



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

“ANALISIS DEL EFECTO DE LA INTENSIFICACION EN LA FRUTICULTURA DE RIEGO SOBRE EL BALANCE HIDRICO DE LA CUENCA DE PETORCA, CHILE”

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

MAXIMILIANO PEÑA ESPINOZA

PROFESOR GUÍA:

MAURICIO GALLEGUILLOS TORRES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MIGUEL LAGOS ZUÑIGA

FELIPE SAAVEDRA MELÉNDEZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por FONDAP-15110009

SANTIAGO DE CHILE

2021

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Maximiliano Peña Espinoza
FECHA: 19/07/2021
PROFESOR GUÍA: Mauricio Galleguillos Torres**

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA INTENSIFICACION EN LA FRUTICULTURA DE RIEGO SOBRE EL BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DE PETORCA, CHILE

En la cuenca del Río Petorca el panorama hídrico es difícil, la mega-sequía y la mala gestión pública, mantiene una crisis hídrica que ha generado pérdidas de terrenos agrícolas (la principal actividad económica de la zona) y que tiene instalada una competencia por el agua llevando a las comunidades rurales a no tener abastecimiento de agua potable. Para comprender la crisis en Petorca es necesario analizar como las componentes naturales y antrópicas del balance afectan la disponibilidad de agua, de tal manera, se hace posible definir medidas de mitigación por parte de las instituciones correspondientes.

El objetivo de este trabajo es analizar la influencia de la actividad frutícola en el balance hídrico de la cuenca de Petorca. Se analizó los cambios de cobertura y uso de suelo mediante clasificación supervisada sobre imágenes Landsat para los años 2002, 2008, 2014 y 2020. Luego se estiman requerimientos de riego en las zonas definidas como suelo agrícola usando ecuaciones de evapotranspiración de cultivo y coeficiente de cultivo, esto para el periodo 2003-2019. Finalmente, se evaluó la importancia de la componente de riego frente a las componentes naturales mediante un balance hídrico y análisis de índice de aridez, coeficiente de escurrimiento y curva de Budyko.

Los resultados indican que la parte baja de la cuenca presenta un estrés hídrico natural y se observan indicios de propagación de la sequía en el coeficiente de escurrimiento de la subcuenca Sobrante. Se evidencia un importante aumento del índice de aridez (desde 3,8 a 4,7) entre el periodo 2013-2011 al periodo 2011-2019. Otro resultado interesante es el hallazgo de como la actividad agrícola a migrado a la parte alta de la cuenca con el fin de tener mejor acceso a fuentes hídricas.

El requerimiento de riego es de 12 [mm/año] a nivel de cuenca, menos del 5% de la precipitación, con poco potencial de afectar mayormente el balance a gran escala. Sin embargo, a menor escala, en la zona de inspección agrícola (ZAI) definida más adelante, los efectos de la demanda por riego toman una mayor preponderancia, disminuyendo la disponibilidad hídrica de la zona circundante a la actividad. Al analizar los derechos otorgados en ZAI no se encuentran los suficientes para abastecer la demanda por riego estimada, lo cual puede ser dado por la existencia de extracciones ilegales o por derechos de aguas sin coordenadas registradas en la base de datos de la DGA.

Por último, al cuantificar la oferta natural de la cuenca, se tiene que el caudal asociado a derechos de aguas (superficiales y subterráneos) representa un 250% del caudal estimado como oferta. Aquello reafirma la condición de sobreotorgamiento de la cuenca del río Petorca.

Dedicatoria

*“Dedicado a todas y todos los luchadores por el agua que son amedrentados
el día de mañana Chile será un país más digno gracias a ustedes
y gracias a los jóvenes estudiantes”*

Agradecimientos

Primero quiero agradecer a mi familia, gracias a ellos he tenido a la posibilidad de estar donde estoy, gracias a mis padres, Eugenia y Carlos, por decidir darme la vida, amarme y apoyarme a lo largo de ella. Gracias a mis hermanos, Ignacio y Nicolas, por estar siempre cuando los necesito, cuenten conmigo cada vez que lo necesiten, los quiero mucho. Gracias a todos mis familiares por ser lo más importante para mí, en especial a mis tías que me quieren como a un hijo más.

Agradecer a mis amigos que ya son casi como mi segunda familia. Mati, Pao, Dani, Mario y Caro, estas son de esas personas que te marcan desde pequeño o joven y quieres tener cerca hasta viejo, este tiempo hubiese sido más difícil sin ustedes. Gracias también a quienes aparecieron en mi época de universidad y sin duda hoy son fundamentales en mi vida: gracias Diego y gracias Cote, ustedes tienen un espacio especial en este logro universitario.

En la universidad conocí personas interesantes que han dejado enseñanzas que valoro mucho, gracias por ello y por los buenos momentos a los cabros y cabras de la 8, a los amigos y amigas de la ebria, a compas de civil y de los centros de estudiantes.

Agradezco a mi comisión que ayudo desde un principio con la conceptualización de la idea de esta tesis y siempre tuvo una disposición ejemplar para trabajar en ella.

Gracias Felipe por ser un buen consejero a lo largo de este periodo, por mostrarme una forma distinta de ser ingeniero y por abrirme las puertas de la Fundación Somos Agua, también por presentarme gente de la fundación dispuesta a ayudar generosamente sin esperar nada a cambio.

Gracias al profesor Mauricio por su motivación, por creer en un proyecto interdisciplinario y ser un investigador que inspira fe en que el mundo científico podrá generar cada vez más herramientas para un Chile mejor y justo. Gracias al profesor Miguel por su gran disposición, por su gran capacidad de guiar trabajos y ser una persona muy humana.

Agradecimientos a “FONDAP-15110009” por financiar parte de este trabajo. También agradecer al centro de investigación CR2 por integrarme como estudiante de tesis y haberme dado la posibilidad de ser parte de una linda comunidad donde trabaje de manera horizontal los grandes investigadores como Camila y Mauricio Z.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Hipótesis de trabajo	2
1.3. Objetivos	2
2. Revisión bibliográfica	3
2.1. Mapeo de cubiertas de suelo	3
2.2. Teledetección aplicada a vegetación	4
2.3. Modelo de Budyko y Balance hídrico	9
3. Caracterización de la Zona de Estudio	11
3.1. Geomorfología	11
3.2. Geología e Hidrogeología	12
3.3. Meteorología e Hidrología	14
3.4. Agricultura	16
3.5. Derechos de Agua	18
4. Metodología	20
4.1. Generación de mapas de cultivo	20
4.2. Estimar la evapotranspiración mediante el coeficientes de cultivo	26
4.3. Evaluar la influencia de la evapotranspiración de cultivos en el balance	31
5. Resultados	35
5.1. Mapas de cobertura de suelo y cultivos	35
5.2. Estimación de evapotranspiración de cultivo (ETc)	39
5.3. Balance hídrico y modelo de Budyko	45
6. Discusión	55
6.1 Cambio de cubierta terrestre y uso de suelo	55
6.2 Demanda de riego	55
6.3 Balance hídrico	57
6.4 Oferta natural	59
7. Conclusión	60
8. Bibliografía	62
9. Anexos	68

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de proceso de clasificación. (Fuente: Wegmann et al., 2016).	3
Figura 2: Absorción de bandas RED y NIR en vegetación. (Fuente: Wegmann et al., 2016).	5
Figura 3: Rangos esperados de Kc en etapas de crecimiento.	8
Figura 4: Curva de Budyko (Fuente: Gan et al., 2020).	10
Figura 5: Cuenca de Río Petorca en desembocadura y Estaciones Fluviométricas estudiadas.	11
Figura 6: Geomorfología de la cuenca de Petorca (Fuente: Castro & Espinosa, 2008).	12
Figura 7: Geología de la cuenca del río Petorca	13
Figura 8: Climograma de la cuenca del río Petorca periodo 1979-2019 (Fuente: Datos grilla climática CR2).	15
Figura 9: Caudales medidos en estaciones fluviométricas rellenados con base de datos (CR)2.	16
Figura 10: Superficie plantada de frutales tipo palto (Catastro Frutícola, CIREN).	17
Figura 11: Derechos de Aprovechamiento de Aguas Concedidos en la cuenca del río Petorca.	18
Figura 12: Nuevos Derechos de Agua concedidos por periodos quinquenales en la cuenca del río Petorca.	19
Figura 13: Flujo de trabajo para generación de mapeo de cultivo.	21
Figura 14: Flujo de trabajo para estimación de ETc.	27
Figura 15: Mapa de estaciones fluviométricas utilizadas y subcuenca Sobrante, subcuenca Pedernal, área de control 1 y 2.	31
Figura 16: Componentes del balance hídrica de cuenca.	32
Figura 17: Flujo de trabajo para balance hídrico y modelo de Budyko.	34
Figura 18: Cubierta Terrestre del 2014 obtenida a partir de Clasificación Supervisada.	35
Figura 19 : Comparación Clasificación Supervisada con Catastro Frutícola.	37
Figura 20: Comparación mapa de uso agrícola periodo 2002-2008 y 2014-2020 entre Longotoma y Hierro Viejo (AC1).	38
Figura 21: Comparación mapa de uso agrícola periodo 2002-2008 y 2014-2020 entre Hierro Viejo y Chicolco (AC2).	38
Figura 22: Histograma de Coeficiente de cultivo para verano del 2009.	39
Figura 23: Boxplot de Kcb para el periodo 2001-2008, 2009-2013 y 2014-2020. (amarillo: verano, rojo: otoño, azul: invierno y verde: primavera).	40
Figura 24: Kcb promedio píxel nivel mensual y anual.	41
Figura 27: Evapotranspiración potencial media y evapotranspiración de cultivo media en píxel de uso agrícola.	45
Figura 28: Evapotranspiración de cultivo anual en la cuenca, en área de control 1 y 2.	45
Figura 29: Balance Hídrico Anual en subcuenca Longotoma y Área de Control 1.	47

Figura 30: Diagrama de Wundt en subcuenca Longotoma y Sobrante (2003-2019).....	48
Figura 31: Comparación esorrentía y requerimientos de riego.....	49
Figura 32: Zona Agrícola de Inspección.....	50
Figura 33: Balance hídrico en Zona Agrícola de Inspección.....	51
Figura 34: Relación entre precipitación, evapotranspiración real y caudal.....	52
Figura 35: Relación precipitación, evapotranspiración y evapotranspiración potencial.....	53
Figura 36: Comparación de ET para producto SSEBop y resultados del BHN.....	53
Figura 37: Regresión de ET entre producto satelital SSEBop y resultados del BHN.	54
Figura 38: Temperatura media anual en la cuenca del río Petorca.	68
Figura 39: Precipitación media anual en la cuenca del río Petorca.	68
Figura 40: Regresión lineal entre ET0 calculada con estaciones INIA y PET de Hargreaves.....	69
Figura 41: Comparación entre producto grillado CR2 y estación meteorológica Hierro Viejo periodo 2003-2019.	70
Figura 42: Valores anuales de ET real en producto SSEBop para puntos de inspección vegetación nativa.....	70
Figura 43: Puntos de inspección de vegetación nativa.....	71
Figura 44: Caudales medios mensuales en 2003-2019.....	72
Figura 45: Promedio de caudales medios mensuales para cada mes en 2003-2009.	72
Figura 46: Diagrama de Wundt en Área de Control 1 (2003-2019).	73
Figura 47: Balance Anual Área de Control 2.	73
Figura 48: Diagrama de Wundt en Área de Control 2 (2003-2019).	74
Figura 49: Balance Anual Hierro Viejo.....	74
Figura 50: Diagrama de Wundt en Subcuenca Hierro Viejo (2003-2019).....	75
Figura 51: Balance Anual Sobrante.....	75
Figura 52: Diagrama de Wundt en Subcuenca Sobrante (2003-2019).	76
Figura 53: Balance Anual Pedernal.....	76
Figura 54: Diagrama de Wundt en Subcuenca Pedernal (2003-2019).....	77
Figura 55: Diagrama de Wundt en Zona agrícola de inspección.....	77

Índice de tablas

Tabla 1: Datos Geomorfología por Subcuenca.	12
Tabla 2: Resultados BHN en la cuenca del Rio Petorca (BHN, 2017).	16
Tabla 3: Cultivos Frutales en la Comuna de Petorca (Fuente: Catastro Frutícola, CIREN).	17
Tabla 4: Tipos de derechos de agua otorgados en cuenca de Petorca.	18
Tabla 5: Evaluación de precisión en cada cobertura vegetal.	36
Tabla 6: Área clasificada como cultivo para cada cobertura vegetal.	36
Tabla 7: Área de uso agrícola para cada mapa de uso agrícola	37
Tabla 8: Consolidados de Resultados del Balance Hídrico.	48
Tabla 9: Oferta Natural de la cuenca y demanda de aprovechamiento de aguas.	59
Tabla 10: Resultados Balance anual en ZAI.	78
Tabla 11: Resultados Balance medio mensual en ZAI.	78

1. Introducción

1.1. Motivación

A partir del año 2010, las precipitaciones medias anuales en Chile Central han mostrado déficits entre el 55% y 77% con relación a un año promedio. En la zona, usualmente la disminución de precipitaciones generaba 1 o 2 años secos, sin embargo, en la última década se han constatado largos períodos de tiempo de déficit, a este comportamiento climático se le ha sido denominado mega-sequía en Chile (Garreaud et al., 2017).

Se ha evidenciado que los modelos climáticos que simulan el forzamiento histórico del clima sólo logran explicar la mitad del déficit de precipitación, siendo al menos un cuarto del déficit atribuible al cambio climático de origen antropogénico (Boisier et al., 2016). Es esperable que esta condición climática siga influyendo en el escenario hídrico chileno en el corto y mediano plazo.

Ante esta adversa situación de sequía un manejo eficiente y consciente del recurso se vuelve fundamental. Por el contrario, de no existir un órgano capaz de articular medidas de mitigación, las afectaciones pueden poner en peligro sectores económicos fundamentales y la vida misma de las personas. Esto es lo que ha estado ocurriendo en Chile y la cuenca de río Petorca es un caso emblemático de la crisis hídrica que afecta al país.

En Muñoz et al. (2020) se hizo una reconstrucción histórica de caudales en el río Petorca, esto mediante registros de anillos de árbol, se indica que la Mega-Sequía es el periodo más seco en los últimos 700 años de registro. Además de este contexto climático, la condición crítica de la cuenca se ha visto exacerbada producto de la actividad agricultura intensiva y la débil gestión de aguas.

El foco del conflicto se sitúa en las zonas rurales. El abastecimiento para consumo humano es suplido por las iniciativas de comité y cooperativas de agua potable rural (APR), estas han visto el descenso del nivel de los pozos que abastecen el sistema sanitario. Se constata una competencia por el recurso hídrico entre las iniciativas de APR y el sector agrícola, la demanda por riego de los cultivos se intensifica en primavera y verano siendo suministrada principalmente por aguas subterráneas, misma fuente que suministra a las iniciativas de APR (Aldunce et al. 2017).

La escasez también afecta fuertemente al sector agrícola, la búsqueda de una fuente segura de agua ha generado el movimiento de las zonas agrícolas hacia la parte alta de la cuenca, además, se han reconocido extracciones ilegales y reiteradas denuncias de ello (CNR, 2013b). Actualmente, en Chile, no se tiene la capacidad de fiscalización y monitoreo para detener las extracciones ilegales.

La utilización de percepción remota para la evaluación de recursos naturales es un campo en constante crecimiento, existen avances tecnológicos ligados a los sensores espaciales que han permitido aumentar la resolución de imágenes y la cantidad de sensores en órbita. Esta tecnología satelital amplia un campo de estudio

que permite cuantificar los requerimientos hídricos de los predios agrícolas siendo un gran apoyo a la fiscalización de extracciones ilegales.

En este contexto nace el presente trabajo, que tiene como objetivo principal analizar la influencia de la agricultura de riego en el balance hídrico de la cuenca del río Petorca mediante la estimación de la evapotranspiración de cultivo, la cual es una componente clave y compleja de estimar dentro del balance hídrico (Nouri et al. 2016).

Para llevar a cabo el objetivo, se aplicará una la metodología de estimación de demanda por riego según el enfoque de coeficientes de cultivos que fue difundido en FAO56 (Allen et al. 1998) y recientemente estimable mediante análisis satelitales a partir de índices de vegetación y datos meteorológicos (Pôças et al.2020).

1.2. Hipótesis de trabajo

La hipótesis de trabajo formulada de esta memoria pretende verificar si en Petorca, la fruticultura de riego ha generado un fuerte déficit en el balance hídrico modificando los procesos hidrológicos de la cuenca.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de esta memoria consiste en analizar la influencia de la intensificación de la fruticultura de riego en el balance hídrico de la cuenca mediante la estimación de evapotranspiración de cultivo y evaluar su relevancia con respecto a las demás componentes.

Objetivos Específicos

Con el fin de alcanzar el objetivo principal se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la intensificación de la fruticultura de riego mediante análisis del cambio de cobertura y uso de la tierra agrícola.
- Estimar la evapotranspiración de cultivo mediante el cálculo de coeficientes de cultivo usando el método de índices de vegetación.
- Evaluar la influencia de la evapotranspiración de cultivos en un modelo de balance hídrico simple y analizar las variaciones en índices de aridez, coeficiente de escorrentía y la curva de Budyko.

2. Revisión bibliográfica

En este capítulo se exhibe parte de la revisión bibliográfica realizada en el marco de investigación del presente trabajo. Se muestran las referencias necesarias para plantear la metodología presentada en el capítulo 4, la revisión presentada se ordena según primer, segundo y tercer objetivo específico.

Primero se definen conceptos clave sobre el mapeo de cobertura terrestre, luego se muestran las referencias más influyentes en este trabajo en cuanto a la estimación de requerimientos de riego mediante teledetección, finalmente las investigaciones consideradas para establecer un marco de referencia de Budyko y desarrollar un balance hídrico simple en la cuenca.

2.1. Mapeo de cubiertas de suelo

El concepto de cubierta de suelo (Land Cover), se refiere a las coberturas biológicas o físicas presentes sobre la superficie de la Tierra, es importante diferenciarlo del concepto de uso de suelo (Land Use) que se refiere a la forma en que las personas usan un terreno en particular.

Para la producción de mapas confiables de coberturas de suelo es necesario que cada país tenga la clasificación más apropiada a sus propias condiciones terrestres, dichas clases deben adaptarse a la diversidad propia de cada ecorregión. Sin embargo, es importante que el esquema de clasificación pueda compararse con otros sistemas a nivel internacional, por lo que en Hernández et al. (2016) se crea un esquema con dichas características, marcando un precedente en materia de clasificación de suelo en Chile.

Clasificación de cobertura de suelo

En el libro “Remote Sensing and GIS for ecologists: Using Open Source Software” (Wegmann et al., 2016), se dedica un capítulo a la generación de coberturas terrestre donde se describen detalladamente pasos para clasificar imágenes, este procedimiento fue el que guio la etapa de clasificación en el presente trabajo. “Una clasificación de cobertura terrestre es solo una conversión de múltiples capas de entrada en grupos de píxeles con características similares” (Wegmann et al., 2016), este concepto se ilustra en la figura 1.

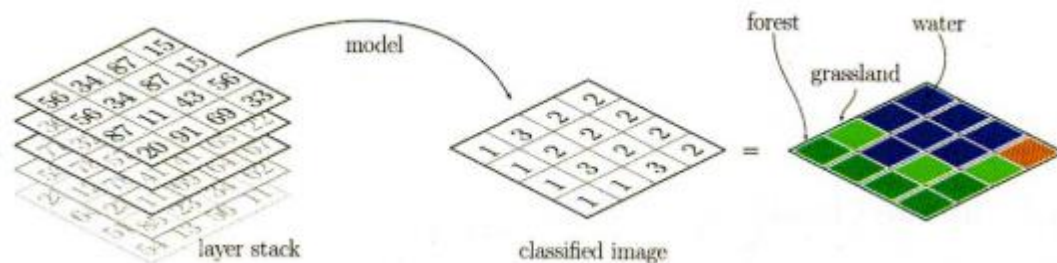


Figura 1: Diagrama de proceso de clasificación. (Fuente: Wegmann et al., 2016).

Los métodos de clasificación pueden ser manuales, siendo la fotointerpretación el más común, o automáticos que usan algoritmos computacionales. En cuanto a los algoritmos computacionales de clasificación existen dos grandes opciones, clasificación supervisada y no supervisada.

Estudio de cubierta de suelo en Chile

De los primeros mapas de cobertura terrestre realizados de Chile se presenta el trabajo de Echeverría et al. (2006) donde se realizó clasificación supervisada en tres escenas (1975-1990-2000) obtenidas del sensor Landsat. Se evaluaron patrones de deforestación y fragmentación en la cordillera costera del centro-sur de Chile, específicamente entre el río Maule y el río Cobquecura, resultando una reducción del 67% del bosque nativo en la zona.

Otros estudios han investigado localmente el cambio de cobertura terrestre en las regiones de Valparaíso, O'Higgins y Metropolitana (Schulz et al., 2010 y Puertas et al., 2013), parte de las regiones del Maule y Bío-Bío (Nahuelhual et al., 2012) y parte de la Región de la Araucanía (Altamirano et al., 2013).

El trabajo realizado en Zhao et al. (2016) marca un precedente en el estudio de cubiertas terrestre en el país, obteniéndose como resultado final el producto "LandCover2014Chile". Las etapas de mapeo se dividen a grueso modo en recolección de datos (imágenes satelitales), pre-procesamiento de datos, diseño de esquema de clasificación, diseño y aplicación de muestreo multi-temporal, validación y evaluación de precisión.

Aplicación de Google Earth Engine para clasificación de coberturas

Google Earth Engine es una plataforma de análisis geoespacial a escala planetaria basada en información contenida en la nube, dada sus características representa un gran aporte al desarrollo operacional de la teledetección y brinda acceso a recursos computacionales de alto nivel especializados en el análisis de datos geoespaciales (Gorelick et al., 2017).

Esta plataforma ofrece la aplicación de varios algoritmos de clasificación supervisada, estos fueron evaluados y comparados por sus desarrolladoras con clasificadores de redes neuronales generados en ambientes externos a la plataforma. El algoritmo con mayor precisión general (OA) fue *Classification and Regression Tree* (CART) alcanzando una precisión de 75% (Shelestov et al., 2017).

2.2. Teledetección aplicada a vegetación

Índices de vegetación (IV)

Los índices de vegetación son ecuaciones que relacionan las bandas del espectro electromagnético de una imagen para percibir atributos de la vegetación. Se ha probado que existe una fuerte correlación entre los índices de vegetación y procesos

biofísicos de las plantas como cubierta fraccional (f_c), índice de área foliar (LAI) y contenido de clorofila (Glenn et al. 2011).

En la figura 2 se pueden ver dos casos de absorción de luz para dos árboles en distintos estados de vigorosidad. RED representa el valor de reflectancia de banda roja y NIR de la banda del infrarrojo cercano. La luz roja es fuertemente absorbida por la clorofila de las hojas y la infrarroja es reflejada por la estructura mesófila (en medio de la hoja), por lo que es esperable que la vegetación más densa tenga menores valores de RED y mayores valores de NIR .

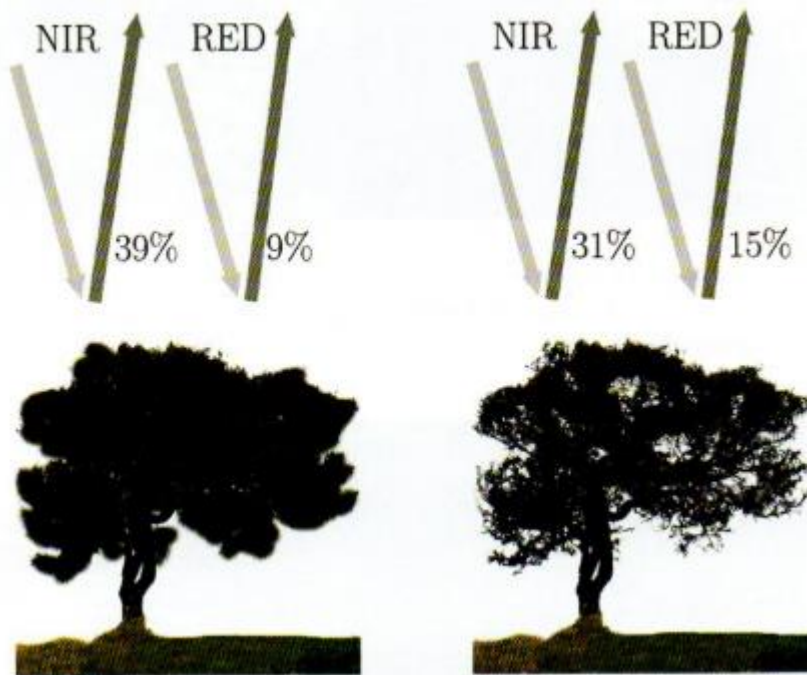


Figura 2: Absorción de bandas RED y NIR en vegetación. (Fuente: Wegmann et al., 2016).

El más común de los índices es el índice de vegetación de diferencia normalizada ($NDVI$), este se calcula según la ecuación (1). Los valores de $NDVI$ varían entre -1 y 1, para los negativos se les suele clasificar como agua, para los valores ligeramente positivos se le clasifica como suelo desnudo y para los valores más altos se les clasifica como vegetación.

$$(1) \quad NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Otros dos índices frecuentemente usados son el índice de vegetación ajustado al suelo ($SAVI$) en la ecuación (2) y índice de vegetación mejorado (EVI) en la ecuación (3). En el caso de $SAVI$, L es un factor de calibración que da cuenta de los efectos de fondo de suelo (generalmente estimado en 0.5), además, este índice permite extender

el rango sobre el cual el *IV* aumenta su densidad de vegetación y es menos sensible que el *NDVI* a cambio de reflectancia del suelo de fondo (Huete 1988).

$$(2) SAVI = \frac{(NIR-RED)(1+L)}{(NIR+RED+L)}$$

En cuanto a *EVI*, *C1* y *C2* son coeficientes diseñados para corregir la resistencia a aerosoles usando el valor de reflectancia de la banda azul (establecidos en -6 y 7.5 respectivamente), *G* es un factor de ganancia (establecido en 2.5) y *L* es un dosel de ajuste de fondo (establecido en 1). Este índice presenta una mayor sensibilidad a las condiciones de vegetación con alta biomasa (Huete et al. 1999).

$$(3) EVI = \frac{G(NIR-RED)}{(NIR+C1*RED+C2*BLUE+L)}$$

Evapotranspiración de referencia (*ET₀*)

La evapotranspiración de referencia es la tasa de pérdida de humedad sobre una superficie de referencia que corresponde a un cultivo hipotético de césped con características específicas, este concepto se introdujo para estudiar la demanda de cultivo de la atmósfera independiente del tipo de cultivo y sus prácticas de manejo (Allen et al., 1998).

Dada la importancia de tener un método estándar para el cálculo de evapotranspiración de referencia se derivan ecuaciones para estimar evaporación y posteriormente la evapotranspiración basada en la resolución del balance energético y transferencia de masa. El resultado del trabajo llevado por FAO formula la ecuación de Penman-Monteith, la cual es ampliamente aceptada en el campo de la investigación como el estándar para estimar evapotranspiración de referencia aplicado a requerimientos de riego. La ecuación (10) usa datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento.

$$(4) ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u)}$$

Donde R_n es la radiación solar neta en la superficie de cultivo y G es el flujo del calor del suelo, ambos en unidades de $[MJ/m^2d]$, T es la temperatura media del aire a dos metros de altura en unidades de $[^{\circ}C]$, u es la velocidad del viento a 2 metros de altura en $[m/s]$, e_s es la presión de vapor de saturación y e_a es la presión real de vapor, ambos en unidades de $[kPa]$, γ es la constante psicrométrica y Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor, ambos en unidades de $[kPa/^{\circ}C]$.

Estimación de evapotranspiración (*ET*)

En Nouri et al. (2013) se hace una recopilación de las distintas técnicas de teledetección para predecir evapotranspiración, las que son clasificadas en cuatro tipos de métodos mencionándose las características principales de cada uno, ellos son: a) Métodos empíricos directos, b) Métodos residuales, c) Métodos de inferencia

o índices de vegetación y d) Modelos determinísticos. Se analizan ventajas y desventajas de los distintos enfoques siendo finalmente recomendado el método de inferencia para la estimación de la evapotranspiración de cultivo en sistemas agrícolas. Este método es el mejor evaluado por su capacidad de observar vegetación heterogénea, por una menor cantidad de parámetros a medir y su simplicidad en comparación a los demás métodos que se basan en modelos de balance de energía o modelos de transferencia que tienen más variables de entrada y necesitan calibraciones muy detalladas (Nouri et al. 2013).

El método de inferencia o índices de vegetación aplica teledetección para medir un factor de ajuste de la planta que modifica la evapotranspiración de referencia (ET_0) y estima evapotranspiración real (ET_r). Se requiere conocer características del cultivo y datos meteorológicos (radiación, temperatura, humedad y viento).

En los primeros experimentos, donde se usaban lisímetros para captar la evapotranspiración de los cultivos, se estudió de manera empírica el ajuste para un solo tipo de cultivo, estos son producidos en condiciones agronómicas óptimas. Con el uso de lisímetros se midió ET , usando datos meteorológicos se calculo ET_0 y se ajustan buscando una relación con IV estableciendo un coeficiente de transpiración (T_c). Dicha relación es definida en la ecuación en la ecuación (4) (Choudhury et al., 1994).

$$(5) ET = ET_0 * (IV')^n = ET_0 * T_c$$

Donde IV' es el índice de vegetación normalizado entre 0 (para suelo desnudo) y 1 (para vegetación completamente transpiraste y sin estrés hídrico). Se encontró que el índice $SAVI$ estaba casi linealmente relacionados con la evapotranspiración por lo tanto el exponente del coeficiente de transpiración es 1. Para $NDVI$ el exponente es menor a 1 por que este índice se satura para altos valores de LAI (Choudhury et al., 1994).

Otro enfoque para estimar evapotranspiración mediante índices de vegetación es el cálculo de coeficientes de cultivo, a diferencia del coeficiente de transpiración, este incorpora la evaporación del suelo y el estrés hídrico de las plantas.

Coeficientes de cultivo

Este es un enfoque de estimación de ET , este concepto fue ampliamente difundido en la guía FAO-56 (Allen et al., 1998) y define la evapotranspiración de un cultivo (ET_c) como la evapotranspiración potencial (ET_0) por un coeficiente (K_c) como es definido en la ecuación (5.). En la ecuación (6) se muestra la definición propuesta para los coeficientes de cultivos.

$$(6) ET_c = K_c * ET_0$$

$$(7) K_c = K_{cb}K_s + K_e$$

Donde K_{cb} representa la componente de la transpiración basal y se le denomina coeficiente de cultivo basal, K_s cuantifica la reducción de transpiración por estrés hídrico (también aplicable a estrés por salinidad) y K_e es el coeficiente de evaporación del suelo.

En la figura 4 se ilustra la evolución del coeficiente de cultivo a lo largo sus distintas etapas de crecimiento, esto para un rango (color gris) que varía según el tipo de cultivo. Se puede observar que el inicio del crecimiento es el momento con menor coeficiente, también se puede ver que luego del desarrollo del cultivo en la parte media de la temporada es el punto en que el coeficiente de cultivo es máximo.

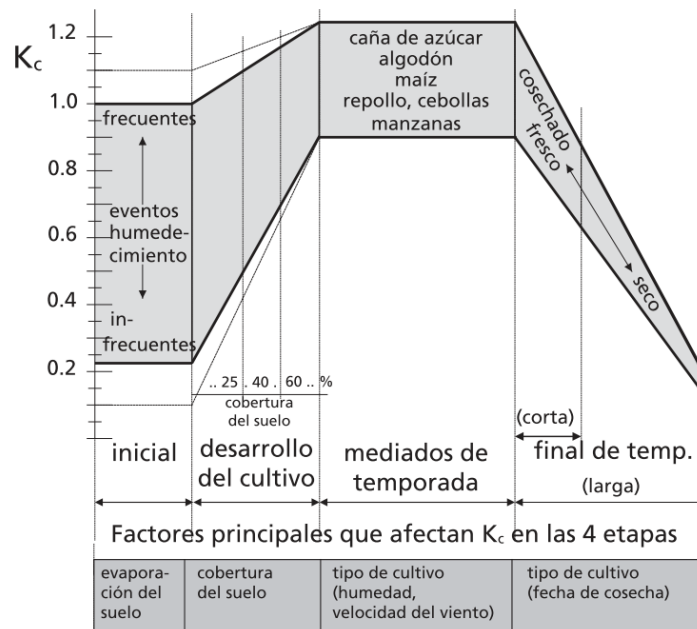


Figura 3: Rangos esperados de K_c en etapas de crecimiento. (Fuente: Allen et al., 1998).

Cuando los coeficientes de cultivos (K_c) son derivados del cálculo de índices de vegetación se les simboliza con K_{c-vi} , esto implica usar ecuaciones que determinen el coeficiente de cultivo basal (K_{cb-vi}) mediante índices de vegetación. Si bien las ventajas conceptuales y operativas de este enfoque de cálculo de coeficiente de cultivo basal no son cuestionadas hoy en día, la gran variabilidad entre las relaciones K_{cb} y VI hace que no exista un consenso sobre una única ecuación que describa K_{c-vi} , por el contrario, existen muchas propuestas desde el ámbito de la investigación.

En Pôças et al. (2020) se puede encontrar una completa recopilación de las propuestas para dicha relación $K_{cb} - VI$. Una propuesta de interés en dicha investigación es la de Allen y Pereira (2009) que incluye un coeficiente de densidad de cultivo (K_d) a la estimación de K_{cb-vi} . Este coeficiente integra el impacto de la fracción de la cobertura del suelo y la altura del cultivo en estimación. Dicho concepto es rescatado en Pôças et al. (2015) para utilizar el procedimiento de cálculo de K_{cb-vi} que sigue a continuación en las ecuaciones (7)

$$(8) K_{cb-vi} = K_{c_min} + K_d \left(\frac{VI - VI_{min}}{VI_{max} - VI_{min}} \right)$$

Donde K_{c_min} es el coeficiente de cultivo para suelo desnudo, K_d el coeficiente de densidad de cultivo, VI es el índice de vegetación percibido en el cultivo, VI_{max} es el índice de vegetación para la cobertura vegetal máxima y VI_{min} es el índice de vegetación para una cobertura vegetal mínima. En la metodología citada K_{c_min} es evaluado entre 0.1 y 0.15, se utilizan los siguientes valores para el rango de índices de vegetación $NDVI_{max} = 0.9$, $NDVI_{min} = 0.2$, $SAVI_{max} = 0.09$ y $SAVI_{min} = 0.75$.

El coeficiente de densidad de cultivo (K_d) incorpora la densidad de vegetación, la forma de coeficiente de densidad es curvilíneo con el índice de área foliar (IAF) o la fracción de cobertura del suelo (Allen et al., 2009). Su cálculo se puede realizar mediante distintas ecuaciones dependiendo de la información disponible, en Allen et al. (2009) se presentan dos ecuaciones de las cuales la más relevante para este estudio es la ecuación (8).

$$(9) K_d = 1 - e^{-0.7 * IAF}$$

Donde IAF es el índice de área foliar que se define como el área de vegetación sobre el área de suelo, este parámetro suele ser medido y se puede ajustar su valor según un modelo lineal con respecto a índices espectrales. En la memoria de título de Rivero (2020) se encuentra un ajuste de IAF para plantaciones de palto de diferente cobertura y vigor en la comuna de Peumo, Región de O'Higgins. Se evaluaron varios índices espectrales siendo el mejor evaluado $SAVI$ con un $R^2 = 0.87$, la regresión se presenta en la ecuación (9).

$$(10) \quad IAF = 4,3 * SAVI - 0.7$$

2.3. Modelo de Budyko y Balance hídrico.

Budyko 1958, se postula que para entender el equilibrio hídrico y el clima se puede suponer que la evapotranspiración anual media está determinada por la precipitación y la energía disponible para evapotranspirar (ETP), este supuesto deriva en un modelo de balance hídrico simple conocido como la curva de Budyko. A partir de esta formulación se puede estimar la componente de ET o caudales dependiendo de los datos disponibles (Zhang, 2008).

La curva de Budyko es una relación empírica entre evapotranspiración y precipitación, dicha relación es una parametrización analítica simplificada del equilibrio hídrico en función del índice de aridez de captación. En Gentine et al. (2012) se presenta la curva de Budyko como la ecuación (11).

$$(11) \quad \frac{[ET]}{[P]} = \left([\emptyset] \tanh \left(\frac{1}{[\emptyset]} \right) (1 - \exp(-[\emptyset])) \right)^{1/2}$$

Donde ET es evapotranspiración anual media de la cuenca, P es precipitación anual media y ϕ el índice de aridez. Este último es definido como el cociente entre la evapotranspiración potencial y la precipitación (12), representa una relación entre la demanda y oferta atmosférica de agua y se utiliza para caracterizar clima.

$$(12) \quad [\phi] = [PET]/[P]$$

Esta formulación nace a partir del balance dado en la ecuación (13).

$$(13) \quad \frac{\Delta S}{\Delta T} = P - ET - Q$$

Al plantear el balance hídrico de la cuenca se genera un modelo que puede ser enfocado para determina ET real. Es necesario suponer que en el largo plazo existe un equilibrio hídrico entre las entradas y salidas del sistema, supuesto ampliamente aceptado para cuencas en condiciones naturales o de poca intervención, esto implica que la variación del almacenamiento es cero en un periodo largo de tiempo y resulta la ecuación (14).

$$(14) \quad \Delta S = 0 \rightarrow Q = P - ET$$

Los modelos de Budyko proporcionan un marco para analizar interacciones clima-cuenca, se han utilizado ampliamente para cuantificar el rol de la vegetación estudiando las variaciones anuales de las componentes e incluso se han incorporado impactos del cambio climático dentro de su parametrización (Gan et al., 2020). En la figura 5 se puede observar la curva de Budyko para distintas parametrizaciones según el tipo de vegetación predominante en la cuenca (donde w un coeficiente de disponibilidad de agua).

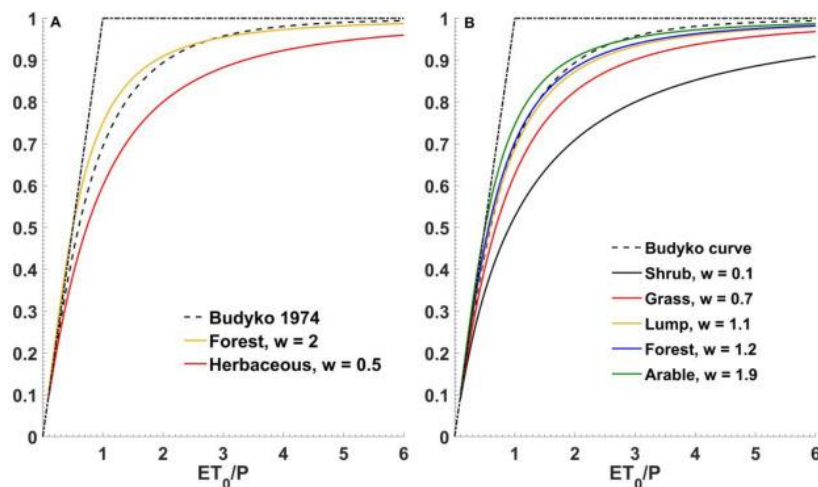


Figura 4: Curva de Budyko (Fuente: Gan et al., 2020).

3. Caracterización de la Zona de Estudio

La zona de estudio es la cuenca del río Petorca hasta su desembocadura en la costa del océano Pacífico, en el Figura 5, se presenta un mapa de la delimitación de la cuenca junto a las estaciones fluviométricas estudiadas, las estaciones son río Petorca en Longotoma (rojo), río Petorca en Hierro Viejo (amarillo), río Sobrante en Piadero (verde) y río Pedernal en Tejada (celeste), cada una de ellas determina el punto de salida de una subcuenca, estas zonas son definidas con mayor detalle en el siguiente capítulo. Además, se puede observar en el mapa el punto de salida de la cuenca, la red hidrográfica principal y una estratificación de altitud en tres tramos.

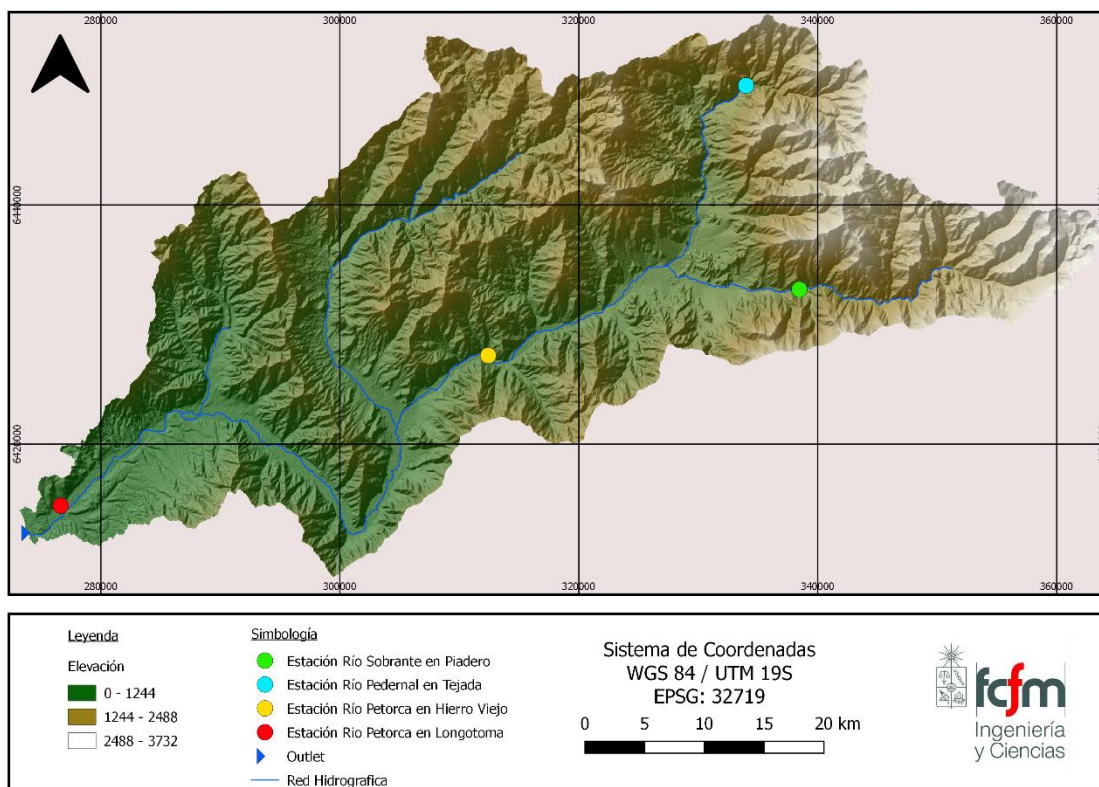


Figura 5: Cuenca de Río Petorca en desembocadura y Estaciones Fluviométricas estudiadas.

Este capítulo muestra las principales características que permiten generar la conceptualización de la cuenca y sus subcuencas. Los aspectos relevantes para dicho propósito son la caracterización de la geomorfología, geología e hidrogeología, meteorología e hidrología, derechos de aguas concedidos y actividad agrícola. Los antecedentes considerados de menor relevancia se incluyen en la sección de Anexos.

3.1. Geomorfología.

En la tabla 1 se muestran los principales datos morfológicos de cada subcuenca delimitada por su correspondiente estación fluviométrica como punto de salida. Destacan las pendientes medias que varían entre 38 [m/m] a 45 [m/m], este es un

indicador de una morfología escarpada, estando las pendientes más altas en la subcuenca del río Petorca en Hierro Viejo con una máxima de 331 [m/m].

La longitud del río Petorca es de aproximadamente 112 [km] desde la desembocadura hasta la alta montaña, el valle alcanza un ancho máximo de 1.4 [km] con un promedio de 650 [m], se trata de una cuenca con altas pendientes y un valle angosto (Castro & Espinosa, 2008).

Tabla 1: Datos Geomorfología por Subcuenca.

Geomorfología	Petorca en Longotoma	Petorca en HiejoViejo	Sobrante en Piadero	Pedernal en Tejada
Área [km2]	1937	948	242	81
Altura min [msnm]	10	423	1130	1318
Altura max [msnm]	3737	3737	3737	3453
Altura med [msnm]	1327	1793	2607	2457
Pendiente max [m/m]	331	331	226	193
Pendiente med [m/m]	38	40	42	45
Longitud Cauce [km]	108	56	25	8

En la figura 6 se presenta una caracterización geomorfológica de las distintas zonas de la cuenca. Es claro como predominan las zonas de montaña y cerro, la llanura aluvial o valle representa una pequeña parte de la totalidad de la cuenca, es relevante la presencia de quebradas y zonas aluvial-coluvial al margen del valle.

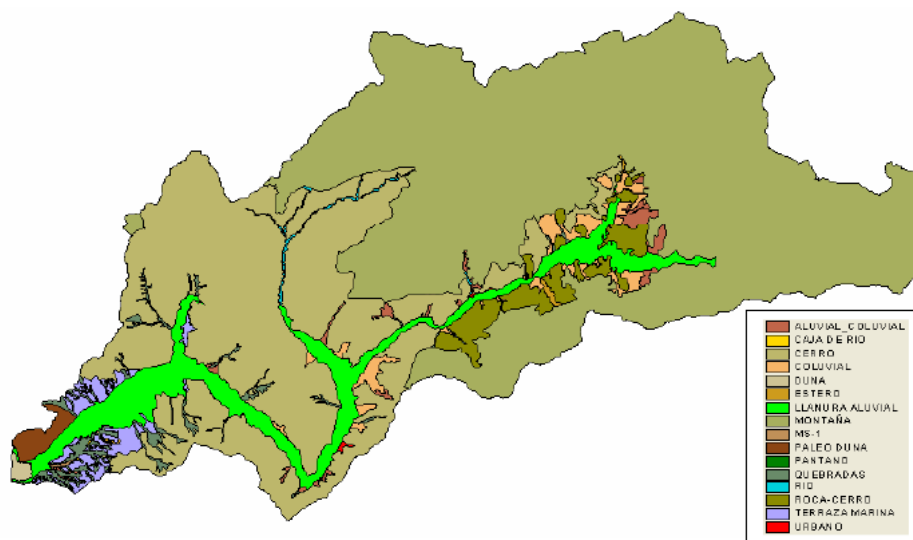


Figura 6: Geomorfología de la cuenca de Petorca (Fuente: Castro & Espinosa, 2008).

En la zona baja de la cuenca existe la presencia de terrazas marinas que tienen una importancia relacionada a la retención de flujo que permite la presencia de pequeños pantanos, también se encuentran zonas de dunas e importantes quebradas.

3.2. Geología e Hidrogeología.

En la figura 7 se presenta la geología de la cuenca estudiada, se puede percibir una variabilidad espacial importante, la única formación que muestra una constante a lo largo de la cuenca es la zona del valle que está formada por los depósitos aluviales y coluviales.

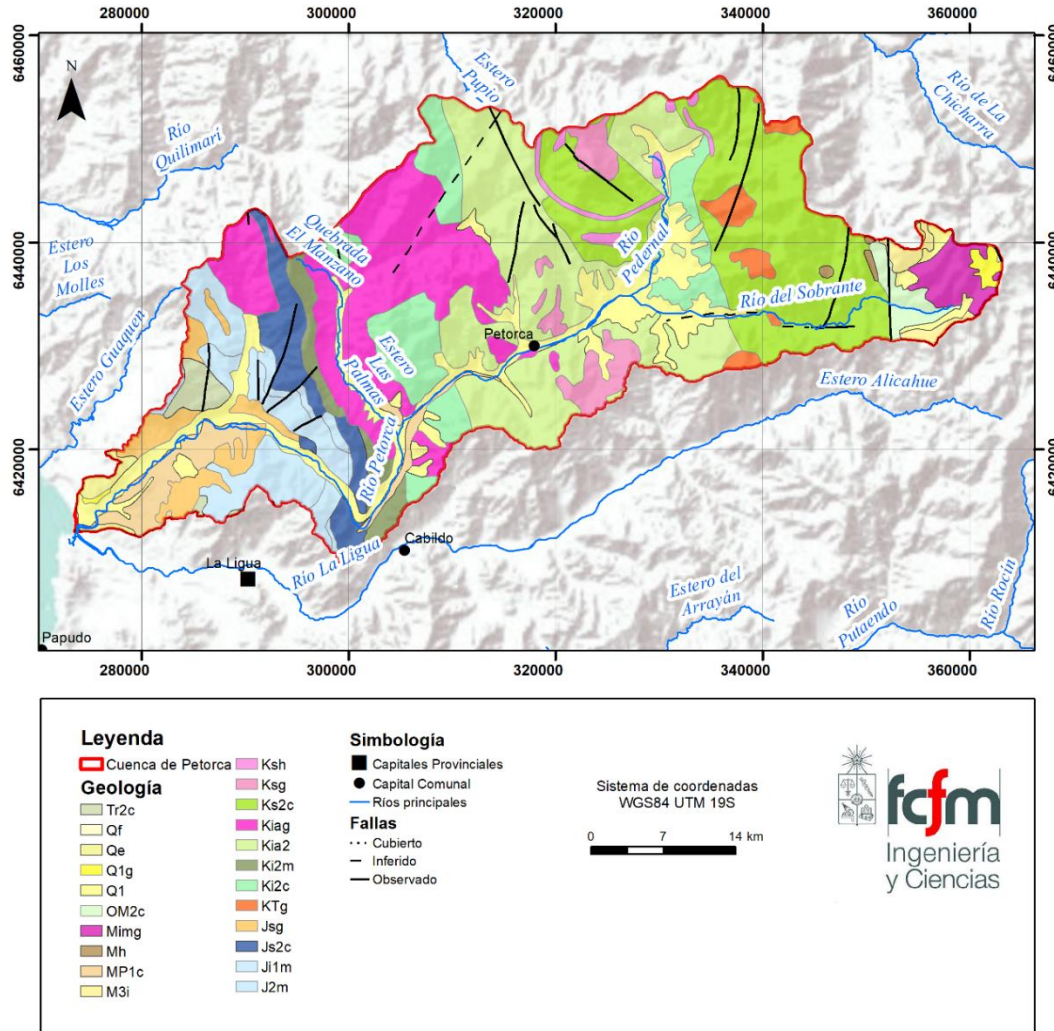


Figura 7: Geología de la cuenca del río Petorca.

En la zona alta de la cuenca, donde se encuentran las subcuencas Sobrante y Pedernal, existe una predominancia de secuencias volcanosedimentarias continentales, también hay una importante presencia de rocas volcánicas generadas en un ambiente intrusivo en el punto más alto de la subcuenca Sobrante. En la confluencia del río Pedernal con el río Sobrante se muestran secuencias sedimentarias y volcánicas continentales. En esta zona se encuentran fallas con importante longitud y con dirección norte-sur.

A menor altitud, en la parte media de la cuenca hay una predominancia de secuencias sedimentarias y volcánicas del Cretácico inferior con presencia de andesitas y basaltos muy presente en la cordillera de la costa entre las regiones III y

Metropolitana. La subcuenca asociada al estero las Palmas presenta una formación principalmente por secuencias volcánicas en ambiente plutónico asociado a rocas doritas y monzodoritas de proxeno, típicas de la cordillera de la costa entre las II y V región.

Ya en la parte baja de la cuenca es notable la presencia secuencias volcánicas y sedimentarias marinas provenientes del periodo Jurásico. En esta zona los depósitos fluviales cobran mayor preponderancia siendo la parte con mayor ancho de valle. La geología se vincula principalmente con el reconocimiento de las zonas con mayores capacidades de infiltración, es decir, las zonas con características sedimentarias, depósitos y fallas geológicas.

3.3. Meteorología e Hidrología

Los datos de precipitación y temperatura se obtienen a partir del producto grillado contenido por el centro de investigación CR2 (Center for Climate and Resilience Research, 2021b), el producto seleccionado entrega la precipitación en todo el territorio nacional a nivel mensual para el periodo 1979-2019 con una escala espacial de aproximadamente 5 kilómetros.

En la figura 8 se presenta el climograma de la cuenca. La cuenca de Petorca tiene una precipitación anual promedio de 340 [mm/año] y una temperatura media anual de 12 [°C]. Se muestra que julio es el mes con mayor precipitación mensual con 80 [mm], el mes con menor es enero con 2 [mm].

Cerca del 80% de las precipitaciones se concentran entre los meses de mayo a agosto, el resto de los meses las precipitaciones son menores a 20 [mm]. Esta caracterización considera datos desde el año 1979 al 2019 y sirve para ser un punto de comparación con las precipitaciones registradas para el periodo de estudio (2003-2019).

En cuanto a las temperaturas julio es el mes más frío con una temperatura media de 8 [°C], enero es el mes más caluroso con 17 [°C], por lo que se tiene una amplitud térmica de 9 [°C]. La temperatura mínima anual es de 6.4 y la temperatura máxima anual es de 18 [°C]. Las temperaturas son utilizadas para caracterizar el clima de la zona.

Según la clasificación climática de Beck et al. (2018), basada en Köeppen (1948), la cuenca se encuentra en una zona de transición entre el clima Bsk (semiárido frío) a Csa (Templado con veranos secos y calurosos). Se estima que para el periodo 2071-2100 la zona se encontrara en una transición del clima desértico a semiárido.

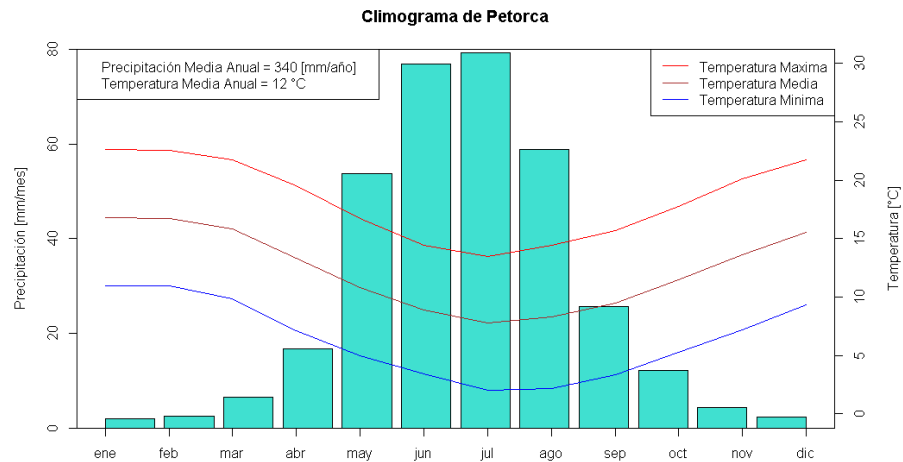


Figura 8: Climograma de la cuenca del río Petorca periodo 1979-2019 (Fuente: Datos grilla climática CR2).

Los datos observados de caudales se obtienen a partir de 4 estaciones fluviométricas: Río Petorca en Longotoma, Río Petorca en Hierro Viejo, Río Sobrante en Piadero y Río Pedernal en Tejada, estas tienen ID 5120001, 5110002, 5100001 y 5101001 correspondientemente. Para poder disponer de las series completas es necesario realizar un relleno usando la base de datos del CR2MET que contiene todas las estaciones de Chile, se busca la estación con el mejor coeficiente de correlación para cada estación y se procede a completar usando la regresión entre los datos históricos de ambas estaciones.

En la figura 9 se presentan los caudales medidos mensuales en las estaciones fluviométricas. Se puede observar un comportamiento nivo-pluvial en las estaciones Sobrante y Hierro Viejo, esto dado por su máxima de escorrentía en la estación primaveral (desfasado de las precipitaciones presentadas en la figura 8) y la presencia de un flujo invernal. Para la estación Longotoma se observa un comportamiento pluvio-nival, dado por su preponderancia de la escorrentía invernal y con presencia de flujo primaveral.

En cuanto al balance hídrico de la cuenca, se utilizan los resultados del Balance Hídrico Nacional (BHN, 2017) con el fin de tener un punto de comparación y validación, el BHN determina las distintas componentes del balance mediante un modelo hidrológico de capacidad de infiltración variable (VIC) a partir de forzantes meteorológicas. En la tabla 2 se muestran los resultados a nivel agregado del Balance Hídrico Nacional en la cuenca del Río Petorca.

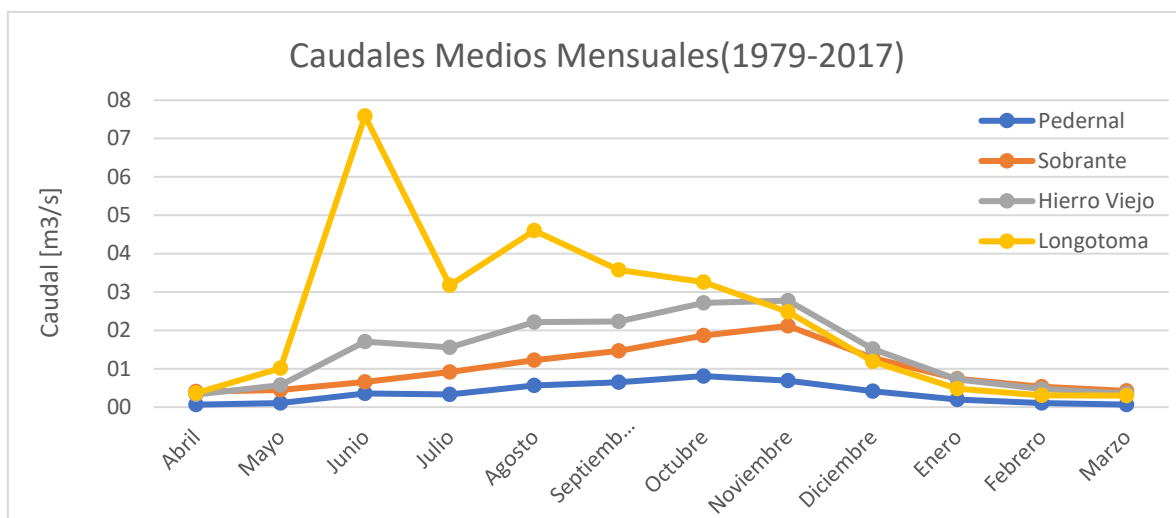


Figura 9: Caudales medidos en estaciones fluviométricas rellenados con base de datos (CR)2.

Tabla 2: Resultados BHN en la cuenca del Rio Petorca (BHN, 2017).

Balance Hidrico Nacional - Cuenca Rio Petorca									
Pp	Q (VIC)	ET (VIC)	ET (RIEGO)	Q (GLACIAR)	q (RECARGA)	ETP (VIC)	TP (HARGRAVE)	T	ERROR
[MM/AÑO]								[°C]	%
265	76.3	189.3	6	0	74.3	1592	1409	13.5	0

3.4. Agricultura

La agricultura es la principal actividad económica de la cuenca, para el año 2011, esta actividad, demanda de 1.47 [m³/s] de los recursos hídricos, lo cual representa cerca del 92% de la demanda antrópica total de la cuenca en contraste con los 0.05 [m³/s] del agua potable (3%) y los 0.08 [m³/s] de la demanda minera (5%) (DGA, 2011).

Según los datos del Censo Agropecuario y Forestal del año 2007, en la comuna de Petorca cerca del 87% de la superficie cultivado corresponde a frutales, un 6% a forraje y solo un 4% a hortalizas. La Encuesta Hortícola del INE indica que en la región de Valparaíso la superficie de hortalizas ronda los 10.000 a 8.000 [ha] entre el 2007 al 2019, lo cual podría considerarse despreciable ante las más de 300.000 [ha] asociadas a fruticultura reportadas en el Catastro Frutícola del año 2017.

En la tabla 3 se presenta la superficie cultivada de especies frutales en la comuna de Petorca obtenidas desde el Catastro Frutícola (CIREN, 2021), el palto tiene una absoluta preponderancia representado el 82% de los cultivos frutales para el año 1996

y el 48% para el año 2020, le sigue el nogal, limonero y mandarina con un 24%, 12% y 11% respectivamente para el año 2020.

Tabla 3: Cultivos Frutales en la Comuna de Petorca (Fuente: Catastro Frutícola, CIREN).

Especie	1996	2002	2008	2014	2017	2020
Palto	583	1.506	2.368	1.207	761	763
Nogal	22	199	279	461	376	377
Naranja	8	166	288	73	30	19
Limonero	81	159	171	103	106	179
Mandarino	0	54	132	133	152	197
Olivo	0	11	17	15	21	16
Frambuesa	0	11	0	0	0	0
Duraznero	1	6	1	0	0	0
Tangelo	0	3	3	0	0	0
Níspero	3	2	2	1	0	0
Chirimoyo	4	2	0	0	0	0
Almendro	1	2	5	23	33	30
Pomelo	0	0	7	0	0	0
Arandano	0	0	23	14	14	7
Cerezo	0	0	6	36	22	9
Tuna	0	0	2	6	24	4
Lima	0	0	1	0	0	0
Granado	0	0	0	49	31	0
TOTAL	703	2.121	3.304	2.121	1.570	1.601

En la figura 10 se observa que, al analizar los datos anteriores, el mínimo de superficie cultivada en el año 1996, el palto representaba el 82% de la superficie frutal, hay un pico en el año 2008 con 3.300 [ha] cultivadas siendo más de 2.000 [ha] de palto, luego se percibe un decaimiento de más de la mitad de la superficie llegando a 1.600 [ha] en el año 2020.

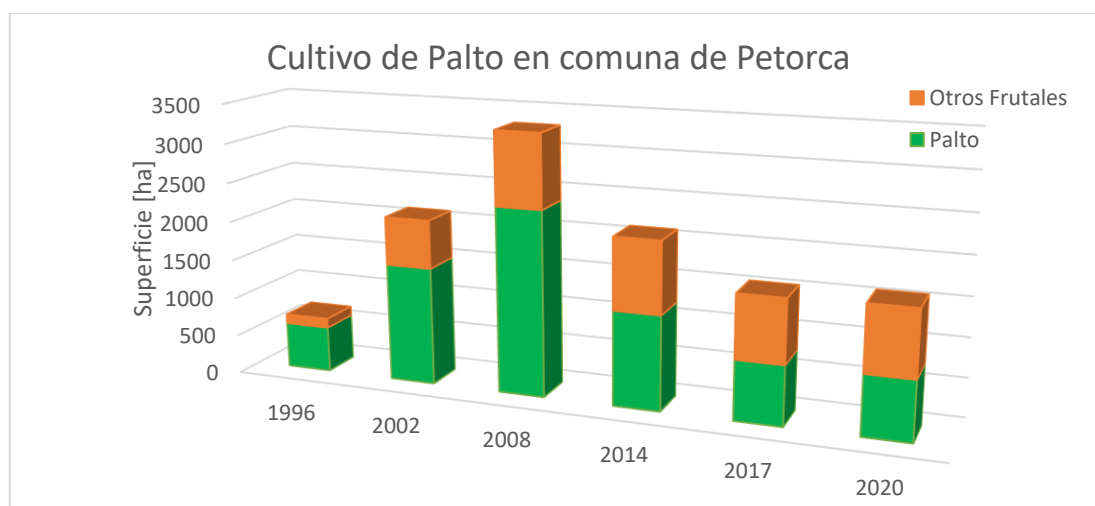


Figura 10: Superficie plantada de frutales tipo palto (Catastro Frutícola, CIREN).

3.5. Derechos Aprovechamiento de Aguas Otorgados.

La información fue obtenida del registro de derechos de la DGA (DGA, 2020). Estos datos fueron filtrados y analizados para confeccionar la siguiente tabla y los siguientes dos gráficos. En la tabla 4 se puede ver que, existe un total de 1947 derechos de aprovechamientos otorgados y que no existen derechos no consuntivos en la cuenca del río Petorca. El 23% de los derechos son del tipo superficial y 77% subterráneos. Del total de derechos un 10.5% de ellos no tiene una coordenada de referencia.

Tabla 4: Tipos de derechos de agua otorgados en cuenca de Petorca.

Derechos de agua						
Con coordenadas			Sin coordenadas			Total
Consuntivo		No Consuntivo	Consuntivo		No Consuntivo	
Superficial	Subterráneo		Superficial	Subterráneo		
412	1331	0	44	160	0	1947

En la figura 11, se presenta la evolución cada 5 años del caudal otorgado según los derechos de aprovechamiento, se presenta esta evolución derechos superficiales, subterráneos y el total de derechos.

Antes de 1990, los derechos otorgados eran menor a 1 [m³/s], para el año 2000 se llega a 2 [m³/s], luego para el año 2005 viene el primer gran crecimiento, se experimenta un alza de 2 [m³/s] en superficiales y 0.5[m³/s] en subterráneas resultando un total en derechos de cerca de 5 [m³/s]. Desde el 2005 hasta la fecha se han otorgado otros 4 [m³/s] llegando a un total de aproximadamente 9 [m³/s] para el año 2020.

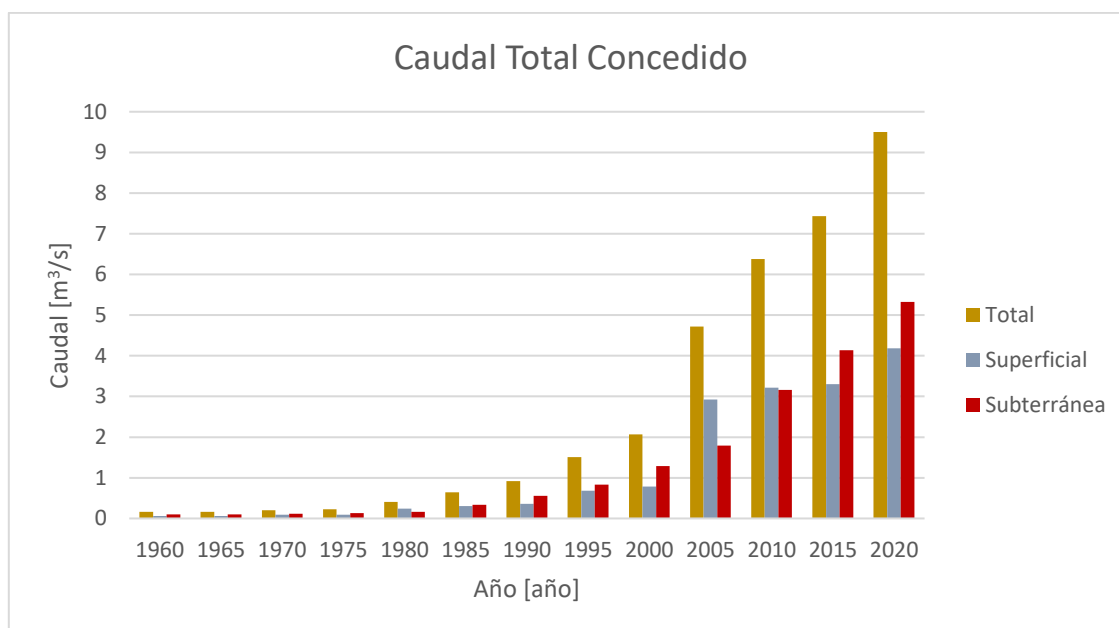


Figura 11: Derechos de Aprovechamiento de Aguas Concedidos en la cuenca del río Petorca.

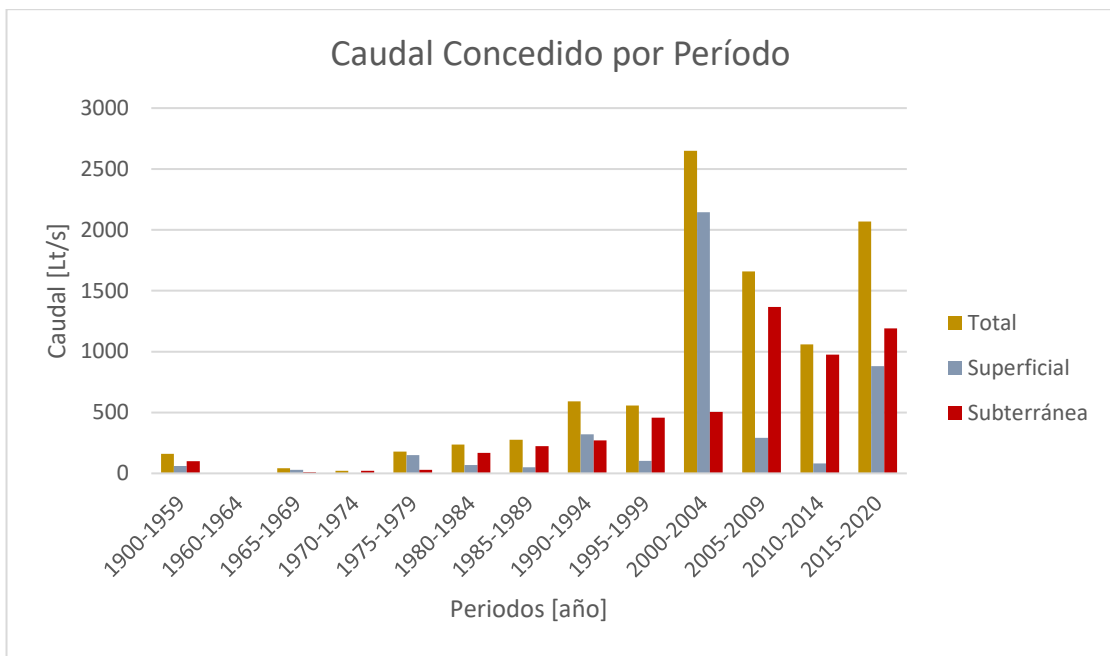


Figura 12: Nuevos Derechos de Agua concedidos por periodos quinquenales en la cuenca del río Petorca.

4. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología de trabajo, se divide en tres ejes relacionados con los objetivos específicos mostrados anteriormente. Primero se expone la metodología usada para generar mapas de cobertura de suelo y mapas de uso de suelo agrícola, luego se desarrolla el método de estimación de demanda de riego mediante el cálculo de evapotranspiración de cultivo para finalmente evaluar la influencia de esta componente en el balance hídrico de la cuenca, contrastar los resultados con el balance hídrico nacional (DGA, 2017) y situar cada subcuenca en un modelo de Budyko.

4.1. Generación de mapas de cultivo.

La generación de mapas se realiza con técnicas de percepción remota y clasificación supervisada de imágenes satelitales mediante el uso de la aplicación Google Earth Engine (GEE). El primer objetivo es generar mapas de cobertura vegetal, usando clasificación supervisada en cuatro imágenes representativas de cuatro temporadas estivales distintas (2002, 2009, 2014 y 2020). A continuación, se usan las 4 coberturas de vegetación, con el objetivo de generar tres mapas de uso de suelo agrícola, cada uno representativo de un periodo distinto y consecutivo entre ellos (2002-2008, 2009-2013 y 2014-2020).

La metodología propuesta para la generación de cobertura vegetal se subdivide en las siguientes etapas: recopilación y preprocesamiento de imágenes, definición de predictores, creación puntos de muestreo, clasificación supervisada, métricas de evaluación y validación. Posterior a ello, se utiliza un algoritmo de post-clasificación desarrollado en el programa R que usa las 4 coberturas vegetal y reglas de decisión para generar 3 mapas de uso agrícola o también llamados mapas de cultivos. Esta metodología se representa como un flujo de trabajo por etapas en la figura 13.

a) Recopilación y preprocesamiento de imágenes.

En esta etapa se recopilan imágenes de las colecciones “USGS Landsat 5 Surface Reflectance Tier1” para los años 2002 y 2009 y “USGS Landsat 8 Surface Reflectance Tier1” para los años 2014 y 2020 (Google Earth Engine, 2021a, 2021b). El rango temporal usado para filtrar imágenes es desde diciembre a marzo, las imágenes elegidas tienen de fecha 07/12/2001 (que representa el periodo estival del año 2002), 11/01/2009, 09/01/2014 y 10/01/2020.

Se debe disponer de una imagen por año y esta debe estar libre de nubes para que no se incluyan valores de píxeles que puedan confundir al algoritmo de clasificación, para verificar aquello se aplica un filtro de nubes que admite solo un 1% de nubosidad en la imagen, además, se le aplican visualizaciones de las bandas “rojo” y “qa” (esta última evalúa la calidad de la imagen satelital) de Landsat para verificar no haya nubes no detectadas por el filtro.

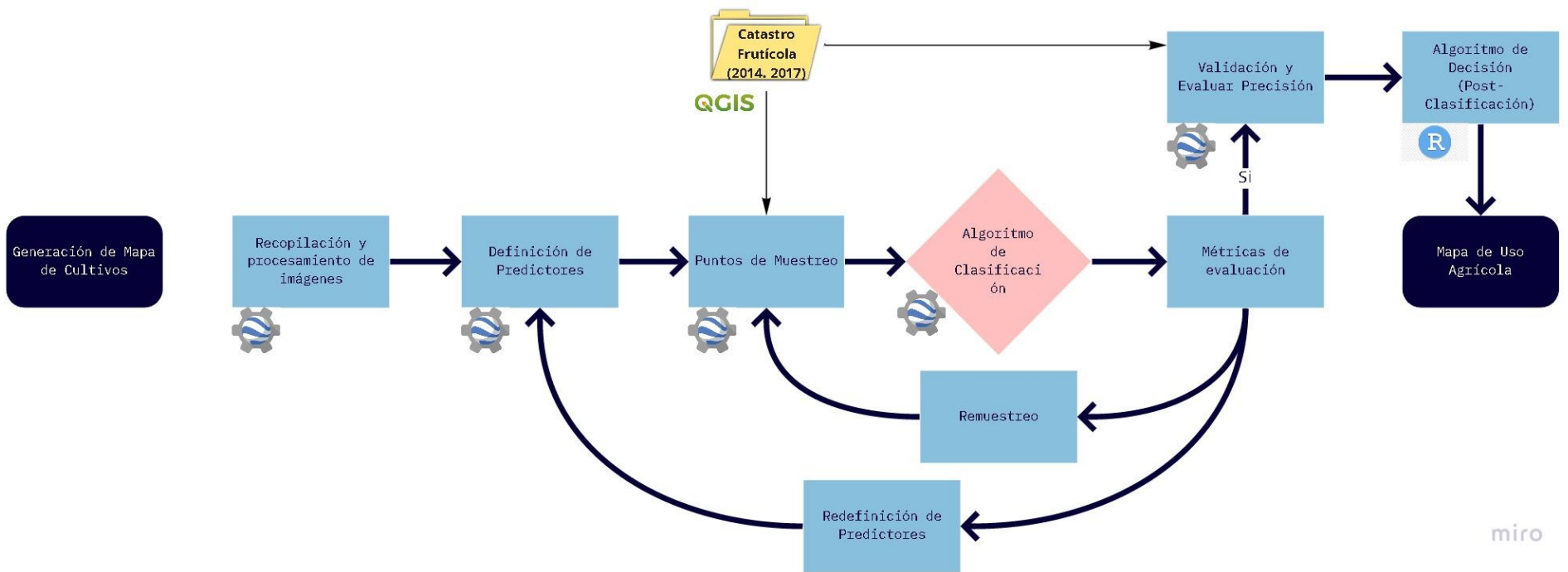


Figura 13: Flujo de trabajo para generación de mapeo de cultivo.

b) Definición de predictores.

Una vez que se tienen las 4 imágenes limpias a clasificar se debe definir qué información dentro de ellas es la que se utiliza para realizar la clasificación, en particular, que bandas de Landsat son las que se consideran para caracterizar los píxeles. Usando las bandas “rojo” y “infrarrojo cercano” se calculó el índice *NDVI* el cual se incluye como primer predictor, además, se incluyen las bandas “verde” y “infrarroja de onda corta 1” por ser sensibles ante la presencia de vegetación.

Un 4° predictor es la relación de Geary's C, esta es una medida estadística de autocorrelación espacial, la relación fue calculada para la banda *NDVI* con una ventana espacial de 3 x 3 píxeles mediante el algoritmo *neighborhoodToBands()*, propio de la aplicación Google Earth Engine (Earth Engine Data Catalog, 2021), este convierte los valores de *NDVI* de la vecindad de un píxel en un valor que cuantifica la semejanza de la vecindad. A este tipo de estimaciones locales de asociación espacial se les conoce como medidas de texturas (Anselin, 1995).

Se incluyeron además predictores topográficos de elevación e índice de posición topográfico (TPI), este último compara la elevación de una celda con la elevación media de un vecindario específico entregando la diferencia entre ambos. Ambos se obtuvieron desde el producto digital de elevación “SRTM” (USGS, 2020), estos predictores son fundamentales para distinguir la vegetación de cerro con los cultivos.

Los resultados de las clasificaciones al incluir las bandas espectrales del rojo e infrarrojo presentaron exactitudes similares que solo el incluir el *NDVI*, por lo que se optó por sacarlas de la clasificación para tener un modelo más parsimonioso con menos predictores. También se considera incluir la distancia a caminos y ríos, pero estos predictores muestran resultados que tienden a confundir vegetación de valle con cultivos por lo que no fueron incluidos.

Predictores <- [*NDVI*, GREEN, SWIR 1, Geary's C, Elevación, TPI]

c) Puntos de Muestreo.

En esta etapa es necesario tener bien definidas las clases en las que se va a caracterizar la cobertura vegetal, la metodología considera cuatro clases: cultivos, vegetación de cerro, vegetación de valle o cauce y suelo desnudo. Se realizó un muestreo de más de 300 puntos sobre cada una de las imágenes. La clase suelo desnudo tiene 120 puntos de muestreo y el resto de las clases entre 60 a 70 puntos.

Se utilizó información de las áreas agrícolas reportadas en el catastro frutícola comentado en el capítulo anterior (CIREN, 2021). En particular se

cuenta con la capa vectorial “Catastro Frutícola 2014” y “Catastro Frutícola 2017” y con los resultados a nivel comunal de los catastros frutícolas en la V región de Chile. Además, se apoya el muestreo contrastando y comparando predios agrícolas y tipos de vegetación con imágenes en alta resolución de Google Earth (2004, 2011, 2013, 2015 y 2016).

Para muestrear se adoptaron distintos criterios según la interpretación que se le da a cada clase, los puntos asociados a la clase suelo desnudo se buscó que fueran todos con bajo NDVI y que en alta resolución se diferenciara roca visualmente, la clase vegetación de cerro tiene una intensidad mayor de *NDVI* pero sigue siendo baja para considerarse cultivo dado que existe una mayor área entre cada matorral o arbusto de cerro.

La clase vegetación de valle o cauce representa aquella que está presente en cursos preferentes de agua y que tienen un *NDVI* mayor, por lo que es la clase que el clasificador más llega a confundir con cultivos. Para diferenciar ambas clases se empleó un criterio de forma que es importante lograr captar en el muestreo y que se refleja en el predictor [Geary's C].

La clase cultivo visualmente es de una frondosidad media a alta, sin considerar cultivo en una etapa temprana de desarrollo o con podas masivas para no confundir al clasificador, de igual manera estos cultivos no considerados en la clasificación si pueden llegar a ser reconocidos por el algoritmo dependiendo de su verdor. Se buscaban cultivos que tengan al menos 3 x 3 pixeles (90mts x 90mts) de tamaño para obtener una asociación espacial perceptible por la ventana móvil del predictor Geary's, además, se buscaban cultivos con un *NDVI* medio a alto para marcar la diferencia con vegetación natural (principalmente matorrales de *NDVI* bajo a medio).

El remuestreo es la etapa en que se modifican los puntos de muestreo que son clasificados erróneamente por el algoritmo, este proceso cumple un rol fundamental en la metodología, se realiza visualizando los resultados del clasificador eliminando puntos que generan confusión o no cumplen cabalmente los criterios anteriormente explicados y se seleccionan otros puntos más representativos.

d) Algoritmo de clasificación.

De los algoritmos de clasificación supervisada que ofrece GEE el utilizado en este estudio es *Classification and Regression Tree* (CART). Para aplicar el algoritmo se requiere de entrada un vector con el nombre de las capas, una imagen de capas y puntos de muestreo. La salida del algoritmo es una imagen de una sola capa con las clases cargadas en el muestreo.

Se evaluó el algoritmo K-means de clasificación no supervisada, pero este no logra buenos resultados, por simple inspección visual se ve como se

clasifican predios agrícolas como vegetación natural y suelo desnudo, también clasifica zonas de generación natural como cultivos.

e) Métricas de evaluación, validación y post-clasificación.

En un primer análisis de resultados del algoritmo se calcula el área de cada clase y se compara el área de cultivos con las áreas reportadas en el catastro frutícola, para el año 2014, se compara con la capa vectorial del catastro y se evalúan los aciertos sobre los mismos puntos de muestreo. Esta se considera la primera métrica de evaluación, de no existir una similitud entre el área clasificada y la entregada por el catastro se inicia un proceso de redefinición de los predictores o remuestreo dependiendo de los resultados.

Para el resto de las clasificaciones se buscó que existiera una semejanza entre las áreas de cultivo y las tendencias de superficies catastradas en el reporte a nivel comunal y provincial del catastro frutícola (revisar gráfico 2).

Cumplida las métricas anteriores, se procede a realizar la validación mediante puntos de muestreo definidos con este único fin, es decir, no fueron usados en el desarrollo del algoritmo, solo en esta etapa de evaluación. Aproximadamente 120 puntos con sus correspondientes clases, determinadas bajo los mismos criterios que el muestreo anteriormente explicado. De esta manera se evalúa la precisión del clasificador mediante el cociente entre aciertos y total de puntos validando la herramienta computacional.

Es fundamental entender la clasificación de coberturas como un proceso iterativo, los predictores y el muestreo son dos elementos que controlan el modelo realizado por el algoritmo, de tal manera cada vez que los resultados no sean los esperados es necesario revisar ambas. Esto se ilustra en la figura 8, donde se puede un ciclo en la etapa de métricas de evaluación.

Finalmente se cargan las cuatro imágenes clasificadas en R 4.0, se aplica una regla de decisión y se generan los tres mapas de uso de uso agrícola. La regla de decisión definida dentro del proceso de post-clasificación expresa que si una zona es clasificada como cultivo para al menos una cobertura de dos coberturas consecutivas esta se define como zona de uso agrícola. Si la cobertura del año 2002 indica que un píxel es cobertura “cultivo”, pero no lo es en la cobertura del año 2008, se clasificara como uso de suelo agrícola para el periodo 2002-2008. También en caso de que la cobertura del 2008 indique un píxel como “cultivo”, pero no en la cobertura del año 2002, dicho píxel será clasificado de igual manera como uso de suelo agrícola para el periodo 2002-2008. En caso de que ambas coberturas indiquen un píxel como “cultivo” también se le considerara como uso de suelo agrícola. La metodología descrita es ilustrada como un flujo de etapas en la figura 8.

Para presentar la evolución de valores de coeficiente de cultivo se generaron gráficos tipo “box plot” que permiten visualizar parámetros estadísticos como la mediana y cuartiles, cada caja representa la distribución de Kcb en una estación. Los valores “outliers” fueron descartados de la gráfica. Se realizaron tres gráficos, cada uno contiene la distribución de los mapas estacionales correspondiente a uno de los tres periodos determinados por los mapas de uso agrícola.

4.2. Estimación de evapotranspiración de cultivo

La estimación de evapotranspiración de cultivo aplica solo para las zonas definidas como uso agrícola, en esta metodología se requiere conocer las variables de coeficiente de cultivo y evapotranspiración de referencia como se puede ver en la ecuación (5). El objetivo es generar mapas de coeficientes de cultivos y mapas de evapotranspiración de referencia para luego hacer álgebra con los valores de cada píxel. El flujo de etapas a seguir en esta metodología se puede observar en la figura 14.

Para generar los mapas de coeficientes de cultivo se siguen las etapas, primero se recopilan las imágenes satelitales, segundo se procesan las imágenes, después se realiza la homogenización entre sensores, luego se calculan los índices necesarios mediante el álgebra de bandas espectrales, finalmente se procede a la generación de mapas y análisis de resultados.

a) Recolección y procesamiento de imágenes.

Los mapas de coeficiente de cultivo fueron generados a partir de las colecciones “USGS Landsat 5 Surface Reflectance Tier1”, “USGS Landsat 7 Surface Reflectance Tier1” y “USGS Landsat 8 Surface Reflectance Tier1”, las mismas colecciones que usadas en el mapeo de cultivo, pero ahora se utiliza un gran número de imágenes, intentando disponer de la mayor cantidad de ellas. Primero se aplicó un filtro temporal para trabajar solo con imágenes del 2001 al 2020, luego se aplica un filtro de nubes que admite hasta un 5% de nubosidad en la imagen.

Dada la cantidad de imágenes disponibles se opta por usar un paso temporal estacional para el cálculo de coeficiente de cultivo, esto ya que no existen las imágenes suficientes para tener todos los meses del periodo de estudio (en particular, la cantidad de imágenes se ve disminuida drásticamente en meses de invierno por la presencia de nubes).

Se agrupan las imágenes por estación, al ser 20 años el periodo a estudiar, se obtiene un total de 80 estaciones en las cuales se agrupan las imágenes, luego para obtener una imagen por estación se hace una agregación temporal mediante el algoritmo *median()*, el cual simplemente calcula la mediana por píxel entre la colección de imágenes a agregar. Finalmente se obtienen 80 imágenes de una serie estacional de 20 años.

b) Homogenización entre sensores Landsat.

El proceso de homogenización apunta a corregir errores asociados a mediciones de diferentes satélites, cada sensor capta longitudes de onda levemente diferentes, en consecuencia, los valores espectrales de cada banda se deben ajustar.

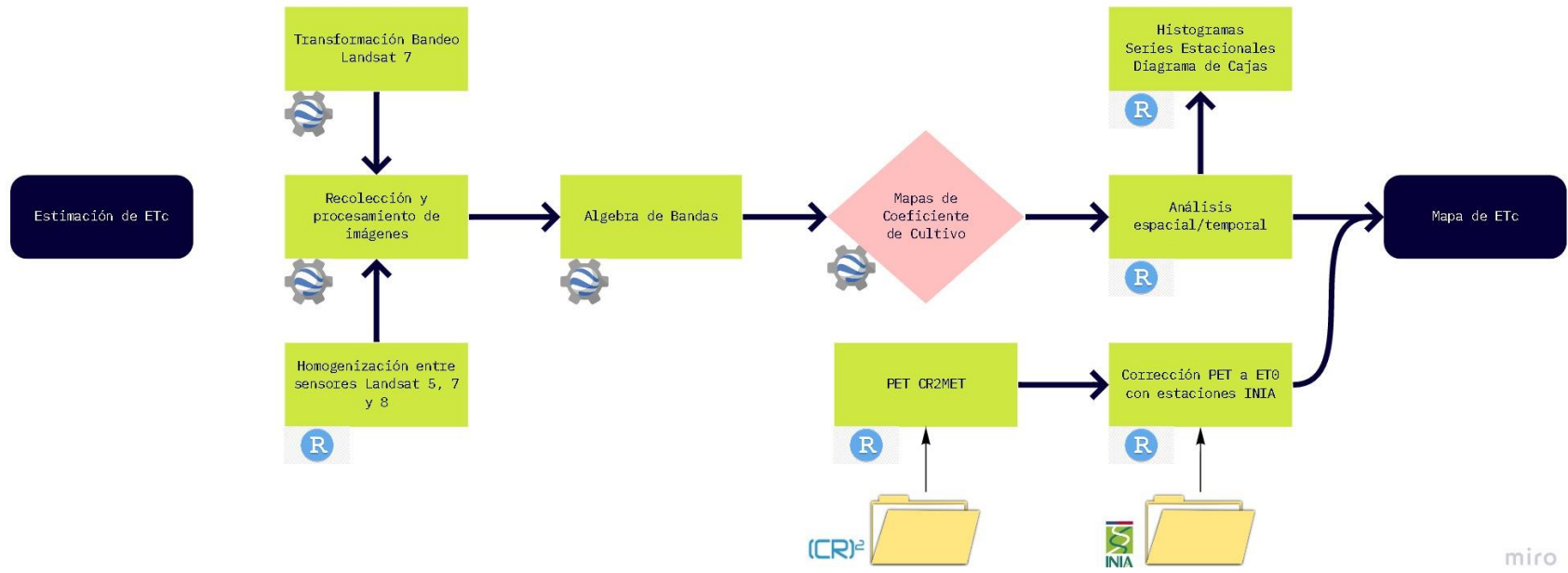


Figura 14: Flujo de trabajo para estimación de ETC.

Se toma una imagen de cada sensor, sin nubosidad, se recorta un área rectangular en la zona media de la cuenca, estas pueden ser de distintas fechas. Se calcula la diferencia entre los píxeles de la imagen del sensor a corregir y la imagen del “sensor base”, para esta metodología se elige al satélite Landsat8 como “sensor base”. El cálculo de diferencia de píxeles se realiza para cada una de las bandas a homogenizar, en este caso se homogeniza la banda “verde”, “rojo”, “infrarrojo cercano” y “SWIR 1”.

En cuanto se tiene la diferencia del valor de banda en cada píxel se analiza la distribución de estas, se debe tener una distribución normal con media cercana a cero, al 10% de los píxeles más cercanos a la media se les denomina “píxeles invariantes”, estos son los píxeles que menos variación presentan en ambas imágenes por lo que se considera que la diferencia calculada está asociada principalmente a errores de los instrumentos satelitales.

Por último, con los píxeles invariantes, se hace una regresión lineal entre los valores de ambos sensores para cada banda a homogenizar. Esta regresión es aplicada para homogenizar los valores espectrales de banda de Landsat 5 a Landsat 8 y de Landsat 7 a Landsat 8.

c) Álgebra de bandas.

En base a las bandas “rojo” y “infrarrojo cercano” se calculan los índices NDVI y SAVI, estos son los índices necesarios para calcular coeficiente de cultivo basal aplicando las ecuaciones (7), (8) y (9). Los parámetros de $NDVI_{max}$, $NDVI_{min}$ y K_{c_min} son fijados en 0.9, 0.2 y 0.15 correspondientemente, estos valores fueron definidos considerando la investigación de Pôças et al. (2020)

Para el cálculo de coeficiente de cultivo definido en la ecuación (6) se suponen condiciones óptimas de riego que hacen al coeficiente de estrés hídrico K_s igual a 1 y se supone que el coeficiente de evaporación K_e es muy cercano a 0, esto último se puede evidenciar en la investigación de Rivero (2020) donde se estimó el coeficiente de evaporación en paltos de la VI región de Chile usando la metodología de Pôças y un modelo de transferencia hídrica a nivel de suelo en HIDRUS 1D. Estos dos supuestos son tratados en la sección de discusiones. De tal manera se puede considerar que el coeficiente de cultivo basal es igual al coeficiente de cultivo en la zona de estudio.

d) Mapas de coeficiente de cultivo y análisis de resultados.

Después de que se tienen las imágenes con el coeficiente de cultivo estimado incorporado en sus bandas se procede restringir los datos de

coeficiente de cultivo a las zonas definidas como cultivos, para ello se cortan las imágenes usando como base el mapa de cultivos correspondiente a cada año según el periodo que representa el mapa.

Estos resultados son exportados desde la aplicación Google Earth Engine en formato *.TIF* y son llevados al lenguaje de R 4.0, se hace un análisis de resultados mediante histogramas y diagramas de caja.

Finalmente, se hace una interpolación desde los mapas estacionales para generar mapas mensuales. Dicha interpolación considera que el mapa mensual de enero es igual al mapa estacional de verano, el mapa de abril es igual al mapa de otoño y los meses intermedios son una suma ponderada de ambos mapas, de esta manera el mapa de febrero es la suma entre el mapa de enero ponderado por dos tercios y el mapa de abril ponderado con un tercio (en marzo se pondera por un tercio y dos tercios correspondientemente). Dicha interpolación se replica para abarcar todos los meses del año.

Una vez que se tienen los mapas de coeficientes de cultivos se procede a generar mapas de evapotranspiración de referencia (ET₀) a partir de los valores de evapotranspiración potencial. Para ello el producto utilizado es la estimación de evapotranspiración potencial (PET) de la base de datos de la grilla climática CR2 calculada con la fórmula Hargreaves-Samani (Alvarez-Garreton et al., 2018). Este producto entrega evapotranspiración potencial a nivel diario por lo que son agregadas temporalmente para así tener valores de evapotranspiración potencial a nivel mensual, también se hace un desagregado espacial usando la función *resample()* que transfiere los datos de una grilla a otra con distintas dimensiones, esto con el fin de obtener la misma resolución de 30 x 30 metros, como las demás imágenes procesadas de Landsat.

Obteniéndose los mapas de PET, los valores de píxel son corregidos mediante una regresión lineal con la base de los datos agrometeorológicos de las estaciones INIA presentes en la cuenca (Manuel Montt, Palquico y Pullancon), estas estaciones proporcionan información sobre distintas variables agrometeorológicas de las cuales se usó temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento para calcular evapotranspiración de referencia con la fórmula de Penman-Monteith. El cálculo de ET₀ se realiza en R 4.0 usando el paquete llamado “Evapotranspiration” (Guo et al., 2020).

De tal manera, conociendo los valores de evapotranspiración de referencia puntual de las estaciones se comparó con el píxel más cercano de los mapas de PET en las correspondientes coordenadas a las estaciones y se genera una regresión lineal que es usada a modo de transformación del producto grillado del CR2 para obtener mapas de ET₀. Este ajuste se presenta en el gráfico 22 que

se encuentra en la sección de anexos, acá se puede ver una pendiente cercana a 1, con un coeficiente de determinación de 0.7 y un error cuadrático medio de 29 [mm/mes].

Finalmente, para los mapas de evapotranspiración de referencia y coeficiente de cultivo se multiplican los valores de píxel con algebra de rasters resultando la estimación de evapotranspiración de cultivo (ecuación 5).

4.3. Evaluación de la influencia de la evapotranspiración de cultivos en el balance hídrico.

Se realiza un balance hídrico dentro de la cuenca para cada año del periodo de estudio, las variables a considerar dentro del balance son las siguientes: caudal, precipitación evapotranspiración de cultivo y evapotranspiración real de cuenca.

Se definen dos áreas de control, el área de control uno (AC1), la cual es delimitada por el área de la subcuenca de Río Petorca en Longotoma menos el área de la subcuenca del Río Petorca en Hierro Viejo. El área de control dos (AC2) es delimitada por el área de la subcuenca de Río Petorca en Hierro Viejo menos las áreas de las subcuencas del Río Sobrante y del Río Pedernal.

Estas áreas de control son definidas bajo el criterio determinado por puntos de salidas con información, estos son representados por las cuatro estaciones fluviométricas de la cuenca. El objetivo de definir estas áreas es realizar un balance en cada una de ellas, estas se pueden observar en la figura 15 junto con las estaciones fluviométricas utilizadas en el balance hídrico.

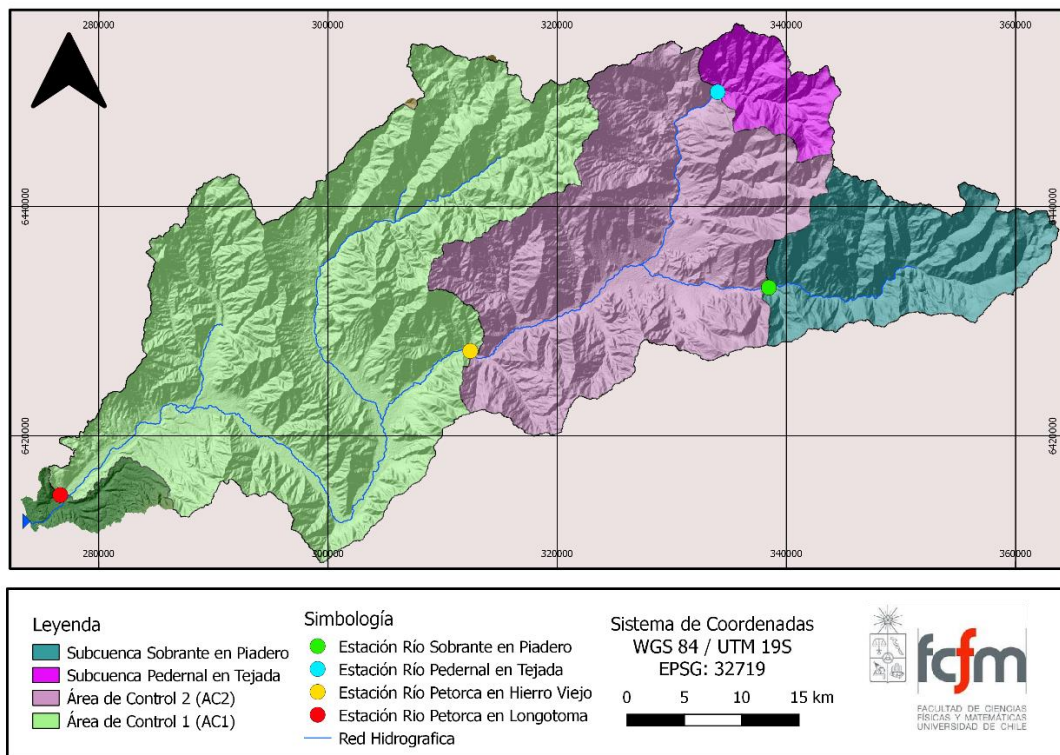


Figura 15: Mapa de estaciones fluviométricas utilizadas y subcuenca Sobrante, subcuenca Pedernal, área de control 1 y 2.

La evapotranspiración real de la cuenca se obtiene a partir de imágenes satelitales del producto “operational Simplified Surface Energy Balance”

(SSEBop) (Savoca et al., 2013), este está disponible para el periodo 2003-2020 con una resolución espacial de 1 x 1 kilómetro. El producto es comparado con los resultados del balance hídrico nacional, además, es evaluado mediante un análisis de pixeles que compara la ET real de SSEBop en zonas de vegetación nativo con la evapotranspiración real esperada en este tipo de sistemas nativos, en la bibliografía se pueden encontrar estimaciones de ET para sistemas nativos en la zona centro-sur de Chile (Olivera-Guerra et al., 2013) y hacia el norte (Mosre, 2020).

Para el balance hídrico de la cuenca se utilizará el modelo conceptual de la figura 16 y la ecuación general (15) donde ΔS es la variación en el almacenamiento de la cuenca, P es la precipitación, ET es la evapotranspiración, Q los caudales asociados a escorrentía, GW_{in} las entradas laterales de agua subterránea y GW_{out} las salidas de agua subterráneas.

Es necesario incorporar supuestos en el flujo de aguas subterráneas de la cuenca antes de plantear la ecuación de balance hídrico a utilizar en este estudio, se considera que en el largo plazo la recarga de agua subterránea (GW_{in}) es semejante a la descarga en el punto de salida de la cuenca (GW_{out}), por lo que se supone que ambas se cancelan en la ecuación (15).

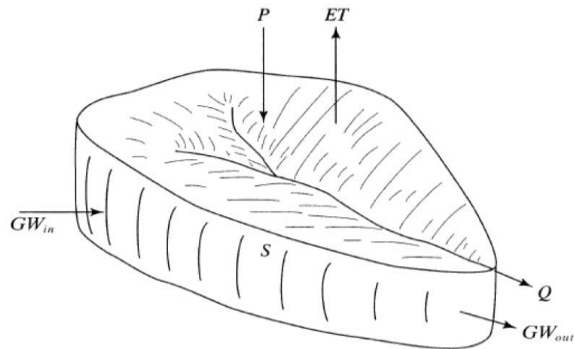


Figura 16: Componentes del balance hídrica de cuenca.

$$(15) \quad \Delta S = P + GW_{in} - ET - Q - GW_{out}$$

Cabe recordar que el objetivo principal de este trabajo es evaluar la influencia de la evapotranspiración de cultivo en la cuenca por lo que la componente de evaporación se subdivide en la asociada a los cultivos y la asociada procesos naturales dentro de la cuenca. Es por lo que se debe considerar la ecuación (16) dentro del balance hídrico. De tal manera que el balance hídrico anual en la cuenca se resuelve en la ecuación (17).

$$(16) \quad ET = ET_c + ET_{cuenca}$$

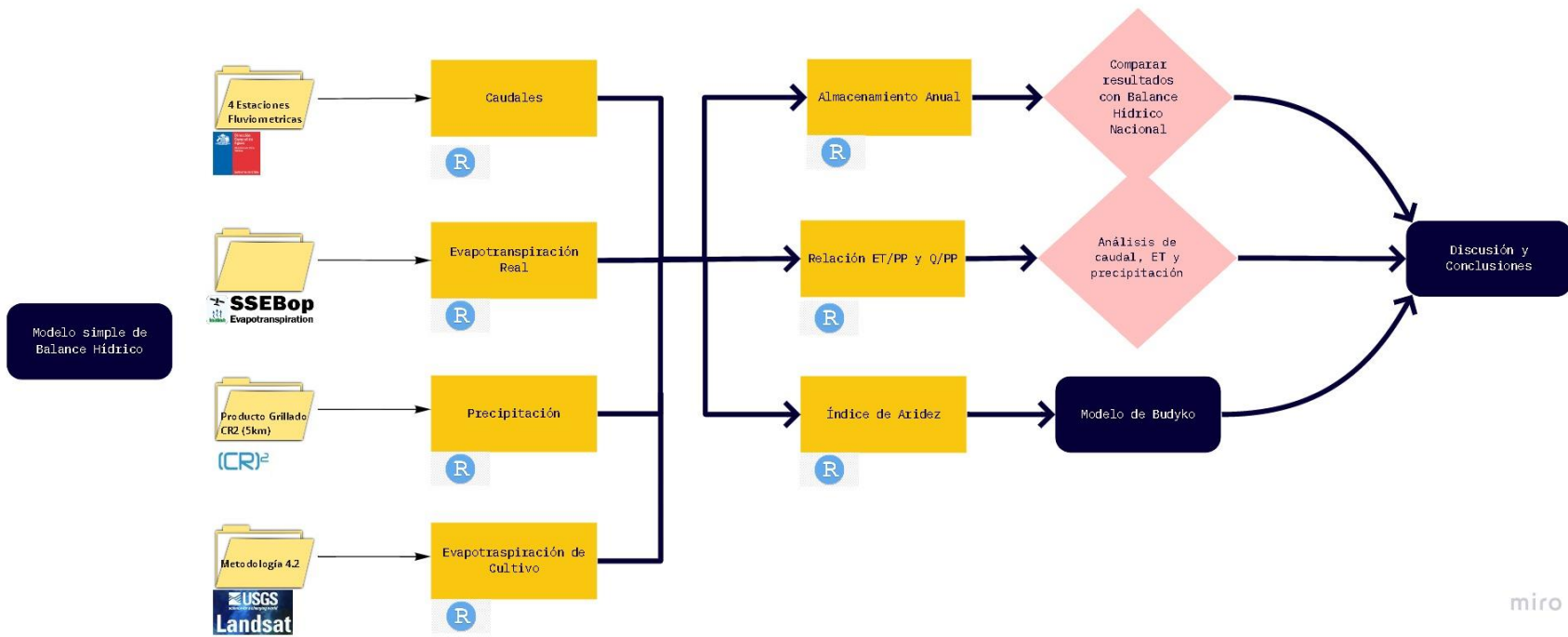
$$(17) \quad \Delta S_{anual} = P - (ET_c + ET_{cuenca}) - Q$$

Para poder visualizar el balance hídrico a nivel mensual se realiza un diagrama de Wundt, este exhibe el promedio de caudales medios mensuales para cada mes dentro del periodo de estudio, su utilización será aportar a las discusiones con una visión estacional del balance hídrico.

Una vez calculado el almacenamiento anual en cada de las cuatro subcuencas con punto de salida en las estaciones fluviométricas y en las dos áreas de control definidas anteriormente se procede a realizar un análisis de evapotranspiración, precipitación y caudales en las cuatro subcuencas.

Este análisis requiere graficar la relación entre el cociente de evapotranspiración con precipitación y el cociente entre caudales (en unidades de [mm/año]) con precipitación, esto permite ubicar cada subcuenca en un gráfico que entrega información sobre cómo se distribuye la oferta del recurso hídrico (precipitación) entre la componente demandantes de agua (evapotranspiración y caudal).

Con estas dos ecuaciones y conociendo la precipitación y el índice de aridez de la cuenca es posible determinar la evapotranspiración estimada por la curva de Budyko, esta será comparada con la evapotranspiración calculada en la metodología anterior. El flujo de trabajo de esta parte de la metodología se presenta en la figura 17.



miro

Figura 17: Flujo de trabajo para balance hídrico y modelo de Budyko.

5. Resultados

Los resultados del trabajo se presentan divididos por cada objetivo específico, primero se muestran los resultados asociados al mapeo de coberturas de suelo y uso de suelo agrícola, se presentan mapas ilustrativos y tablas que contienen los valores de áreas de cultivo para cada periodo. Luego se muestran los resultados de coeficiente de cultivo y evapotranspiración de referencia usados para estimar requerimientos de riego mediante evapotranspiración de cultivo, se presentan el volumen total de agua demandado por las zonas definidas como cultivo. Finalmente se muestran los resultados del balance hídrico anual, relación escorrentía - precipitación y el modelo de Budyko.

5.1 Mapas de cobertura de suelo y cultivos

En la figura 18 se puede observar el resultado de la clasificación supervisada para el año 2014, en color gris el suelo desnudo, color verde los cultivos, color amarillo vegetación natural asociado a quebradas y relativamente denso y en color marrón vegetación natural de cerro con menor densidad.

En la figura se muestran la mayoría de los cultivos en la cuenca, estos se encuentran ubicados en el área de control uno y dos (AC1 y AC2), no existen zonas de cultivos en las subcuencas Sobrante y Pedernal.

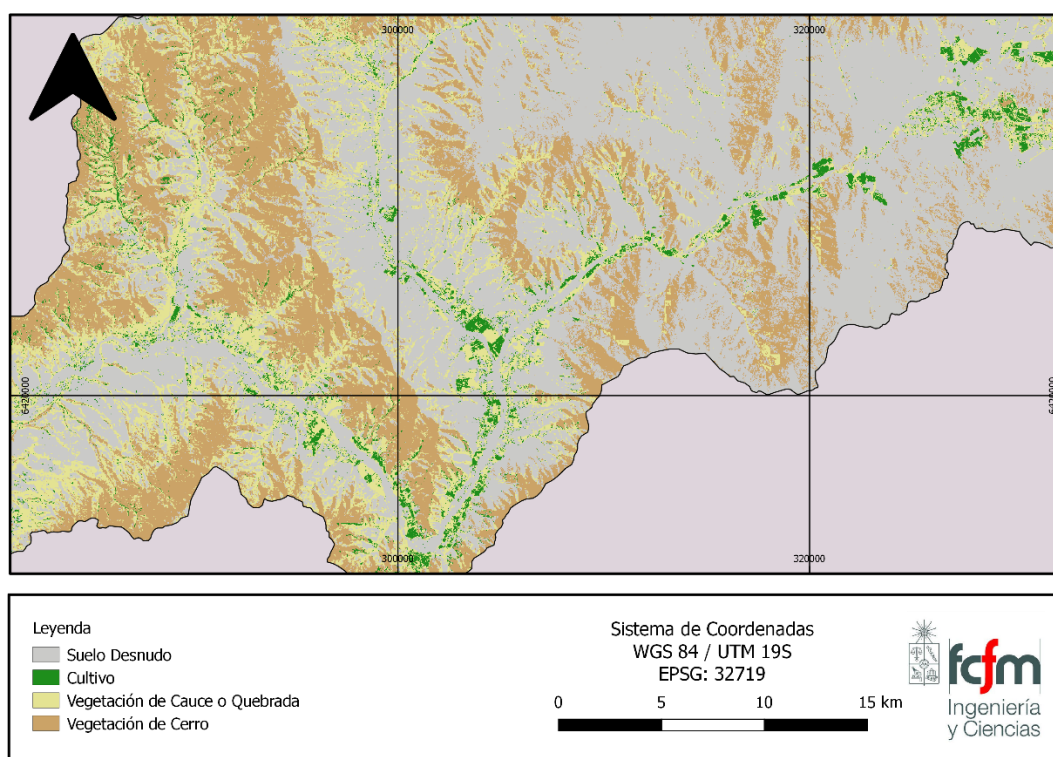


Figura 18: Cubierta Terrestre del 2014 obtenida a partir de Clasificación Supervisada.

En cuanto a la evaluación de las coberturas de suelo se realizó una medición de la precisión de las clasificaciones, los puntos de evaluación son clasificados visualmente y luego comparados con lo predicho por el algoritmo en cada punto, estos resultados se pueden ver en la tabla 5, acá se muestran los aciertos del algoritmo ante más de 250 puntos muestreados visualmente. La precisión, medida como aciertos sobre total de puntos, varía entre 85% a 90% dependiendo del año clasificado con un promedio de 87.7% de precisión.

Tabla 5: Evaluación de precisión en cada mapa de cobertura vegetal.

	LC2002	LC2009	LC2013	LC2020
Aciertos	215	239	233	223
Total	254	266	265	252
Precisión	0.85	0.90	0.88	0.88

En la tabla 6 se reportan las áreas clasificadas como cultivo para las cuatro coberturas generadas, se puede ver como el área cultivada se reduce para el año 2014 y como se produce una disminución drástica para el año 2020. También se reporta el porcentaje que representa cada área de cultivo con respecto al área total de la cuenca.

Tabla 6: Área clasificada como cultivo para cada cobertura vegetal.

Año	Superficie		
	[ha]	[km2]	% Cuenca
2002	4018.74	40.19	2.02
2009	4359.59	43.60	2.20
2014	3049.84	30.50	1.54
2020	963.77	9.64	0.49

En la figura 19 se muestra una comparación entre la superficie estimada en la metodología de clasificación (amarillo) y la superficie reportada en el catastro frutícola para la comuna de Petorca y la comuna de La Ligua (azul y naranja). Es importante mencionar que la cuenca del río Petorca contiene a toda la comuna de Petorca y cerca del 50% de la comuna de la Ligua.

Se puede ver que para el año 2002 existe una sobreestimación por parte de la clasificación ya que la superficie es ligeramente mayor a la suma total de ambas comunas, para el año 2007 y 2013 se ve que el resultado de la clasificación es mayor al de la comuna de Petorca y contiene un porcentaje de la comuna de La Ligua por lo que cumple con lo esperado. Para el año 2020 se evidencia una clara subestimación en la que no se capta un porcentaje importante de la actividad frutícola.

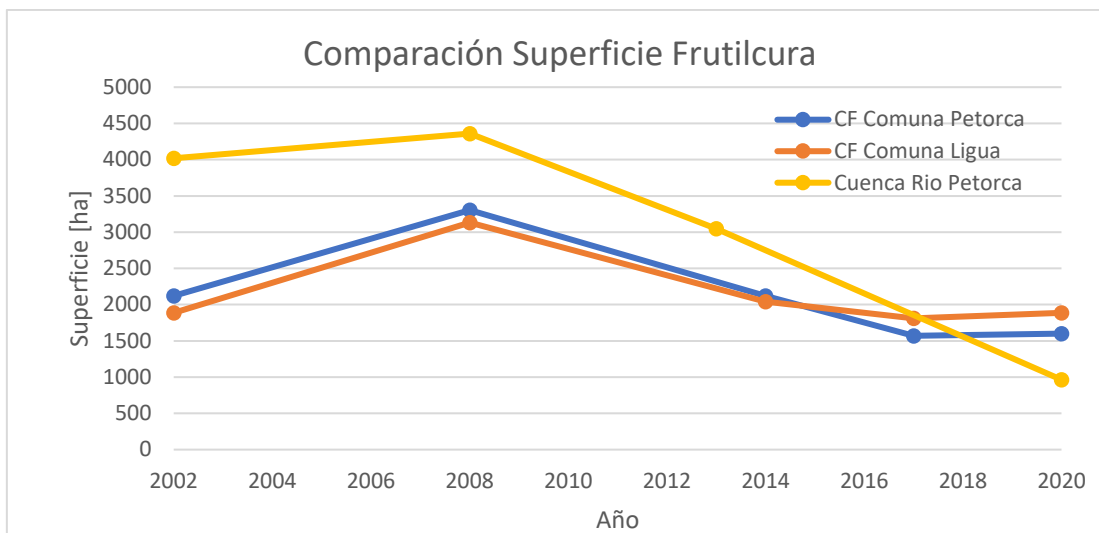


Figura 19: Comparación Clasificación Supervisada con Catastro Frutícola.

En la tabla 7 se reportan las áreas asociadas a zonas de uso agrícola de riego para los tres periodos definidos, su máximo se da en el periodo 2001-2008 llegando a abarcar más de 5.400 [ha] y representando un 2.7% del área total de la cuenca.

Tabla 7: Área de uso agrícola para cada mapa de uso agrícola.

Periodo	Área cultivos [ha]			
	AC1	AC2	Total	% Cuenca
2002-2008	4195.62	1607.22	5802.84	2.92
2009-2013	3545.28	2089.89	5635.17	2.84
2014-2019	2056.32	1590.13	3646.45	1.84

En la figura 20 se aprecia la zona definida como uso agrícola dentro del área de control uno (AC1), en color azul se muestran las zonas agrícolas que se mantuvieron entre el periodo 2002-2008 y 2014-2020, en color blanco se pueden ver las áreas agrícolas que están presentes solo para el periodo 2002-2008 y en color rojo las presentes solo en el periodo 2014-2020. La baja presencia de azul indica que las zonas de cultivo han tenido una alta variabilidad espacial y la predominancia del blanco indica que esta zona tuvo una mayor intensidad de cultivo en el pasado.

En la figura 21 se aprecia la zona definida como uso agrícola dentro del área de control dos (AC2) para el periodo 2002-2008 y 2014-2020. La predominancia del color rojo muestra que existe un claro aumento de las zonas de cultivos en esta parte de la cuenca, nuevamente los cultivos que se han mantenido en el tiempo son mínimos implicando una alta variabilidad.

Los resultados indican que existe un descenso en el área definida como zonas agrícolas en el periodo 2014-2020, además se puede observar una

migración de estas zonas desde la parte media-baja (AC1) a la parte media-alta de la cuenca (AC2).

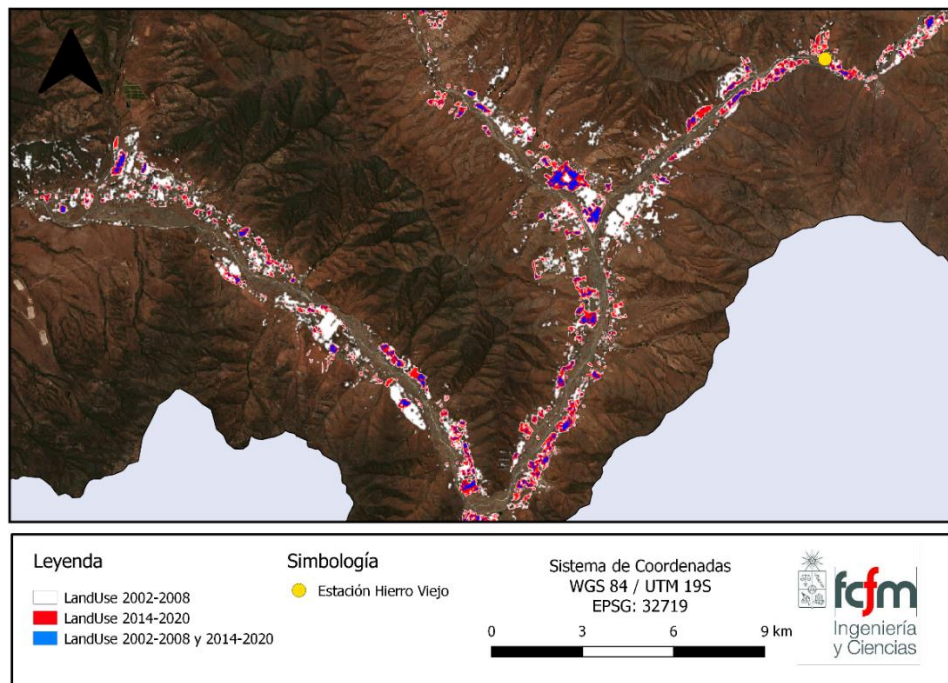


Figura 20: Comparación mapa de uso agrícola periodo 2002-2008 y 2014-2020 entre Longotoma y Hierro Viejo (AC1).

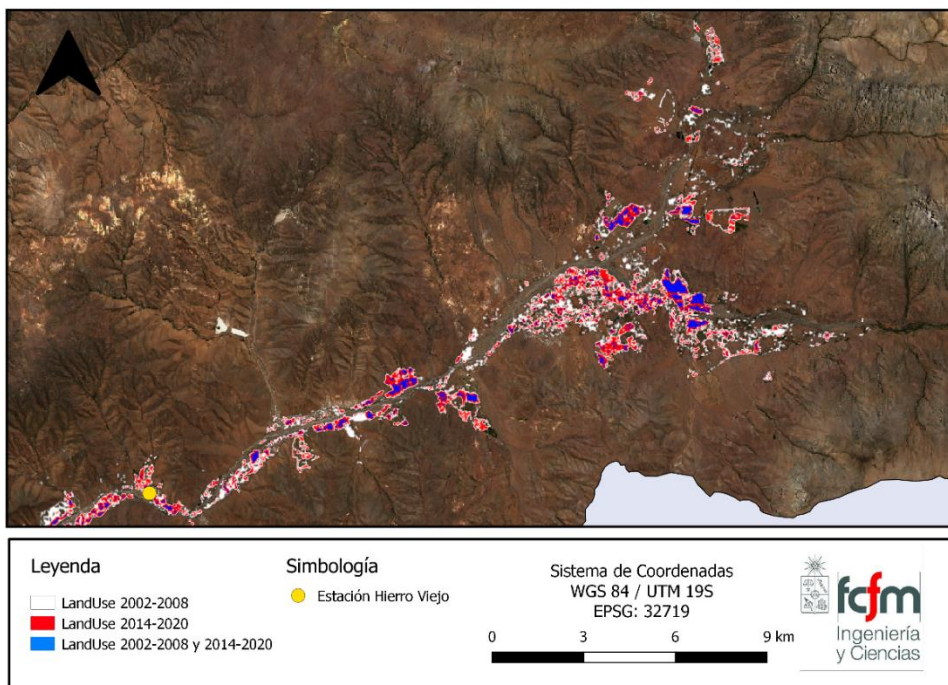


Figura 21: Comparación mapa de uso agrícola periodo 2002-2008 y 2014-2020 entre Hierro Viejo y Chicolco (AC2).

5.2 Estimación de evapotranspiración de cultivo (ETc)

Los resultados sobre estimación de evapotranspiración de cultivo contienen la distribución temporal, estimación y mapeo de coeficientes de cultivo, estimación de evapotranspiración de referencia y calculo volumétrico de demanda de riego asociado a ETc.

Coeficiente de cultivo

El coeficiente de cultivos fue calculado solo para las zonas de uso agrícola, por ellos las estimaciones asociadas corresponden al cálculo de álgebra de bandas en las imágenes satelitales, pero considerándose únicamente los pixeles en dichas zonas ya que este parámetro pierde sentido para suelos no agrícolas.

En la figura 22 se muestra la distribución de valores de coeficiente de cultivo para la estación de primavera del año 2010, esta tiene un valor máximo cercano a 1 y un mínimo cercano a 0.1, se puede apreciar una distribución bimodal lo que podría indicar la presencia de dos grupos de cultivos.

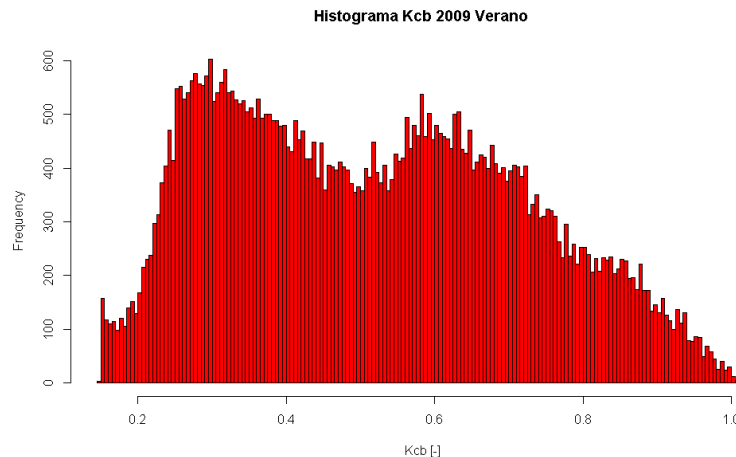


Figura 22: Histograma de Coeficiente de cultivo para verano del 2009.

En la figura 23 se pueden observar tres diagramas de caja que muestra la distribución del valor de coeficiente de cultivo en la cuenca, esto para cada estación dentro de periodo 2003-2019.

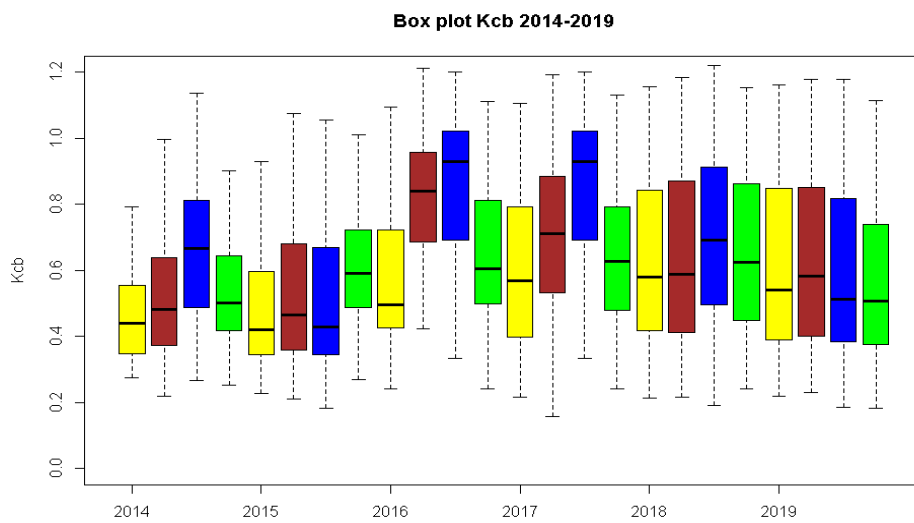
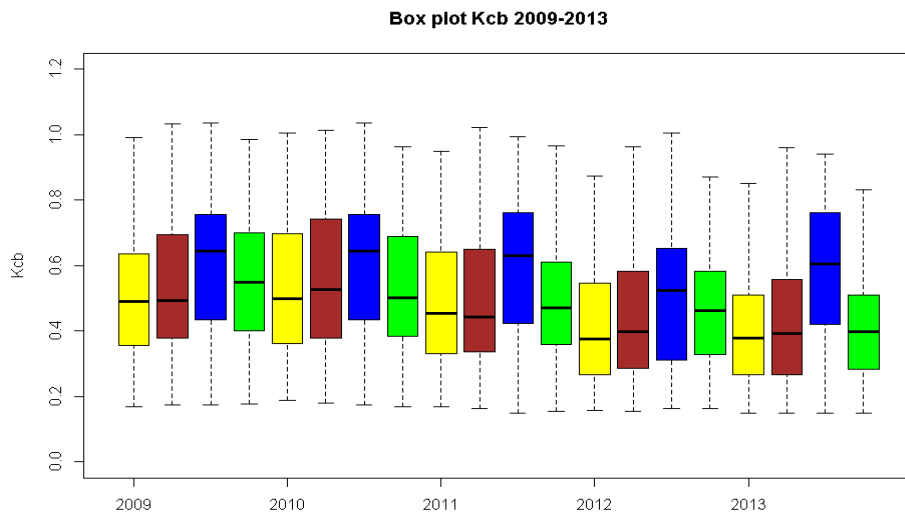
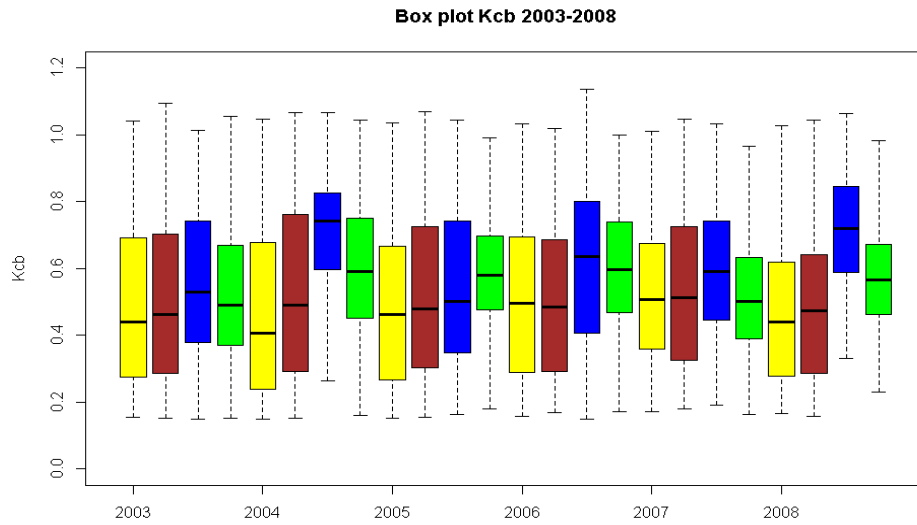


Figura 23: Boxplot de Kcb para el periodo 2001-2008, 2009-2013 y 2014-2020. (amarillo: verano, rojo: otoño, azul: invierno y verde: primavera).

En cuanto al periodo 2003-2008, la mediana varia con valores en torno a 0.4 y 0.6. Es claro que existe una mayor continuidad de la mediana para las estaciones de primavera (verde), verano (amarillo) y otoño (rojo), no así para la estación de invierno (azul). En invierno se rompe dicha continuidad con valores más altos de coeficiente de cultivo, donde se puede ver como sale del rango mencionado llegando a valores de hasta 0.8. Los cuartiles muestran una mayor variación entre estaciones en comparación con la variación de cuartiles para una misma estación en diferentes años, los valores extremos permanecen relativamente constante entre 0.15 y 1.

En cuanto al “box plot” que muestra coeficiente de cultivo para el periodo 2009-2013, nuevamente la mediana varía entre 0.4 y 0.6 pero las estaciones de invierno están por sobre ese rango de media. En el periodo 2014-2020, se ve un comportamiento de aumento de la mediana de coeficiente de cultivo desde el año 2016, es llamativo el valor en la estación de otoño del 2016 que llega ser mayor a 0.8, también lo es el alto valor de mediana en la estación invernal del 2017 y 2018 llegando a ser mayor a 0.9.

En la figura 24 se presenta la media de los mapas anuales de coeficiente de cultivo, en cuanto a los valores se presenta la mediana de los mapas promediados entre las cuatro estaciones correspondientes a cada año del periodo estudiado. Estos se encuentran entre 0.5 y 0.6 excepto para los años entre 2011 y 2013 con una disminución que llega a 0.45 y para el año 2016 con un aumento hasta 0.7.

En rojo se presentan las precipitaciones en [mm/año] donde se aprecia un prolongado periodo seco entre 2009 y 2014 entre 200 a 250 [mm], los niveles mínimos de precipitación están en el 2019 con menos de 100 [mm].

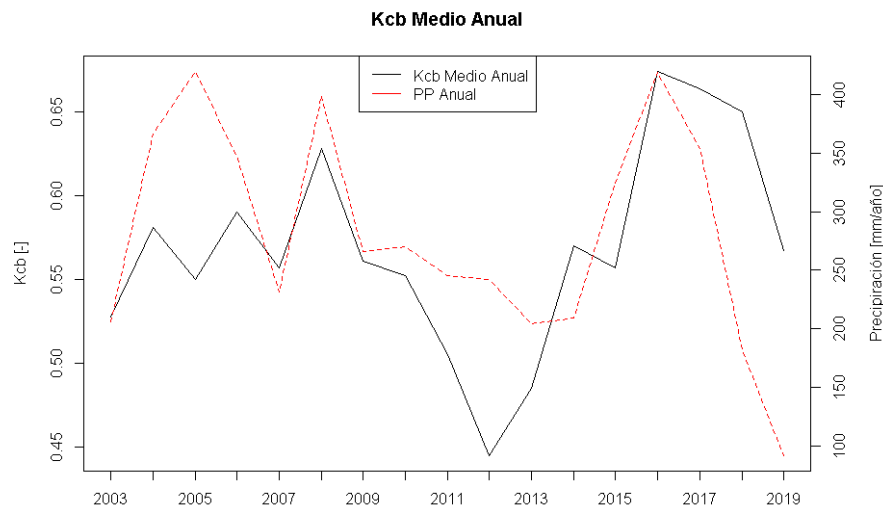


Figura 24: Kcb promedio píxel nivel mensual y anual.

En la figura 25 se muestra el coeficiente de cultivo medio para el periodo 2014-2019 y 2003-2008, es decir, el coeficiente de cultivo mapeado representa un indicador de transpiración para un periodo de 5 años, por lo que también revela un nivel de intensidad de cultivo en ese tiempo.

Se puede observar en el mapa el movimiento de las zonas de cultivos hacia la parte alta de la cuenca. En cuanto a los píxeles cercanos a 1, para llegar a esos valores, deben representar predios que durante 5 años han realizado una producción intensiva de cultivos.

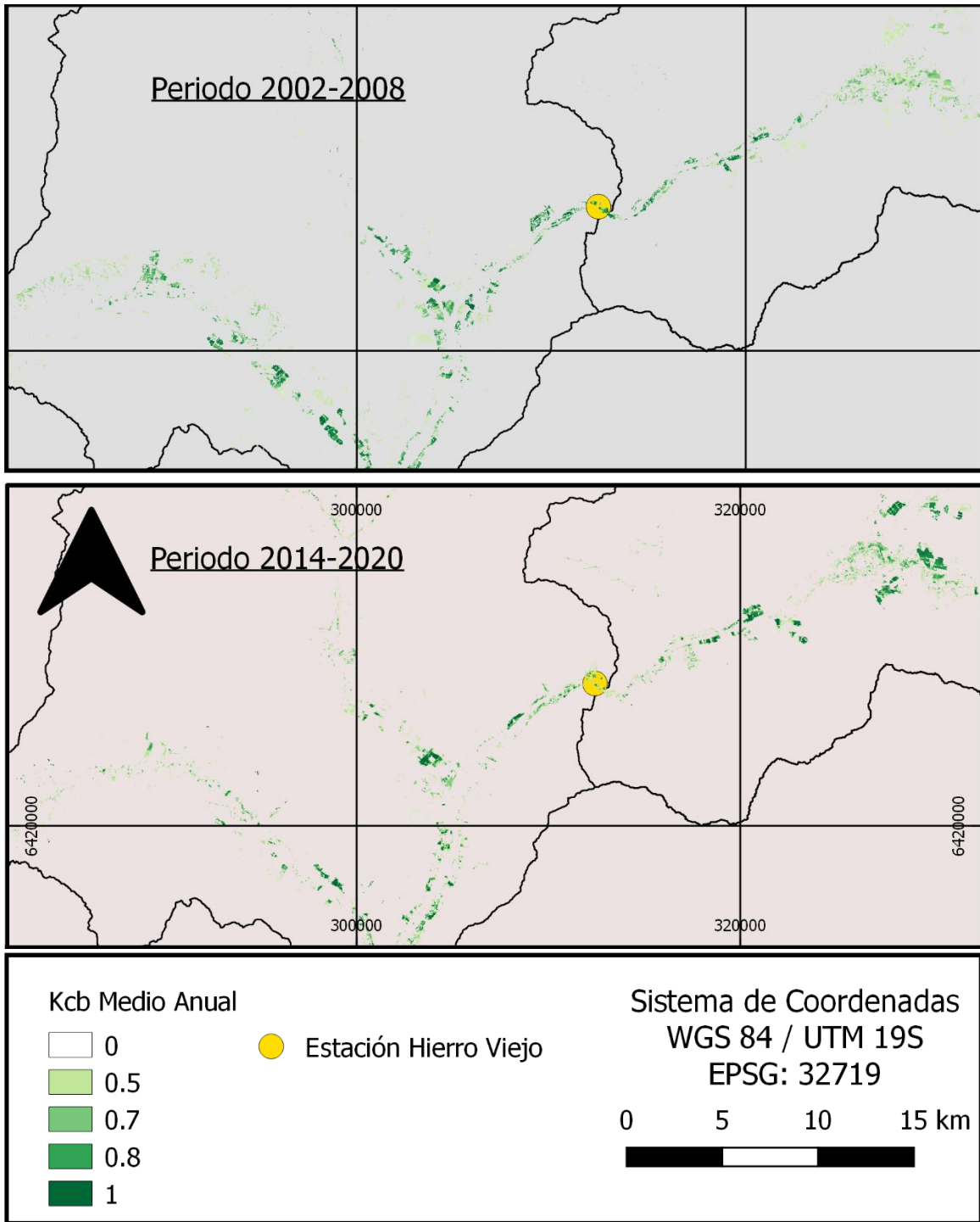


Figura 25: Coeficiente de cultivo medio en periodo 2002-2008 y 2014-2020.

Evapotranspiración de referencia

Los resultados de evapotranspiración de referencia para las estaciones Palquico, Manuel Montt y Pullancon se muestran en la figura 25. Se dispone de datos que permitieron su cálculo mensual para el periodo 2014-2018 con aproximadamente 150 valores en total.

Se observa el comportamiento sinusoidal esperado, excepto para la estación Pullancon, esta tiene interrupciones en la señal sinusoidal y la razón se debe a que es una estación agrometeorológica costera que se ve afectada por la presencia de nubosidad costera, sin embargo, se consideró que los datos anómalos eran un porcentaje menor y se incluyó en la regresión.

Una vez realizada la corrección anterior se puede estimar los valores de evapotranspiración de referencia en las zonas asociadas a agricultura para luego estimar ETc.

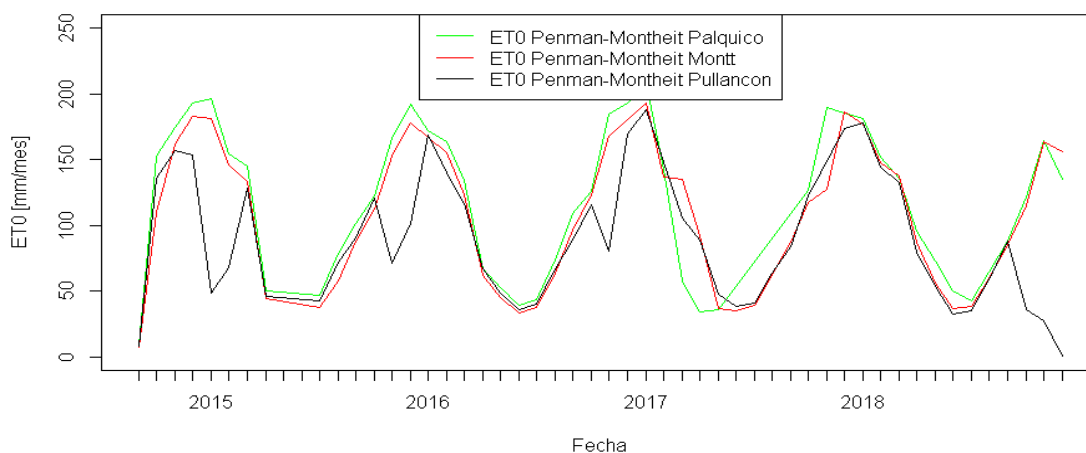


Figura 26: ET0 calculado en base a datos de estaciones INIA.

Evapotranspiración de cultivo

En la figura 27 se pueden ver los resultados sobre evapotranspiración de referencia (rojo) y de cultivo (verde) a nivel mensual en las zonas definidas como agrícola en la cuenca, esto en unidades de [mm/mes]. Se puede apreciar como la señal sinusoidal de ET0 tiene una amplitud relativamente constante, a diferencia de ETc que en sus valores máximos sufre una reducción entre 2011-2013 y un posterior aumento que sobre pasa la media entre 2016-2018.

En la figura 28 se muestra la estimación de volumen anual de ETc en la cuenca, en el área de control uno y área de control dos en unidades de [m³/año]. En la cuenca y en AC1 el máximo de requerimiento de riego está en el año 2004,

en el caso de AC1 el máximo es de 30 millones de metros cúbicos, desde el año 2010 se ve una disminución que llega casi a los 20 millones en el año 2015.

Para AC2 se ve una leve tendencia al alza, pero siempre en torno a 10 millones de metros cúbicos al año, el año 2009 y 2016 son el máximo de requerimiento de riego. Se percibe el efecto de la sequía, pero muy levemente en comparación a sus efectos en el área de control 1.

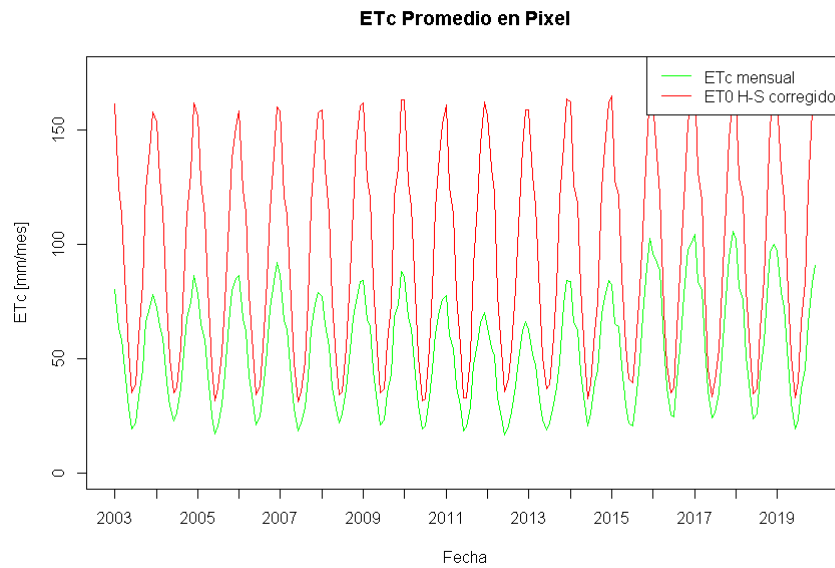


Figura 27: Evapotranspiración potencial media y evapotranspiración de cultivo media en píxel de uso agrícola.

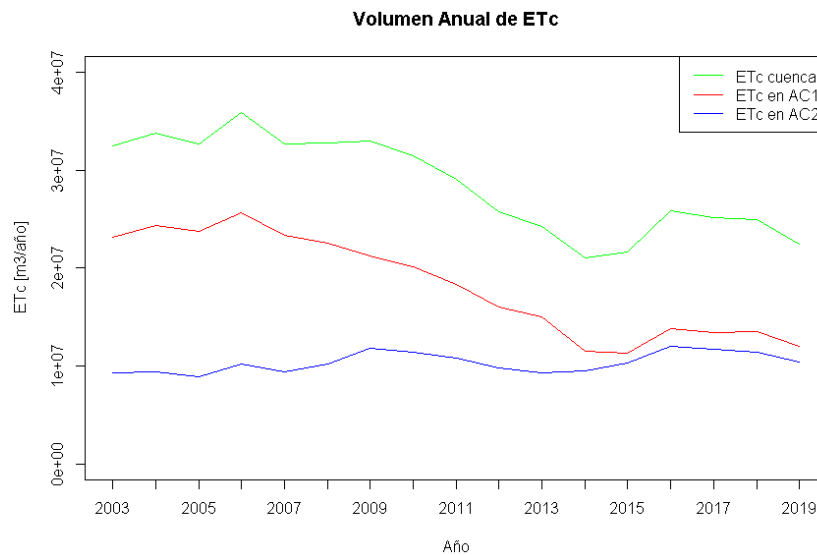


Figura 28: Evapotranspiración de cultivo anual en la cuenca, en área de control 1 y 2.

5.3 Balance hídrico y modelo de Budyko.

Los resultados del balance hídrico son presentados en paneles de gráficos y una tabla resumen, se muestra un gráfico comparativo entre requerimientos de riego y escurrimiento. Los resultados del balance que no sean presentados este capítulo son adjuntados el anexo D. Además, se presentan los resultados de la relación $ET/PP - Q/PP$ y del modelo de Budyko.

En la figura 29 se muestran los resultados del balance hídrico anual para la subcuenca Longotoma y el área de control 1. En ambos casos las componentes que dominan la disponibilidad de agua son la precipitación, que representa la oferta atmosférica de agua, y la evapotranspiración real o natural, que representa la demanda o consumo de agua por parte de la vegetación y la atmósfera. Las componentes de caudal y requerimientos de riego son de un orden de magnitud menor, por lo que no tienen volumen suficiente para comprometer la variación del almacenamiento total de la subcuenca o del área de control.

Es llamativo como en AC1 la componente de evapotranspiración real es superior a la precipitación haciendo que la variación del almacenamiento sea inferior a cero en todos los años del periodo estudiado, eso implica que naturalmente se está evapotranspirando agua que proviene de otras fuentes distinta a la precipitación.

La figura 30 se exhiben dos diagramas de Wundt que muestran el valor de cada componente del balance hídrico a nivel mensual. Para la subcuenca de Longotoma se ve que en los meses de abril a agosto la precipitación es mayor a la evapotranspiración real, haciendo que la variación del almacenamiento sea positiva, en los meses de septiembre a mayo la precipitación es menor, haciendo la variación del almacenamiento negativa.

En la subcuenca Sobrante se tiene que los caudales toman una mayor importancia, estos son más elevados que en el resto de las subcuencas y muestran el comportamiento de una subcuenca nivopluvial, ya que su máximo está en los meses de octubre y noviembre. Se puede ver en el gráfico como estos caudales de primavera tienen repercusiones en la variación del almacenamiento de la cuenca.

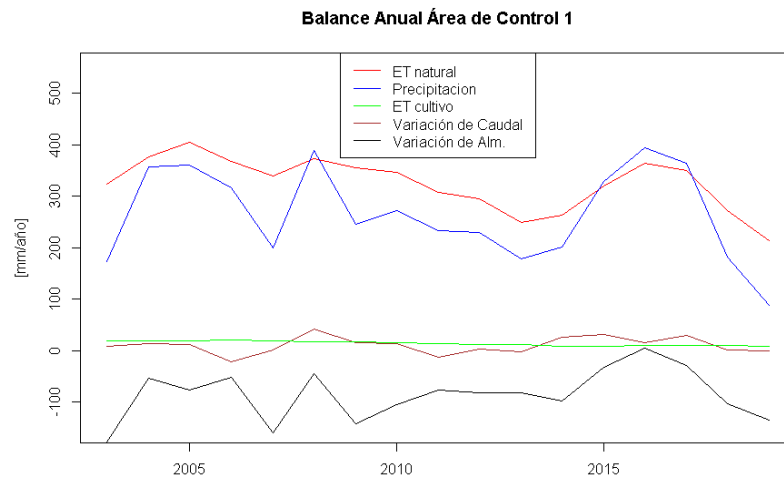
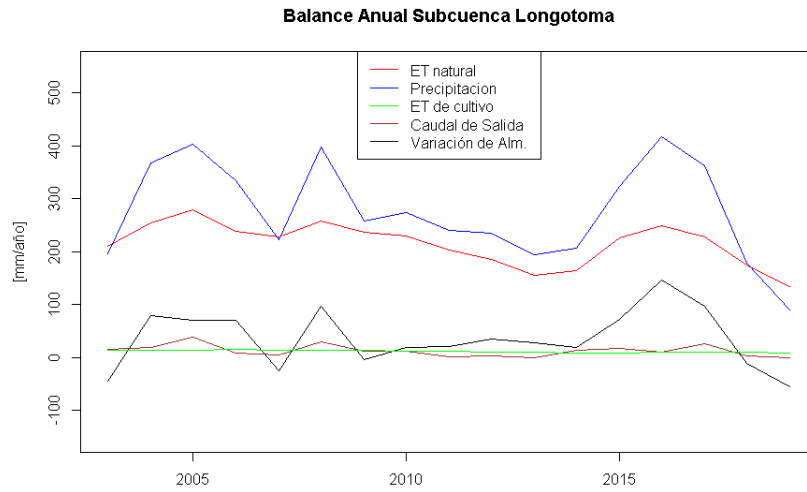


Figura 29: Balance Hídrico Anual en subcuenca Longotoma y Área de Control 1.

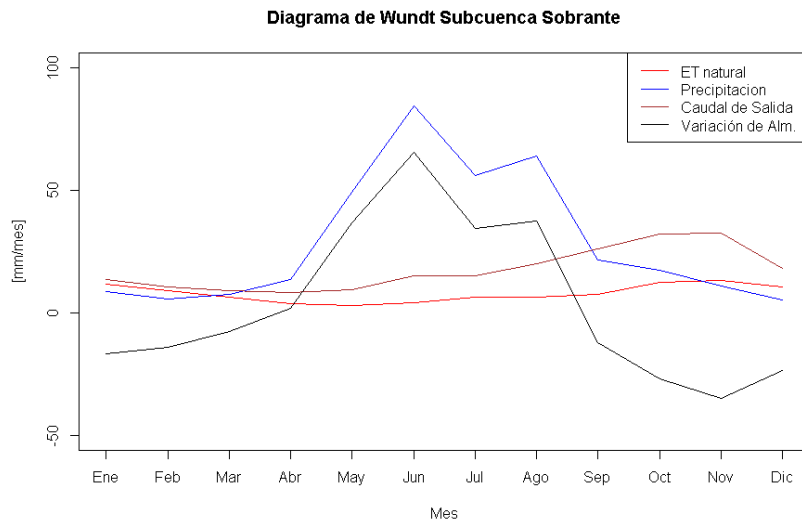
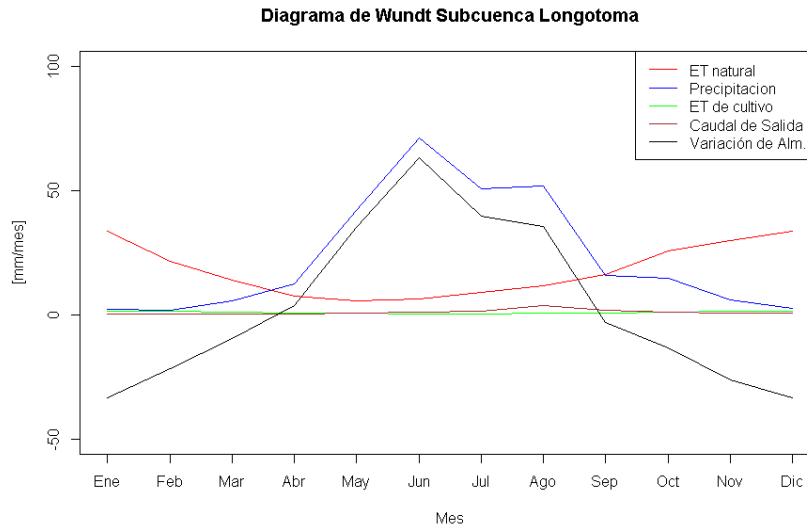


Figura 30: Diagrama de Wundt en subcuenca Longotoma y Sobrante (2003-2019).

En la tabla 8 se muestra un consolidado de resultados del balance hídrico para cada subcuenca estudiada en unidades de [mm/año]. La evapotranspiración real o natural es notoriamente superior para la subcuenca de Longotoma, el caudal es mucho mayor en la subcuenca Sobrante, estas dos zonas son las con menor almacenamiento.

Tabla 8: Consolidados de Resultados del Balance Hídrico (2003-2019).

Subcuenca	[mm/año]					
	PP	PET	ET n	ET c	Q	ΔS
Longotoma	277	1165	215	12	13	37
Hierro Viejo	288	1138	101	9	15	163
Sobrante	344	925	95	0	210	39
Pedernal	303	975	72	0	20	211

Ya que la componente de precipitación y evapotranspiración real son mucho mayores a la evapotranspiración de cultivo y a la escorrentía, es relevante realizar un acercamiento a estas dos últimas, en la figura 31 se muestra el caudal de la estación río Petorca en Longotoma y la evapotranspiración de cultivo en la subcuenca de Longotoma. Se puede apreciar como ambas son el mismo orden de magnitud, sin embargo, el requerimiento de riego es mayor al caudal de salida de la cuenca para la mayoría de los años del periodo de estudio y ronda el metro cubico por segundo.

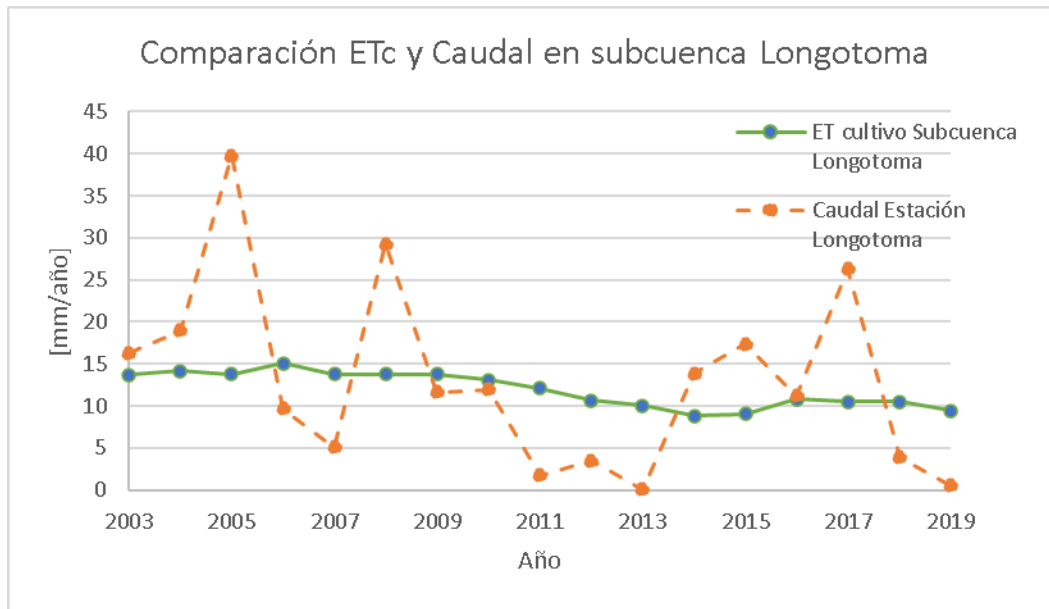


Figura 31: Comparación escorrentía y requerimientos de riego.

Para realizar un ejercicio de estudio a menor escala, en la figura 32, se define un lugar llamado Zona Agrícola de Inspección (ZAI), esta tiene un área de aproximadamente 390 [ha] tiene como objetivo dar una visión a menor escala del balance hídrico y con ello generar insumos para la discusión.

En la figura 33 se muestra una inspección de componentes del balance hídrico en ZAI, la componente de precipitación, con media anual de 200 [mm/año], representa el 70% de la precipitación media anual a nivel de cuenca. La evapotranspiración real o natural, con 130 [mm/año], es un 60% de lo estimado a nivel de cuenca. La evapotranspiración de cultivo se concentra en esta zona, elevándose hasta 260 [mm/año], siendo más de 20 veces la tasa a nivel de cuenca, además pasa a ser la componente de mayor volumen en la mayoría de los años. Es relevante como la variación de almacenamiento es persistentemente negativo y con valor promedio de -190 [mm/año]. Parte de los

supuestos para el análisis de esta zona es considerar que la escorrentía tiende a cero.

Para un análisis mensual, en parte de anexos se adjuntan el diagrama de Wundt de las componentes analizadas y las tablas asociadas. Se observa que, en términos de almacenamiento medio mensual, los meses críticos son diciembre y enero con cerca de -65 [mm/mes], la demanda de riego media mensual llega hasta 35.6 [mm/mes] o 53.5 [Lt/s]. Existen meses de recarga, en que las precipitaciones son mayores que las demás componentes, pero a nivel anual existe un marcado déficit que afecta directamente el almacenamiento de la zona.

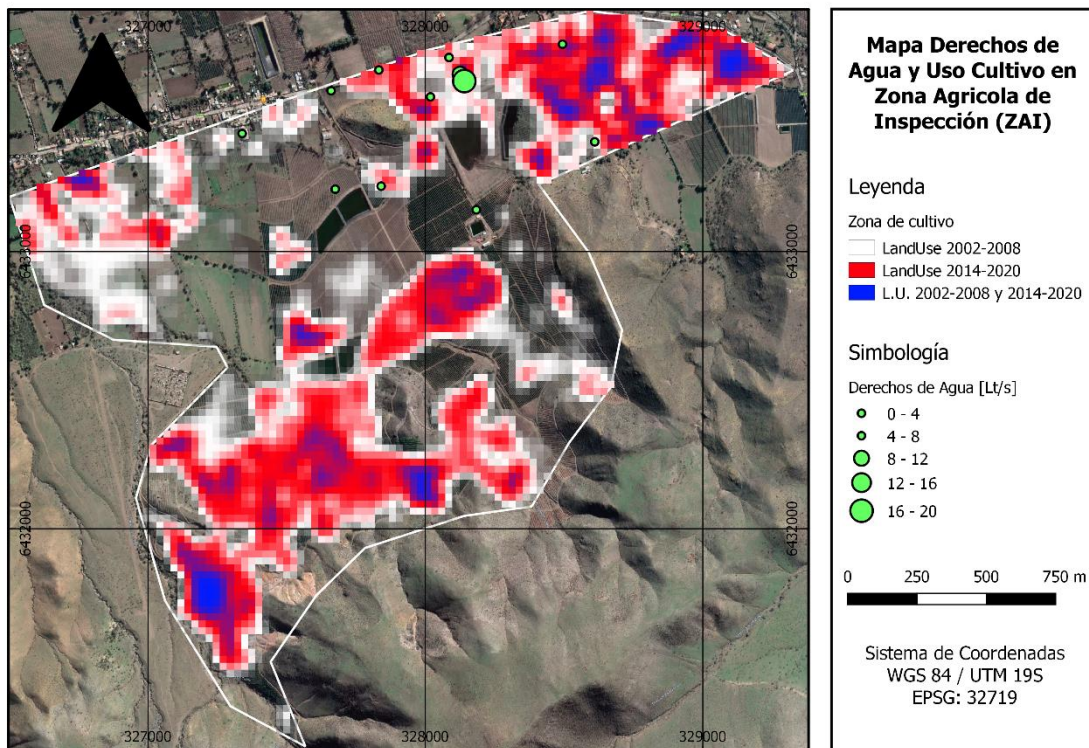


Figura 32: Zona Agrícola de Inspección.

Balance en Zona Agrícola de Inspección

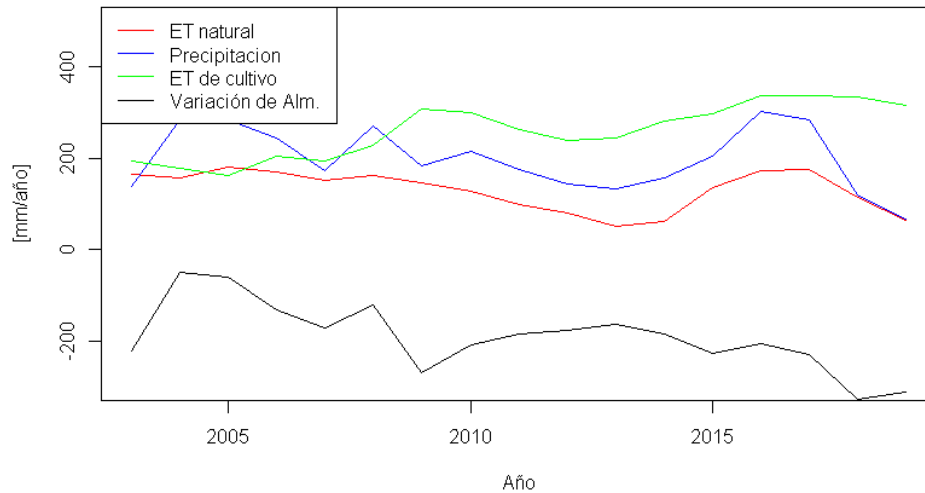


Figura 33: Balance hídrico en Zona Agrícola de Inspección.

En la figura 34 se exhibe la relación entre ET/PP y Q/PP, es importante notar que este último cociente representa el coeficiente de escorrentía en la subcuenca. Estos fueron calculados para tres periodos, en amarillo se muestra el cálculo para el periodo completo, en azul para un primer periodo entre 2003 y 2011, en naranja se tiene para un segundo periodo entre 2011 y 2019. La variación entre periodos es mínima excepto para la subcuenca Sobrante donde se percibe una notable disminución del coeficiente de escorrentía desde 0.7 a menos de 0.5.

El cociente entre evapotranspiración potencial y precipitación ronda 0.2 y 0.4 para las subcuencas de Hierro Viejo, Sobrante y Pedernal, en Longotoma se muestra un valor más elevado llevando este parámetro hasta el valor de 0.8.

Para un tiempo climatológico es esperable en este tipo de gráficos que los puntos se sitúen cerca de la recta naranja, es decir, que la mayoría de la precipitación entrante a la cuenca salga de ella a través de evapotranspiración o caudal respondiendo a la ecuación 18. En este sentido es llamativo el caso de las subcuencas Hierro Viejo y Pedernal en que la suma de ambos cocientes alcanza 0.4 y 0.3 correspondientemente.

$$(18) \quad \frac{ET}{PP} + \frac{Q}{PP} = 1$$

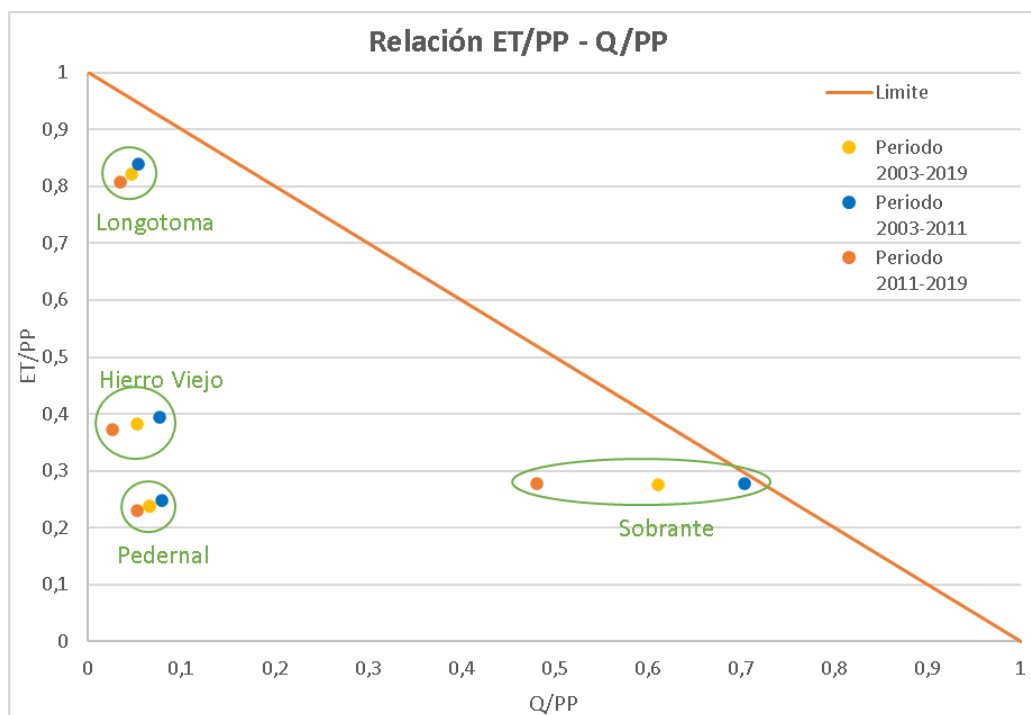


Figura 34: Relación entre precipitación, evapotranspiración real y caudal.

En la figura 35 se exhibe la relación entre ET/PP y el índice de aridez para cada subcuenca estudiada en tres periodos. Para comprender este gráfico se deben entender las rectas incluidas en él, el límite energético indica que la evapotranspiración real no puede ser mayor a la potencial, el límite de agua indica que la evapotranspiración real no puede ser mayor a la precipitación y la curva de Budyko muestra el modelo conceptual planteado en la revisión bibliográfica que busca estimar evapotranspiración a partir de evapotranspiración potencial y precipitación.

La subcuenca con mayor índice de aridez es Longotoma con un valor mayor a 4 y la con menor es Sobrante con 2.5. Los cambios entre el periodo 2003-2011 a 2011-2019 indica un aumento en el índice de aridez entre 1 y 0.8 puntos dependiendo de la subcuenca, también se percibe un valor casi constante del cociente entre evapotranspiración y precipitación.

En la misma figura 35 se puede realizar una comparación de la evapotranspiración realizada por el modelo de Budyko y la estimada en base al producto satelital SSEBop más la evapotranspiración de cultivo (considerar que esta última es proporcionalmente mucho menor a la de SSEBop), el modelo estima una evapotranspiración entre dos y tres veces la presentada en el producto satelital excepto para la subcuenca de Longotoma.

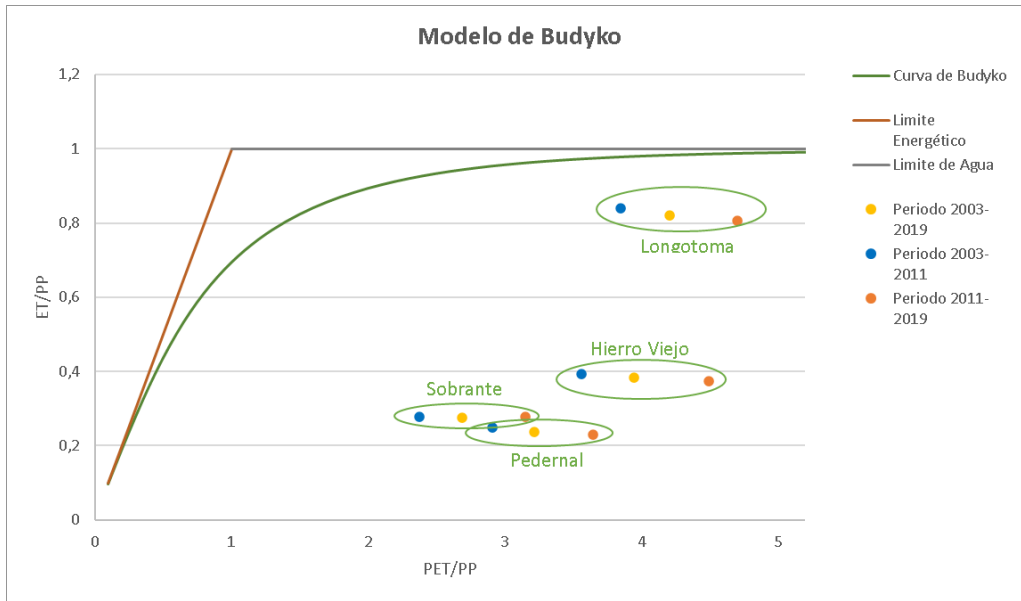


Figura 35: Relación precipitación, evapotranspiración y evapotranspiración potencial.

En las siguientes dos figuras (36 y 37) se muestra una comparación de evapotranspiración entre los resultados del balance hídrico nacional (BHN) y los datos procesados del producto satelital SSEBop a nivel anual (sin considerar la ETc calculada). En la figura 37 se muestra una regresión entre de ET anual para ambos en el periodo 2003-2015, esta regresión entrega un coeficiente de determinación (R²) de 0.73, un error cuadrático medio (RMSE) de 60.3 [mm/año] y un porcentaje de sesgo (PBIAS) de 34.7 %.

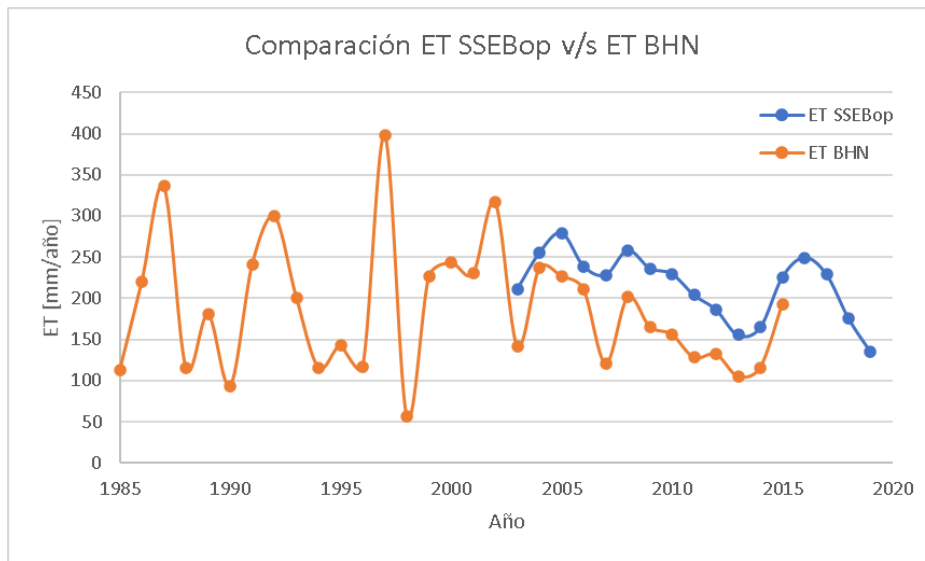


Figura 36: Comparación de ET para producto SSEBop y resultados del BHN.

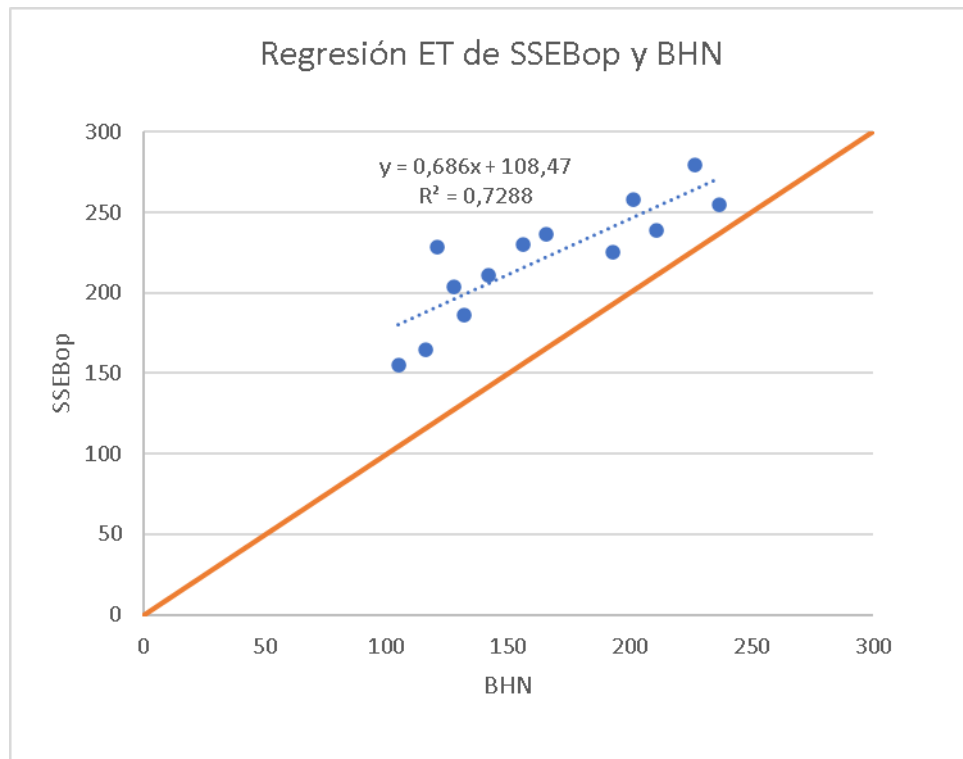


Figura 37: Regresión de ET entre producto satelital SSEBop y resultados del BHN.

6. Discusión

6.1. Cambio de cubierta terrestre y uso de suelo.

La comparación de áreas con el catastro frutícola (figura 19) es solo una referencia ya que las áreas a comparar son distintas (nivel comunas y nivel cuenca), además, es esperable diferencias con el catastro frutícola ya que la metodología realizada en el presente trabajo solo estima en base a una imagen estival. Se eligió una imagen estival ya que se reduce el ruido de una señal asociada a vegetación natural de tipo pradera, la cual es más prolifera en meses de invierno o primavera.

En los mapas de cobertura de suelo se observa una disminución importante en el área de cultivo en AC1 y un leve aumento en el AC2, esto se traduce como un movimiento de las zonas de cultivo desde la parte media a la parte alta de la cuenca. Considerando la escasez y el conflicto hídrico presente en la cuenca, lo anterior es interpretable como una búsqueda de suelos con mayor disponibilidad de agua por parte del sector frutícola.

Los diagramas boxplot de coeficiente de cultivo (K_{cb}) muestran como la intensidad de los cultivos aumenta en el último periodo, considerando que el área es menor, esto se interpreta como una marginación de ciertos productores en contraste con la mayor producción e intensidad de producción de otros (figura 26). En Aldunce et al. (2017), con respecto a los impactos del sector agrícola en el periodo de la mega-sequia, entrevistados mencionan la disminución en la calidad y cantidad de la producción de alimentos; pérdida de cultivos y animales; reducción de tierras de regadío; disminución del tamaño de los productos agrícolas; la imposibilidad de sembrar en fechas tradicionales; y estrés hídrico en cultivos.

6.2. Demanda de riego

Dada la capacidad del enfoque K_{cb-vi} de reflejar condiciones reales del vigor de la cubierta vegetal mediante imágenes satelitales, la estimación representa un ajuste real más que potencial de requerimientos de riego en comparación con técnicas basadas en la ETc con valores de tabulados para cada cultivo, (Nouri et al, 2013). La principal ventaja del método de índices de vegetación es que es capaz de mostrar las variaciones en el crecimiento de las plantas dada condiciones climáticas anormales, por ejemplo, heladas o sequias, además se pueden apreciar las variaciones espaciales de Kc de los campos.

En cuanto a los requerimientos de riego, en la cuenca se estimó una evapotranspiración de cultivo media anual de 12 [mm/año] o 755 [Lt/s]. Es evidenciable las repercusiones de la mega-sequia (figura 28) que afecta negativamente a AC1, en AC2. En efecto la disminución de la ETc a escala de

la cuenca completa es marcada desde el año 2007 llegando a valores mínimos el año 2015. Esta señal de disminución se ve más fuertemente marcada para el AC2 que la AC1 que es un área con baja demanda por riego de manera constante en el tiempo, lo que pone de manifiesto la variabilidad espacio-temporal de esta componente.

Esta componente antrópica no tiene la magnitud de afectar la disponibilidad a escala de cuenca (figura 29) pero se ha evidenciado que genera afectaciones de disponibilidad a hídrica de pozos cercanos a las extracciones al disminuir el nivel de la napa freática. En el trabajo de Lopez (2019) se detectan puntos de extracciones ilegales que, considerando un radio de influencia de 200 [m], afectan las extracciones de otros 15 pozos con derechos de aprovechamiento otorgados.

Para evaluar dicha importancia de la componente de riego a menor escala, se definió la Zona Agrícola de Inspección (Figura 32), en la cual se encontró que la variación anual del almacenamiento (S) es persistentemente negativa para todo el periodo de estudio (figura 33) con una media anual de -190 [mm/año]. Se considera que entradas más salidas naturales de flujos subsuperficiales y subterráneos tienden a cero en el largo plazo, se puede considerar que el almacenamiento representa en su mayoría una pérdida de carga del acuífero.

El análisis medio mensual indica que la zona agrícola delimitada tiene una pérdida de almacenamiento entre los meses de septiembre a abril con una máxima en enero y diciembre de 64 [mm/mes] o 96 [Lt/s], también se recarga el almacenamiento entre mayo a agosto con una máxima de 42 [mm/mes] en junio. Dado lo anterior, se reafirma las afectaciones al almacenamiento a nivel local, las que se agudizan en verano.

En esta zona la demanda por riego (ETc) alcanza su punto más alto en el mes de diciembre con una media mensual de 51.8 [Lt/s] (tabla 10). En enero del año 2019 la demanda fue de 65.7 [Lt/s]. Estos dos datos son importantes ya que en la zona los derechos subterráneos en la zona suman un total de 52.7 [Lt/s]. Se verifica que no hay presencia de extracciones superficiales con coordenadas en la base de datos de la DGA, por lo que, se asume que esta demanda por riego se alimenta únicamente de extracciones subterráneas

Por consiguiente, en enero del 2019, hubieron al menos 13 [Lt/s] destinados a riego que aparentemente no tienen derechos de aprovechamiento asociado. Un riego con flujos superficiales es posible en el extremo sur del polígono, sin embargo, dado que estamos analizando el mes de enero se supondrá que dichos posibles flujos superficiales son despreciables en comparación a los 13 [Lt/s] sin derechos de aprovechamiento asociados. Por ello, solo quedan dos fuentes posibles, extracciones ilegales de agua o derechos de aprovechamientos otorgados sin coordenadas disponibles como información.

6.3. Balance hídrico

Es importante notar que la evapotranspiración de cultivo (ET_c) es la única componente netamente producida por el humano y que las observaciones de caudal no representan una escorrentía natural en las estaciones de Longotoma y Hierro Viejo ya que son modificadas por extracciones superficiales y subterráneas (las extracciones subterráneas influyen en la escorrentía por la disminución del flujo subsuperficial).

Por otro lado, la precipitación y evapotranspiración real (ET_n) son componentes propiamente naturales, la oferta y demanda atmosférica de agua, estas dominan el balance hídrico de las subcuencas y determinan en gran medida la variación del almacenamiento en ellas.

En el AC1 se tiene que la evapotranspiración real es mayor que la precipitación (figura 29), esto quiere decir que la superficie está liberando agua que proviene de otra fuente distinta a la precipitación registrada. Es discutible la posible sobreestimación de la evapotranspiración real por parte del producto satelital, por lo que en los resultados se presenta una comparación a nivel agregado con los resultados del balance hídrico nacional (figura 36). Se puede ver una buena aproximación a los resultados del BHN pero con una sobrestimación cercana al 30%, esta sobrestimación generaría cambios en el balance hídrico, disminuyendo el estrés natural de la zona AC1 pero sin mayores repercusiones en las discusiones asociadas a demás zonas de la cuenca. Sin embargo, aun con esta reducción del 30% en la ET estimada, hay años en los que la ET sigue superando la precipitación en AC1, manteniéndose el estado de estrés natural.

La zona AC1 contiene los bosques nativos más frondosos de la cuenca y son la salida más importante de evapotranspiración natural, el bosque podría estar captando agua de dos maneras posibles, desde la atmosfera mediante un efecto de atrapaniebla o desde el subsuelo con sus raíces, para luego liberarla como evapotranspiración. El efecto de atrapaniebla fue estudiado en Del-Val et al. (2006) encontrándose que los colectores pasivos de niebla (PFC) captaron 200 [mm/año] en la zona de Chile central, se propone la captación real del bosque costero podría ser incluso más alta.

Ambas hipótesis, para la explicar la mayor evapotranspiración sobre precipitación de esta zona, requieren ser probadas y de técnicas que permitan cuantificar la condensación de vapor de agua en el bosque nativo y su capacidad de captar agua desde el flujo subsuperficial, lo que supera los alcances de este trabajo.

Los resultados de la relación precipitación, caudal y evapotranspiración (figura 34) son llamativos en la estación Hierro Viejo y Pedernal por su lejanía a la recta esperada, necesariamente hay agua proveniente de precipitación que esta circulando a través de la cuenca en formas distintas a las salidas por caudal o evapotranspiración. Se observa sobreestimación de las precipitaciones por parte del producto grillado de CR2MET en comparación a los datos puntuales de la estación meteorológica Hierro Viejo, esta es poco menor al 30% (figura 41 de anexos C), esto podría explicar en parte la lejanía a la recta esperada pero no en su totalidad ya que la distancia es mucha.

En el intento de explicar por dónde circula el agua precipitada faltante, una hipótesis con fuente antrópica no es aplicable en la subcuenca Pedernal dada su condición de no intervención, además, en Hierro Viejo la precipitación es dos órdenes de magnitud mayor que la demanda antrópica por lo que se descarta que las extracciones sean capaces de explicar que sucede con la precipitación que no escurre como caudal ni evapora. Una posible fuente natural de circulación de agua es la infiltración de las lluvias en el acuífero.

Con relación al mismo gráfico (figura 34), la disminución del coeficiente de escorrentía en la subcuenca Sobrante es llamativo y un símbolo de alerta, esta podría llegar a tener asociado efectos antrópicos de existir extracciones en la zona aguas arriba de la estación fluviométrica, esto se considera poco probable y requiere de una fiscalización en terreno para ser comprobada o refutada.

Una explicación más probable a la disminución del coeficiente de escorrentía esta dado por efectos naturales ligados a la memoria de la cuenca (Alvarez-Garreton et al., 2021), se relaciona con la transferencia de precipitaciones a lentos flujos subterráneos mediante infiltración, esta infiltración termina aportando a la escorrentía aguas abajo. En Alvarez-Garreton et al. (2021) se correlaciona positivamente este aporte con cuencas que tienen presencia de la acumulación de nieve, como lo es el Sobrante. En Taucare et al. (2020) se estudia la recarga de acuíferos y cómo ciertas condiciones la favorecen, se prueba la existencia de recargas en áreas andinas elevadas mediante infiltración por medio de fracturas de roca originadas por la lluvias y deshielos. Estas condiciones se condicen con lo encontrado en la subcuenca Sobrante. Con una condición nivopluvial (figura 9), importantes fracturas ubicadas en la subcuenca Sobrante (figura 7) y una altura media de 2.600 [m.s.n.m.]. Dicho lo anterior se podría explicar la disminución (del periodo 2003-2011 al 2009-2019) del coeficiente de escorrentía en la subcuenca Sobrante como un efecto de propagación de la mega-sequia, dada la disminución de las precipitaciones se produce una disminución de los flujos subterráneos transferido a la escorrentía.

En cuanto a los resultados relacionados al modelo de Budyko, es claro que la subcuenca de Longotoma se encuentra más cerca del límite hídrico del modelo porque contiene la zona con mayor evapotranspiración de la cuenca. Se

ve un aumento generalizado del índice de aridez entre periodos, esto se debe principalmente a la disminución de precipitaciones en el segundo periodo (2011-2019) a raíz de la mega-sequía.

6.4. Oferta natural

Para periodos climatológicos largos (en este estudio se cuenta con 17 años de datos) se puede estimar la oferta natural mediante un balance hídrico simplificado que considera que el caudal medio anual se asemeja a la diferencia entre la precipitación media anual y evapotranspiración media anual (Lagos, 2020). Al comparar la oferta de la cuenca con las demandas registradas como derechos de aprovechamiento se tiene que, tanto a nivel superficial como total, la oferta es menor. Esto implica que hay derechos superficiales que no se pueden ejercer y que existe una sobre otorgamiento de derechos totales.

Tabla 9: Oferta Natural de la cuenca y demanda de aprovechamiento de aguas.

[m ³ /s]						
Precipitación	ET Natural	Oferta Natural	Derechos de aprovechamiento Superficiales Otorgados	Diferencia entre Oferta y Derechos Superficiales	Derechos de aprovechamiento Total Otorgados	Diferencia entre Oferta y Derechos Totales
17.01	13.21	3.8	4.18	-0.38	9.5	-5.7

Hay que recordar que no existen derechos no consuntivos en la cuenca. Si se desea diferenciar entre derechos permanentes y eventuales, hay que considerar que estos últimos son todos superficiales y suman un total de 2,09 [m³/s].

7. Conclusión

Las cubiertas agrícolas clasificadas siguen la tendencia reportada en los catastros, considerándose representativas para mostrar como la actividad agrícola se ha visto afectada negativamente en la parte media-baja de la cuenca y favorecida en la parte media-alta. Se concluye entonces por este motivo que hubo movimiento de la actividad agrícola hacia nuevas fuentes hídricas.

La metodología relacionada al coeficiente de cultivo tiene la capacidad de estimar evapotranspiración de cultivo en diversos tipos de especies, aunque el índice de área foliar fue calculado usando como base ecuaciones parametrizadas para estimar requerimientos de riego en paltos, estos representan al menos el 50% de las especies agrícolas presentes en la cuenca del Rio Petorca, por lo que se consideran los resultados representativos de las necesidades de riego de la actividad frutícola.

La evapotranspiración natural consume en promedio 215 [mm/año] de agua, sin embargo, la zona más frondosa de vegetación nativa (ubicada en el AC1) alcanza valores entre 400 a 800 [mm/año]. Esta se contrasta con el consumo de agua por riego en los predios la cual es en promedio 410 [mm/año]. Se concluye que el consumo hídrico de los cultivos es comparable con el consumo de la vegetación nativa de medio vigor, siendo su consumo menor que el del vigoroso bosque costero y mayor para la gran mayoría de las áreas de vegetación nativa.

Las disminuciones de demanda de riego se relacionan a la disminución de las precipitaciones, siendo los agricultores en el AC1 los más perjudicados. También se concluye que la demanda de riego representa baja cantidad de agua con respecto al balance hídrico a escala de cuenca, siendo la evapotranspiración real de la cuenca dominada por la vegetación nativa. Se identifican posibles efectos a escala local, como en la zona agrícola de inspección (ZAI). En esta zona, la variación de almacenamiento anual negativo representa en su mayoría la descarga del acuífero como resultado de las extracciones para uso de riego. Aquello es una señal potente de que la actividad de fruticultura genera afectaciones locales de disponibilidad hídrica hacia la misma actividad frutícola y los pozos dentro del radio de influencia. Además, en ZAI, no se encontraron los suficientes derechos de aprovechamiento de aguas otorgados para abastecer la demanda de riego, lo cual abre dos opciones, una es que existen derechos de aprovechamiento sin coordenadas, no contabilizadas en este estudio, la otra es que este análisis sea una prueba de que hay extracciones ilegales en la zona de inspección.

La crisis hídrica vivida en la cuenca de Petorca es multicausal, en este trabajo se han encontrado indicios de estrés natural al ser esta una zona semiárida e impactada por efectos de la mega-sequía, también hay evidencias de la propagación de la sequía en los caudales de la parte alta de la cuenca, se encuentran también por causas antrópicas dadas por el sobreotorgamiento de derechos de aguas y por una demanda de riego que es mayor a los derechos

otorgados en algunos predios de la cuenca. En cuanto a las causas naturales se puede decir que una sequía prolongada reduce la disponibilidad en toda la cuenca y hace que todos los usuarios de aguas se vean afectados, por tanto, es necesario un plan de adaptación ante estos eventos. En cuanto a las causas antrópicas de la crisis se tiene como principal razón el actual modelo de gestión hídrica del país, al generar una competencia de mercado por este bien y otorgar derechos de aprovechamientos que superan la oferta natural de la cuenca, se causa una disputa entre los usuarios de agua.

Se sugiere un estudio más específico de afectaciones de la demanda por riego a nivel local, esto podría dilucidar mejor la dinámica de disputa territorial por el agua en esta zona en crisis. El gran potencial del presente mapeo de demanda de riego es que acompañada con una campaña de terreno podría ser una herramienta de fiscalización para las autoridades. Se considera necesario una reasignación de derechos de agua en la cuenca, no solo porque se haya constatado un sobreotorgamiento, sino porque es necesario que los nuevos derechos de agua limiten los impactos locales de esta actividad.

8. Bibliografía

- Aldunce, P., Araya, D., Sapiain, R., Ramos, I., Lillo, G., Urquiza, A., & Garreaud, R. (2017). Local perception of drought impacts in a changing climate: The mega-drought in central Chile. *Sustainability (Switzerland)*, *9*(11), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su9112053>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 - Crop Evapotranspiration. March.*
- Allen, Richard G., & Pereira, L. S. (2009). Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science*, *28*(1), 17–34. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0182-z>
- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(11), 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Alvarez-Garreton, C., Pablo Boisier, J., Garreaud, R., Seibert, J., & Vis, M. (2021). *Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile.* *Hydrology and Earth System Sciences.* <https://doi.org/10.5194/hess-25-429-2021>
- Barbosa, O., Marquet, P. A., Bacigalupe, L. D., Christie, D. A., del-Val, E., Gutierrez, A. G., Jones, C. G., Weathers, K. C., & Armesto, J. J. (2010). Interactions among patch area, forest structure and water fluxes in a fog-inundated forest ecosystem in semi-arid Chile. *Functional Ecology*, *24*(4), 909–917. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01697.x>
- Boisier, J. P., Alvarez-Garreton, C., Cordero, R. R., Damiani, A., Gallardo, L., Garreaud, R. D., Lambert, F., Ramallo, C., Rojas, M., & Rondanelli, R. (2018). Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elementa*, *6*. <https://doi.org/10.1525/elementa.328>
- Budyko, M. I. (1961). The Heat Balance of the Earth's Surface. *Soviet Geography*, *2*(4), 3–13. <https://doi.org/10.1080/00385417.1961.10770761>
- Bujes, N. (2015). *ESTUDIO DE LA PROPIEDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ACUÍFERO DEL RÍO PETORCA EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE STUDY* (Vol. 3, Issue 2). <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Castro, R., & Espinosa, M. (2008). *Evaluación ambiental de plantaciones de paltos en laderas. Cuenca del río Petorca. Región de Valparaíso. Chile.* 1–170.
- Center for Climate and Resilience Research. (2021a). *Datos de caudales.* <http://www.cr2.cl/datos-de-caudales/>
- Center for Climate and Resilience Research. (2021b). *Productos grillados.*

<http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>

- Chávez, R. O., Moreira-Muñoz, A., Galleguillos, M., Olea, M., Aguayo, J., Latín, A., Aguilera-Betti, I., Muñoz, A. A., & Manríquez, H. (2019). GIMMS NDVI time series reveal the extent, duration, and intensity of “blooming desert” events in the hyper-arid Atacama Desert, Northern Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 76(June 2018), 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.013>
- Chen, H., Huo, Z., Zhang, L., & White, I. (2020). New perspective about application of extended Budyko formula in arid irrigation district with shallow groundwater. *Journal of Hydrology*, 582(17), 124496. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124496>
- Choudhury, B. J., Ahmed, N. U., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Daughtry, C. S. T. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 50(1), 1–17. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90090-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90090-6)
- CIREN. (2021). *Catastro Frutícola*. <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/catastros-fruticolas/catastro-fruticola-ciren-odepa>
- CNR. (2016). *Diagnóstico para desarrollar plan de riego en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca*. 208.
- Del-Val, E., Armesto, J. J., Barbosa, O., Christie, D. A., Gutiérrez, A. G., Jones, C. G., Marquet, P. A., & Weathers, K. C. (2006). Rain forest islands in the Chilean semiarid region: Fog-dependency, ecosystem persistence and tree regeneration. *Ecosystems*, 9(4), 598–608. <https://doi.org/10.1007/s10021-006-0065-6>
- DGA, D. general de aguas. (2011). *ESTUDIO DIAGNÓSTICO DE LOS RECURSOS SUBTERRÁNEOS EN EL SISTEMA HÍDRICO LIGUA Y PETORCA*. http://www.ciifen-int.org/images/stories/Herramientas_y_Recursos/Informe_Final_Medidas_de_Adaptación_PNM.pdf
- DGA, D. general de aguas. (2017). *Actualización del Balance Hídrico Nacional*. 378.
- DGA, D. general de aguas. (2020). *Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA*. https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx
- Eagleson, P. S. (1978). *The Distribution of Annual Precipitation Derived From Observed Storm Sequences*. 14(5).
- Earth Engine Data Catalog. (2021). *neighborhoodToBands*. <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-image-neighborhoodtobands>

- Echeverria, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J. M., Lara, A., & Newton, A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests. *Biological Conservation*, 130(4), 481–494. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.01.017>
- Gan, G., Liu, Y., & Sun, G. (2020). Understanding Interactions among Climate, Water, and Vegetation with the Budyko framework. *Earth-Science Reviews*, 103451. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103451>
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Pablo Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Gentine, P., D’Odorico, P., Lintner, B. R., Sivandran, G., & Salvucci, G. (2012). Interdependence of climate, soil, and vegetation as constrained by the Budyko curve. *Geophysical Research Letters*, 39(19), 2–7. <https://doi.org/10.1029/2012GL053492>
- Gerardo, H., Gutiérrez, L., & Hernández, V. (n.d.). *EL ALGORITMO K MEANS MEDIANTE WEKA (WAIKATO ENVIRONMENT FOR KNOWLEDGE ANALYSIS) Resumen Introducción.*
- Glenn, E. P., Neale, C. M. U., Hunsaker, D. J., & Nagler, P. L. (2011). Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrological Processes*, 25(26), 4050–4062. <https://doi.org/10.1002/hyp.8392>
- Gong, P., Wang, J., Yu, L., Zhao, Y., Zhao, Y., Liang, L., Niu, Z., Huang, X., Fu, H., Liu, S., Li, C., Li, X., Fu, W., Liu, C., Xu, Y., Wang, X., Cheng, Q., Hu, L., Yao, W., ... Chen, J. (2013). Finer resolution observation and monitoring of global land cover: First mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(7), 2607–2654. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.748992>
- Google Earth Engine. (2021a). *USGS Landsat 5 Surface Reflectance Tier 1*. Earth Engine Data Catalog. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LT05_C01_T1_SR
- Google Earth Engine. (2021b). *USGS Landsat 8 Surface Reflectance Tier 1*. Earth Engine Data Catalog. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C01_T1_SR
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Gregorio, A. Di. (2016). Land Cover Classification System. In *October* (Issue October). <http://www.fao.org/docrep/003/x0596e/x0596e00.htm>

- Guo, D., Westra, S., & Peterson, T. (2020). *Package 'Evapotranspiration.'*
- Hansen, M. C., Potapov, P. V, Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V, Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). *Reports 16. 134*(2011).
- Hernández, H. J., Galleguillos, M., & Estades, C. (2016). Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014 : Descripción del Producto. *Laboratorio GEP, Facultad de Ciencias Forestales y de La Conservación de La Naturaleza, Universidad de Chile, 2015*, 1–4. <http://www.gep.uchile.cl/Landcover/Landcover de Chile - Descripción del Producto - GEP UCHILE 2016.pdf>
- Huete, A. R. (1988). Comparative studies on IFAT, ELISA & DAT for serodiagnosis of visceral leishmaniasis in Bangladesh. *Bangladesh Medical Research Council Bulletin*, 22(1), 27–32.
- Huete, A. R., Didan, K., & Van Leeuwen, W. (1999). Modis Vegetation Index. *Vegetation Index and Phenology Lab*, 3(1), 129.
- Kennedy, R. E., Yang, Z., & Cohen, W. B. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr - Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2897–2910. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.008>
- Kennedy, R. E., Yang, Z., Cohen, W. B., Pfaff, E., Braaten, J., & Nelson, P. (2012). Spatial and temporal patterns of forest disturbance and regrowth within the area of the Northwest Forest Plan. *Remote Sensing of Environment*, 122, 117–133. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.024>
- Lagos-Zuñiga, M., Dionizis, D., Moya, H., Valdés, J. M., Jara, F., Saavedra, F., Astorga, K., & De la Fuente, A. (2020). ¿ CUÁNTA AGUA TIENEN REALMENTE NUESTROS RÍOS ? UN ANÁLISIS A TRAVÉS. *November*, 0–12. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C01_T1_SR
- López, O. (2019). IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS CON POSIBLE EXTRACCIÓN ILEGAL DE AGUA EN LA CUENCA DE PETORCA, CHILE, MEDIANTE LA ESTIMACIÓN DE ÁREAS AGRÍCOLAS SIN DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA ASIGNADOS. In *SSRN Electronic Journal* (Vol. 5, Issue 564). <https://doi.org/10.4324/9781315853178>
- Madariaga, A., Maillet, A., & Rozas, J. (2021). Multilevel business power in environmental politics: the avocado boom and water scarcity in Chile. *Environmental Politics*, 00(00), 1–22. <https://doi.org/10.1080/09644016.2021.1892981>
- Mosre, J. (2020). *ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATES IN ARID REGIONS USING IN-SITU AND REMOTE SENSING DATA ESTIMATES IN ARID REGIONS USING IN-SITU AND REMOTE SENSING DATA.*

- Muñoz, A. A., Klock-Barría, K., Alvarez-Garreton, C., Aguilera-Betti, I., González-Reyes, Á., Lastra, J. A., Chávez, R. O., Barría, P., Christie, D., Rojas-Badilla, M., & Lequesne, C. (2020). Water crisis in petorca basin, Chile: The combined effects of a mega-drought and water management. *Water (Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/w12030648>
- Nahuelhual, L., Carmona, A., Lara, A., Echeverría, C., & González, M. E. (2012). Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south-central Chile. *Landscape and Urban Planning*, 107(1), 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.04.006>
- Nouri, H., Beecham, S., Kazemi, F., Hassanli, A. M., & Anderson, S. (2013). Remote sensing techniques for predicting evapotranspiration from mixed vegetated surfaces. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(3), 3897–3925. <https://doi.org/10.5194/hessd-10-3897-2013>
- Olivera-Guerra, L., Mattar, C., & Galleguillos, M. (2014). Estimation of real evapotranspiration and its variation in Mediterranean landscapes of central-southern Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28(1), 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.11.012>
- Panez Pinto, A., Mansilla Quiñones, P., & Moreira-Muñoz, A. (2018). Agua, tierra y fractura sociometabólica del agronegocio. Actividad frutícola en Petorca, Chile. *Bitácora Urbano Territorial*, 28(3), 153–160. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v28n3.72210>
- Pôças, I., Calera, A., Campos, I., & Cunha, M. (2020). Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: A review on spectral vegetation indices approaches. *Agricultural Water Management*, 233(December 2019), 106081. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106081>
- Pôças, Isabel, Paço, T. A., Paredes, P., Cunha, M., & Pereira, L. S. (2015). Estimation of actual crop coefficients using remotely sensed vegetation indices and soil water balance modelled data. *Remote Sensing*, 7(3), 2373–2400. <https://doi.org/10.3390/rs70302373>
- Puertas, O. L., Brenning, A., & Meza, F. J. (2013). Balancing misclassification errors of land cover classification maps using support vector machines and Landsat imagery in the Maipo river basin (Central Chile, 1975-2010). *Remote Sensing of Environment*, 137, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.06.003>
- Rivero, L. (2020). *CARTOGRAFÍA DE COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc) A PARTIR DE DATOS REMOTOS SOBRE PALTOS EN CHILE MEDITERRÁNEO*. UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD.
- Savoca, M. E., Senay, G. B., Maupin, M. A., Kenny, J. F., & Perry, C. A. (2013). Actual Evapotranspiration Modeling Using the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) Approach. *U.S Geological Survey Scientific Investigations Report 2013–5126*, January, 16 p.

<http://pubs.usgs.gov/sir/2013/5126>

- Schulz, H. (2011). Patt. In *Religion und Konflikt*.
<https://doi.org/10.13109/9783666604409.185>
- Schulz, J. J., Cayuela, L., Echeverria, C., Salas, J., & Rey Benayas, J. M. (2010). Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975-2008). *Applied Geography*, 30(3), 436–447.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.12.003>
- Senay, G B, Leake, S., Nagler, P. L., Artan, G., Dickinson, J., Cordova, J. T., & Glenn, E. P. (2011). *Estimating basin scale evapotranspiration (ET) by water balance and remote sensing methods* *†*. 4049(December), 4037–4049.
<https://doi.org/10.1002/hyp.8379>
- Senay, Gabriel B, Bohms, S., Singh, R. K., Gowda, P. H., Velpuri, N. M., Alemu, H., & Verdin, J. P. (2013). *OPERATIONAL EVAPOTRANSPIRATION MAPPING USING REMOTE SENSING AND WEATHER DATASETS : A NEW PARAMETERIZATION FOR THE SSEB APPROACH* 1. 49(3).
<https://doi.org/10.1111/jawr.12057>
- Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N., Novikov, A., & Skakun, S. (2017). Exploring Google earth engine platform for big data processing: Classification of multi-temporal satellite imagery for crop mapping. *Frontiers in Earth Science*, 5(February), 1–10. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00017>
- Taucare, M., Daniele, L., Viguier, B., Vallejos, A., & Arancibia, G. (2020). Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile. *Science of the Total Environment*, 722, 137824.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137824>
- Troch. (2009). Advanced Bash-Scripting Guide An in-depth exploration of the art of shell scripting Table of Contents. *Okt 2005 Abrufbar Uber Httpwww Tldp OrgLDPabsabsguide Pdf Zugriff 1112 2005, 2274*(November 2008), 2267–2274. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- USGS. (2020). *NASA SRTM Digital Elevation 30m*.
<https://doi.org/10.1029/2005RG000183/full>
- Wegman, M., Leutner, B., & Dech, S. (2016). *Remote Sensing and GIS for Ecologists: Using Open Source Software (Data in the Wild)*.
- Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang, Y., & Shao, Q. (2008). Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework - Model development and testing. *Journal of Hydrology*, 360(1–4), 117–131.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.021>
- 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.

9. Anexos

Anexo A: Caracterización Climática

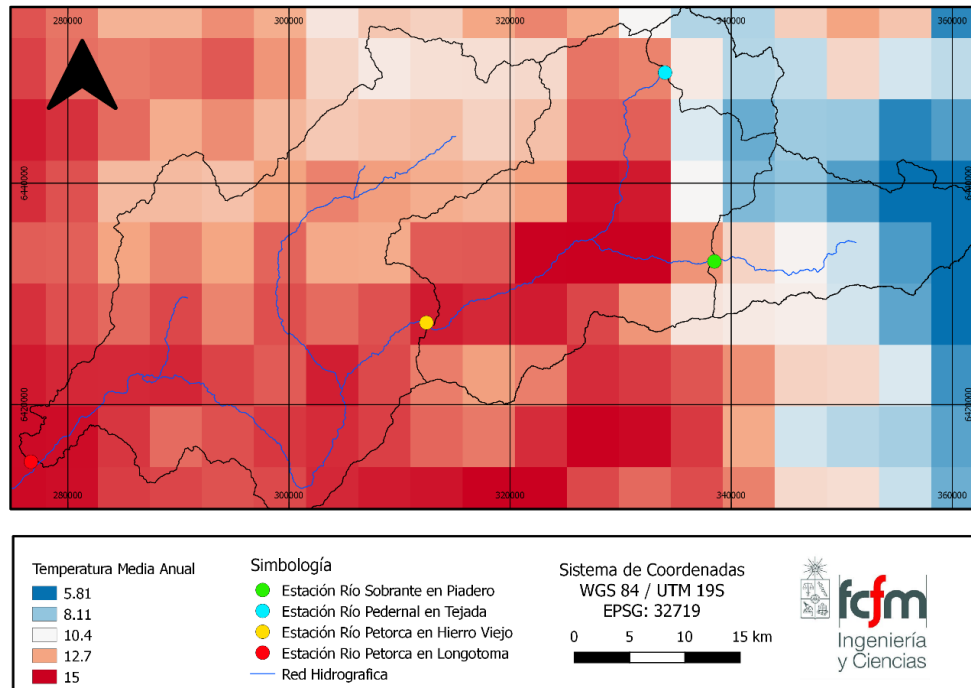


Figura 38: Temperatura media anual en la cuenca del río Petorca.

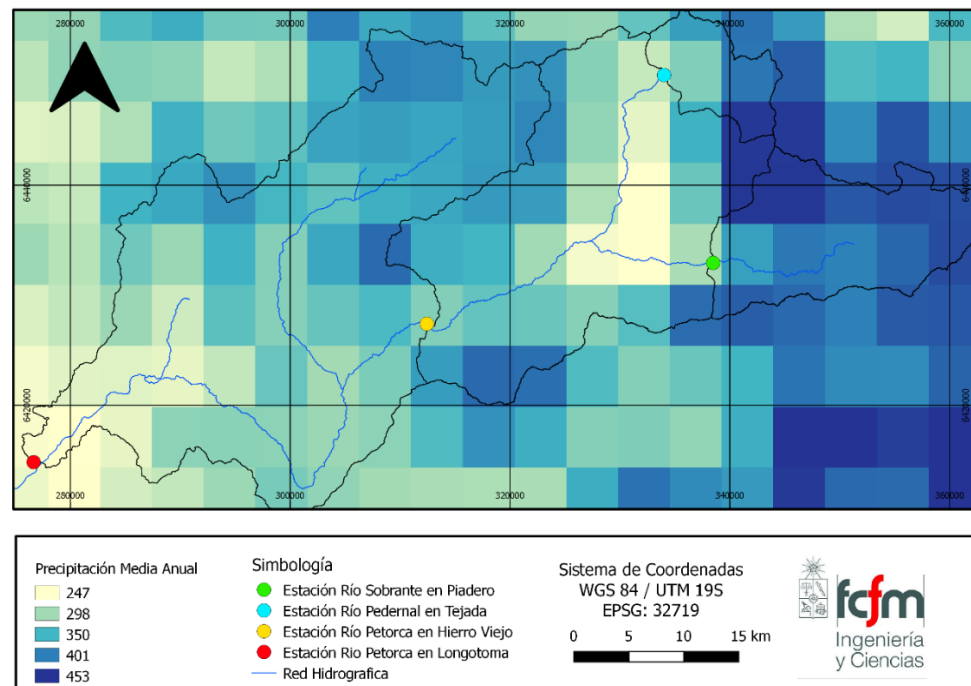


Figura 39: Precipitación media anual en la cuenca del río Petorca.

Anexo B: Estimación Evapotranspiración

En el gráfico 22 se exhibe un diagrama de dispersión entre los valores de evapotranspiración de referencia de las estaciones y los valores de evapotranspiración potencial calculados con “Hargreaves – Samani” en los pixeles asociados a la posición de dichas estaciones.

Se observa la línea de tendencia con una pendiente de 1.03 y un intercepto de -18.56, la regresión presenta un R cuadrado de 0.7 y un error cuadrático medio de 29.2 [mm/mes]. Los valores anómalos estas principalmente presentes en la estación Pullancon, esto se debe a ser una estación costera con alteraciones en las mediciones asociadas a nubosidades que alteran los valores de radiación.

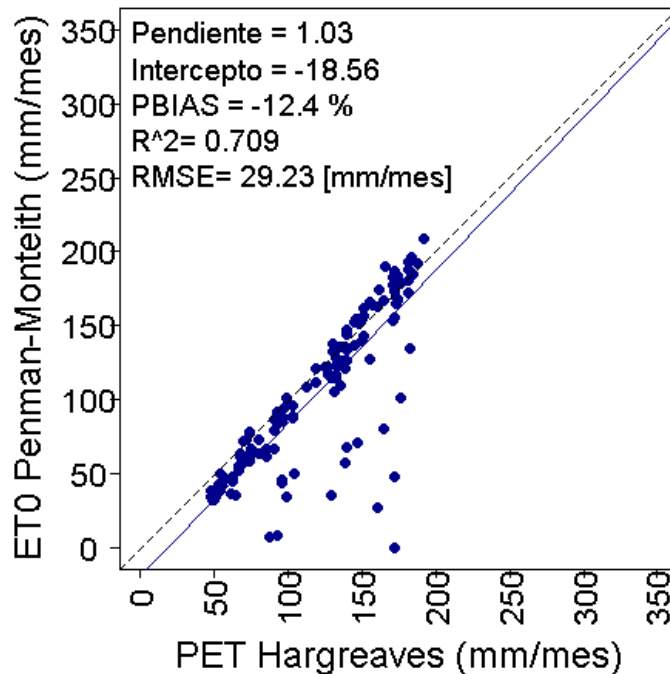


Figura 40: Regresión lineal entre ET0 calculada con estaciones INIA y PET de Hargreaves.

Anexos C: Validación Datos

En el gráfico 23 se muestra la comparación entre el producto grillado de CR2 con los datos de la estación meteorológica Hierro Viejo. Se realiza una regresión entre la precipitación media en el periodo 2003-2019. Se muestra un coeficiente de determinación de 0.82, se estimó un porcentaje de sesgo de 63.3% y un error cuadrático medio de 16.8 [mm/mes].

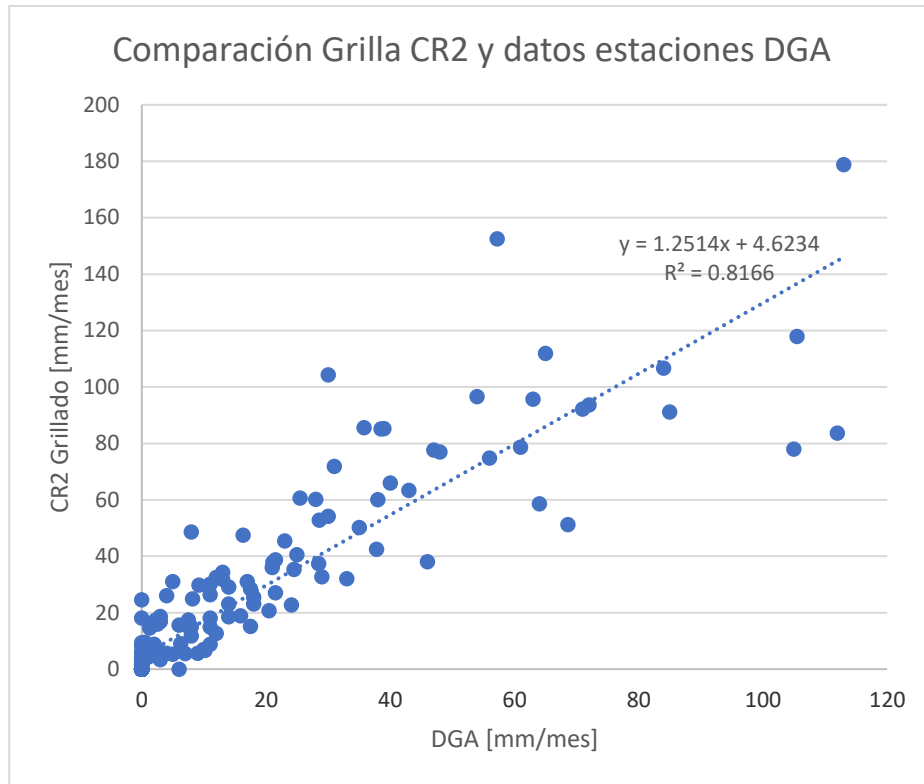


Figura 41: Comparación entre producto grillado CR2 y estación meteorológica Hierro Viejo periodo 2003-2019.

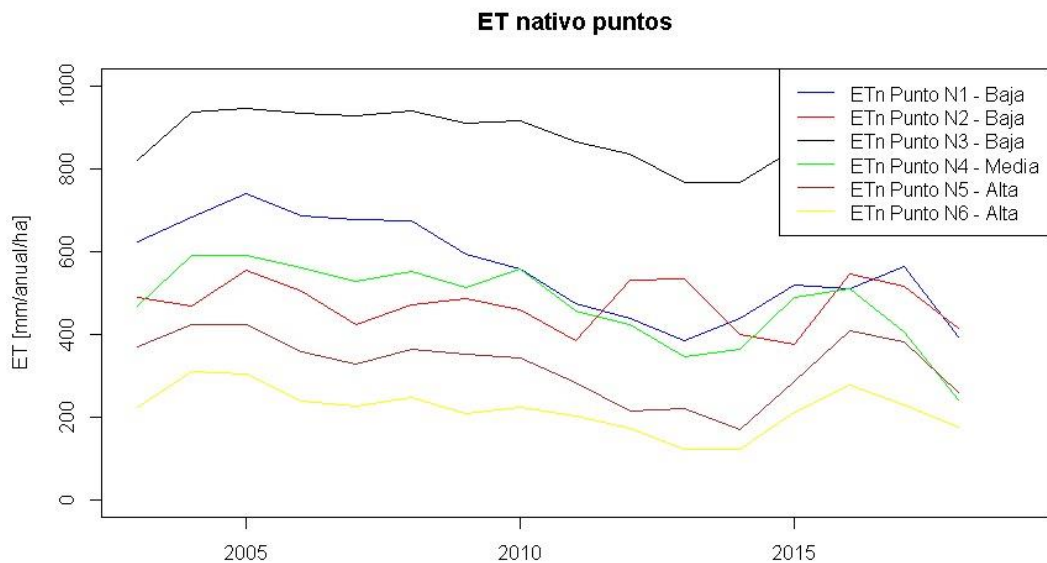


Figura 42: Valores anuales de ET real en producto SSEBop para puntos de inspección vegetación nativa.

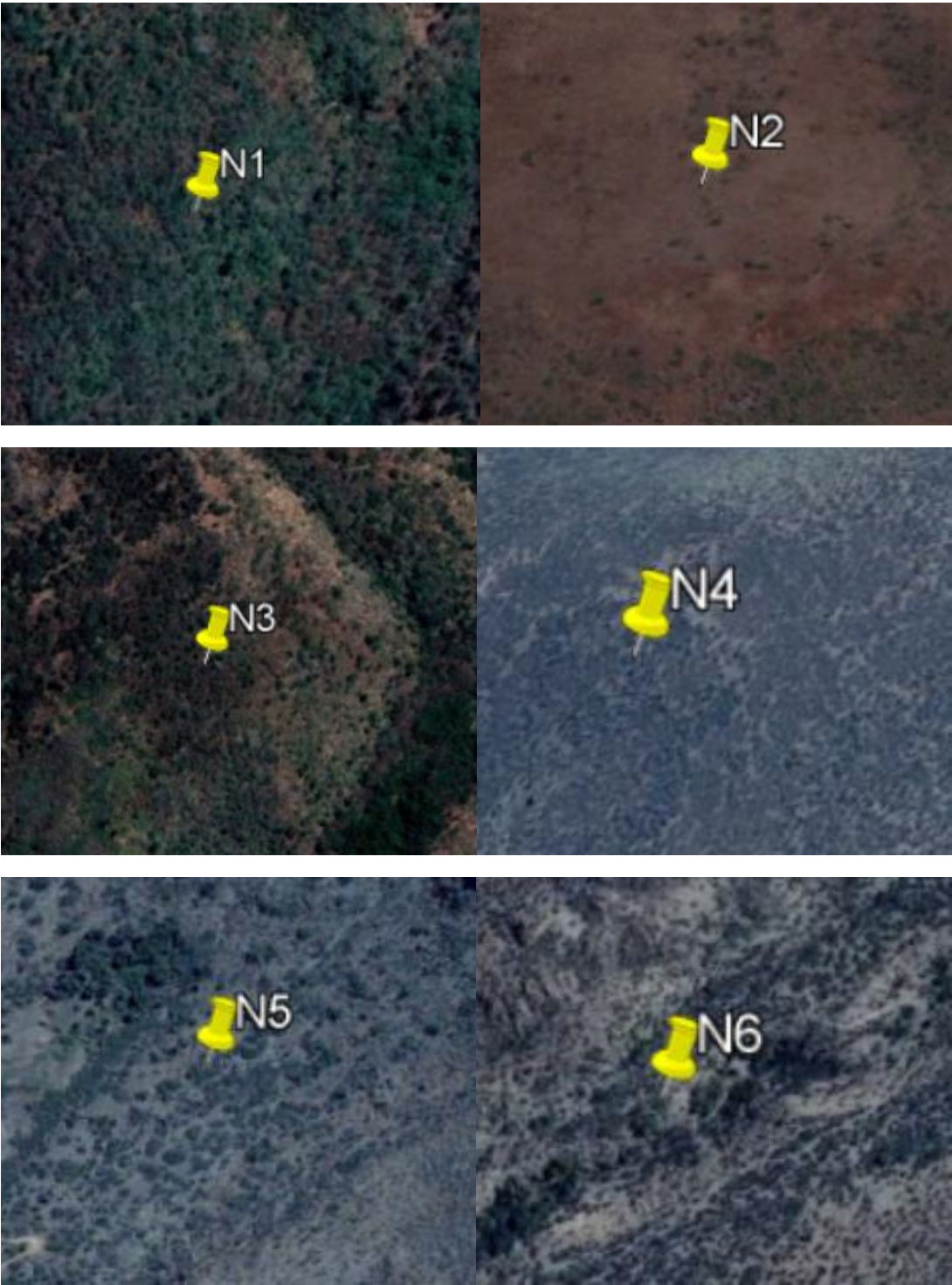


Figura 43: Puntos de inspección de vegetación nativa.

Anexo D: Balance Hídrico

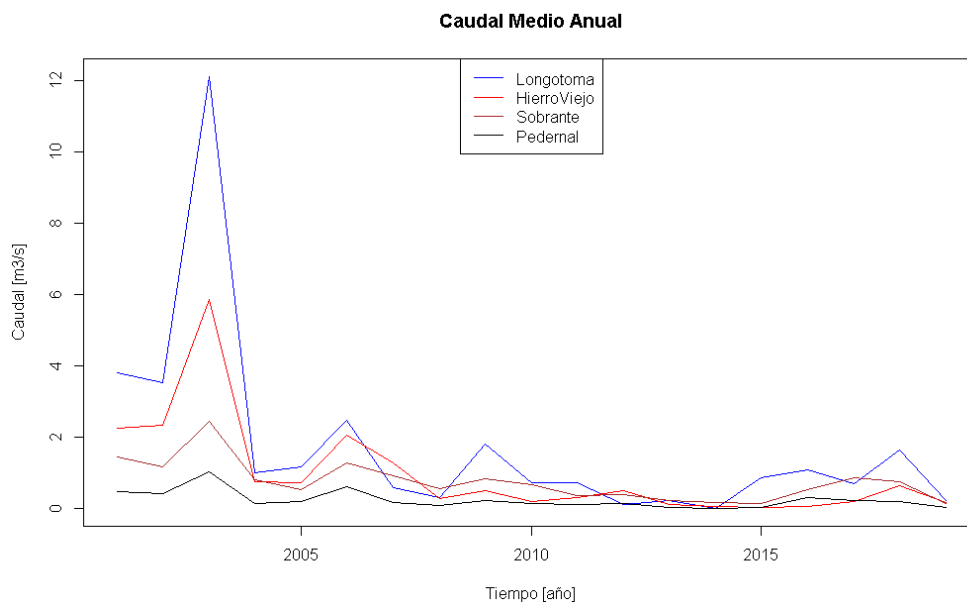


Figura 44: Caudales medios mensuales en 2003-2019.

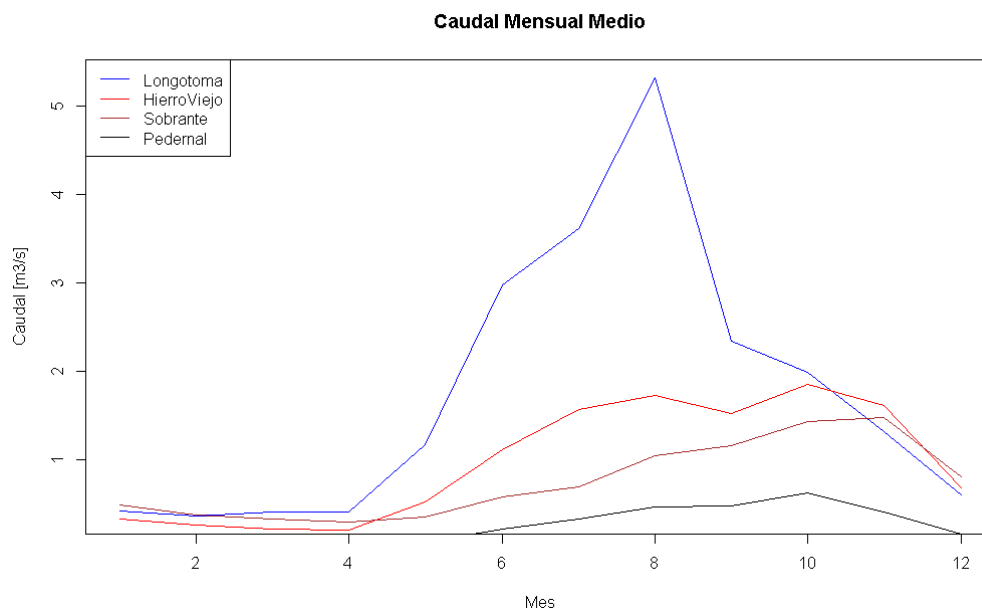


Figura 45: Promedio de caudales medios mensuales para cada mes en 2003-2009.

Diagrama de Wundt Área de Control 1

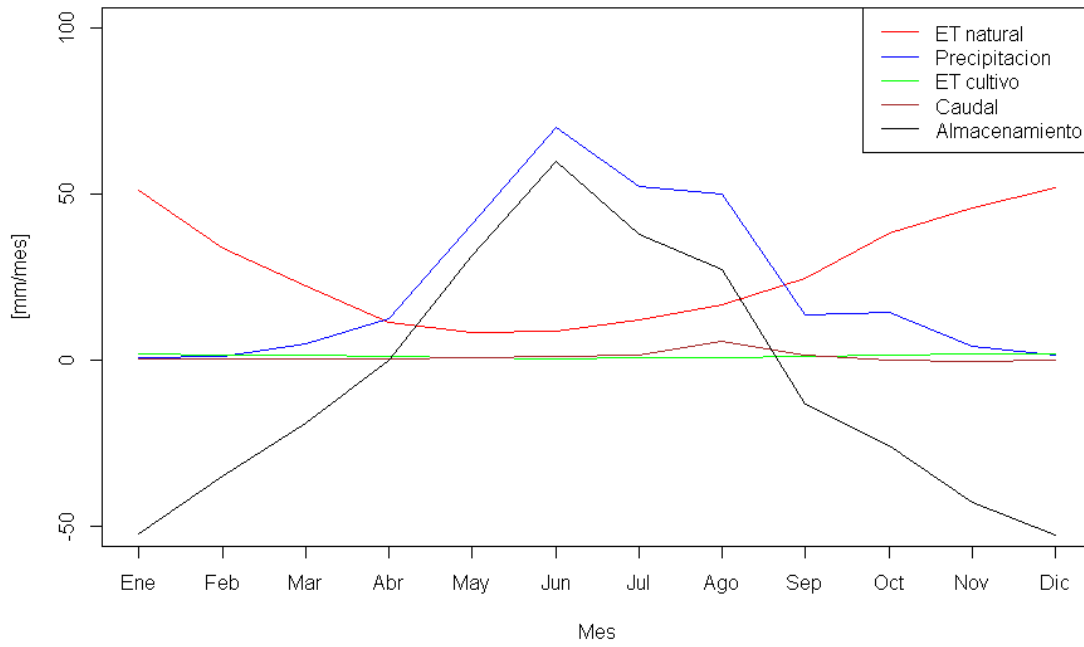


Figura 46: Diagrama de Wundt en Área de Control 1 (2003-2019).

Balance Anual Área de Control 2

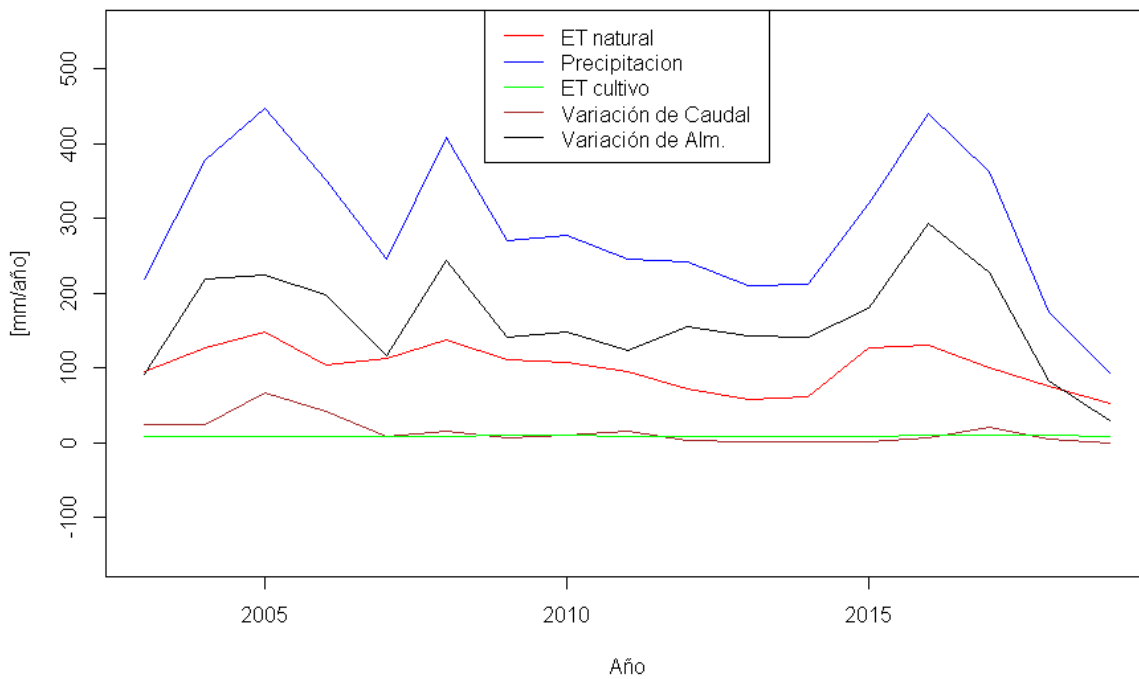


Figura 47: Balance Anual Área de Control 2.

Diagrama de Wundt Área de Control 2

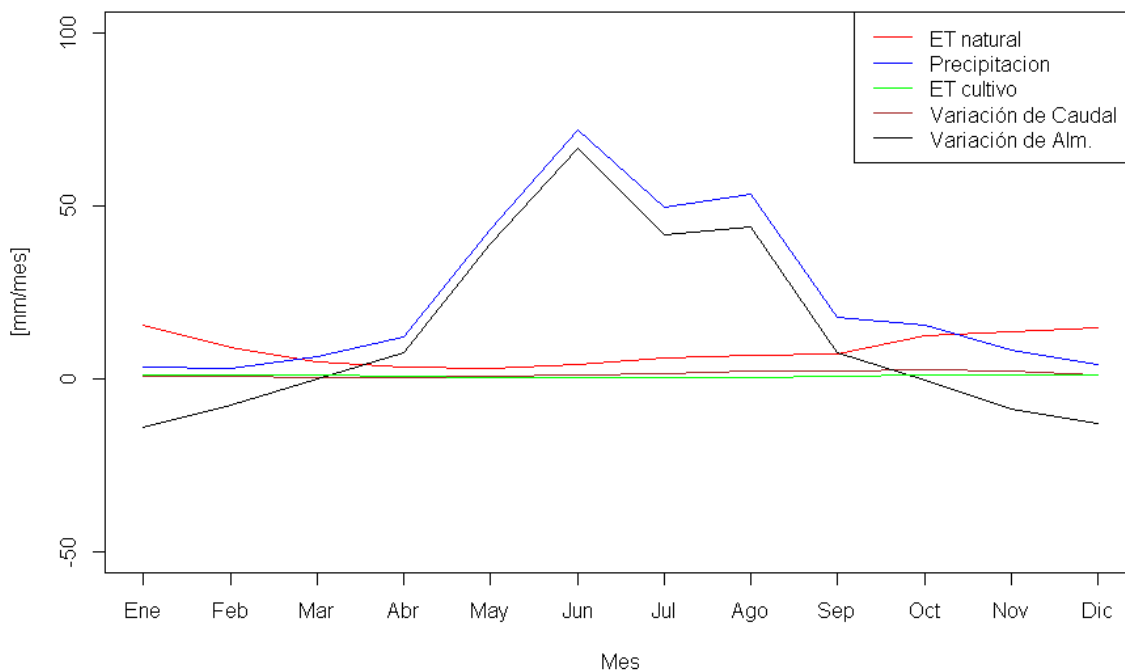


Figura 48: Diagrama de Wundt en Área de Control 2 (2003-2019).

Balance Anual Subcuenca Hierro Viejo

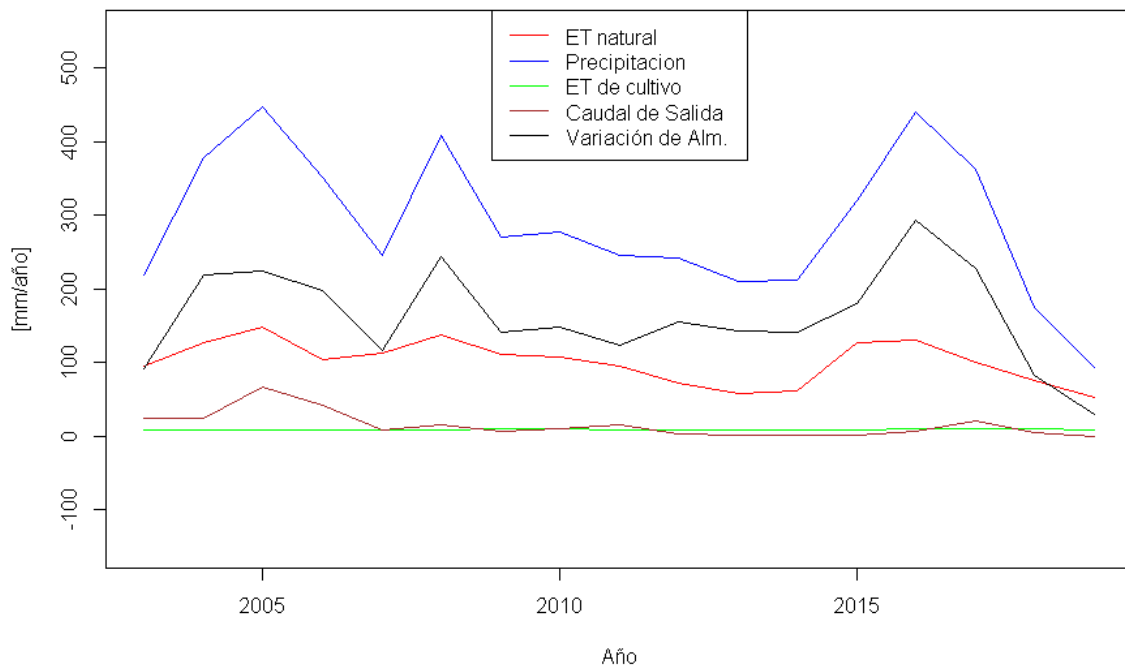


Figura 49: Balance Anual Hierro Viejo.

Diagrama de Wundt Subcuenca Hierro Viejo

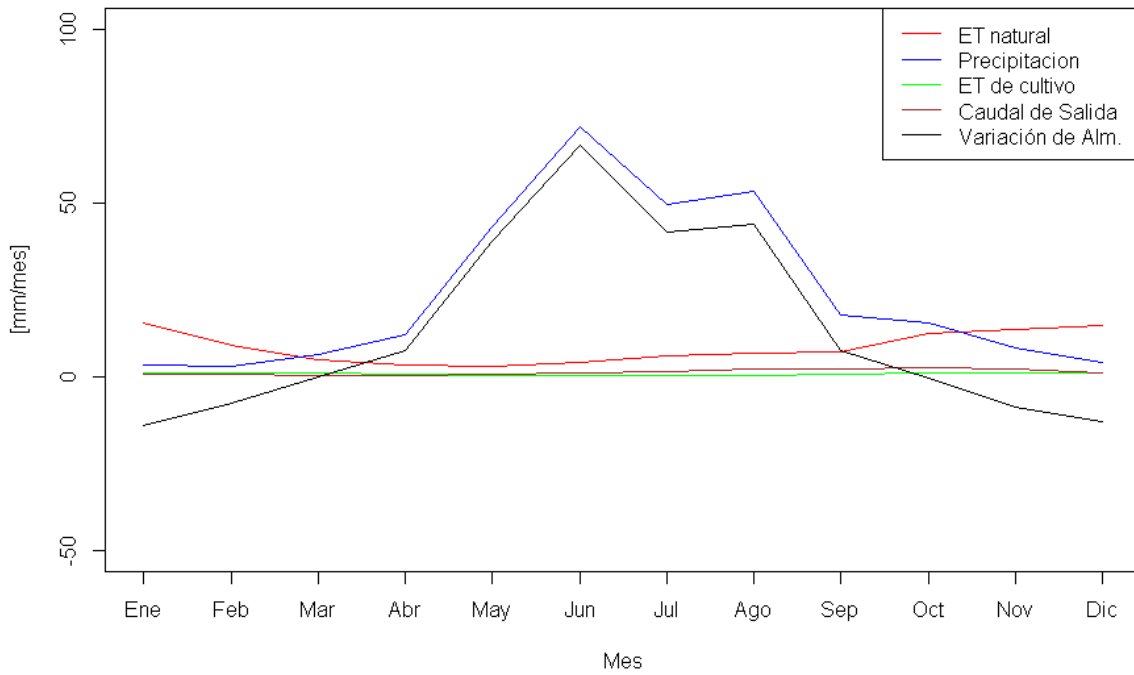


Figura 50: Diagrama de Wundt en Subcuenca Hierro Viejo (2003-2019).

Balance Anual Subcuenca Sobrante

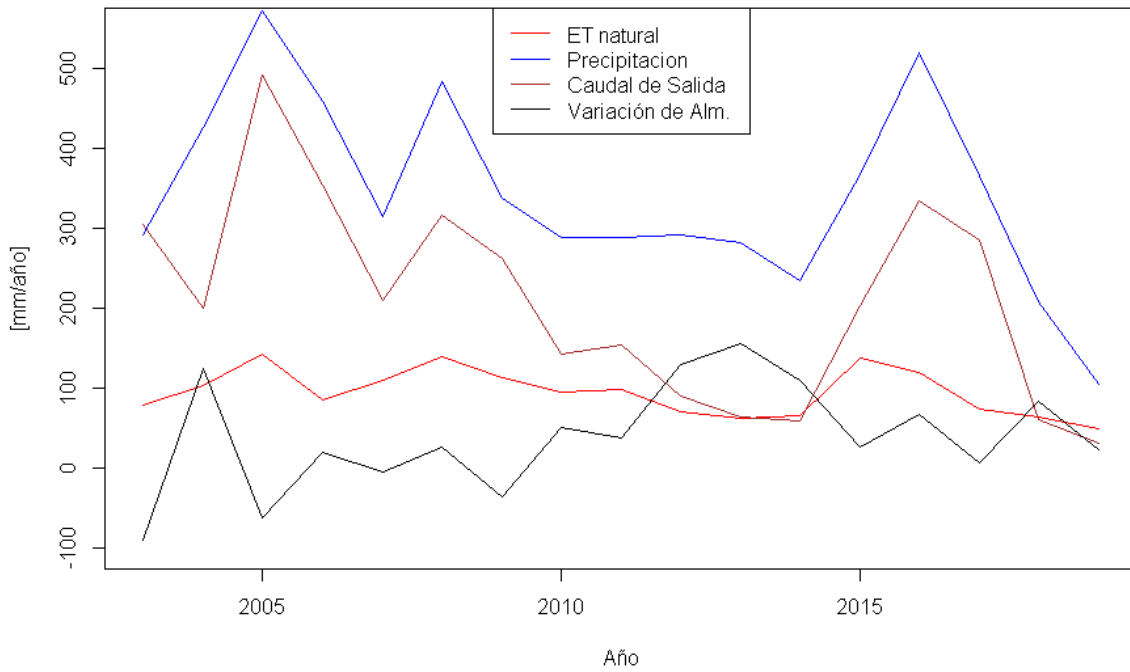


Figura 51: Balance Anual Sobrante.

Diagrama de Wundt Subcuenca Sobrante

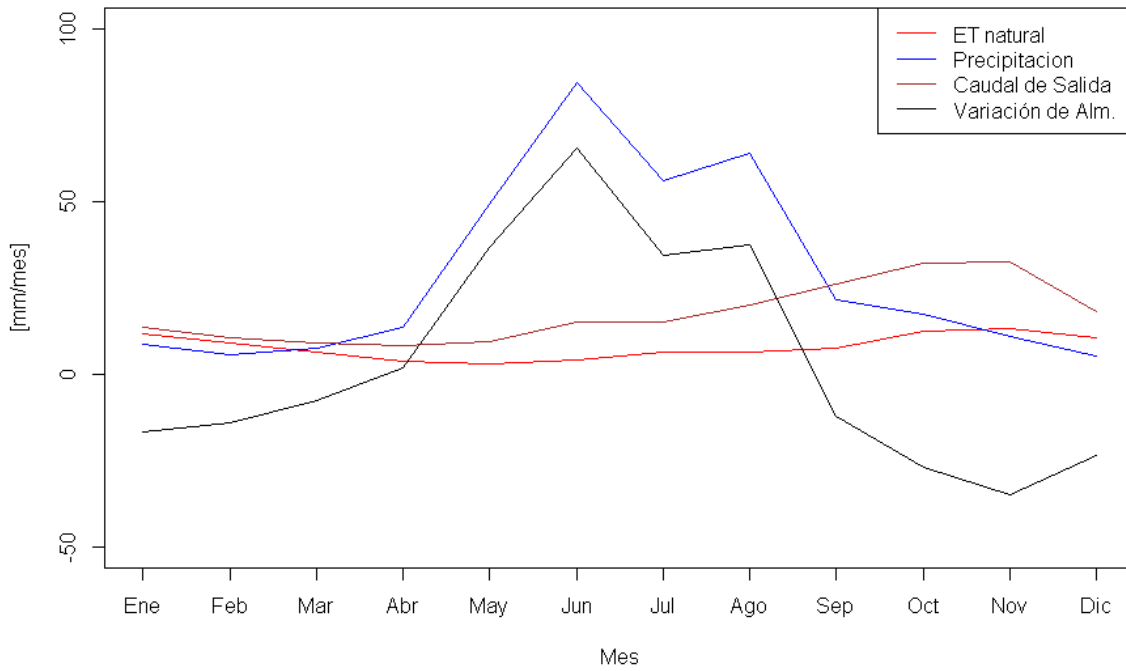


Figura 52: Diagrama de Wundt en Subcuenca Sobrante (2003-2019).

Balance Anual Subcuenca Pedernal

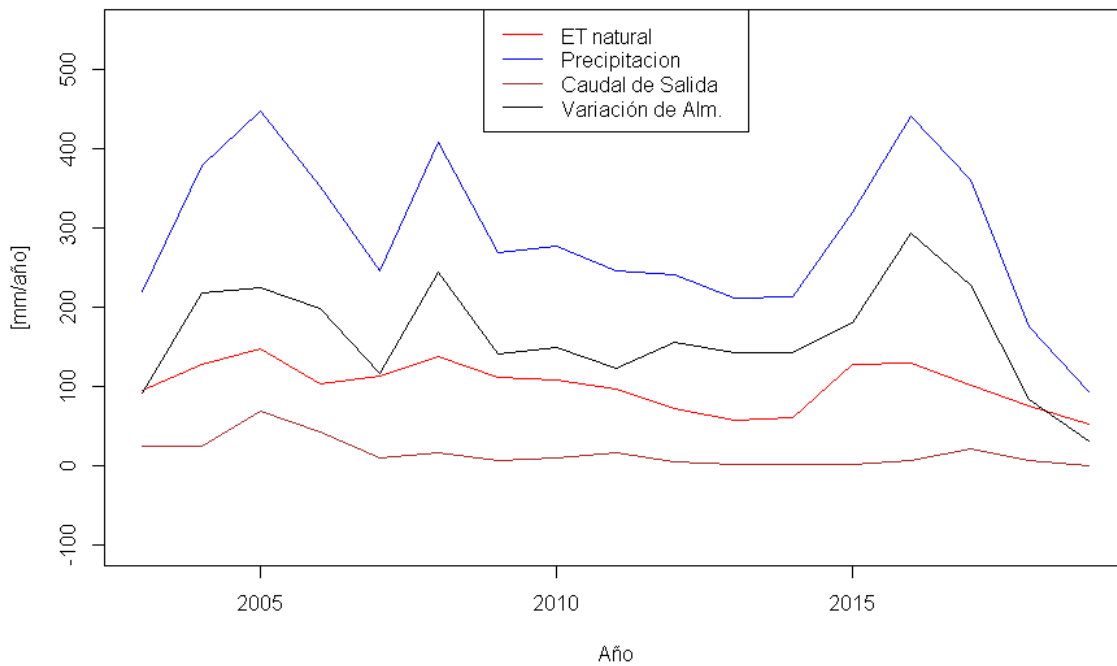


Figura 53: Balance Anual Pedernal.

Diagrama de Wundt Subcuenca Pedernal

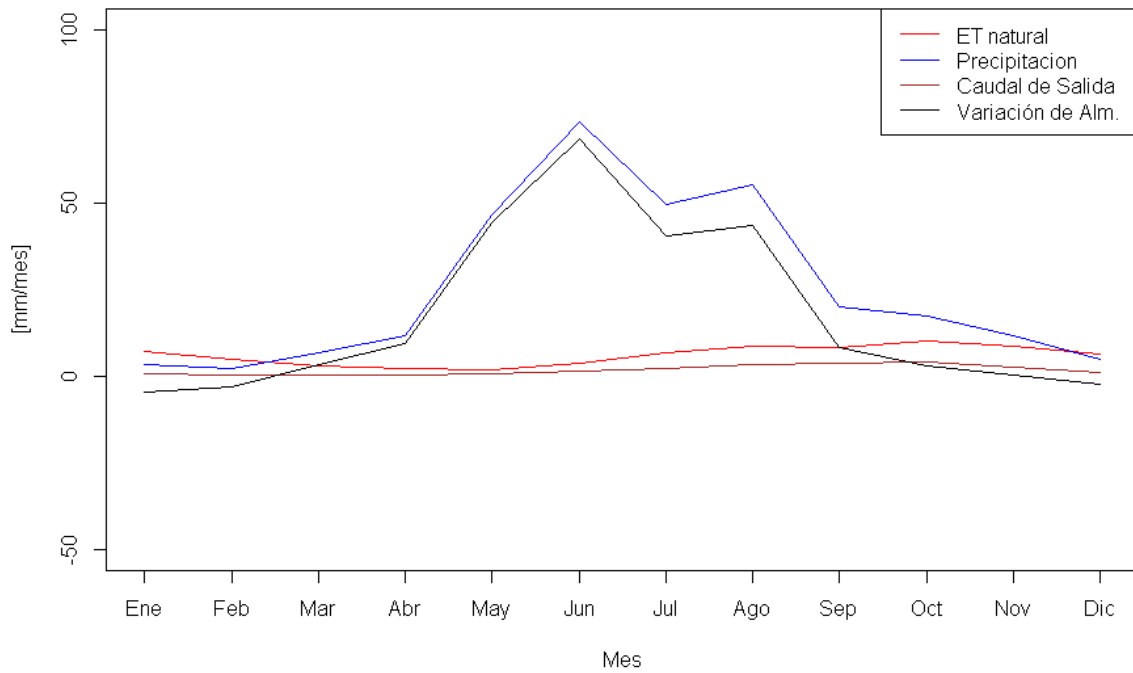


Figura 54: Diagrama de Wundt en Subcuenca Pedernal (2003-2019).

Diagrama de Wundt en Zona Agrícola de Inspección

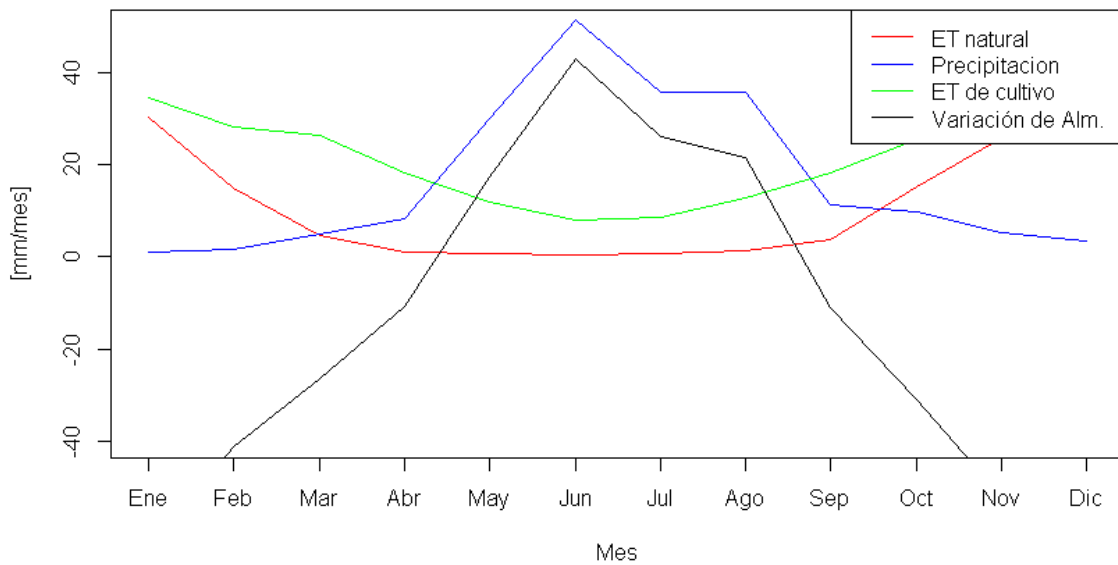


Figura 55: Diagrama de Wundt en Zona agrícola de inspección.

Tabla 10: Resultados Balance anual en ZAI.

Lts/s				
ano	pp	etn	etc	s
2003	16.9929624	20.4326484	23.9455869	-27.3852729
2004	35.0454352	19.3191495	21.9057929	-6.17950721
2005	35.2073904	22.4278539	20.1646931	-7.38515659
2006	30.2176781	20.9914098	25.4721731	-16.2459049
2007	21.2594379	18.7317922	23.8526885	-21.3250428
2008	33.4543148	20.1475457	28.3894244	-15.0826553
2009	22.7491816	18.0027968	38.1225283	-33.3761435
2010	26.705346	15.6484304	36.968616	-25.9117003
2011	21.7403601	12.1171233	32.4327451	-22.8095083
2012	17.7928495	10.0547089	29.57678	-21.8386395
2013	16.4292092	6.41946347	30.2927123	-20.2829666
2014	19.3097915	7.62234589	34.7219351	-23.0344895
2015	25.2675272	16.8540811	36.708983	-28.2955369
2016	37.4883663	21.511387	41.5633592	-25.5863799
2017	35.0231819	21.8416381	41.7072407	-28.5256969
2018	14.8393252	14.2438071	41.3806792	-40.7851612
2019	8.3116543	7.86372717	39.2235196	-38.7755924

Tabla 11: Resultados Balance medio mensual en ZAI.

Lts/s				
Mes	pp	etn	etc	s
Ene	1.6705098	45.8534926	50.4708433	-96.3361876
Feb	2.37392894	22.2959763	45.3192246	-62.2199904
Mar	7.25981614	7.19538399	38.5765858	-39.7980398
Abr	12.4996248	1.48611111	27.3938738	-16.3803601
May	45.4169858	1.20563725	17.3525176	26.2804137
Jun	77.6840158	0.84462827	12.1722509	64.6671367
Jul	53.8208526	1.31141748	12.5438475	39.5474595
Ago	54.1066441	2.1746732	18.8666098	32.4364741
Sep	16.805081	5.70761846	27.5205539	-16.4230914
Oct	14.5284805	22.8320057	36.9758675	-46.5119217
Nov	7.88891176	38.6417688	47.553683	-78.30654
Dic	4.98321579	46.7138685	51.7947848	-95.2519303