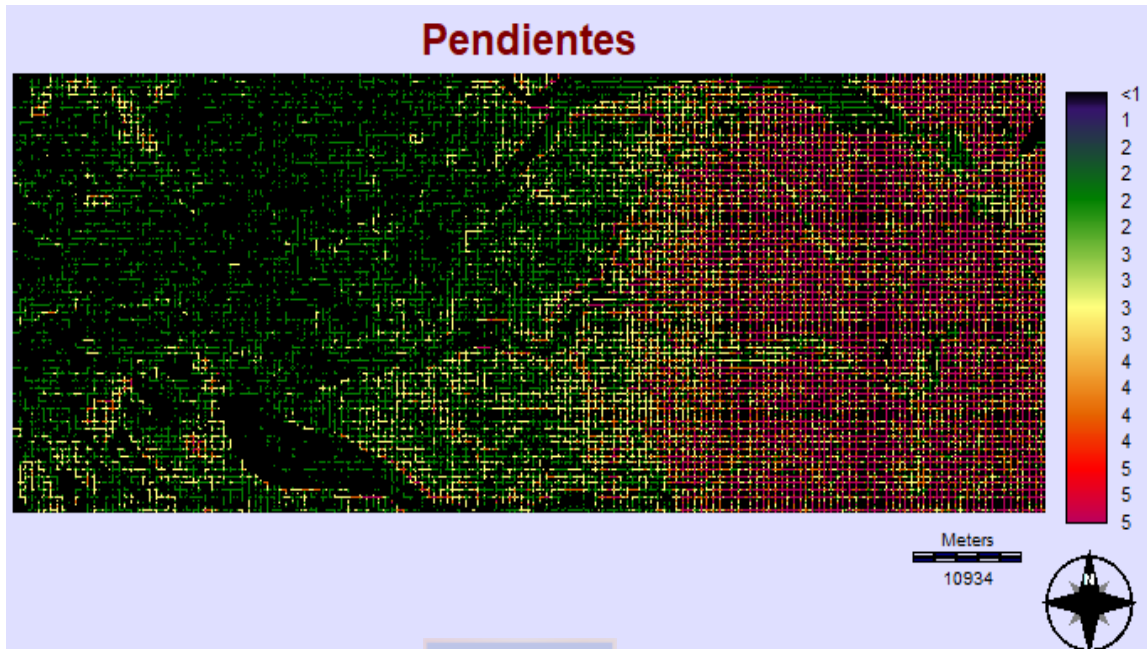


Figura ANEXO 14: Pendientes distribuidas en 5 clasificaciones o rangos, en donde el rango 1 va de (0m – 3m), el rango 2 está entre (3m – 12m), el rango 3 (12m – 30m), el rango 4 (30m – 45m) y el rango 5 (>45m).