



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

IMPACTO HIDROLÓGICO DE PLANTACIONES FORESTALES EN
CUENCAS DE LA REGIÓN DEL MAULE: HUENCHULLAMI, PURAPEL Y
PERQUILAUQUÉN.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ÁLVARO IGNACIO MARTÍNEZ-CONDE CAMPS

PROFESORA GUÍA
HAYDEE XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
NICOLÁS VÁSQUEZ PLACENCIA
CAMILA ÁLVAREZ GARRETÓN

SANTIAGO DE CHILE
2022

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil

POR: Álvaro Ignacio Martínez-Conde Camps

FECHA: 2022

PROFESORA GUIA: Haydee Ximena Vargas Mesa

IMPACTO HIDROLÓGICO DE PLANTACIONES FORESTALES EN CUENCAS DE LA REGIÓN DEL MAULE: HUENCHULLAMI, PURAPEL Y PERQUILAUQUÉN.

Las plantaciones forestales se han expandido en los últimos 50 años, reemplazando suelos desnudos, praderas, pastizales, bosque nativo, etc., cambiando de forma sustancial el uso de suelo en la zona centro-sur del país. En un contexto de cambio climático es necesario identificar y cuantificar las componentes antropogénicas que alteran el ciclo hidrológico con el fin de adaptarnos. Este estudio cuantifica el impacto hidrológico de las plantaciones forestales en cuencas de la región del Maule: Huenchullami, Purapel y Perquilauquén.

Para abordar esto, en primer lugar, se identifica la evolución temporal y espacial de las plantaciones forestales a través de algoritmos de clasificación supervisada, en base a imágenes Landsat 5 y 8 para el periodo entre los años 1986 y 2021. Luego, se implementa el modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC) simulando las coberturas vegetales históricas previamente estimadas, escenarios de aumento y reducción de las plantaciones forestales para el periodo histórico entre los años 1985 y 2020 y proyecciones de cambio climático para el periodo entre los años 2030 y 2060.

Los resultados de la detección remota estiman un aumento sostenido de las plantaciones forestales para las cuencas de Purapel y Perquilauquén. En el caso de la cuenca de Huenchullami, se observa un alza para el periodo 1987 – 2010, posteriormente los cultivos decrecen. A su vez, los escenarios simulados muestran que, al aumentar la superficie de las plantaciones forestales, la escorrentía disminuye y evapotranspiración aumenta. En los escenarios de disminución de los monocultivos forestales, sucede el efecto contrario.

Finalmente, se concluye que las plantaciones forestales impactan el ciclo hidrológico, reduciendo la escorrentía y aumentando la evapotranspiración. La magnitud de estos efectos depende las características climáticas, vegetacionales, entre otros, de las cuencas en estudio. Se espera que las plantaciones forestales generen un mayor impacto en condiciones de aridez y estrés hídrico.

Dedicatoria

A tod@s l@s que luchan por mitigar
el cambio climático en nuestro país

Agradecimiento

Quiero agradecer a toda mi comisión por la disposición y la voluntad para enseñar y ayudar, sin su aporte esta memoria no la hubiera terminado. Mis profundos agradecimientos a la profe Xime que acogió este proyecto personal y guio esta memoria, gratitud a toda empatía que transmitió de forma remota en las dificultades en el camino, también agradezco al Nico Vásquez por guiarme en la calibración de VIC y en las profundas correcciones que hacen que este documento sea entendible. Igualmente, a la profesora Camila que siempre tuvo la disposición para ayudar.

En la misma línea, agradezco a todo el cuerpo docente del área de hidrología del departamento, sufrí las interminables tareas, pero sin duda alguna las disfrutaba. Agradezco el entusiasmo del profe Pablo, el carisma del Miguel, la cercanía de Yohann y definitivamente agradezco a Eduardo Muñoz que con sus auxiliares aprendí a programar.

Muchas gracias a mi familia que fue incondicional estos 7 años de U, a mi mamá que siempre me ayudo y entrego un enorme soporte, a mi padre que debes en cuando no me chamulla con temas técnicos. Agradezco a mi Nina que me inculco desde pequeño el cuidado por el medio ambiente y la protección a los animales, sin duda alguna no hubiera estudiado Ingeniería hidráulica sin su influencia.

Profundamente agradecido del mundo del Rugby, me dio la oportunidad de estudiar en la universidad que quería, fue un desahogo importante estos 7 años de universidad, si bien dejaba los estudios a un lado para jugar, valió la pena cada segundo. También a mi equipo de rugby Diablos Ingeniería por enseñarme que *“Lo importante es la amistad... eso sí que va conmigo... y los chicos de ingeniería eso sí que son amigos...”*

Quiero agradecer a todos mis amigos que hice en la facultad, partiendo desde la *Archi* en plan común con su pauteo horas antes de los controles y a mis amigos de Civil que hicieron que mi estadía en el departamento fuera cálida, en particular un saludo a la Pancha y el Hernancillo.

Y por último quiero agradecer a toda la gente que me ayudo con la memoria, la mijal, Ignacio Quiroga, el Héctor y al mismo Eduardo Muñoz que me enseñó a modelar en VIC. Quiero dedicar esta última oración a mi pololi sofi <3 que fue un apoyo y cable a tierra este último periodo.

Tabla de contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimiento.....	iii
1. Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Generales.....	1
1.2.2. Específicos	1
1.3. Organización del informe.....	2
2. Marco Teórico	3
2.1. Antecedentes generales	3
2.1.1. Actualización del balance hídrico nacional.....	3
2.1.2. Bosques en la región del Maule.....	3
2.1.3. Impacto hidrológico de las forestales	4
2.1.4. Cambio climático.....	6
2.2. Modelos hidrológicos.....	8
2.3. Modelo hidrológico <i>Variable Infiltration Capacity</i> (VIC)	8
2.4. Clasificación supervisada.....	10
2.4.1. <i>Maximum likelihood classification</i> (MLC)	11
2.4.2. <i>Support vector machine</i> (SVM)	12
2.4.3. <i>Neuronal net</i> (NNET)	13
2.4.4. <i>Classification and regression tree</i> (CART)	14
2.3.5 <i>Randomforest</i> (RF).....	15
2.5. Escenarios de evolución de plantaciones forestales	16
2.6. Antecedentes requeridos	17
2.6.1. Catastro y actualización de los recursos vegetacionales y uso de la tierra (CONAF)	17
2.6.2. Cobertura de suelo de Zhao et al. (2016).....	18
2.6.3. Imágenes satelitales Landsat	19
2.6.4. Forzantes climáticas empleadas en los proyectos de actualización del balance hídrico nacional	20
2.6.5. Evapotranspiración satelital	21
3. Zona de estudio.....	22
3.1. Climatología y régimen hidrológico.....	24
3.2. Cobertura vegetal actual.....	25
4. Metodología.....	27
4.1. Detección remota	27
4.2. Modelación hidrológica	31
4.2.1. Análisis de sensibilidad	31
4.2.2. Parámetros vegetacionales	32
4.2.3. Proceso de calibración	34
4.2.3.1. Escalamiento de variables distribuidas.....	34
4.2.3.3. Estrategias de calibración	35
4.2.3.4. Calibración.....	39
4.2.4. Regionalización	40
4.3. Escenarios de cambio de cobertura vegetal.....	40
5. Resultados	42
5.1. Resultados de la detección remota.....	42

5.2.	Resultados de la modelación hidrológica.....	45
5.2.1.	Análisis de sensibilidad.....	45
5.2.2.	Calibración del modelo VIC	46
5.2.3.	Regionalización	47
5.2.4.	Modelación de evapotranspiración.....	47
5.3.	Impacto hidrológico en las variaciones de la cobertura vegetal.....	49
5.3.1.	Simulaciones hidrológicas de coberturas vegetales históricas	49
5.3.2.	Simulación hidrológica de escenarios en la variación de la cobertura vegetal para el periodo histórico entre los años 1985 y 2020.....	52
5.3.3.	Simulación hidrológica de escenarios en la variación de la cobertura vegetal para las proyecciones de cambio climático para el periodo de los años entre 2030 y 2060.....	53
6.	Análisis de resultados	56
6.1.	Análisis de resultado de la detección remota	56
6.2.	Análisis de la modelación hidrológica.....	57
6.2.1.	Análisis de los parámetros vegetacionales	57
6.2.2.	¿Qué parámetros se deben utilizar?	58
6.2.3.	Análisis de la modelación de la evapotranspiración.....	59
6.3.	Análisis del impacto hidrológico de los Escenarios de cambios de cobertura vegetal...	60
7.	Conclusiones.....	61
	Bibliografía.....	62
	ANEXOS.....	68
	ANEXO A – Ecuaciones de evapotranspiración del modelo VIC.....	69
	ANEXO A.1 – Evaporación desde el follaje de vegetación	69
	ANEXO A.2 – Transpiración de la vegetación.....	71
	ANEXO A.3 – Evaporación del suelo desnudo	72
	ANEXO B – Evolución temporal y espacial de la cobertura vegetal	74
	ANEXO B.1 – Huenchullami.....	74
	ANEXO B.2 – Purapel.....	78
	ANEXO B.3 – Perquilauquén	81
	ANEXO C – Régimen natural	84
	ANEXO D – Resultados de calibración	86
	ANEXO E – Mapas de los escenarios de modificación de la cobertura vegetal	90
	ANEXO E.1 – Mapas de las coberturas vegetales históricas.....	90
	ANEXO E.2 – Escenarios de variación de la cobertura vegetal en condiciones pasadas.....	92
	ANEXO E.3 – Escenarios de variación de la cobertura vegetal en condiciones pasadas.....	94

1. Introducción

1.1. Motivación

En el 2016 el sulfato de pasta química de madera, papel y artículos de maderas fueron el 3^{er}, 6^{to} y 8^{vo} producto más exportado en Chile, superando los 7.000 millones de dólares en exportaciones, posicionando a la industria forestal en un pilar de nuestra economía (DataChile, 2020). Lo anterior se atribuye en gran medida a políticas de estado que han promovido el crecimiento de cultivos forestales, a través de incentivos estatales que empiezan en 1974 con la promulgación del decreto de ley 701, donde se establece que: “Durante el plazo de 10 años, el Estado bonificará el 75% del valor a la forestación y su manejo” (Decreto de ley 701., 1974, Art. 21°); decreto que, posteriormente, ha sido prorrogado por distintos presidentes (Ley 19561, 1998; Ley 20488, 2011).

En consecuencia, las superficies de plantaciones forestales se han expandido en los últimos 50 años, reemplazando suelos desnudos, praderas, pastizales, bosque nativo, etc., cambiando de forma sustancial el uso de suelo en la zona centro-sur del país (Zhao et al. 2016). Esto ha generado conflictos socioambientales en las comunidades, alteraciones en ecosistemas, calidad y cantidad de suelos disponibles, así como, calidad y cantidad de agua disponible (Gayoso et al. 1995; Alvarez-Garreton et al. 2019).

En el actual contexto de mega sequía se ha evidenciado que el agua es un recurso finito y elemental para el desarrollo íntegro de la sociedad, causando un interesante y necesario debate en la administración y uso de este elemento. Distintos estudios concluyen que la escasez hídrica se mantendrá o agudizará con los efectos del cambio climático (Santibáñez, 2018), abriendo la pregunta ¿Cómo adaptarnos al cambio climático en el país?

Investigaciones confirman que las plantaciones forestales disminuyen la cantidad de aguas disponible (Alvarez-Garreton et al. 2019; Galleguillos et al. 2021; Jones et al. 2017; Little et al. 2009; Stehr et al., 2010), por lo que parece necesario agregar este tema a la discusión, en busca de una manejo integrado y responsable del recurso hídrico

En consecuencia, este estudio busca cuantificar el impacto hídrico del crecimiento forestal en la región del Maule, en particular en las cuencas: Huenchullami, Purapel y Perquilauquén, todas ellas con un explosivo crecimiento forestal. Para ello se plantea el uso del modelo Variable Infiltration Capacity (VIC, Liang et al. 1994), para modelar hidrológicamente, bajo escenarios de forestación y deforestación en condiciones meteorológicas históricas y proyecciones de cambio climático.

1.2. Objetivos

1.2.1. Generales

El objetivo general de este trabajo es analizar la respuesta hidrológica asociada a cambios en la superficie de plantaciones forestales en condiciones pasadas y futuras en las cuencas de Huenchullami, Purapel y Perquilauquén, ubicadas en la región del Maule.

1.2.2. Específicos

El estudio de investigación propuesto posee cuatro objetivos específicos, los cuales son desarrollados en el orden que se presenta a continuación:

1. Evaluar cambios de las superficies de plantaciones forestales para el periodo 1985 a 2020 en las cuencas de Huenchullami, Purapel y Perquilauquén.
2. Estimar cambios en la evapotranspiración y escorrentía de las cuencas debido a variaciones pasadas de las superficies de plantaciones forestales, a través de la modelación hidrológica del modelo VIC.
3. Proponer posibles escenarios futuros, espaciales y temporales, de variación de las superficies plantadas en las zonas de estudio, según tendencias históricas.
4. Diagnosticar el impacto hidrológico de las forestales en los escenarios propuestos, a través de la modelación hidrológica del modelo VIC.

1.3. Organización del informe

Este documento se compone de 7 capítulos. El presente capítulo 1 corresponde a una breve introducción del tema; el capítulo 2 corresponde a la revisión bibliográfica donde se presentan los conocimientos necesarios para desarrollar este trabajo; en el capítulo 3 se expone la características de la zona de estudio; en el capítulo 4 se describe la metodología utilizada para satisfacer los objetivos planteados; en el capítulo 5 se muestra los resultados obtenidos; en el capítulo 6 se analiza en detalle los resultados; finalmente el capítulo 7 concluye de forma general los resultados de este trabajo.

2. Marco Teórico

Esta sección muestra el marco teórico en el cual se efectuó la investigación, los conocimientos expuestos son necesarios para comprender decisiones metodológicas, discusión, análisis y conclusión de los resultados obtenidos. La sección incluye antecedentes generales, revisión de conceptos generales de modelación hidrológica y específicos del modelo hidrológico VIC. Se agrega el análisis de metodologías para estimar escenarios de evolución de plantaciones forestales y requerimientos de información para dichos efectos.

2.1. Antecedentes generales

Los antecedentes generales tienen como objetivo contextualizar y justificar el presente trabajo. Se muestra la base metodológica del trabajo, la importancia de la preservación y principales características de los bosques nativos de la zona de estudio, el respaldo académico de la hipótesis y el contexto del cambio climático, donde urge entender el impacto de la catástrofe climática en nuestros ecosistemas para su preservación y conservación.

2.1.1. Actualización del balance hídrico nacional

El balance hídrico nacional, desarrollado entre los años 1983 y 1987, consideraba que las variaciones de almacenamiento podrían ser despreciables al ser promediadas en un periodo de tiempo suficientemente amplio, bajo el supuesto de sistema en equilibrio. Durante las últimas décadas, la red hidrométrica nacional ha crecido significativamente y en contexto de cambio climático el supuesto de estacionariedad no se cumple (DGA, 2017), en consecuencia, la Dirección General de Aguas (DGA) encargó la actualización del balance hídrico nacional, proyecto que ha sido liderado por la Universidad de Chile en colaboración con la Pontificia Universidad Católica de Chile (DGA, 2017, 2018, 2019a y 2019b).

El proyecto generó una metodología basada en modelación hidrológica y, al mismo tiempo incorpora proyecciones de cambio climático de forma efectiva (DGA, 2017), aplicándose en las distintas macrozonas del país, incluyendo Isla de Pascua (DGA, 2017, 2018, 2019a y 2019b) adoptando como base la cobertura de suelo estática de Zhao et al. (2016). La DGA específica (2017): “Este estudio servirá como línea de base de cualquier estudio hidrológico, así como proyectos de consultoría a nivel nacional”, lo cual viene a respaldar la importancia del presente proyecto.

2.1.2. Bosques en la región del Maule

La geografía distintiva de Chile con el desierto de Atacama en el norte, cordillera de los Andes en el este, mares y hielos australes y el océano Pacífico en el oeste, han aislado los ecosistemas del territorio con el resto de Sudamérica generando un endemismo considerable (CONAMA, 2008 & MMA, 2014). Lo anterior genera un gran interés en la preservación y conservación de los ecosistemas presentes en el territorio pues, como lo señala la ONG *Conservation International* Chile es uno de los 35 “hotspots” de la biodiversidad en el mundo.

En el caso de los bosques nativos, aproximadamente el 45% de las especies son endémicas (García & Ormazabal, 2008; Zhao et al. 2016). Debido a la variedad forestal de nuestro país es necesario especificar las principales características de los bosques analizados en el presente trabajo.

Donoso (1981) clasifica los bosques nativos de la región centro sur de nuestro país según su fisionomía-ecológica en bosque principalmente siempre verdes y bosques principalmente deciduos o caducifolios (pérdida de hojas una vez por temporada). Asimismo, se subdivide el bosque siempre verde en bosques latifoliados (hojas anchas), que incorporan los bosques nativos: palma chilena, esclerófilo y Roble-Raulí-Coigüe (Decreto 259., 1998, Art.°19). Y los bosques de coníferas (hoja en aguja, e.g. Ciprés de la cordillera; Decreto 259., 1998, Art.°19). A su vez, los bosques principalmente deciduos o caducifolios son latifoliados y se componen de los bosques nativos: Lengua, Roble-Raulí-Coigüe y Roble-Hualo (Donoso, 1981; Decreto 259., 1998, Art.°19).

La definición de los tipos de bosques nativos descritos según el decreto 259, Art.°19 (1998) son:

1. **Ciprés de la cordillera** (*Austrocedrus chilensis*): Es aquel que se encuentra, en forma pura o asociada con otras especies, representado, a lo menos, por 40 individuos de la especie por hectárea, cada uno mayor de 2 metros de altura.
2. **Lengua** (*Nothofagus pumilio*): es aquel que se encuentra, en forma pura o asociado con otras especies, representado, a lo menos, por un 50 % de individuos de la especie por hectárea.
3. **Roble-Raulí-Coigüe** (*Nothofagus obliqua*, *Nothofagus alpina*, *Nothofagus dombeyi*): es aquél que se encuentra representado por la presencia de cualquiera de las 3 especies o una combinación de ellas, constituyendo la asociación o cualquiera de ellas más de 50 % de los individuos por hectárea con un diámetro no inferior a 10 cm. a 1,30 metros de altura.
4. **Roble-Hualo** (*Nothofagus obliqua*, *Nothofagus glauca*): es aquél que se encuentra representado por la presencia de una o ambas especies, constituyendo, a lo menos, un 50 % de los individuos por hectárea.
5. **Esclerófilo**: es aquel que se encuentra representado por la presencia de, a lo menos, una de las especies que a continuación se indican, o por la asociación de varias de ellas. Las especies que constituyen este tipo son: Quillay (*Quillaja saponaria*), Litre (*Lithraea caustica*), Peumo (*Cryptocaria alba*), Espino (*Acacia caven*), Maitén (*Maytenus boaria*), Algarrobo (*Prosopis chilensis*) Belloto (*Beilschmiedia miersii*), Boldo (*Peumus boldus*), Bollén (*Kageneckia oblonga*), Molle (*Schinus latifolius*) y otras especies de distribución geográfica similar a las ya indicadas.

En tanto las características fisionomía-ecológica de las plantaciones forestales corresponde a bosques siempre verdes, en tanto la forma de las hojas del monocultivo *pinus radiata* corresponde a coníferas y del *eucaliptus globulus* a latifoliados.

2.1.3. Impacto hidrológico de las forestales

Las plantaciones de *pinus radiata* y *eucaliptus globulus* sustituyen distintos tipos de coberturas de suelo (suelo desnudo, praderas, pastizales, bosque nativo, etc.), alterando las condiciones naturales del medio ambiente físico. Estos impactos condicionan el balance hídrico de una cuenca, influenciando a la escorrentía (Gayoso & Iroume, 1995).

Gayoso y Iroumé publicaron en 1995 una extensa revisión bibliográfica, basada en la experiencia internacional, identificando los principales impactos de la industria forestal sobre el suelo, lo que se resume a continuación:

1. **Compactación de suelos**: resultado del tránsito de la maquinaria forestal. Según Gayoso & Iroumé (1995): “Esto trae consigo un aumento de la cohesión y consecuentemente un

aumento de la resistencia de corte, lo cual dificulta el desarrollo radicular. Otra consecuencia es la disminución de los macroporos, lo que significa menor disponibilidad de agua en el suelo y aumento de la escorrentía superficial.”

2. **Remoción de suelos:** proceso que engloba el traslado de tierras por los equipos madereros según actividad (Gayoso & Iroumé, 1995).
3. **Erosión hídrica:** según Gayoso & Iroumé (1995): “La insuficiente cobertura se manifiesta marcadamente en los primeros años de siembra, donde se favorece la escorrentía superficial aumentando el riesgo de erosión, problema que se agrava en situación de suelos compactos.”

No se puede ignorar la pérdida de suelo producto de la cosecha, en particular, en el método de tala rasa y quema de los desechos, si se ejerce de manera constante se espera un grave impacto sobre la erosión. Además, se debe tener en cuenta que las pendientes del suelo inciden en el proceso (Gayoso & Iroumé, 1995).

4. **Ciclo de elementos de nutrientes:** las rápidas y numerosas rotaciones que experimentan las superficies forestales inducen a un agotamiento gradual de los nutrientes en el suelo, proceso que se agrava con la quema de desechos después de la cosecha, donde los nutrientes son liberados a la atmósfera (Gayoso & Iroumé, 1995).

La misma publicación precisa las alteraciones en el balance hídrico. A pesar de que no concluye sobre el impacto de la escorrentía global, pero intuye una perturbación de las condiciones naturales de las cuencas según lo siguiente:

1. **Niveles de intercepción:** Las plantaciones forestales presentan una mayor intercepción respecto a la vegetación baja: matorrales, arbustos, praderas, pastizales, etc. Pero presenta una menor intercepción respecto al bosque nativo (Gayoso & Iroumé, 1995).
2. **Consumo de agua por evapotranspiración:** se estima que, en condiciones de campo, los bosques de eucaliptos transpiran 1,5 mm/día en invierno a 6 mm/día en verano, de manera análoga las plantaciones de pino radiata en verano consumirían 10 mm/día. Se debe tener en cuenta que son valores referenciales pues, la transpiración real está condicionada en el marco de lo indicado en el diagrama de Budyko; se considera que en zonas con precipitaciones superiores a 1.200 mm/año, la transpiración de las plantaciones de eucaliptos serán cercanas a 1.000 mm/año y para zonas más húmedas la transpiración puede llegar a los 1.500 mm/año siendo, la transpiración de las plantaciones de pino es de la misma magnitud (Gayoso & Iroumé, 1995).

La evapotranspiración asociada a plantaciones forestales es mayor al bosque nativo y vegetación baja (Gayoso & Iroumé, 1995).

3. **Escorrentía superficial:** la alteración de los componentes del balance hídrico incide en la perturbación de la escorrentía (Gayoso & Iroumé, 1995). El resultado de la escorrentía dependerá de las condiciones locales.
4. **Calidad de agua:** el uso de pesticida está directamente relacionado con la calidad de agua; además, las actividades características del proceso forestal: construcción de caminos, cortafuegos, cosecha, etc. aportan sedimentos a la escorrentía, lo que puede alterar las características físico-químicas del agua (Gayoso & Iroumé, 1995).

Huber et al. (2007) publicaron un breve estudio que cuantifica el efecto de las plantaciones de pino radiata en el balance hídrico en Chile. Se midió la intercepción, percolación y evapotranspiración de praderas y monocultivos de pinos en cuatro localidades de la zona centro-sur del país. Huber et al. (2007) concluyen: “Comparado con los arbustos o praderas, los sitios con plantaciones de *Pinus radiata* registraron un alto consumo de agua por evapotranspiración y una reducción en la percolación”.

Dos años más tarde, una investigación de Lara et al. (2009) correlaciona el tipo de cobertura, plantación forestal o bosque nativo, con la respuesta hídrica en seis cuencas de la región de Los Ríos, en el periodo hidrológico de 2003 al 2007. La respuesta hídrica se definió como la fracción de escorrentía superficial, sin flujo base, de la precipitación. Se encuentra una correlación positiva en la cobertura de bosque nativo y la respuesta hídrica, en contraste, la correlación es negativa con la cobertura forestal.

En el mismo año Little et al. (2009) analizaron el impacto de los monocultivos en dos cuencas de gran escala (<10.000 ha) en la región del Maule, para el periodo de 1964 a 2004, ambas cuencas experimentaron un explosivo crecimiento forestal. Se buscó el mejor ajuste entre la relación escorrentía-precipitación y se analizaron los residuos (diferencia entre la escorrentía observada y predicha), interpretando el decrecimiento progresivo en el tiempo de los residuos en la época estival, como efecto de los cambios de las coberturas vegetales.

En el año siguiente Stehr et al. (2010) publicaron un estudio de modelación hidrológica usando el modelo SWAT (Arnold et al., 2012), en la Región de la Araucanía. Los autores modelaron cuatro escenarios para el periodo de 1994 a 1999: 1. Condición base, 2. Aumento de la cobertura forestal, sin intervención al bosque nativo, 3. Aumento de la agricultura, sin intervención al bosque nativo y 4. Respetar las tendencias del crecimiento forestal y agrícola de la zona. Stehr et al. (2010) concluyen que “Sustituyendo área de agricultura, arbustos y praderas con plantaciones forestales, la escorrentía media anual disminuye al 10%, mientras la sustitución con tierras agrícolas, la escorrentía media anual incrementa en un 7%”.

Recientemente, Álvarez-Garretón et al. (2019) publicaron una investigación sobre 25 cuencas de la zona centro-sur del país usando un balance hídrico simple, ponderando los tipos de coberturas presente en cada cuenca con la precipitación distribuida espacialmente del producto meteorológico CR2MET (Boisier et al., 2017; DGA, 2017). Con los balances calibrados, variaron la cobertura de bosque nativo reemplazándolo por plantaciones forestales, lo que permitió concluir que la escorrentía anual disminuye consistentemente con los incrementos de plantaciones forestales.

2.1.4. Cambio climático

La definición de cambio climático según el IPCC (2012) corresponde a un: “Cambio en el estado del clima que se puede identificar (e. g., usando pruebas estadísticas) por cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades durante un período prolongado, generalmente décadas o más. El cambio climático puede deberse a procesos naturales o forzantes externas como cambios antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de tierra.”

Existe numerosa evidencia científica que el cambio climático es inequívoco, que se manifiesta en un aumento paulatino de las temperaturas globales, en particular, los últimos tres decenios han sido sucesivamente más cálidos, la temperatura de los océanos se ha elevado, acrecentado la energía

almacenada en el sistema planetario. Al mismo tiempo, en las zonas polares se registra una disminución en los volúmenes de nieve y hielo, con un consecuente aumento del nivel del mar. Paralelamente, las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero han crecido, siendo esta la causa dominante de las alteraciones detectadas en todo el sistema climático a partir de la segunda mitad de siglo XX (IPCC, 2014).

Los efectos del cambio climático están condicionados por la emisión y concentración en la atmósfera de los gases de efecto invernadero, dichas emisiones se han descrito cuatro escenarios de cambio climático según el forzamiento radiativo que generarían los gases de efecto invernadero para finales del siglo XXI. Para un forzamiento radiativo de 2,6 W/m², 4,5 W/m², 6,0 W/m² y 8,5 W/m² se tienen los escenarios 2,6 RCP, 4,5 RCP, 6,0 RCP y 8,5 RCP respectivamente (DGA, 2018; IPCC, 2014).

Todos los escenarios predicen que las tendencias históricas se agudizarán y pronostican que la frecuencia e intensidad de los eventos extremos aumentará (IPCC, 2014). Adicionalmente, se espera un incremento de las precipitaciones a nivel global, sin embargo, esta variable no se distribuirá de forma uniforme en el globo. Las zonas subtropicales muestran una tendencia a la aridez, siendo estas zonas vulnerables al déficit de precipitaciones y en consecuencia a una mayor susceptibilidad a la escasez hídrica, lo que traerá impactos económicos, sociales y ecológicos (DGA, 2018; Santibañez, 2018).

Los efectos del cambio climático se ven acentuados en el hemisferio norte respecto del hemisferio sur, debido a la distribución en las masas de aguas del planeta (Garreaud, 2011), aunque, esto también podría explicarse a que el hemisferio norte exista registros meteorológicos más detallados y representativos.

En Chile, se han registrado cambios graduales en variables meteorológicas a lo largo del siglo XX. Los estudios y registros indican que las temperaturas en las zonas costeras disminuyeron, en los valles centrales muestran un ligero aumento y en los sectores cordilleranos incrementaron considerablemente (Falvey & Garreaud, 2009). Respecto a las precipitaciones, desde la región del Maule hasta Chiloé, se registran pérdidas importantes en la cantidad decadal (Garreaud, 2011; Santibañez, 2018).

Las proyecciones de cambio climático pronostican un alza en las temperaturas en todo el territorio nacional, con mayor sensibilidad en las zonas cordilleranas, lo que tendrá como efecto una mayor altitud de la línea de nieves, reduciendo la escorrentía estival y aumentándola en la época invernal (MMA, 2015; Santibañez, 2018). En efecto, el estudio realizado por la DGA (2018) en las macrozonas norte y centro, concluye: “En prácticamente todas las cuencas se aprecia una disminución en las precipitaciones. Respecto de otras variables se aprecian dos modos de cambios. En la zona norte (desde Aconcagua al norte) se aprecia que adicional a la disminución en precipitación se produce una disminución en evapotranspiración que en algunos casos es mayor a la disminución en precipitación lo que provoca un aumento relativo en escorrentía. Cuencas más al sur la evapotranspiración tiende a aumentar y por ende los caudales.”

2.2. Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos son una idealización del ciclo hidrológico usados para predecir inundaciones, sequías, recarga de aguas subterráneas, etc., esta herramienta es fundamental para el desarrollo de estrategias y gestiones del recurso hídrico, en particular, permite cuantificar la disponibilidad hídrica bajo proyecciones de cambio climático (Hrachowitz & Clark, 2017).

Las predicciones de los modelos están sujetos a incertidumbre, la cual proviene de los errores de las observaciones (de entrada, o salida), a fenómenos vinculados al sistema no están bien representados en el modelo, ya sea por error conceptual del fenómeno o una incorrecta parametrización (Hrachowitz & Clark, 2017). Por lo tanto, la elección de un modelo repercute en las estimaciones hidrológicas.

En el estudio de Hrachowitz & Clark (2017) clasifican los modelos según estos criterios.

1. **Simplificación espacial: distribuidos, semidistribuidos y agrupados.** Los modelos espacialmente distribuidos representan la heterogeneidad dentro del dominio del modelo, ya sea mediante una distribución de las forzantes del modelo y/o de sus parámetros. Por otra parte, los modelos agrupados representan de manera homogeneidad todo el dominio, por lo que busca simular fenómenos de gran escala.
2. **Simplificación del sistema: base física y conceptuales.** Los modelos de base física simulan los balances de energía, masa y momento en una columna vertical de suelo-vegetación-atmosfera. Por otro lado, los modelos conceptuales describen en una macro escala el ciclo hidrológico.
3. **Arquitectura del modelo: continuos y discretos.** Los modelos continuos se desarrollan a microescalas, donde los flujos se calculan mediante gradientes espaciales. A su vez, los modelos discretos o “Bucket” en inglés consideran tanques o piscinas que almacenan y transmiten agua, esta transmisión respeta un orden jerárquico según el gradiente de energía de cada unidad.
4. **Estrategias de refinamiento/escala del modelo: Bottum-up y Top-down.** La visión “bottom-up” se basa en el razonamiento inductivo y el “top-down” en el razonamiento deductivo.

2.3. Modelo hidrológico *Variable Infiltration Capacity* (VIC)

La elección del modelo hidrológico depende de las necesidades y objetivos de cada estudio, siendo su elección una decisión subjetiva del usuario. El modelo *Variable Infiltration Capacity* (VIC; Liang et al. 1994) es el modelo más citado en la literatura para el periodo 1991 – 2018 (Addor & Melsen, 2019) y corresponde al empleado en el proyecto de actualización del balance hídrico nacional (DGA, 2017) y en sus implementaciones en distintas macrozonas del país (DGA, 2018, 2019a y 2019b).

El modelo VIC es un modelo distribuido de base física que representa procesos de evapotranspiración, acumulación y derretimiento de nieve, interceptación, lagos, etc. Su versatilidad y flexibilidad para representar distintas coberturas vegetales (Liang et al., 1994), hace de VIC el modelo idóneo para este estudio, aunque no incorpore formalmente acuíferos y sus respectivas interacciones (DGA, 2018). En la Figura 2. 1 se presenta un diagrama conceptual del modelo.

VIC comparte las siguientes características básicas (Liang et al. 1994):

1. La unidad de modelación se representa mediante una cuadrícula de celdas ($\gg 1$ Km), planas y uniformes. La heterogeneidad de la subcuadrícula (e.g., altitud, cobertura de suelo) se maneja a través de distribuciones estadísticas.
2. Las entradas del modelo son series de tiempo de factores meteorológicos subdiarios o diarios. Adicionalmente, VIC requiere de información de la cobertura vegetal (e.g., *Leaf Area Index*, LAI) y atributos del suelo.
3. Los flujos tierra-atmósfera y balances de agua y energía se simulan en intervalos de tiempo diarios o subdiarios. En el caso de incorporar balance de energía, se requiere explícitamente un paso temporal de simulación subdiario.
4. El agua ingresa al sistema a través de la atmósfera y se ignora el flujo horizontal entre celdas. Una vez que el agua ingresa a la red de canales (escorrentía), no puede fluir de regreso al suelo (otras cuadrículas).

El modelo VIC simula el ciclo hidrológico en régimen natural. En consecuencia, el contraste entre las estimaciones y las observaciones requiere que éstas últimas se encuentren en régimen natural.

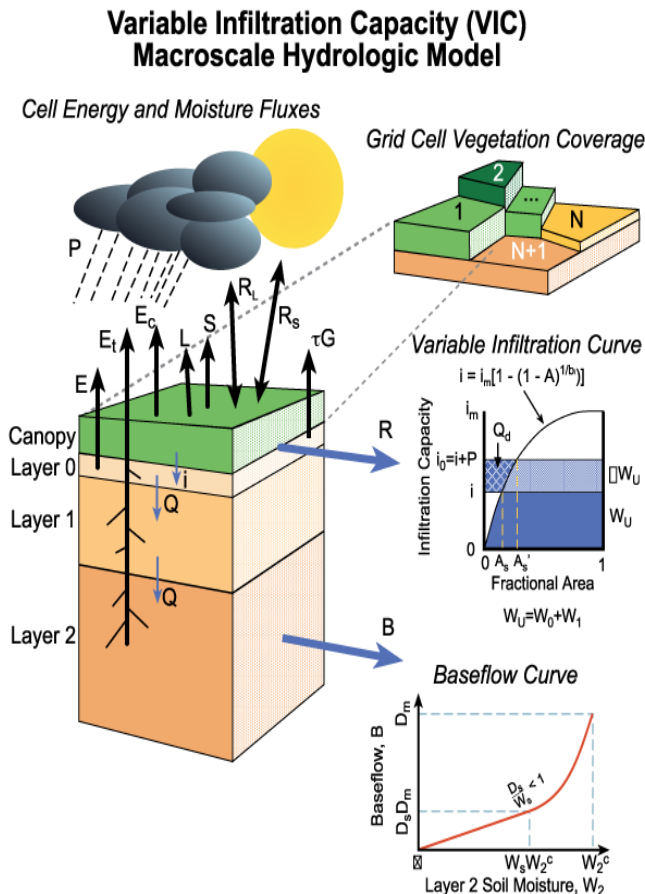


Figura 2. 1 Diagrama de los procesos que representa el modelo VIC - Fuente: <https://vic.readthedocs.io/en/master/Overview/ModelOverview/>

El modelo VIC resuelve la ecuación general del balance hídrico en una cuenca, determinada por la ecuación 2.1, este estudio se enfoca a interpretar y representar de forma fidedigna los procesos

involucrados en la evapotranspiración (para mayor detalle, revisar el anexo – A donde se muestran las relaciones físicas, climáticas y fisionómicas de este flujo).

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P - ET - Q' \quad (2.1)$$

Donde ΔS es la variación del agua almacenada en un intervalo de tiempo Δt , P corresponde a la precipitación, ET son las pérdidas asociadas al proceso de evapotranspiración y Q' es la escorrentía de salida de la cuenca.

2.4. Clasificación supervisada

La era satelital ha permitido generar mapas de vegetación en todo el globo, analizando impactos de actividades antropogénicas, catástrofes naturales o impactos del cambio climático. Estos avances son importantes en las ciencias de recursos naturales, originando propuestas mitigadoras y protectoras en áreas comprometidas (Rogan & Chen, 2003; Thanh Noi & Kappas, 2017; Xie et al., 2008). El principal insumo para generar estos mapas son las imágenes satelitales, sin embargo, éstas solo entregan la reflectancia de la superficie terrestre en longitudes de onda limitados por los sensores. Es por ello, en el procesamiento de las imágenes vital para distinguir coberturas en el suelo (Richards, 2013; Thanh Noi & Kappas, 2017; Xie et al., 2008).

La principal herramienta al cuantificar la cobertura de suelo es la clasificación supervisada (Richards, 2013; Xie et al. 2008). El fundamento de este recurso es “entrenar” un algoritmo con muestras clasificadas para posteriormente catalogar muestras sin clasificación. En este contexto “entrenar” significa determinar los parámetros de los algoritmos de forma iterativa, logrando identificar la firma espectral¹ probable, estadística o correlacionada de cada clase. Lo anterior, se conoce como “*Machine learning*” (Richards, 2013; Xie et al. 2008).

El algoritmo más popular es la máxima verosimilitud o “*Maximum Likelihood Classification*”, por ser el primer algoritmo riguroso y con desempeño computacional eficiente (Richards, 2013). Los avances en el presente siglo en las ciencias computacionales han potenciado algoritmos de inteligencia artificial, aplicados en la clasificación supervisada (Thanh Noi & Kappas, 2017; Richards, 2013; Xie et al., 2008).

Varias investigaciones han probado el desempeño de distintos algoritmos de clasificación de forma comparativa, los que muestran distintas performances según las clases y sector en estudio (Jamali, 2019; Nitze, 2012; Thanh Noi & Kappas, 2017). Por lo anterior, en el presente estudio se verifica las predicciones de los algoritmos utilizados.

Para esta investigación se considera los algoritmos de clasificación supervisada más citados en la literatura para el periodo 2007 – 2017: “*Maximum Likelihood Classification*” (MLC), “*Support Vector Machine*” (SVM), “*Neuronal Net*” (NNET), “*Classification and regression tree*” (CART) y “*RandomForest*” (RF) (Thanh Noi & Kappas, 2017).

¹ Firma espectral: radiación reflejada en función de la longitud de onda

2.4.1. Maximum likelihood classification (MLC)

Este método supone una distribución gaussiana multivariable de las firmas espectrales de cada clase (Richards, 2013). La asignación de clases a las muestras sin clasificar es por decisión bayesiana, es decir, la clase más probable es la que finalmente se asigna a cada muestra, esto se expresa matemáticamente según la ecuación 2.2.

$$p(x|w_i)p(w_i) > p(x|w_j)p(w_j) \quad (2.2)$$

Donde x representa la firma espectral del píxel, w_i es la clase i . A su vez, la probabilidad que el espectro x pertenezca a la clase w_i se estima a partir de la ecuación 2.3.

$$p(x|w_i) = (2\pi)^{-N/2}|C_i|^{-1/2}\exp\{-1/2(x - m_i)^T C_i^{-1}(x - m_i)\} \quad (2.3)$$

Donde m_i y C_i son el promedio del vector y covarianza de la matriz de las muestras de entrenamiento de clase w_i , N es el número de bandas espectrales² analizadas. El algoritmo maximiza la función de verosimilitud la cual se define como:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta) \quad (2.4)$$

Donde $f(x)$ es una función a elección, θ es el set de parámetros de la función $f(x)$ y x_1, x_2, \dots, x_n es el vector de la muestra de entrenamiento. En este contexto la función $f(x)$ es la probabilidad dictada por la ecuación 2.3 con la decisión bayesiana de la ecuación 2.2. Este algoritmo probabilístico es robusto al identificar clases deseadas, sin embargo, existen límites en el espectro de dudosa clasificación, ver Figura 2. 2

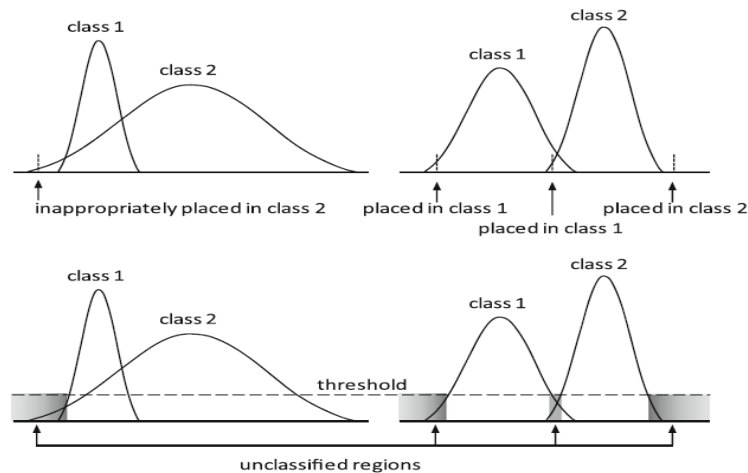


Figura 2. 2 Límites de dudosa clasificación en el algoritmo MLC – Fuente: Richards (2013).

² Bandas espectrales: Intensidad de la radiación en un rango específico de la longitud de onda, cada rango corresponde una banda espectral distinta.

2.4.2. Support vector machine (SVM)

Este algoritmo separa linealmente clases binarias en el espacio del espectro. Las clases son clasificadas por desigualdades definidas por el hiperplano óptimo, equidistantes a las muestras de entrenamiento que están al borde de la frontera (Hastie et al., 2009; Richards, 2013). La definición del hiperplano (ecuación 2.5) y sus respectivos márgenes (ecuación 2.6) son las siguientes:

$$f(x) = x^T \beta + \beta_0 = 0 \quad (2.5)$$

$$M = \frac{1}{\|\beta\|} \quad (2.6)$$

Donde x es la muestra espectral del píxel y β es un vector unitario. Los parámetros β son determinados por el siguiente problema de optimización:

$$\begin{aligned} & \text{Max } M \\ \text{s. a. } & y_i(x_i^T \beta + \beta_0) \geq M \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Donde $y_i \in \{-1, 1\}$ representa la clase del píxel de entrenamiento i . El píxel es asignado a la clase y_i al cumplir la desigualdad indicada en la ecuación 2.8.

$$y_i(x_i^T \beta + \beta_0) \geq 1 \quad (2.8)$$

En la práctica, existen muestras de entrenamiento, que están insertas en el conjunto errado, este fenómeno se conoce como “*overlap*”; la Figura 2. 3 ilustra el hiperplano del algoritmo, “*overlap*” y los subconjuntos de asignación de clases. Para amortiguar este problema, las restricciones del problema de optimización cambian según lo descrito por la ecuación (2.9).

$$\begin{aligned} & y_i(x_i^T \beta + \beta_0) \geq M - \varepsilon_i \\ \text{O} & \\ & y_i(x_i^T \beta + \beta_0) \geq M (1 - \varepsilon_i) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Donde ε_i es la distancia del píxel superpuesto al margen correspondiente a su clase.

En el caso que las muestras de entrenamiento no sean linealmente separables, estas se pueden transformar a otros espacios, hasta lograr la separación lineal. Esta función se denomina “*Kernel*”. El método funciona de forma binaria, en el contexto de clasificación supervisada, el algoritmo diferencia si el píxel analizado es o no de una respectiva clase, hasta lograr la asignación.

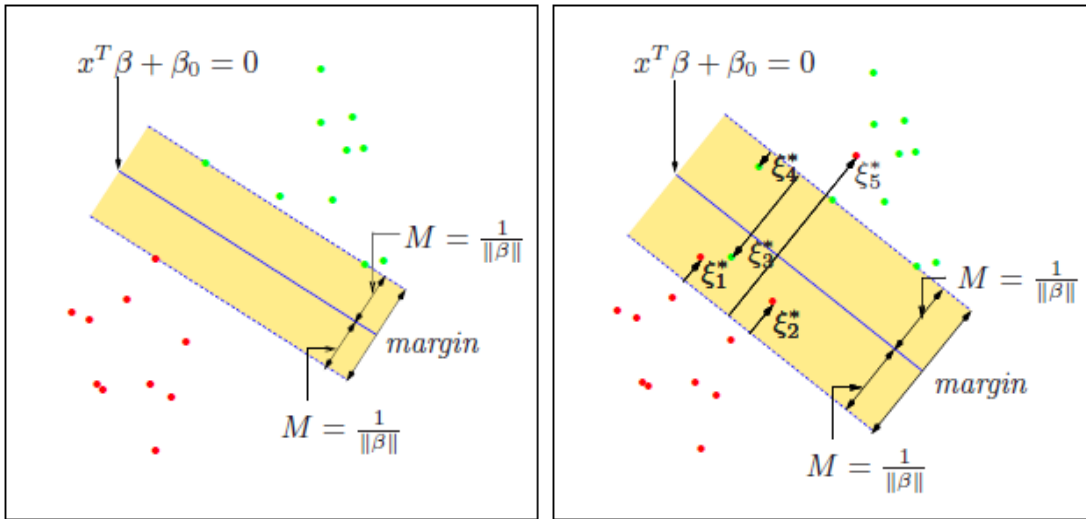


Figura 2. 3 Esquema del hiperplano, márgenes y subconjuntos de clases. Los puntos rojos y verdes representan clases binarias. La imagen de la derecha ilustra un caso ideal y la izquierda muestra “overlap”. – Fuente: Hastie et al. (2009)

2.4.3. Neuronal net (NNET)

Probablemente, las redes neuronales es el algoritmo de inteligencia artificial más popular en la actualidad. Este método replica la sinapsis neuronal, entrelazando operaciones matemáticas (“neuronas”), obteniendo la clasificación (“interpretación”) (Hastie et al., 2009; Kubat 2017; Richards, 2013).

El algoritmo construye capas de neuronas, las cuales interactúan hasta lograr una correcta clasificación, ver Figura 2. 5. Las “neuronas” aplican la función activación sobre la suma ponderada de los datos de entrada. La ecuación 2.10 describe matemáticamente una neurona.

$$f(w^T x + \theta) \tag{2.10}$$

Donde $f(z)$ es la función de activación, x son los datos de entrada, pueden ser el espectro de onda del píxel o la respuesta de distintas neuronas, w es el vector de ponderación y θ el umbral. La Figura 2. 4 sintetiza el funcionamiento de una neurona.

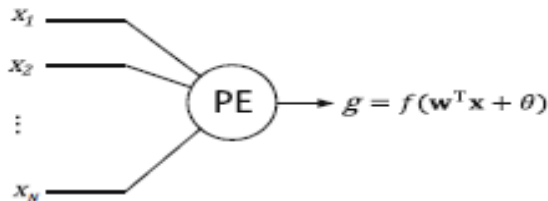


Figura 2. 4 Esquema del funcionamiento neuronal– Fuente: Richards (2013)

Los ponderadores y umbral de cada neurona se determinan con el concepto “*backpropagation*”, el cual corresponde a un ajuste iterativo de los parámetros neuronales hasta lograr una correcta predicción sobre la muestra de entrenamiento.

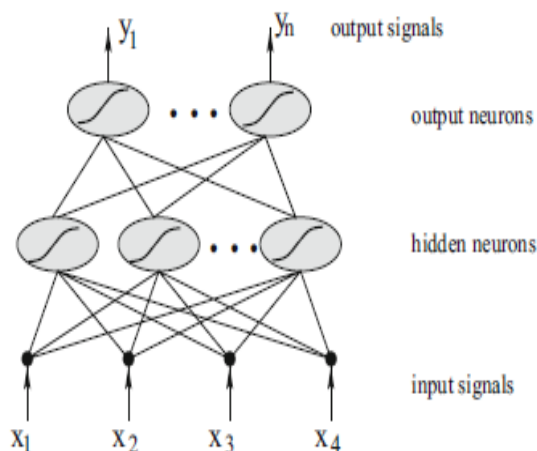


Figura 2. 5 Esquema de una red neuronal –fuente: Kubat (2017)

2.4.4. Classification and regression tree (CART)

Los árboles de decisión son ampliamente utilizados en gestión, predicción y clasificación en diversas áreas, a través de sucesivas desigualdades en los predictores, el algoritmo resuelve el problema (Genuer & Poggi, 2020; Kubat, 2017). La Figura 2. 6 ejemplifica un árbol de clasificación y regresión de clases y los subconjuntos dentro del espacio.

En el contexto de clasificación supervisada, los predictores son las bandas de la imagen satelital. Las desigualdades, llamadas ramas, son generadas por cada punto de las muestras de entrenamiento hasta lograr la correcta clasificación. Posteriormente el algoritmo “poda las ramas” y ajusta iterativamente los umbrales minimizando el error cuadrático medio (ecuación 2.11) y reduciendo la varianza (ecuación 2.12) (Genuer & Poggi, 2020; Kubat, 2017).

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i \in R_j} (y_i - \hat{y}_{R_j})^2 \quad (2.11)$$

$$\sum_{k=1}^K \hat{p}_{mk}(1 - \hat{p}_{mk}) \quad (2.12)$$

Donde y_i es la clase del punto de entrenamiento i , \hat{y}_{R_j} es la predicción asociada al punto de entrenamiento, j es el número de clases y R_j es el conjunto de la clase j . \hat{p}_{mk} es la proporción de datos de entrenamientos que se encuentran en la región m y que pertenecen a la clase k . Uno de los principales problemas del algoritmo es la dependencia a los predictores dominantes y la gran varianza en la clasificación (Genuer & Poggi, 2020; Kubat, 2017).

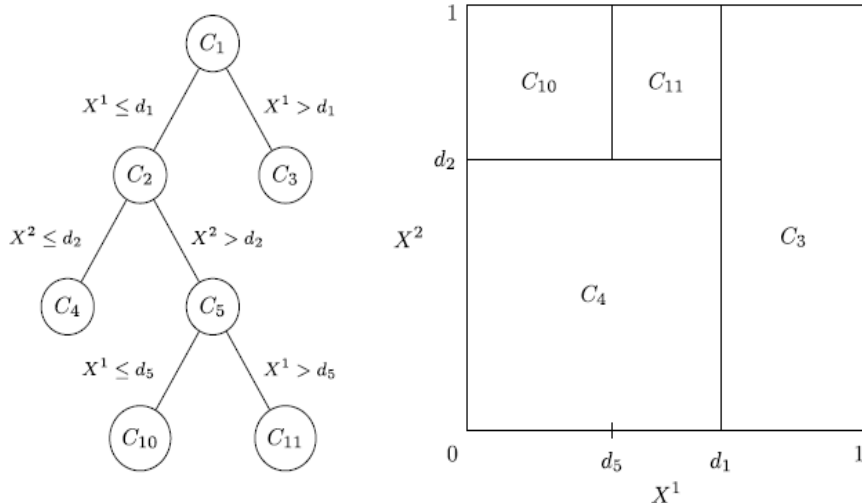


Figura 2. 6 En la izquierda se ejemplifica un árbol de Clasificación y Regresión. A la derecha se muestra el espacio de subconjuntos (clases) en el espacio de los predictores - Fuente: Genuer & Poggi (2020)

2.3.5 Randomforest (RF)

Este algoritmo fue publicado por Breiman (2001), convirtiéndose en uno de los algoritmos más populares de *machine learning*, posicionado en el algoritmo más citado en la literatura en los últimos años, en el contexto de clasificación supervisada (Thanh Noi and Kappas, 2017). El fundamento del algoritmo acopla una cantidad considerable de árboles de decisión, catalogando según el resultado mayoritario de éstos. Este método se diferencia de CART al incorporar subconjuntos de predictores de forma aleatoria en la construcción de cada árbol, reduciendo el tamaño de estos. De esta forma, estabiliza la predicción, reduce la varianza y la clasificación es independiente de los predictores (Breiman, 2001; Genuer & Poggi, 2020; Teguiim; 2017). En la Figura 2. 7 se esquematiza el funcionamiento del algoritmo.

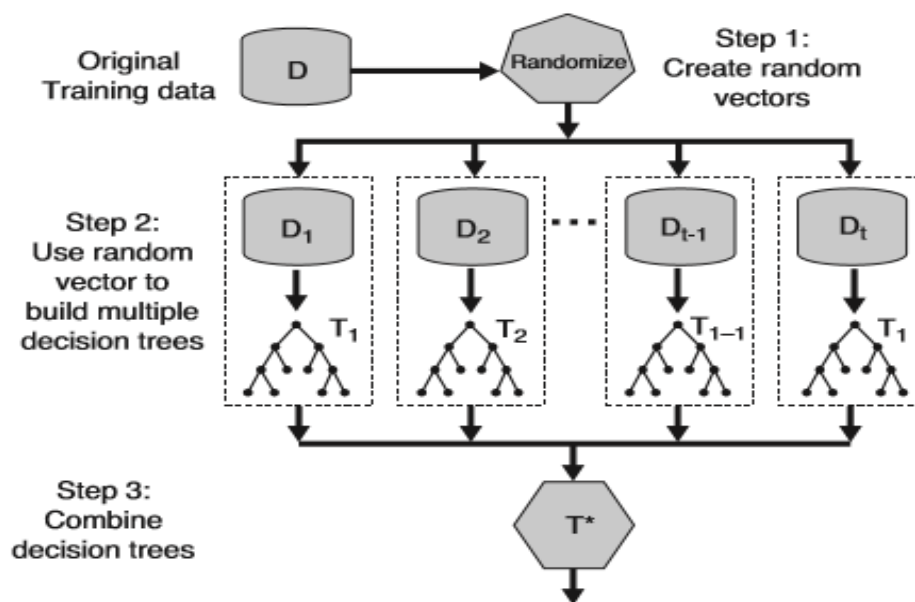


Figura 2. 7 Funcionamiento del algoritmo Randomforest – Fuente: Teguiim (2017)

2.5. Escenarios de evolución de plantaciones forestales

Las plantaciones forestales se han expandido en los últimos 50 años, reemplazando suelos desnudos, praderas, pastizales, bosque nativo, etc. modificando de forma sustancial el uso de este, en la zona centro-sur del país (Zhao et al., 2016). Para diciembre del 2017, el Instituto Forestal (INFOR) cuantificó una superficie de 2.289.525 hectáreas en plantaciones forestales en todo Chile, siendo las regiones del Biobío, Araucanía y el Maule las que concentran el 38,9%, 21,6% y 15,6% de estos bosques respectivamente (Gysling et al., 2019). En la Figura 2. 8 se muestra la evolución temporal de los monocultivos forestales en el país.

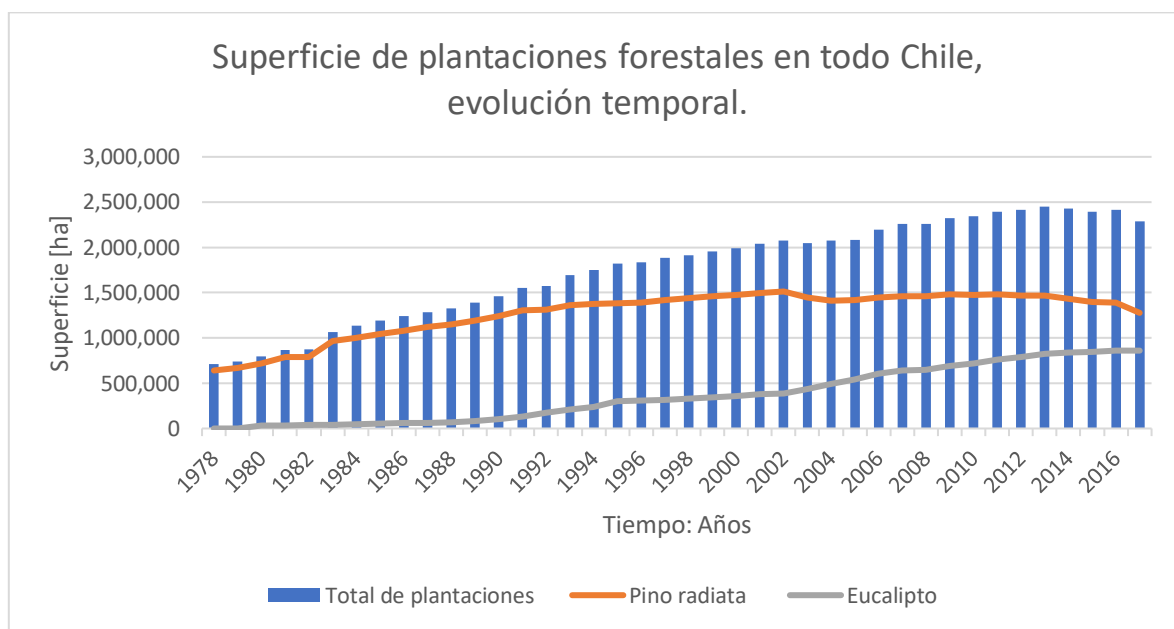


Figura 2. 8 Evolución temporal de la superficie forestal en Chile - Elaboración propia con datos del instituto forestal (INFOR).

En la última década la expansión de superficies forestales se ha visto mermada, mientras que la reforestación por rotaciones de estos monocultivos va en alza (Gysling et al., 2019). Esto, en teoría lograría una estabilización de la superficie forestal. En la Figura 2. 9 se muestra la superficie forestada y reforestada del siglo XXI. Cabe señalar que simultáneamente con la vigencia de la ley sobre recuperación del bosque nativo y fomento forestal 20.283 del 2008, los fomentos para la preservación, obtención de productos no madereros y madereros de bosques nativos, han incrementado año tras año (Gysling et al., 2019).

Este incentivo se encuentra en concordancia con los compromisos que Chile adquirió en el acuerdo de París del año 2015, en el que se compromete a un manejo sustentable y a la recuperación de 100 mil hectáreas de bosque nativo y forestación de 100 mil hectáreas de bosque nativo para el 2030 (CONAF, 2015). Si bien las metas propuestas en este acuerdo son positivas, hay que tener en cuenta que la forestación de bosque nativo será cercana al 4% de la superficie forestal actual, por lo que no se espera cambios sustantivos en el uso de suelo a nivel nacional.

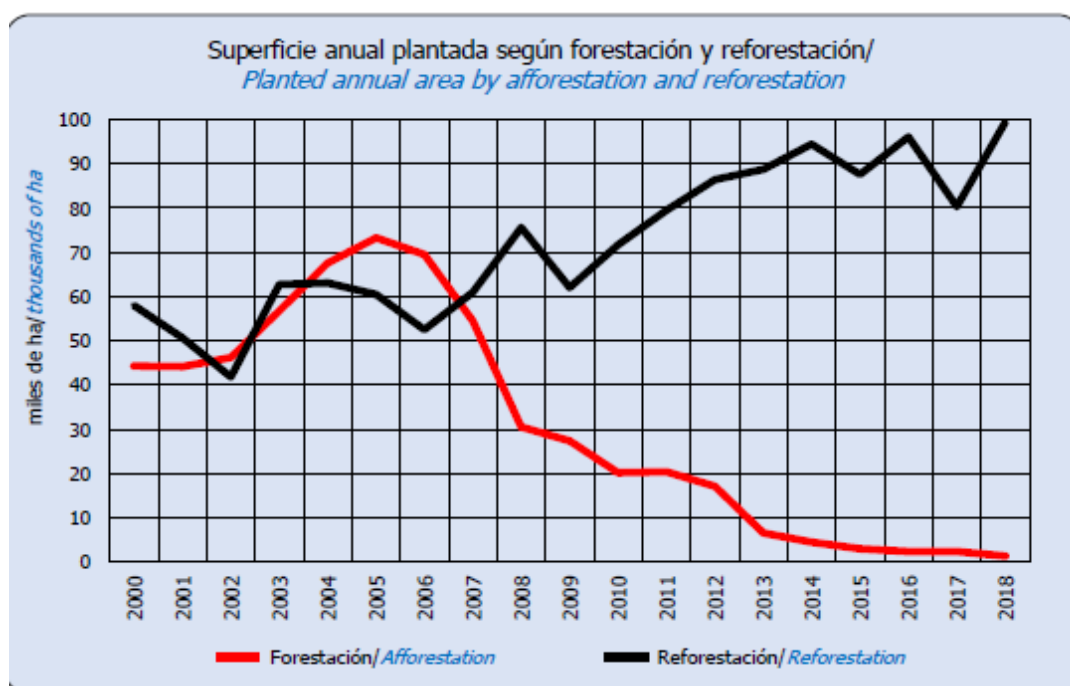


Figura 2. 9 Superficie anual plantada según forestación y reforestación - Fuente: Gysling et al. 2019

Por otro lado, las investigaciones académicas han propuestos escenarios de evolución de plantaciones forestales en estudios hidrológicos. El estudio de Stehr et al. (2010) modela hidrológicamente dos escenarios extremos donde toda la cobertura vegetal corresponde a plantaciones forestales o terrenos agrícolas. En tanto, la publicación de Álvarez-Garretón et al. (2019) sustituye entre 1000 a 4000 hectáreas de bosque nativo a plantaciones forestales y viceversa.

2.6. Antecedentes requeridos

2.6.1. Catastro y actualización de los recursos vegetacionales y uso de la tierra (CONAF)

Desde el año 1993, CONAF lleva a cabo el proyecto “Catastro y evaluación de los recursos vegetacionales nativos de Chile”, identificando el uso de suelo y cobertura vegetal para todo el territorio nacional, especificando las coberturas relacionadas al bosque nativo, plantaciones forestales y matorrales. El catastro es actualizado periódicamente, a través de proyectos de alcance regional (CONAF, 2020).

Las actualizaciones del catastro de CONAF incluyen la definición legal de bosques de acuerdo a la ley 20.283 (2008): “Sitio poblado con formaciones vegetales en las que predominan árboles y que ocupa una superficie de por lo menos 5.000 metros cuadrados, con un ancho mínimo de 40 metros, con cobertura de copa arbórea que supere el 10% de dicha superficie total en condiciones áridas y semiáridas y el 25% en circunstancias más favorables”. También define bosque nativo como: “Bosque formado por especies autóctonas, provenientes de generación natural, regeneración natural, o plantación bajo dosel con las mismas especies existentes en el área de distribución original, que pueden tener presencia accidental de especies exóticas distribuidas al azar.”

En la página de CONAF (<https://sit.conaf.cl/>) están disponibles la primera actualización del catastro del año 2009 (regiones del Maule y Biobío) y la última (2015 y 2016 de las regiones del Maule y Biobío). Las actualizaciones son realizadas con interpretación de fotografías aéreas, imágenes satelitales SPOT 6 y 7 e imágenes de alta resolución de Google Earth, estos análisis de datos son contrastadas y corregidas con campañas a terreno (CONAF, 2018).

La actualización del catastro para la región del Maule fue publicada el año 2016, con interpretación de fotografías aéreas del año 2007, imágenes satelitales SPOT 6 y 7 en los años 2015 y 2016 e imágenes de Google Earth. En la Tabla 2. 1 se muestra el uso de suelo en la región del Maule.

Tabla 2. 1 Uso de suelo para la región del Maule – Fuente: CONAF (2018).

USOS DEL SUELO	Superficie (hectáreas)	%
1. Áreas urbanas e industriales	26.602,8	0,9
2. Terrenos agrícolas	619.858,3	20,5
3. Praderas y matorrales	563.406,4	18,6
4. Bosques	1.245.083,1	41,1
4.1 Plantación	634.893,4	20,9
4.2 Bosque nativo	581.514,9	19,2
4.3 Bosque mixto	28.674,7	0,9
5. Humedales	2.744,0	0,1
6. Áreas desprovistas de vegetación	488.637,4	16,1
7. Nieves eternas y glaciares	48.363,0	1,6
8. Cuerpos de agua	36.069,8	1,2
Total general	3.030.764,8	100,0

2.6.2. Cobertura de suelo de Zhao et al. (2016)

Zhao et al. (2016) generan un mapa de cobertura vegetal para Chile continental con imágenes satelitales del año 2014, gracias a una colaboración internacional de investigadores de China, Estados Unidos y Chile. El resultado de dicho estudio se encuentra disponible en la página web http://datos.cedeus.cl/layers/local-geoserver-uploaded-geotiffs:lc_2014_chile_bytescale y los detalles metodológicos son expuestos en la publicación de Zhao et al. (2016).

El mapa fue elaborado con imágenes Landsat 8 de los años 2013 y 2014, complementadas con el producto *Enhanced Vegetation Index* (EVI) de MODIS, capturas de alta resolución de Google Earth e información *Digital Elevation Model* (DEM) de la misión *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Zhao et al. (2016) construyeron mapas a nivel de mensual a través del algoritmo *RandomForest*; las muestras de entrenamiento y validación son obtenidas de la base de información del servicio forestal chileno, filtradas por geógrafos y científicos de biodiversidad del país.

Las coberturas mensuales presentan variaciones estacionales de la vegetación a causa del ciclo fenológico y el crecimiento interanual, por ese motivo los investigadores ensamblan los mapas mensuales con reglas lógicas obteniendo el producto final (Zhao et al. 2016). La cobertura de suelo tiene tres capas de especificación de forma creciente, las capas 1, 2 y 3 presentan un acierto del 80%, 73% y 70% respectivamente (Zhao et al. 2016).

2.6.3. Imágenes satelitales Landsat

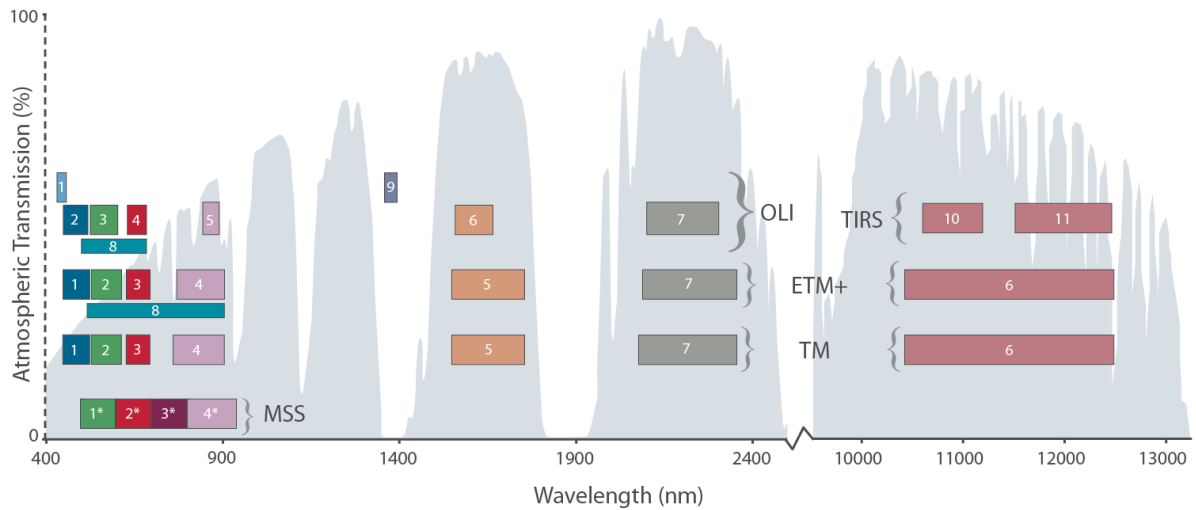
Las fotografías de nuestro planeta en las primeras misiones *Apolo*, orientadas a llevar al hombre a la luna, inspiró a los investigadores a idear un programa satelital de detección remota para recopilar datos sobre los recursos naturales del planeta (Landsat NASA, 2022).

En el 1970 se aprobó el proyecto Landsat el cual se materializó con el lanzamiento del primer satélite del programa (Landsat 1) el 23 de julio de 1972. Desde esa fecha a la actualidad el proyecto ha documentado con imágenes satelitales los recursos naturales de todo el mundo de forma ininterrumpida (Landsat NASA, 2022).

Las misiones del programa han experimentado modificaciones tecnológicas, mejorando progresivamente la captación de información. Para entender dichos cambios, es necesario detallar algunas de las resoluciones de las imágenes satelitales.

1. **Resolución temporal:** Las primeras tres misiones Landsat (1, 2 y 3) tienen una resolución temporal de 18 días, mientras que en las siguientes misiones aumento a 16 días (Landsat NASA, 2022).
2. **Resolución espacial:** Todas las misiones Landsat tienen una resolución espacial de 30 metros, las imágenes fotografían un área de 185x180 km (Landsat NASA, 2022).
3. **Resolución espectral:** El proyecto ha cambiado los sensores multiespectrales en distintas etapas del proyecto. Los satélites Landsat 1, 2 y 3 poseían los sensores Multispectral Scanner System (MSS), mientras que Landsat 4 y 5 el sensor Thematic Mapper (TM), Landsat 7 el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM +) y Landsat 8 cuentan con los sensores Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS) (Landsat NASA, 2022).

El cambio de sensores ha mejorado la recolección de información. Sin embargo, las bandas espectrales de cada sensor captan información en dominios espectrales levemente distintos (Landsat NASA, 2022). La Figura 2. 10 muestra los dominios de cada banda espectral de los distintos sensores del programa. Esto abre la pregunta ¿son equiparables las bandas espectrales de las distintas etapas del programa Landsat?, Li et al. (2013) comparó los índices de vegetación para los satélites Landsat 7 y 8, sensores ETM + y OLI respectivamente, concluyendo que hay una ligera diferencia para cada banda espectral, pero con una alta similitud.



* MSS bands 1–4 were known as bands 4–7, respectively, on Landsats 1–3

Figura 2. 10 Espectro reflejado por el planeta y dominio de cada banda espectral para los distintos sensores del programa Landsat – Fuente: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>

2.6.4. Forzantes climáticas empleadas en los proyectos de actualización del balance hídrico nacional

Las forzantes empleadas provienen del producto CR2MET (Boisier et al., 2018; DGA, 2018), la cual se encuentra distribuido mediante una grilla de resolución espacial de 0,05° para todo el territorio continental y una resolución temporal diaria para el periodo de enero 1979 hasta diciembre del 2020 (Bosier et al., 2018; DGA, 2018). El producto CR2MET cuenta con valores diarios de precipitación y temperaturas extremas.

Las estimaciones de precipitación se elaboraron a partir de un reanálisis atmosférico (ERA Interim), considerando la topografía junto con otras variables climáticas, las que se usaron para elaborar una regresión lineal múltiple que permitiera ajustar los datos del reanálisis a los datos observados. Respecto a las temperaturas extremas diarias la metodología de elaboración es similar a la de precipitación, pero considera más variables como predictor, como, por ejemplo, la temperatura superficial extraída de productos satelitales MODIS (Boisier et al., 2018; DGA, 2018).

Las simulaciones hidrológicas consideran un paso temporal subdiario. Los datos diarios de precipitación son convertidos en datos tri horarios, incorporando la distribución diaria del producto ERA Iterim o ERA5 (dependiendo de la macrozona), mientras que la temperatura se obtiene ajustando la distribución diaria propuesta por ERA Iterim o ERA5 (dependiendo de la macrozona), pero ajustando los extremos a la estimación propuesta por el producto CR2MET. La velocidad del viento es obtenida directamente desde ERA5, interpolando a los puntos de grilla de interés (DGA, 2017, 2018, 2019a y 2019b). Para mayor detalle, se sugiere la lectura de los informes respectivos de cada una de las etapas del estudio “Actualización del Balance Hídrico Nacional” (DGA, 2017, 2018, 2019a y 2019b).

Para las estimaciones de cambio climático (2030 – 2060) se consideran los cuatro modelos de circulación general (GCM) utilizados en la Actualización del Balance Hídrico Nacional, así como el mismo escenario de emisiones RCP 8,5. Este escenario es el peor para el CMIP-5, por lo tanto, las proyecciones utilizadas en el presente estudio corresponden al escenario más desfavorable (DGA, 2017, 2018, 2019a y 2019b).

La selección de GCMs consideró la variabilidad climática influenciada por El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y el Modo Anular del hemisferio Sur (SAM). Adicionalmente, DGA (2017) incorporó como criterio la sensibilidad climática (respuesta global del sistema climático frente a cambios en forzantes externas).

Los cuatro modelos son: 1. CSIRO Mk3-6-0 (Commonwealth Scientific and Industrial Research on Climate), 2. CCSM4 (Community Climate System Model), 3. MIROC-ESM (Model for Interdisciplinary Research on Climate) y 4. IPSL-CM5A-LR (Institut Pierre Simon Laplace), que corresponden a sensibilidades climáticas baja extrema, baja moderada, alta moderada y alta extrema respectivamente (DGA, 2017).

2.6.5. Evapotranspiración satelital

En los últimos 30 años la red hidrométrica nacional ha crecido significativamente, en consecuencia, ha permitido elaborar de forma robusta el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional. No obstante, los escasos o nulos registros de otras variables del ciclo hidrológico como la acumulación y derretimiento de nieves, evapotranspiración, infiltración, etc., hace que los estudios hidrológicos sean dependientes de la escorrentía observada, ignorando las otras componentes del ciclo.

Los productos e imágenes satelitales permiten ampliar y/o complementar la base de datos disponibles para la modelación hidrológica. Por ejemplo, Dembélé et al. (2020) incorporaron productos satelitales, de evapotranspiración para mejorar la representación espacial de otros flujos y variables de estado en el río Volta, usando el modelo hidrológico mHM (Samaniego et al. 2010).

En Chile están disponibles varios productos de evapotranspiración satelital como MOD 16 (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/>) y GLEAM (<https://www.gleam.eu/>) ambos utilizados como referencia en la primera etapa del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017).

3. Zona de estudio

Las zonas en estudio corresponden a las cuencas definidas por las estaciones fluviométricas de la región del Maule: Río Huenchullami en Coipue, Río Purapel en Sauzal y Río Perquilauquén en Quella. La Figura 3. 1 se delimita las cuencas y sus límites políticos.

Mientras que la disponibilidad de información de las estaciones Río Purapel en Sauzal y Río Perquilauquén es sobre el 80% para el periodo entre los años 1979 y 2020, Río Huenchullami en Coipue tiene menos del 10% del registro para el mismo periodo. La Tabla 3. 1 exhibe las coordenadas y disponibilidad de información de las estaciones fluviométricas de las cuencas en estudio.

Para el presente estudio se hace referencia las cuencas de Huenchullami, Purapel y Perquilauquén a las cuencas definidas por las estaciones fluviométricas Río Huenchullami en Coipue, Río Purapel en Sauzal y Río Perquilauquén en Quella respectivamente.

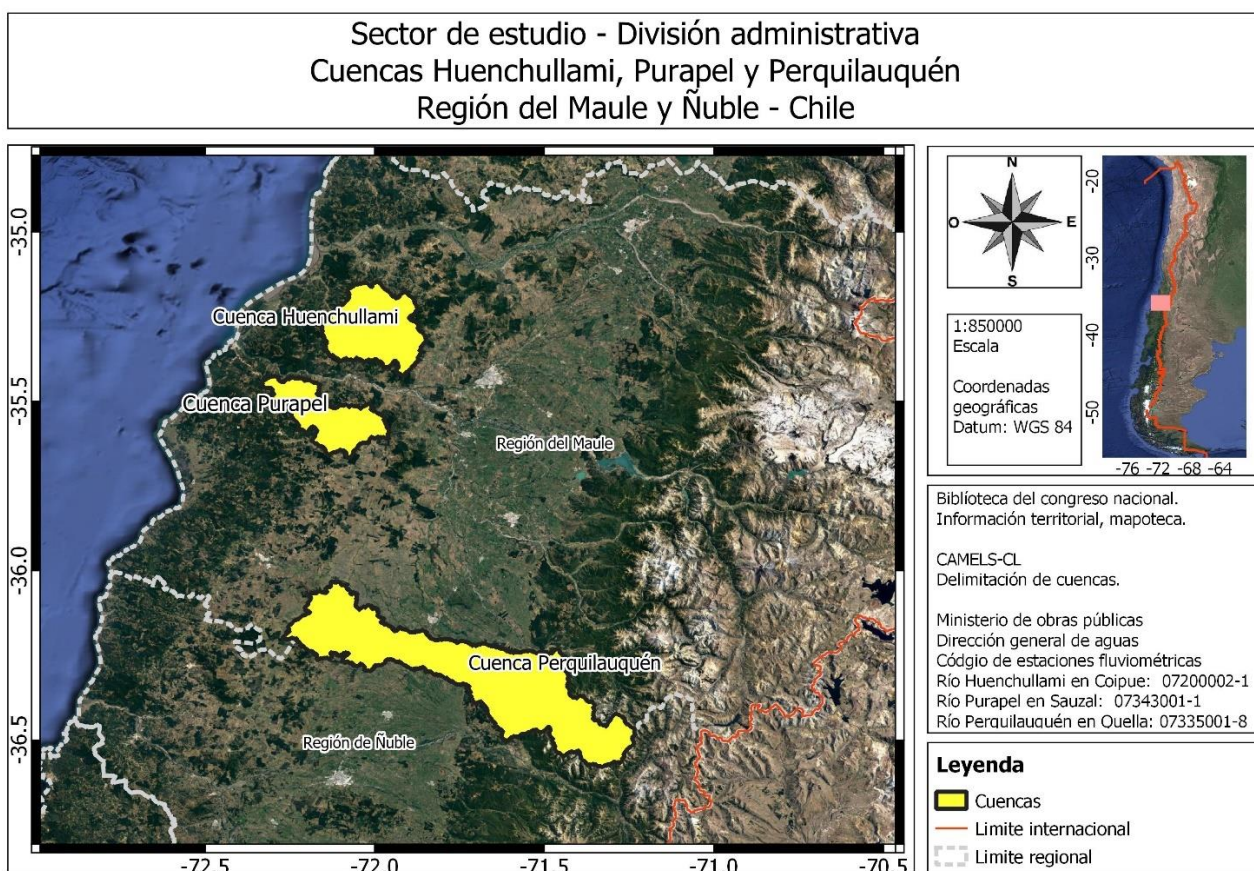


Figura 3. 1 Cartografía básica del sector de los sectores en estudio – Fuente: base de Google Earth.

Tabla 3. 1 Coordenadas de las estaciones fluviométricas de las cuencas en estudio e información disponible – Información extraída: DGA.

Cuenca	Nombre de la estación	Código BNA	Longitud [°]	Latitud [°]	Cota [m.s.n.m.]	Vigencia	Meses válidos**
Huenchullami	Río Huenchullami en Coipue*	07200002-1	72°07'18''	35°14'16''	0	31/05/2011	27
Purapel	Río Purapel en Sauzal*	07343001-1	72°01'01''	35°37'11''	150	01/06/1963	361
	Río Purapel en Nirivilo	07341001-0	72°03'59''	35°34'37''	80	01/01/1900	364
Perquillauquén	Río Perquillauquén en Quella*	07335001-8	72°05'27''	36°04'24''	120	01/01/1966	410
	Río Perquillauquén en Gniquen	07332001-1	71°58'48''	36°15'14''	140	01/01/1900	423
	Río Perquillauquén en San Manuel	07330001-0	71°37'27''	36°22'36''	266	01/10/1963	413

Nota:(*) Punto de salida de las cuencas de este estudio.

(**) Se considera mes válido si presenta más del 70% de la información diaria del periodo comprendido entre enero 1979 a diciembre del 2015, un total de 444 meses.

La cuenca de Huenchullami escurre desde la cordillera de la costa hasta el océano Pacífico de oriente a poniente, con un rango de altitud entre los 0 m s.n.m. hasta los 800 m s.n.m.; la cuenca Purapel escurre desde la cordillera de la costa hasta el valle central de norponiente a suroriente siendo afluente del río Maule, con un rango de altitud entre los 150 m s.n.m. hasta los 750 m.s.n.m., finalmente, la cuenca Perquillauquén escurre desde la precordillera de los Andes hasta el valle central de oriente a poniente siendo afluente del río Maule, con un rango de altitud desde los 100 m s.n.m. hasta los 2200 m s.n.m. La Figura 3. 2 ilustra las curvas hipsométricas de las cuencas en estudio, tanto Purapel y Perquillauquén son cuencas sedimentarias y Huenchullami es una cuenca en equilibrio de erosión.

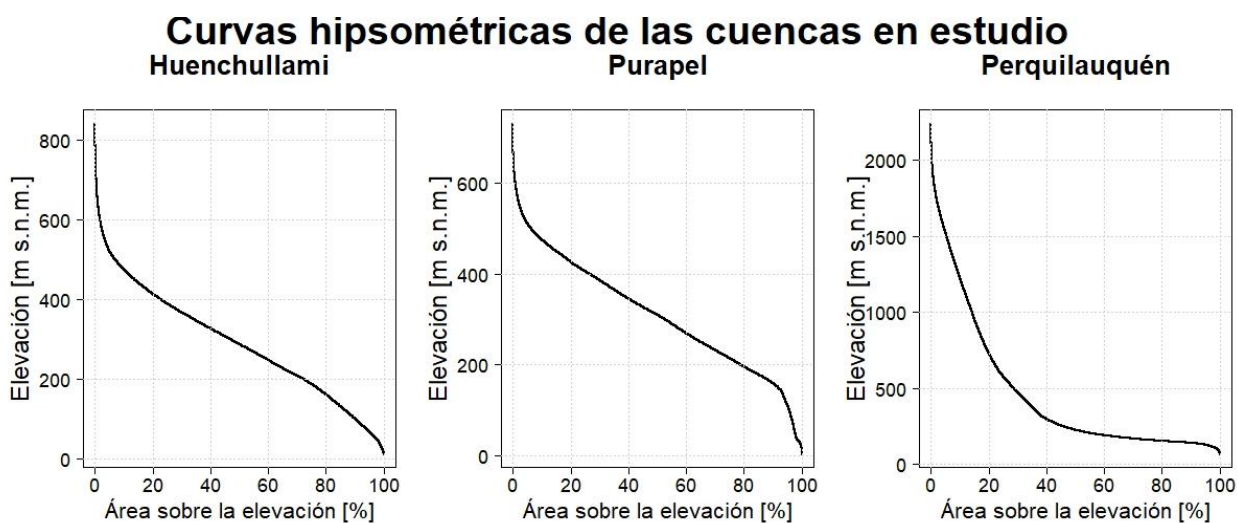


Figura 3. 2 Curvas hipsométricas de las cuencas en estudio – Información extraída: misión satelital SRTM

3.1. Climatología y régimen hidrológico

El área de estudio presenta un clima templado cálido supratermal y mesotermal (Centro AGRIMED, 2017). La época invernal concentra las precipitaciones siendo junio el más húmedo y julio el más frío. Durante la época estival la temperatura media es superior a las otras épocas siendo diciembre el mes más seco y cálido. La Figura 3. 3 muestra el climograma de las cuencas en estudio para el periodo entre los años 1979 y 2020.

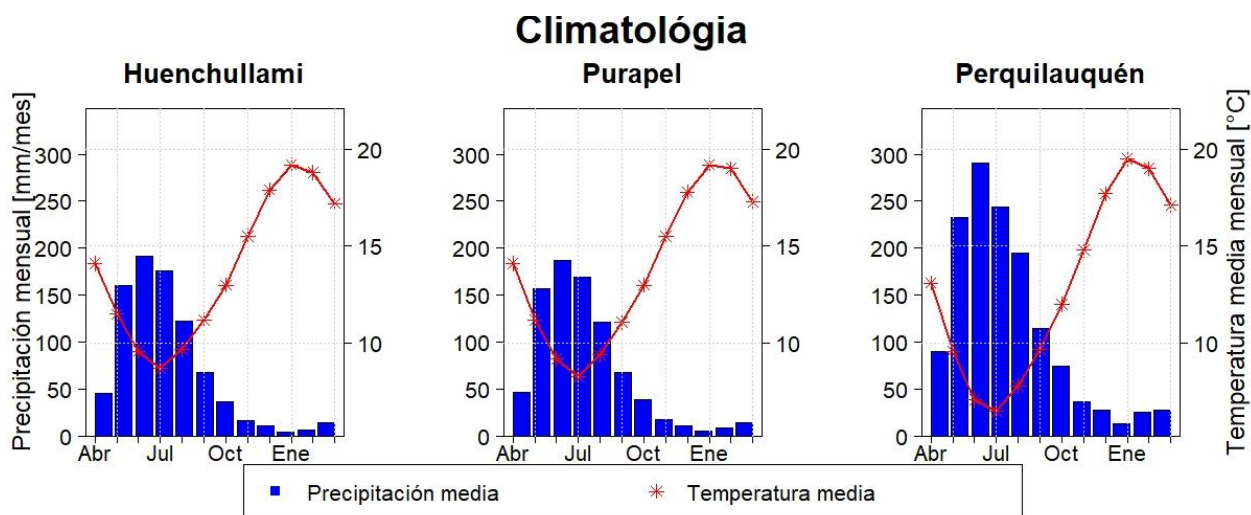


Figura 3. 3 Climatología de las cuencas en estudio – información extraída de Álvarez-Garretón et al. (2018)

El régimen hídrico de las cuencas Purapel y Perquilauquén es pluvial, por la cercanía, similitud geomorfológica (ver Figura 3. 2) y climática (ver Figura 3. 3) se deduce que la cuenca Huenchullami tiene un comportamiento hídrico pluvial. La Figura 3. 4 ilustra las curvas de variación estacional de las cuencas Purapel y Perquilauquén para los meses válidos con información completa en el período 1979 a 2020.

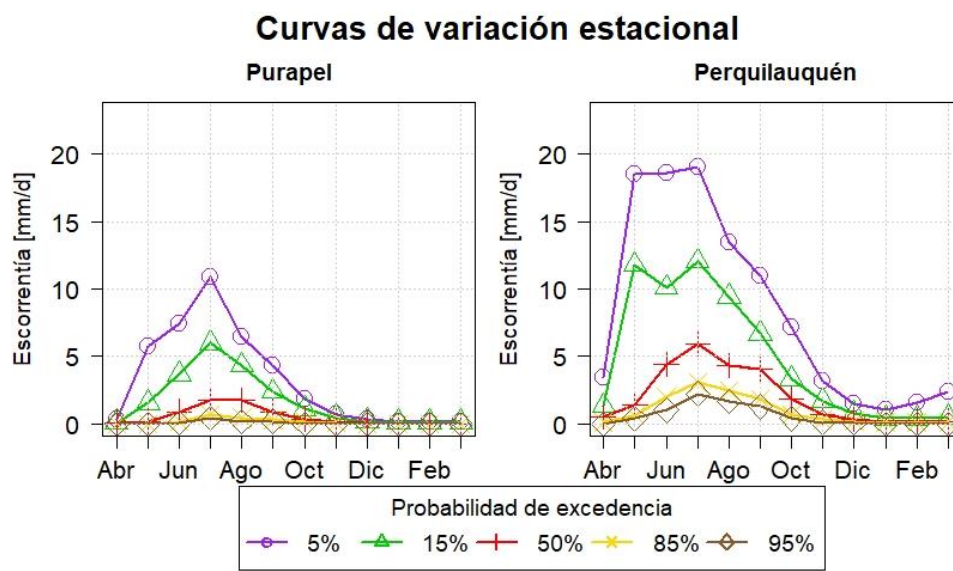


Figura 3. 4 Curvas de variación estacional, solo se consideraron los meses válidos.

3.2. Cobertura vegetal actual

Desde la región de O'Higgins hasta la región de la Araucanía los monocultivos forestales se concentran en la cordillera de la costa con plantaciones ocasionales en el valle central y precordillera de los Andes (CONAF, 2015 y 2016; Zhao et al. 2016). En particular, en las cuencas Huenchullami y Purapel sobre el 60% de su superficie corresponde a plantaciones de *Pinus radiata* (CONAF, 2016). En cambio, la cuenca de Perquilauquén posee mayor diversidad, ya que cerca de un cuarto de su superficie corresponde a cultivos agrícolas, otro cuarto a bosque nativo y otro cuarto monocultivos forestales. El 80% de los monocultivos corresponde a *Pinus radiata*, 14% a *Eucaliptus globulus* y el resto son otras especies (CONAF, 2015 y 2016). En la Tabla 3. 2 se muestra la superficie porcentual para las coberturas: agrícola, bosque nativo y mixto, monocultivos forestales, praderas y matorrales y suelo desnudo según CONAF (2015 y 2016) y Zhao et al. (2016).

Tabla 3. 2 Cobertura vegetal de las cuencas en estudio según CONAF (2015 y 2016) y Zhao et al. (2016)

	Huenchullami		Purapel		Perquilauquén	
	CONAF [%]	Zhao [%]	CONAF [%]	Zhao [%]	CONAF [%]	Zhao [%]
Agrícola	4,6	3,37	6,4	0,99	28,2	17,74
Cuerpos de agua	0,2	0	0	0	1	0,5
Bosque nativo y mixto	18,1	11,56	12	7,74	28,2	22,9
Monocultivos forestales	62,3	54,90	67,8	50,33	24,6	15,62
Praderas y matorrales	14,6	30,12	13,1	40,8	14,4	42,15
Suelo desnudo	0	0,01	0	0,02	2,8	0,91

Nota: Las coberturas: Áreas Urbanas, Humedales, Nieves no están presente en la tabla por la inexistencia en las cuencas. Pastizales y matorrales en la cobertura de suelo de Zhao et al. (2016) se consideraron como praderas y matorrales.

Los bosques nativos dominantes en las cuencas de Huenchullami y Purapel corresponde al bosque esclerófilo y roble–hualo. En Perquilauquén la mayoría del bosque nativo corresponde al roble-hualo seguido por el roble-raulí-coihue. El bosque esclerófilo está presente en menor medida, mientras el bosque de lenga y ciprés de la montaña son relativamente escasos. En la Figura 3. 5 se ilustra los tipos de bosques nativos en cada cuenca con el respectivo porcentaje que abarcan.

Esta investigación sólo considera dos tipos de bosques nativos, bosque esclerófilo, definido en el decreto 259, Art°19 (1998) y bosque caducifolio, definidos en la clasificación de Donoso (1981) y especificados por García & Ormazábal (2008). Lo anterior incluye a las especies de la familia *Nothofagaceae*, que incorpora los bosques nativos definidos en el decreto 259, Art°19 (1998): lenga, roble-hualo y roble-raulí-coihue.

**Tipo de bosque nativo
según el Catastro vegetacional CONAF (2015 y 2016)**

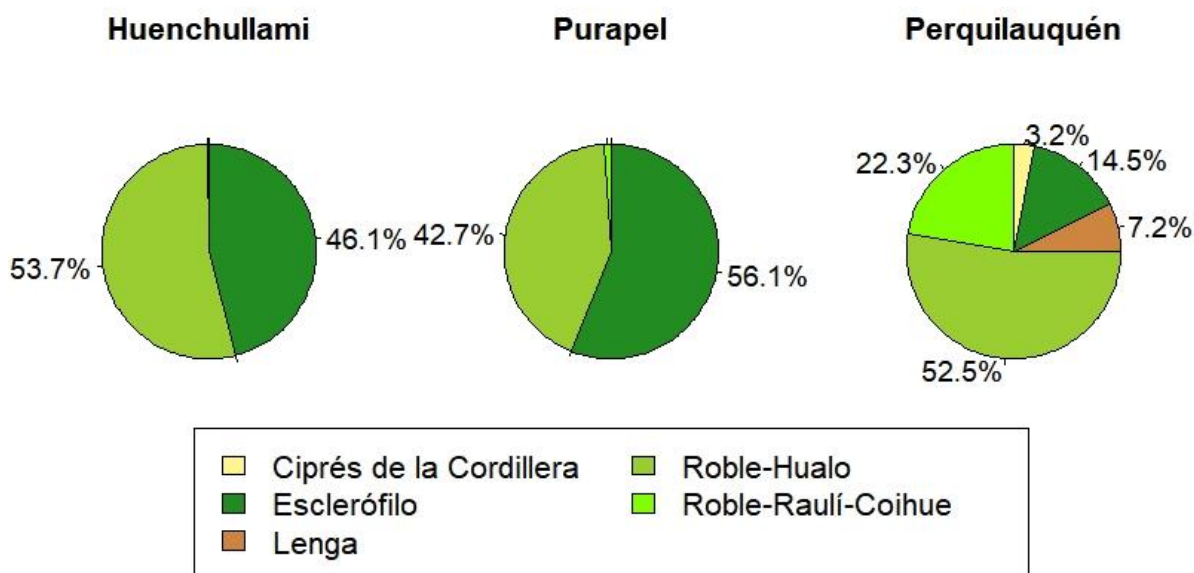


Figura 3. 5 Tipos de bosque nativos en las cuencas en estudio según CONAF (2015 y 2016).

Según el censo agropecuario del 2007, el tipo de cultivo mayoritario en la cuenca Huenchullami corresponde a forraje anual, en particular la avena; en Purapel son viñas y en Perquilauquén los cereales, en particular el arroz y en menor medida el trigo blanco. La Figura 3. 6 ilustra el tipo de cultivo de los sectores en estudio.

Distribución de cultivos según el Censo agropecuario 2007

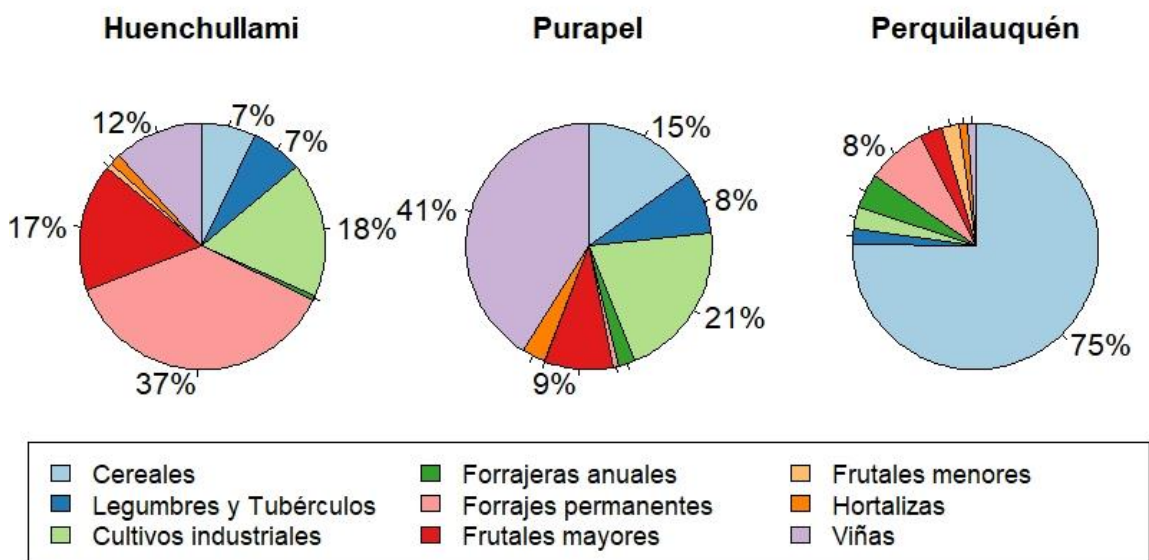


Figura 3. 6 Distribución de cultivos en las cuencas de estudio según el censo agropecuario 2007.

4. Metodología

La metodología está descrita según el orden cronológico. En una primera instancia se detalla la metodología empleada en la detección remota de plantaciones forestales en años pasados y posteriormente se precisan los procedimientos en la modelación hidrológica tales como análisis de sensibilidad, calibración y escenarios de cambio en la cobertura vegetal.

4.1. Detección remota

La metodología empleada para la detección remota se basa en la investigación de Echeverría et al. (2006) complementada con el trabajo de Zhao et al. (2016). Se probaron los algoritmos de clasificación supervisada más mencionados en la literatura para el periodo 2007 – 2017: “*Maximum Likelihood Classification*” (MLC), “*Support Vector Machine*” (SVM), “*Neuronal Net*” (NNET), “*Classification and regression tree*” (CART) y “*RandomForest*” (RF) (Thanh Noi & Kappas, 2017).

Para la clasificación supervisada, se recopilaron imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8 de los meses de enero entre los años 1986 a 2021 (aquellas que presentan nubes sobre las zonas en estudio son excluidas). La Tabla 4. 1 se muestran las fechas de las imágenes satelitales empleadas en el presente estudio con su respectivo satélite y sensor.

Todas las imágenes satelitales son corregidas atmosféricamente con el método “*Dark object subtraction*” (DOS) desarrollado por Chavez (1989). Para esta investigación se seleccionaron las bandas: Green, Blue, Red, NIR, SWIR1 y SWIR2 para la clasificación supervisada. Una vez preprocesadas las imágenes se agrega la topografía de la zona de estudio, información extraída de la misión satelital SRTM.

Tabla 4. 1 Imágenes satelitales analizadas

Fecha	Satélite	Sensor
15/01/1987	Landsat 5	MSS
15/01/1990		
24/01/2002		
16/01/2005		
25/01/2008		
14/01/2010		
25/01/2014	Landsat 8	OLI
12/01/2015		
15/01/2016		
23/01/2019		
12/01/2021		

Los polígonos de las actualizaciones del catastro vegetacional de CONAF de los años 2009, 2015 y 2016 (correspondientes a las regiones del Maule, Maule y Biobío, respectivamente) son considerados en el análisis si su superficie es mayor a una hectárea y si la superficie vegetal abarca más del 1% de la cuenca correspondiente. En consecuencia, las clases entrenadas y en efecto predichas por los algoritmos en las cuencas de Huenchullami y Purapel son Agricultura, Bosque

caducifolio, Bosque esclerófilo, Plantaciones forestales y Praderas y Matorrales. Adicionalmente para la cuenca de Perquilauquén se agregan las clases de Cuerpos de agua y Suelo desnudo.

Para generar las muestras de entrenamiento y validación se extraen las firmas espectrales de los píxeles (de la imagen Landsat) ubicados en los centroides de los polígonos del catastro vegetacional de CONAF y son complementados con la altitud de la misión STRM. Para la actualización del catastro vegetacional de CONAF del año 2009 se trabaja con la imagen Landsat del año 2008, de forma análoga, para la actualización del catastro vegetacional de CONAF de los años 2015 y 2016 se utiliza la imagen Landsat 2016.

Para entrenar los algoritmos se selecciona de forma aleatoria el 80% de la muestra y el 20% restante es utilizado para el proceso de validación, el cual consiste en determinar la precisión general de los algoritmos (ecuación 4.1). Posteriormente, los algoritmos predicen la cobertura vegetal en toda la imagen Landsat y se calcula el error medio simple de las predicciones (ecuación 4.2).

Los algoritmos de mejor rendimiento por cuenca son extrapolados al resto de las imágenes Landsat, prediciendo la cobertura vegetal de cada imagen. Los métodos entrenados con las muestras de la actualización del catastro vegetacional de CONAF del año 2009 predicen la cobertura vegetal de las imágenes Landsat 5 (sensor MSS), a su vez, los algoritmos entrenados con las muestras de la actualización del catastro vegetacional de CONAF de los años 2015 y 2016 predicen la cobertura vegetal para las imágenes Landsat 8 (sensor OLI). La Figura 4. 1 esquematiza el proceso detección remota.

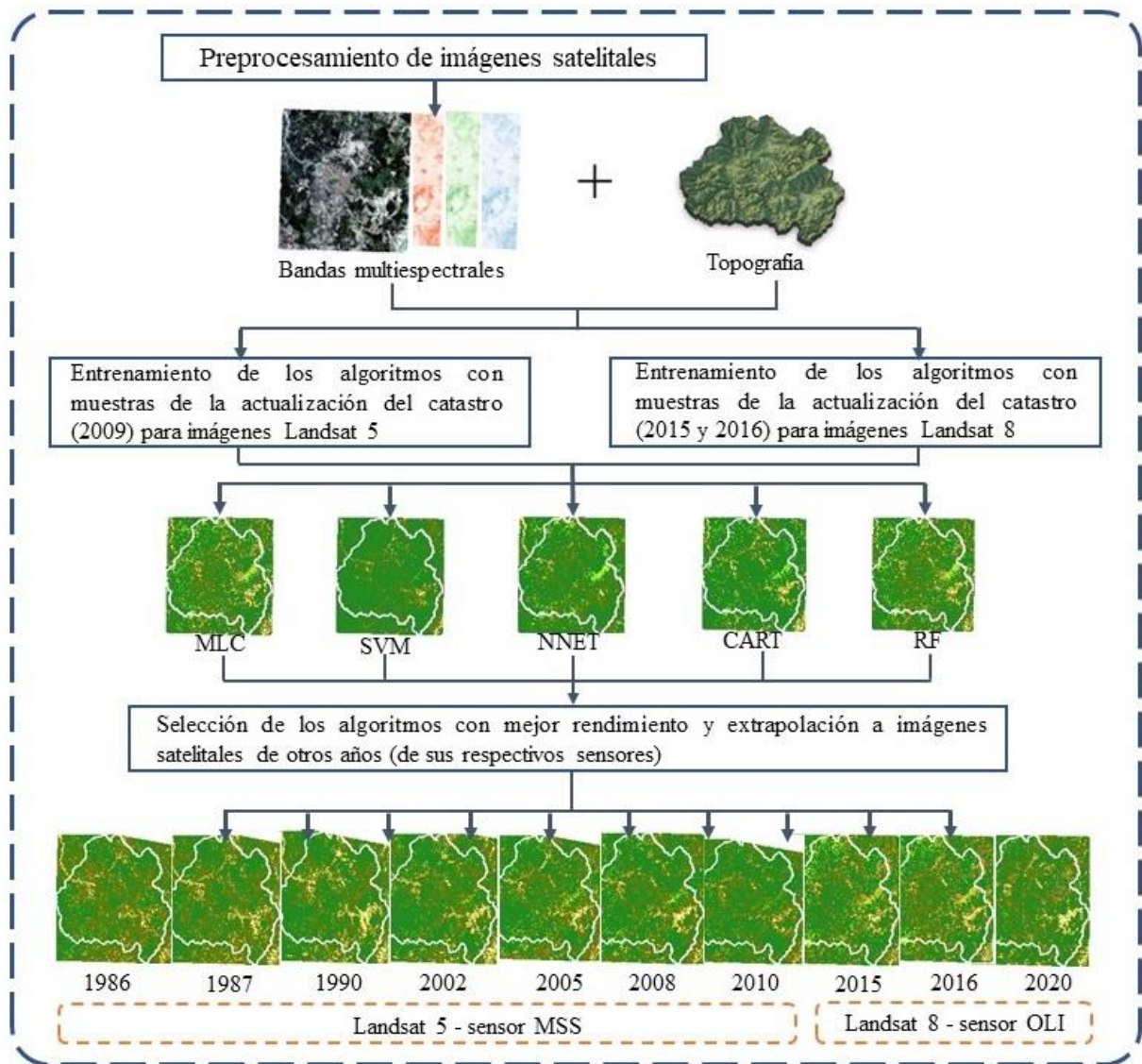


Figura 4. 1 Conceptualización de la detección remota

La precisión general (OA) se obtiene a partir de la matriz de confusión, la cual corresponde a la predicción realizada por el algoritmo a cada muestra de la validación. La matriz se construye por columnas, donde cada una representa una clase efectiva de las muestras de validación, mientras que en sus filas corresponde a la predicción realizada por el algoritmo para cada muestra de validación de la columna. La Tabla 4. 2 muestra un ejemplo de la matriz de confusión para el algoritmo *Random Forest* aplicado en la cuenca Purapel

Tabla 4. 2 Matriz confusión. Algoritmo RandomForest, Cuenca Purapel, fecha de la imagen: 25/01/2008. Muestras de entrenamiento extraídas de la actualización del catastro de CONAF del año 2009.

	Agrícola	Bosque Esclerófilo	Bosque Caducifolio	Plantaciones forestales	Praderas y matorrales
Agrícola	7	0	0	3	7
Bosque esclerófilo	0	0	0	1	0
Bosque Caducifolio	0	0	3	11	1
Plantaciones forestales	5	0	1	151	17
Praderas y matorrales	6	0	1	49	26

La siguiente expresión muestra el cálculo de la precisión general (OA) para el ejemplo de la Tabla 4. 2 la precisión general corresponde al 64,7%.

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^{n=N} x_{i,i}}{m} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Donde OA es la abreviación de *overall accuracy* (precisión general), $x_{i,i}$ es la diagonal de la matriz de confusión en la clase i, N es el número de clases entrenadas por el algoritmo y m es el total de la muestra de validación.

De forma complementaria, los algoritmos predicen la cobertura vegetal de la imagen Landsat (de los años 2008 o 2016), la superficie predicha se contrasta con la superficie observada por la actualización del catastro vegetacional de CONAF (de los años 2009 o 2015 y 2016) a través del error medio simple de la ecuación 4.2.

$$EMS = \frac{\sum_{i=1}^{n=N} |A_{pred_i} - A_{clase_i}|}{N} \quad (4.2)$$

Donde EMS es el error medio simple de la predicción, A_{pred_i} es la superficie de la clase i predicha por el algoritmo, A_{clase_i} es la superficie censada por CONAF en la clase i, N es la cantidad de clases entrenadas en el algoritmo.

Los catastros vegetacionales de CONAF tienen como objetivo diferenciar, catalogar e identificar espacialmente los bosques de Chile, por lo tanto, el resto de las clases de vegetación no muestran el mismo detalle ni precisión, esto conduce una mayor cantidad de polígonos para identificar y diferenciar bosques. En consecuencia, las muestras de entrenamiento y validación presentan sesgo, lo que trae repercusiones en las clasificaciones de los algoritmos (este problema se conoce como “*Overfitting*”), por lo que es de interés la precisión por clases de los algoritmos seleccionados. Para lo anterior se define una nueva métrica, “*produces accuracy*” (PA, ecuación 4.3), corresponde a una modificación de la precisión general (OA) de la ecuación 4.1.

$$PA_i = \frac{x_{i,i}}{m} \cdot 100 \quad (4.3)$$

Donde $x_{i,i}$ es un elemento de la matriz de confusión y m es la suma de todos los elementos de la columna i .

4.2. Modelación hidrológica

En esta sección se detallan las etapas preliminares de la modelación hidrológica las cuales son la obtención de parámetros vegetacionales a través de la revisión en la literatura y restitución a régimen natural de la escorrentía observada. Con esta información se realizó el análisis de sensibilidad y calibración del modelo VIC, lo que a continuación se precisa. Para todas las etapas de modelación hidrológica se considera las coberturas y clases vegetales censadas en la actualización del catastro vegetacional de CONAF de los años 2015 y 2016.

4.2.1. Análisis de sensibilidad

En el presente estudio se aplica el método *distributed evaluation of local sensitivity analysis* (DELSA) desarrollado por Rakovec et al. (2014). Este algoritmo cuantifica la sensibilidad global de los parámetros en modelos hidrológicos, varios estudios en nuestro país han aplicado este análisis de sensibilidad al modelo VIC (DGA 2019; González, 2020; Sepúlveda, 2021).

DELSA es un método híbrido de sensibilidad local y global, basado en derivadas. El método requiere de menos iteraciones respecto a los análisis de sensibilidad global. Esta investigación se analizaron los parámetros de suelo y vegetación del modelo VIC con los espacios de parámetros recopilados por Sepúlveda (2021).

El índice DELSA se define como:

$$S_l^j = \frac{\left| \frac{\partial \psi}{\partial \theta_j} \right|_l^2 \cdot z_j^2}{V_L(\psi)} \quad (4.4)$$

Donde:

$\frac{\partial \psi}{\partial \theta_j} \Big|_l$ es el gradiente local de la métrica ψ , evaluado en el parámetro θ_j , en el set de parámetros l . Para efectos prácticos Rakovec et al. (2014) calcula el gradiente local variando el 1% del parámetro θ_j . La ecuación 4.4 muestra la aproximación matemática.

$V_L(\psi)$ es la varianza local definida en la ecuación 4.5

z_j^2 es la varianza de la distribución uniforme del parámetro θ_j (ecuación 4.7)

$$\frac{\partial \psi}{\partial \theta_j} \Big|_l \approx \frac{\psi(\theta_j + 0,01 \cdot \theta_j) - \psi(\theta_j)}{0,01 \cdot \theta_j} \quad (4.5)$$

$$V_L(\psi) = \sum_{j=1}^N \left| \frac{\partial \psi}{\partial \theta_j} \right|_l^2 \cdot z_j^2 \quad (4.6)$$

$$z_j^2 = \frac{1}{12} \cdot (\theta_{j,max} - \theta_{j,min})^2 \quad (4.7)$$

En la notación de la ecuación 4.7: $\theta_{j,max}$ corresponde al máximo valor que puede obtener el parámetro θ_j , análogamente $\theta_{j,min}$ es el mínimo.

DELSA se aplica a cinco píxeles de modelación (ver Tabla 4. 3). En cada píxel se simulan 200 iteraciones del algoritmo. Los sets de parámetros son obtenidos por un muestreo del hipercubo latino.

Tabla 4. 3 Píxeles de modelación en los cuales se aplicó DELSA

Cuenca	Latitud [°]	Longitud [°]	Índice de aridez
Huenchullami	-35,275	-72,025	1,92
Purapel	-35,425	-72,175	2,01
Purapel	-35,575	-72,125	2,09
Perquilauquén	-36,175	-72,175	1,77
Perquilauquén	-36,375	-71,525	0,92

Nota los datos del índice de aridez es la razón entre la evapotranspiración potencial (según la relación Penman - Monteith) y precipitación, ambos son extraídos de las forzantes de modelación.

Las métricas de evaluación analizadas son KGE (ecuación 4.8) y %BIAS (ecuación 4.9), esta última aplicada para la escorrentía y evapotranspiración. La referencia (“lo observado”) de escorrentía y evapotranspiración, corresponde a los resultados del proyecto de la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) para cada píxel.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 - (\alpha - 1)^2 - (\beta - 1)^2} \quad (4.8)$$

Donde

r es el coeficiente de determinación entre la simulación y los datos de referencias (observado).

α es la razón entre las medias de datos simulados y de referencia (observado).

β razón entre las desviaciones estándar entre los datos simulados y de referencia (observado).

$$\%BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \cdot 100 \quad (4.9)$$

Donde S son los datos simulados y O los datos de referencia (observados).

4.2.2. Parámetros vegetacionales

La cobertura vegetal utilizada en la modelación hidrológica corresponde a la considerada en actualización del catastro vegetacional de CONAF de los años 2015 y 2016. Las clases vegetacionales consideradas en la modelación hidrológica corresponden a las clases predichas en la detección remota: Agricultura, Bosque caducifolio, Bosque esclerófilo, Cuerpos de agua, Plantaciones forestales, Praderas y matorrales y Suelo desnudo.

Los parámetros de vegetación para Agricultura, Cuerpos de agua y Suelo desnudo son heredados de los proyectos de Actualización del Balance Hídrico Nacional. En el caso de la Agricultura los parámetros LAI y Albedo son estimados mediante las ecuaciones 4.12 y 4.13.

Los parámetros de vegetación del resto de las clases son recopilados a partir de una revisión bibliográfica, adaptándolos según las características fisionómicas. En la Tabla 4. 4 se muestran los parámetros vegetacionales utilizados para el proceso de modelación.

Tabla 4. 4 Parámetros vegetacionales a partir de la revisión de la literatura

Parámetro	Unidades	Bosque caducifolio	Bosque esclerófilo	Plantaciones forestales (<i>Pinus radiata</i>)	Praderas y matorrales
root_depth1	m	0,3	0,2	0,5	0,3
root_fract1	-	0,8	0,1	0,8	0,4
root_depth2	m	0,3	0,2	0,5	1,36
root_fract2	-	0,1	0,4	0,1	0,6
root_depth3	m	0,4	0,2	1,5	0
root_fract3	-	0,1	0,5	0,1	0
rarc	s/m	50	60	60	50
rmin	s/m	250	125	250	135
Altura	m	5	25	20	2

Nota: *root_depth_i*; *root_fract_i* corresponde a la profundidad de las raíces y su respectiva densidad en la capa de modelación *i*. *rarc* corresponde a la resistencia arquitectónica de la vegetación, *rmin* a la resistencia mínima estomática y *Altura* corresponde a la altura de la vegetación.

Los parámetros *rarc* y *rmin* son adaptados de los trabajos de Xie & Yuan (2006) y Xie et al. (2007). La densidad y profundidad de raíces se basan en numerosos artículos científicos:

1. Bosque caducifolio: basado en Moreno-Chacón & Lusk (2004) y Reyes et al. (2007).
2. Bosque esclerófilo: basado en Hoffmann & Kummerow (1978).
3. Plantaciones forestales: basado en Hubber & Trecaman (2000), Sudmeyer et al. (2004) y Watson & O’Loughlin (1989).
4. Praderas y matorrales: heredados del proyecto de actualización del balance hídrico nacional.

El catastro vegetacional del CONAF para los años 2015 y 2016 informa la altura media de los bosques nativos y matorrales. En el caso de las plantaciones forestales se consideran los datos de Watson & O’Loughlin (1989).

Los parámetros del modelo VIC *rough* (ROU) y *displacement* (DIS) son calculados mediante las recomendaciones de la página web del modelo VIC (<https://vic.readthedocs.io/en/master/>). Ambos parámetros dependen de la altura de la vegetación, *h*, según se aprecia en las ecuaciones 4.10 y 4.11.

$$ROU = 0,123 \cdot h \quad (4.10)$$

$$DIS = 0,67 \cdot h \quad (4.11)$$

Los parámetros LAI y Alb son estimados de forma espacial (en cada píxel de modelación) y mensual. Ambos se obtienen a partir de imágenes satelitales Landsat 7 y 8 durante los años 2015 y 2016. Los parámetros se estiman según las ecuaciones 4.12 y 4.13 basadas en los artículos de Díaz et al. (2010) y Deguay & Ledrew (1992), respectivamente.

$$LAI = 4,9 \cdot NDVI - 0,46 \quad (4.12)$$

$$Alb = 0,526 \cdot Green + 0,362 \cdot NIR + 0,112 \cdot SWIR2 \quad (4.13)$$

Donde

Green: Banda correspondiente al espectro visible verde

NIR: Banda correspondiente al infrarrojo cercano

SWIR2: Banda correspondiente al infrarrojo de ondas cortas 2

NDVI: Índice de vegetación, se calcula según la ecuación 4.14.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (4.14)$$

Donde: Red es la banda correspondiente al espectro visible rojo.

Los parámetros vegetacionales restantes siguen las recomendaciones de la página web del modelo VIC (<https://vic.readthedocs.io/en/master/>).

4.2.3. Proceso de calibración

El cambio en la cobertura vegetal e incorporación de nuevas clases vegetacionales hace necesario calibrar los parámetros del modelo hidrológico. La calibración se realiza en las cuencas de Purapel y Perquillauquén. La cuenca de Huenchullami, por insuficiencia de datos, no es calibrada, por lo que sus parámetros son estimados mediante regionalización.

Esta subsección muestra los pasos para realizar la calibración. Por ello se precisa el escalamiento de los resultados distribuidos del modelo VIC, la restitución del régimen hídrico a uno natural, las estrategias de calibración y la optimización de los parámetros con el algoritmo *Shuffled Complex Evolution* (SCE – UA).

4.2.3.1. Escalamiento de variables distribuidas

Este proceso es aplicado para los resultados del modelo VIC y los productos satelitales de evapotranspiración GLEAM y MOD16.

Para promediar cualquier variable distribuida espacialmente se debe aplicar la ecuación 4.15

$$X = \frac{\sum_{i=1}^N X_i \cdot frac_i \cdot A_{pixel_i}}{\sum_{i=1}^N frac_i \cdot A_{pixel_i}} \quad (4.15)$$

Donde X es la variable escalada, X_i la variable en la celda i, $frac_i$ la fracción de la celda inserta en la celda i y A_{pixel_i} el área del píxel i y N es el número total de celdas.

4.2.3.2. Restitución al régimen natural

Las cuencas en estudio presentan extracciones de aguas tanto superficiales como subterráneas. Esto incide en los registros de escorrentía incorporando incertidumbre en la estimación del régimen hídrico natural. VIC simula la escorrentía en condiciones naturales, por lo que es necesario restituir el régimen hídrico observado a uno natural para calibrar el modelo.

Para el presente estudio se estima que el régimen natural corresponde a la suma de los derechos de aprovechamiento de aguas consuntivos permanentes a la escorrentía observada. Tanto Huenchullami como Purapel sólo presentan derechos consuntivos permanentes. En el caso de Perquilauquén existen derechos de aprovechamiento de agua consuntivos y no consuntivos, estos últimos restituyen sus aguas en los dominios de la cuenca por lo que no fueron considerados en este análisis.

La presencia del embalse Digua en la cuenca de Perquilauquén condiciona la restitución al régimen natural. La Dirección de Obras Hidráulicas desde el año 2009 posee derechos de aprovechamiento de agua que tienen como finalidad captar agua para el embalse, estos derechos corresponden a una naturaleza consuntiva y de magnitudes de 11,5 m³/s, 38,5 m³/s y 11,5 m³/s para los meses de junio, julio y agosto respectivamente. Paralelamente, los agricultores de la zona tienen derechos de aprovechamiento de aguas (aguas abajo del embalse Digua) cuya fuente corresponde al sistema de riego del embalse. Por lo tanto, los derechos de aprovechamiento de agua cuya fuente sea el sistema de riego del embalse, son ignorados para el proceso, con el supuesto que ese volumen de agua tiene origen en la captación del embalse.

El funcionamiento del embalse empezó en el año 1968, por lo tanto, los derechos de agua de captación asignados el año 2009 son replicados a los años anteriores. Los derechos de agua de las tres son recopilados desde la página web de la DGA (https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx). El anexo C muestra los resultados de la restitución a régimen natural.

4.2.3.3. Estrategias de calibración

Los parámetros a calibrar se escogieron según el análisis de sensibilidad del presente trabajo (ver Figura 5. 2, más adelante), la metodología aplicada en el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional y los resultados de Sepúlveda (2021). La Tabla 4 5 muestra los parámetros seleccionados para la calibración, su respectiva descripción y la estrategia adoptada.

Se opta por una combinación de estrategias de acuerdo con la información disponible y la sensibilidad obtenida por el método DELSA. Se consideran tres estrategias de calibración:

1. Concentrado: optimización del parámetro con un único valor para toda la cuenca.

2. Patrón: optimización del parámetro distribuyendo la magnitud por celda según productos de referencias.
3. Grupos: optimización del parámetro de forma independiente según los grupos generados de los productos de referencia.

Los parámetros de suelos disgregados por capas del suelo $Expt_i$ y $Ksat_i$ son optimizados de forma conjunta (un solo valor para todas las capas). En tanto, el espesor de las capas h_i son optimizados de forma individual distribuyendo la magnitud del parámetro según el producto de Pelletier et al. (2016) (estrategia de calibración correspondiente a patrón).

Los parámetros $Ksat$ y $Expt$ mostraron una mayor sensibilidad, por lo cual se opta por una estrategia de calibración en grupos, estos son distribuidos por la geología dominante según lo descrito en el mapa geológico de Chile del SERNAGEOMIN del año 2011 (<https://geometadatos.wordpress.com/2011/05/16/geologia-de-chile-ernageomin-layer-online/>). Si bien, los parámetros b y Ws mostraron insensibilidad en el presente estudio. De igual forma, son calibrados por grupo debido a la sensibilidad obtenida por Sepúlveda (2021) y en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2019a), además estos parámetros podrían estar influenciados por la vegetación dominante (Vaze et al., 2011).

Los parámetros h y $Bulk_density$ mostraron sensibilidad según el método DELSA. Sin embargo, para ahorrar recursos computacionales se optó una estrategia por patrón. El parámetro h distribuye la magnitud por las celdas de modelación según el patrón de la grilla de capas de suelo y sedimentación desarrollada por Pelletier et al. (2016) (https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Global_Soil_Regolith_Sediment.html). De igual forma, el parámetro $Bulk_density$ distribuye la magnitud según la grilla de densidad aparente elaborado por Hengl (2018) (<https://zenodo.org/record/2525665#.YnVEdejMJPY>).

Finalmente, los parámetros Ds y $Dsmax$ se calibraron de forma concentrada suponiendo que la escorrentía tenga las mismas características de escurrimiento en toda la cuenca.

Tabla 4 5 parámetros calibrados y estrategia optada

Parámetros	Descripción	Estrategia	Producto de referencia
b	Parámetro asociado a la curva de infiltración	Grupo	Vegetación (CONAF, 2015; 2016)
Ds	Fracción del Dsmáx donde comienza el caudal base no lineal	Concentrado	No aplica
Dsmáx	Velocidad máxima del caudal base	Concentrado	No aplica
Ws	Fracción de humedad del suelo donde ocurre el caudal base no lineal	Grupo	Vegetación (CONAF, 2015; 2016)
Expt	Exponente en la ecuación de cambell para la conductividad hidráulica	Grupo	Geológico (SERNAGEOMIN, 2011)
h	Espesor de las capas del suelo	Patrón	Grilla de capas de suelo y sedimentación (Pelletier et al. 2016)
Ksat	Conductividad hidráulica saturada	Grupo	Geológico (SERNAGEOMIN, 2011)
Bulk_density	Densidad aparente de las capas de suelo	Patrón	Grilla de densidad aparente (Hengl, 2018)

En la cuenca de Purapel se calibraron 20 parámetros y en Perquilauquén 26 parámetros. La vegetación y geología predominantes en cada celda de modelación se ilustra en las Figura 4. 2 y Figura 4. 3.

Los grupos de vegetación en Purapel son dos y en Perquilauquén cinco. En consecuencia, en Purapel se calibran dos valores de b y Ws asociados a la cobertura de plantaciones forestales y praderas y matorrales, en cambio en Perquilauquén b y Ws se disgregan en los cinco grupos de vegetación dominante en la cuenca. Análogamente, Ksat y Expt se disgregan por los grupos geológicos presentes en cada cuenca. En ambas cuencas se calibran cinco valores de Ksat y Expt.

Vegetación dominante por celda de modelación

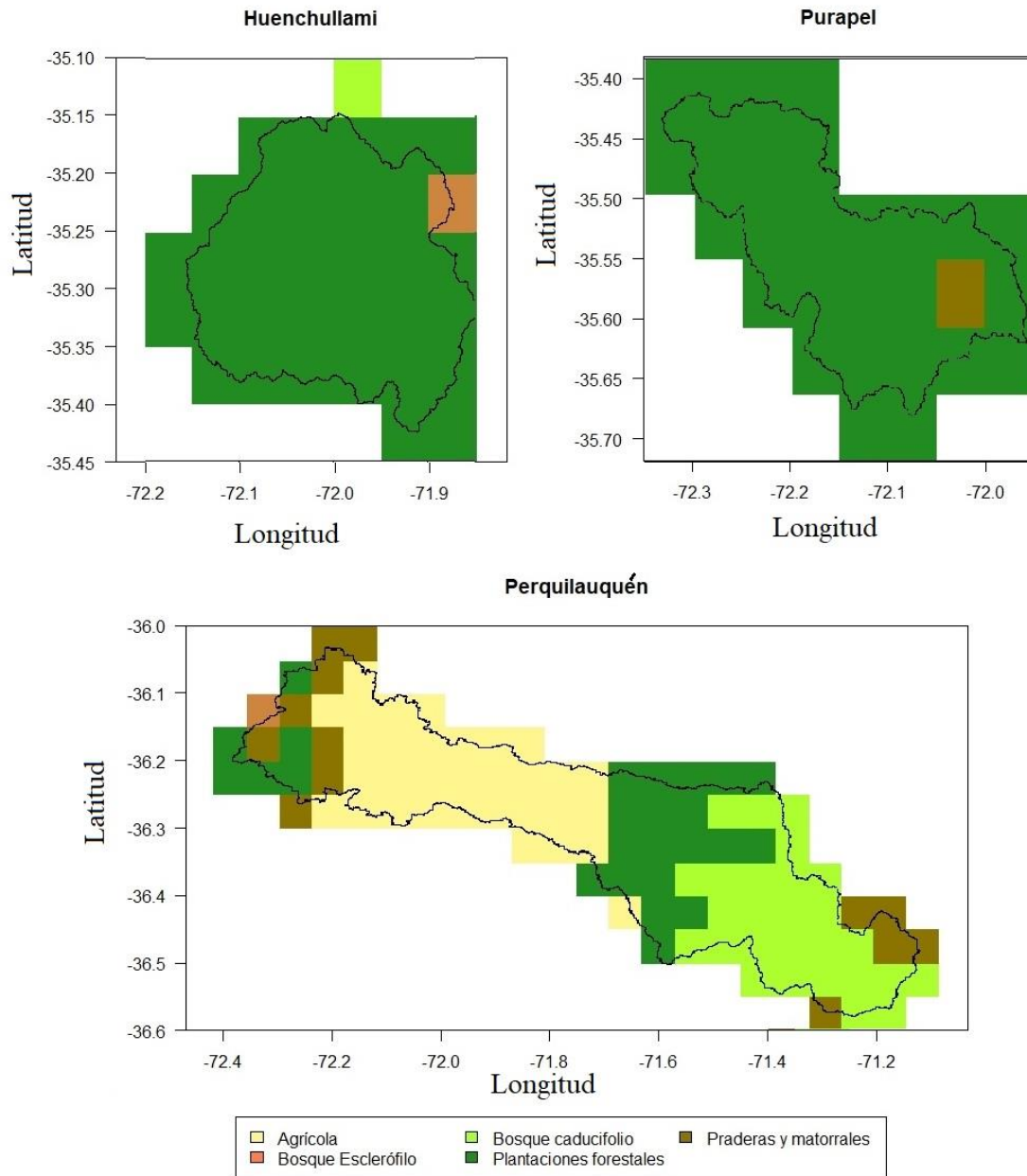


Figura 4. 2 Vegetación dominante por celda de modelación

Geología característica por celda de modelación

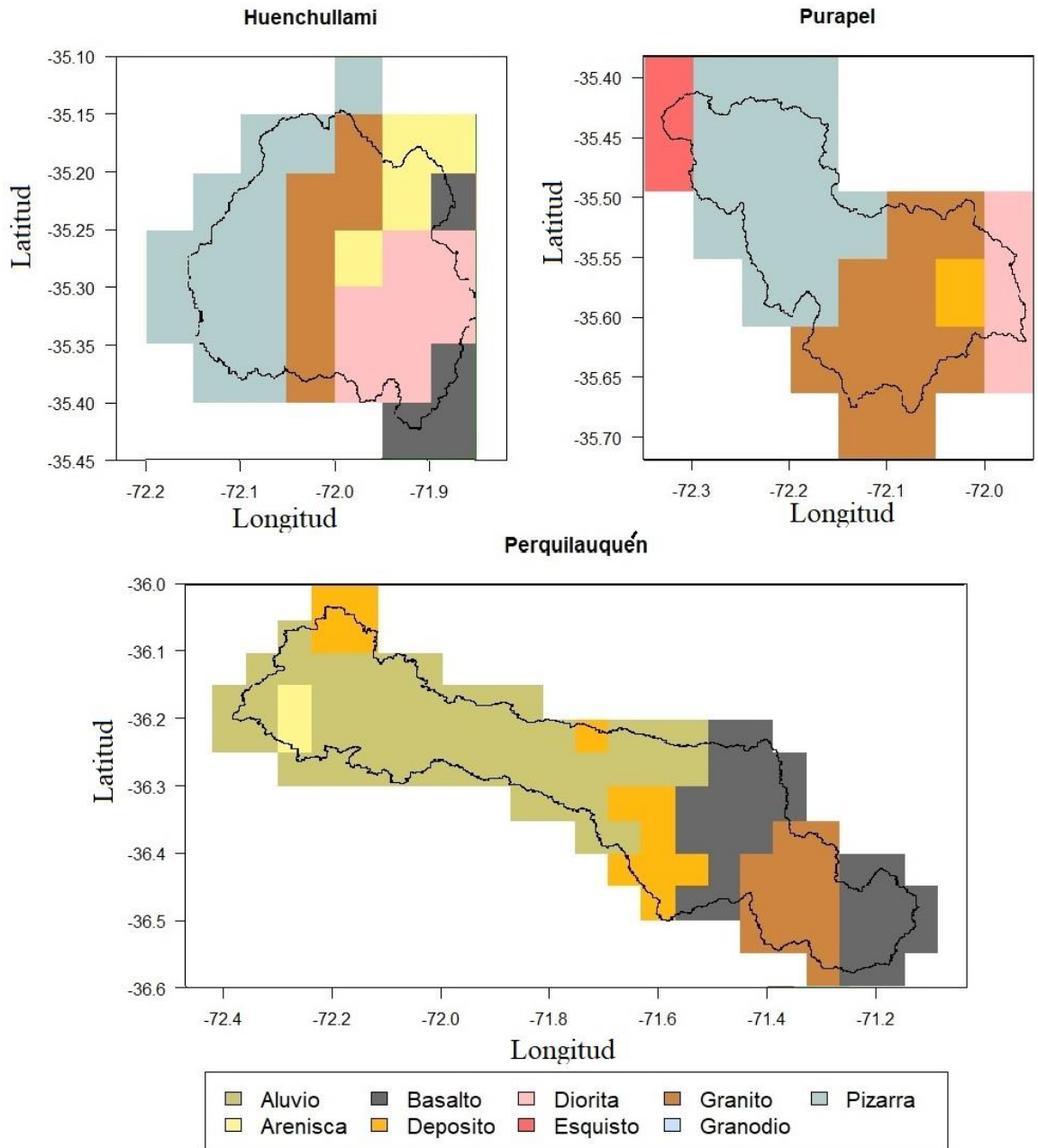


Figura 4. 3 Geología característica por celda de modelación

4.2.3.4. Calibración

Las proyecciones de cambio climático en el país predicen una disminución de las precipitaciones y aumento de las temperaturas en Chile central. En este contexto una calibración en estas circunstancias con métricas que se ajusten a la escorrentía base es idóneo para cuantificar la disponibilidad hídrica futura.

De acuerdo con lo anterior, la calibración se realizó en el periodo 2008 – 2018, época seca. La función objetivo corresponde a la métrica Split – KGE (Fowler et al., 2018), la cual, se define como

el promedio anual (en año hidrológico) de la métrica KGE (Gupta et al., 2009; ecuación 4.7). Split – KGE pondera con el mismo peso los años húmedos como los secos, lo cual permite mejorar el ajuste de la escurrentía en épocas secas (Fowler et al., 2018).

El algoritmo de optimización empleado es *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) desarrollado por Duan et al. (1993). SCE-UA es el método utilizado en el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional. El esquema de calibración utilizado considera los siguientes pasos:

- i. Generar una población inicial en el espacio de parámetros y calcular la función objetivo (Split-KGE) para cada set.
- ii. Ordenar los sets de parámetros según el rendimiento de la función objetivo.
- iii. Dividir los sets de parámetros en complejos.
- iv. Evolucionar cada complejo con el algoritmo *Competitive Complex Evolution* (CCE), basado en el método simplex.
- v. Volver a ordenar los sets de parámetros evolucionados, análogo al paso ii.
- vi. Comprobar el criterio de convergencia, si no se cumple repetir pasos iii, iv y v.

En la calibración se siguieron todos los ajustes recomendados por Duan et al. (1993). Como por ejemplo considerar 10 complejos en el proceso. Por costos computacionales se limita el tiempo de calibración: en Purapel se limita el algoritmo un máximo de 6 días y en Perquilauquén a 15 días.

4.2.4. Regionalización

Por la insuficiencia de datos no fue posible calibrar la cuenca de Huenchullami, por lo cual en ésta se heredan los parámetros calibrados de las cuencas Purapel y Perquilauquén según los siguientes criterios:

1. Similitud geológica y vegetación dominante.
 - a) En caso de que las cuencas Purapel y Perquilauquén tengan el mismo grupo dominante de geología o vegetación, la celda que dona sus parámetros calibrados es la de mayor cercanía a la celda que recibe los parámetros.
2. Similitud climática y mayor cercanía.

Los parámetros calibrados por grupo geológico (Ksat y Expt) heredan a los mismos grupos geológicos presentes en Huenchullami. El mismo criterio se aplica con los grupos de vegetación dominante. Los parámetros D_s , D_{smax} , h_i y Bulk_density son heredados desde Purapel. Las Figura 4. 2 y Figura 4. 3 permiten visualizar la vegetación y geología dominante de las cuencas.

4.3. Escenarios de cambio de cobertura vegetal

Con las coberturas vegetales estimadas para años anteriores y los parámetros calibrados, se plantean escenarios hipotéticos de la cobertura vegetal, los cuales aumentan o disminuyen la superficie de plantaciones forestales.

En una primera instancia se simulan las coberturas vegetales estimadas por la detección remota de las imágenes Landsat de los años 1986, 1990, 2002, 2016 y 2021. Las forzantes climáticas utilizadas corresponden al producto CR2MET v.2.0 (Boiser et al., 2018; DGA, 2018) disgregadas

en un paso temporal subdiario según el producto ERA-5 para el periodo comprendido entre los años 1985 y 2020.

Posteriormente, se plantean escenarios de aumento y disminución de la superficie forestal con respecto a la cobertura vegetal de la actualización del catastro vegetacional de CONAF de los años 2015 y 2016. Los escenarios de modificación aplican los siguientes criterios.

1. Las plantaciones forestales sólo sustituyen las praderas y matorrales.
2. En caso de disminuir la superficie de monocultivos forestales, el terreno es recuperado por la vegetación nativa dominante de cada píxel (Bosque caducifolio, Bosque esclerófilo o Praderas y Matorrales).

Estos criterios son aplicados a nivel de celda de modelación, en caso de que una celda no tenga plantaciones forestales no sufre modificaciones, por lo tanto, los escenarios respetan la espacialidad de la vegetación. Los escenarios simulados son los siguientes:

- Escenario A: Disminución en un 100% de la superficie forestal.
- Escenario B: Disminución en un 50% de la superficie forestal
- Escenario C: Disminución en un 10% de la superficie forestal
- Escenario D: Aumento en un 10% de la superficie forestal
- Escenario E: Aumento en un 50% de la superficie forestal

De forma análoga a las simulaciones de coberturas vegetales históricas, estos escenarios son modelados en el periodo correspondiente entre los años 1985 y 2020 y las forzantes climáticas corresponden al producto CR2MET v.2.0 (Boiser et al., 2018; DGA, 2018) disgregadas en un paso temporal subdiario según el producto ERA-5.

Finalmente se simulan los escenarios anteriores bajo proyecciones de cambio climático para el periodo comprendido entre los años 2030 y 2060. Los escenarios propuestos modifican la cobertura vegetal para el año 2021. Adicionalmente, se simula las proyecciones de las coberturas vegetal para el año 2030, la cual corresponde a una extrapolación de las tendencias históricas y espaciales determinadas por la detección remota.

Las forzantes climáticas para las proyecciones de cambio climático son obtenidas de los GCMs empleados en el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017, 2018, 2019a y 2019b): 1. Commonwealth Scientific and Industrial Research on Climate (CSIRO Mk3-6-0), 2. Community Climate System Model (CCSM4), 3. Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC-ESM) y 4. Institut Pierre Simon Laplace (IPSL-CM5A-LR).

5. Resultados

Esta sección en una primera instancia muestra los resultados de la detección remota, especificando los rendimientos de los algoritmos de clasificación supervisada y las tendencias históricas en la evolución de la cobertura vegetal. Posteriormente exhibe los resultados de la modelación hidrológica, detallando los procesos de análisis de sensibilidad, calibración y regionalización. Finalmente, se presentan las simulaciones de los escenarios hipotéticos de reducción y aumento de las plantaciones forestales en la cobertura vegetal.

5.1. Resultados de la detección remota

El acierto (precisión general) de los algoritmos de clasificación supervisada corresponde al 60% aproximadamente, ver Tabla 5. 1 y Tabla 5. 2. Tanto la investigación de Echeverría et al. (2006) como Zhao et al. (2016) logran una precisión general sobre el 80%, lo que se puede atribuir al origen de las muestras de entrenamiento y validación. El primer estudio utiliza cuatro fuentes de muestreo, de las cuales se seleccionan manualmente los puntos de entrenamiento según el criterio de los investigadores. De igual manera, para el producto de Zhao et al. (2016), geógrafos y biólogos filtraron la información de las actualizaciones del catastro vegetacional de CONAF.

Los únicos filtros aplicados en el presente estudio corresponden a que los polígonos de los catastros sean mayores a una hectárea y las coberturas vegetales analizadas abarquen más del 1% de la cuenca correspondiente.

Para el sensor MSS (Landsat 5) el algoritmo que logra la mejor precisión general y menor error medio simple corresponde a *RandomForest* (RF) para las cuencas Huenchullami y Purapel, a su vez, el algoritmo *Maximum Likelihood Classification* (MLC) logra el mejor rendimiento en ambas métricas en Perquillauquén. Para el sensor OLI (Landsat 8) el algoritmo con mayor rendimiento corresponde a RF en las cuencas Huenchullami y Perquillauquén, paralelamente el método MLC tiene la mejor performance en Purapel.

Tabla 5. 1 Rendimiento de los algoritmos entrenados con la imagen del 25/01/2008 - Landsat 5, sensor MSS

Algoritmo	Huenschullami		Purapel		Perquillauquén	
	OA [%]	EMS [Km ²]	OA [%]	EMS [Km ²]	OA [%]	EMS [Km ²]
MLC	55,7	26,31	57,5	16,9	55,4	147,19
SVM	59,2	37,89	63	26,64	49,3	212,78
NNET	57,8	30,5	64,7	21,38	50,8	180,6
CART	57,5	33,54	63	22,89	50,5	181,79
RF	60,1	24,26	64,7	13,9	55,3	158,44

Tabla 5. 2 Rendimiento de los algoritmos entrenado con la imagen del 15/01/2016 - Landsat 8, sensor OLI

	Huenchullami		Purapel		Perquillauquén	
Algoritmo	OA [%]	EMS [Km ²]	OA [%]	EMS [Km ²]	OA [%]	EMS [Km ²]
MLC	54,3	19,42	61,4	14,84	57,2	130,28
SVM	54,2	42,26	63	23,98	60,1	171,79
NNET	54,5	43,54	57,5	48,35	53	217
CART	52,6	22,56	58,7	24,99	52,5	179,63
RF	56,6	18,28	60	15,37	60	121,65

Los algoritmos entrenados estiman la cobertura vegetal de las imágenes satelitales de distintos años. En la Figura 5. 1, se observa la evolución temporal de la cobertura vegetal según los algoritmos con mejor rendimiento para sus respectivas cuencas y sensores. En el anexo C se adjuntan la evolución espacial y temporal de la cobertura vegetal para todas las cuencas.

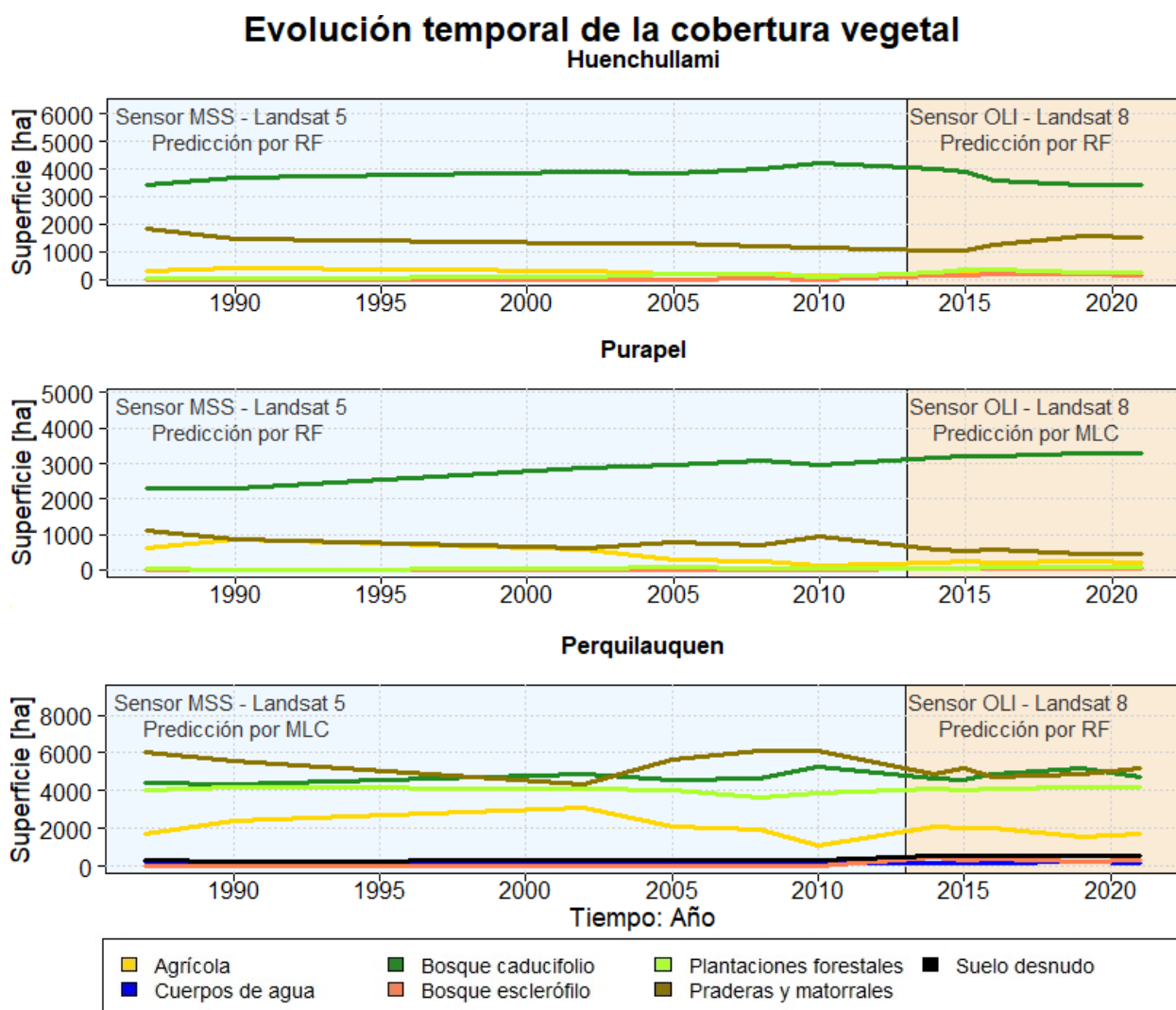


Figura 5. 1 Evolución temporal de la cobertura vegetal

En todas las cuencas se observa un aumento sostenido de las Plantaciones forestales en desmedro de la Agricultura, Praderas y Matorrales. De igual manera, se observa una correlación entre las superficies de Plantaciones forestales y Praderas y Matorrales, probablemente los monocultivos forestales se siembren sobre estos terrenos. Tanto en Huenchullami como Perquilauquén se observa un aumento de las Praderas y Matorrales cuando las forestales pierden terreno, lo que podría explicarse gracias a que la firma espectral de los bosques cosechados sea similar a los matorrales.

También destaca la correlación entre los terrenos agrícolas y las Praderas y Matorrales. De forma análoga con la tala de los bosques, la firma espectral del desuso de los terrenos agrícolas sea semejante la firma espectral de las praderas.

Respecto a la precisión específica de los algoritmos (“*produces accuracy*”; PA), la detección de las plantaciones forestales tiene un acierto sobre el 60% para el sensor MSS y del 65% para el sensor OLI. De igual forma, la precisión para detectar bosques caducifolios corresponde a un acierto sobre el 60%. Las Tabla 5. 3 y Tabla 5. 4 muestran la precisión específica para cada cuenca y cada clase de vegetación.

Tabla 5. 3 Precisión por clases de los algoritmos con mejor rendimiento para el sensor MSS

	Huenchullami	Purapel	Perquilauquén
Clase	PA [%]	PA [%]	PA [%]
Agrícola	35,7	38,9	36,5
Bosque caducifolio	75	60	61,3
Bosque esclerófilo	0	0	0
Cuerpos de agua	-	-	25
Plantaciones forestales	64,8	70,2	60,8
Praderas y matorrales	48,2	51	60,8
Suelo desnudo	-	-	36,4

Tabla 5. 4 Precisión por clases de los algoritmos con mejor rendimiento para el sensor OLI

	Huenchullami	Purapel	Perquilauquén
Clase	PA [%]	PA [%]	PA [%]
Agrícola	59,1	39,3	51,2
Bosque caducifolio	45,2	25	75,5
Bosque esclerófilo	28,6	4,7	22,9
Cuerpos de agua	-	-	69,6
Plantaciones forestales	65,1	88,6	67
Praderas y matorrales	46,5	34	49,5
Suelo desnudo	-	-	44,1

5.2. Resultados de la modelación hidrológica

5.2.1. Análisis de sensibilidad

Los cinco pixeles (indicados en la Tabla 4. 3) presentan la misma sensibilidad, lo que se atribuye por el régimen hídrico pluvial de las cuencas. Los pixeles muestran una alta sensibilidad en los parámetros Ksat1, Ksat2, Rmin y LAI, en una menor escala Dsmax, Expt1, Expt2, Expt3, Depth2, Bulk_density1, Bulk_density2, Bulk_density3, Roots3, Rarc y DIS. En la Figura 5. 2 se muestra la sensibilidad obtenida con el método DELSA para las métricas KGE y %BIAS para escorrentía y evapotranspiración.

Los trabajos de González (2020) y Sepúlveda (2021) coinciden en que los parámetros de vegetación sensible en métricas asociadas a la evapotranspiración son Rmin y LAI. En la Actualización del Balance Hídrico (DGA, 2019) y la investigación de Sepúlveda (2021) concluyen que los parámetros sensibles para procesos de escorrentía son b, Expt2 y Depth2, aunque dichos análisis de sensibilidad son realizados a escala de cuenca.

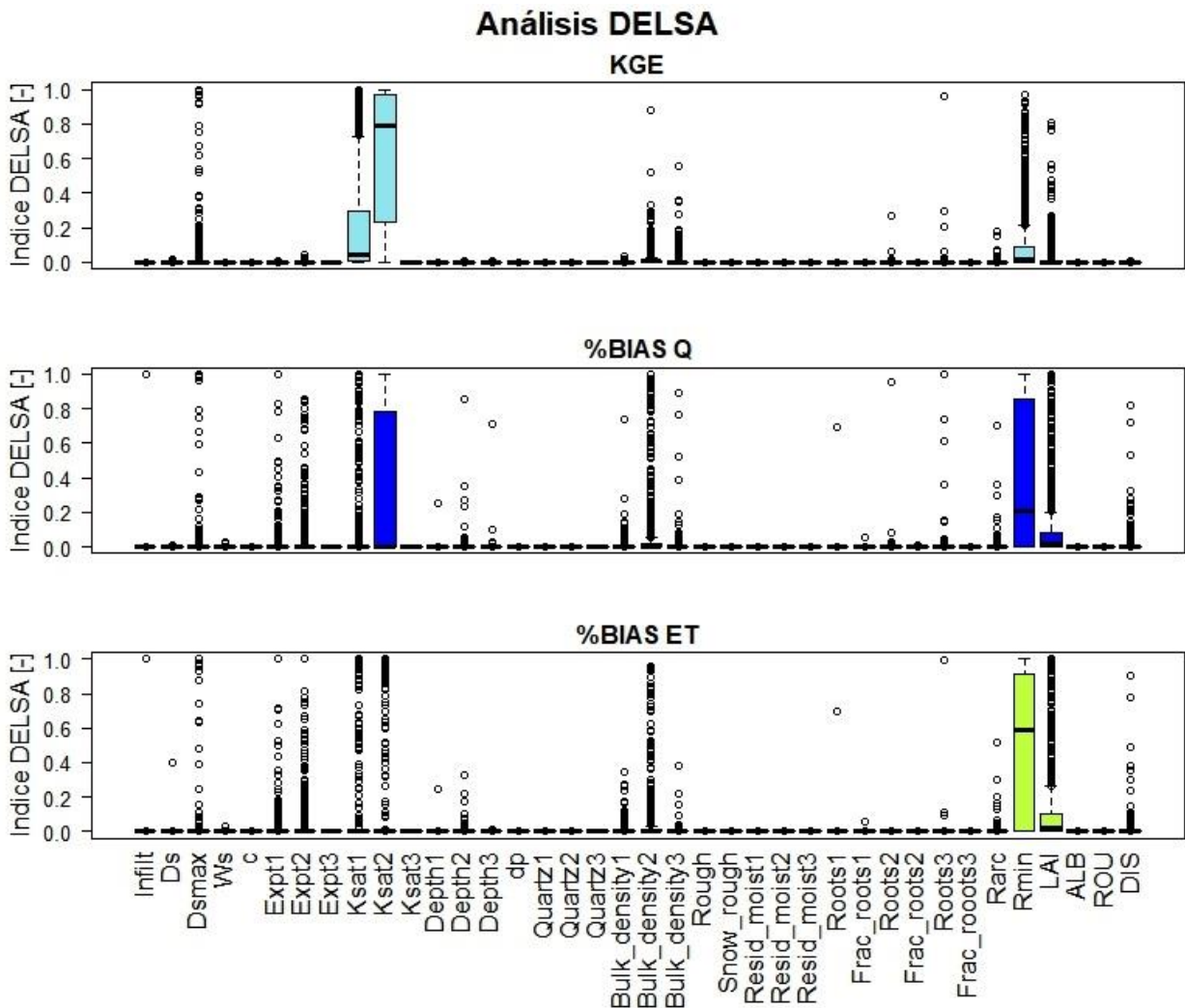


Figura 5. 2 Índices de sensibilidad DELSA para distintas métricas: KGE (panel superior), %BIAS de escorrentía (panel central) y %BIAS para la evapotranspiración (panel inferior). Los resultados sintetizan los resultados de los cinco pixeles.

5.2.2. Calibración del modelo VIC

Las cuencas de Purapel y Perquilauquén son calibradas para el periodo comprendido entre los años 2008 y 2018 considerando la escorrentía restituida a régimen natural. Esta sección limita a mostrar los rendimientos de los parámetros óptimos para el periodo comprendido entre los años 1985 y 2020. El anexo – D muestra los rendimientos para los periodos de calibración y validación del modelo para pasos temporales diarios.

Para cada una de las cuencas, los procesos de optimización fueron interrumpidos antes de lograr la convergencia debido a que se sobrepasa el tiempo límite asignado. En consecuencia, el modelo tiene el potencial para mejorar las métricas de eficiencia.

La cuenca de Purapel muestra un ajuste de 0,27 para Split – KGE, durante el período de calibración. La eficiencia mejora si se consideran las métricas KGE (0,62) y NSE (0,63). En tanto, el desempeño en Perquilauquén es parejo para las funciones mencionadas anteriormente (Split – KGE: 0,55, KGE: 0,48 y NSE: 0,58).

El modelo sobreestima la escorrentía restituida a régimen natural en ambas cuencas. La Figura 5. 3 muestra la escorrentía media anual simulada y en régimen natural.

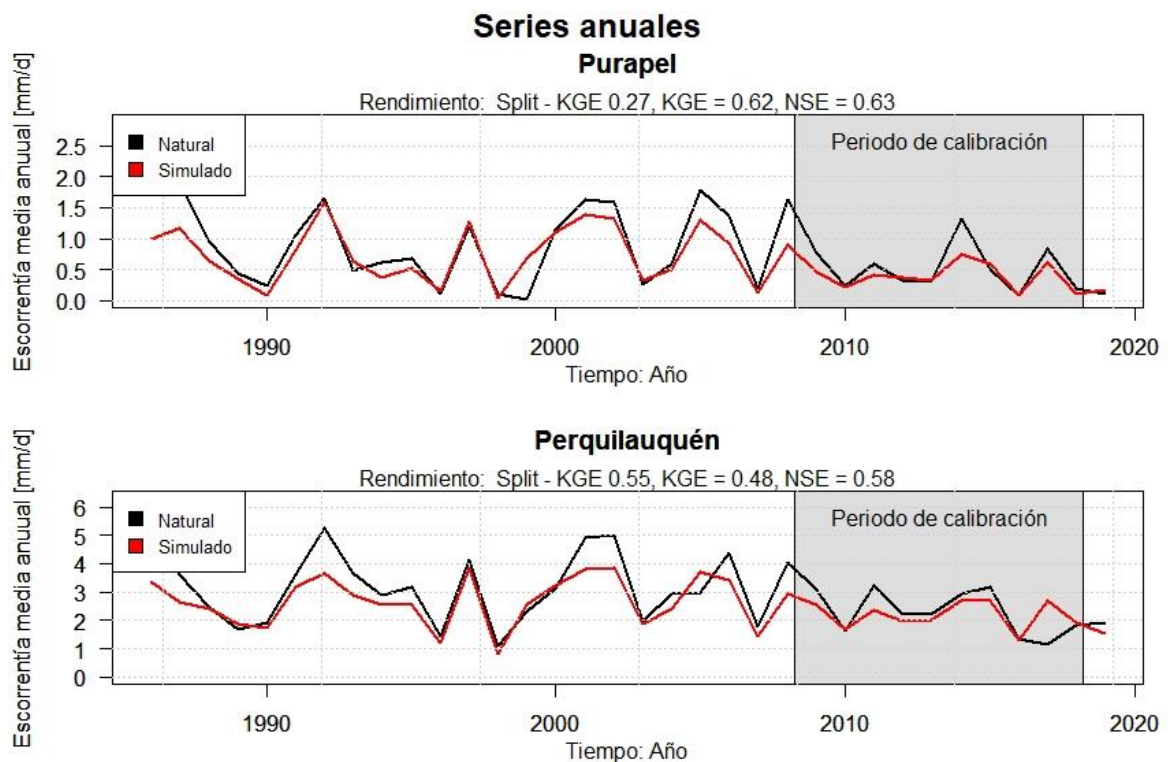


Figura 5. 3 Escorrentía media anual en régimen natural y simulada por el modelo VIC para las cuencas de Purapel y Perquilauquén

5.2.3. Regionalización

Los pixeles de modelación de la cuenca Huenchullami, heredan los parámetros calibrados de las cuencas Purapel y Perquilauquén según las características geológicas, vegetacionales y físicas de las celdas de modelación. La Figura 5. 6 ilustra la simulación de escorrentía.

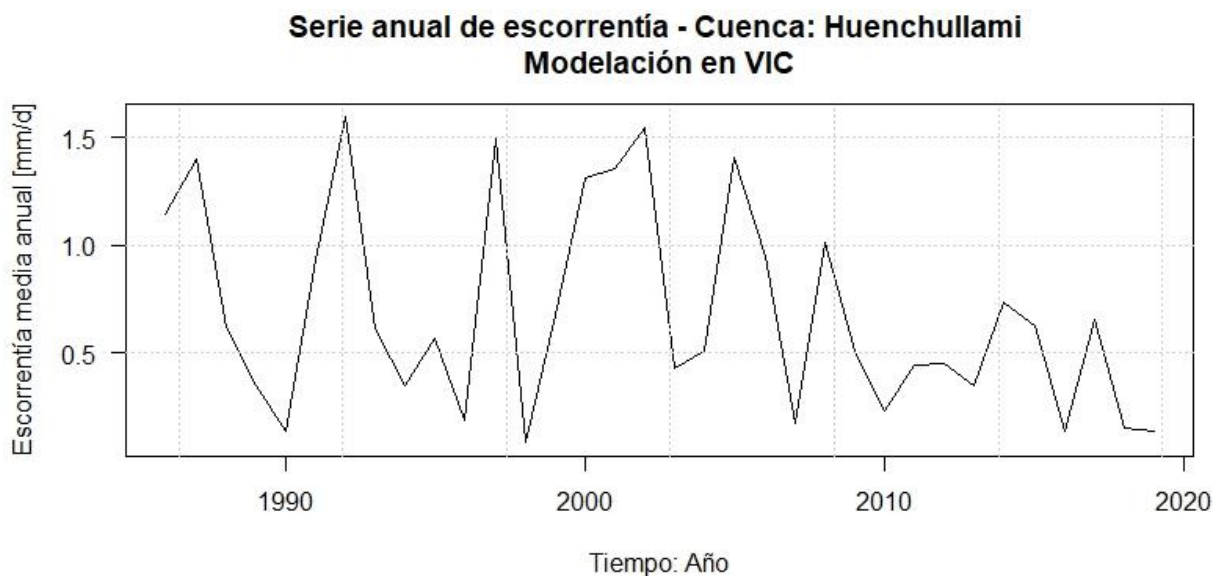


Figura 5. 4 Escorrentía simulada por el modelo VIC en la cuenca de Huenchullami.

5.2.4. Modelación de evapotranspiración

Las simulaciones de evapotranspiración con los parámetros calibrados se comparan con los resultados del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional, el modelo GLEAM y el producto satelital MOD16. Para esta sección se aplica la notación BHN para referirse a los resultados del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional.

Las simulaciones en VIC estimaron una media de la evapotranspiración anual para la cuenca de Huenchullami de 573 mm/año, Purapel de 584 mm/año y Perquilauquén de 396 mm/año. El producto satelital MOD16 presenta una evapotranspiración anual de 600 mm/año aproximadamente en las tres cuencas, respecto a los resultados del proyecto de la Actualización del Balance Hídrico Nacional muestran que la evapotranspiración está en un rango entre 150 mm/año a 200 mm/año. Finalmente, el modelo GLEAM presenta sesgo, sobreestimando la evapotranspiración a una magnitud de 1000 mm/año aproximadamente. En la Tabla 5. 5 muestra los estadísticos de la evapotranspiración modelada para las tres cuencas.

Tabla 5. 5 Estadísticos de la evapotranspiración anual modelada

Cuenca	Modelo	Promedio [mm/año]	Desviación estándar [mm/año]
Huenchullami	VIC	573,1	73,1
	BHN	173,7	41,6
	MOD16	610,8	28,9
	GLEAM	1023,5	61,3
Purapel	VIC	584,5	70,9
	BHN	154,1	38,7
	MOD16	555,8	47
	GLEAM	1034,3	56,5
Perquillauquén	VIC	396,5	45,1
	BHN	194,9	37,7
	MOD16	533,2	20,8
	GLEAM	1004,1	40,8

Nota: VIC hace referencia a la modelación de ET con los parámetros calibrados en el presente estudio.

En tanto la dispersión anual, las simulaciones de evapotranspiración anual del modelo VIC y los resultados de la Actualización del Balance Hídrico Nacional muestran una correlación (R^2) superior al 0,83 en todas las cuencas. A su vez, el producto satelital MOD16 y las simulaciones en el modelo VIC muestra una correlación (R^2) de 0,53 y 0,36 en las cuencas Huenchullami y Purapel, respectivamente, para la cuenca de Perquillauquén la correlación (R^2) aumenta a un 0,71.

Finalmente, el modelo GLEAM exhibe sesgos y no presenta correlación con las modelaciones del modelo VIC. En la Figura 5. 5, se muestra la dispersión anual de evapotranspiración de las simulaciones en el modelo VIC con la evapotranspiración de referencia (resultados de la Actualización del Balance Hídrico Nacional, producto satelital MOD16 y modelo GLEAM).

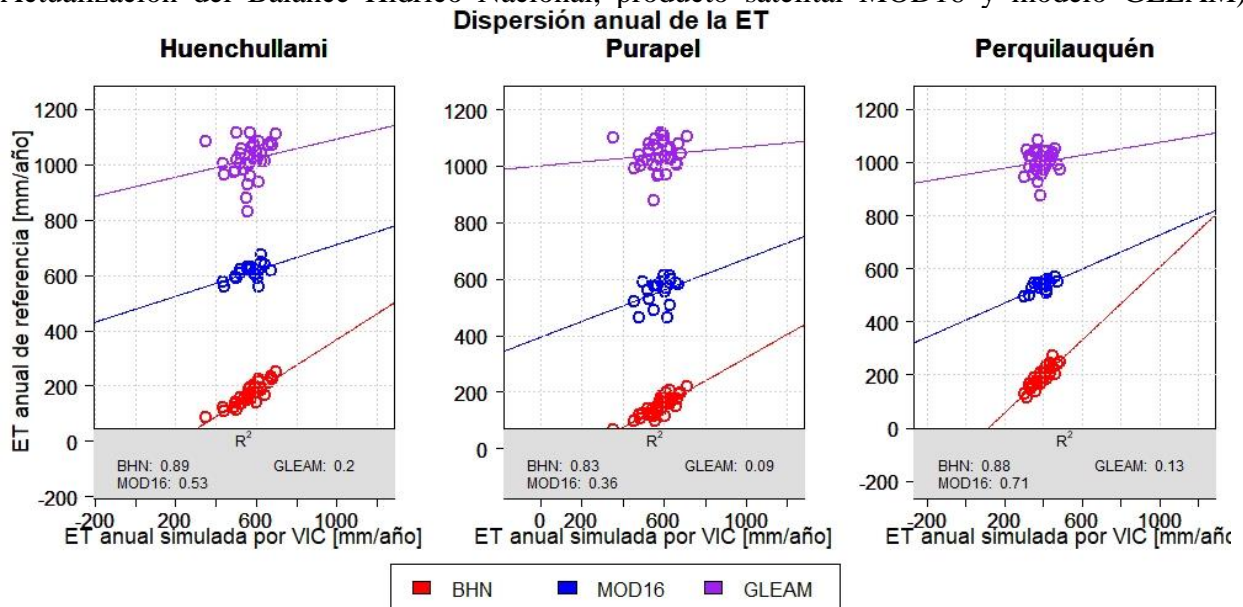


Figura 5. 5 Dispersión de la evapotranspiración entre las simulaciones en VIC y los productos de referencia (resultados de la Actualización del Balance Hídrico Nacional, producto satelital MOD16 y modelo GLEAM).

Para la estacionalidad (valores medios mensuales) de la evapotranspiración, las simulaciones en el modelo VIC mostraron que los meses que más evapotranspira corresponden a los primaverales seguidos por los meses invernal y la época que menos evapotranspira es la estival. A su vez, los resultados del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional estiman que la época invernal es la que más evapotranspira, debido a la disponibilidad de agua. Análogamente a las simulaciones en el modelo VIC, el producto satelital MOD16 muestra que la primavera es la estación que más evapotranspira y en los meses estivales disminuye la evapotranspiración. Finalmente, el modelo GLEAM muestra que la época que más evapotranspira son los meses de verano. La Figura 5. 6 se presenta la estacionalidad de la evapotranspiración para todas las cuencas.

Estacionalidad de ET

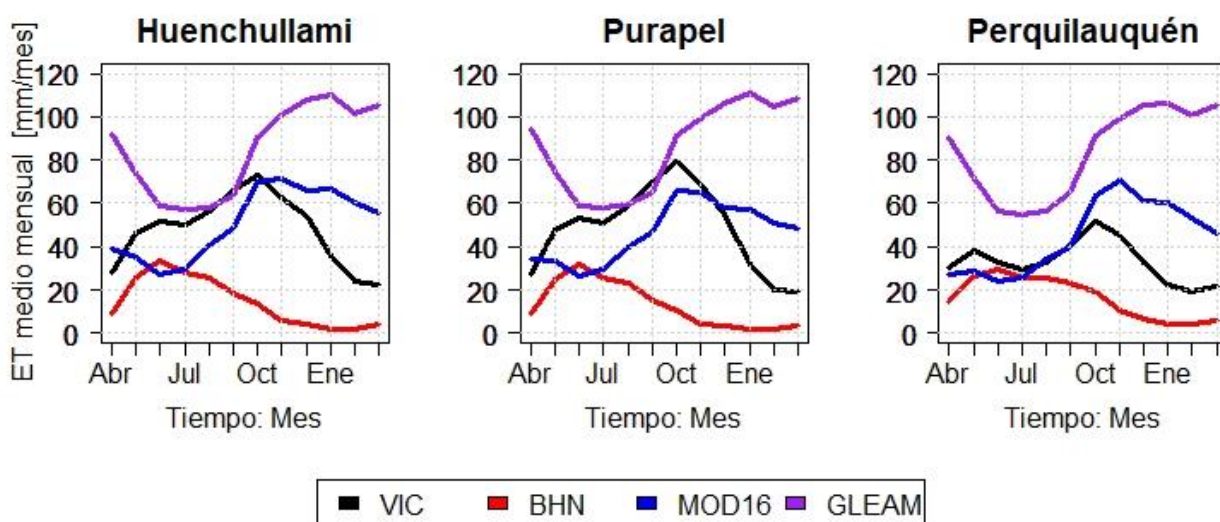


Figura 5. 6 Estacionalidad de la evapotranspiración.

5.3. Impacto hidrológico en las variaciones de la cobertura vegetal

La presente sección muestra los resultados en el impacto hidrológico bajo distintos escenarios de cobertura vegetal. En una primera instancia, se muestran las simulaciones hidrológicas con las coberturas vegetales estimadas por la detección remota para los años 1986, 1990, 2002, 2016 y 2021. Posteriormente se presentan las simulaciones en escenarios de aumento y disminución de la superficie de plantaciones forestales en condiciones meteorológicas históricas (para el periodo entre los años 1985 y 2020) y en proyecciones de cambio climático para el periodo entre los años 2030 y 2060.

Los resultados son presentados con una partición de la precipitación entre escorrentía y evapotranspiración y variaciones anuales de la escorrentía y evapotranspiración respecto a la simulación de referencia. En el anexo – E se muestran los mapas de vegetación por celda de modelación para los escenarios planteados en la metodología.

5.3.1. Simulaciones hidrológicas de coberturas vegetales históricas

Se simulan las coberturas vegetales estimadas para los años 1986, 1990, 2002, 2016 y 2021, las forzantes climáticas corresponden al producto CR2MET v.2.0 (Boiser et al., 2018: DGA, 2018) disgregadas en un paso temporal subdiario según el producto ERA-5 para el periodo histórico entre

los años 1985 y 2020. En las Tabla 5. 6, Tabla 5. 7 y Tabla 5. 8 se muestran la evolución temporal de la cobertura vegetal para las cuencas Huenchullami, Purapel y Perquilauquén respectivamente. Adicionalmente se agrega las proyecciones de la cobertura vegetal para el año 2030, las cuales corresponde a un escenario de simulación bajo proyecciones de cambio climático.

Para la cuenca Huenchullami, las plantaciones forestales y praderas y matorrales fluctúan en un 10% de la superficie de la cuenca, con una correlacionan negativamente entre ellas (con un coeficiente de correlación de Pearson de -0,8). Las proyecciones de la cobertura vegetal para el año 2030 indican una estabilización de las superficies de Plantaciones forestales y Praderas y Matorrales.

Tabla 5. 6 Evolución temporal de la cobertura vegetal en la cuenca de Huenchullami

Clase	Año 1987 [%]	Año 1990 [%]	Año 2002 [%]	Año 2016 [%]	Año 2021 [%]	Año 2030 [%]
Agrícola	4,9	7,4	4,8	3,5	4,7	3,5
Bosque caducifolio	0,9	0,5	1,6	5,8	3,9	6,1
Bosque esclerófilo	0,1	0	0,1	3,2	2,7	3,8
Plantaciones forestales	61,7	65,8	70,1	64,7	61,5	63,9
Praderas y Matorrales	32,4	26,0	23,4	22,8	27,2	22,9

A su vez, la cuenca de Purapel la superficie de Plantaciones forestales muestran un crecimiento sostenido en desmedro de las Praderas y Matorrales. De igual forma que en Huenchullami, las superficies de Plantaciones forestales y Praderas y Matorrales tienen una correlación negativa (con un coeficiente de correlación de Pearson de -0,83). Las proyecciones de la cobertura vegetal para el año 2030 plantean que prácticamente la totalidad de la cuenca será Plantaciones forestales.

Tabla 5. 7 Evolución temporal de la cobertura vegetal en la cuenca de Purapel

Clase	Año 1987 [%]	Año 1990 [%]	Año 2002 [%]	Año 2016 [%]	Año 2021 [%]	Año 2030 [%]
Agrícola	14,9	21,7	13,6	5,1	4,7	0,5
Bosque caducifolio	0,9	0,3	0,5	1,6	2,3	2,4
Bosque esclerófilo	0	0	0	0,8	1,3	1,4
Plantaciones forestales	56,6	56,4	71,2	78,7	80,6	89
Praderas y Matorrales	27,6	21,6	14,7	13,8	11,1	6,8

En cambio, la cobertura vegetal en la cuenca de Perquilauquén se ha mantenido estable en el tiempo.

Tabla 5. 8 Evolución temporal de la cobertura vegetal en la cuenca de Perquilauquén

Clase	Año 1987 [%]	Año 1990 [%]	Año 2002 [%]	Año 2016 [%]	Año 2021 [%]	Año 2030 [%]
Agrícola	10,3	14,3	18,4	11,9	10,3	11,8
Bosque caducifolio	24	24,7	24,2	24,2	25	24,7
Bosque esclerófilo	0	0	0	2,5	2,2	3
Cuerpos de agua	1,4	0,6	0,8	1,2	1	1
Plantaciones Forestal	26,3	25,7	28,9	28,9	27,9	29,5
Praderas y matorrales	35,8	32,9	25,7	28,1	30,5	26,4
Suelo desnudo	2,1	1,7	2	3,2	3,1	3,5

Para las simulaciones de las coberturas vegetales históricas, los resultados son presentados en un balance hídrico adimensional (partición de la precipitación entre la escorrentía y la evapotranspiración, ver Figura 5. 7), de esto se concluye que las simulaciones de las coberturas vegetales del año 1990 corresponden a las más áridas para las cuencas de Huenchullami y Purapel. En tanto las simulaciones de las coberturas vegetales de los años 1987 y 2021 corresponden a las más húmedas para las cuencas Purapel y Huenchullami, respectivamente, lo que coincide con la menor masa forestal de las coberturas. En el caso de las simulaciones de las coberturas vegetales históricas en la cuenca de Perquilauquén no muestran variaciones en el balance hídrico debido a la estabilidad histórica de la cobertura vegetal.

Partición de la precipitación

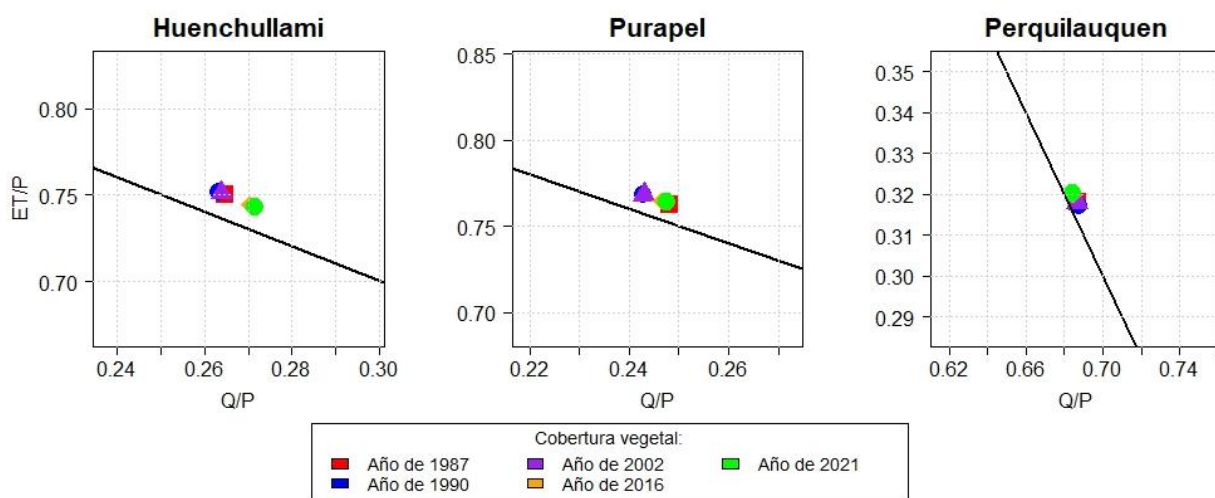


Figura 5. 7 Partición de la precipitación entre la escorrentía y evapotranspiración para las simulaciones de la cobertura vegetales históricas

5.3.2. Simulación hidrológica de escenarios en la variación de la cobertura vegetal para el periodo histórico entre los años 1985 y 2020.

La presente subsección muestra los resultados de las simulaciones de escenarios de variación de reducción y aumentos de la superficie forestal modificando cobertura vegetal de referencia que corresponde a la actualización del catastro vegetacional de CONAF para los años 2015 y 2016, la Tabla 5. 9 muestra la cobertura vegetal. Los escenarios simulados corresponden a:

- Disminución en un 100% de la superficie forestal (-100%).
- Disminución en un 50% de la superficie forestal (-50%)
- Disminución en un 10% de la superficie forestal (-10%)
- Aumento en un 10% de la superficie forestal (+10%)
- Aumento en un 50% de la superficie forestal (+50%)

Entre paréntesis, está la notación empleada para las Tabla 5. 10 y Figura 5. 8. Los criterios en la modificación de la cobertura vegetal y las forzantes climáticas empleadas se detallan en la sección de metodología.

Tabla 5. 9 Cobertura vegetal de las cuencas según CONAF (2015 y 2016).

	Huenchullami [%]	Purapel [%]	Perquillauquén [%]
Agrícola	4,6	6,4	28,2
Cuerpos de agua	0,2	0	1
Bosque nativo y mixto	18,1	12	28,2
Monocultivos forestales	62,3	67,8	24,6
Praderas y Matorrales	14,6	13,1	14,4
Suelo desnudo	0	0	2,8

Las simulaciones que reducen superficie de las plantaciones forestales muestran una respuesta más húmeda y consistentemente, los escenarios que aumentan la cobertura de los monocultivos forestales se vuelven más áridos respecto a la simulación de referencia (con la cobertura vegetal de la actualización del catastro vegetacional de CONAF para los años 2015 y 2016). En la Figura 5. 8 se muestra el balance hídrico adimensional (partición de la precipitación entre la escorrentía y la evapotranspiración) de los escenarios simulados y simulación de referencia.

Partición de la precipitación

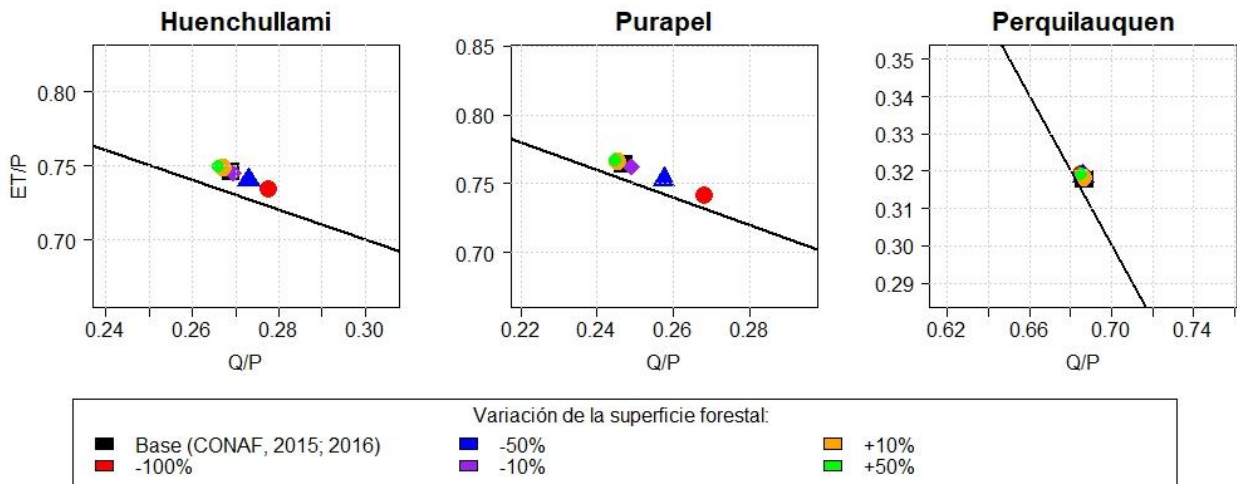


Figura 5. 8 Partición de la precipitación entre la escorrentía y evapotranspiración para escenarios de modificación de la cobertura vegetal para el periodo histórico entre los años 1985 y 2020.

Las cuencas de Huenchullami y Purapel muestran una mayor sensibilidad (cambio de la escorrentía y evapotranspiración anual frente a los escenarios propuestos) que la cuenca de Perquilauquén. Esto se debe a que los escenarios modifican sustantivamente las superficies vegetales de las cuencas de Huenchullami y Purapel, a causa de que la mayoría de la cobertura vegetal de estas cuencas corresponden a monocultivos forestales (ver Tabla 5. 9). En el caso de la cuenca de Perquilauquén muestra insensibilidad a los escenarios, esto se debe a que los escenarios propuestos no modifican significativamente la cobertura vegetal. En la Tabla 5. 10 presenta las variaciones anuales de escorrentía y evapotranspiración para los escenarios simulados en todas las cuencas.

Tabla 5. 10 Estimación de la variación anual de la escorrentía y evapotranspiración en escenarios de modificación de la cobertura vegetal para el periodo histórico entre los años 1985 y 2020.

Escenario de variación de la superficie forestal	Huenchullami		Purapel		Perquilauquén	
	$\Delta Q \%$	$\Delta ET \%$	$\Delta Q \%$	$\Delta ET \%$	$\Delta Q \%$	$\Delta ET \%$
-100%	3,7	-1,4	9,8	-3,1	-0,2	0,3
-50%	1,7	-0,7	4,9	-1,5	-0,1	0,2
-10%	0,2	-0,1	1	-0,3	0	0
+10%	-0,8	0,3	-0,7	0,2	0	0,2
+50%	-1,2	0,5	-1	0,3	-0,2	0,4

5.3.3. Simulación hidrológica de escenarios en la variación de la cobertura vegetal para las proyecciones de cambio climático para el periodo de los años entre 2030 y 2060

Los escenarios propuestos en esta sección consideran proyecciones de cambio climático estimadas a partir de los GCMs: CSIRO Mk3-6-0, 2. CCSM4, 3. MIROC-ESM y 4. IPSL-CM5A-LR. La presente subsección muestra los resultados de las simulaciones de escenarios de variación de reducción y aumentos de la superficie forestal modificando la cobertura vegetal de referencia correspondiente a la cobertura vegetal del año 2021 estimada por la detección remota. En la Tabla 5. 11 se muestra la cobertura vegetal de referencia para los escenarios.

Tabla 5. 11 Cobertura vegetal estimada por la detección remota para el año 2021 y proyectada para el año 2030.

Año	Huenchullami		Purapel		Perquillauquén	
	2021 [%]	2030 [%]	2021 [%]	2030 [%]	2021 [%]	2030 [%]
Agrícola	4,7	3,5	4,7	0,5	10,3	11,8
Bosque caducifolio	3,9	6,1	2,3	2,4	25	24,7
Bosque esclerófilo	2,7	3,8	1,3	1,4	2,2	3
Cuerpos de agua	0	0	0	0	1	1
Plantaciones Forestal	61,5	63,9	80,6	89	27,9	29,5
Praderas y matorrales	27,2	22,9	11,1	6,8	30,5	26,4
Suelo desnudo	0	0	0	0	3,1	3,5

Los escenarios aplican las modificaciones de la subsección anterior. De forma análoga a los resultados de la simulación de los escenarios para el periodo histórico entre los años 1985 y 2020, los escenarios de reducción de la superficie de las plantaciones forestales son más húmedo respecto a la simulación de referencia, del mismo modo en el caso de aumento de los monocultivos forestales corresponde a un escenario más árido respecto a la referencia. En la Figura 5. 9 se muestra el balance hídrico adimensional (partición de la precipitación entre la escorrentía y la evapotranspiración) de los escenarios simulados, simulación de referencia y simulación de la cobertura vegetal proyectada para el 2030.

Partición de la precipitación

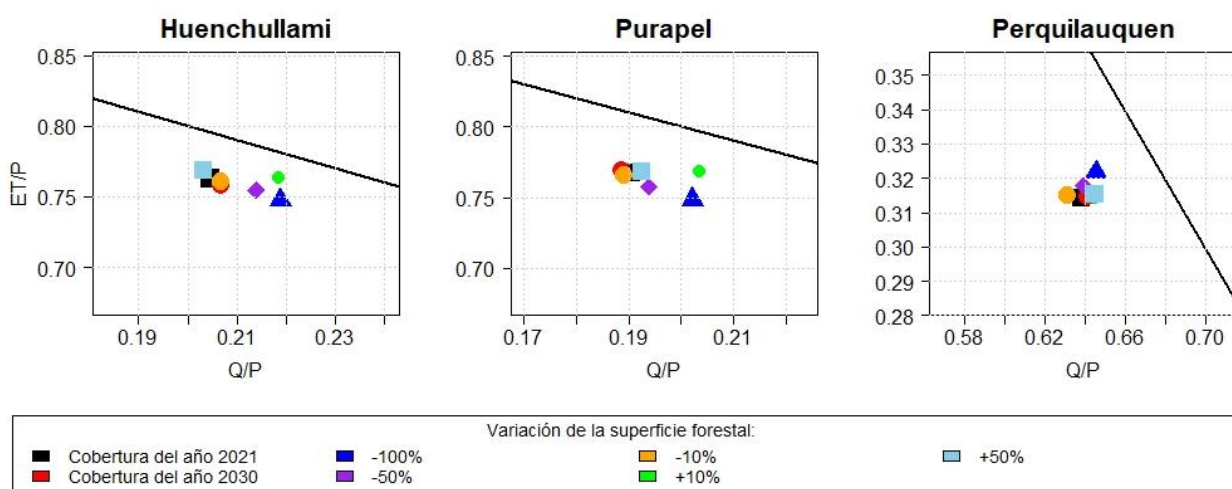


Figura 5. 9 Partición de la precipitación entre la escorrentía y evapotranspiración para escenarios de modificación de la cobertura vegetal bajo proyecciones de cambio climático para el periodo entre los años 2030 y 2060.

De igual forma a la subsección anterior, las cuencas de Huenchullami y Purapel presentan sensibilidad frente a los cambios de cobertura vegetal. Bajo las proyecciones de cambio climático

las variaciones de escorrentía y evapotranspiración se ven acrecentadas respecto a las simulaciones en el periodo histórico. En el caso de Perquilauquén la insensibilidad se mantiene. En la Tabla 5. 12 se presentan las variaciones anuales de escorrentía y evapotranspiración para los escenarios propuestos en todas las cuencas en proyecciones de cambio climático.

En caso de mantener las tendencias históricas de la cobertura vegetal para el año 2030 (y tomando como referencia la cobertura vegetal actual del año 2021), para la cuenca de Purapel la escorrentía disminuirá en un 2,1%, en Huenchullami aumentaría en un 2,8 y finalmente en Perquilauquén no habría cambios hidrológicos. En la Tabla 5. 11 se muestra las coberturas proyectadas para el año 2030 para las tres cuencas en estudio.

Tabla 5. 12 Estimación de la variación anual de la escorrentía y evapotranspiración en escenarios de modificación de la cobertura vegetal para las proyecciones de cambio climático para el periodo entre los años 2030 y 2060.

Escenario de variación de la superficie forestal	Huenschullami		Purapel		Perquilauquén	
	$\Delta Q \%$	$\Delta ET \%$	$\Delta Q \%$	$\Delta ET \%$	$\Delta Q \%$	$\Delta ET \%$
Cobertura vegetal del año 2030	2,8	-0,5	-2,1	0,3	-0,1	0,2
-100%	12,9	-3,3	22,9	-4,3	0	0,2
-50%	6,7	-1,7	11,4	-2,1	0	0,1
-10%	1,7	-0,4	2,3	-0,4	0	0
+10%	-0,8	0,2	-1,4	0,3	0	0,1
+50%	-4,6	1,2	-1,9	0,4	-0,4	0,7

6. Análisis de resultados

Esta sección analiza y discute los resultados del presente trabajo. En una primera instancia, se examina la detección remota tanto de los resultados como de la metodología, adicionalmente se compara el producto de uso de suelo de Zhao et al. (2016) con las coberturas vegetales estimadas para el año 2014. Posteriormente, se revisan los resultados de la modelación hidrológica, analizando en detalle los parámetros de vegetación empleados, se responde a la pregunta: ¿Qué parámetros se debe utilizar?, para luego profundizar en la modelación de la evapotranspiración. Finalmente, se discuten los resultados de los escenarios de cambio de la cobertura vegetal.

6.1. Análisis de resultado de la detección remota

El acierto (precisión general o *overall accuracy*) de los algoritmos utilizados en este trabajo es inferior a los productos de Echeverría et al. (2006) y Zhao et al. (2016). Esto radica en la rigurosa selección de las muestras de entrenamiento y validación de ambas investigaciones. Por otro lado, a las muestras extraídas del catastro vegetacional de CONAF de los años 2009, 2015 y 2016 se les aplican un único filtro.

Además, las muestras de entrenamiento corresponden a los píxeles ubicados en el centroide de los polígonos, bajo el supuesto que corresponde a la firma espectral característica de la clase. Si bien, esto permite ahorrar recursos computacionales, genera incertidumbre a los algoritmos, ya que existe la posibilidad que el píxel ubicado en el centroide del polígono esté fuera del dominio.

Aun así, los algoritmos mostraron respetar la espacialidad y temporalidad (esperada) en la cobertura vegetal de cada cuenca. Sumado a lo anterior, las Plantaciones forestales aumentan su superficie de forma sostenida, lo cual está documentada por Echeverría et al. (2006), Zhao et al. (2016), el Instituto Forestal (INFOR) y CONAF. Los Bosques caducifolios mantienen su espacialidad en las cuencas, lo cual es esperable. El anexo – B muestra los mapas generados por la clasificación supervisada para las imágenes analizadas.

Lo anterior, se justifica con las Tabla 5. 3 y Tabla 5. 4 que exponen la precisión específica de los algoritmos al detectar cada clase. Los algoritmos muestran una precisión del 70% aproximadamente en la detección de las Plantaciones forestales y Bosques caducifolios. Esto da robustez a la identificación y distinción de estos bosques, lo cual satisface el primer objetivo específico del trabajo: “Evaluar cambios en las superficies de plantaciones forestales en las cuencas”.

Respecto a las demás clases detectadas, las predicciones estiman una fuerte correlación negativa entre las Praderas y Matorrales con las Plantaciones forestales, con una correlación de Pearson de -0,8 para la cuenca de Huenchullami, -0,83 para Purapel y -0,17 para Perquilauquén. Por lo que se concluye que las plantaciones forestales sustituyen a las Praderas y Matorrales y viceversa.

La evolución temporal de la cobertura vegetal (ver Figura 5. 1) muestra un sostenido aumento de las superficies de plantaciones forestales para las cuencas de Purapel y Perquilauquén con una tasa de crecimiento de 310 y 240 hectáreas por año. En el caso de Huenchullami desde 1987 hasta el 2010 los monocultivos forestales aumentan en una tasa de 260 hectáreas, mientras que a partir del 2014 la superficie forestal se ha visto mermada en 800 hectáreas por año.

Finalizando este subcapítulo, los algoritmos de clasificación supervisada tienen el potencial de mejorar sus rendimientos con modificaciones a la metodología, como por ejemplo aplicar filtros más rigurosos en la selección de muestras, realizar una inspección visual previa de las muestras filtradas o que el píxel que entrega la firma espectral de entrenamiento este dentro del dominio de la cuenca, entre otras. Adicionalmente, se podrían diferenciar las clases Praderas de los Matorrales.

Por último, la Tabla 6. 1 muestra una comparación de la cobertura de suelo de Zhao et al. (2016) con las estimaciones de la cobertura vegetal de la detección remota para el año 2014 (año correspondiente al producto de Zhao et al. (2016)). Las estimaciones de la clasificación supervisada estiman una mayor masa forestal respecto al uso de suelo de Zhao et al. (2016), esto se debe al fenómeno “*overfitting*” a causa de que las muestras de entrenamiento están sesgadas con información forestal.

Tabla 6. 1 Comparación de la estimación de la cobertura vegetal según los algoritmos de mejor rendimiento y el producto de Zhao et al. (2016).

Clase	Huenchullami		Purapel		Perquillauquén	
	Propio [%]	Zhao [%]	Propio [%]	Zhao [%]	Propio [%]	Zhao [%]
Agrícola	2,13	3,37	5,3	0,99	12,42	17,74
Cuerpos de agua	0	0	0	0	0,92	0,5
Bosque nativo	6,94	11,56	2,48	7,74	27,21	22,9
Monocultivos forestales	71,86	54,90	78,46	50,33	27,46	15,62
Praderas y matorrales	19,06	30,12	13,75	40,8	28,74	42,15
Suelo desnudo	0	0,01	0	0,02	3,24	0,91

6.2. Análisis de la modelación hidrológica

Esta subsección discute sobre los parámetros vegetacionales encontrados en la literatura y los analiza respecto a las ecuaciones del modelo que simulan la evapotranspiración. Posteriormente se comparan las metodologías del presente estudio y las del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional respondiendo la pregunta: ¿Qué parámetros se deben utilizar? Finalmente, se analiza la evapotranspiración simulada en el modelo VIC, los resultados de la Actualización del Balance Hídrico Nacional, el producto satelital MOD16 y el modelo GLEAM discutiendo si la metodología de Dembélé et al. (2020) es aplicable para futuros trabajos.

6.2.1. Análisis de los parámetros vegetacionales

El modelo VIC representa el ciclo hidrológico con ecuaciones de base física, que exigen parámetros de los cuales manejamos escasa o nula información, en particular para la flora nativa del país. En consecuencia, se homologan parámetros de vegetación de bosques extranjeros a nativos según las semejanzas fisonómicas.

Si bien, la mayoría de los parámetros de vegetación no presentan sensibilidad en DELSA, la resistencia estomática mínima (r_{min}) es altamente sensible, lo que dificulta la correcta representación de los bosques nativos. De igual forma, el índice LAI muestra sensibilidad. Sin

embargo, éste se obtuvo a partir de imágenes satelitales, lo que reduce la incertidumbre en la estimación.

Si bien, el análisis de sensibilidad ayuda a interpretar el comportamiento del modelo, analizar las ecuaciones permite identificar las características fisionómicas de la vegetación (representados por parámetros) que inciden en la modelación hidrológica. De las ecuaciones que utiliza el modelo VIC se deduce que la evapotranspiración es inversamente proporcional a los parámetros de resistencia arquitectónica (r_{acr}) y resistencia estomática mínima (r_{min}), en tanto los parámetros de profundidad y densidad de las raíces son directamente proporcionales.

Analizando detalladamente el comportamiento de los sistemas de raíces, una mayor profundidad de las raíces permite que la vegetación absorba y posteriormente transpire el agua de las capas profundas del modelo. Esto ocurre siempre y cuando exista estrés hídrico en las capas superficiales. En caso de no existir estrés hídrico la vegetación solo transpira el agua correspondiente a la capa superficial, sin alterar los flujos subsuperficiales. En el Anexo – A ilustra las ecuaciones del modelo VIC asociadas a los procesos de evapotranspiración.

Con lo anterior y observando que las raíces de las plantaciones forestales son las más profundas de las clases vegetales (ver Tabla 4. 4), se concluye que en los escenarios de estrés hídrico las plantaciones forestales impactan de mayor medida los flujos subsuperficiales, lo que eventualmente repercute a la escorrentía simulada.

6.2.2. ¿Qué parámetros se deben utilizar?

En ambas cuencas, el algoritmo de calibración SCE-UA no logró la convergencia debido a que se superó el tiempo límite de cálculo en el intento de calibración, en consecuencia, el modelo tiene el potencial de mejorar el rendimiento.

Lo anterior, obliga a revisar y comparar el desempeño de los parámetros seleccionados en este trabajo y los del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional. La Tabla 6. 2 muestra el rendimiento de ambos estudios. En Purapel los parámetros propuestos en este estudio tiene un desempeño superior al proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional, mientras que en Perquilauquén el comportamiento es opuesto.

Tabla 6. 2 Rendimiento de los distintos sets de parámetros para el periodo entre los años 1985 y 2020.

Métricas	Purapel		Perquilauquén	
	VIC	BHN	VIC	BHN
Split – KGE	0,27	-4,96	0,55	0,65
KGE	0,62	-0,35	0,48	0,78
NSE	0,63	0,19	0,58	0,75

Lo anterior abre la pregunta ¿Qué parámetros óptimos se deben utilizar? Esta investigación utilizó los rangos de parámetros recopilados por Sepúlveda (2021), los cuales son distintos a los empleados en el BHN. La Tabla 6. 3 muestra las diferencias en el rango de parámetros considerados en el proceso de calibración.

Tabla 6. 3 Rangos de parámetros empleados en el presente trabajo y en el proyecto de actualización del balance hídrico nacional

Parámetro	Sepúlveda (2021)		BHN	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
b	0,001	0,4	0	1
Dsmax	1	50	0	∞
Expt	5	30	3	∞
h ₁	0,01	0,5	0,01	h ₂
h ₂	h ₁ + 0,5	h ₁ + 4	h ₁	∞
h ₃	0,1	4	h ₂	∞
Ksat	1	10000	0	∞

Los parámetros del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional para la cuenca Perquilauquén: Dsmax, Expt, h₂ y h₃, están fuera de los rangos informados por Sepúlveda (2021), por lo tanto, la comparación directa no es correcta.

Las simulaciones de evapotranspiración del presente estudio muestran una estacionalidad similar a producto satelital MOD16 y modelo GLEAM, este comportamiento es esperable para la evapotranspiración. En cambio, los resultados del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional presentan una evapotranspiración inusual, donde los meses de invierno es donde ocurre la evapotranspiración a causa de la disponibilidad de agua.

Con los antecedentes mostrados, la respuesta de la pregunta ¿Qué parámetros utilizar? es que se deben utilizar los parámetros del presente estudio

6.2.3. Análisis de la modelación de la evapotranspiración

Las simulaciones de evapotranspiración en el modelo VIC como las del producto MOD16 tienen un comportamiento anual y estacional esperado, dado que los meses de primavera se concentra la evapotranspiración debido al aumento de las temperaturas y la disponibilidad hídrica. En tanto el modelo GLEAM presenta sesgos en sus productos.

Respecto a los resultados de evapotranspiración del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional, son inusuales en estacionalidad (ver Figura 5. 6) y muestran una subestimación de la evapotranspiración anual (ver Figura 5. 5). Esto se debe a que el proyecto incorpora la intervención del riego posterior a la modelación hidrológica y los resultados presentados corresponden a la salida del modelo VIC. Aun así, para las cuencas de Huenchullami y Purapel, la agricultura abarca menos del 5% de la superficie de la cuenca según el producto de Zhao et al (2016) (ver Tabla 6. 1), por lo que la evapotranspiración no debería cambiar significativamente.

La simulación de evapotranspiración en el modelo VIC muestra una gran similitud al producto satelital MOD16 tanto en la estacionalidad (ver Figura 5. 6) como la correlación anual (ver Figura 5. 5), esto viene a respaldar el proceso de calibración y abre la posibilidad de incorporar este producto en futuras investigaciones, las cuales pueden complementar la calibración hidrológica basándose en las propuestas metodológicas del estudio de Dembélé et al. (2020).

6.3. Análisis del impacto hidrológico de los Escenarios de cambios de cobertura vegetal

En esta subsección se analizan en una primera instancia las simulaciones para las coberturas vegetales históricas, posteriormente se analizan las simulaciones de los escenarios de aumento y disminución de la cobertura vegetal para el periodo entre los años 1985 y 2020. Finalmente, se discuten estos mismos escenarios en proyecciones del cambio climático.

Las coberturas vegetales históricas que presentan menos superficie de plantaciones forestales en las cuencas de Huenchullami y Purapel corresponden a los años de 2021 y 1987, coinciden con las simulaciones más húmedas respecto al resto de simulaciones. En cambio, para la cuenca de Perquilauquén todas sus simulaciones no muestran variaciones en el balance hídrico adimensional (ver Figura 5. 7) debido a que la cobertura vegetal es estable en el tiempo.

Para las simulaciones de los escenarios hipotéticos de aumento y reducción de la superficie forestal para el periodo histórico entre los años 1985 y 2020, las variaciones anuales de escorrentía tienen el mismo comportamiento y magnitudes que los resultados de las investigaciones de Álvarez-Garretón et al. (2019) y Stehr et al. (2010). Respecto a las simulaciones en el modelo VIC, a medida que aumenta la superficie de plantaciones forestales disminuye la escorrentía y aumenta la evapotranspiración, mientras que, al disminuir los monocultivos, sucede lo opuesto. Esto se debe a que las plantaciones forestales tienen una mayor profundidad de raíces respecto a las otras clases de vegetación y, por lo tanto, acceso al agua de las capas profundas.

En tanto las simulaciones de los escenarios bajo proyecciones de cambio climático mantienen la misma tendencia que los escenarios en el periodo histórico, en este caso, las variaciones de escorrentía y evapotranspiración se agudizan. A consecuencia de un aumento del estrés hídrico, (por las proyecciones de alza en las temperaturas y disminución de las precipitaciones) y como se comentó con anterioridad en el capítulo 6.2.1, en caso de estrés hídrico las raíces de la vegetación absorben y transpiran el agua de las capas profundas del modelo. En específico, por la profundidad de las raíces, lo cual repercute en los flujos simulados.

Por lo anterior, se concluye que las zonas áridas susceptible al estrés hídrico, son más vulnerables a un impacto de las plantaciones forestales que las zonas húmedas. Por lo que sería interesante investigar el efecto de las plantaciones forestales entre zonas áridas y húmedas de forma comparativa.

Finalmente, se debe mencionar la insensibilidad (sin variación de la escorrentía y evapotranspiración) de la cuenca de Perquilauquén a los distintos escenarios de cambio en la cobertura vegetal, esto se explica porque los escenarios propuestos no modifican sustantivamente la cobertura vegetal. En cambio, para las cuencas de Huenchullami y Purapel, donde la mayoría de su superficie corresponde a plantaciones forestales, los escenarios modifican sustancialmente la cobertura vegetal generando una mayor sensibilidad.

7. Conclusiones

En la detección remota se determina un aumento sostenido en la superficie forestal en las cuencas de Purapel y Perquilauquén. En el caso de la cuenca de Huenchullami, se observa un alza para el periodo 1987 – 2010 para posteriormente decrecer. Los algoritmos de la detección remota experimentaron el fenómeno “*overfitting*” originado por el sesgo de las muestras de entrenamiento, si bien, se logra identificar satisfactoriamente las plantaciones forestales y bosques caducifolio, muestra una insuficiencia en detectar otras clases de vegetación.

Por lo tanto, los métodos clasificación supervisada tienen el potencial de mejorar con simples modificaciones a la metodología, empezando a seleccionar la muestra de forma rigurosa, con una posterior inspección visual y separar la clase Praderas y Matorrales, entre otras.

Respecto a la modelación hidrológica, el algoritmo de calibración SCE-UA no convergió, por lo tanto, existe el potencial de mejorar la representación hidrológica del presente trabajo, potencial que se puede llegar con una mejor capacidad computacional. Además, al comprar la evapotranspiración de las simulaciones en VIC con el producto satelital MOD16, se aprecia una gran similitud y abre la puerta para incluir este producto en futuros estudios e incluso como un complemento al momento de calibrar.

Los escenarios simulados para el periodo histórico entre los años 1985 y 2020 muestran que, al aumentar la superficie de las plantaciones forestales, la escorrentía disminuye y evapotranspiración aumenta. Por otro lado, los escenarios de disminución de los monocultivos forestales, sucede el efecto contrario. Esto se debe a la profundidad de las raíces de estos bosques.

En tanto las simulaciones de los escenarios bajo proyecciones de cambio climático (periodo 2030 – 2060) mantienen la misma tendencia que los escenarios en el periodo histórico, en este caso, las variaciones de escorrentía y evapotranspiración se agudizan, a consecuencia de un aumento del estrés hídrico.

Finalmente, se concluye que las zonas áridas susceptible al estrés hídrico, son más vulnerables a un impacto de las plantaciones forestales que las zonas húmedas. De todas formas, la magnitud del impacto hidrológico de las plantaciones forestales depende de las características propias de la cuenca como el clima, cobertura vegetal, entre otros.

Bibliografía

- Álvarez-Garretón C., Lara A., Boiser J., & Galleguillos M. (2019). The impacts of native forests and forest plantations on water supply in Chile. *Forest*, 10,473.
- Arnold J. G., Moriasi D. N., Gassman P. W., Abbaspour K. C., White M. J., Srinivasan R., Santhi C., Harmel R.D., van Griensven A., Van Liew M. W., Kannan N. & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Boisier J. P., Alvarez-Garretón C., Cepeda J., Osses A., Vásquez N. & Rondanelli R. (2018, April). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 19739).
- Breiman L., (2001). Random Forests, *Machine Learning* 45, pp. 5-32.
- Centro AGRIMED, Facultad de Ciencias Agronómicas. 2017. Atlas Agroclimático de Chile. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y del Maule. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Chavez P.S. (1989). Extracting Spectral Contrast in Landsat Thematic Mapper Image Data Using Selective Principal Component Analysis. *Photogrammetric engineering & remote sensing*. Vol. 55, No. 3, pp. 339-348.
- CONAF. (2021). Catastro de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile al año 2020. Departamento de Monitoreo de Ecosistemas Forestales. 76 p.
- CONAF, Departamento de monitoreo de Ecosistema Forestales, Santiago, Chile. (2018). Monitoreo de cambios, corrección cartográfica y actualización del catastro de los recursos vegetacionales nativos de la región del Maule. Resumen ejecutivo 50 p. Santiago, Chile.
- CONAMA. (2008). Biodiversidad de Chile, Patrimonio y Desafíos, Ocho Libros Editores (Santiago de Chile), 640 pp.
- Decreto 259. (1998). Diario Oficial de la República de Chile. Santiago, Chile.
- Decreto de ley 701. (1974). Diario Oficial de la República de Chile. Santiago, Chile.
- Dembélé M., Ceperley N., Zwart S. j., Salvadore E., Mariethoz G & Schaepli B. (2020). Potential of satellite and reanalysis evaporation datasets for hydrological modelling under various model calibration strategies. *Advances in water resources*. 143 (2020) 103667.
- 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. (2018). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro. SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas,

Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.
Realizado por: Fundación para la transferencia tecnológica Pontificia Universidad Católica de Chile.

- DGA. (2019). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas sur y parte norte de la macrozona austral, SIT N° 441. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- DGA. (2019). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de la parte sur de la macrozona austral e isla de Pascua, SIT N° 444. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Díaz A., Balbontín C., González I., Sanchez I. (2010). Procesamiento de imágenes de satélite: Obtención de magnitudes biofísicas de la vegetación. Curso de especialista en SIG y teledetección. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla La Mancha. Albacete, España. Sección 4.4, Página 15.
- Dickinson R. E. (1984). Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models. *Climate processes and climate sensitivity*, 29, 58-72.
- Donoso C. (1982). Reseña ecológica de los bosques mediterráneos de Chile. *Bosque* (4) 2: 117 - 146.
- Duan Q.Y., Gupta V.K., Sorooshian S. (1993). Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization. *J. Optimization Theory Appl.* 76, 501–521.
- Echeverría C., Coomes D., Salas J., Rey-Benayas J., Lara A. & Newton A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forest. *Biological conservation* 130. 481-494.
- Falvey M., & Garreaud R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D4).
- Fowler K. M., Peel A., Western and L. Zhang. (2018): Improved Rainfall-Runoff Calibration for Drying Climate: Choice of Objective Function. *Water Resour. Res.*, 54, 3392–3408
- Galleguillos M., Gimeno F., Puelma C., Zambrano-Bigiarini M., Lara A., & Rojas M. (2021). Disentangling the effect of future land use strategies and climate change on streamflow in a Mediterranean catchment dominated by tree plantations. *Journal of Hydrology*, 595, 126047.
- Gayoso J. & Iroume A. (1995). Impacto del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico. *BOSQUE*. Volumen 16 N° 2, 3-12.

- García, N. & C. Ormazabal. (2008). Arboles Nativos de Chile. Enersis S.A. Santiago, Chile. 196 p.
- Garreaud R. (2011). Cambio climático: Bases físicas e impactos en Chile. Revista Tierra adentro-INIA. N°93
- González M. J. (2020). Adaptación frente al cambio climático en la cuenca del río Rapel: análisis del cambio de uso de suelo en la disponibilidad hídrica. Memoria para optar al título de ingeniera Civil. Universidad de Chile. Repositorio académico de la universidad de Chile.
- Gysling A., Álvarez V., Soto D., Pardo E., Poblete P. & González C. (2019). Anuario forestal 2019, Boletín estadístico N°168.
- Hastie T., Tibshirani R., & Friedman J. (2009). The Elements of Statistical Learning [electronic resource]: Data Mining, Inference, and Prediction, Second Edition (2nd ed. 2009.). Springer New York.
- Hengl T. (2018). Soil bulk density (fine earth) 10 x kg / m-cubic at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution (v0.2) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2525665>
- Hrachowitz M. & Clark M. (2017). HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. Hydrology and earth system sciences. 21, 3953-3973.
- Hoffmann A. & Kummerow J. (1978). Root studies in the Chilean Matorral. Oecologia (Berl.) 32, 57.69.
- Huber A., Iroumé A. & Bathurst J. (2007). Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. Hydrological processes. 22, 142-148.
- Huber A. & Trecaman. (2000). Efecto de una plantación de *Pinus radiata* en la distribución espacial del contenido de agua del suelo. BOSQUE 21(1): 37-44.
- IPCC, 2012; Glossary of terms. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B.m V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. March, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M.Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 555-564
- IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.
- Jones J., Almeida A., Cisneros F., Iroumé A., Jobbágy, E., Lara A., Lima W., Little C., Llerena C., Silveira L. & Villegas, J. C. (2017). Forests and water in South America. Hydrological Processes, 31(5), 972-980.

- Landsat NASA. (2022, 16 febrero). Landsat Science. Landsat Science | A Joint NASA/USGS Earth Observation Program. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Lara A., Little C., Urrutia R., McPhee J., Álvarez-Garretón C., Oyarzún C., Soto D., Donoso P., Nahuelhual L., Pino M. & 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, 415-424.
- Ley 19651. (1998). Diario Oficial de la República de Chile. Santiago, Chile.
- Ley 20283. (2008). Diario Oficial de la República de Chile. Santiago, Chile.
- Ley 20488. (2011). Diario Oficial de la República de Chile. Santiago, Chile.
- Li P., Jiang L. & Feng Z. (2013). Cross-comparison of vegetation indices derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors. *Remote sensing*. 2014, 6, 310-329.
- Liang X., Lettenmaier D.P., Wood E.F. & Burges, S.J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, vol. 99(D7). 14415-14428.
- 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, 162-170.
- MMA. (2015). Plan nacional de adaptación al cambio climático [Equipo de elaboración del documento, Jadrijevic M., Santis G., Muck K-P. & Farías F.]. Santiago, Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2014). Quinto Informe Nacional de Biodiversidad de Chile ante el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CBD). Ministerio del Medio Ambiente. Santiago, Chile, 140 pp.
- Moreno-Chacón M. & Lusk C.H. (2004). Vertical distribution of fine root biomass of emergent *Nothofagus dombeyi* and its canopy associates in a Chilean temperate rainforest. *Forest Ecology and Management* 199 (2004) 177 – 181.
- Nitze I., Schulthess U. & Asche H. (2012). Comparison of machine learning algorithms random forest, artificial neural network and support vector machine to maximum likelihood for supervised crop type classification. *Proceedings of the 4th GEOBIA*, may 7-9, 2012 – Rui de Janeiro – Brazil. p. 035
- Pelletier, J.D., P.D. Broxton, P. Hazenberg, X. Zeng, P.A. Troch, G. Niu, Z.C. Williams, M.A. Brunke, and D. Gochis. 2016. Global 1-km Gridded Thickness of Soil, Regolith, and Sedimentary Deposit Layers. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1304>

- Qiao H., Wu M., Shakir M., Wang L., Kang J. & Niu Z. (2016). Classification of small-scale eucalyptus plantations based on NDVI time series obtained from multiple high-resolution Datasets. *Remote sensing*. 8, 117.
- Reyes R., Gerding V. & Donoso C. (2007). Crecimiento de una plantación de *Nothofagus nervosa* durante 20 años en Valdivia. *BOSQUE* 28(2): 129-138.
- Richards, A. J. (2013). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. (5th edition, Springer).
- Rogan J. & Chen D. (2003). Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. Elsevier. *Progress in Planning* 61 (2004) 301 – 325.
- Santibáñez F. (2018). El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. Oficina de estudios y políticas agrarias (ODEPA). Reflexiones y desafíos al 2030: Perspectiva de especialistas externos. Segunda edición, 147-178
- Samaniego L., R. Kumar, S. Attinger. (2010): Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resour. Res.*, 46,W05523,. WRR Editors' Choice Award 2010
- Sepúlveda U. (2021). Análisis de sensibilidad de parámetros del modelo VIC a través del gradiente hidroclimático de Chile. Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería. Mención recursos y medio ambiente hídrico. Universidad de Chile. Repositorio académico de la universidad de Chile.
- Stehr A., Aguayo M., Link O., Parra O., Romero F. & Alcayaga H. (2010). Modelling the hydrologic response of a mesoscale Andean watershed to changes in land use patterns for environmental planning. *Hydrology and Earth System Sciences*. 14, 1963-1977.
- Sudmeyer R.A., Speijers J. & Nicholas B.D. (2004). Root distribution of *Pinus pinaster*, *P. radiata*, *Eucalyptus globulus* and *E.Kochii* and associated soil chemistry in agricultural land adjacent to the lines. *Tree Physiology* 24, 1333-1346.
- Teguim, Herve. (2017). Prediction of Student Performance Using Machine Learning Algorithms. Master thesis. Mathematischen Institut der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakult. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
- Thanh Noi, & Kappas, M. (2017). Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18(1), 18–.
- Vaze J., Perraud J.-M., Teng J., Chiew F. & Wang B. (2011). Estimating regional model parameters using spatial land cover information – implications for predictions in ungauged basins. 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 12-16 December 2011.
- Watson A. & O'Loughlin C. (1989). Structural root morphology and biomass of three age-classes of *pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* 20(1):97 – 110.

- Yilmaz K.K., Gupta H. V, Wagener T. (2008). A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resour. Res.* 44, 1–18.
- Xie Y., Sha Z. & Yu M. (2008). Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of plant ecology*. Volume 1, numero 1, pages 9-23.
- Xie Z. & Yuan F. (2006). A parameter estimation scheme of the land surface model VIC using the MOPEX databases. *Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization: Results of the Model Parameter Experiment-MOPEX*. IAHS Publ. 307.
- Xie Z., Yuan F., Duan Q., Zheng J., Liang M. & Chen F. (2007). Regional parameter estimation of the VIC land surface model: Methodology and application to river basins in China. *Journal of Hydrometeorology*, 8(3), 447–468.
- Zhao Y., Feng D., Yu L., Wang X., Chen Y., Bai Y., Hernández H.J., Galleguillos M., Estades C., Biging G.S., Radke J.D. & Gong P. (2016). Detailed Dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote sensing of environment*. 183, 170-185.

ANEXOS

ANEXO A – Ecuaciones de evapotranspiración del modelo VIC

El presente anexo muestra las ecuaciones del proceso de evapotranspiración del modelo VIC. Las ecuaciones provienen de la publicación de Liang et al. (1994) y de los anexos del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017).

La evapotranspiración del modelo es la suma de los siguientes procesos:

1. Evaporación desde el follaje de vegetación.
2. Transpiración de la vegetación.
3. Evaporación del suelo desnudo.

Este anexo detalla las ecuaciones empleadas por VIC para obtener estas variables.

ANEXO A.1 – Evaporación desde el follaje de vegetación

VIC estima la evaporación desde el follaje según la siguiente expresión

$$E_c[n] = f [n] \cdot E_c^*[n] \quad (\text{A.1.1})$$

Donde

$E_c[n]$ es la evaporación desde el follaje de la clase vegetal n

$f [n]$ es la fracción de tiempo requerido para que la evaporación desde el follaje consuma toda el agua interceptada.

$E_c^*[n]$ es la máxima evaporación de agua interceptada en el follaje

La definición de $E_c^*[n]$ y $f [n]$ se presentan en las ecuaciones A.1.2 y A.1.3

$$E_c^*[n] = \left(\frac{W_i[n]}{W_{im}[n]}\right)^{2/3} \cdot E_p[n] \cdot \frac{r_w[n]}{r_w[n] + r_o[n]} \quad (\text{A.1.2})$$

Donde:

$W_i[n]$ es la cantidad de agua interceptada por la clase vegetal n en un tiempo dt

$W_{im}[n]$ es la máxima cantidad de agua que puede ser interceptada por la clase vegetal. definida en la ecuación A.1.5

$E_p[n]$ es la evaporación potencial según la relación de Penman-Monteith.

$r_o[n]$ es la resistencia debido a la variación del gradiente de humedad específica entre las hojas y el aire sobre el follaje. Parámetros de entrada del modelo.

$r_w[n]$ es la resistencia aerodinámica producto de la transferencia de agua.

$$f [n] = \min\left(1, \frac{W_i[n] + P \cdot \Delta t}{E_c^*[n] \cdot \Delta t}\right) \quad (\text{A.1.3})$$

Donde P es la precipitación. Para obtener $W_i[n]$ se requiere realizar un balance de masa en la superficie del follaje expuesto en la ecuación A.1.4

$$\frac{dW_i[n]}{dt} = P - E_c[n] - P_t[n] \quad (\text{A.1.4})$$

Para $0 \leq W_i[n] \leq W_i[n]$

$P_t[n]$ es el exceso de precipitación cuando se excede $W_{im}[n]$ el cual está definido por la siguiente expresión.

$$W_{im}[n] = K_l \cdot LAI [n, m] \quad (\text{A.1.5})$$

K_l es una constante que toma el valor de 0,2 mm y LAI [n,m] es el índice de área foliar para la clase n y del mes m. Este es un parámetro de entrada del modelo.

La resistencia aerodinámica producto de la transferencia de agua $r_w[n]$ se estima:

$$r_w[n] = \frac{1}{C_w[n] \cdot u(z)} \quad (\text{A.1.6})$$

$u(z)$ es la velocidad del viento a una altura z, $C_w[n]$ es el coeficiente de transferencia de agua para la cobertura vegetal n, el cual esta dictado por las expresiones:

$$C_w[n] = 1,351 \cdot a^2[n] \cdot F_w[n] \quad (\text{A.1.6})$$

$$a^2[n] = \frac{K^2}{[\ln(\frac{z - d_0[n]}{z_0[n]})]^2} \quad (\text{A.1.7})$$

Donde

a es el coeficiente de arrastre.

K es la constante de von Karman que toma el valor 0,4.

$d_0[n]$ es la altura de desplazamiento plano para la cobertura n. Parámetro de entrada del modelo

$z_0[n]$ es la rugosidad. Parámetro de entrada del modelo.

$F_w[n]$ función definida en la ecuación A.1.8

$$F_w[n] = 1 - \frac{9,4 \cdot Ri_b[n]}{1 + c \cdot |Ri_b[n]|^{1/2}} \quad \text{Para } Ri_b[n] < 0 \quad (A.1.8)$$

$$F_w[n] = \frac{9,4 \cdot Ri_b[n]}{(1 + 4,7 \cdot Ri_b[n])^2} \quad \text{Para } 0 \leq Ri_b[n] \leq 0,2$$

Donde $Ri_b[n]$ es el número de Richardson, c se define por:

$$c = 49,82 \cdot a^2[n] \cdot \left(\frac{z_2[n] - d_0[n]}{z_0[n]} \right)^{1/2} \quad (A.1.9)$$

ANEXO A.2 – Transpiración de la vegetación.

La transpiración de la vegetación se estima según la siguiente expresión

$$E_t[n] = \left[1 - \left(\frac{W_i[n]}{W_{im}[n]} \right)^2 \right] \cdot E_p[n] \cdot \frac{r_w[n]}{r_w[n] + r_0[n] + r_c[n]} \quad (A.2.1)$$

Donde:

$E_t[n]$ es la transpiración de la cobertura vegetal n .

$W_i[n]$ es la cantidad de agua interceptada por la clase vegetal n en un tiempo.

$W_{im}[n]$ es la máxima cantidad de agua que puede ser interceptada por la clase vegetal. definida en la ecuación A.1.5

$E_p[n]$ es la evaporación potencial según la relación de Penman-Monteith.

$r_0[n]$ es la resistencia debido a la variación del gradiente de humedad específica entre las hojas y el aire sobre el follaje. Parámetros de entrada del modelo.

$r_w[n]$ es la resistencia aerodinámica producto de la transferencia de agua.

$r_c[n]$ es la resistencia estomática, definida en la ecuación A.2.2

$$r_c[n] = \frac{r_{0c}[n] \cdot g_{sm}[n]}{LAI [n, m]} \quad (A.2.2)$$

Donde:

$r_{0c}[n]$ es la resistencia estomática mínima. Parámetro de entrada del modelo

$g_{sm}[n]$ es el factor de estrés hídrico debido a la humedad del, esto se define en la expresión A.2.3

$$\begin{aligned}
g_{sm}^{-1}[n] &= 1 & W_j &\geq W_j^{cr} \\
g_{sm}^{-1}[n] &= 1 \frac{W_j[n] - W_j^w}{W_j^{cr} - W_j^w} & W_j^w &\leq W_j[n] \leq W_j^{cr} \\
g_{sm}^{-1}[n] &= 0 & W_j[n] &< W_j^w
\end{aligned} \tag{A.2.2}$$

Donde

$W_j[n]$ es la humedad del suelo en la capa j.

W_j^{cr} es la humedad crítica de la capa j tal que si la humedad es mayor el estrés hídrico es 1.

W_j^w es la humedad de suelo equivalente a la capacidad de campo.

Bajo estas circunstancias las capas de suelo no están en estrés hídrico:

$$\begin{aligned}
W_j[n] &\geq W_j^{cr} \\
f_j[n] &> 0,5
\end{aligned} \tag{A.2.2}$$

Donde $f_j[n]$ es la fracción de raíces en la capa j. parámetro de entrada del modelo.

La transpiración consume el agua de las capas de forma progresiva en caso de estrés hídrico, el proceso de transpiración se detiene en profundidad cuando encuentra una capa sin estrés hídrico. Transpiración por capas se define:

$$E_t[n] = \sum_{j=1}^{n=m} E_{t,j}[n] \cdot f_j[n] \tag{A.2.3}$$

Donde m es la primera capa del suelo sin estrés hídrico.

Finalmente, la transpiración en el paso del tiempo esta definida por:

$$E_t[n] = (1 - f[n]) \cdot E_p[n] \cdot \frac{r_w[n]}{r_w[n] + r_o[n] + r_c[n]} + f[n] \cdot [1 - (\frac{W_i[n]}{W_{im}[n]})^{2/3}] \cdot E_p[n] \cdot \frac{r_w[n]}{r_w[n] + r_o[n] + r_c[n]} \tag{A.2.4}$$

Donde todos los términos han sido definidos anteriormente.

ANEXO A.3 – Evaporación del suelo desnudo

La evaporación desde el suelo desnudo ocurre solo en la primera capa de modelación. En caso de que ésta esté saturada la evaporación de suelo es igual a la evaporación potencial para suelos de desnudos (según la relación de Penman-Monteith).

En caso de no saturación la evaporación se define:

$$E_s = E_p[n + 1] \cdot [\int_0^{A_s} dA + \int_{A_s}^1 \frac{i_0}{i_0 \cdot (1 - (1 - A))^{1/b_i}} dA] \tag{A.3.1}$$

Donde:

$E_p[n + 1]$ es la evaporación potencial del suelo desnudo

A_s es el área que se encuentra saturada.

A es la fracción de área donde la infiltración es menor a la tasa i

b_i es un parámetro de entrada del modelo.

La tasa de infiltración i se define como:

$$i = i_m \cdot [1 - (1 - A)^{1/b_i}] \quad (\text{A.3.2})$$

Donde i_m es la capacidad máxima de infiltración.

Para la ecuación A.3.1 no existe expresión analítica por lo cual el modelo VIC lo resuelve con una expansión de series.

ANEXO B – Evolución temporal y espacial de la cobertura vegetal

El presente anexo muestra las coberturas vegetales estimadas por los algoritmos de clasificación supervisada para las cuencas en estudio en los años 1987, 1990, 2002, 2014, 2016 y 2021. Si bien, se extrapoló las predicciones para los años 2005, 2008, 2010, 2015 y 2019 estos mapas no son mostrados por no ser parte activa de la simulación hidrológica de las coberturas vegetales históricas. Esta sección se subdivide por las cuencas de Huenchullami, Purapel y Perquilauquén.

ANEXO B.1 – Huenchullami

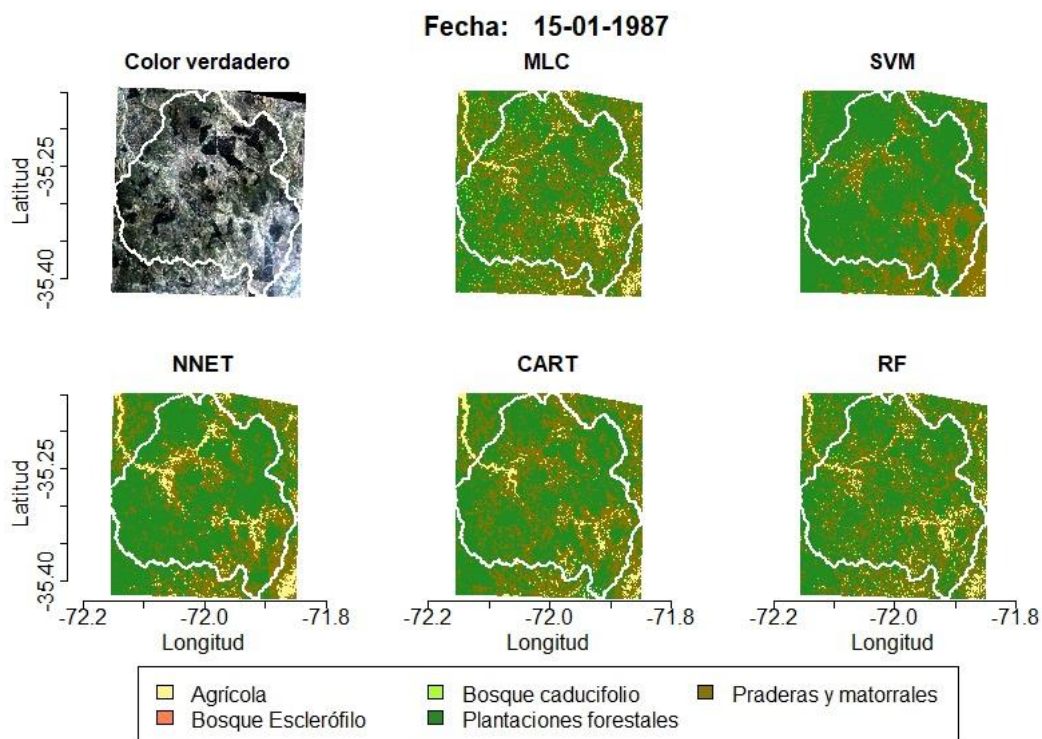


Figura B.1. 1Detección remota en Huenchullami año 1987.

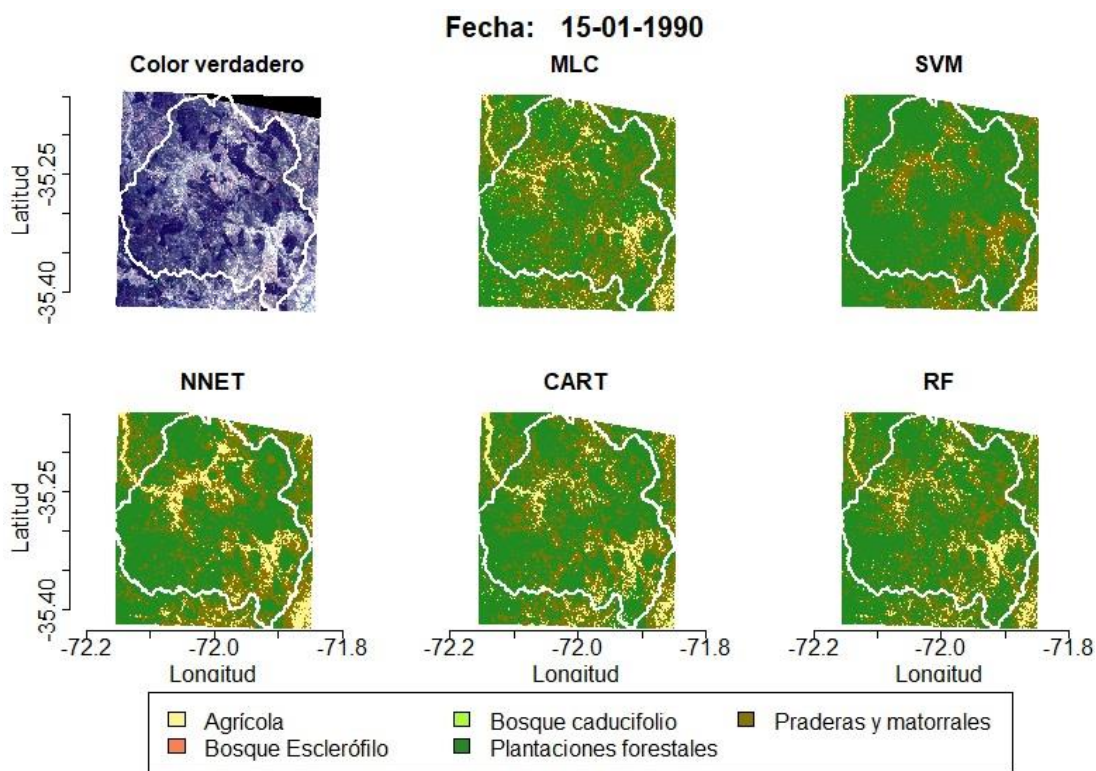


Figura B.1. 2 Detección remota en Huenchullami año 1990.

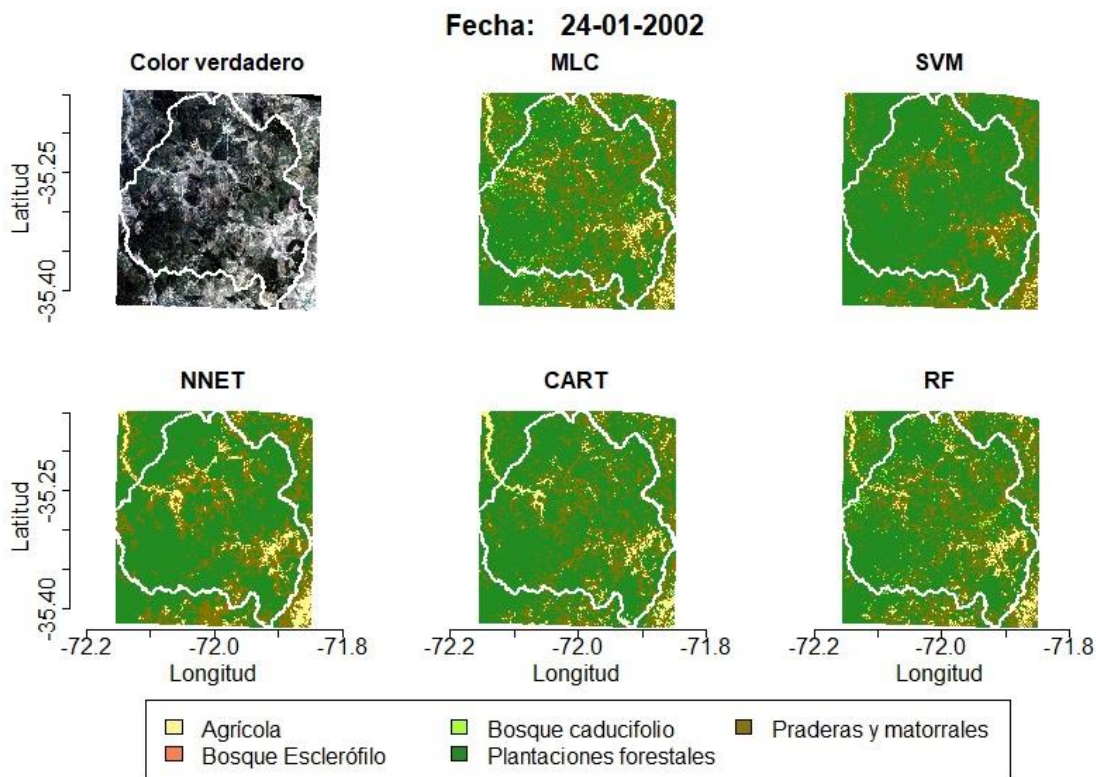


Figura B.1. 3 Detección remota en Huenchullami año 2002.

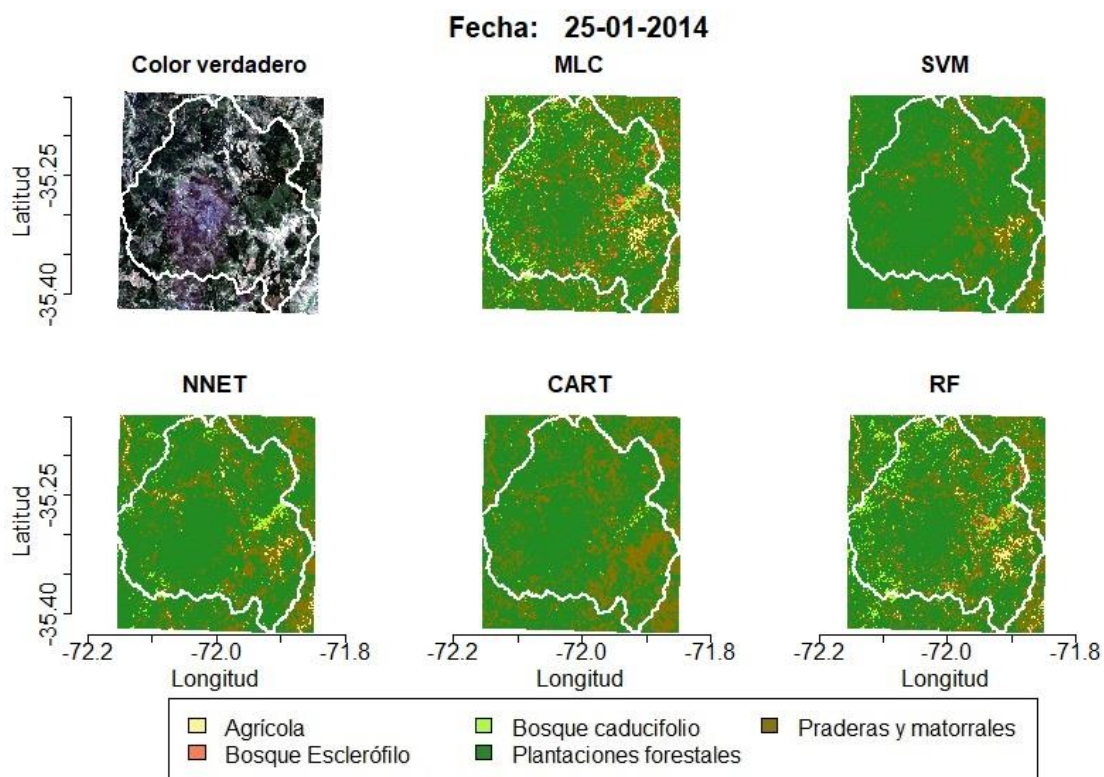


Figura B.1. 4 Detección remota en Huenchullami año 2014.

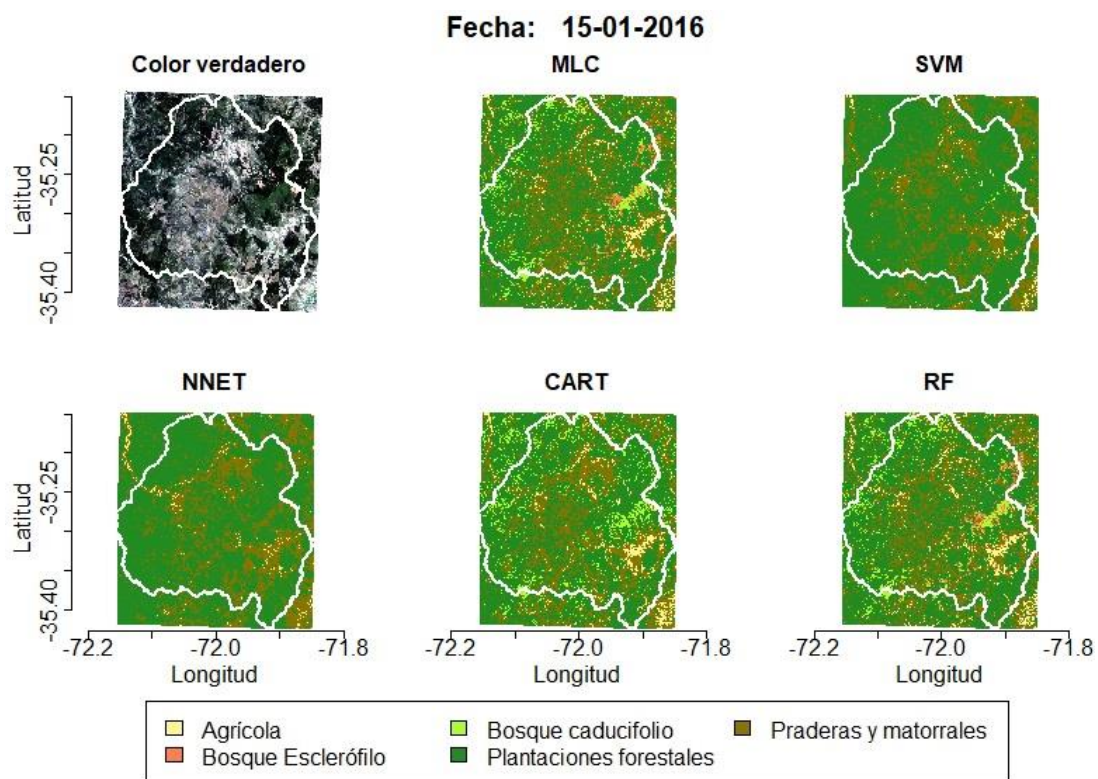


Figura B.1. 5 Detección remota en Huenchullami año 2016.

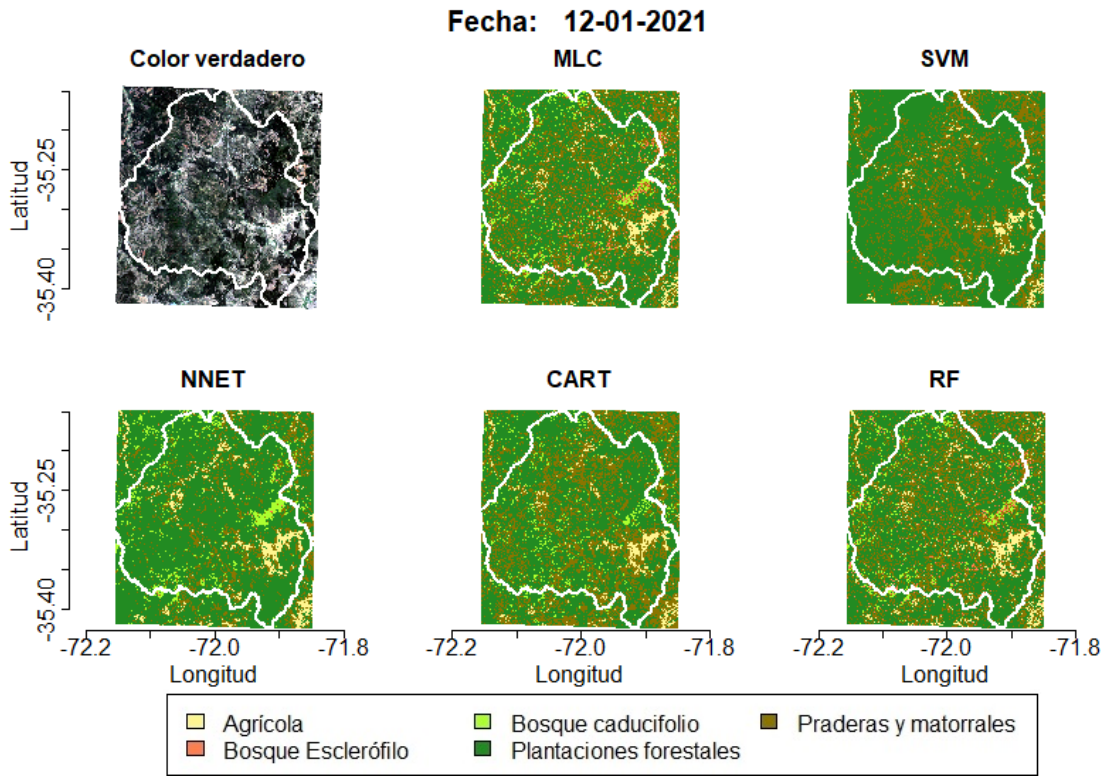


Figura B.1. 6 Detección remota en Huenchullami año 2021.

ANEXO B.2 – Purapel

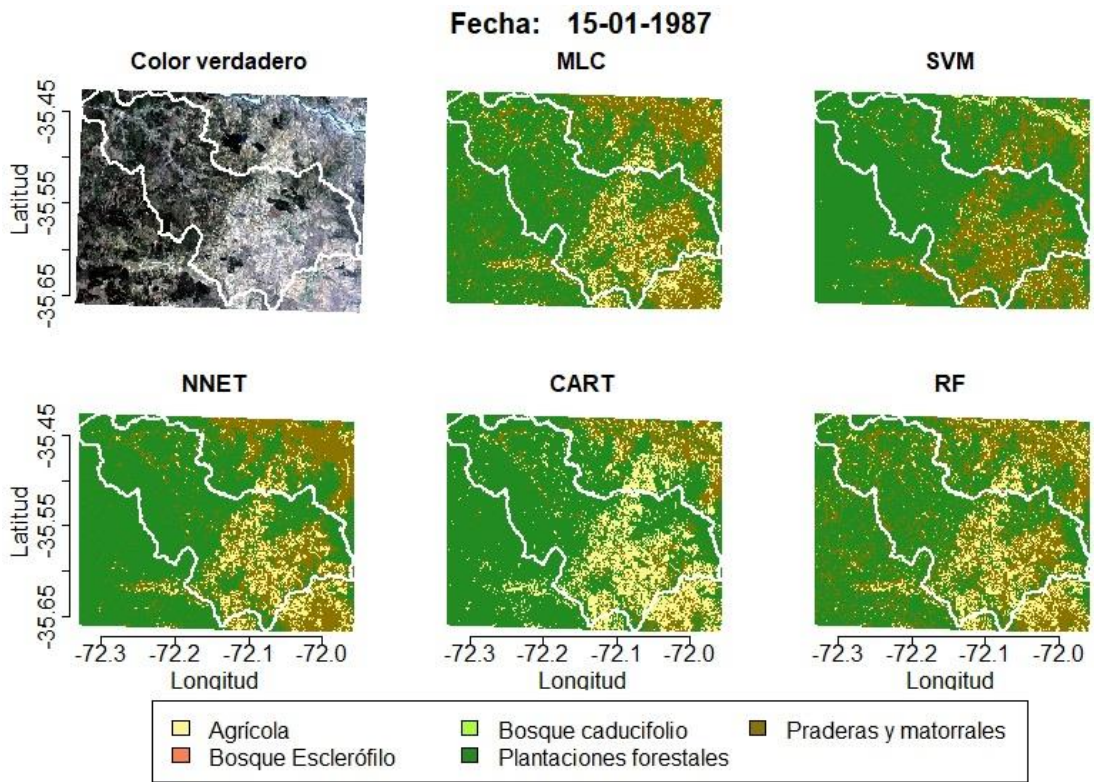


Figura B.2. 1 Detección remota en Purapel año 1987.

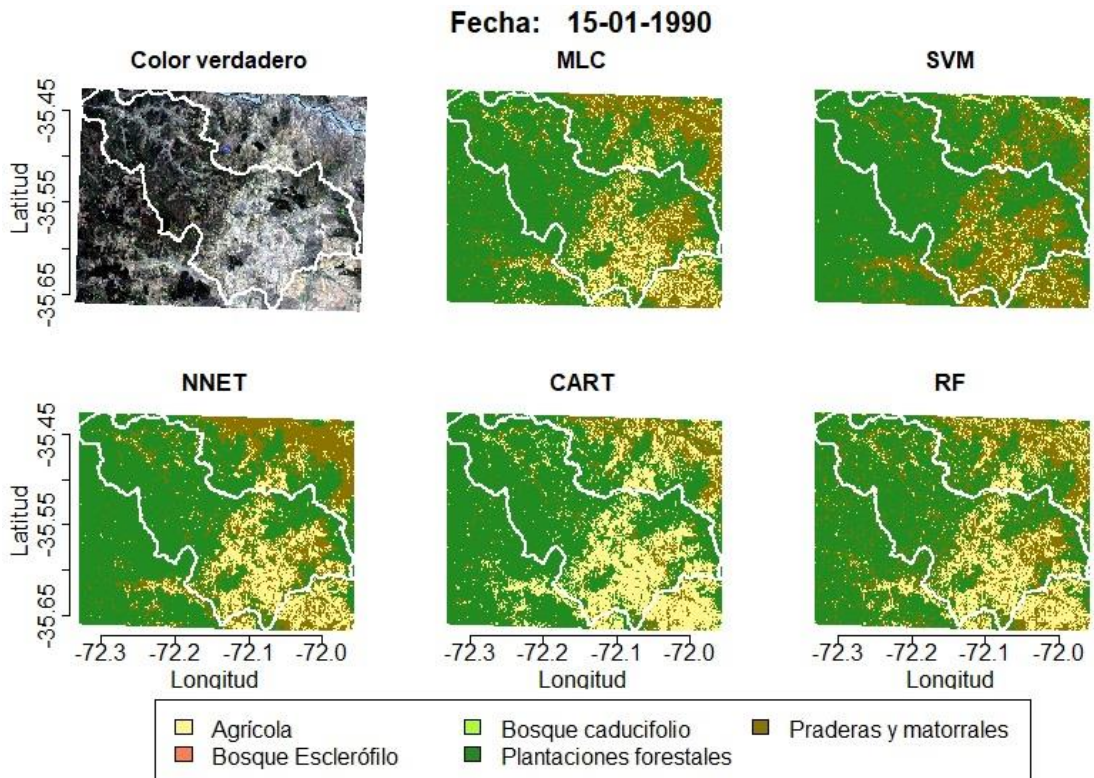


Figura B.2. 2 Detección remota en Purapel año 1990.

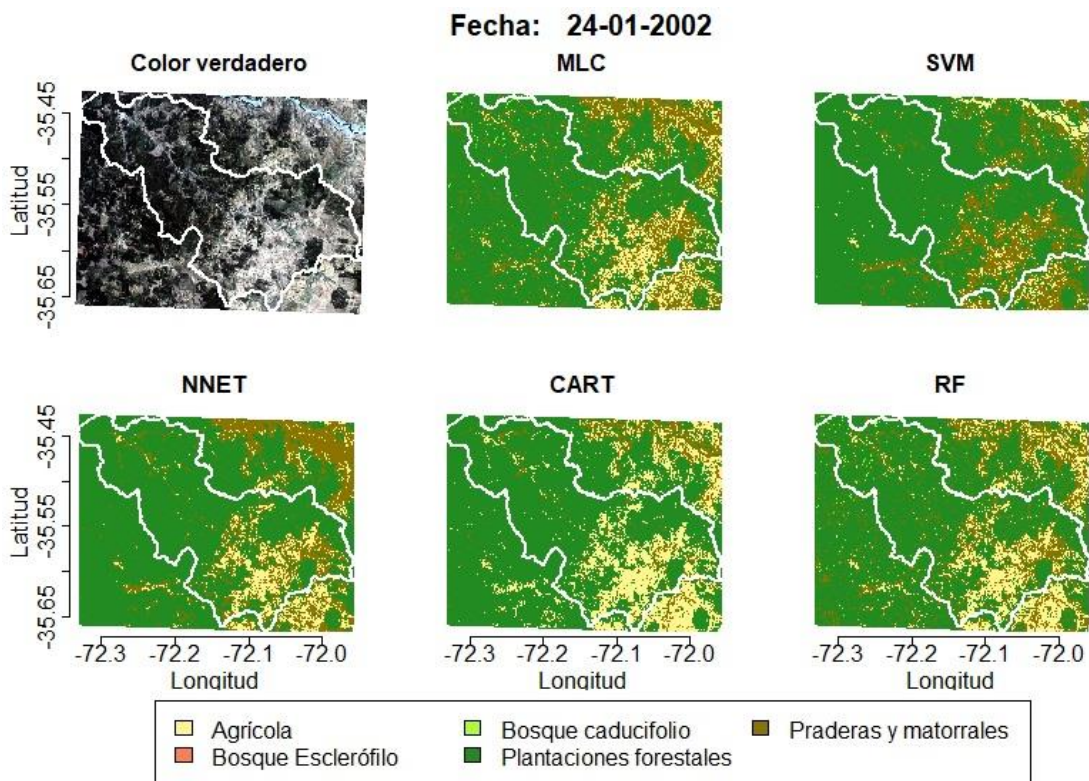


Figura B.2. 3 Detección remota en Purapel año 2002.

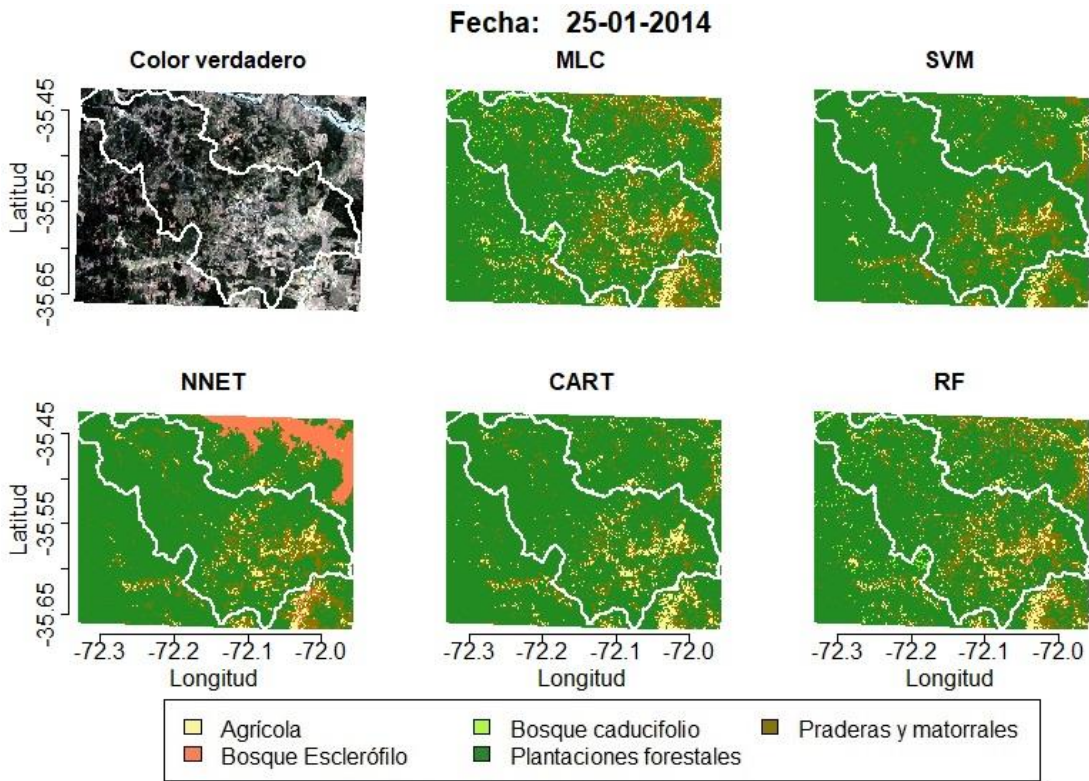


Figura B.2. 4 Detección remota en Purapel año 2014.

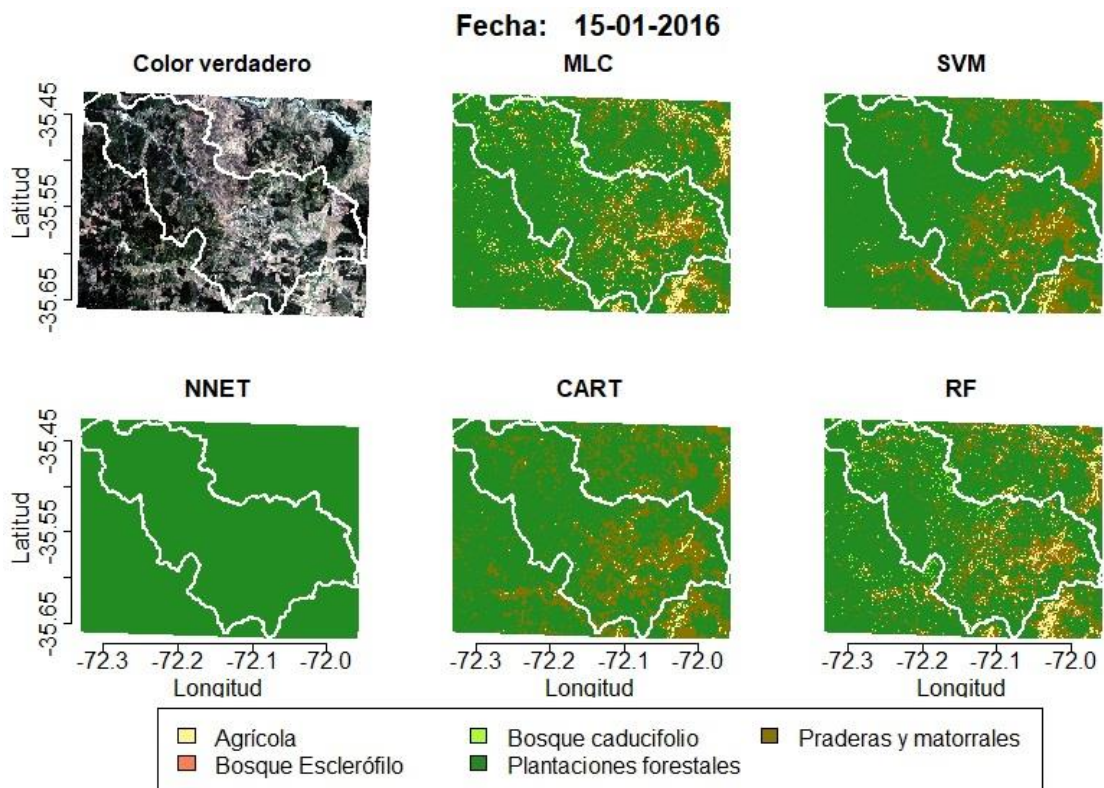


Figura B.2. 5 Detección remota en Purapel año 2016.

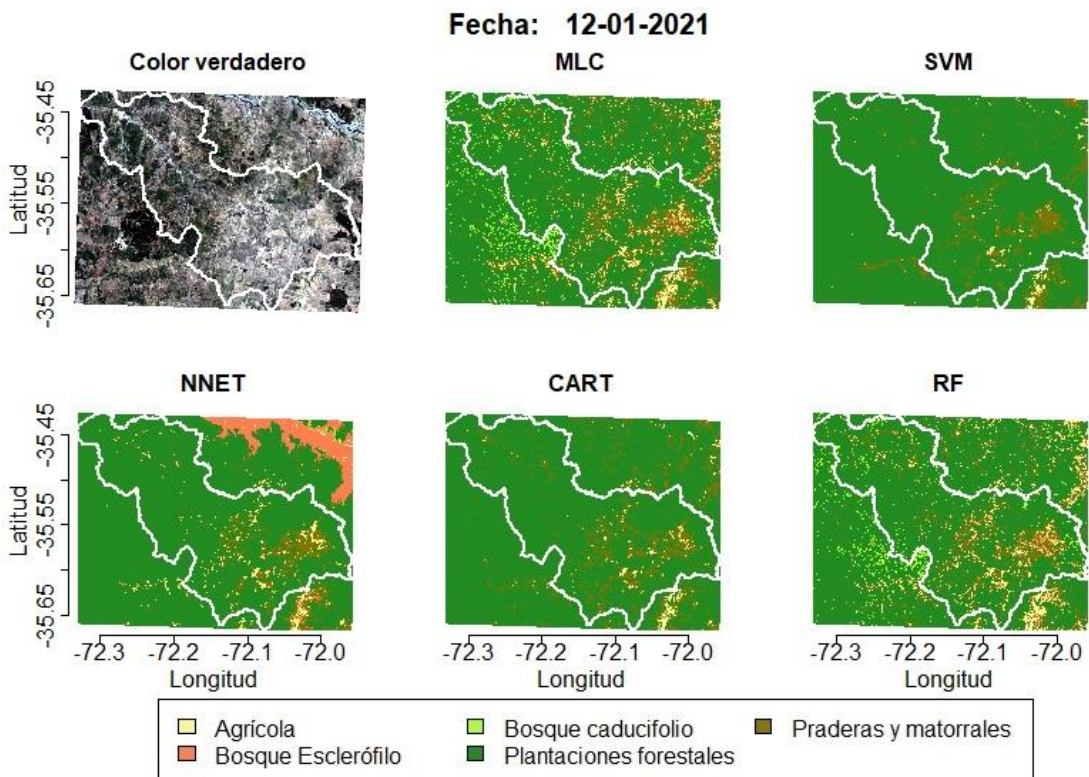


Figura B.2. 6 Detección remota en Purapel año 2021.

ANEXO B.3 – Perquillauquén

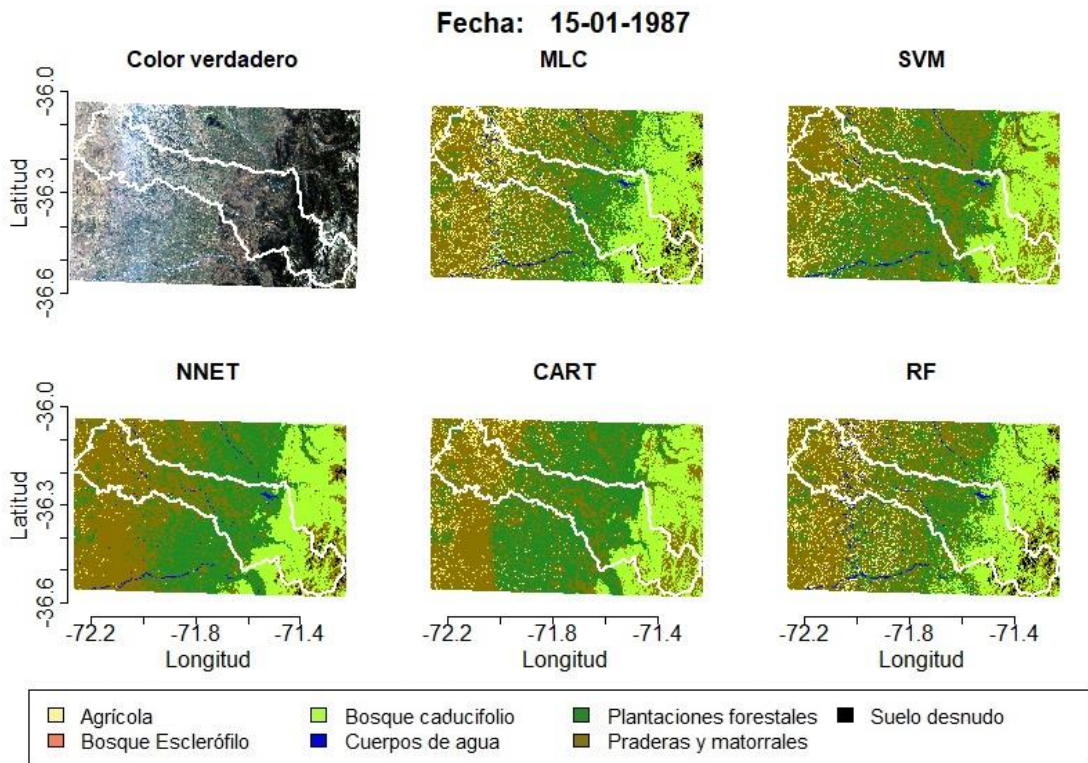


Figura B.3. 1 Detección remota en Perquillauquén año 1987.

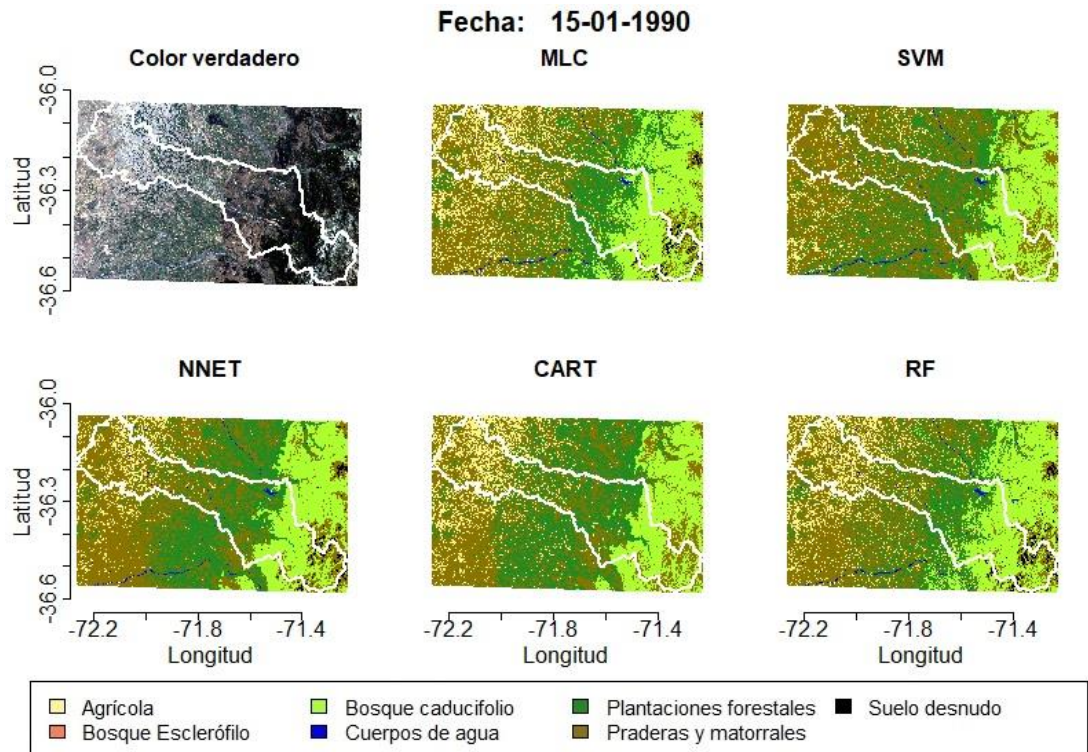


Figura B.3. 2 Detección remota en Perquillauquén año 1990.

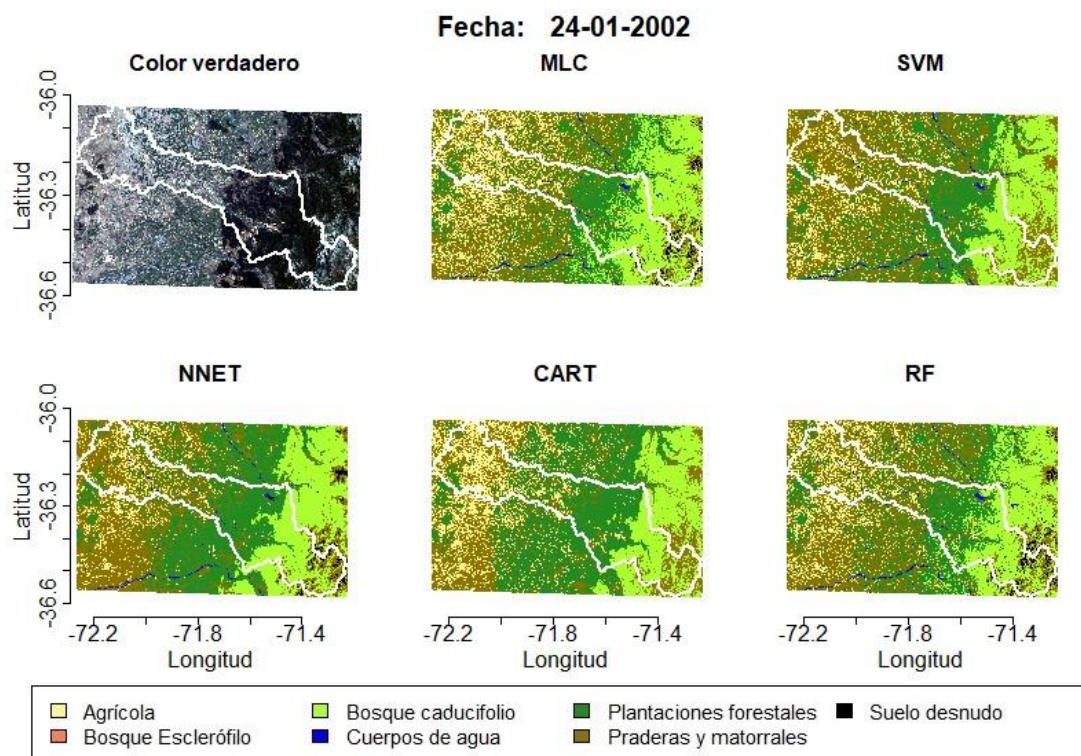


Figura B.3. 3 Detección remota en Perquilauquén año 2002.

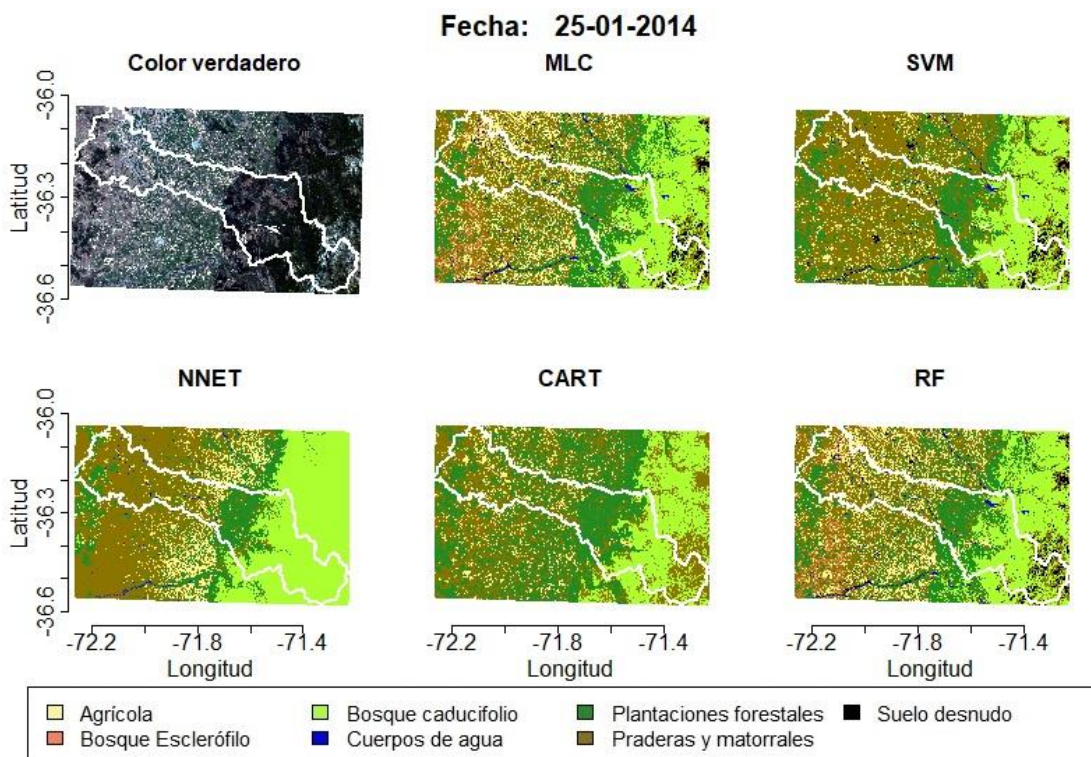


Figura B.3. 4 Detección remota en Perquilauquén año 2014.

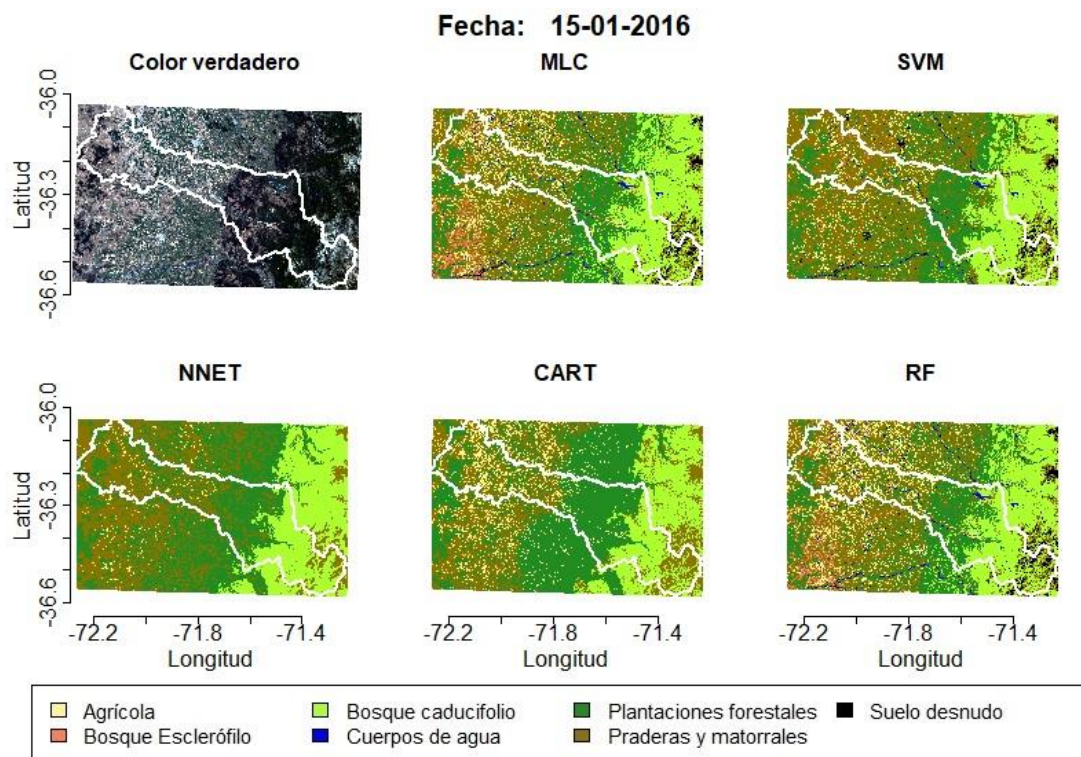


Figura B.3. 5 Detección remota en Perquilauquén año 2016.

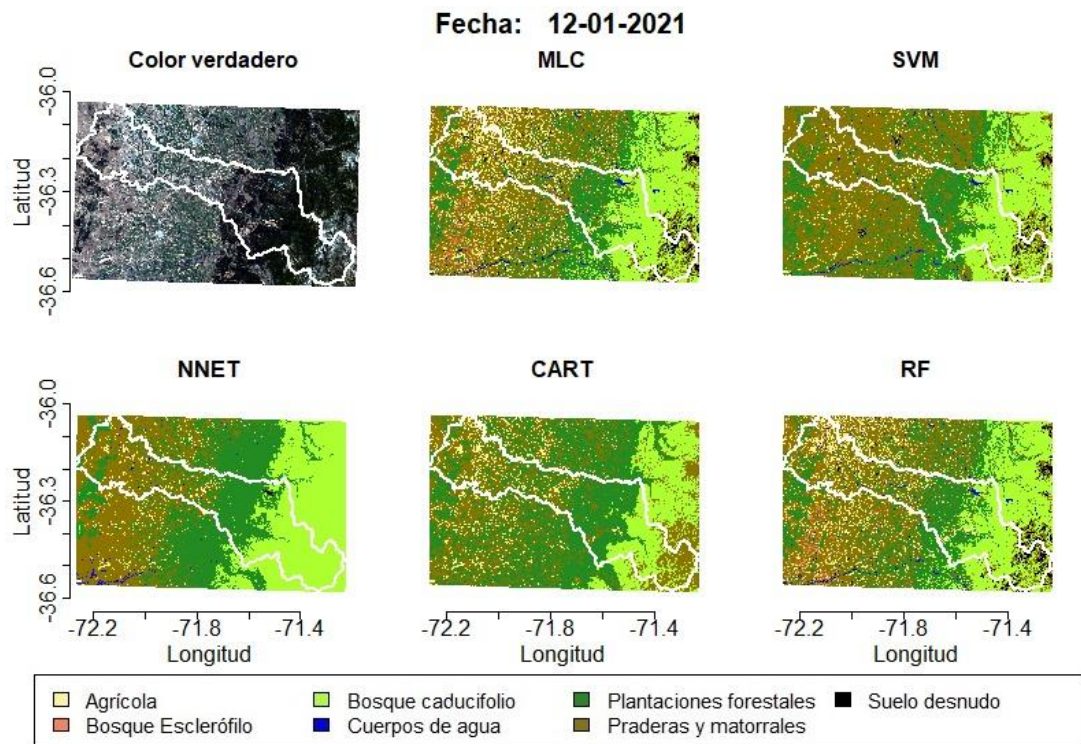


Figura B.3. 6 Detección remota en Perquilauquén año 2021.

ANEXO C – Régimen natural

Este anexo muestra los caudales observados y los derechos de aprovechamiento de agua otorgados (DAA) para las cuencas de Purapel y Perquilauquén, la restitución a régimen natural de los registros fluviométricos corresponde a es la suma de ambas magnitudes. A continuación, se presenta la serie anuales y los valores medios mensuales.

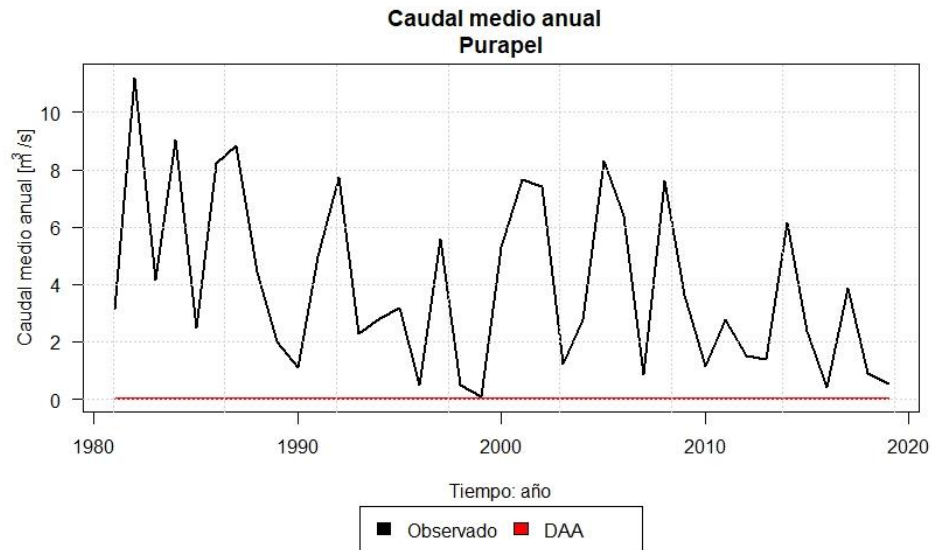


Figura C. 1 Anualidad de los caudales observados y derechos de aguas otorgados- Cuenca Purapel.

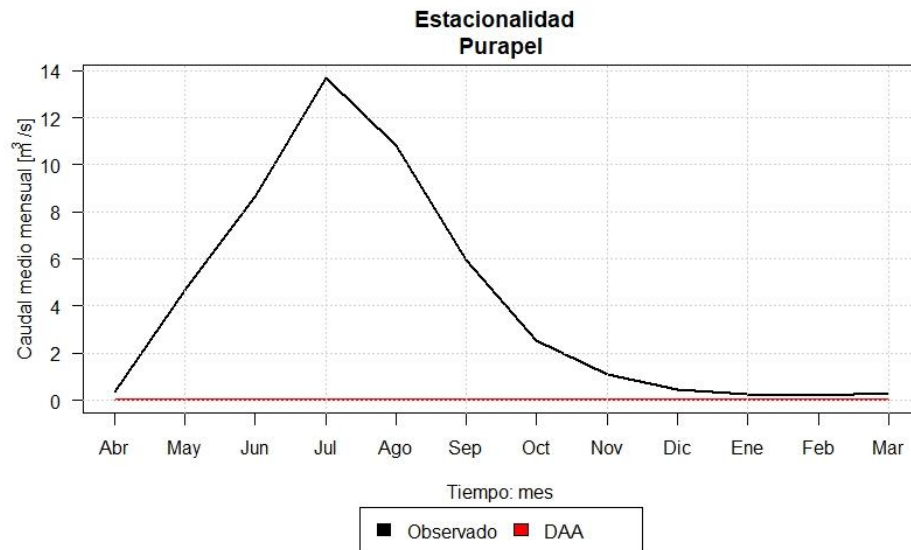


Figura C. 2 Estacionalidad de los caudales observados y derechos de aguas otorgados - Cuenca Purapel.

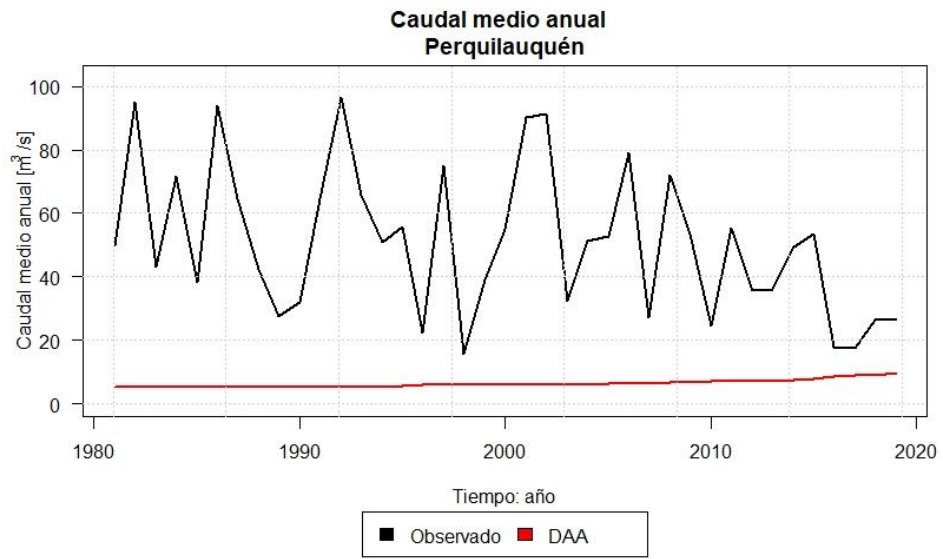


Figura C. 3 Anualidad de los caudales observados y derechos de aguas otorgados- Cuenca Perquillauquén.

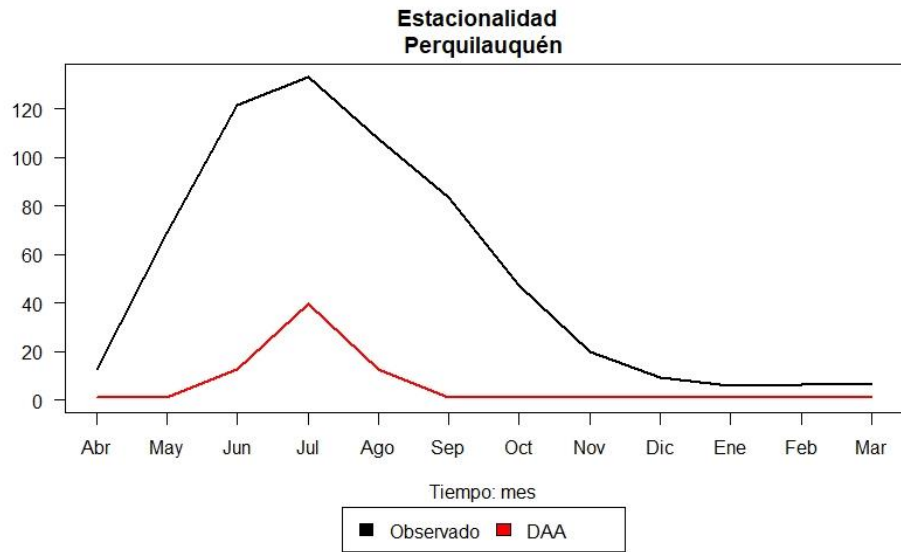


Figura C. 4 Estacionalidad de los caudales observados y derechos de aguas otorgados - Cuenca Perquillauquén.

ANEXO D – Resultados de calibración

El presente anexo ilustra el rendimiento del modelo para el periodo de calibración (2008-2018), validación (1985 – 2008) y completo (1985 – 2020).

En el caso de Purapel, la función objetivo Split – KGE disminuye su rendimiento en el periodo de validación respecto al de calibración. Sin embargo, las métricas KGE y NSE mejoran considerablemente para el mismo periodo. En Perquillauquén el rendimiento de todas las métricas es bastante parejos para todos los periodos.

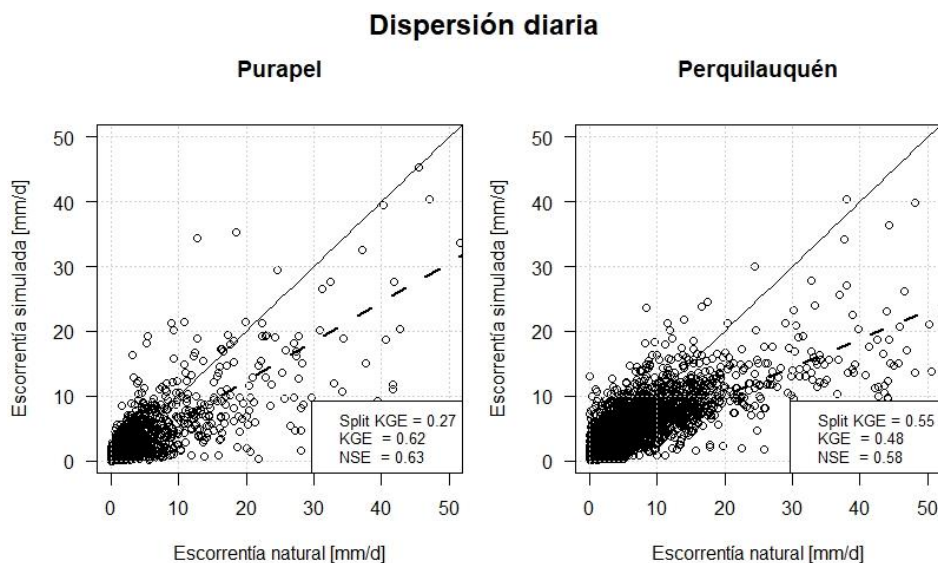


Figura D. 1 Dispersión del modelo para el periodo completo para ambas cuencas.

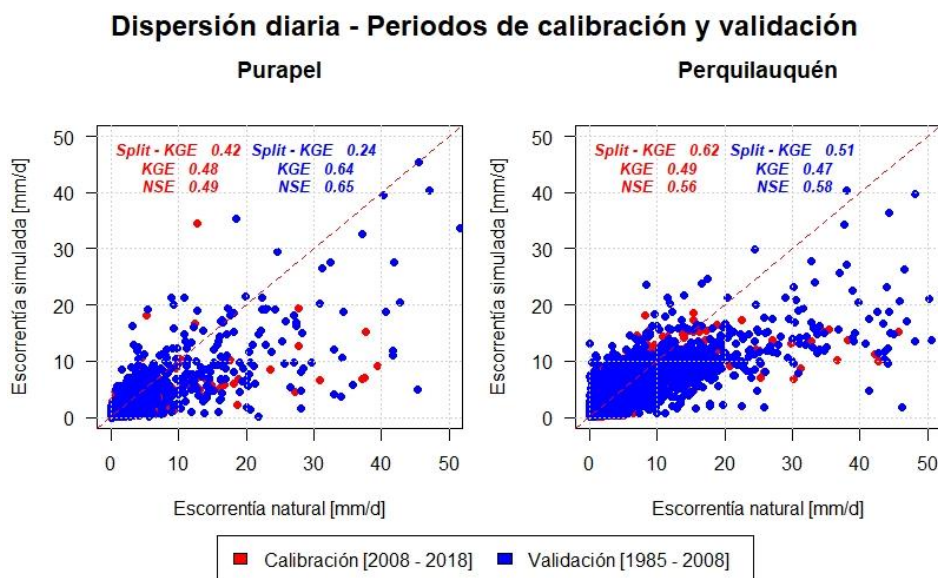


Figura D. 2 Dispersión del modelo para los periodos de calibración y validación para ambas cuencas.

Al analizar las simulaciones en la curva de duración, se observa un ajuste a la escorrentía base. Esto es una consecuencia del uso de la métrica Split – KGE como función objetivo y de la época seca escogida para la calibración. Las métricas empleadas para diagnosticar el ajuste del modelo en la curva de duración son las propuestas por Yilmaz et al. (2008).

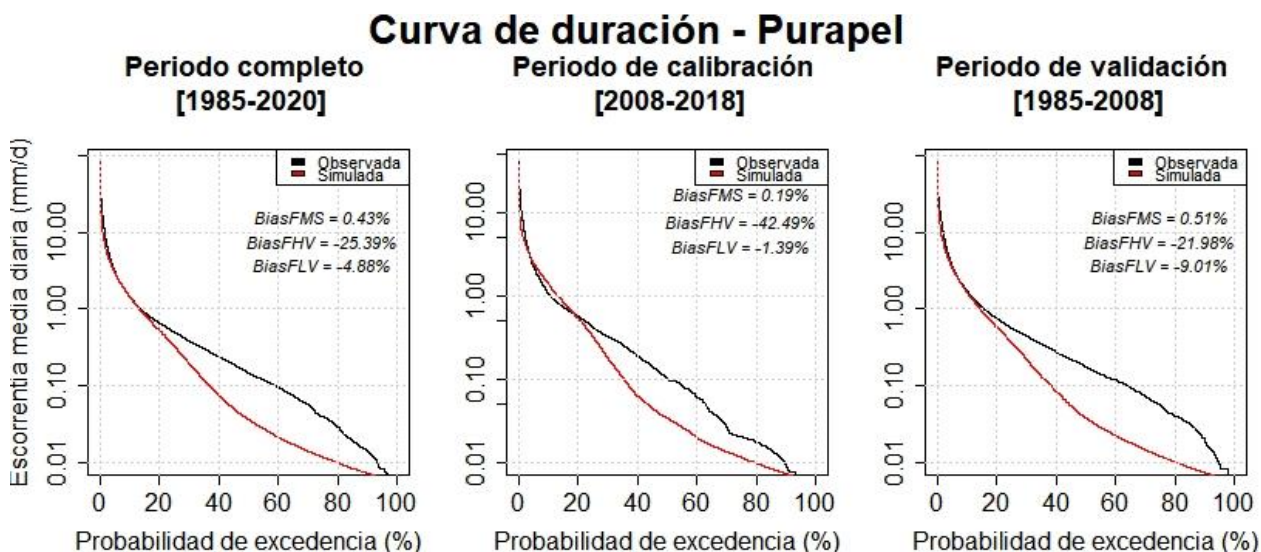


Figura D. 3 Curvas de duración para los periodos en análisis para la cuenca Purapel.

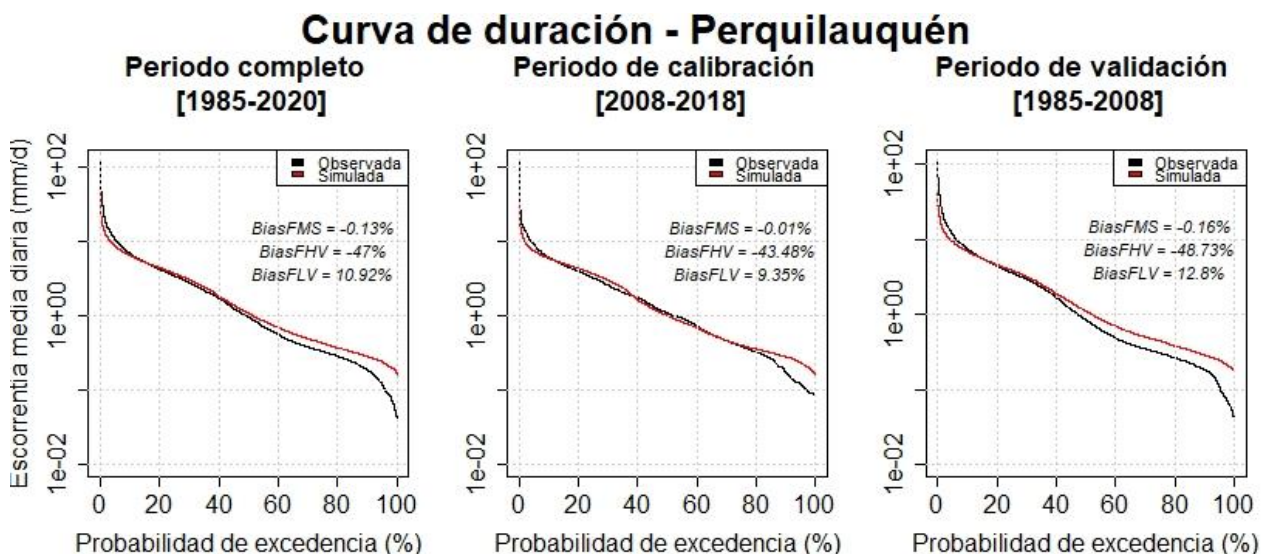


Figura D. 4 Curvas de duración para los periodos en análisis para la cuenca Perquilauquén.

A continuación, se presenta las series diarias en escala logarítmica de ambas cuencas. En Purapel se observa un correcto ajuste para escorrentías bajas, en cambio Perquilauquén presenta sesgos en épocas secas fuera del periodo de calibración, en particular para el año 1998.

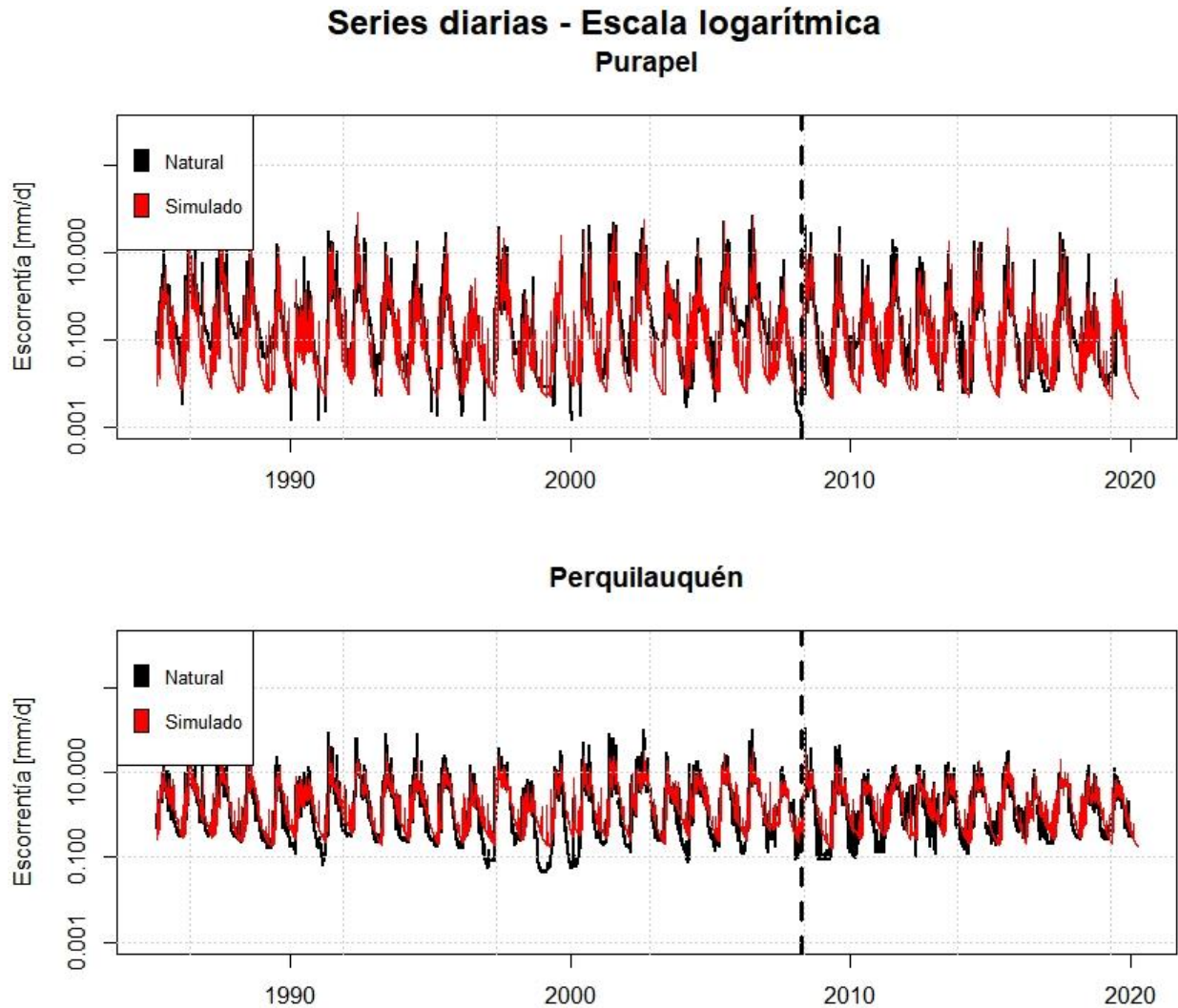


Figura D. 5 Serie diaria en espacio logarítmico en ambas cuencas.

Respecto a la partición de precipitación en evapotranspiración y escorrentía, se observa que el periodo de calibración es árido. En Purapel la evapotranspiración tiene un rol protagónico mientras que en tanto Perquilauquén la mayoría de la precipitación escurre.

Partición

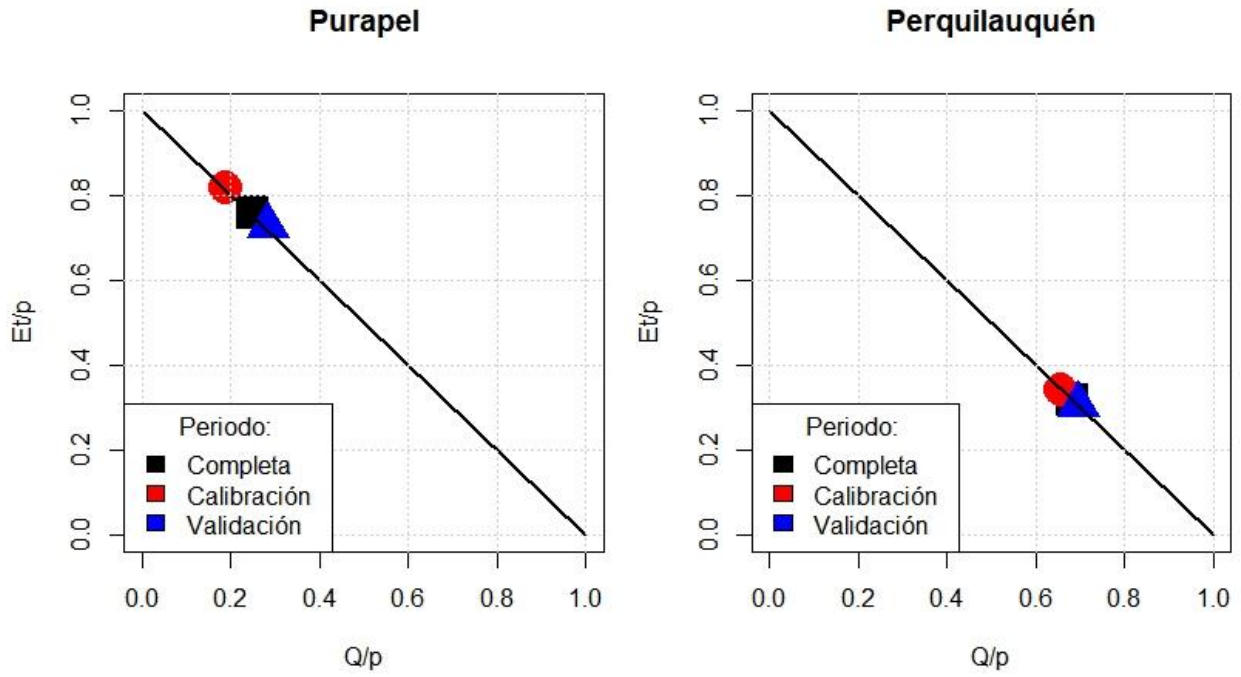


Figura D. 6 Partición de la precipitación para todos los periodos y ambas cuencas.

ANEXO E – Mapas de los escenarios de modificación de la cobertura vegetal

Este anexo muestra los mapas de vegetación de los escenarios realizados en el estudio, estos mapas muestran la vegetación dominante para las celdas de modelación. Este anexo presenta tres subsecciones correspondientes a mapas de la cobertura vegetal histórica estimadas por la detección remota, escenarios de aumento y reducción de las plantaciones forestales en condiciones pasadas y futuras. En este anexo la palabra Experimento hace referencia a escenarios

ANEXO E.1 – Mapas de las coberturas vegetales históricas

Esta generación de experimentos simula las coberturas pasadas predichas por la clasificación supervisada. El periodo analizado es desde 1985 al 2020.

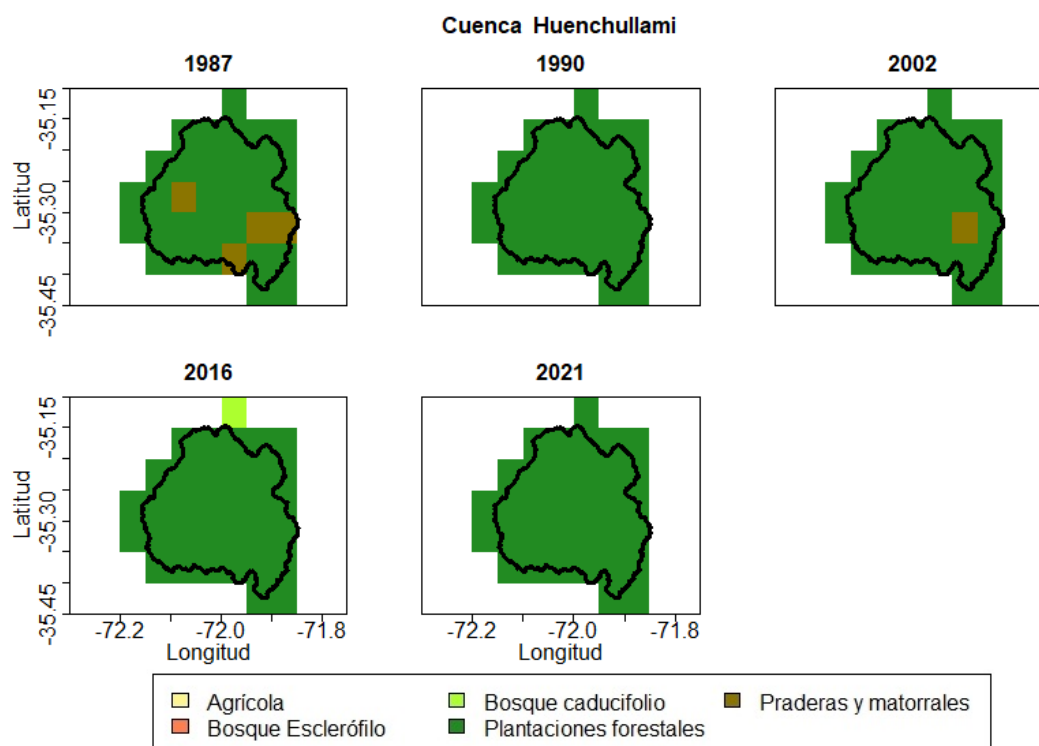


Figura E. 1 Mapas de la primera generación de experimentos - Cuenca Huenchullami

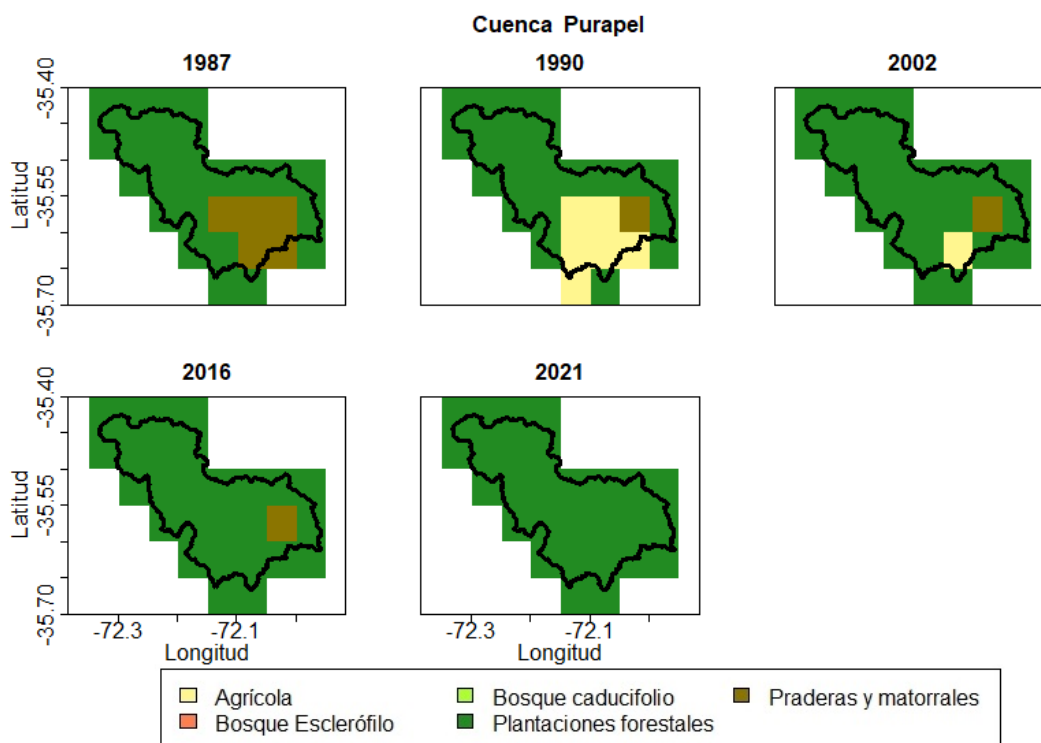


Figura E. 2 Mapas de la primera generación de experimentos - Cuenca Purapel

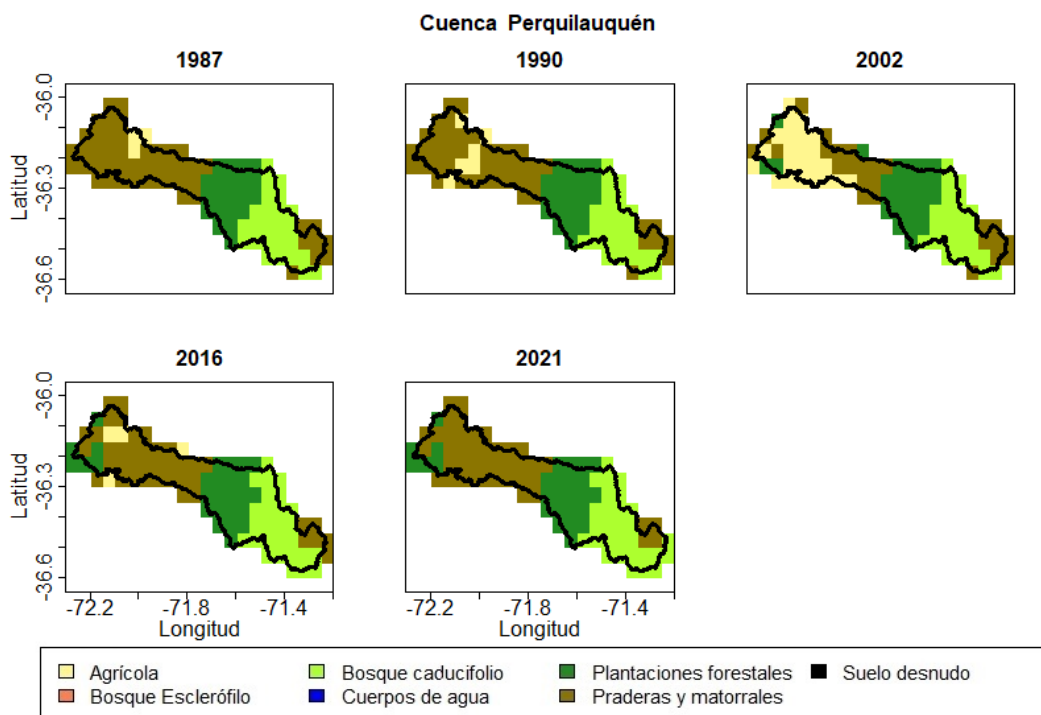


Figura E. 3 Mapas de la primera generación de experimentos - Cuenca Perquilauquén.

ANEXO E.2 – Escenarios de variación de la cobertura vegetal en condiciones pasadas

Estos escenarios varían la superficie forestal en escenarios hipotéticos, bajo los criterios mencionados en la metodología. La Cobertura base corresponde a la actualización del catastro vegetacional de CONAF para los años 2015 y 2016. Los experimentos A, B y C corresponde a una reducción del 100%, 50% y 10% de las plantaciones forestales respecto a la base, a su vez, Los experimentos D y E corresponden a un aumento del 10% y 50% de las plantaciones forestales.

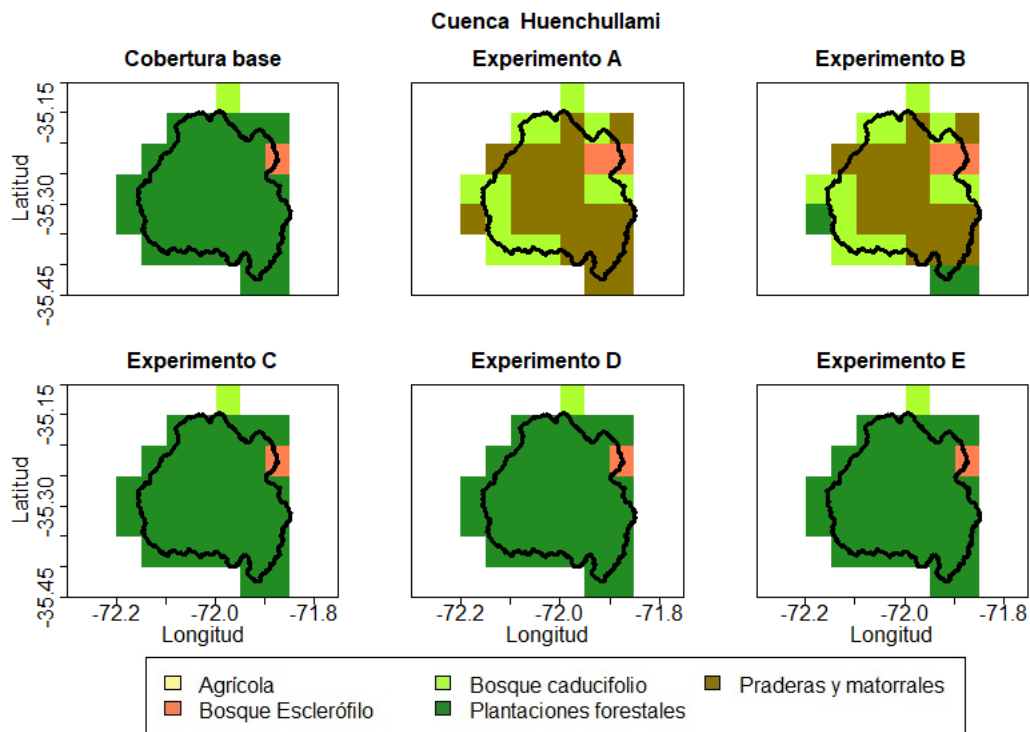


Figura E. 4 Mapas de la segunda generación de experimentos - Cuenca Huenchullami.

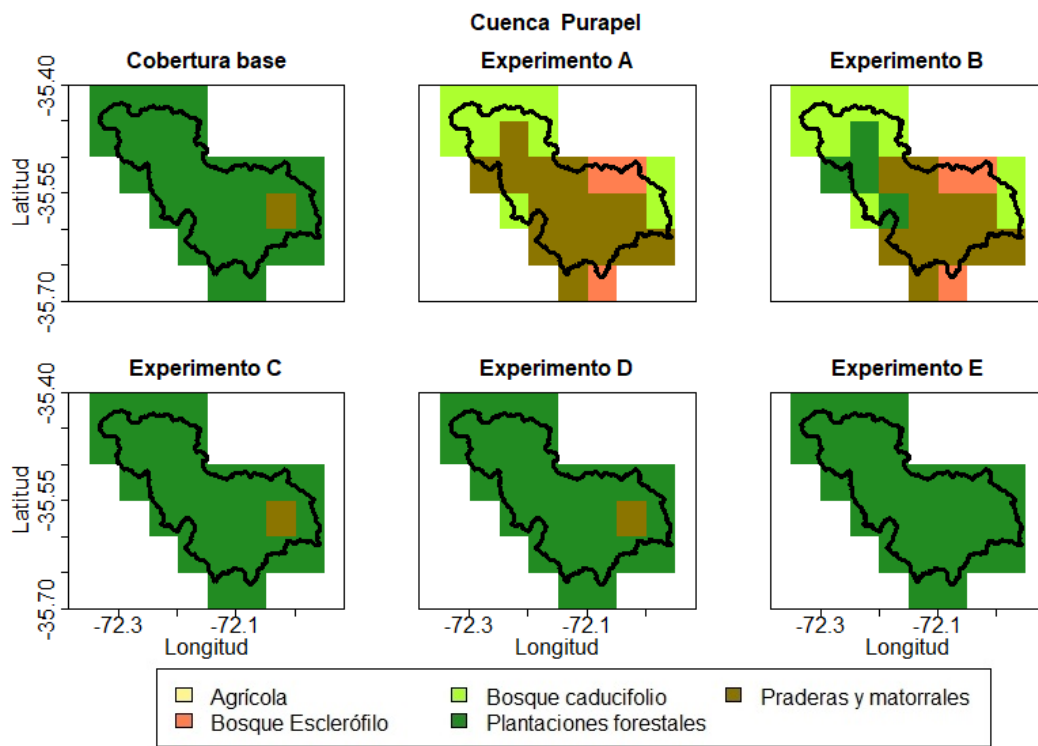


Figura E. 5 Mapas de la segunda generación de experimentos - Cuenca Purapel

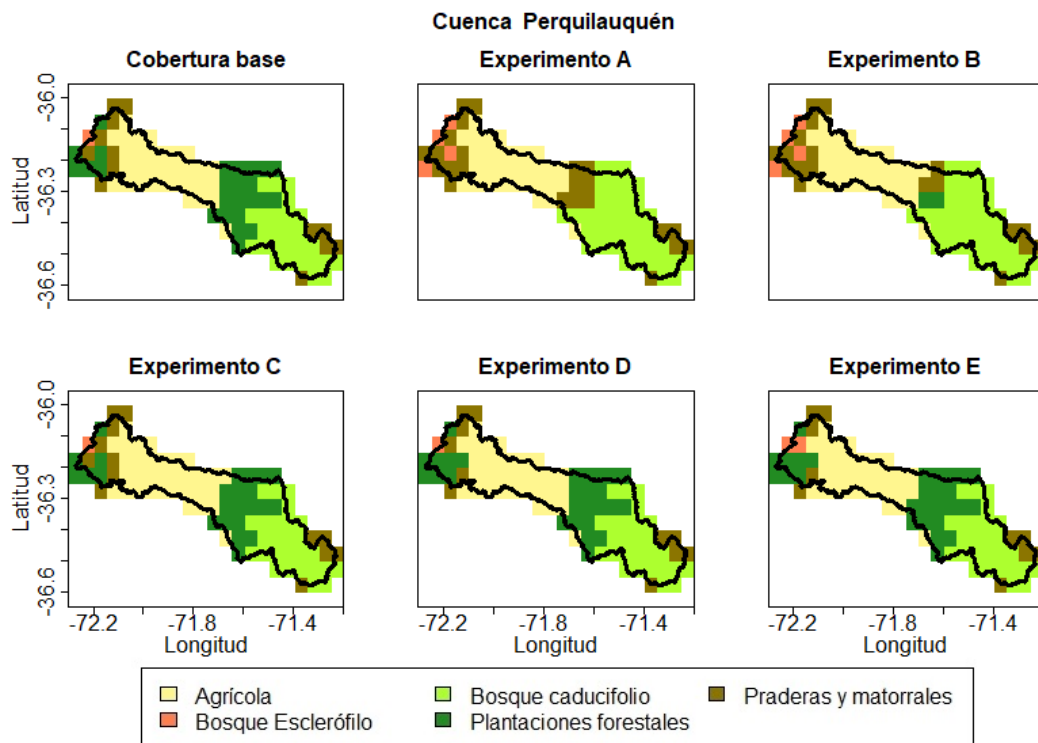


Figura E. 6 Mapas de la segunda generación de experimentos - Cuenca Perquillauquén

ANEXO E.3 – Escenarios de variación de la cobertura vegetal en condiciones pasadas

Estos escenarios varían la superficie forestal en escenarios hipotéticos, bajo los criterios mencionados en la metodología. La Cobertura base corresponde cobertura del año 2021 estimada por la detección remota. Los experimentos A, B y C corresponde a una reducción del 100%, 50% y 10% de las plantaciones forestales respecto a la base, a su vez, Los experimentos D y E corresponden a un aumento del 10% y 50% de las plantaciones forestales. Por último, el experimento 0 muestra las proyecciones para el año 2030 según las tendencias históricas.

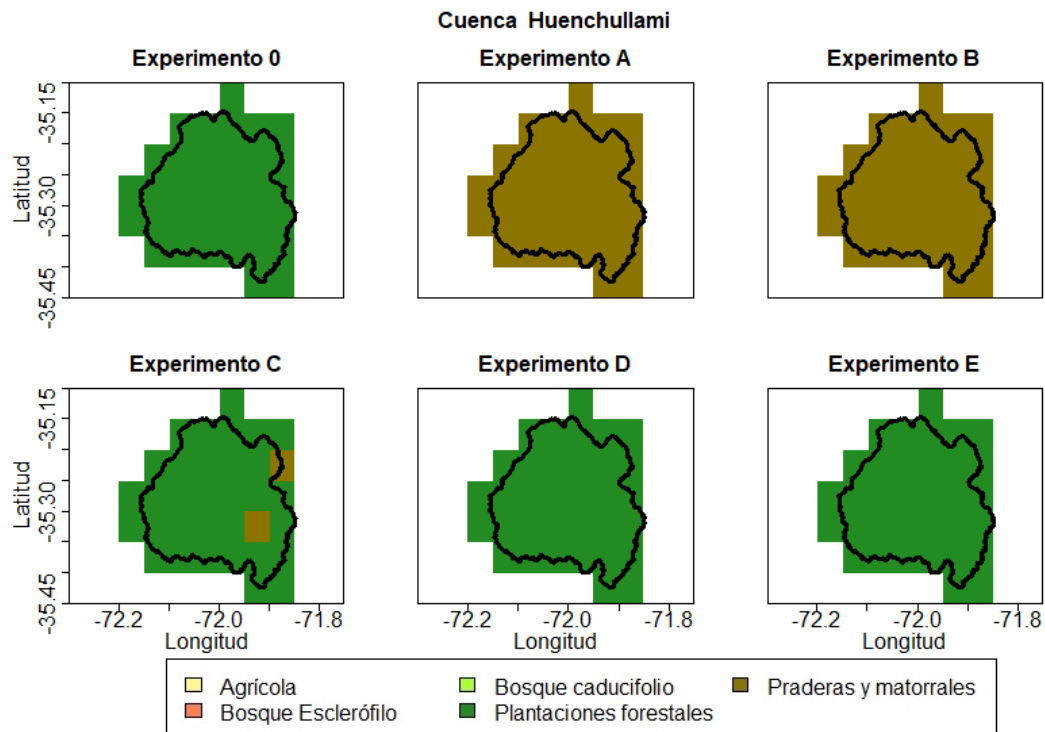


Figura E. 7 Mapas de la tercera generación de experimentos - Cuenca Huenchullami.

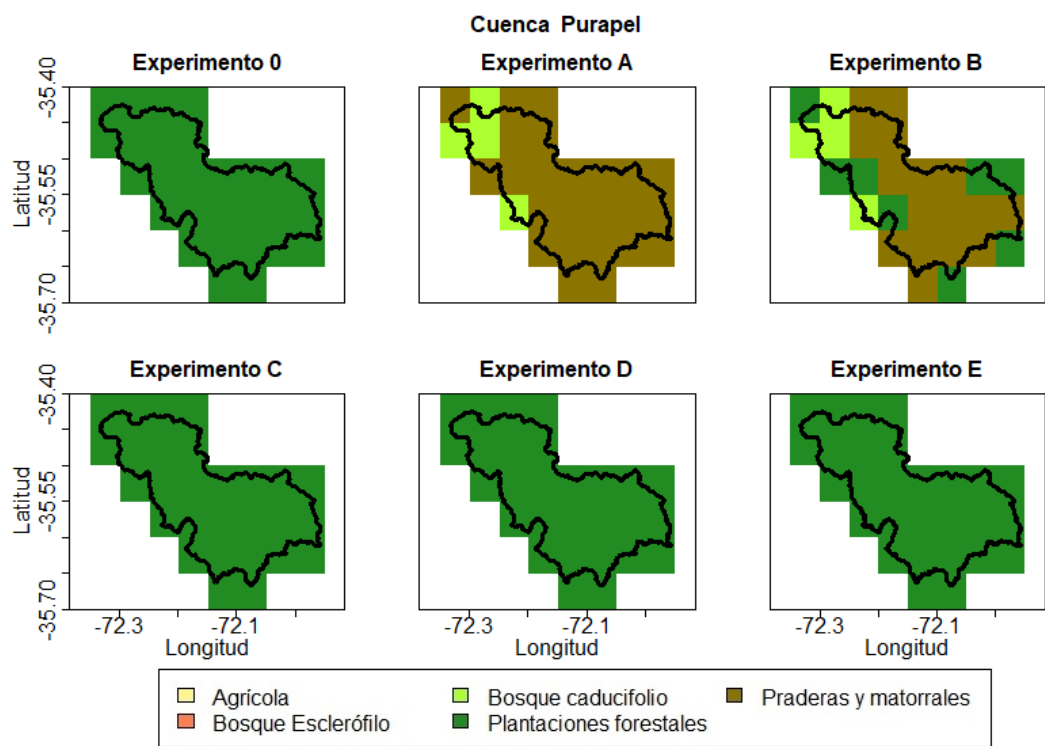


Figura E. 8 Mapas de la tercera generación de experimentos - Cuenca Purapel.

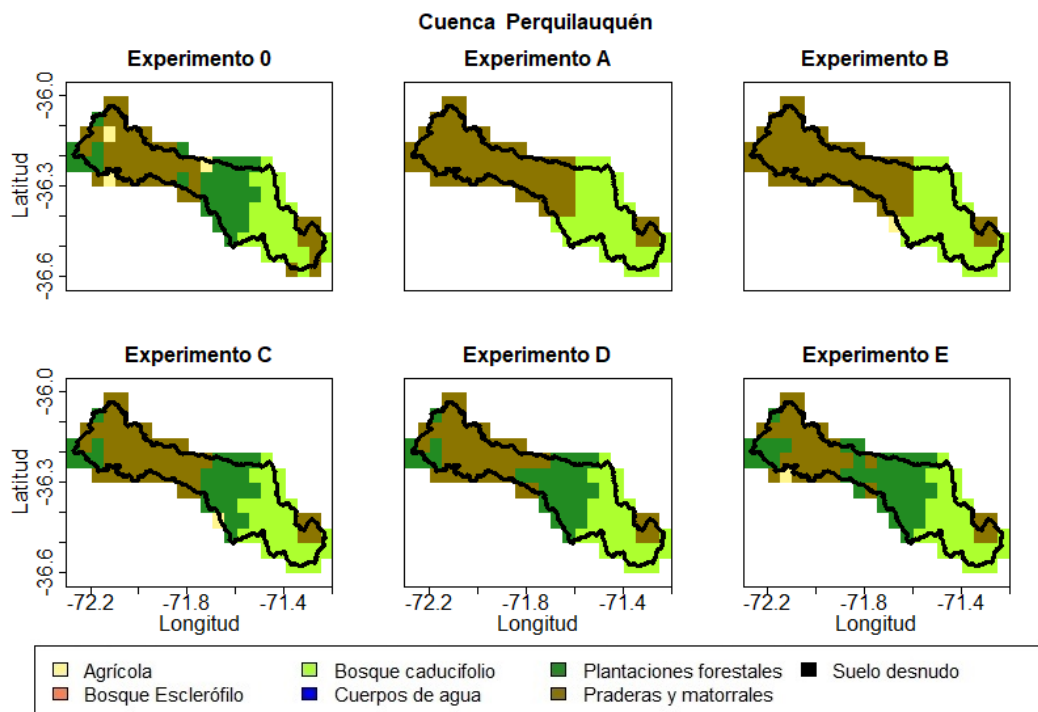


Figura E. 9 Mapas de la tercera generación de experimentos - Cuenca Perquillauquén.