

**UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



**Análisis Comparativo del Coeficiente de Cultivo de Vid  
Mediante NDVI en la Zona Centro Sur de Chile**

Por:

**Ignacio Andrés de Jesús Martínez Olivares**

**Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en  
Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil**

**Profesor Guía: Yerel Alejandra Morales Pino**

**Mayo, 2020**

# Tabla de contenidos

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Lista de figuras</b> .....                                     | <b>4</b>  |
| <b>Lista de tablas</b> .....                                      | <b>6</b>  |
| <b>Capítulo 1: Introducción</b> .....                             | <b>7</b>  |
| 1.1 Motivación.....   | 7         |
| 1.2 Objetivos.....  | 10        |
| 1.3 Organización del documento.....                               | 11        |
| <b>Capítulo 2: Revisión bibliográfica</b> .....                   | <b>12</b> |
| 2.1 Cambio climático y agricultura.....                           | 12        |
| 2.2 Estimación de la evapotranspiración.....                      | 13        |
| 2.2.1 Métodos de la determinación de la evapotranspiración.....   | 13        |
| 2.2.2 Coeficiente de cultivo.....                                 | 16        |
| 2.2.3 Índice de vegetación.....                                   | 18        |
| 2.3 Imágenes satelitales.....                                     | 19        |
| 2.3.1 Características de los satélites Landsat 7 y Landsat 8..... | 20        |
| <b>Capítulo 3: Metodología</b> .....                              | <b>23</b> |
| <b>Capítulo 4: Área de estudio</b> .....                          | <b>25</b> |
| 4.1 Localización.....   | 25        |
| 4.2 Clima.....  | 28        |
| 4.2.1 Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....       | 28        |
| 4.2.2 Región del Maule.....                                       | 29        |
| 4.2.3 Región de Ñuble.....  | 30        |
| 4.2.4 Región del Biobío.....                                      | 30        |
| 4.3 Uso de suelo.....   | 31        |
| 4.3.1 Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....       | 31        |
| 4.3.2 Región del Maule.....                                       | 32        |
| 4.3.3 Región de Ñuble.....  | 33        |
| 4.3.4 Región del Biobío.....                                      | 34        |
| 4.4 Ubicación de viñas.....                                       | 35        |
| 4.4.1 Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....       | 35        |
| 4.4.2 Región del Maule.....                                       | 36        |
| 4.4.3 Región de Ñuble.....  | 37        |
| 4.4.4 Región del Biobío.....                                      | 38        |
| 4.5 Estaciones meteorológicas.....                                | 38        |
| 4.5.1 Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....       | 39        |
| 4.5.2 Región del Maule.....                                       | 40        |
| 4.5.3 Región de Ñuble.....  | 41        |
| 4.5.4 Región del Biobío.....                                      | 42        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Capítulo 5: Manejo de información disponible y sectorización de área de estudio .....</b> | <b>43</b> |
| 5.1 Estaciones meteorológicas en zona vitícola.....  | 43        |
| 5.2 Imágenes de estudio por región .....   | 45        |
| 5.3 Catastro vitícola nacional.....  | 46        |
| 5.4 Sectorización de área de cultivo por región .....  | 48        |
| <b>Capítulo 6: Resultados .....</b>  | <b>51</b> |
| 6.1 Región del Libertador General Bernardo O'Higgins .....                                   | 53        |
| 6.2 Región del Maule.....  | 57        |
| 6.3 Región de Ñuble y Región del Biobío.....   | 62        |
| 6.4 Comparación de regiones.....   | 67        |
| <b>Capítulo 7: Análisis de resultados .....</b>  | <b>73</b> |
| <b>Capítulo 8: Conclusiones y comentarios.....</b>   | <b>79</b> |
| <b>Referencias .....</b>   | <b>81</b> |
| <b>Anexo 1: Estaciones meteorológicas .....</b>  | <b>84</b> |
| <b>Anexo 2: Cobertura de estaciones evaporimétricas .....</b>                                | <b>93</b> |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 - Exportaciones chilenas de alimentos 2017; Valor exportado en US\$ millones[1].  | 7  |
| Figura 1.2 - Evolución de las exportaciones de vino (total). Periodo 2000 a 2018[2].   | 8  |
| Figura 1.3 - Evolución de la superficie vitícola nacional por región (hectáreas)[7].   | 9  |
| Figura 1.4 - Evolución temporal del coeficiente de cultivo basal (Kcb) y NDVI[15].   | 10 |
| Figura 2.1 - Deterioro vegetación 2010 - 2015[5].  | 12 |
| Figura 2.2 - Bandeja de clase A[19].   | 14 |
| Figura 2.3 - Método de lisímetro[20].  | 15 |
| Figura 2.4 - Análisis espacial vectorial de estaciones que registran evapotranspiración (a) 5 Km, (b) 10 Km, (c) 15 km.  | 16 |
| Figura 4.1 - Área de estudio.  | 27 |
| Figura 4.2 - Climograma zona 1: Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.  | 28 |
| Figura 4.3 - Climograma zona 2: Región del Maule.  | 29 |
| Figura 4.4 - Climograma zona 3 y 4: Región del Ñuble y Región del Bio-Bio.   | 30 |
| Figura 4.5 - Uso de suelo zona 1: Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.  | 31 |
| Figura 4.6 - Uso de suelo zona 2: Región del Maule.  | 32 |
| Figura 4.7 - Uso de suelo zona 3: Región del Ñuble.  | 33 |
| Figura 4.8 - Uso de suelo zona 4: Región del Biobío.   | 34 |
| Figura 4.9 - Ubicación de viñas dentro del terreno de uso agrícola zona 1: Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.   | 35 |
| Figura 4.10 - Ubicación de viñas dentro del terreno de uso agrícola zona 2: Región del Maule.  | 36 |
| Figura 4.11 - Ubicación de viñas dentro del terreno de uso agrícola zona 3: Región de Ñuble.   | 37 |
| Figura 4.12 - Ubicación de viñas dentro del terreno de uso agrícola zona 4: Región del Biobío.   | 38 |
| Figura 4.13 - Ubicación de estaciones meteorológicas zona 1: Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.   | 39 |
| Figura 4.14 - Ubicación de estaciones meteorológicas zona 2: Región del Maule.   | 40 |
| Figura 4.15 - Ubicación de estaciones meteorológicas zona 3: Región de Ñuble.  | 41 |
| Figura 4.16 - Ubicación de estaciones meteorológicas zona 4: Región del Biobío.  | 42 |
| Figura 5.1 - Información zona de estudio región del Libertador General Bernardo O'Higgins: rango NDVI (verde), área agrícola de uso de suelo (azul), ubicación viñas (rojo). | 48 |
| Figura 5.2 - Información zona de estudio región del Maule: rango NDVI (verde), área agrícola uso de suelo (azul), ubicación viñas (rojo).                                    | 49 |
| Figura 5.3 - Información zona de estudio región del Ñuble y Biobío: rango NDVI (verde), área agrícola uso de suelo (azul), ubicación viñas (rojo).                           | 49 |
| Figura 5.4 - Detalle información zona de estudio región del Maule.   | 50 |
| Figura 6.1 - Área vitícola.  | 51 |
| Figura 6.2 - Serie de tiempo NDVI ponderado.   | 52 |
| Figura 6.3 - Análisis de Kc. (a) 2000-1 (b) 2006-7 (c) 2008-9.   | 54 |
| Figura 6.4 - Análisis de Kc. (a) 2010-11 (b) 2012-13 (c) 2014-15.  | 55 |
| Figura 6.5 - Análisis de Kc. (a) 2016-17 (b) 2018-19.  | 56 |
| Figura 6.6 - Análisis de Kc (a) 2003-4 (b) 2004-5 (c) 2007-8.  | 58 |
| Figura 6.7 - Análisis de Kc (a) 2008-9 (b) 2010-11 (c) 2012-13.  | 59 |
| Figura 6.8 - Análisis de Kc (a) 2013-14 (b) 2015-16 (c) 2016-17.   | 60 |
| Figura 6.9 - Análisis de Kc (a) 2017-18 (b) 2018-19.   | 61 |
| Figura 6.10 - Análisis de Kc (a) 2004-5 (b) 2007-8 (c) 2008-9.   | 63 |
| Figura 6.11 - Análisis de Kc (a) 2010-11 (b) 2012-13 (c) 2013-14.  | 64 |
| Figura 6.12 - Análisis de Kc (a) 2014-15 (b) 2015-16 (c) 2017-18.  | 65 |
| Figura 6.13 - Análisis de Kc (a) 2018-19.  | 66 |
| Figura 6.14 - Comparación de Kc (a) 2008-9 (b) 2010-11 (c) 2012-13 (d) 2018-19.  | 67 |
| Figura 6.15 - Comparación Kc Maule, Ñuble y Biobío (a) 2004-5 (b) 2007-8 (c) 2008-9.   | 69 |
| Figura 6.16 - Comparación Kc Maule, Ñuble y Biobío (a) 2010-11 (b) 2012-13 (c) 2013-14.  | 70 |
| Figura 6.17 - Comparación Kc Maule, Ñuble y Biobío (a) 2015-16 (b) 2017-18 (c) 2018-19.  | 71 |
| Figura 7.1 - Precipitación anual área de estudio.  | 73 |
| Figura 7.2 - Temperatura media 2016 - 17.  | 76 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 7.3 - Humedad relativa 2016 - 17. ....  | 76 |
| Figura 7.4 - Precipitación 2016 - 17. ....   | 76 |
| Figura 7.5 – Comparación lámina de agua a aplicar estimada vs riego real 2018 - 19.....                              | 77 |
| Figura 7.6 - Comparación Ks estimada Región del Maule vs real Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. .... | 78 |

## Lista de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2.1 - Coeficiente de bandeja según velocidad del viento y humedad relativa. ....                             | 14 |
| Tabla 2.2- Resumen algunas relaciones $K_c$ - $V_L$ . ....   | 18 |
| Tabla 2.3 - Características de los principales sensores. ....  | 20 |
| Tabla 2.4 - Características satélite Landsat 7. ....   | 20 |
| Tabla 2.5 - Resoluciones: espacial y espectral del sensor ETM+. ....   | 21 |
| Tabla 2.6 - Características Landsat 8. ....  | 21 |
| Tabla 2.7 - Resoluciones: espacial y espectral del sensor OLI/TIRS. ....   | 22 |
| Tabla 3.1 - Valores de $K_c$ mensuales para vid vinífera. ....   | 23 |
| Tabla 3.2 - Índices de estrés hídrico ( $K_s$ ): Región Libertador General Bernardo O'Higgins[50]. ....            | 24 |
| Tabla 3.3 – Coeficiente de riego ( $K_r$ ): Regiones Maule, Ñuble y Biobío[46]. ....                               | 24 |
| Tabla 4.1 - Distribución uso de suelo zona 1: Región Libertador General Bernardo O'Higgins. ....                   | 31 |
| Tabla 4.2 - Distribución uso de suelo zona 2: Región del maule. ....   | 32 |
| Tabla 4.3 - Distribución uso de suelo: Región de Ñuble. ....   | 33 |
| Tabla 4.4 - Distribución uso de suelo: Región del Biobío. ....   | 34 |
| Tabla 5.1 - Estaciones pluviométricas disponibles. ....  | 43 |
| Tabla 5.2 - Estaciones de temperatura disponibles. ....  | 44 |
| Tabla 5.3 - Estaciones de humedad relativa disponibles. ....   | 44 |
| Tabla 5.4 - Periodo de análisis disponible. ....   | 45 |
| Tabla 5.5 - Catastro de vides de vinificación anual zona 1: Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. .... | 46 |
| Tabla 5.6 - Catastro de vides de vinificación anual zona 2: Región del Maule. ....                                 | 47 |
| Tabla 5.7 - Catastro de vides de vinificación anual zona 3 y 4: Región de Ñuble y Región del Biobío. ....          | 47 |
| Tabla 6.1 – Clasificación de rango de pixeles de NDVI por área. ....   | 51 |
| Tabla 6.2 - NDVI ponderado. ....   | 52 |
| Tabla 7.1 - Comparación porcentual lámina de agua a aplicar estimada vs riego real. ....                           | 77 |

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Motivación

El Producto Interno Bruto (PIB) nacional está relacionado principalmente con exportaciones mineras y silvoagropecuarias. En esta última, uno de los puntos altos es la exportación de vinos como se aprecia en la Figura 1.1. Entre el año 2000 y el 2018 se observa un crecimiento sostenido, tanto en volumen de producción, como en valor monetario (US\$) de producción anual en la industria vitícola (ver Figura 1.2). “Actualmente Chile se encuentra posicionado en el cuarto lugar de exportadores de vinos de carácter mundial, superado solamente por Francia, España e Italia con una vasta experiencia en materia vitivinícola” según ODEPA<sup>1</sup>. Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados, la exportación de este producto podría presentar un crecimiento y con ello la cantidad de hectáreas de cultivo de vid.

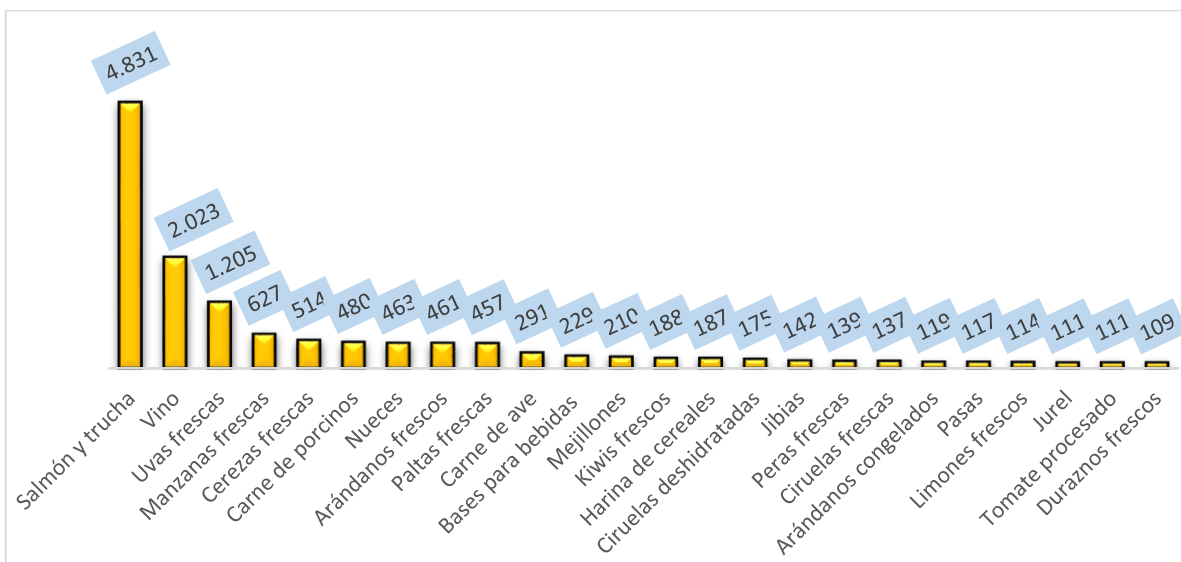


Figura 1.1 - Exportaciones chilenas de alimentos 2017; Valor exportado en US\$ millones[1].

<sup>1</sup> Oficina de Estudios y Políticas Agrarias.

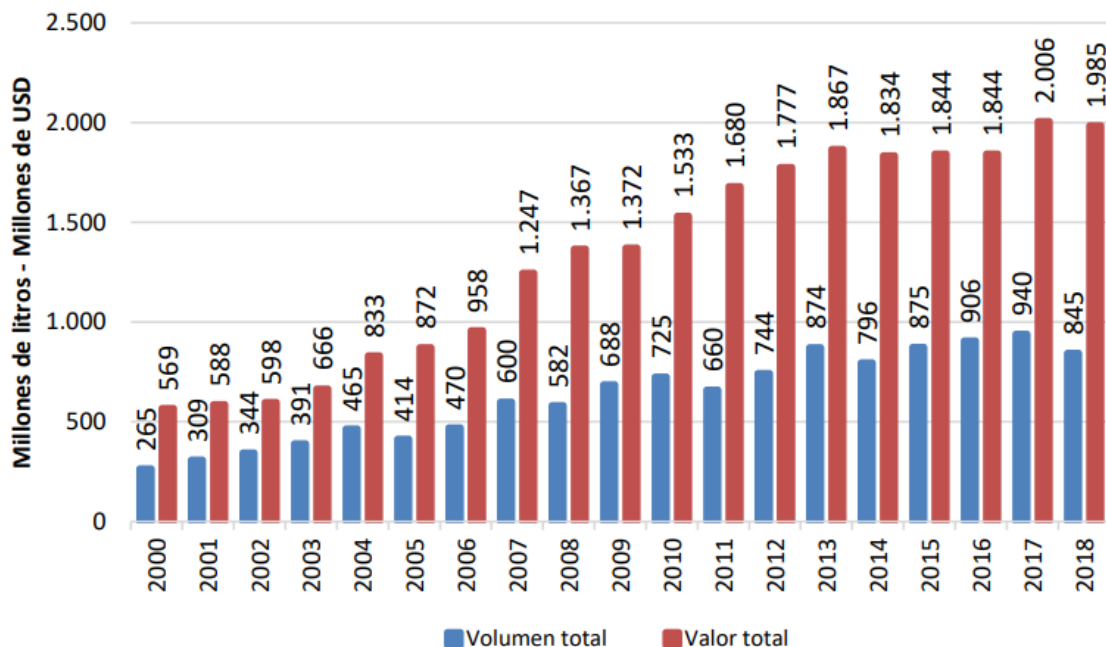


Figura 1.2 - Evolución de las exportaciones de vino (total). Periodo 2000 a 2018[2].

Dentro de la producción agropecuaria, un factor importante es la disponibilidad de agua. Este punto está siendo afectado en gran parte por el cambio climático, producido tanto por causas naturales como antropogénicas. Según el doctor Fernando Santibáñez, académico de la Universidad de Chile, responsable de varios estudios científicos [3], [4] y uno de los principales referentes nacionales en materia de cambio climático, “los alcances del aumento de temperatura serán importantes, afectando la precipitación, nubosidad y, en especial el paisaje”. Esto se ve reflejado directamente en fenómenos como sequías y heladas.

La zona centro-sur resultó afectada por una sequía muy amplia y de gran extensión territorial, calificada como “mega sequía 2010-2015” según el (CR)<sup>2</sup> [5], durante la década de mayor calidez registrada en Chile, aumentando la pérdida de agua evaporada y déficit hídrico. Eventualmente “no va a ser la última mega sequía debido al cambio climático” según Garreaud<sup>2,3</sup>.

El cambio climático en la agricultura está relacionado con variaciones en los climas locales más que en patrones mundiales [6]. El aumento de la temperatura de la superficie de la tierra en las distintas zonas geográficas ha afectado de manera diferente en el territorio nacional. “El área de producción de vinos actualmente se extiende entre la IV Región y el Biobío, pero el aumento de la temperatura y menor disponibilidad de agua ya empiezan a notarse: el 95 % de viñas tiene problemas de agua según estudio” según ODEPA [6] (ver Figura 1.3).

<sup>2</sup> Subdirector (CR)<sup>2</sup>.

<sup>3</sup> Profesor titular del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile desde el año 2011.

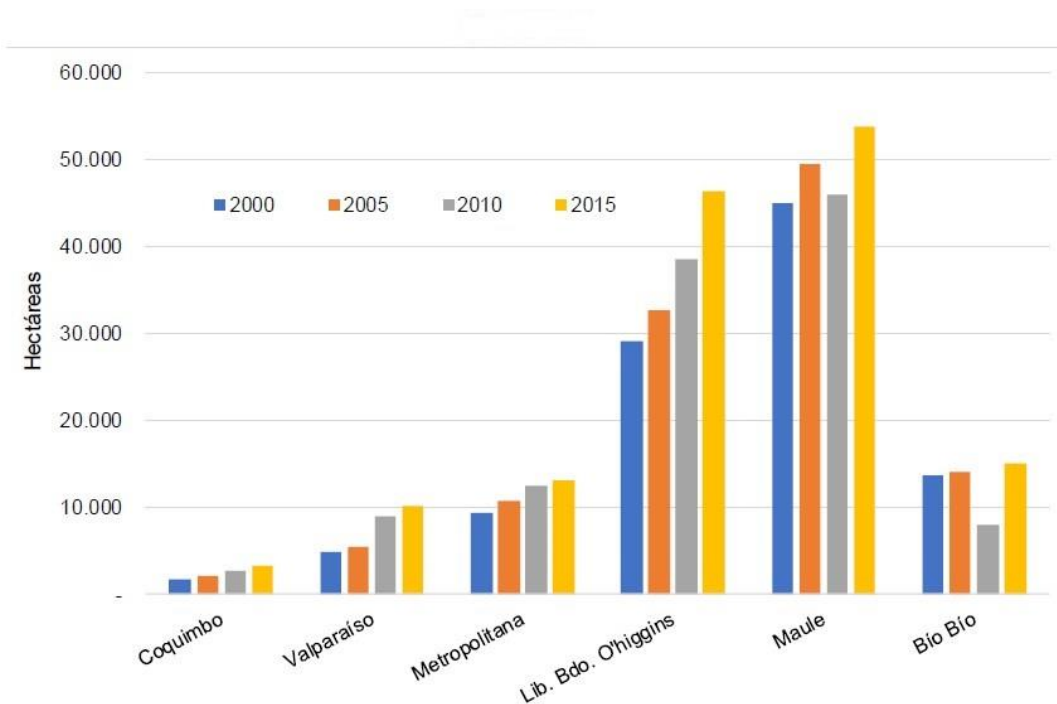


Figura 1.3 - Evolución de la superficie vitícola nacional por región (hectáreas)[7].

Según estudios realizados a nivel nacional [4], [8], se prevé que hacia 2050 no solo se vivirá en un país más caluroso, menos lluviosos, etc., sino que además una serie de paisajes se modificarán debido a la menor disponibilidad de agua y avance de zonas áridas, trasladando cultivos desde la zona central hacia el sur. En el caso de la vid, sectores como la Región de la Araucanía podrían convertirse en productores de vinos hacia 2050. La Universidad Austral y el Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB) explica que se perderá gran parte de la actual zona de viñas, pero se abrirán nuevas áreas en lugares hasta ahora inusuales [6].

Debido al déficit hídrico ya mencionado, se debe llevar a cabo un análisis de demanda de agua por evapotranspiración de cultivo (ETc) para conocer los requerimientos de plantaciones existentes o posibles plantaciones de vid debido al traslado que se espera en relación con el cambio climático. La ETc se obtiene mediante la evapotranspiración potencial (ETo) y el coeficiente de cultivo (Kc)[9], donde una manera de estimar la ETo es a través de la expresión de Penman-Monteith y valores de Kc teóricos que aparecen en la literatura, por ejemplo, FAO. Pero ¿Es siempre igual? ¿El patrón de Kc ha cambiado en estos últimos años? En la actualidad existen estudios [10], [11] que analizan cómo está variando el cultivo debido a la menor disponibilidad de agua, el avance del desierto, trasladando los cultivos del centro al sur, pero no se enfocan en el cambio del coeficiente de cultivo en sí, influenciados por los eventos ya mencionados (sequia, cambio climático, etc.).

Una alternativa, para analizar posibles variaciones, es utilizar el NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada) un método basado en sensores remotos, una opción económicamente viable que provee información con alta resolución espacial y temporal para estimar el Kc. Abundantes trabajos científicos [12], [13] ponen en claro una relación lineal entre el Kc y NDVI (ver Figura 1.4). Esta relación se ha aplicado para una amplia gama de cultivos y vegetación natural en trabajos teóricos y experimentales[14].

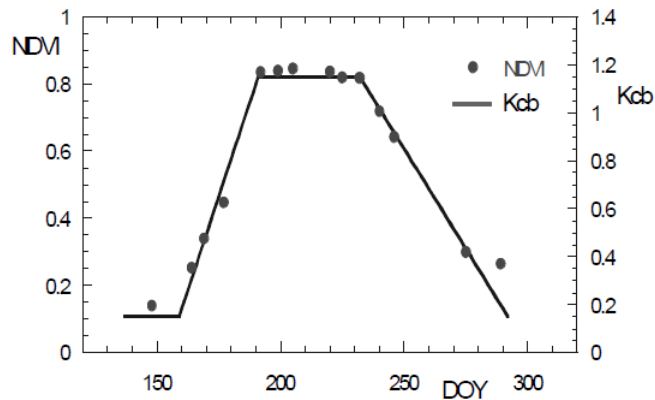


Figura 1.4 - Evolución temporal del coeficiente de cultivo basal (Kcb) y NDVI[15].

El NDVI es un parámetro que se obtiene de forma simple y directa desde las imágenes satelitales, mediante una ecuación que combina las reflectividades de la superficie en el rango del rojo e infrarrojo cercano [16]. Este método podría ayudar a estimar la cantidad de agua evapotranspirada e identificar los meses en que más necesita agua el cultivo (vid) para mejorar el uso del recurso hídrico.

Dado que el Kc es un parámetro relevante para la demanda de agua de los cultivos se propone analizar, a través del NDVI, si existen variaciones con respecto al valor teórico en la zona centro-sur del país.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es analizar el comportamiento del coeficiente de cultivo de vid vinífera mediante el NDVI en la zona centro sur de Chile.

Los objetivos específicos se mencionan a continuación:

- Encontrar una expresión en la literatura que utilice el NDVI para obtener el coeficiente de cultivo en vides.
- Determinar el coeficiente de cultivo para cada una de las zonas analizadas por medio de imágenes satelitales y NDVI.
- Realizar un análisis comparativo de los coeficientes de cultivo obtenidos con los valores teóricos.
- Determinar si existen variaciones en la demanda de recursos hídricos, tanto en cantidad como en su distribución temporal.

## 1.3 Organización del documento

A continuación, se describen brevemente los capítulos que forman parte de esta memoria.

En el capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica, donde se muestra cómo ha cambiado la agricultura debido al cambio climático, dado que la demanda de agua es necesaria para los diversos tipos de cultivos, donde la evapotranspiración es un factor clave para ello. Junto con lo anterior se presentan los diferentes métodos para estimar o medir la evapotranspiración, además de un nuevo método para la obtención del coeficiente de cultivo mediante percepción remota. Se entrega igualmente una descripción de los diferentes satélites que entregan información relevante para el presente estudio.

En el capítulo 3 se presenta la metodología, donde se realiza una breve descripción de los procesos involucrados para llevar a cabo este trabajo.

En el capítulo 4, asociado al área de estudio, se muestra la localización de las diferentes regiones analizadas, con su respectivo clima, uso de suelo y la ubicación de las viñas en los diferentes valles. Además, se muestran las estaciones meteorológicas presentes en cada región.

En el capítulo 5, correspondiente al manejo de la información disponible y sectorización del área de estudio, se indica la dificultad para obtención de información meteorológica en la zona de viñedos. Además de las ventajas y desventajas que se presentaron para la obtención de imágenes satelitales y el proceso a través del cual se sectorizó el área de cultivo por región para su proceso de análisis.

En el capítulo 6, se presentan los resultados del coeficiente de cultivo de cada una de las regiones obtenidas en función del NDVI. Además de una comparación del Kc de todas las regiones de estudio incluyendo valores teóricos y experimentales.

En el capítulo 7, asociado al análisis de resultados, se lleva a cabo una descripción más específica de los resultados obtenidos y el porqué de las diferentes variaciones evidenciadas en el periodo fenológico de la vid vinífera.

En el capítulo 8, asociado a las conclusiones y comentarios, se realiza un resumen del análisis de resultados en función de los objetivos esperados en el presente estudio.

## Capítulo 2: Revisión bibliográfica

### 2.1 Cambio climático y agricultura

Desde mediados de los años 90, existe una gran preocupación por el impacto del cambio climático en la producción agrícola, lo que está afectando de manera nacional y mundial. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) plantea, en el Quinto Informe de Evaluación 2014[17], que el aumento de la temperatura en el aire y el océano, alteraciones en el ciclo del agua, deshielo generalizado, y elevaciones del nivel del mar, es muy probable que sea a causa del calentamiento provocado por el cambio climático. Además, el IPCC señala que varias zonas ecológicas van a ser afectadas por cambios en el clima regional, debido a la temperatura, precipitaciones y concentraciones del CO<sub>2</sub>. Debido a esto varias actividades dependientes de los fenómenos climáticos pueden verse afectadas; caso particular es la agricultura, dado que es muy sensible a estos cambios, pues este tipo de actividad presenta una relación directa con el clima.

Según el doctor Fernando Santibáñez, responsable de varios estudios científicos[3], [4] “los alcances del aumento de temperatura serán importantes, afectando la precipitación, nubosidad y, en especial el paisaje”, esto se ve reflejado directamente en fenómenos como sequías (Ver Figura 2.1) y heladas.

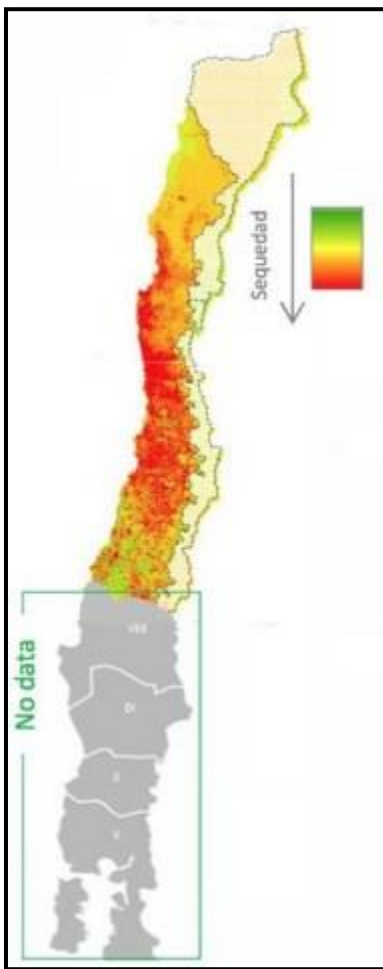


Figura 2.1 - Deterioro vegetación 2010 - 2015[5].

La zona centro-sur resultó afectada por una sequía muy amplia y de gran extensión territorial, calificada como “mega sequía 2010-2015” según el (CR)<sup>2</sup>[5], durante la década de mayor calidez registrada en Chile, aumentando la pérdida de agua evaporada y déficit hídrico. Eventualmente “no va a ser la última mega sequía debido al cambio climático” según Garreaud<sup>4</sup>.

Según estudios realizados a nivel nacional [4], [8], se prevé que hacia 2050 no solo se vivirá en un país más caluroso, menos lluvioso, etc., sino que además una serie de paisajes se modificarán debido a la menor disponibilidad de agua y avance de zonas áridas, trasladando cultivos desde la zona central hacia el sur.

Los fenómenos ya mencionados crean una interrogante sobre la disponibilidad de los recursos hídricos existentes, ya que estos recursos son esenciales para los mayores productores y exportadores del país, es decir, minería y agricultura, siendo este último el que utiliza una mayor cantidad de recursos hídricos. En la agricultura se crea una gran inquietud a la hora de analizar la demanda de agua necesaria en los diferentes cultivos, siendo la evapotranspiración uno de los factores clave para ello.

## 2.2 Estimación de la evapotranspiración

### 2.2.1 Métodos de la determinación de la evapotranspiración

La evapotranspiración es un fenómeno complejo por los diversos factores que lo afectan (climático, meteorológicos, características vegetativas, humedad, etc.). Existen dos grandes grupos de métodos para determinar esta variable: la medición o métodos directos y de estimación o métodos indirectos [18].

#### 2.2.1.1 Método de medición de evapotranspiración

En este caso se calcula la evapotranspiración a través del control de ingresos y salidas de agua en el suelo que tiene una cubierta vegetal. Estos métodos obtienen resultados muy exactos, normalmente son muy costosos y requiere una gran calibración.

Los métodos de medición son numerosos pero los más frecuentes son:

- Bandeja de evaporación: es un recipiente cilíndrico (Ver Figura 2.2), trata de medir la evaporación del agua, la cual es la cantidad de agua máxima que puede perder una planta. Para obtener la evapotranspiración de la cubierta vegetal de pasto basta conocer la evaporación y corregirlo con un coeficiente de bandeja como muestra Ecuación 2.1:

$$ET_o = EB * K_b \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

$ET_o$  : evapotranspiración de referencia (mm/día).

$EB$  : evaporación de bandeja (mm/día).

$K_b$  : coeficiente de bandeja.

---

<sup>4</sup> Exploradores: del Atomo al Cosmos | Alerta de megasequía  
<http://www.cr2.cl/megasequia/#1513261126854-28c44789-8f2b>

El coeficiente de bandeja depende de las características de la velocidad del viento y humedad relativa, además de la ubicación de la bandeja (Ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1 - Coeficiente de bandeja según velocidad del viento y humedad relativa.

| U<br>(km/día) | Humedad Relativa (%) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|               | 40                   |      |      | 60   |      |      | 80   |      |      | 100  |      |      |      |      |      |
|               | D(m)                 | D(m) | D(m) | D(m) | D(m) | D(m) | D(m) | D(m) | D(m) | D(m) | D(m) | D(m) | D(m) | D(m) |      |
| <b>50</b>     | 0.57                 | 0.62 | 0.67 | 0.65 | 0.7  | 0.75 | 0.72 | 0.77 | 0.82 | 0.78 | 0.82 | 0.87 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| <b>100</b>    | 0.56                 | 0.6  | 0.65 | 0.64 | 0.69 | 0.74 | 0.71 | 0.75 | 0.8  | 0.77 | 0.81 | 0.86 | 0.81 | 0.85 | 0.9  |
| <b>200</b>    | 0.53                 | 0.58 | 0.63 | 0.62 | 0.66 | 0.71 | 0.68 | 0.73 | 0.78 | 0.74 | 0.78 | 0.83 | 0.78 | 0.82 | 0.86 |
| <b>300</b>    | 0.51                 | 0.56 | 0.61 | 0.59 | 0.64 | 0.69 | 0.66 | 0.7  | 0.75 | 0.71 | 0.75 | 0.8  | 0.75 | 0.79 | 0.83 |
| <b>400</b>    | 0.49                 | 0.53 | 0.58 | 0.57 | 0.61 | 0.66 | 0.63 | 0.67 | 0.72 | 0.68 | 0.72 | 0.77 | 0.71 | 0.75 | 0.8  |
| <b>500</b>    | 0.46                 | 0.51 | 0.56 | 0.54 | 0.59 | 0.64 | 0.6  | 0.65 | 0.7  | 0.65 | 0.69 | 0.74 | 0.68 | 0.72 | 0.77 |
| <b>600</b>    | 0.44                 | 0.48 | 0.53 | 0.52 | 0.56 | 0.61 | 0.58 | 0.62 | 0.67 | 0.62 | 0.66 | 0.71 | 0.65 | 0.69 | 0.74 |
| <b>700</b>    | 0.41                 | 0.46 | 0.51 | 0.49 | 0.53 | 0.59 | 0.55 | 0.59 | 0.64 | 0.59 | 0.63 | 0.68 | 0.62 | 0.66 | 0.7  |
| <b>800</b>    | 0.39                 | 0.43 | 0.48 | 0.47 | 0.51 | 0.56 | 0.52 | 0.57 | 0.62 | 0.56 | 0.61 | 0.65 | 0.59 | 0.63 | 0.67 |

Fuente: Adaptado de [19].

Donde:

D: Distancia desde la bandeja hasta el borde de la cubierta vegetal de pasto (m).

U: Velocidad del viento (Km/día).

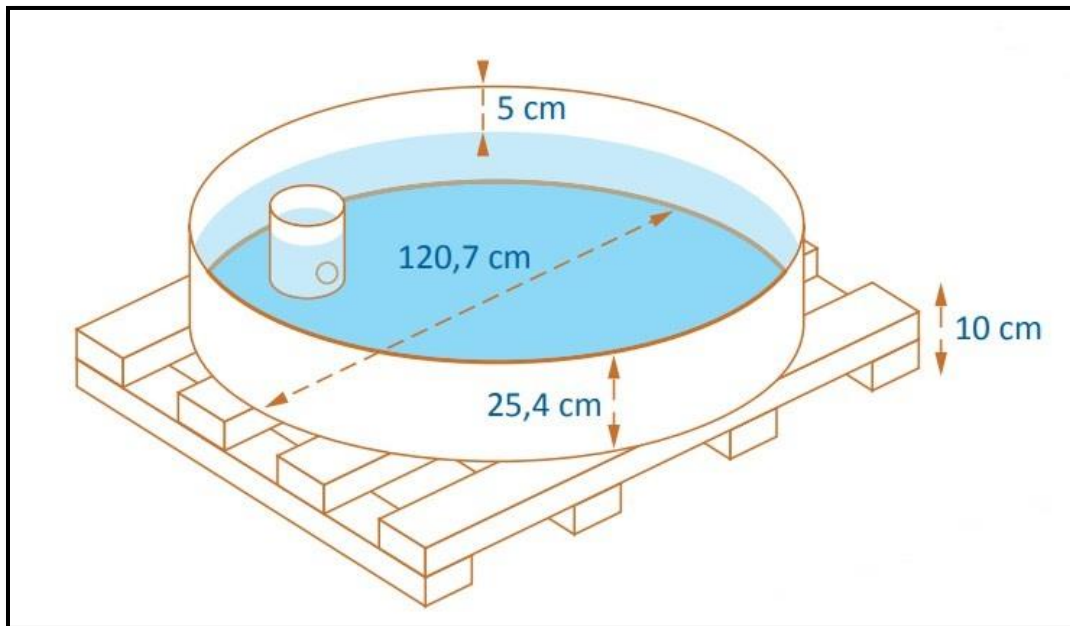


Figura 2.2 - Bandeja de clase A[19].

- Lisímetros: es un dispositivo introducido en el suelo, relleno con el mismo terreno del lugar y vegetación. Es utilizado para medir la evapotranspiración potencial (ETp) o de cultivo (ETc)[20]. (Ver Figura 2.3).

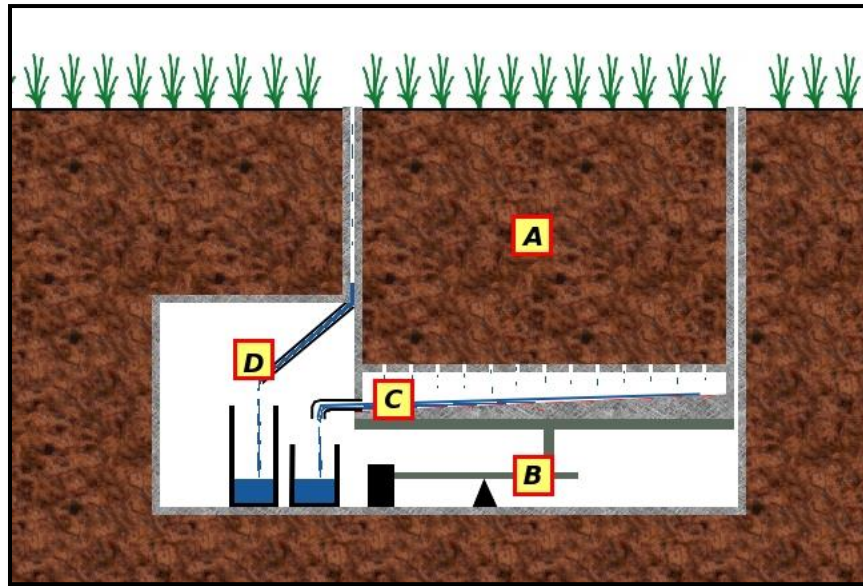


Figura 2.3 - Método de lisímetro[20].

### 2.2.1.2 Métodos de estimación de la evapotranspiración

Estos se utilizan para estudios de grandes áreas, son empleados para determinar la evapotranspiración en su máximo potencial (ETp) para un cultivo hipotético, cuyas características son conocidas y que corresponde a un cultivo de pasto de altura uniforme, bien regado y en óptimas condiciones de crecimiento. Para obtener la evapotranspiración real se incorporó el coeficiente de cultivo (Kc) propio del cultivo.

Los modelos se pueden clasificar debido a la variable climática sobre la que se basa la evapotranspiración:

#### Métodos basados en la temperatura del aire y datos astronómicos

Son los métodos más simples de ocupar, requieren solo la temperatura del aire, pero son los menos confiables[18].

- Método de Thornthwaite (1948)
- Método de Blainey y Criddle (1950)

#### Métodos basados en la temperatura del aire y la humedad relativa

Estos métodos además de la temperatura del aire incorporan la humedad relativa, un factor para obtener la tasa de evapotranspiración al determinar el gradiente higróico entre la atmósfera y la superficie evaporante [18].

- Método de Papadakis (1970)
- Método de Ivanov (1954)
- Método de Hargreaves (1975)

## Métodos basados en la radiación solar

Se basa en una correlación entre la evapotranspiración y la radiación solar. Los resultados obtenidos son más precisos que los métodos anteriores, pero más difícil de obtener debido a la escasez de estaciones de radiación [18].

- Método de Turc (1961)
- Método de Jensen-Haise (1963)

## Métodos basados en la ecuación de combinación del balance de energía y de la transferencia turbulenta del vapor de agua.

Existe un acuerdo en Chile y el mundo en que estos métodos entregan mejores resultados, debido a que, estiman la evapotranspiración dentro del balance de energía superficial y que el vapor de agua se difunde en régimen turbulento de manera simultánea [18].

- Método de Penman (1948)
- Método de Bouzo (1998)
- Método Penman-Monteith (1965) corresponde a una modificación realizada por Monteith a la fórmula propuesta por Penman. Es el método que la FAO ha recomendado para estimar los requerimientos hídricos de cultivo de todo el mundo.

En la actualidad la Evapotranspiración potencial (ET<sub>p</sub>) se puede obtener de diferentes sitios de internet, donde a partir de estaciones meteorológicas es posible conocer la Etp para una localidad en específico, pero como se puede ver en la *Figura 2.4* existe una baja densidad de estaciones que entreguen dicha información.

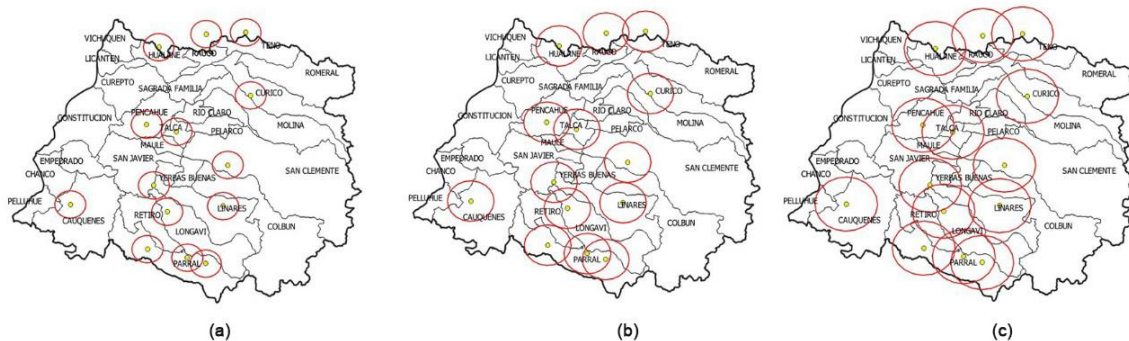


Figura 2.4 - Análisis espacial vectorial de estaciones que registran evapotranspiración (a) 5 Km, (b) 10 Km, (c) 15 km.

## 2.2.2 Coeficiente de cultivo

El coeficiente de cultivo es un factor que permite calcular la evapotranspiración de cultivo a través de la evapotranspiración potencial.

$$ET_c = ET_p * K_c$$

Ecuación 2.2

Donde:

$ET_c$  : evapotranspiración del cultivo (mm).

$K_c$  : coeficiente de cultivo (adimensional).

$ET_p$  : evapotranspiración potencial (mm).

El objetivo del uso del  $K_c$  es la determinación de la  $ET_c$  en el área cercana y representativa de la zona de cultivo, donde el  $K_c$  es el efecto combinado de la altura del cultivo, albedo<sup>5</sup>, resistencia del cultivo y evaporación del cultivo.

El  $K_c$  utilizado normalmente son los valores referenciales de la literatura (FAO), pero en los últimos 40 años se ha llevado a cabo una gran cantidad de investigaciones para estimar la evolución el coeficiente de cultivo[21], [22].

La utilización de la percepción remota para evaluar la necesidad de agua de los cultivos es una nueva manera, ya que es posible estimar los diferentes coeficientes de cultivo a través de los índices de vegetación (VI) mediante la interpretación de las imágenes satelitales, lo cual tiene una larga historia de desarrollo.

Primero Jackson et al. en el año 1980 encontraron una relación entre el coeficiente de cultivo con el índice de vegetación perpendicular (PVI) para el trigo[23]. Heilman et al. [12] expusieron la posibilidad de relacionar el índice de vegetación (VI) para describir el coeficiente de cultivo. Bausch y Neale[24]; Neale[13] demostraron la posibilidad de relacionar el coeficiente de cultivo de los cultivos herbáceos (cereales, legumbres y otros) con el índice de vegetación de las imágenes satelitales. Choundhury[25] establecieron una relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) derivado de un modelo de transferencia radiactiva y un coeficiente de transpiración calculado para el trigo bajo diferentes condicionales de fondo del suelo y de cobertura vegetal, proporcionando un fundamento teórico de esta relación. Hunsaker también mostraron una relación lineal entre el coeficiente de cultivo y el NDVI, pero en el cultivo de algodón en las etapas de crecimiento antes de la cobertura total[26]. Bausch y Choundhury propusieron otras relaciones con respecto a los cultivos herbáceos, pero utilizando el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)[25], [27]. Estas relaciones fueron estudiadas para diversos cultivos y recientemente para la papa Jayanthi[28], el algodón y la remolacha Gonzalez-Dugo y Mateos [29] y el trigo Duchemin [30], Er-Raki [31]. Últimamente, algunos estudios (Rafn [32], Singh e Irmak [33] están combinando la metodología de la teledetección térmica y la óptica para obtener relaciones entre el coeficiente de cultivo y el índice de vegetación o comparar los resultados de ambas metodologías con respecto a datos precisos del terreno González-Dugo [34]. Cuesta comprobaron la capacidad de obtener un coeficiente único a partir de los datos de los satélites para varios cultivos anuales[35]. González-Piqueras obtuvieron una buena relación entre el coeficiente de cultivo y el índice de vegetación para el trigo y el maíz, comparando con base en la reflectancia coeficientes de cultivo de la radiometría de campo con datos del lisímetro. Campos relaciona el NDVI con el coeficiente de cultivo Vid[14], obteniendo una relación muy similar a la obtenida por Neale. En la Tabla 2.2 se puede apreciar un breve resumen de las ecuaciones obtenidas por algunos de los autores ya mencionados.

---

<sup>5</sup> Porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella

Tabla 2.2- Resumen algunas relaciones Kc - VI.

| <b>Ecuaciones</b>               | <b>Autor</b>            | <b>Cultivo</b>        |
|---------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| <b>Kcb = 1.36 NDVI - 0.06</b>   | Bausch and Neale (1987) | Maíz                  |
| <b>Kcb = 1.56 NDVI - 0.26</b>   | Choundhury (1994)       | Planteamiento teórico |
| <b>Kcb = 1.416 SAVI + 0.017</b> | Bausch (1993)           | Maíz                  |
| <b>Kcb = 1.69 SAVI - 0.16</b>   | Choundhury (1994)       | Planteamiento teórico |
| <b>Kcb = 1.587 SAVI + 0.005</b> | Jayanthi (2007)         | Papa                  |
| <b>Kcb = 1.44 NDVI - 0.1</b>    | Campos (2010)           | Vid                   |

### 2.2.3 Índice de vegetación

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales que tienden a medir el vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es el producto de varios valores espectrales (sumando, dividiendo, o multiplicando) indicando la cantidad o vigor de la vegetación en un pixel[36].

Existe una variedad de Índice de Vegetación que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la cobertura vegetal. La mayoría de estos índices están basados en las diferentes interacciones entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas espectro rojo e infrarrojo.

Los índices de vegetación en general se dividen en tres grupos:

- Basados en la Pendiente
  - Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)
  - Índice de Vegetación Transformado (TVI)
  - Índice de Vegetación Transformado Corregido (CTVI)
  - Índice de Vegetación Transformado de Tiam (TTVI)
  - Índice de Vegetación Cociente simple (RVI)
  - Índice de Vegetación Normalizado (NRVI)
  
- Basado en la distancia<sup>6</sup>
  - Índice de Vegetación Perpendicular (PVI)
  - Índice de Vegetación de Diferencia (DVI)
  - Índice de Vegetación de Suelo Ajustado (SAVI)
  - Índice de Vegetación de Suelo Ajustado (TSAVI)
  
- De transformaciones ortogonales
  - Índice de Vegetación Análisis de Componente (PCA)
  - Índice de Vegetación de Tasseled Cap (GVI)
  - Índice de Vegetación de Misra (MGVI)

<sup>6</sup> SAVI se ajusta en función del tamaño de la vegetación, mientras que TSAVI se ajusta en función de la pendiente del suelo.

### 2.2.3.1 NDVI

El índice de vegetación más conocido y usado es el Índice de Vegetación Diferencial Normalizada (NDVI Normalized Difference Vegetation Index). Este índice fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo[37].

Los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético. A mayor contraste entre el rojo e infrarrojo, mayor vegetación en la cubierta del suelo. En cambio, valores menores de contraste representan vegetación con algún tipo de estrés (o sin vegetación). Esta diferencia en la respuesta espectral permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otras cubiertas[38].

El Índice de Vegetación Diferencial de Normalizada se calcula mediante la Ecuación 2.3:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

- NIR es la reflectividad en el infrarrojo cercano
- RED es la reflectividad en el rojo.

El NDVI es un índice no dimensional donde sus valores varían entre el - 1 y +1. En la práctica, los valores que están por debajo del 0.1 corresponden a cuerpos de agua y a tierra desnuda, mientras que valores más altos son indicadores de la actividad fotosintética de las zonas con vegetación (matorrales, bosques, selva y actividad agrícola)[39].

Algunas de las aplicaciones de los índices de vegetación han sido empleados en dos clases de investigación. La primera se utiliza como indicadores, para monitorear el crecimiento y la productividad de cultivos específicos. La segunda como un dispositivo de mapeo, para asistir la clasificación de imágenes, distinguir áreas con vegetación y sin vegetación, para distinguir entre diferentes tipos y densidades de vegetación y para monitorear variaciones estacionales en el vigor de la masa foliar, abundancia y distribución[36].

## 2.3 Imágenes satelitales

En la actualidad existen varios satélites (Landsat, NOAA, Terra, Aqua, etc.) que transportan los aparatos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia (sensores).

Un sensor es el aparato que reúne la tecnología necesaria para captar imágenes a distancia y transportado a un satélite. Puede captar información para diferentes regiones del espectro y cada una de estas regiones se denomina canal o banda. Los sensores más comunes son NOAA AVHRR, Landsat TM, MODIS (Ver Tabla 2.3).

Tabla 2.3 - Características de los principales sensores.

| Sensor             | Resolución espacial [m] | Tamaño de imagen [Km] | Resolución temporal | Resolución espectral |
|--------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| <b>NOAA AVHRR</b>  | 1100                    | 2700 x 2700           | 12 horas            | 4 bandas             |
| <b>Landsat TM+</b> | 30                      | 185 x 185             | 16 días             | 8 bandas             |
| <b>MODIS</b>       | 250-100                 | 2330 x 2330           | 1 día               | 36 bandas            |

Fuente: Guía de usuario [40],[41],[42]

Los sensores como NOAA AVHRR y MODIS tienen una mayor frecuencia (12 horas – 1 día), es decir, tiempo que se demora en pasar el satélite por la misma zona de la tierra, quizás Landsat tiene una frecuencia menor (16 días), pero la resolución es mucho mayor comparada con el NOAA AVHRR y MODIS, ya que la resolución espacial se refiere a los detalles visibles de una imagen y mientras menor sea el área terrestre por cada pixel, mejores son los detalles captados.

### 2.3.1 Características de los satélites Landsat 7 y Landsat 8

El satélite Landsat-1 fue lanzado el 7 de marzo de 1972 el cual abrió una nueva percepción del planeta con una resolución tanto temporal como espectral desconocida hasta entonces. Este satélite, dotado de sensores empleados en teledetección, fue diseñado con el fin de obtener datos de los recursos terrestres (aplicaciones agrícolas, forestales, usos del suelo, hidrología, recursos costeros y monitorización medioambiental)[43].

#### 2.3.1.1 Satélite Landsat 7 ETM+

El satélite Landsat 7 tiene las siguientes características (Ver Tabla 2.4).

Tabla 2.4 - Características satélite Landsat 7.

|                                |                                     |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Anchura de Barrido</b>      | <b>180 kilómetros</b>               |
| <b>Altitud</b>                 | 705 kilómetros                      |
| <b>Resolución Radiométrica</b> | 8 bits                              |
| <b>Inclinación</b>             | Solar-sincrónica,<br>98.2°          |
| <b>Paso Ecuatorial</b>         | Descendente,<br>10:00am (+/- 15min) |
| <b>Fecha de Lanzamiento</b>    | Abril 1999                          |

El sensor ETM+ dispone de 8 bandas situadas en distintas zonas del espectro electromagnético (Ver Tabla 2.5)

Tabla 2.5 - Resoluciones: espacial y espectral del sensor ETM+.

| Banda | Resolución (m) | Bits por pixel | Rango espectral ( $\mu\text{m}$ ) | Zona del espectro  |
|-------|----------------|----------------|-----------------------------------|--------------------|
| 1     | 30             | 8              | 0.45-0.52                         | Azul               |
| 2     | 30             | 8              | 0.52-0.60                         | Verde              |
| 3     | 30             | 8              | 0.63-0.69                         | Rojo               |
| 4     | 30             | 8              | 0.77-0.90                         | Infrarrojo cercano |
| 5     | 30             | 8              | 1.55-1.75                         | Infrarrojo medio   |
| 6     | 60             | 8              | 10.40-12.50                       | Infrarrojo térmico |
| 7     | 30             | 8              | 2.09-2.35                         | Infrarrojo medio   |
| 8     | 15             | 8              | 0.52-0.90                         | Panromático        |

### 2.3.1.2 Satélite Landsat 8 OLI/TIRS

El satélite Landsat 8 tiene las siguientes características (Ver Tabla 2.6).

Tabla 2.6 - Características Landsat 8.

|                                |                                     |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Anchura de Barrido</b>      | <b>180 kilómetros</b>               |
| <b>Altitud</b>                 | 705 kilómetros                      |
| <b>Resolución Radiométrica</b> | 12 bits                             |
| <b>Inclinación</b>             | Solar-sincrónica,<br>98.2°          |
| <b>Paso Ecuatorial</b>         | Descendente,<br>10:00am (+/- 15min) |
| <b>Fecha de Lanzamiento</b>    | Febrero 2013                        |

El satélite Landsat incorpora dos instrumentos: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS).

Las bandas espectrales del sensor OLI, aun cuando es similar al sensor Landsat 7 ETM+, proporcionan una mejora de las bandas anteriores, debido a que incorporaron dos nuevas bandas espectrales: un canal (banda 1), diseñado para los recursos hídricos e investigación costera, y un canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. Por otro lado, el sensor TIRS agrega dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en el anterior sensor ETM+[44] como se puede observar en la *Tabla 2.7*.

Tabla 2.7 - Resoluciones: espacial y espectral del sensor OLI/TIRS.

| <b>Banda</b> | <b>Resolución (m)</b> | <b>Bits por pixel</b> | <b>Rango espectral (<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>Zona del espectro</b>  |
|--------------|-----------------------|-----------------------|---|---------------------------|
| <b>1</b>     | 30                    | 12                    | 0.43-0.45   | Aerosol costero           |
| <b>2</b>     | 30                    | 12                    | 0.45-0.51   | Azul                      |
| <b>3</b>     | 30                    | 12                    | 0.53-0.59   | Verde                     |
| <b>4</b>     | 30                    | 12                    | 0.64-0.67   | Rojo                      |
| <b>5</b>     | 30                    | 12                    | 0.85-0.88   | Infrarrojo cercano        |
| <b>6</b>     | 60                    | 12                    | 1.57-1.65   | Infrarrojo medio          |
| <b>7</b>     | 30                    | 12                    | 2.11-2.29   | Infrarrojo medio          |
| <b>8</b>     | 15                    | 12                    | 0.50-0.68   | Pancromático              |
| <b>9</b>     | 30                    | 12                    | 1.36-1.38   | Cirrus                    |
| <b>10</b>    | 100                   | 12                    | 10.60-11.19                                       | Infrarrojo térmico (TIRS) |
| <b>11</b>    | 100                   | 12                    | 11.50-12.51                                       | Infrarrojo térmico (TIRS) |

La resolución temporal mide el tiempo transcurrido desde la obtención de una imagen de un punto de la tierra, hasta la siguiente imagen del mismo punto. Para los satélites Landsat 7 y 8 la resolución temporal es de 16 días. Existe un total de 23 imágenes/año en cada punto de la corteza terrestre. Esta resolución, aunque es alta, se puede ver mermada por la presencia de nubes que ocasionan que las imágenes sean inútiles en algunos casos.

## Capítulo 3: Metodología

Para poder estimar el coeficiente de cultivo en el área de estudio se analizará el ciclo vegetativo de la vid vinífera, identificando las etapas más relevantes (brotación, floración, pinta y cosecha) con sus respectivos  $K_c$  teóricos (FAO) y experimentales[45], [46], donde el  $K_c$  experimental obtenido, se analizó en el valle del Maipo, pero se utilizará para el análisis de la región del General Libertador Bernardo O'Higgins. En ambos casos, se puede observar que el mes de enero presenta el mayor  $K_c$  (ver Tabla 3.1), el cual está asociado al periodo cuando el grano cambia de color (pinta).

Tabla 3.1 - Valores de  $K_c$  mensuales para vid vinífera.

|               | Noviembre | Diciembre | Enero | Febrero | Marzo |
|---------------|-----------|-----------|-------|---------|-------|
| Teórico (FAO) | 0,15      | 0,35      | 0,50  | 0,30    | 0,20  |
| Experimental  | 0,69      | 0,81      | 0,86  | 0,83    | 0,72  |

En primer lugar, entre el periodo (2000 – 2019) se obtendrán imágenes satelitales (Landsat 7 y Landsat 8) de <https://earthexplorer.usgs.gov/>, solamente con una nubosidad menor al 20% para un mejor análisis, posteriormente se calculará el NDVI mediante la Ecuación 2.3.

Luego de obtener las imágenes y calcular el NDVI, es necesario identificar la ubicación de las viñas presentes en el área de estudio, para lo cual se realizará una recopilación de información existente en la zona. La revisión bibliográfica[47] arroja que para la región del Libertador General Bernardo O'Higgins existen los valles Colchagua y Cachapoal, la región del Maule existe los valles de Curicó y Maule, la región del Ñuble existe el valle de Itata y la región del Biobío existe el valle de Biobío donde se cultivan las diferentes cepas de vid vinífera (Ver Capítulo 4.4). La localización (coordenadas UTM) se realizará contrastando las coordenadas obtenidas en la bibliografía con imágenes de Google Earth.

Una vez identificada la zona de cultivo de cada viña, se hará un análisis de NDVI característico en cada una de ellas definiendo los valores máximos y mínimos, para luego seleccionar un rango representativo de NDVI para los meses de análisis (noviembre a marzo).

Ya definido el rango de NDVI promedio que abarcan los viñedos se realizará un filtro para poder visualizar únicamente los píxeles en ese rango y determinar el área superficial, la cual se comparará con la información del catastro agrícola de cada región y con la información del catastro de vides de vinificación de cada región. Este proceso comparativo permite ajustar el área obtenida mediante la información de NDVI a las hectáreas cultivadas por año, variando los umbrales iniciales máximos y mínimos de este índice en no más de un 20%.

Posteriormente, para la obtención del  $K_c$  en función del NDVI se aplican las fórmulas de Campos (Ecuación 3.1 [14]), específicamente para vid vinífera y Campoy (Ecuación 3.2 [48]), utilizada para todo tipo de cultivo.

$$K_c = 1,44 * NDVI - 0,1 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$K_c = 1,51 * NDVI - 0,23 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Se considera relevante también incorporar la información encontrada en la revisión bibliográfica, asociada a que las viñas dedicadas a la producción de vinos incorporan un factor de reducción de riego, condición denominada coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ), que corresponde a un método para disminuir la demanda hídrica de las cepas, pero que mejora la calidad de los vinos[49], para obtener la evapotranspiración real del viñedo (ET<sub>r</sub>).

$$ET_r = ET_p * K_c * K_s = ET_p * K_r$$

Ecuación 3.3

Donde:

$ET_p$ : evapotranspiración potencial.

$K_c$  : coeficiente de cultivo.

$K_s$  : coeficiente de estrés hídrico.

$K_r$  : coeficiente de riego.

Los coeficientes de estrés hídrico aplicados en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se presentan en la Tabla 3.2, factores que se aplican a los  $K_c$  obtenidos de manera experimental. En el caso de la Región del Maule, además de las regiones del Ñuble y Biobío (éstas últimas se analizarán juntas) se presenta el coeficiente de riego, es decir, el producto del coeficiente de estrés hídrico con el  $K_c$  estimado en el valle de análisis a través de Penman-Monteith (ver Tabla 3.3).

Se prevé comparar las diferencias entre los  $K_c$  obtenidos mediante el análisis por NDVI y los obtenidos a través de la literatura,  $K_c$  teóricos (FAO)[45] y experimentales sin estrés, véase Tabla 3.1, además de  $K_c$  con estrés de Ferreira et al. y Ortega et al.[46], [50], además de analizar de manera comparativa los  $K_c$  en las diferentes regiones de la zona de estudio.

Tabla 3.2 - Índices de estrés hídrico ( $K_s$ ): Región Libertador General Bernardo O'Higgins[50].

| Tipos de vinos                   | Noviembre | Diciembre | Enero | Febrero | Marzo |
|----------------------------------|-----------|-----------|-------|---------|-------|
| <b>Merlot, Pinot y Carmenere</b> | 0,6       | 0,3       | 0,3   | 0,3     | 0,6   |
| <b>Syrah</b>                     | 0,5       | 0,3       | 0,3   | 0,3     | 0,3   |
| <b>S. Blanc y Chardonay</b>      | 0,6       | 0,6       | 0,6   | 0,6     | 0,6   |

Tabla 3.3 – Coeficiente de riego ( $K_r$ ): Regiones Maule, Ñuble y Biobío[46].

| Tipos de vinos  | Noviembre | Diciembre | Enero | Febrero | Marzo |
|-----------------|-----------|-----------|-------|---------|-------|
| <b>Cabernet</b> |           | 0,15      | 0,29  | 0,38    | 0,33  |
| <b>Merlot</b>   | 0,04      | 0,15      | 0,29  | 0,46    | 0,22  |

## Capítulo 4: Área de estudio

El área de estudio se encuentra dividida en zonas, las cuales corresponden a 4 regiones de Chile. Estas regiones se eligieron debido a que están dentro de las zonas con mayor área de viñedos viníferos en todo Chile, según ODEPA.

### 4.1 Localización

#### ➤ Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

La Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, corresponde a la sexta región de Chile. Ubicada en el centro del país, limita al noroeste con la Región de Valparaíso, noreste con la Región Metropolitana de Santiago, al este con Argentina, al sur con la Región del Maule y al oeste con el océano Pacífico. La región está conformada por 3 provincias con sus respectivas comunas, posee una superficie aproximada de 16.387 [Km<sup>2</sup>] (ver Figura 4.1).

Ubicación geográfica:

| Latitud    | Longitud   |
|------------|------------|
| 34°22'19"S | 71°07'28"O |

#### ➤ Región del Maule

La Región del Maule, corresponde a la séptima región de Chile. Ubicada en el centro del país, limita al norte con la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, al sur con la Región del Ñuble, al este con Argentina y al oeste con el océano Pacífico. La región está conformada por 4 provincias con sus respectivas comunas, posee una superficie aproximada de 36.269,1 [Km<sup>2</sup>] (ver Figura 4.1).

Ubicación geográfica:

| Latitud    | Longitud   |
|------------|------------|
| 35°25'36"S | 71°40'18"O |

#### ➤ Región de Ñuble

La Región de Ñuble corresponde a la décimo sexta región de Chile. Ubicada en la zona centro del país, limita al norte con la Región del Maule, al sur con la Región del Biobío, al este con Argentina y al oeste con el océano Pacífico. La región está conformada por 3 provincias con sus respectivas comunas, posee una superficie aproximada de 13.178,5 [Km<sup>2</sup>] (ver Figura 4.1).

Ubicación geográfica:

| Latitud    | Longitud   |
|------------|------------|
| 36°37'00"S | 71°57'00"O |

➤ **Región del Bio-Bio**

La Región del Biobío, corresponde a la octava región de Chile. Ubicada en la zona centro – sur del país, limita al norte con la Región de Ñuble, al sur con la Región de la Araucanía, al este con Argentina y al oeste con el océano Pacífico. La región está conformada por 3 provincias con sus respectivas comunas, posee una superficie aproximada de 23.890,2 [Km<sup>2</sup>] (ver Figura 4.1).

Ubicación geográfica:

| Latitud    | Longitud   |
|------------|------------|
| 36°46'22"S | 73°03'47'O |

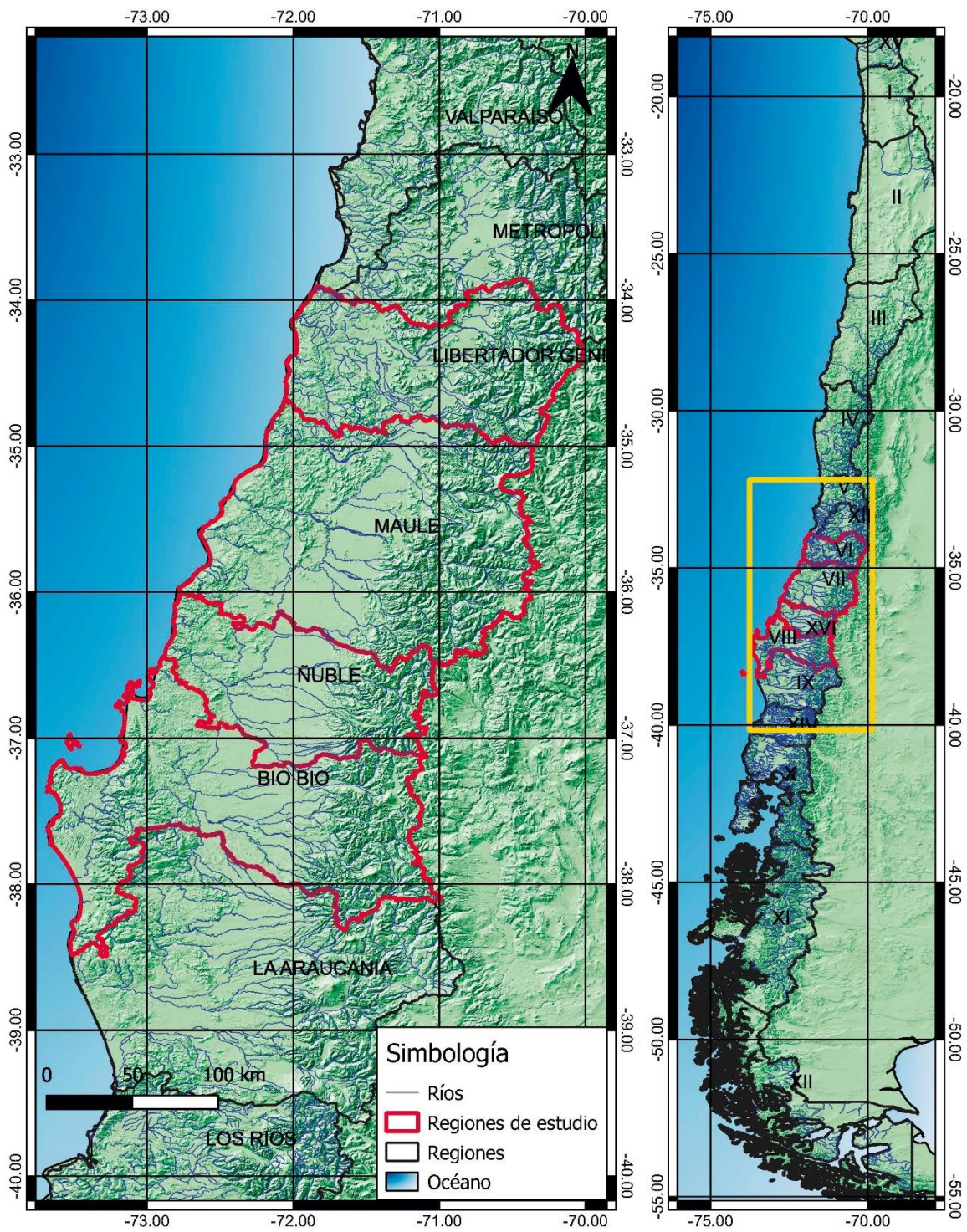


Figura 4.1 - Área de estudio.

## 4.2 Clima

### 4.2.1 Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

La Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se caracteriza por tener un clima templado mediterráneo, pero presenta variaciones dependiendo de la localización topográfica. En la costa se presenta nuboso, mientras que, hacia el interior debido a la sequedad, experimenta fuertes contrastes térmicos. Las precipitaciones son mayores en la costa y la Cordillera de los Andes, debido a que el relieve no permite la entrada de los vientos húmedos oceánicos.

En el litoral, predomina el clima templado nuboso, caracterizado por una mayor humedad y abundante nubosidad. En la depresión intermedia predomina un clima templado mediterráneo cálido con una estación seca de seis meses y un invierno lluvioso.

En la Figura 4.2 se puede apreciar el comportamiento de las precipitaciones y temperaturas existentes en los valles (Colchagua y Cachapoal), a través del climograma de la estación Convento Viejo entre los periodos de 1990 – 2019.

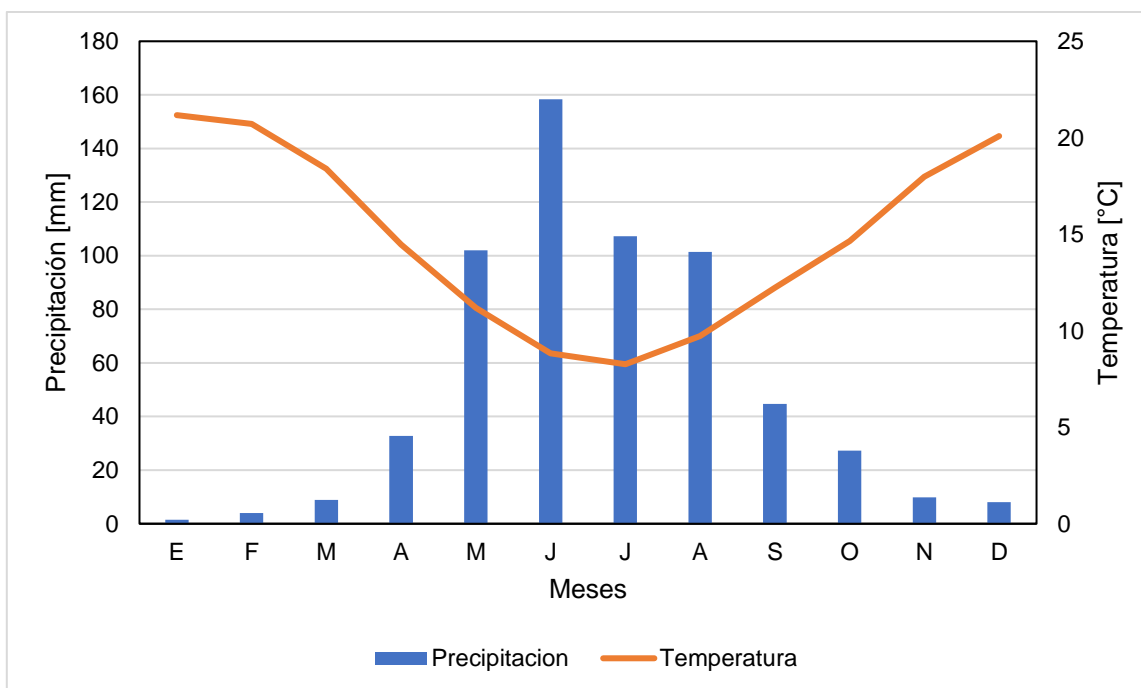


Figura 4.2 - Climograma zona 1: Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

## 4.2.2 Región del Maule

La Región del Maule se caracteriza por tener un clima templado de tipo mediterráneo, con diferencias en sentido de norte a sur, una estación seca de seis meses en el norte y cuatro meses en el sur.

En la costa predomina el clima templado mediterráneo costero, con temperaturas moderadas todo el año. En la depresión intermedia se da un clima templado mediterráneo cálido que cambia a un clima mediterráneo de altura en la precordillera hasta aproximadamente los 2.000 m, presentando una disminución de temperaturas y aumento de precipitaciones.

En la Figura 4.3 se puede apreciar el comportamiento de las precipitaciones y temperaturas existentes en los valles de (Curicó y Maule), a través del climograma realizado en la estación Potrero Grande entre los periodos de 1990 – 2019.

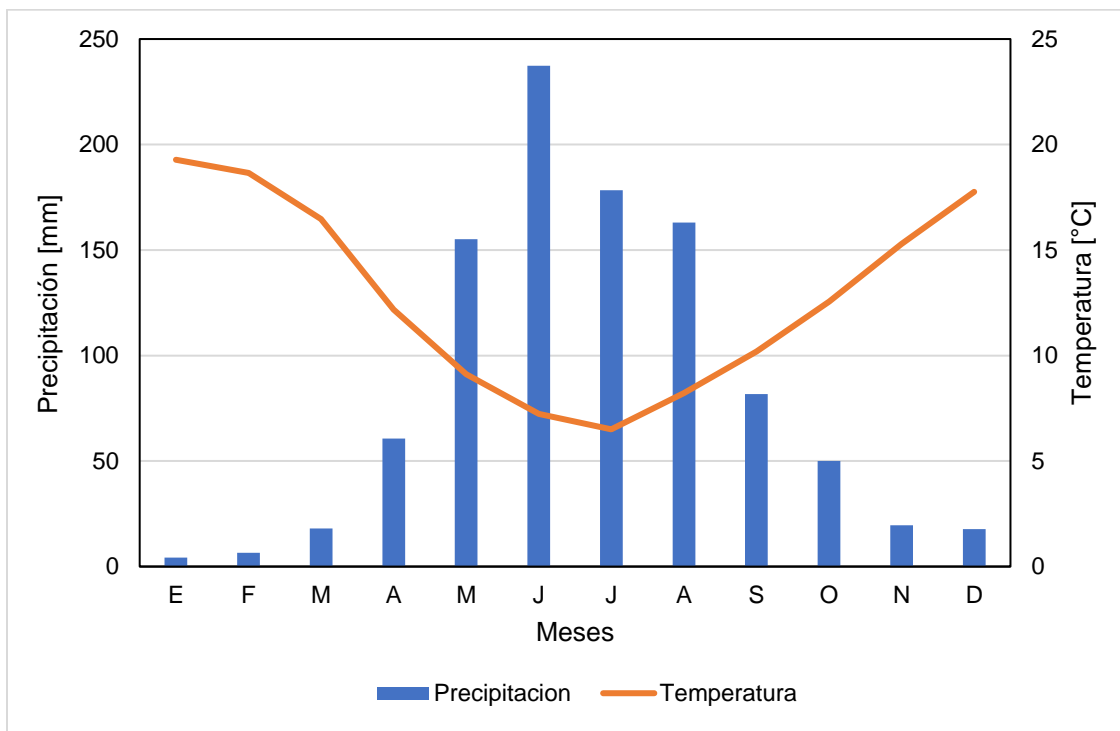


Figura 4.3 - Climograma zona 2: Región del Maule.

### 4.2.3 Región de Ñuble

La Región de Ñuble presenta un cambio entre los climas templados secos en la zona central de Chile y los climas templados lluviosos que comienzan a formarse desde el borde sur de la cuenca del río Itata.

En la zona costera y la Cordillera de la Costa presenta un clima templado húmedo, con una humedad constante con precipitaciones que están entre 800 mm y 1.000 mm anuales de norte a sur de la región. Entre la depresión intermedia y los sectores bajos de la precordillera las precipitaciones varían entre los 1.000 a 1.500 mm anuales con un periodo seco de cuatro meses, esto genera que las temperaturas sean muy contrastantes, con veranos muy calurosos e inviernos muy fríos.

### 4.2.4 Región del Biobío

La Región del Biobío presenta un cambio entre los climas templados en la zona central de Chile y los climas templados lluviosos que comienzan a formarse al sur del río Biobío.

En la zona costera y la Cordillera de la Costa presenta un clima templado húmedo, con una humedad constante con precipitaciones que están entre 1.200 mm y 2.000 mm anuales de norte a sur en la región. En el norte de la región predomina el clima templado mediterráneo, esta abarca la depresión intermedia y las zonas más bajas de la precordillera, donde las precipitaciones alcanzan los 1.300 mm anuales con un periodo seco de cuatro meses, esto genera que las temperaturas sean muy contrastantes, con veranos muy calurosos e inviernos muy fríos.

En la Figura 4.4 se puede observar el comportamiento de las precipitaciones y temperaturas existentes en los valles de (Itata y Biobío), a través del climograma realizado en la estación Coihueco embalse entre los periodos de 1990 – 2019. La información analizada es de la octava región, previo a la separación región Ñuble y Biobío.

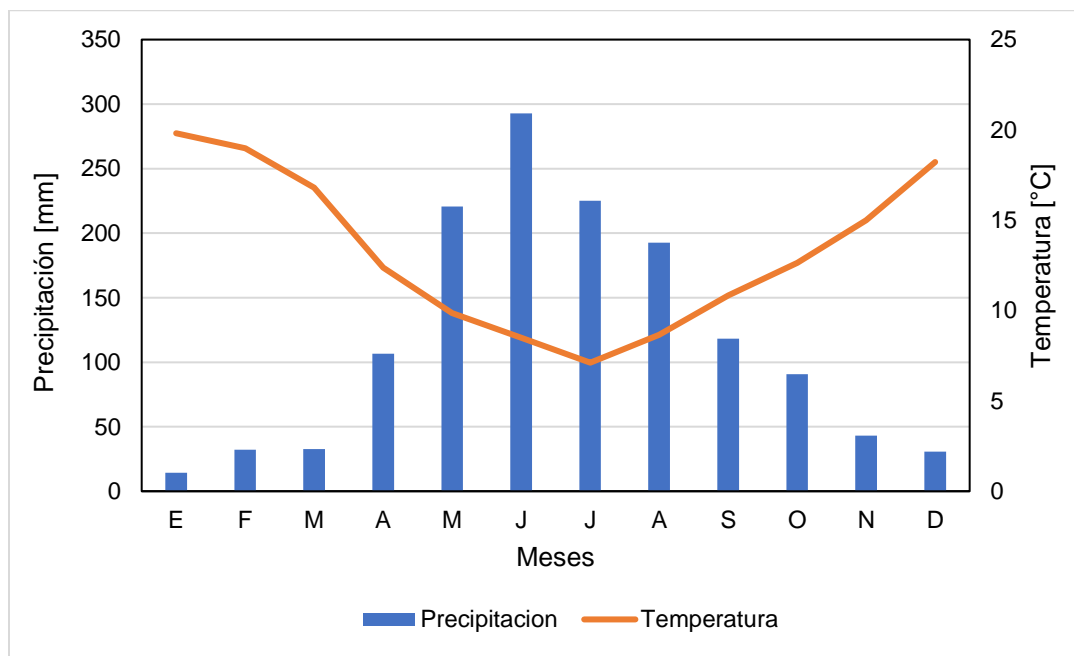


Figura 4.4 - Climograma zona 3 y 4: Región del Ñuble y Región del Bio-Bio.

## 4.3 Uso de suelo

### 4.3.1 Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

Los tipos de suelo que abarcan la mayoría de la región son los bosques 36,1%; terrenos agrícolas 24,8%; praderas y matorrales 20% (ver Figura 4.5). Las áreas menores correspondientes a otros usos se pueden observar en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 - Distribución uso de suelo zona 1: Región Libertador General Bernardo O'Higgins.

| Uso de Suelo                     | Superficie [ha]    | Porcentaje [%] |
|----------------------------------|--------------------|----------------|
| Áreas Desprovistas de Vegetación | 56.406,6           | 3,5            |
| Áreas Urbanas e Industriales     | 33.704,1           | 2,1            |
| Bosque                           | 590.391,2          | 36,1           |
| Cuerpos de Agua                  | 10.369,0           | 0,6            |
| Humedales                        | 6.597,9            | 0,4            |
| Nieves Eternas y Glaciares       | 205.389,3          | 12,6           |
| Praderas y Matorrales            | 326.241,9          | 20,0           |
| Terrenos Agrícolas               | 405.304,3          | 24,8           |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>1.634.404,2</b> | <b>100,0</b>   |

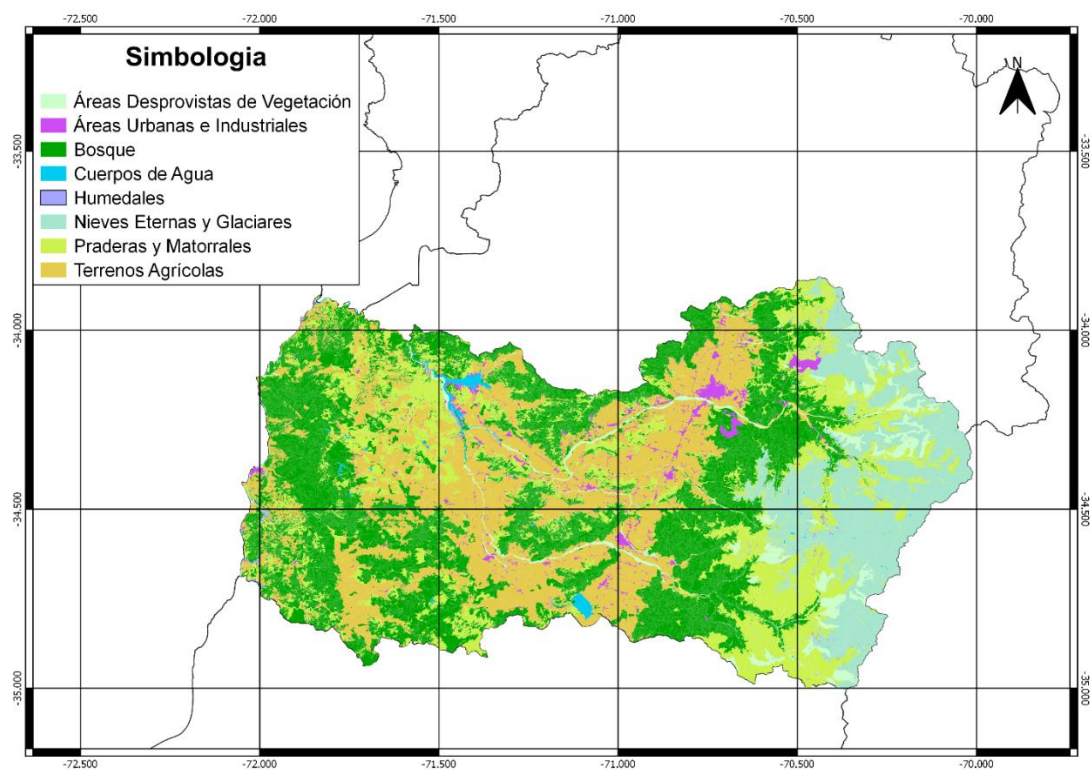


Figura 4.5 - Uso de suelo zona 1: Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

### 4.3.2 Región del Maule

El uso de suelo que predomina la región son los bosques con 41,1%, donde le siguen los terrenos agrícolas con un 20,5% como se puede observar en la Figura 4.6. Dentro del porcentaje de los terrenos agrícolas se encuentra la vitis vinífera y corresponde al área más grande en el país para su cultivo según el Catastro Vitícola Nacional 2016[51], la distribución del resto de los terrenos se puede apreciar en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 - Distribución uso de suelo zona 2: Región del maule.

| Uso de Suelo                     | Superficie [ha]    | Porcentaje [%] |
|----------------------------------|--------------------|----------------|
| Áreas Desprovistas de Vegetación | 488.637,4          | 16,1           |
| Áreas Urbanas e Industriales     | 26.602,8           | 0,9            |
| Bosque                           | 1.245.083,1        | 41,1           |
| Cuerpos de Agua                  | 36.069,8           | 1,2            |
| Humedales                        | 2.744,0            | 0,1            |
| Nieves Eternas y Glaciares       | 48.363,0           | 1,6            |
| Praderas y Matorrales            | 563.406,4          | 18,6           |
| Terrenos Agrícolas               | 619.858,3          | 20,5           |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>3.030.764,8</b> | <b>100,0</b>   |

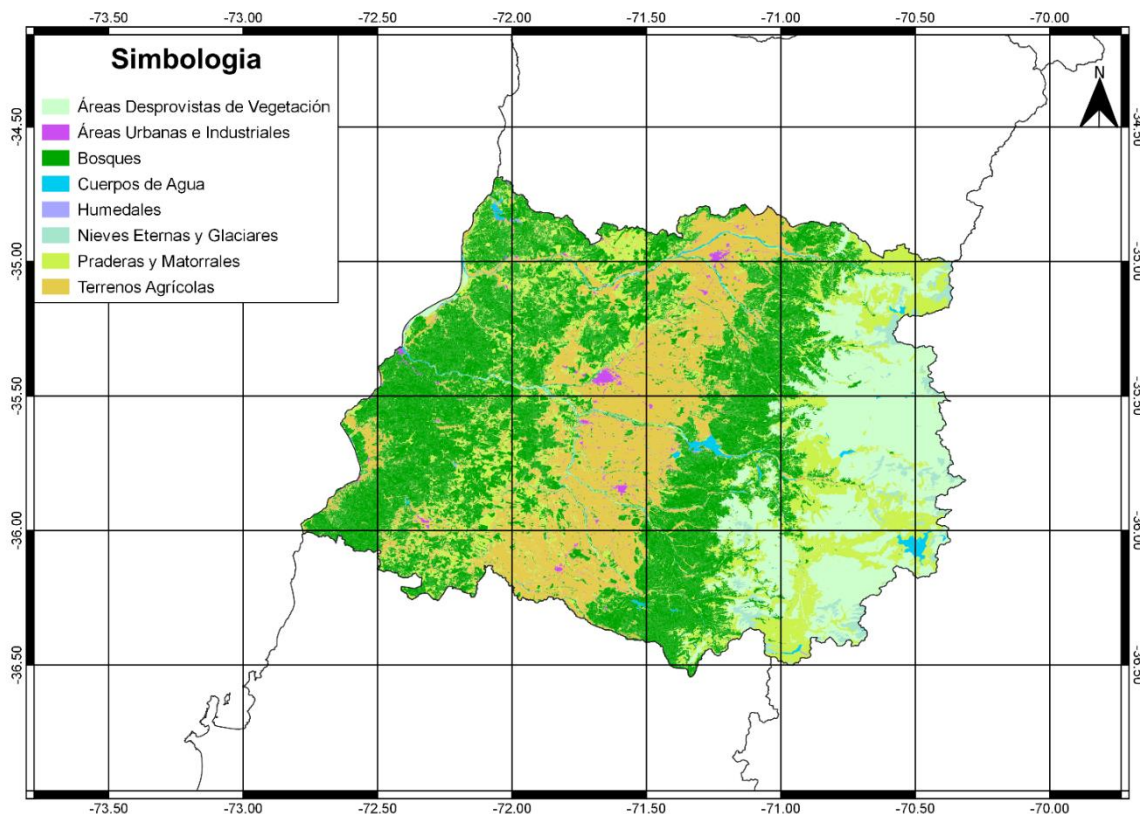


Figura 4.6 - Uso de suelo zona 2: Región del Maule.

### 4.3.3 Región de Ñuble

La mayor parte del suelo de la región pertenece a bosques con un 49,5%, donde le siguen los terrenos agrícolas con un 29,5%, como se puede observar en la Figura 4.7. El resto de los terrenos con un menor porcentaje se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 - Distribución uso de suelo: Región de Ñuble.

| Uso de Suelo                     | Superficie [ha]    | Porcentaje [%] |
|----------------------------------|--------------------|----------------|
| Áreas Desprovistas de Vegetación | 84.844,4           | 6,3            |
| Áreas Urbanas e Industriales     | 11.355,6           | 0,8            |
| Bosque                           | 663.226,6          | 49,5           |
| Cuerpos de Agua                  | 11.012,7           | 0,8            |
| Humedales                        | 1.015,5            | 0,1            |
| Nieves Eternas y Glaciares       | 12.390,2           | 0,9            |
| Praderas y Matorrales            | 161.523,2          | 12,1           |
| Terrenos Agrícolas               | 394.983,0          | 29,5           |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>1.340.351,2</b> | <b>100,0</b>   |

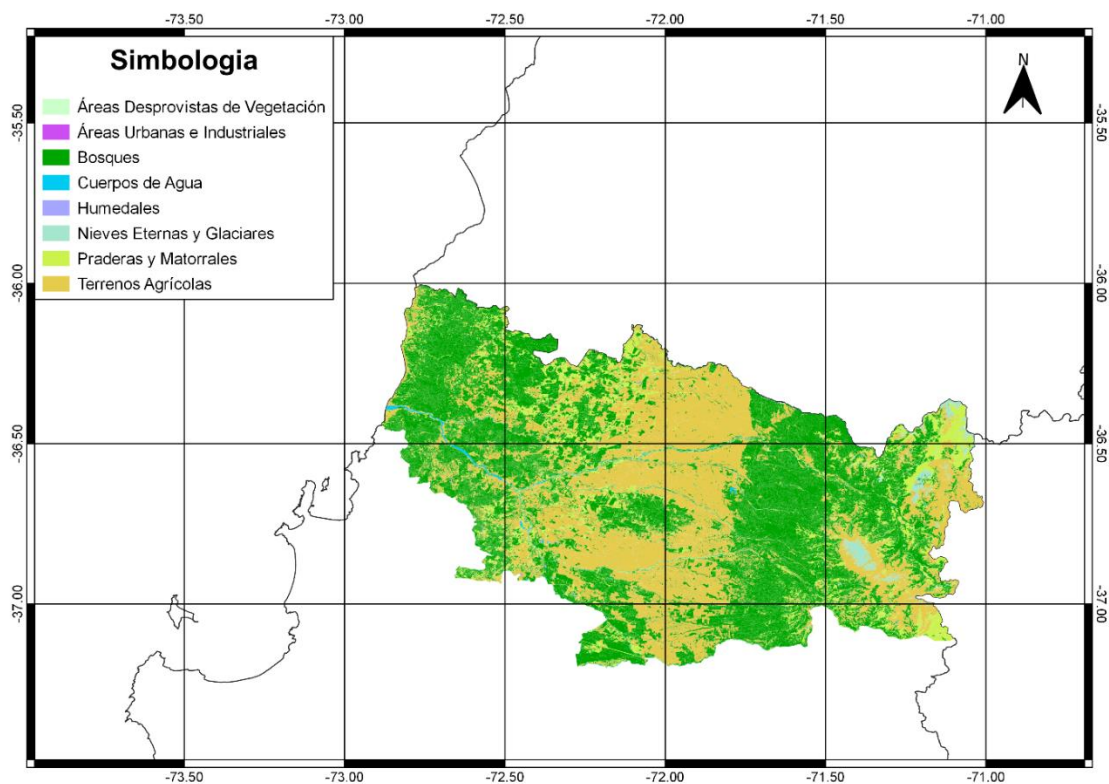


Figura 4.7 - Uso de suelo zona 3: Región del Ñuble.

### 4.3.4 Región del Biobío

La gran parte del suelo pertenece a bosques con un 63,2%, siguen las praderas y matorrales y los terrenos agrícolas con un 15% y 13,6% respectivamente, como se puede observar en la Figura 4.8. La distribución del resto de las áreas se puede apreciar en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 - Distribución uso de suelo: Región del Biobío.

| Uso de Suelo                     | Superficie [ha]    | Porcentaje [%] |
|----------------------------------|--------------------|----------------|
| Áreas Desprovistas de Vegetación | 94.400,9           | 3,9            |
| Áreas Urbanas e Industriales     | 30.263,6           | 1,2            |
| Bosque                           | 1.531.522,4        | 63,2           |
| Cuerpos de Agua                  | 45.282,0           | 1,9            |
| Humedales                        | 10.170,2           | 0,4            |
| Nieves Eternas y Glaciares       | 17.746,6           | 0,7            |
| Praderas y Matorrales            | 362.823,2          | 15,0           |
| Terrenos Agrícolas               | 329.709,4          | 13,6           |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>2.421.918,2</b> | <b>100,0</b>   |

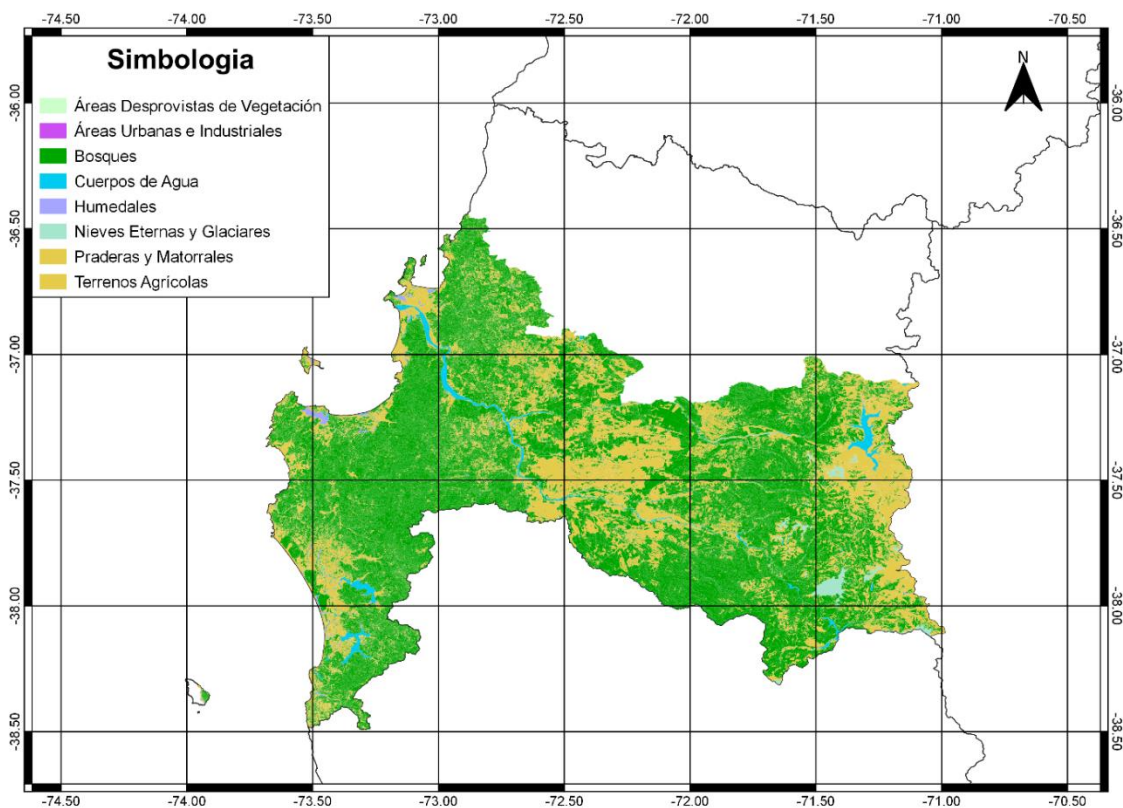


Figura 4.8 - Uso de suelo zona 4: Región del Biobío.

## 4.4 Ubicación de viñas

Según el acuerdo del decreto N°464 de la legislación vitivinícola del país, el 14 de diciembre de 1994, Chile cuenta con una zonificación vitícola geográfica basada en valles transversales, generalmente delineados por los ríos importantes que fluyen desde la cordillera al mar. Esta zonificación divide al país en cinco grandes regiones vitícolas (Atacama, Coquimbo, Aconcagua, Valle Central y Región del Sur), donde cada una de estas regiones se subdivide en diversas subregiones que se explican en los diferentes puntos a continuación:

### 4.4.1 Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se encuentra el valle Rapel a unos 100 kilómetros de Santiago, en esta zona se encuentran dos de los valles vitícolas más prestigiosos y reconocidos a nivel internacional, se trata del Valle Cachapoal y el Valle Colchagua, como se puede ver en la Figura 4.9.

El Valle Cachapoal con su río del mismo nombre, ubicado al sur de Rancagua ha sido conocido por sus variedades tintas (Carmenere, Cabernet Sauvignon y Merlot), las cuales figuran con un 80% del total de la región. El valle posee el típico clima mediterráneo del valle central chileno (veranos calurosos e inviernos templados).

El Valle Colchagua es irrigado por el río Tinguiririca, ubicado al sur del Valle de Rapel. Posee el mismo clima que el Valle Cachapoal.

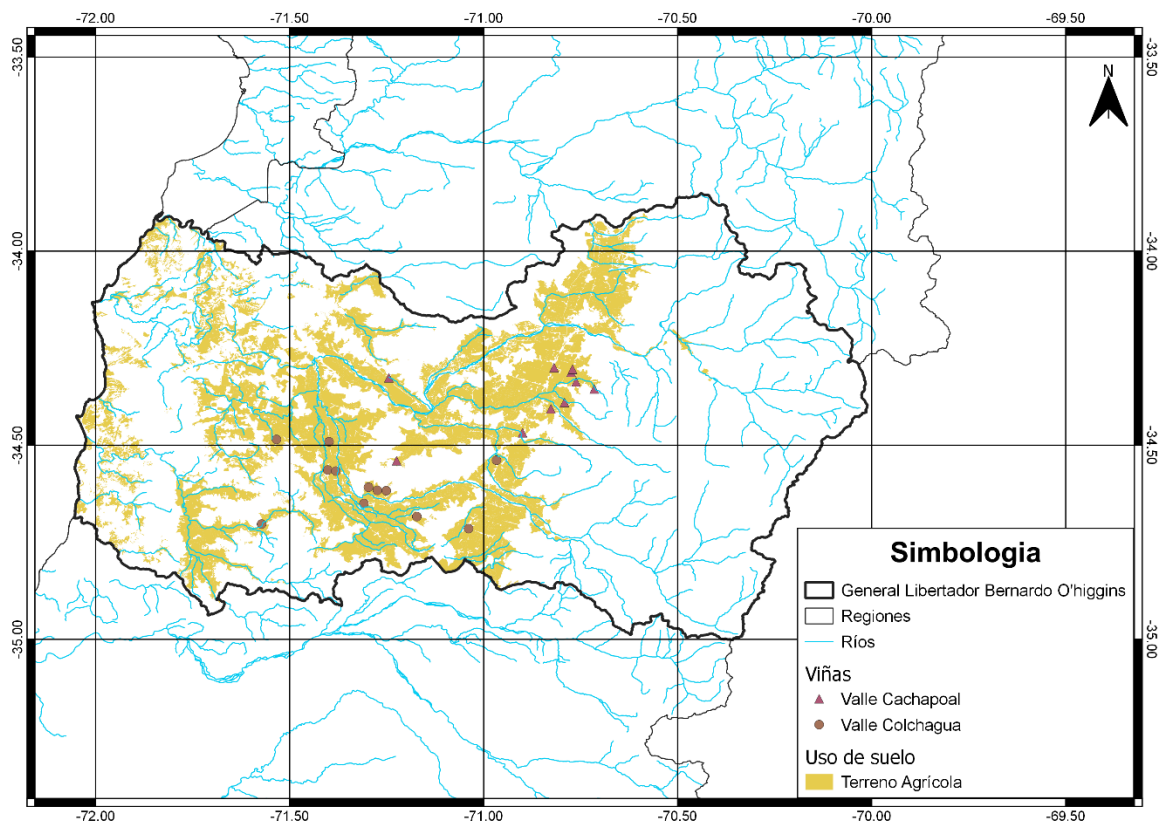


Figura 4.9 - Ubicación de viñas dentro del terreno de uso agrícola zona 1: Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

#### 4.4.2 Región del Maule

En la Región del Maule se encuentran el Valle de Curicó y el Valle del Maule, como se puede ver en la Figura 4.10.

El Valle de Curicó se encuentra a unos 220 kilómetros al sur de Santiago. El clima es mediterráneo moderado (días calurosos en el verano y las noches frías y húmedas). En esta zona se encuentra la mayor superficie de cultivo de cepas de vino blanco del país. El valle de Curicó tiene en la actualidad aproximadamente 18.000 hectáreas de viñedos (Cabernet Sauvignon, Sauvignon Blanc, Merlot y Chardonnay).

El valle del Maule se encuentra a unos 260 kilómetros de Santiago. La región vitícola más grande de Chile, donde abarca al este Los Andes, las planicies soleadas a lo largo del corredor central y al oeste las onduladas colinas costeras, lo que hace posible que las diferentes variedades de cepas (tintas y blancas) puedan prosperar. Este valle no tiene influencia marítima, pero mantiene un diferencial de temperatura favorable, lo cual hace que cepas como el Cabernet Sauvignon y Merlot prosperen de buena manera.

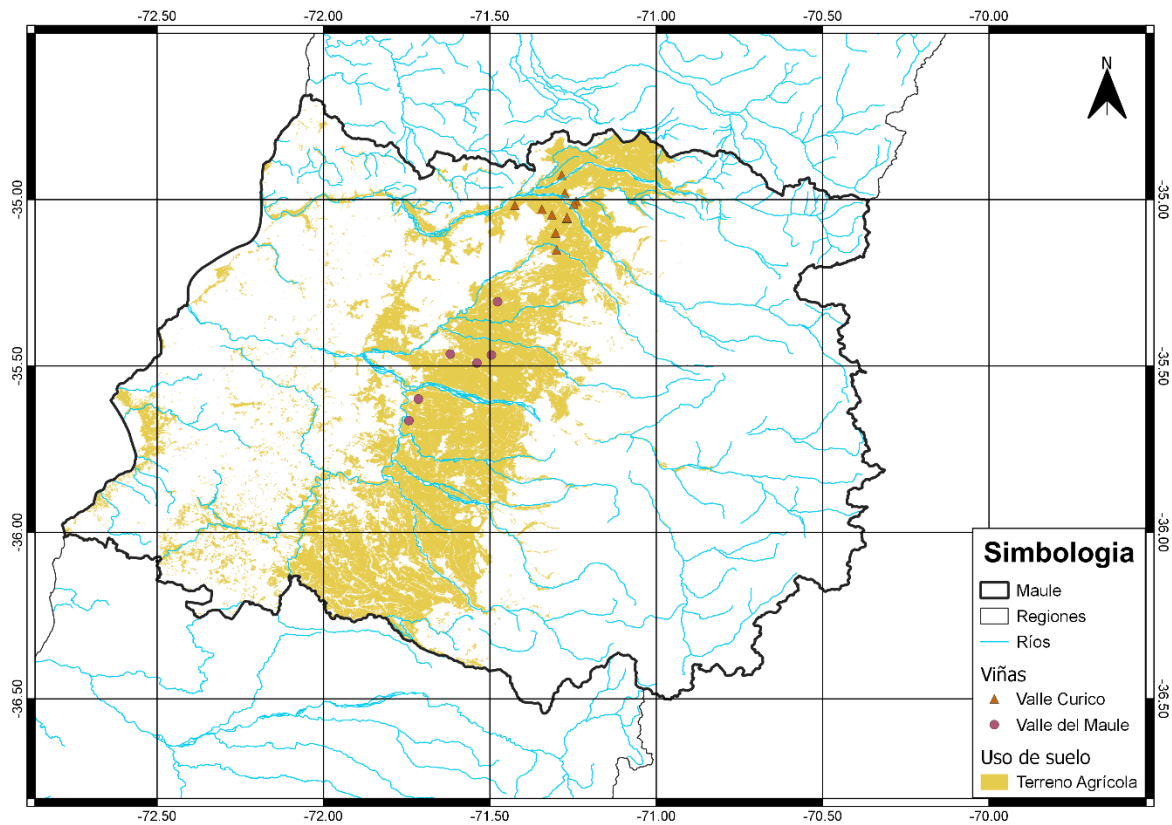


Figura 4.10 - Ubicación de viñas dentro del terreno de uso agrícola zona 2: Región del Maule.

### 4.4.3 Región de Ñuble

En la Región de Ñuble se encuentra el Valle de Itata, como se puede ver en la Figura 4.11, ubicado a 400 kilómetros de Santiago y 50 kilómetros al este de Concepción, una de las zonas vinícolas tradicionales del país donde se producían vinos de mesa, pero en los últimos años se ha comenzado a producir vinos de alta calidad. La superficie cultivada corresponde a 10.000 hectáreas destinadas a cepas rústicas del país y moscatel. En los últimos cinco años se agregaron 1.000 hectáreas de Chardonnay y Cabernet Sauvignon.

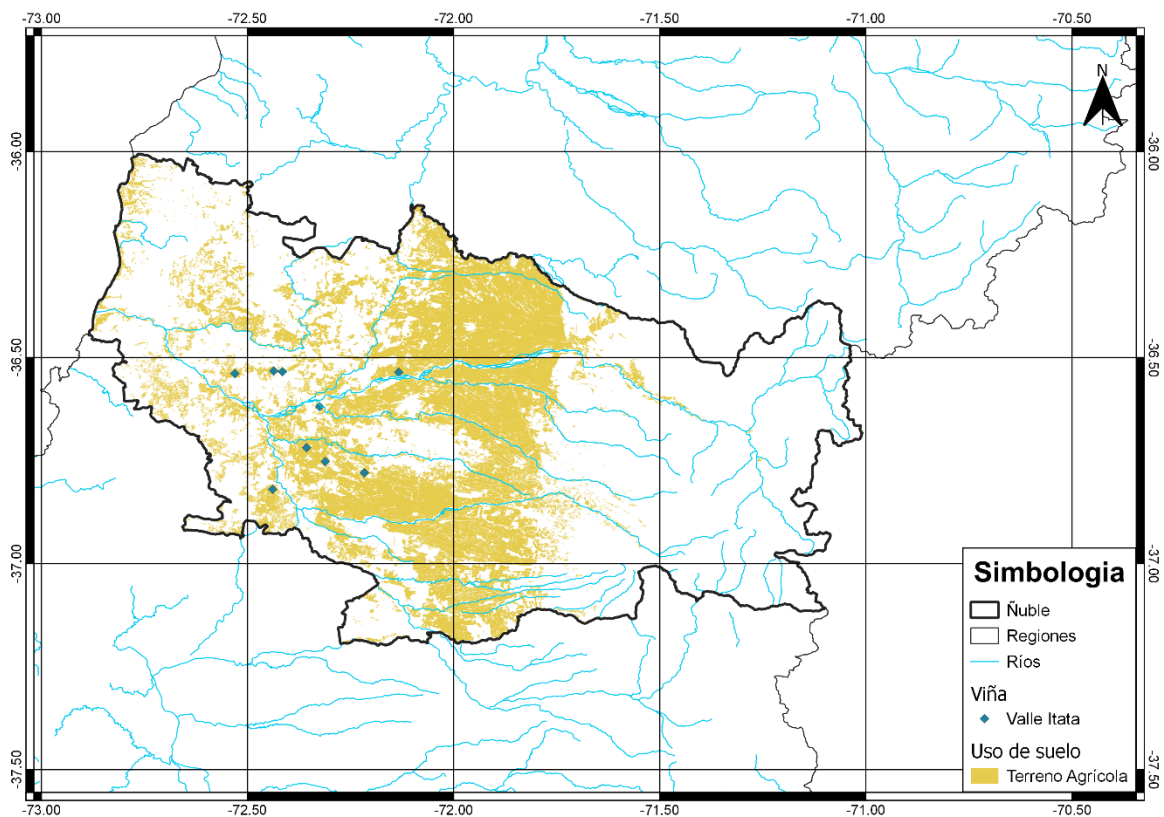


Figura 4.11 - Ubicación de viñas dentro del terreno de uso agrícola zona 3: Región de Ñuble.

#### 4.4.4 Región del Biobío

En la Región del Biobío se encuentra el Valle del Biobío, como se puede ver en la Figura 4.12, ubicado a 500 kilómetros de Santiago a lo largo del río Biobío, es la región vinícola más austral de Chile. Se cultivaban cepas rústicas, pero debido a la variada maduración tardía que tenían en condiciones frías y húmedas, han sido reemplazadas por plantaciones de Pinot Noir.

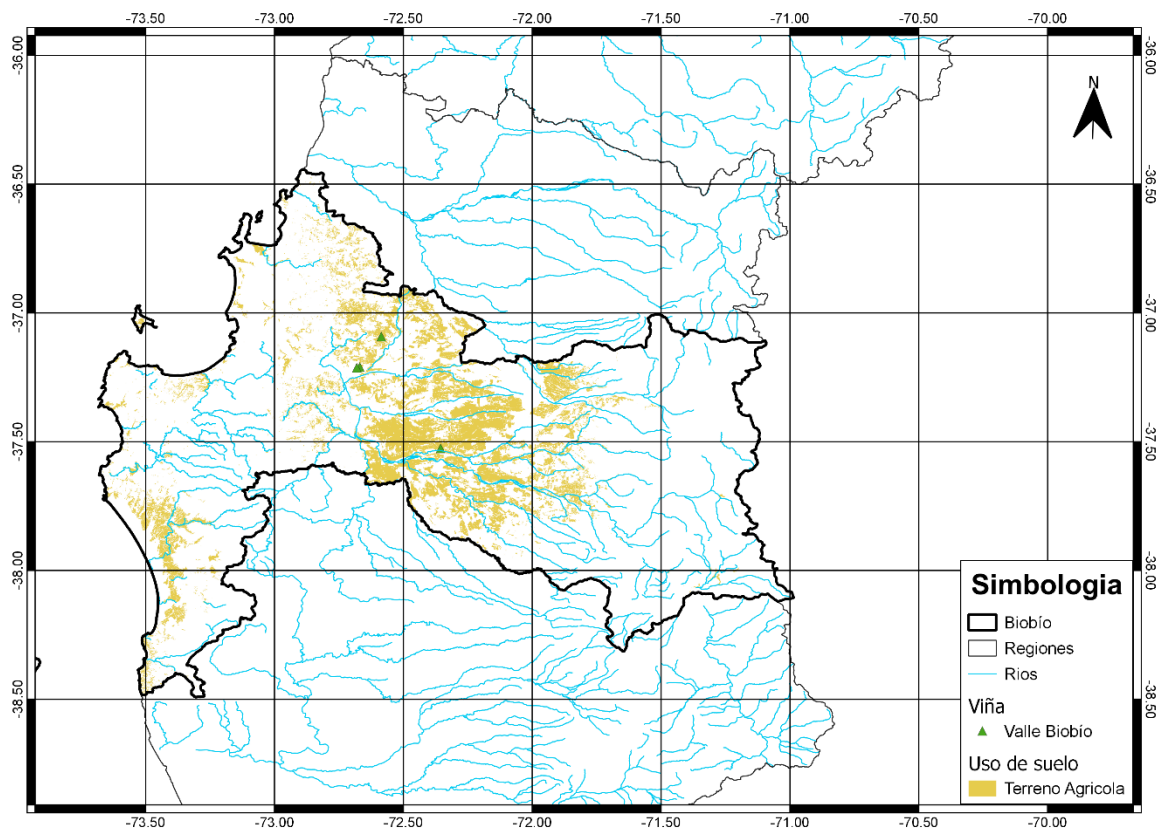


Figura 4.12 - Ubicación de viñas dentro del terreno de uso agrícola zona 4: Región del Biobío.

#### 4.5 Estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas son equipos destinados para medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas como la precipitación, temperatura, velocidad del viento, etc. En Chile existen varias de estas estaciones, donde la información se puede obtener a través de la DGA<sup>7</sup>, AGROMET<sup>8</sup> u otra entidad de información meteorológica.

Las estaciones tienen diversos instrumentos, siendo para la industria agrícola muy importante el evaporímetro, el cual permite registrar la cantidad de agua eliminada mediante evaporación y así poder estimar las necesidades de los cultivos con mayor precisión. Además, este instrumento se vincula con estaciones que miden precipitación, temperatura y humedad relativa.

<sup>7</sup> Dirección General de Aguas

<sup>8</sup> Red Agroclimática Nacional

A continuación, se presentan las estaciones con información disponibles en la zona de estudio. Cabe destacar que, en la simbología de las estaciones meteorológicas que se presentaran, en estaciones DGA se muestran las estaciones pluviométricas y de temperatura, pero a su vez, las estaciones que se presentan como meteorológicas contienen otros instrumentos que pueden registrar evaporación, velocidad de viento, etc. En cuanto a las estaciones de AGROMET, no son exclusivamente de humedad relativa, sino que cuentan con información de temperatura, precipitaciones, velocidad del viento, etc. pero se presentan en la simbología como humedad relativa solamente, dado que esta información no se encuentra disponible en la página web de la DGA.

Es necesario tener en cuenta también, que las estaciones de AGROMET presentan información, pero son de corta data y no son comparable a la información de la DGA, ya que estas estaciones generalmente presentan un extenso registro histórico.

#### 4.5.1 Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

En la Figura 4.13 se puede apreciar la distribución y la gran densidad de estaciones AGROMET en comparación a la baja cantidad de estaciones DGA. Esta última presenta poca cantidad de puntos con instrumentos pluviométricos, evaporimétricos y casi nula donde se registre temperatura. Las características generales de las presentes estaciones están detalladas en el Anexo 1.

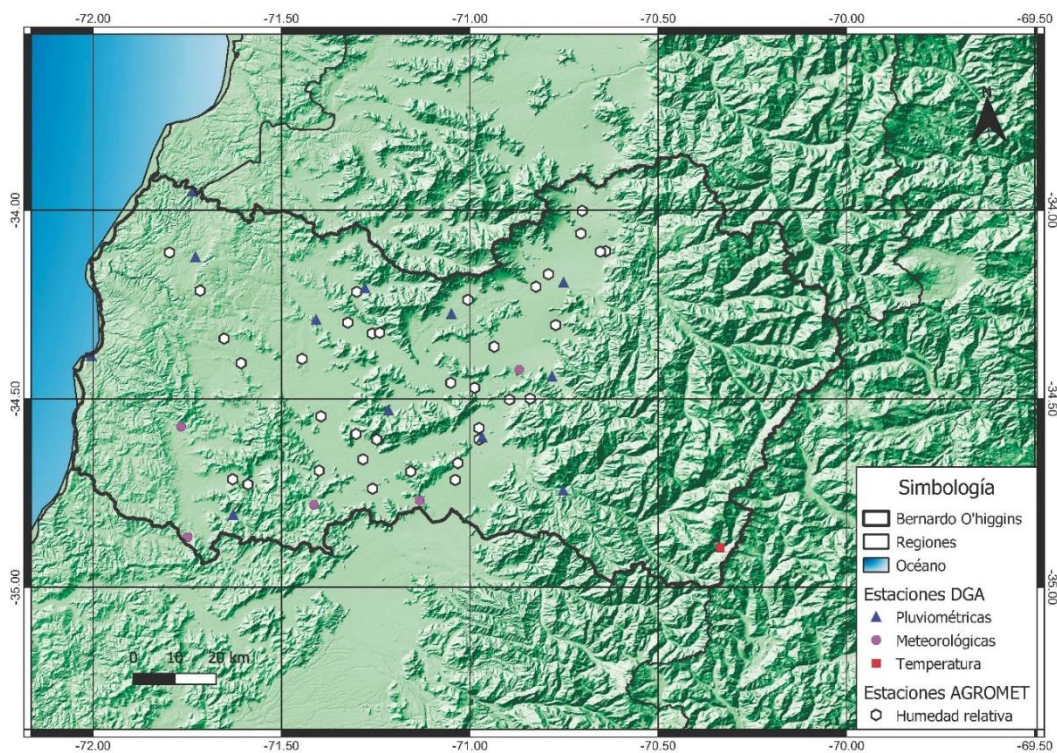


Figura 4.13 - Ubicación de estaciones meteorológicas zona 1: Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

## 4.5.2 Región del Maule

En la Figura 4.14 se puede observar la distribución de las estaciones meteorológicas presentes, donde es posible apreciar una mayor equidad entre estaciones AGROMET y DGA. En el caso de la DGA existe una mayor densidad de puntos con registros pluviométricos en comparación a la región anterior. Las características generales de las presentes estaciones están detalladas en el Anexo 1.

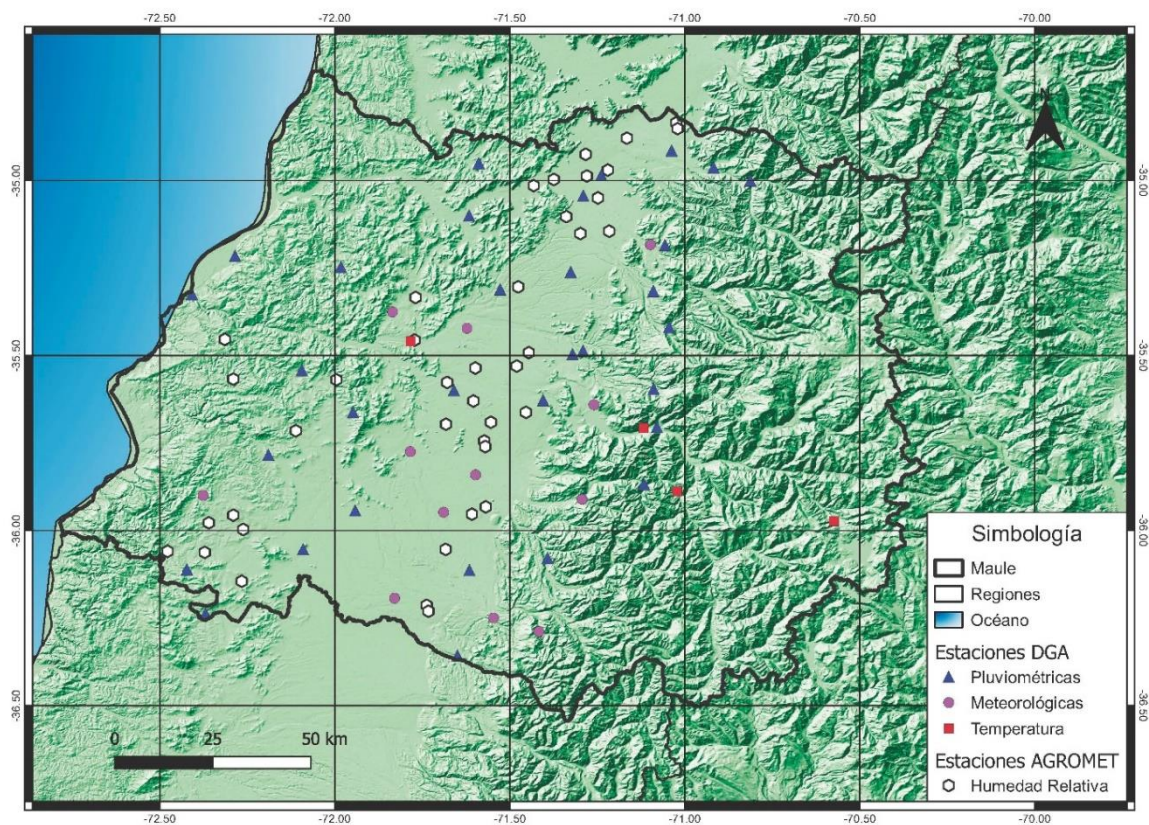


Figura 4.14 - Ubicación de estaciones meteorológicas zona 2: Región del Maule.

### 4.5.3 Región de Ñuble

En la Figura 4.15 es posible apreciar la distribución de las estaciones meteorológicas AGROMET y DGA, donde a medida que se avanza más al sur, la cantidad de estaciones disminuye considerablemente en la zona de estudio, afectando principalmente registros de precipitación y humedad relativa. Las características generales de las estaciones presentes en la región están detalladas en el Anexo 1.

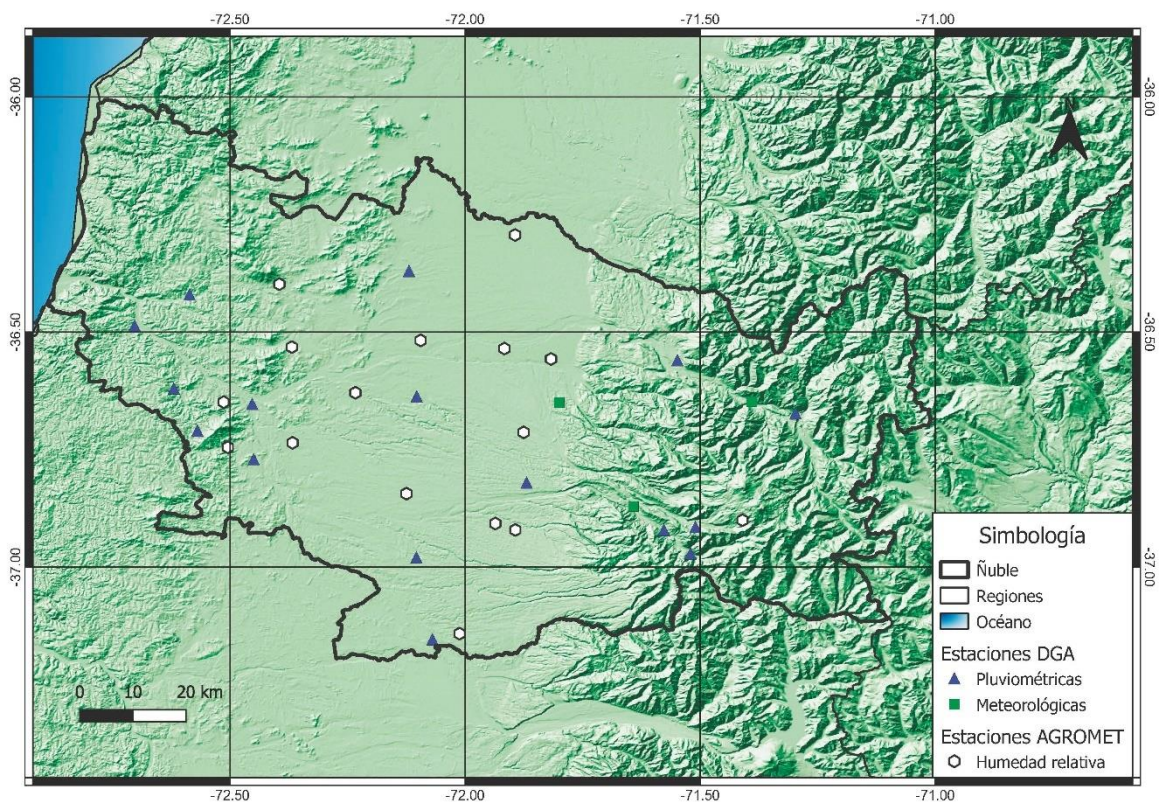


Figura 4.15 - Ubicación de estaciones meteorológicas zona 3: Región de Ñuble.

#### 4.5.4 Región del Biobío

En la Figura 4.16 es posible apreciar que, en comparación a la región anterior, se presenta una mayor cantidad de estaciones DGA que AGROMET, pero de igual manera esta zona cuenta con una baja cantidad de estaciones meteorológicas. Las características generales de las estaciones meteorológicas de la región están detalladas en el Anexo 1.

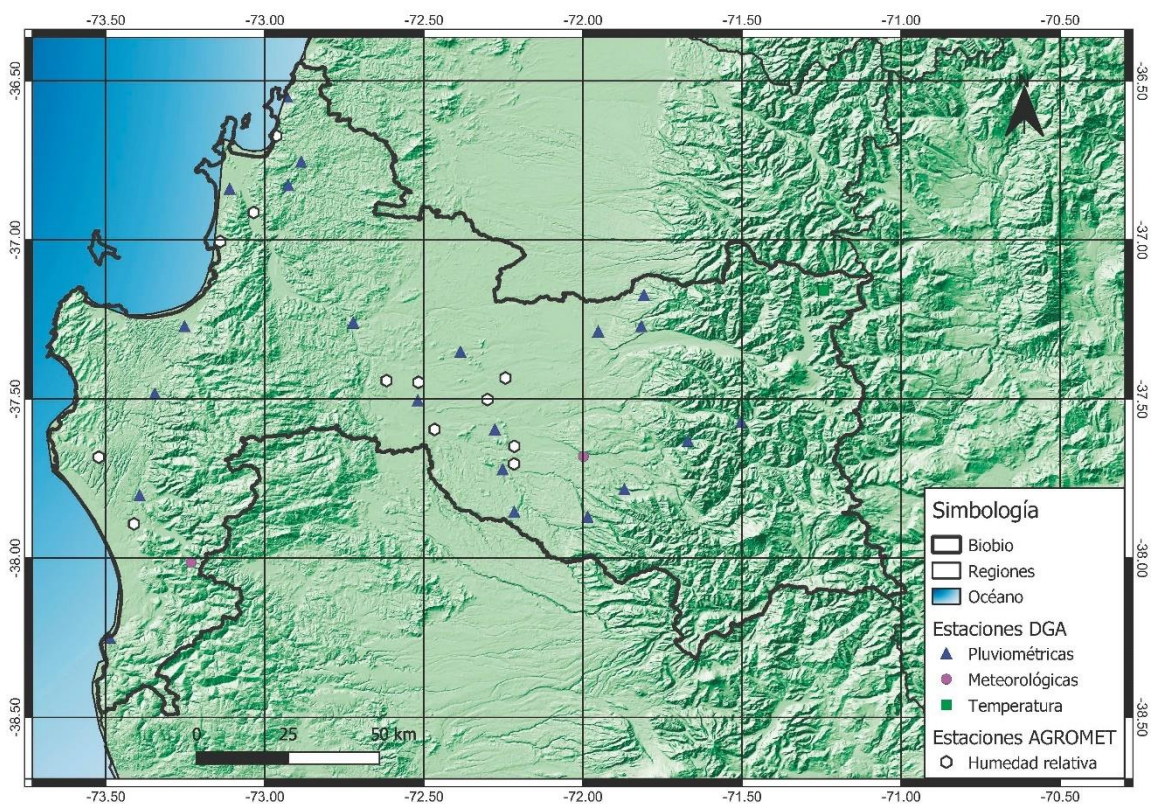


Figura 4.16 - Ubicación de estaciones meteorológicas zona 4: Región del Biobío.

# Capítulo 5: Manejo de información disponible y sectorización de área de estudio

## 5.1 Estaciones meteorológicas en zona vitícola

La información que se obtiene de las estaciones meteorológicas (precipitación, temperatura, evapotranspiración y humedad relativa) son relevantes para el análisis que se presentará en el presente trabajo, pero solamente se manejan las estaciones que se encuentran en la zona de las viñas (véase Tabla 5.1, Tabla 5.2 y Tabla 5.3).

Dentro del estudio no se considera específicamente la obtención de la evapotranspiración, pero es una información necesaria para el análisis de demanda de agua y disponibilidad para los terrenos agrícolas. Existen varias dificultades en el momento de la obtención de esta información en la zona de las viñas a través de diferentes entidades meteorológicas:

- Mediante la DGA es posible obtener los datos a través de la ley de transparencia, pero en la región se presenta una baja densidad de estaciones, donde están a una separación muy amplia y en la mayoría de los casos no se encuentran presentes en la zona las viñas.
- Es posible adquirir información a través de la red AGROCLIMA, pero solamente se pueden visualizar ventanas de 30 días.
- METEOVID es una red de estaciones meteorológicas del sector vitivinícola, presentes de los valles de Valparaíso hasta Biobío, donde su objetivo es poner a disposición del sector agrícola información climática. Tiene información pública, pero no cuenta con un gran registro histórico en línea gratuito, solo es posible obtener de 7 días a 1 mes lo cual no es adecuado para un estudio, sin embargo, es posible obtener información a través de la red privada (pagada), donde los usuarios tienen acceso al software de información (Adcon), permitiendo obtener información estadística de las diferentes variables climáticas.

Para este trabajo se utilizó información de evapotranspiración obtenida a partir de estudios previos hechos específicamente en viñas [46], [52], ya que las viñas de mayor envergadura tienen sus propias estaciones meteorológicas, las cuales no siempre están disponibles para entregar datos en forma pública.

Tabla 5.1 - Estaciones pluviométricas disponibles.

| Región             | Código     | Nombre        | Periodo de Instal. | Registro Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|--------------------|------------|---------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|---------|
|                    |            |               |                    |                  |               | Lat. S      | Long. W |
| Bernardo O'Higgins | 06012003-K | COLTAUCO      | 1978               | /                | 280           | 34°16'      | 71°02'  |
|                    | 06015003-6 | RENGO         | 1971               | /                | 310           | 34°25'      | 70°52'  |
|                    | 06036001-4 | LA CANDELARIA | 1974               | /                | 320           | 34°46'      | 71°24'  |
| Maule              | 07118003-4 | CURICO        | 1971               | /                | 215           | 34°59'      | 71°14'  |
|                    | 07119007-2 | LONTUE        | 1969               | /                | 215           | 35°02'      | 71°17'  |
|                    | 07359005-1 | SAN JAVIER    | 1970               | /                | 135           | 35°35'      | 71°39'  |
| Ñuble              | 08117002-9 | CHILLAN VIEJO | 1977               | /                | 125           | 36°38'      | 72°06'  |
|                    | 08118003-2 | MILLAUQUEN    | 1992               | /                | 130           | 36°22'      | 72°07'  |
|                    | 08135003-5 | NUEVA ALDEA   | 1956               | /                | 25            | 36°39'      | 71°27'  |

Tabla 5.2 - Estaciones de temperatura disponibles.

| Región                    | Código     | Nombre         | Periodo de Instal. | Registro Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|---------------------------|------------|----------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|---------|
|                           |            |                |                    |                  |               | Lat. S      | Long. W |
| <b>Bernardo O'Higgins</b> | 06034003-K | CONVENTO VIEJO | 1971               | /                | 250           | 34°46'      | 71°07'  |
| <b>Maule</b>              | 07116005-K | POTRERO GRANDE | 1971               | /                | 460           | 35°11'      | 71°05'  |
| <b>Ñuble</b>              | 08113001-9 | COIHUECO EMB   | 1971               | /                | 300           | 36°39'      | 71°48'  |

Tabla 5.3 - Estaciones de humedad relativa disponibles.

| Región                    | Nombre             | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|---------------------------|--------------------|---------------|-------------|---------|
|                           |                    |               | Lat. S      | Long. W |
| <b>Bernardo O'Higgins</b> | Ventisquero-Apalta | 245           | 34°61'      | 71°25'  |
|                           | La Rosa Oeste      | 147           | 34°33'      | 71°24'  |
|                           | Anakena            | 389           | 34°3'       | 70°77'  |
| <b>Maule</b>              | Lontué             | 229           | 35°05'      | 71°25'  |
|                           | San Javier         | 149           | 35°63'      | 71°6'   |
|                           | Rauco              | 204           | 34°93'      | 71°28'  |
| <b>Ñuble</b>              | Portezuelo         | 106           | 36°53'      | 72°37'  |
|                           | San Nicolás        | 112           | 36°52'      | 72°09'  |
|                           | Bulnes             | 56            | 36°74'      | 72°37'  |

## 5.2 Imágenes de estudio por región

La ventaja de utilizar imágenes satelitales es la gran capacidad de observación global de territorio en el área agrícola, pero igualmente esta tecnología presenta algunos inconvenientes. En el caso de los satélites Landsat, poseen una resolución temporal limitada de aproximadamente 16 días, esta baja frecuencia y la probabilidad de nubosidad que obstaculiza la visión en la fecha que se obtiene la imagen, presenta una desventaja importante en la recopilación de información, debido a que no sería posible obtener el NDVI en los cultivos a analizar.

Según la metodología se definió un criterio de descarga de imágenes con un máximo de 20% de nubosidad, pero al aplicar este criterio se perdió una gran cantidad de información debido a que existen una gran cantidad de imágenes que superan este nivel de nubosidad, y no es posible utilizarlas debido a que existe un gran nivel de incertidumbre asociado a que la nube no permite medir directamente el NDVI. En la Tabla 5.4 se puede apreciar la cantidad de imágenes disponible para los periodos de análisis.

Además de la limitada disponibilidad de imágenes con baja nubosidad, uno de los satélites empleado (Landsat 7) presenta un problema a partir del 2003, puesto que sufre un fallo en el sistema SLC, el cual es una parte del sensor ETM+ que iguala el movimiento hacia adelante del satélite durante la obtención de imágenes. Sin el SLC, el área escaneada por el sensor delinea un patrón de zigzag provocando un bandeo (mala calibración de los detectores presentes en los sensores, resultando una pérdida de algunos píxeles e incluso líneas enteras) de la imagen. Debido a este problema hubo que realizar un tratamiento a las bandas a utilizar para la obtención del NDVI como se ha realizado en diferentes estudios [53], [54], lo cual podría generar cierto nivel de incertidumbre en los resultados obtenidos.

Tabla 5.4 - Periodo de análisis disponible.

| <b>Periodo</b>   | <b>Lib Bdo<br/>O'Higgins</b> | <b>Maule</b> | <b>Nuble<br/>Biobío</b> |
|------------------|------------------------------|--------------|-------------------------|
| <b>2000-2001</b> | ✓                            |              |                         |
| <b>2001-2002</b> |                              |              |                         |
| <b>2002-2003</b> |                              |              |                         |
| <b>2003-2004</b> |                              | ✓            |                         |
| <b>2004-2005</b> |                              | ✓            | ✓                       |
| <b>2005-2006</b> |                              |              |                         |
| <b>2006-2007</b> | ✓                            |              |                         |
| <b>2007-2008</b> |                              | ✓            | ✓                       |
| <b>2008-2009</b> | ✓                            | ✓            | ✓                       |
| <b>2009-2010</b> |                              |              |                         |
| <b>2010-2011</b> | ✓                            | ✓            | ✓                       |
| <b>2011-2012</b> |                              |              |                         |
| <b>2012-2013</b> | ✓                            | ✓            | ✓                       |
| <b>2013-2014</b> |                              | ✓            | ✓                       |
| <b>2014-2015</b> | ✓                            |              | ✓                       |
| <b>2015-2016</b> |                              | ✓            | ✓                       |
| <b>2016-2017</b> | ✓                            | ✓            |                         |
| <b>2017-2018</b> |                              | ✓            | ✓                       |
| <b>2018-2019</b> | ✓                            | ✓            | ✓                       |

### 5.3 Catastro vitícola nacional

El Catastro Vitícola Nacional, según la Ley N°18.445 encarga al SAG de mantener la información actualizada anual de todos los propietarios de viñas y parronales, de vides de vinificación, de vides de consumo fresco y de vides para la elaboración de pisco.

Se realiza un levantamiento de información mediante cartografía de terrenos, definiendo como plantación comercial a la superficie ocupada por viñas o parronales de tamaño igual o superior a 0,5 hectáreas. En la Tabla 5.5, Tabla 5.6 y Tabla 5.7 solamente se presentan vides de vinificación debido a que es el foco del presente estudio.

Tabla 5.5 - Catastro de vides de vinificación anual zona 1: Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

| <b>Años</b> | <b>Vides de Vinificación</b> |                    | <b>Total [há]</b> |
|-------------|------------------------------|--------------------|-------------------|
|             | <b>Blancas [há]</b>          | <b>Tintas [há]</b> |                   |
| <b>2017</b> | 6659,94                      | 38985,69           | 45645,63          |
| <b>2016</b> | 6785,97                      | 39551,28           | 46337,25          |
| <b>2015</b> | 6751,63                      | 39662,56           | 46414,18          |
| <b>2014</b> | 6915,65                      | 40466,42           | 47382,07          |
| <b>2013</b> | 6112,12                      | 37267,90           | 43380,02          |
| <b>2012</b> | 5941,76                      | 36250,95           | 42192,71          |
| <b>2011</b> | 5772,71                      | 35449,98           | 41222,69          |
| <b>2010</b> | 5593,08                      | 32924,22           | 38517,30          |
| <b>2009</b> | 5455,98                      | 30714,05           | 36170,03          |
| <b>2007</b> | 4297,80                      | 29959,40           | 34257,20          |
| <b>2006</b> | 4145,50                      | 29710,20           | 33855,70          |
| <b>2005</b> | 3730,40                      | 28823,30           | 32553,70          |
| <b>2004</b> | 3519,00                      | 28297,00           | 31816,00          |
| <b>2003</b> | 3423,00                      | 27630,00           | 31053,00          |
| <b>2002</b> | 3299,00                      | 27161,00           | 30460,00          |
| <b>2001</b> | 3323,00                      | 26486,00           | 29809,00          |

Tabla 5.6 - Catastro de vides de vinificación anual zona 2: Región del Maule.

| Años | Vides de Vinificación |             | Total [há] |
|------|-----------------------|-------------|------------|
|      | Blancas [há]          | Tintas [há] |            |
| 2017 | 14.514,67             | 38.102,43   | 52.617,10  |
| 2016 | 14.444,18             | 38.519,02   | 52.963,20  |
| 2015 | 14.775,12             | 39.063,42   | 53.838,54  |
| 2014 | 14.633,65             | 38.862,86   | 53.496,51  |
| 2013 | 14.023,17             | 37.946,23   | 51.969,40  |
| 2012 | 13.868,34             | 37.744,93   | 51.613,27  |
| 2011 | 13.799,57             | 36.540,74   | 50.340,31  |
| 2010 | 13.086,73             | 32.763,82   | 45.850,55  |
| 2009 | 14.404,83             | 34.609,34   | 49.014,17  |
| 2007 | 12.076,00             | 38.498,10   | 50.574,10  |
| 2006 | 11.972,10             | 38.342,40   | 50.314,50  |
| 2005 | 11.640,30             | 37.755,50   | 49.395,80  |
| 2004 | 11.209,00             | 37.064,00   | 48.273,00  |
| 2003 | 10.840,00             | 36.500,00   | 47.340,00  |
| 2002 | 10.727,00             | 36.150,00   | 46.877,00  |
| 2001 | 10.573,00             | 35.826,00   | 46.399,00  |

Tabla 5.7 - Catastro de vides de vinificación anual zona 3 y 4: Región de Ñuble y Región del Biobío.

| Años | Vides de Vinificación |             | Total [há] |
|------|-----------------------|-------------|------------|
|      | Blancas [há]          | Tintas [há] |            |
| 2017 | 5.410,05              | 6.867,63    | 12.277,68  |
| 2016 | 5.335,11              | 6.757,76    | 12.092,87  |
| 2015 | 5.009,32              | 10.098,01   | 15.107,33  |
| 2014 | 4.413,13              | 5.154,92    | 9.568,05   |
| 2013 | 4.143,57              | 4.854,95    | 8.998,52   |
| 2012 | 4.096,33              | 4.657,54    | 8.753,87   |
| 2011 | 4.046,29              | 4.461,26    | 8.507,55   |
| 2010 | 3.918,93              | 4.166,61    | 8.085,54   |
| 2009 | 1.827,52              | 1.592,48    | 3.420,00   |
| 2007 | 6.977,70              | 7.050,60    | 14.028,30  |
| 2006 | 6.967,60              | 7.032,00    | 13.999,60  |
| 2005 | 6.961,60              | 7.009,20    | 13.970,80  |
| 2004 | 6.938,00              | 6.970,00    | 13.908,00  |
| 2003 | 6.935,00              | 6.864,00    | 13.799,00  |
| 2002 | 6.869,00              | 6.763,00    | 13.632,00  |
| 2001 | 6.868,00              | 6.794,00    | 13.662,00  |

## 5.4 Sectorización de área de cultivo por región

Como se ha mencionado anteriormente el NDVI mide el verdor de la vegetación en sí, por lo tanto, es complejo poder afirmar si el área calculada corresponde a viñas o a otro tipo de cultivo. Debido a esto, primero fue necesario sectorizar el rango de pixeles de NDVI en función al área del catastro agrícola del uso de suelo definida para la zona [55], [56], como se puede observar en la Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3, donde se puede ver de manera más detallada en la Figura 5.4, existe presencia de cultivos a lo largo de toda la región, a excepción de la zona cordillerana. Posteriormente se identifican las coordenadas de cada una de las viñas presentes en la región, las cuales se localizan principalmente en la zona del valle (obtenida con apoyo de imágenes Google), por lo tanto, se realiza una segunda sectorización en función de la ubicación de estas.

Una vez que se lleva a cabo el cálculo del área, después de aplicar la segunda sectorización, se pudo observar que el área agrícola en comparación a la obtenida a través del catastro vitícola (ver Tabla 5.5, Tabla 5.6 y Tabla 5.7) es mayor, ya que en la zona del valle los cultivos no corresponden exclusivamente a vid, por lo cual se realizó un ajuste de área en función del rango de NDVI considerado para las viñas analizadas, de tal manera que el área obtenida a través de la información satelital sea coincidente con la información oficial obtenida del catastro vitícola para el periodo analizado. Para cada región se realizó este mismo proceso de análisis.

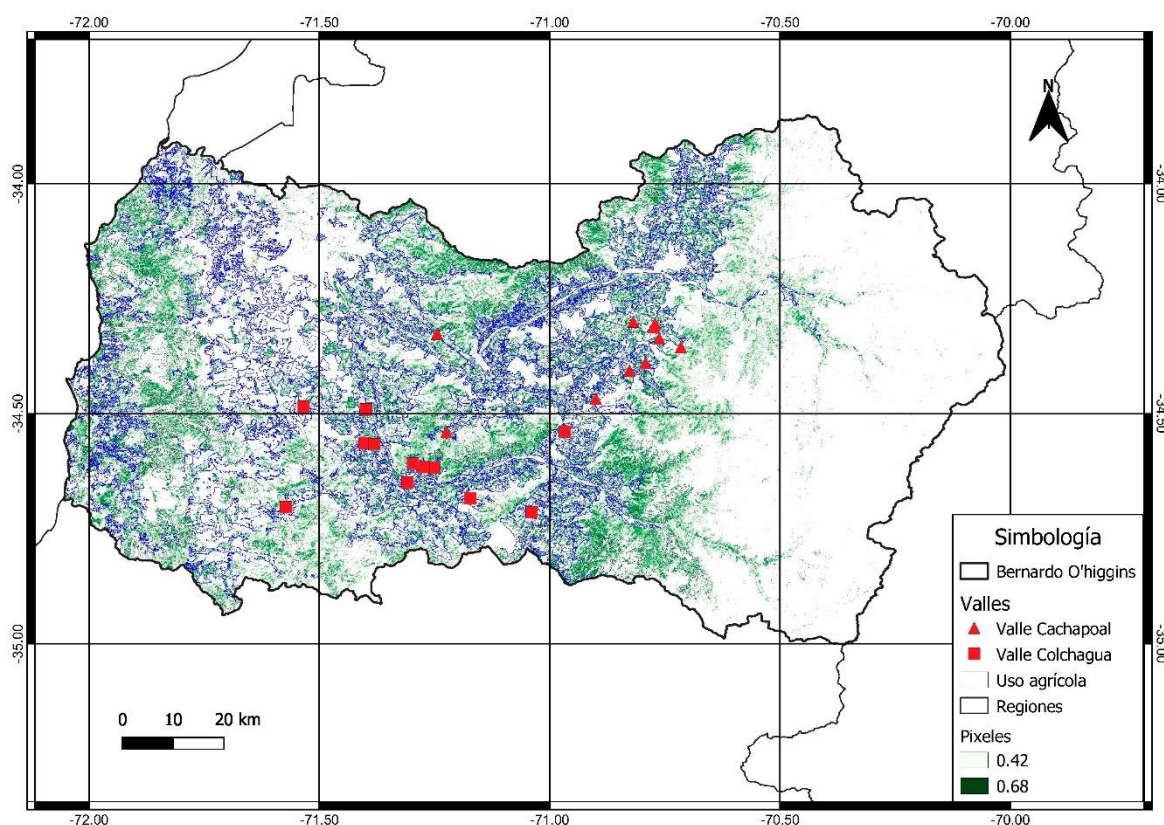


Figura 5.1 - Información zona de estudio región del Libertador General Bernardo O'Higgins: rango NDVI (verde), área agrícola de uso de suelo (azul), ubicación viñas (rojo).

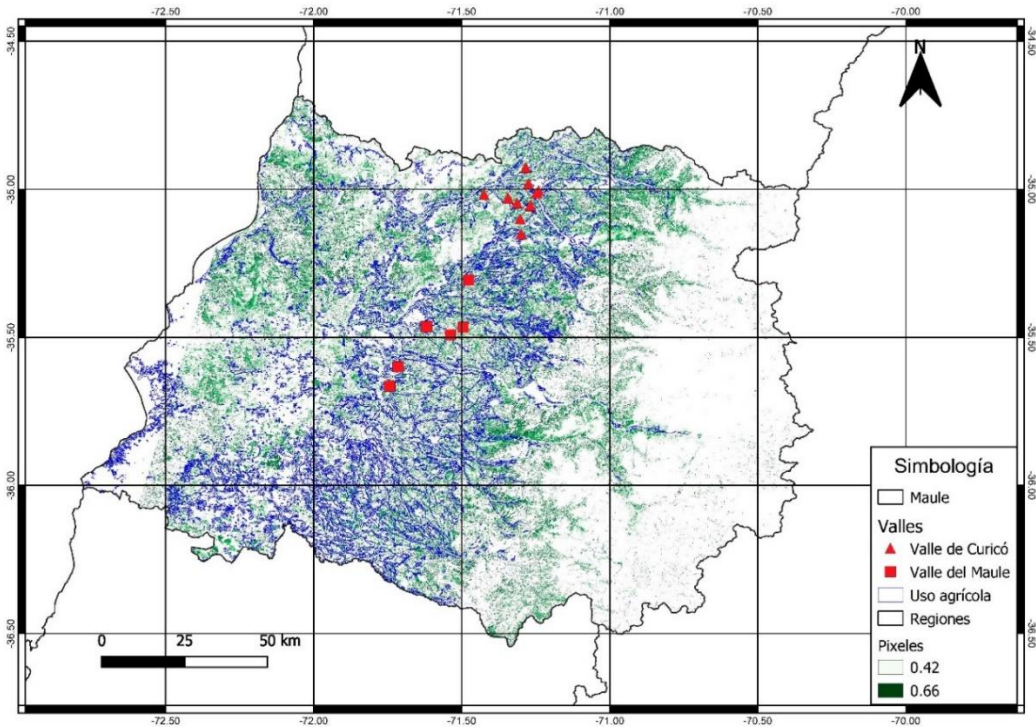


Figura 5.2 - Información zona de estudio región del Maule: rango NDVI (verde), área agrícola uso de suelo (azul), ubicación viñas (rojo).

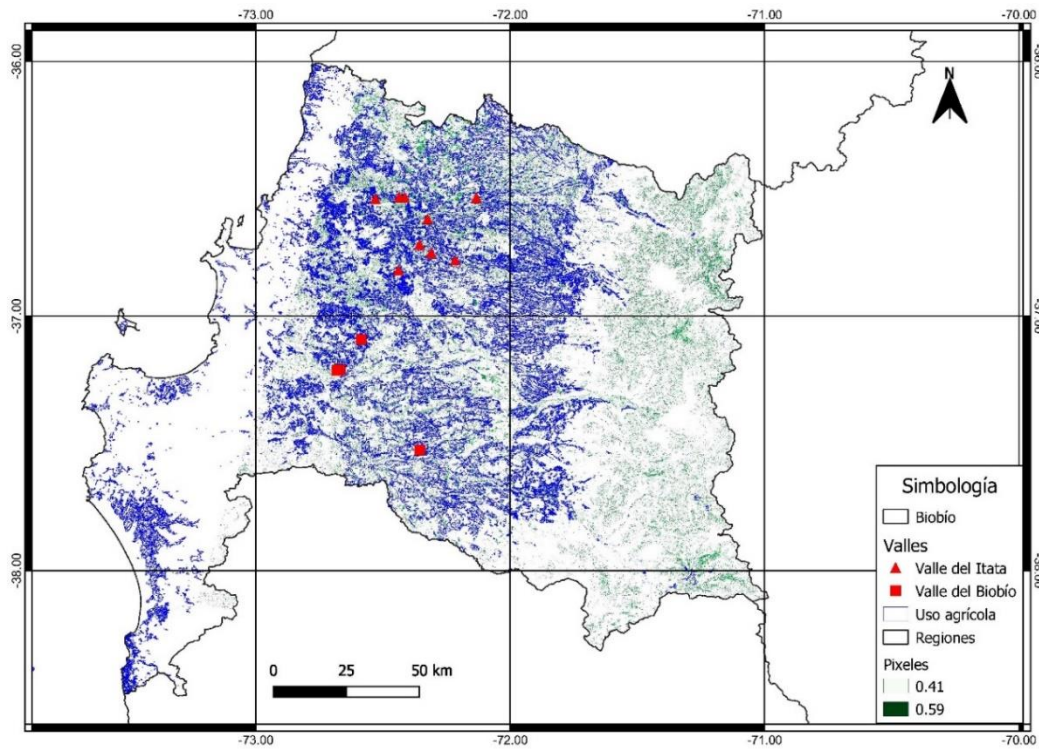


Figura 5.3 - Información zona de estudio región del Ñuble y Biobío: rango NDVI (verde), área agrícola uso de suelo (azul), ubicación viñas (rojo).

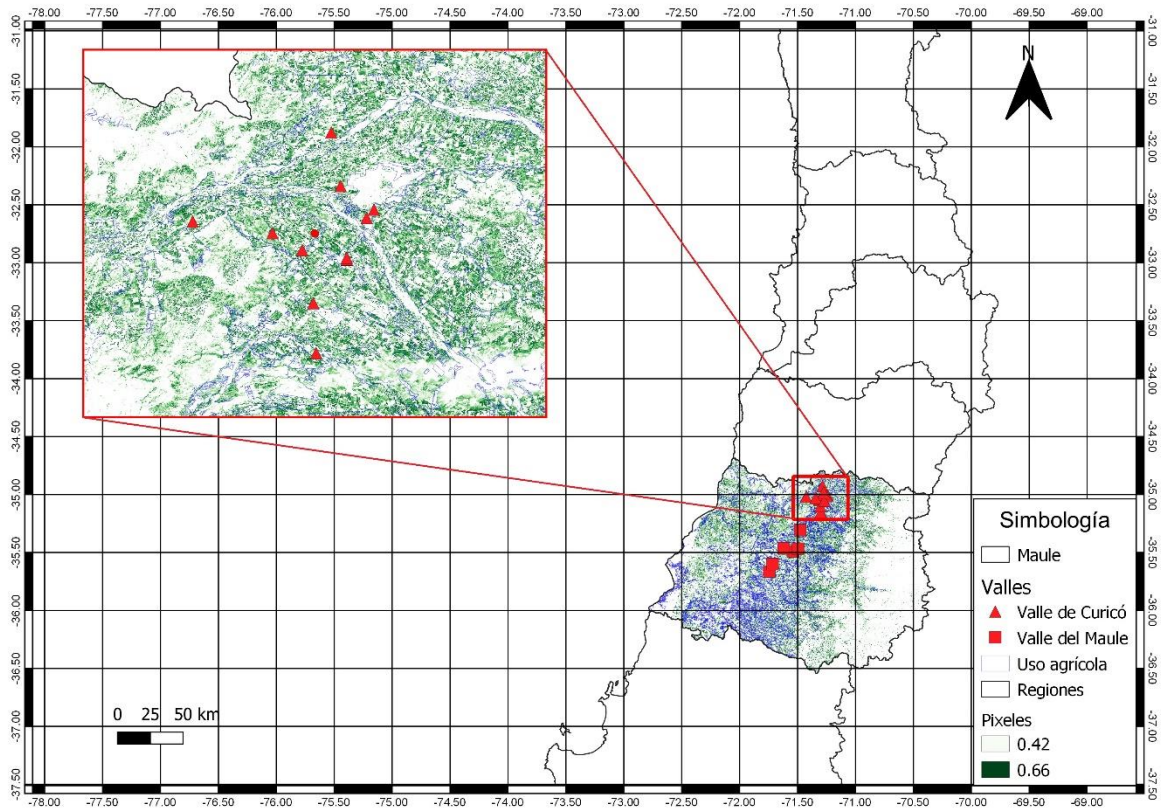


Figura 5.4 - Detalle información zona de estudio región del Maule

## Capítulo 6: Resultados

Según la metodología definida, una primera instancia corresponde a la obtención de imágenes, las cuales se clasificaron en rangos de píxeles con sus valores máximos y mínimos de NDVI. Posteriormente se realizó un análisis de la ubicación de las viñas como se mencionó en la metodología para luego reclasificar los datos ráster para poder obtener el área (Km<sup>2</sup>) y ajustarlo según la zona agrícola, donde se identificó que el área de las viñas era menor, lo cual era de esperarse. En función de lo antes mencionado, se ajustó la estimación del área solamente a la zona donde estaban las viñas, pero aún seguía siendo un área mayor a la encontrada en el catastro agrícola, por lo cual se tuvo que ajustar los rangos de NDVI en función del catastro para que sea coincidente con aquella información (ver Figura 6.1 y Tabla 6.1), este procedimiento se realizó año a año debido que el NDVI de las viñas cambia cada año. Luego se obtuvo el promedio ponderado entre el rango de NDVI definido y el área de píxeles asociado a los diferentes intervalos presentes en dicho rango (ver Tabla 6.2, Figura 6.2). Finalmente, en función del NDVI se adquirió el Kc en todas las regiones a través de la Ecuación 3.1 y Ecuación 3.2, resultados que se presentarán a continuación.

Tabla 6.1 – Clasificación de rango de píxeles de NDVI por área.

| Rango Píxeles                    | 2001          | 2007          | 2009          | 2011          | 2013          | 2015          | 2017          | 2019          |
|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0.25 - 0.30                      |               |               |               |               |               |               |               |               |
| 0.30 - 0.35                      |               |               |               |               |               |               |               |               |
| 0.35 - 0.40                      |               |               | 96.28         |               |               |               |               |               |
| 0.40 - 0.45                      |               |               | 155.42        | 170.68        |               |               |               |               |
| 0.45 - 0.50                      | 31.82         | 167.30        | 83.71         | 154.25        | 187.95        |               |               |               |
| 0.50 - 0.55                      | 178.74        | 180.24        |               | 50.83         | 199.50        | 168.47        |               |               |
| 0.55 - 0.60                      | 70.49         |               |               |               | 50.38         | 191.61        | 179.81        | 180.07        |
| 0.60 - 0.65                      |               |               |               |               |               | 80.01         | 183.83        | 182.87        |
| 0.65 - 0.70                      |               |               |               |               |               |               | 106.08        | 104.54        |
| <b>Área total Km<sup>2</sup></b> | <b>281.04</b> | <b>347.54</b> | <b>335.40</b> | <b>375.77</b> | <b>437.82</b> | <b>440.08</b> | <b>469.72</b> | <b>467.48</b> |

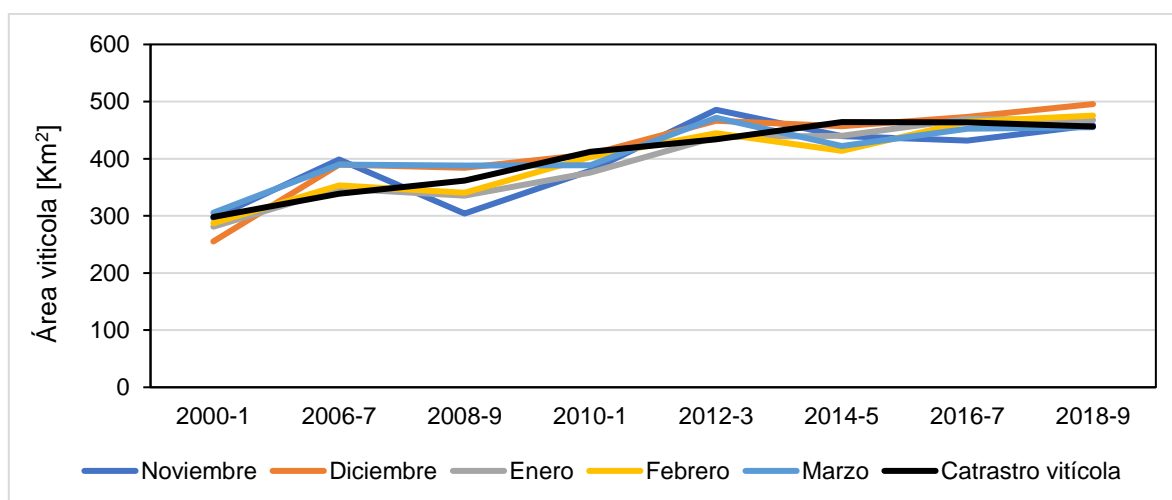


Figura 6.1 - Área vitícola.

Tabla 6.2 - NDVI ponderado.

|                  | 2000-1 | 2006-7 | 2008-9 | 2010-11 | 2012-13 | 2014-15 | 2016-17 | 2018-19 |
|------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Noviembre</b> | 0,482  | 0,465  | 0,433  | 0,420   | 0,422   | 0,513   | 0,563   | 0,563   |
| <b>Diciembre</b> | 0,510  | 0,413  | 0,413  | 0,413   | 0,466   | 0,638   | 0,484   | 0,568   |
| <b>Enero</b>     | 0,532  | 0,501  | 0,423  | 0,459   | 0,509   | 0,565   | 0,617   | 0,617   |
| <b>Febrero</b>   | 0,512  | 0,447  | 0,350  | 0,350   | 0,439   | 0,630   | 0,593   | 0,564   |
| <b>Marzo</b>     | 0,490  | 0,403  | 0,347  | 0,329   | 0,388   | 0,637   | 0,557   | 0,501   |

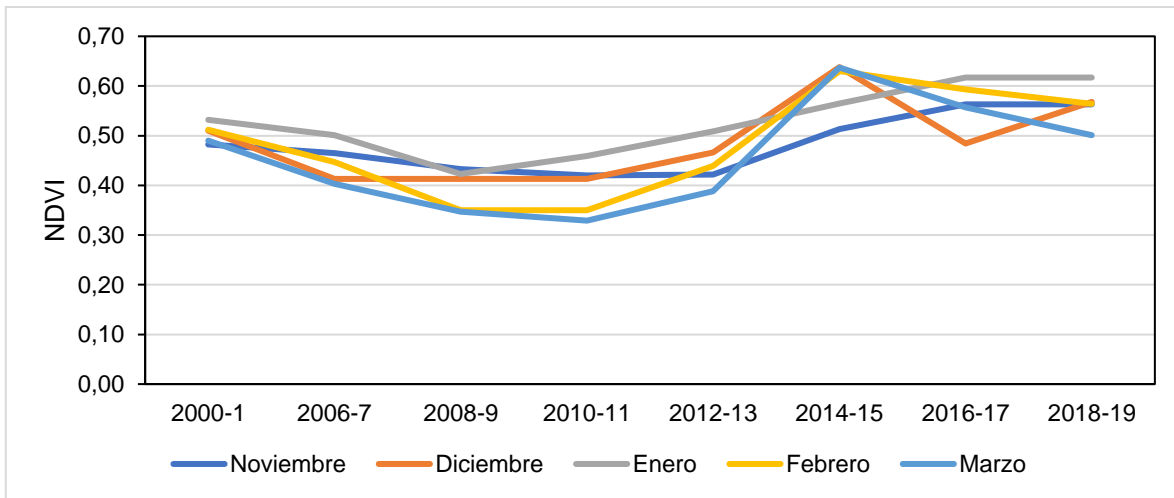


Figura 6.2 - Serie de tiempo NDVI ponderado.

A continuación, se observarán los resultados obtenidos en cada región, pero cabe destacar que se mencionara el Kc (coeficiente de cultivo) y el Kr (coeficiente de riego), donde no son lo mismo, pero están relacionados (ambos miden demanda de agua). Además, el NDVI captura el verdor de la planta o tiene una relación de lo que realmente evapotranspira la planta y se obtiene una relación con el agua que se entrega y se espera que haya una relación entre los coeficientes y NDVI.

## 6.1 Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se analizó el periodo 2000-2019, donde los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.3, Figura 6.4 y Figura 6.5. Se estimó el valor de coeficiente de cultivo mensual según la Ecuación 3.1 y Ecuación 3.2 presentadas anteriormente y se compararon con los Kc obtenidos a través de la literatura (FAO) y de manera experimental (sin estrés y con estrés) [50].

Al observar los gráficos de las figuras ya mencionadas, es posible apreciar que el Kc teórico específico de vid vinífera[45] en todos los casos analizados está por debajo del obtenido mediante las expresiones que consideran el NDVI. En cuanto al Kc obtenido de manera experimental, se puede apreciar que está por sobre los valores estimados mediante la expresión de NDVI, pero coincide con el comportamiento temporal del coeficiente de cultivo. Esta coincidencia tiende a perderse cuando se le aplica el índice de estrés hídrico, a excepción de las vides de vino blanco, donde se puede apreciar que el comportamiento temporal se mantiene y además los valores de coeficiente de cultivo son más cercanos a los obtenidos con información de NDVI.

Por otra parte, se puede observar que existen diferencias entre las expresiones utilizadas para la estimación del Kc, ya que, en el caso de Campoy, este considera la transpiración igual a cero en los suelos sin vegetación, mientras que en el caso de Campos considera la transpiración mayor a cero, ocasionando que los Kc obtenidos por Campos sean mayores a los de Campoy. En los casos analizados es posible apreciar que los valores de Kc estimados mediante la expresión de Campoy son más similares a los comparados con los Kc obtenidos de manera experimental.

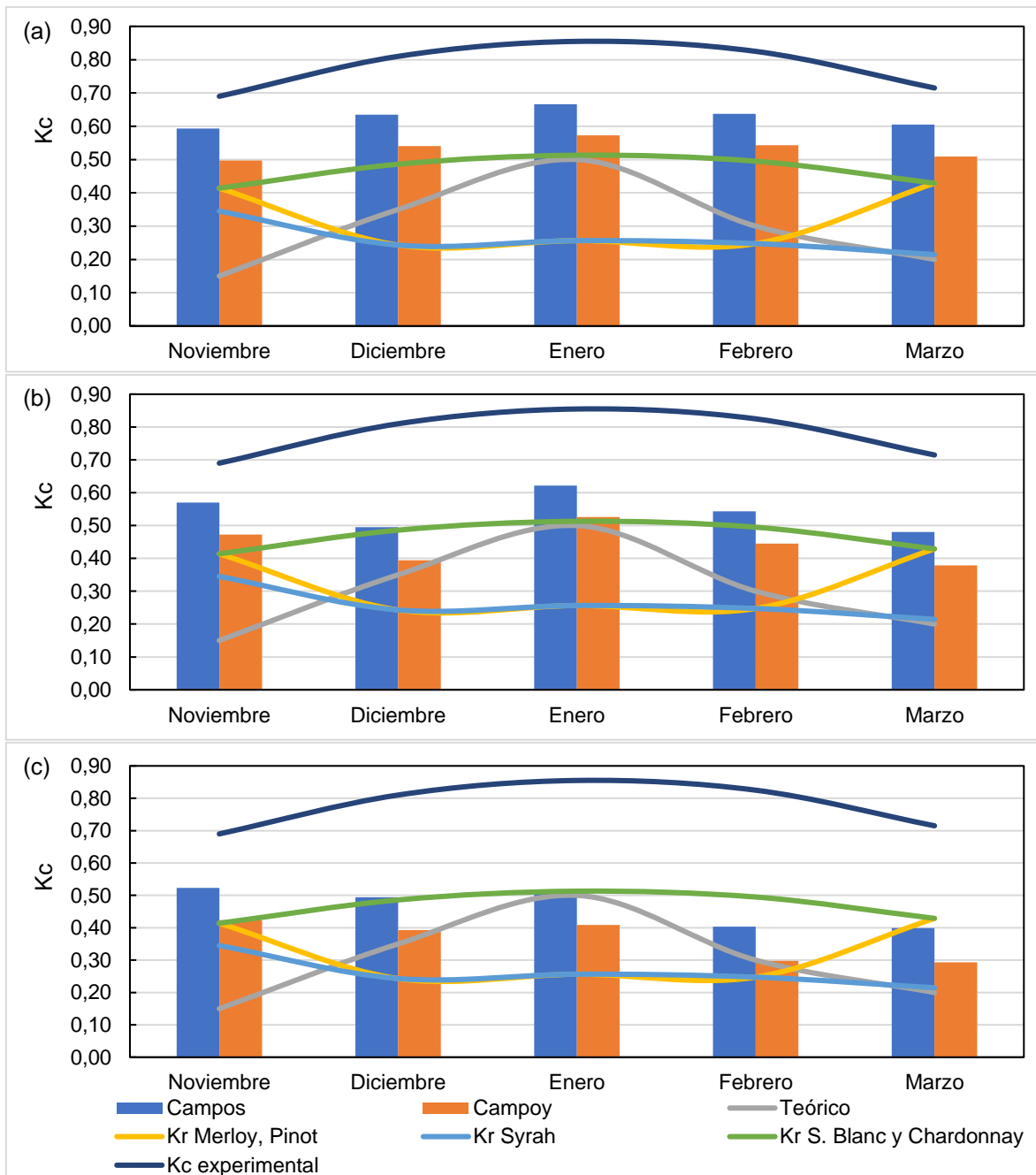


Figura 6.3 - Análisis de Kc. (a) 2000-1 (b) 2006-7 (c) 2008-9.

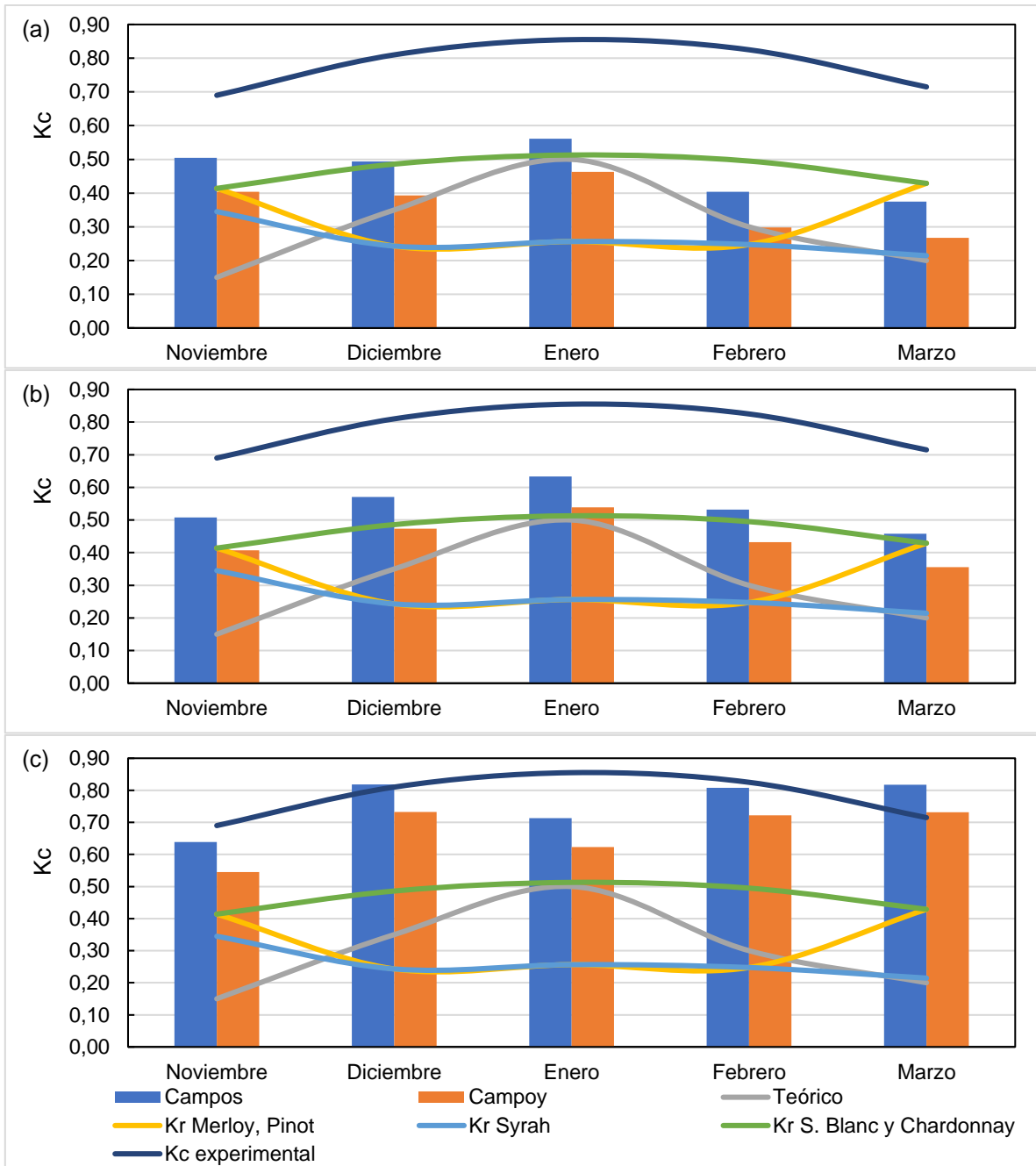


Figura 6.4 - Análisis de Kc. (a) 2010-11 (b) 2012-13 (c) 2014-15.

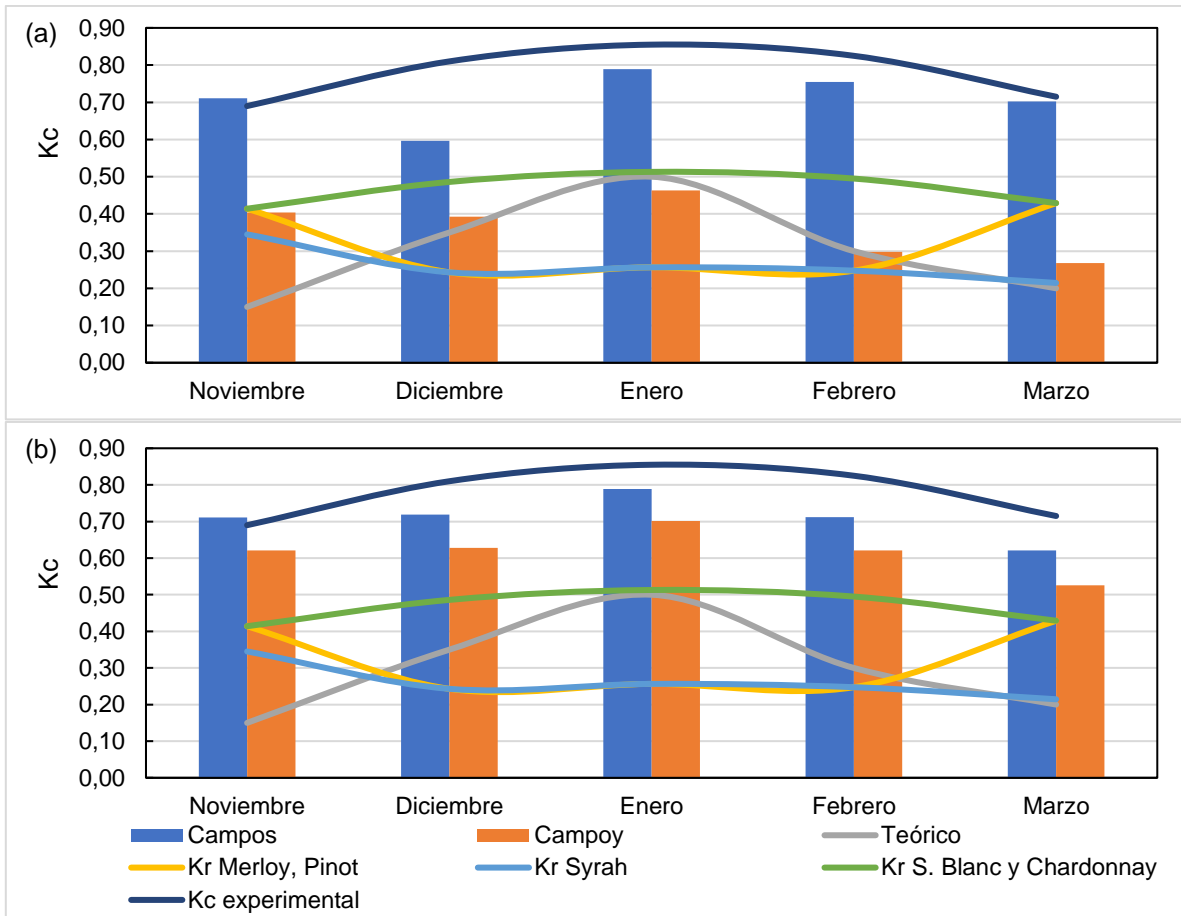


Figura 6.5 - Análisis de Kc. (a) 2016-17 (b) 2018-19.

## 6.2 Región del Maule

En la Región del Maule se analizó el periodo comprendido entre los años 2003 – 2019, donde los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.6, Figura 6.7, Figura 6.8 y Figura 6.9. Se estimó el valor de Kc mensual según las Ecuación 3.1 y Ecuación 3.2 presentadas anteriormente y se compararon con los Kc obtenidos a través de la literatura (FAO) y de manera experimental (con estrés hídrico)[46].

Al observar los gráficos de las figuras ya mencionadas, se puede apreciar que el Kc teórico (FAO) específico para vid vinífera generalmente, en los casos analizados, está por debajo del obtenido a través de las expresiones que consideran el NDVI. En el caso del Kc experimental, lo que en realidad se utiliza en esta región es el Kr, cabe recordar que el Kr (coeficiente de riego) es la combinación del Kc y el Ks (índice de estrés hídrico), que permite estimar la cantidad de agua que en realidad se entrega a la planta. El Kr merlot siempre es inferior al Kc (Campos), en comparación al Kc (Campoy), aunque existen ocasiones en que es mayor como en el mes de febrero. En cuanto al Kr cabernet, siempre es inferior al Kc obtenido por ambas ecuaciones.

El Kc teórico (FAO) presenta un comportamiento desfasado al Kc experimental en un mes, obteniendo el Kc máximo en febrero en comparación al teórico que se presenta en enero. El Kc obtenido a través del NDVI presenta un comportamiento más uniforme en comparación al obtenido en la sexta región, además es posible apreciar que las diferencias en el mes de noviembre son persistentes en el tiempo.

Por otra parte, es posible observar que los Kc estimados mediante la expresión propuesta por Campoy son más similares a los obtenidos a través de la literatura (teórico) en los meses de enero y febrero, mientras que marzo presenta algunos años con alguna similitud, en cambio los meses de noviembre y diciembre no presenta ninguna semejanza.

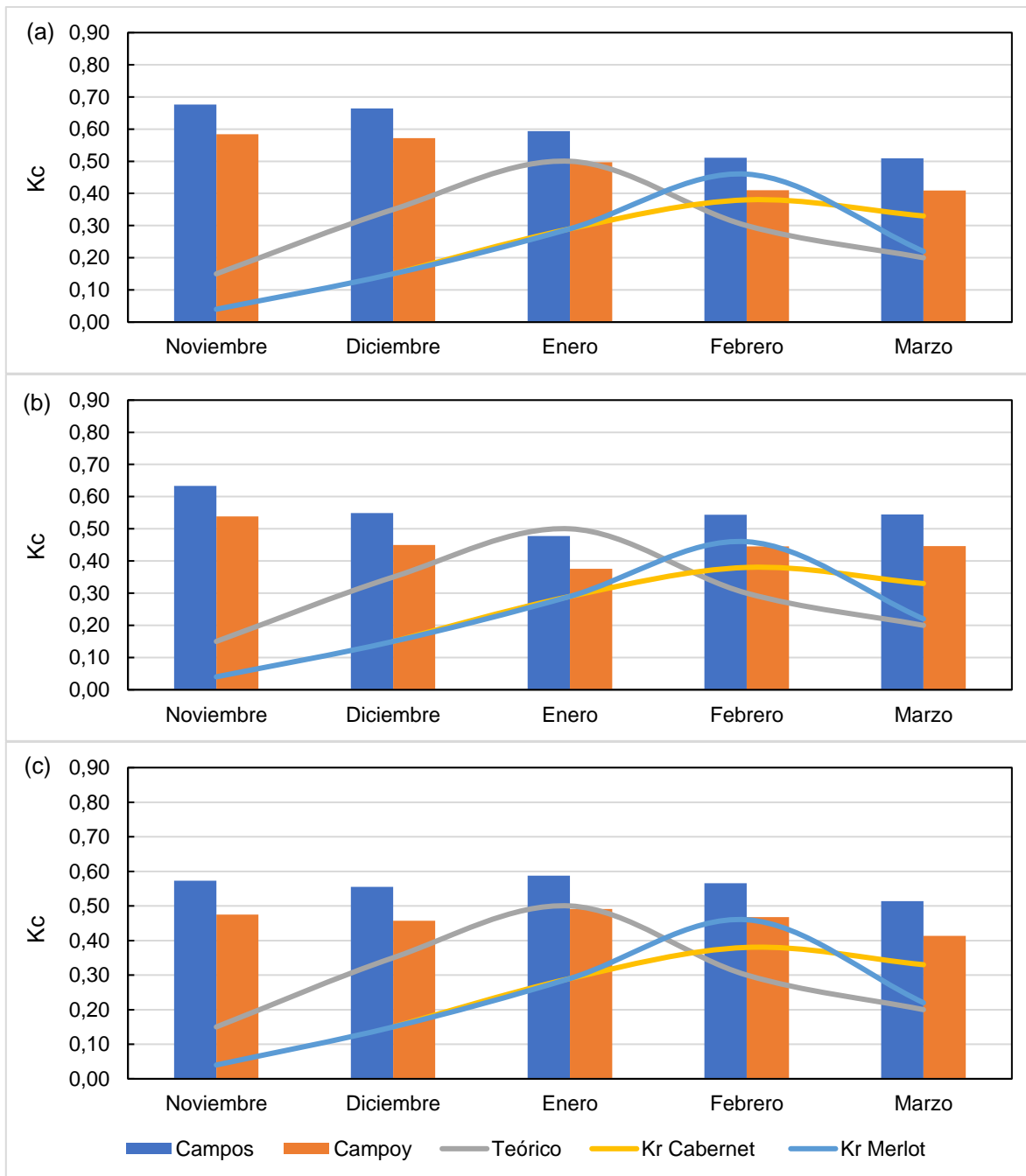


Figura 6.6 - Análisis de Kc (a) 2003-4 (b) 2004-5 (c) 2007-8.

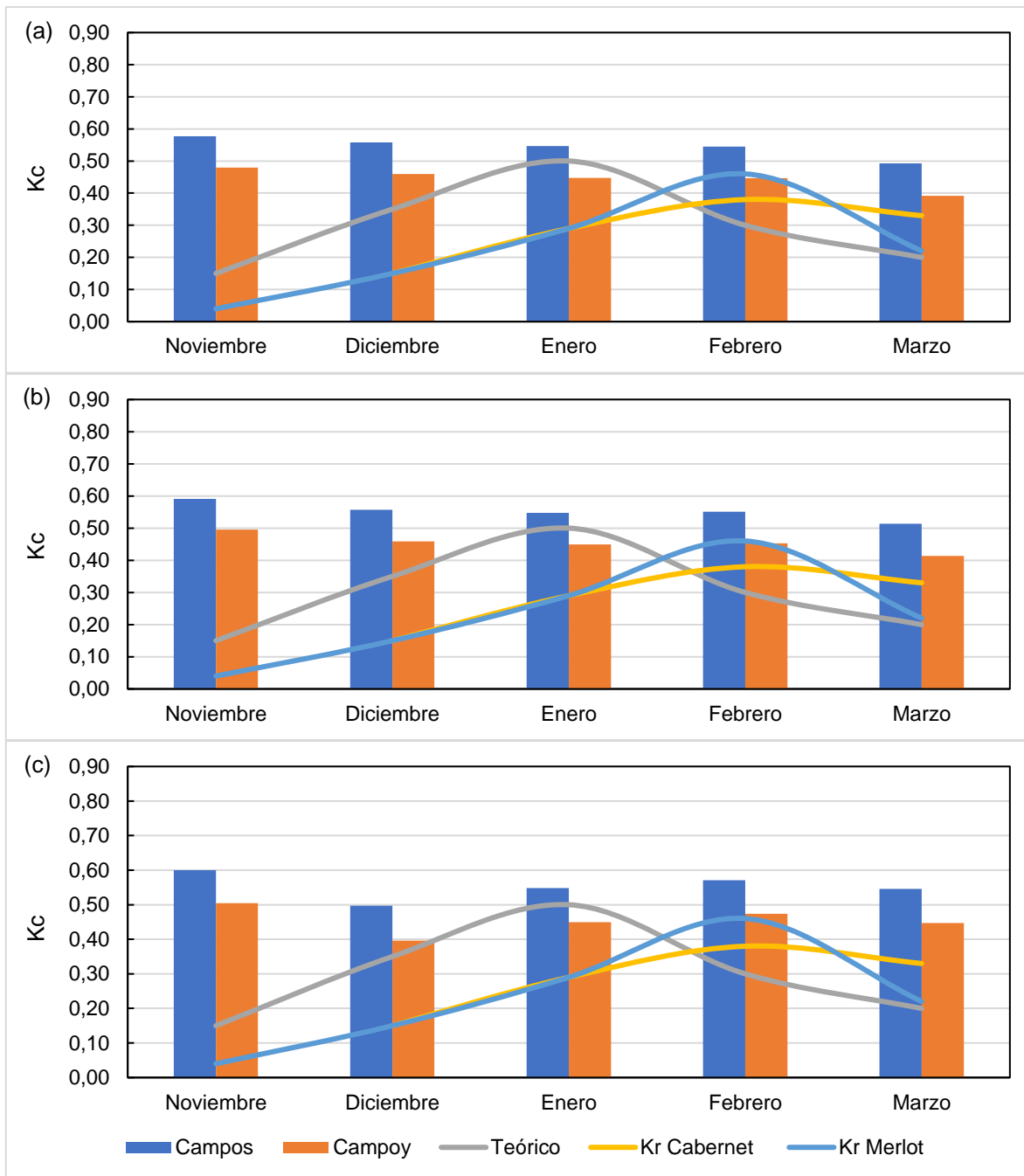


Figura 6.7 - Análisis de Kc (a) 2008-9 (b) 2010-11 (c) 2012-13.

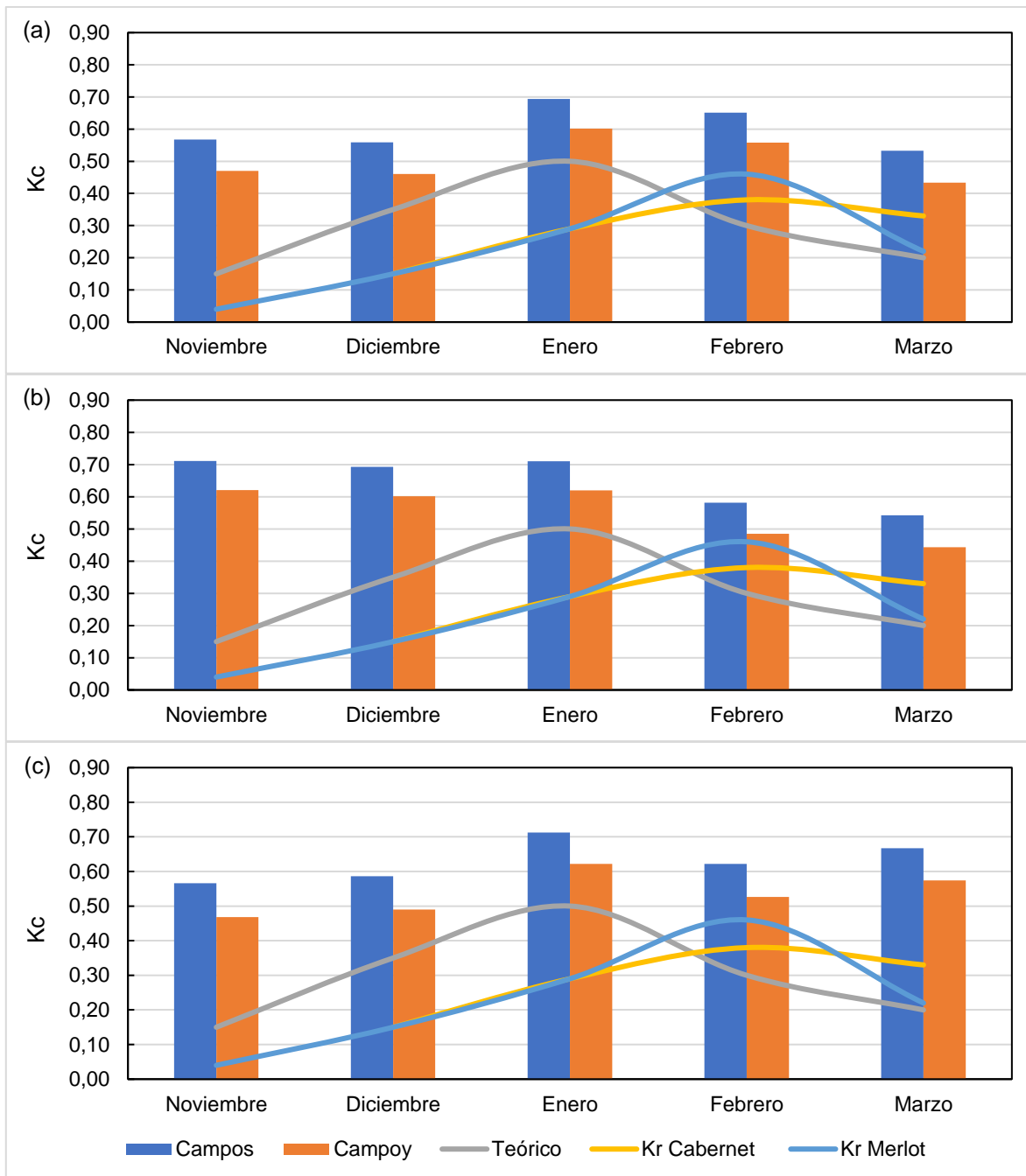


Figura 6.8 - Análisis de Kc (a) 2013-14 (b) 2015-16 (c) 2016-17.

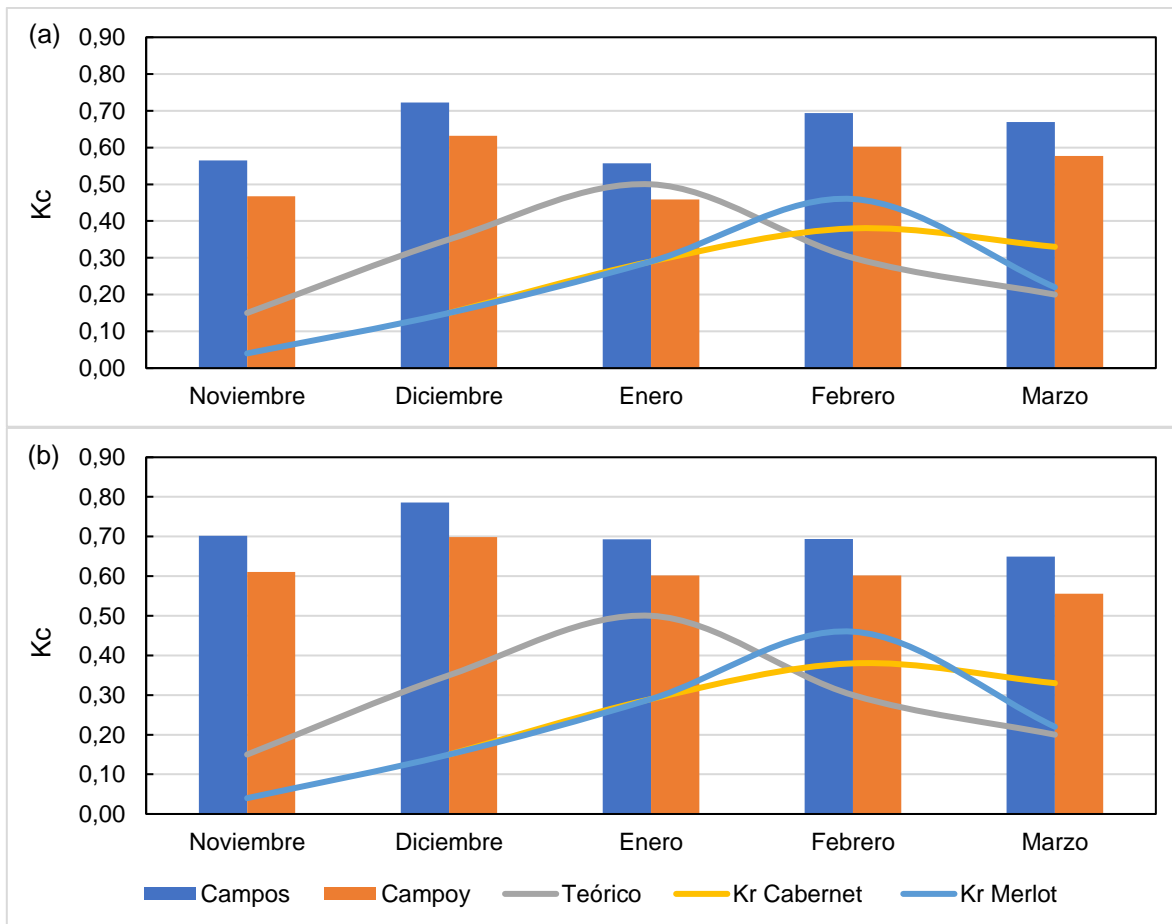


Figura 6.9 - Análisis de Kc (a) 2017-18 (b) 2018-19.

### 6.3 Región de Ñuble y Región del Biobío

En la Región del Ñuble y Biobío se analizó el periodo 2004 – 2019, donde los resultados obtenidos se presentan en las Figura 6.10, Figura 6.11, Figura 6.12 y Figura 6.13. Se estimó el valor de Kc mensual según la Ecuación 3.1 y Ecuación 3.2 presentadas anteriormente y se compararon con los Kc obtenidos a mediante la literatura (FAO) y de manera experimental (con estrés hídrico)[46].

Al observar los gráficos de las figuras ya mencionadas se pueden apreciar que el Kc teórico (FAO) específico para vid vinífera en todos los casos analizados está por debajo del obtenido mediante las expresiones que consideran el NDVI.

En el caso del Kc medido (Kr Cabernet y Merlot), se puede apreciar que de la misma manera que el caso anterior, el valor experimental es inferior al estimado por NDVI. El comportamiento temporal obtenido por NDVI tiene una conducta similar al coeficiente de cultivo medido (Cabernet y Merlot), obteniendo los puntos máximos en el mes de febrero, ya que en este caso se encuentra desfasado en un mes en comparación al teórico. Al igual que todas las regiones se mantiene de forma persistente a largo del tiempo la diferencia en el mes de noviembre, donde las expresiones asociadas al NDVI arrojan valores de Kc altos, lo que podría llevar a una sobreestimación de la demanda de agua a la planta.

Por otra parte, se puede observar que la expresión obtenida por Campoy tiene un comportamiento más similar a los obtenidos de manera experimental, debido a que la expresión de Campoy asume una transpiración del suelo sin vegetación igual a cero.

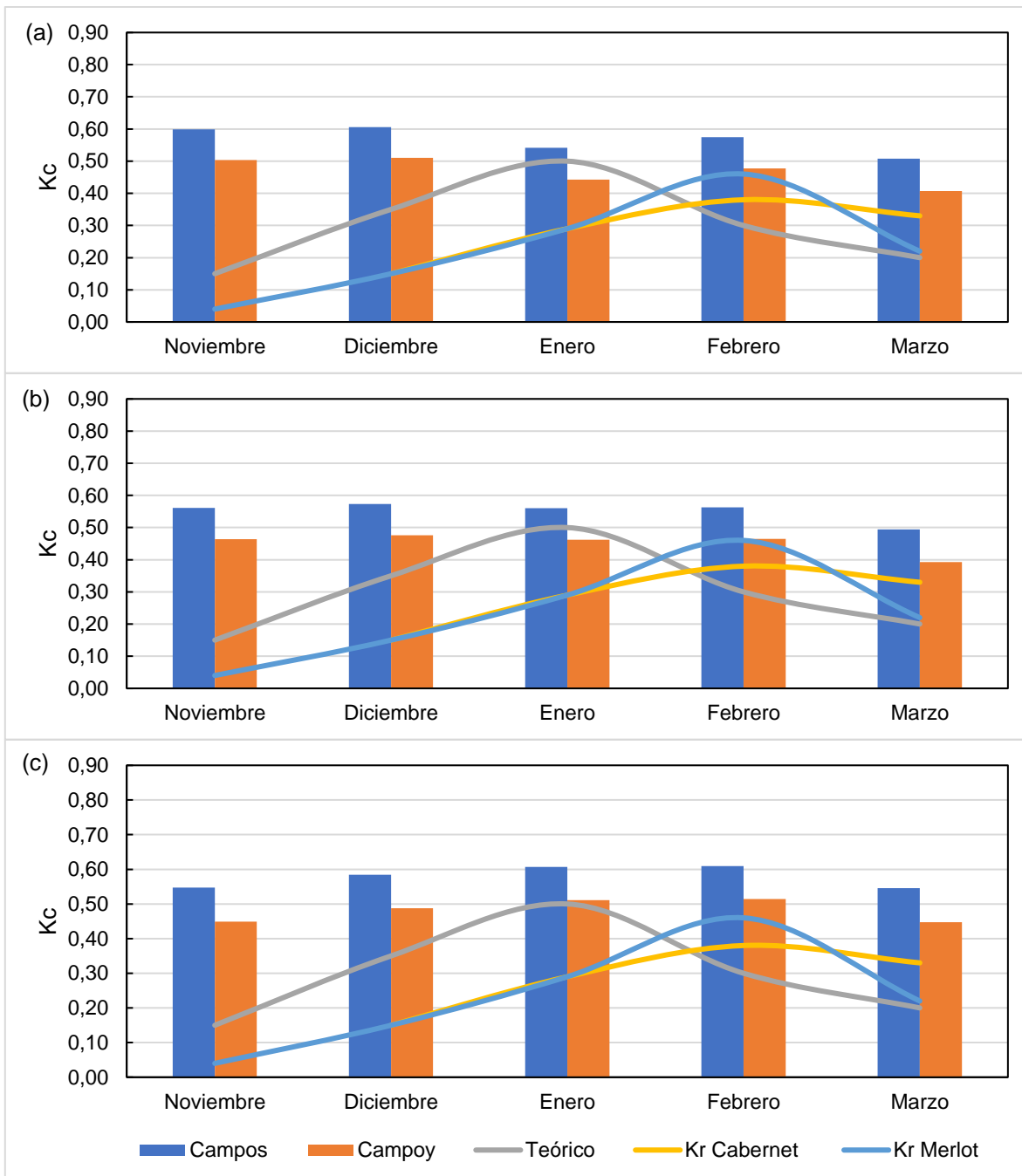


Figura 6.10 - Análisis de Kc (a) 2004-5 (b) 2007-8 (c) 2008-9.

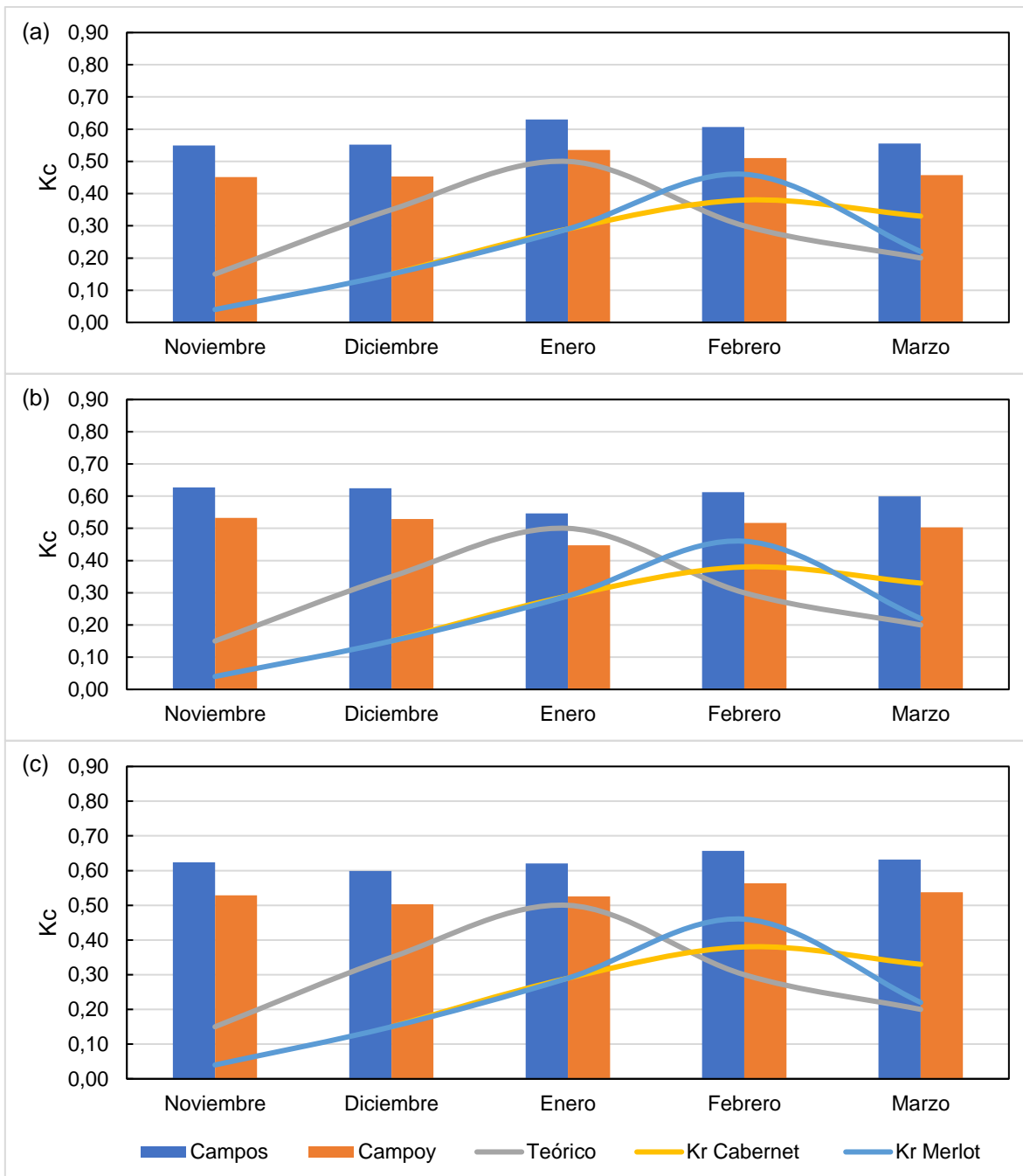


Figura 6.11 - Análisis de Kc (a) 2010-11 (b) 2012-13 (c) 2013-14.

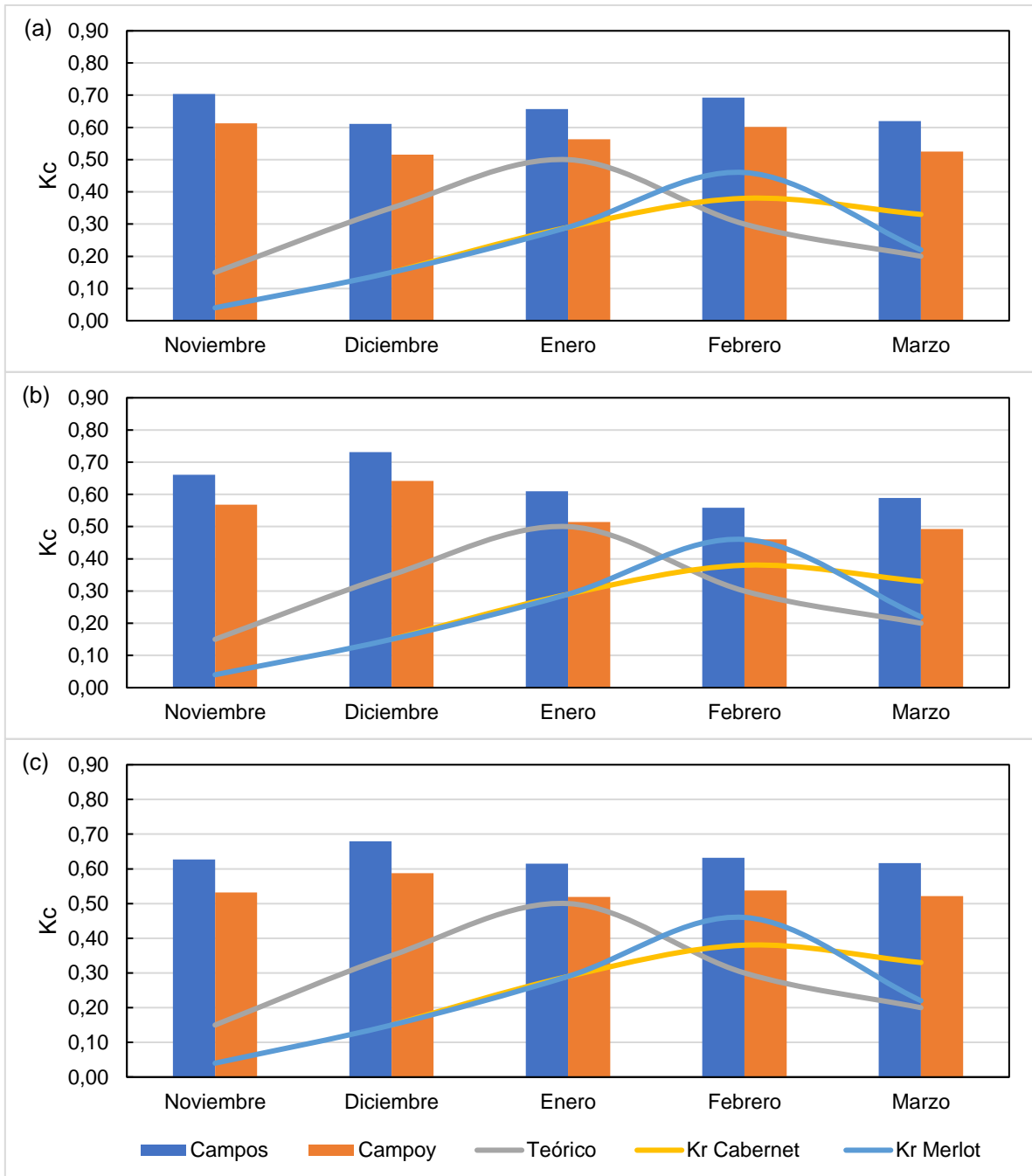


Figura 6.12 - Análisis de Kc (a) 2014-15 (b) 2015-16 (c) 2017-18.

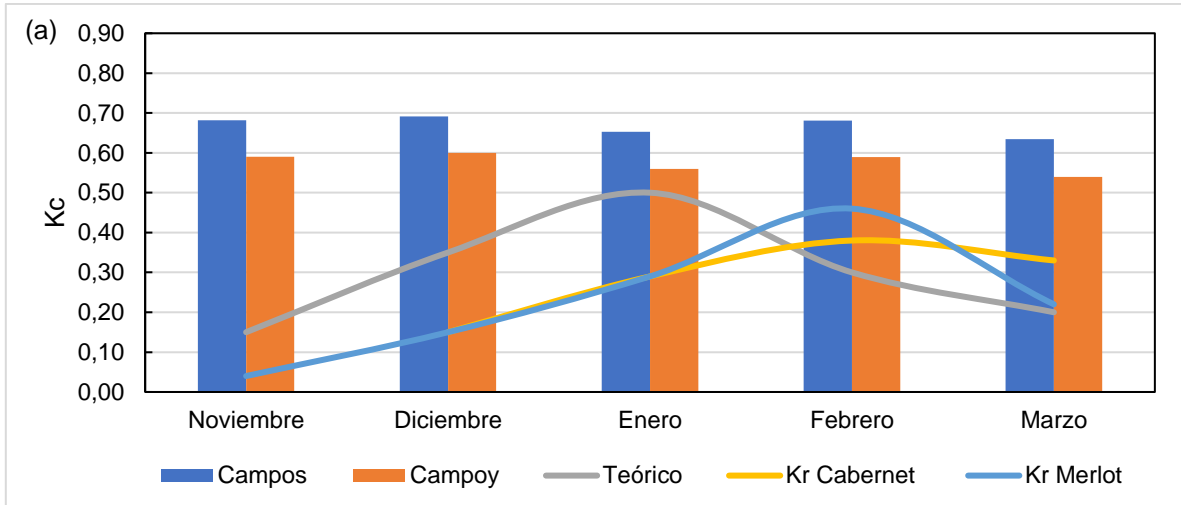


Figura 6.13 - Análisis de  $K_c$  (a) 2018-19

## 6.4 Comparación de regiones

En la zona centro sur de Chile se analizó el periodo 2008 – 2019, donde los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.14. Al observar la imagen es posible ver que la información corresponde únicamente a la expresión propuesta por Campoy, porque según lo observado se asemeja más a los resultados obtenidos en el comportamiento de las viñas a lo largo de la zona de estudio.

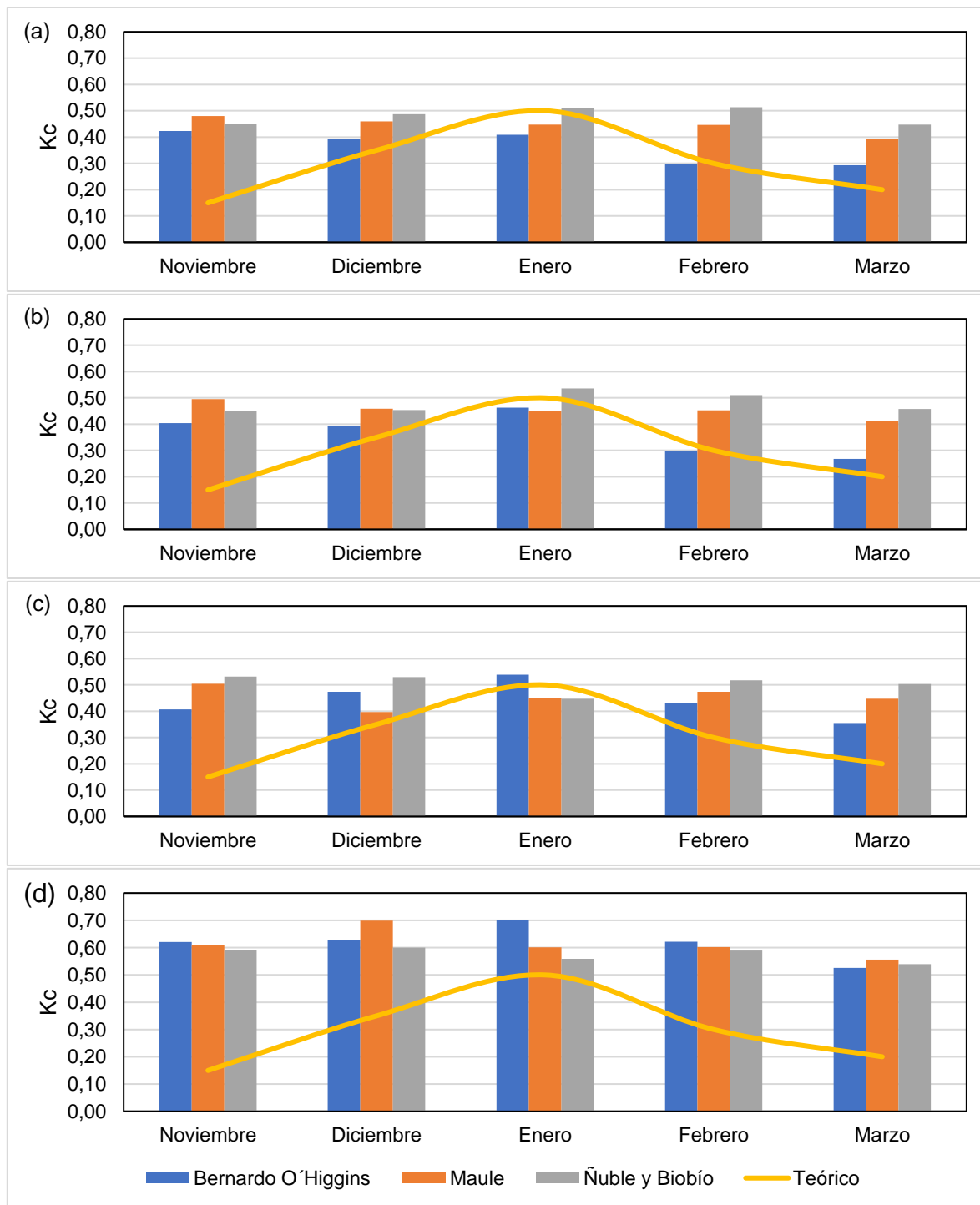


Figura 6.14 - Comparación de Kc (a) 2008-9 (b) 2010-11 (c) 2012-13 (d) 2018-19.

En la Figura 6.14 es posible apreciar que en las regiones analizadas se presentan grandes diferencias. A continuación, se analizarán los resultados de los valores calculados mediante el NDVI, dependiendo de la información disponible. Cabe destacar que los cálculos porcentuales se realizan en periodos de producción consecutivos (según información de Figura 6.14), tomando como base para la estimación el periodo anterior. Los resultados obtenidos se detallan en los siguientes puntos:

- En el mes de noviembre es posible observar que en los años 2008 – 2010 en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins presenta una disminución de aproximadamente el 5%, mientras que en las regiones del Maule y Biobío existe un aumento de 3 y 1% respectivamente. Entre el año 2010 – 2012 existe un aumento entre el 1 y 2% en las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y Maule, en tanto que en la Región del Biobío se presenta un notorio aumento de un 18% en comparación a las regiones ya mencionadas. En el periodo 2012 – 2018 el cual es el periodo de análisis más extenso, el Kc presenta un aumento entre 10 y 20 % en las regiones del Maule y Biobío, pero en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins presenta un gran cambio con un 52% de aumento.
- El mes de diciembre en los años 2008 – 2010, se observa una disminución de 7% en la Región del Biobío, mientras que en las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y del Maule sus variaciones son casi nulas. Entre los periodos 2010 – 2012, se observa un crecimiento entre 15 y 20% en las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y Biobío, mientras que la Región del Maule presenta un descenso de 13.6% en el Kc. En el periodo 2012 – 2018, la Región del Maule revierte el descenso ya mencionado, siendo la región que presenta un mayor cambio, con un aumento de 76%, mientras que las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y Biobío presentan un aumento de 32 y 13%.
- En enero, entre los años 2009 – 2011 la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins presenta un aumento de 13%, mientras que las regiones del Maule y Biobío igualmente presentan un crecimiento, pero menos pronunciado de 0.3 y 5% respectivamente. Entre 2011 – 2013, es posible observar que la Región del Maule conserva constante el Kc, en tanto la región del Libertador General Bernardo O'Higgins presenta un aumento de 16% y la Región del Biobío presenta un decrecimiento de 16%. En el periodo 2013 - 2019 presentaron un crecimiento de 25% en la Región del Biobío y entre 30 y 34% en las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y Maule respectivamente.
- En febrero, entre los años 2009 – 2011, en las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y Maule presentan un pequeño crecimiento de 0.1 y 1.5% respectivamente, en cambio la Región del Biobío presenta una disminución de 0.6%. En los periodos 2011 – 2013 y 2013 – 2019 la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins presenta un aumento de Kc entre 43 y 45% respectivamente, mientras que las regiones del Maule y Biobío presentan un aumento de 1 a 5% entre 2011 – 2013, en tanto que entre 2013 – 2019 presentan un mayor cambio con un 14 a 27% respectivamente.
- En marzo, entre los años 2009 – 2011, en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se presenta una disminución de 9%, mientras que las regiones del Maule y Biobío se presentan un crecimiento de 6 y 2% respectivamente. Entre los años 2011 – 2013 las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins, Maule y Biobío presentan aumentos en 32, 8 y 10% respectivamente, en tanto el periodo 2013 – 2019 se observan aumentos de 48, 24 y 7% respectivamente, siendo la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins la que presenta mayores cambios en este mes.

En comparación entre Kc teórico (FAO) y NDVI observado en la Figura 6.14, se puede observar que el mes de noviembre es el mes con mayor diferencia, generalmente entre un 63 y 76% presentes en el área de estudio, luego el segundo mes con mayor diferencia se presenta en marzo, pero en menor magnitud entre un 25% presente en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y 63% en la Región del Biobío. Los meses de diciembre y febrero tienen una gran similitud con diferencias hasta 50% presentes en las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y Maule, pero presenta un caso donde el Kc asociado al NDVI es inferior al teórico en 1% en el 2011 en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Enero es el mes cuando el Kc teórico (FAO) es máximo con un valor de 0.5; en la mayoría de los casos ya observados el Kc obtenido mediante NDVI es mayor, pero entre 2011 – 2013 se presentan casos donde es inferior entre 8 y 12%, pero en el último año se presentan diferencias entre 10 y 30%, los cuales son menores que las regiones del Maule y

Biobío. Estas grandes diferencias pueden afectar en gran cantidad en la demanda de agua, por ejemplo, en el caso de noviembre donde el Kc presenta importantes diferencias. Uno de los posibles factores que podrían influir en los problemas ya mencionados puede ser por las variables climáticas como humedad relativa, temperatura y precipitaciones.

En el presente estudio se obtuvo una gran cantidad de imágenes para analizar, pero la cantidad de periodos coincidentes en las regiones del área de estudio son pocos, como se puede observar en la Figura 6.14, lo que se considera un problema, dado que condiciona una posible comparación.

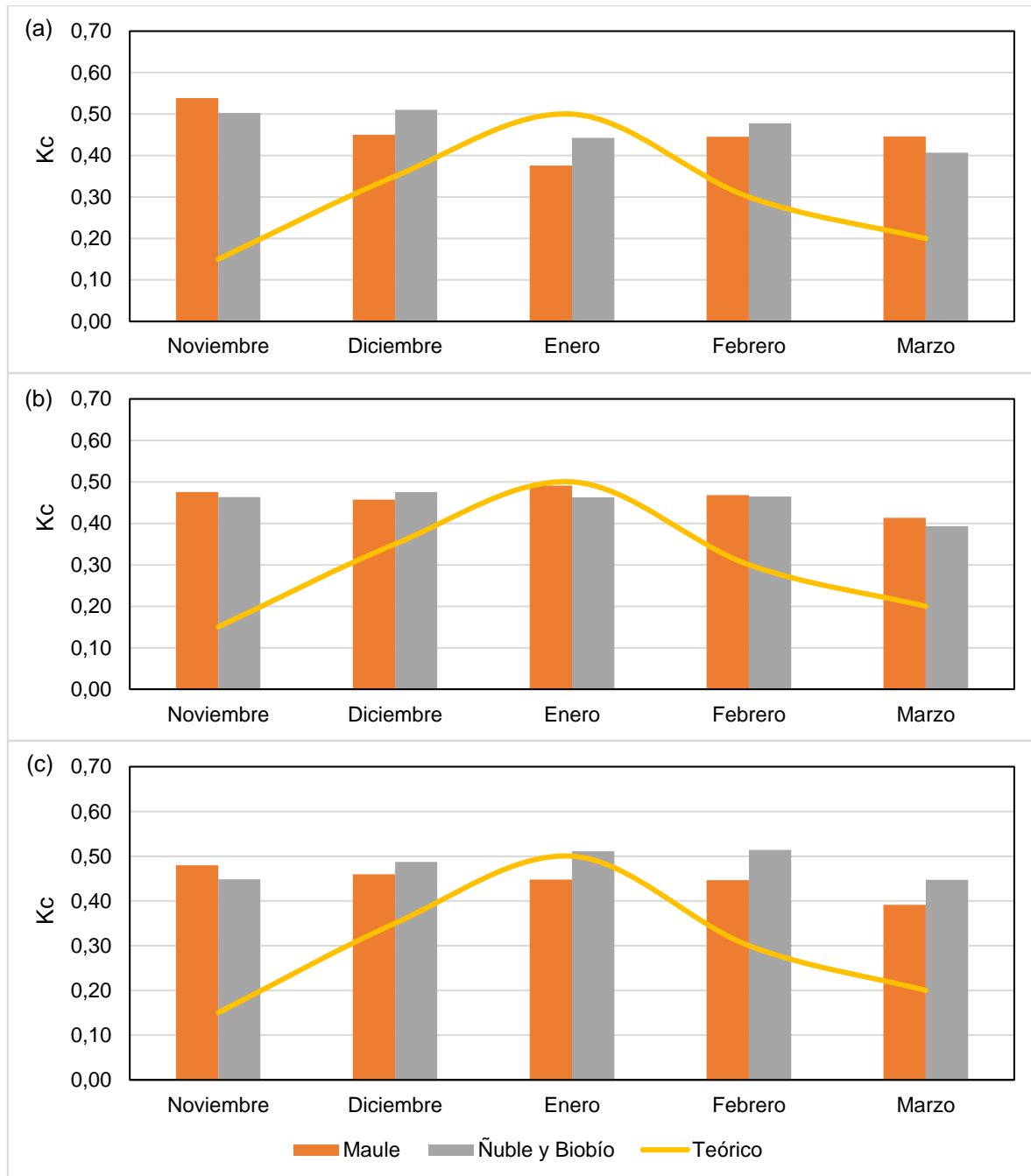


Figura 6.15 - Comparación Kc Maule, Ñuble y Biobío (a) 2004-5 (b) 2007-8 (c) 2008-9.

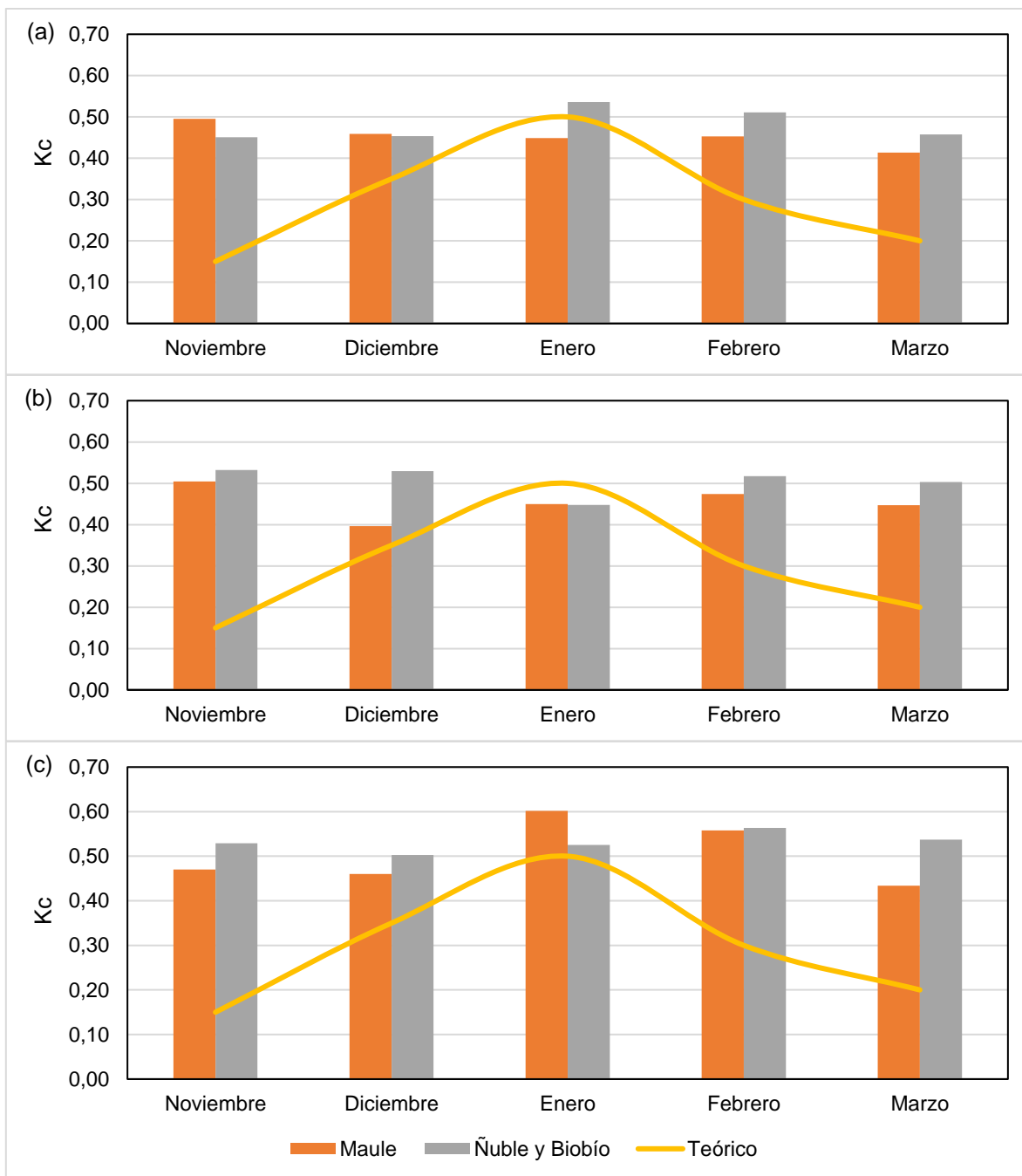


Figura 6.16 - Comparación Kc Maule, Ñuble y Biobío (a) 2010-11 (b) 2012-13 (c) 2013-14.

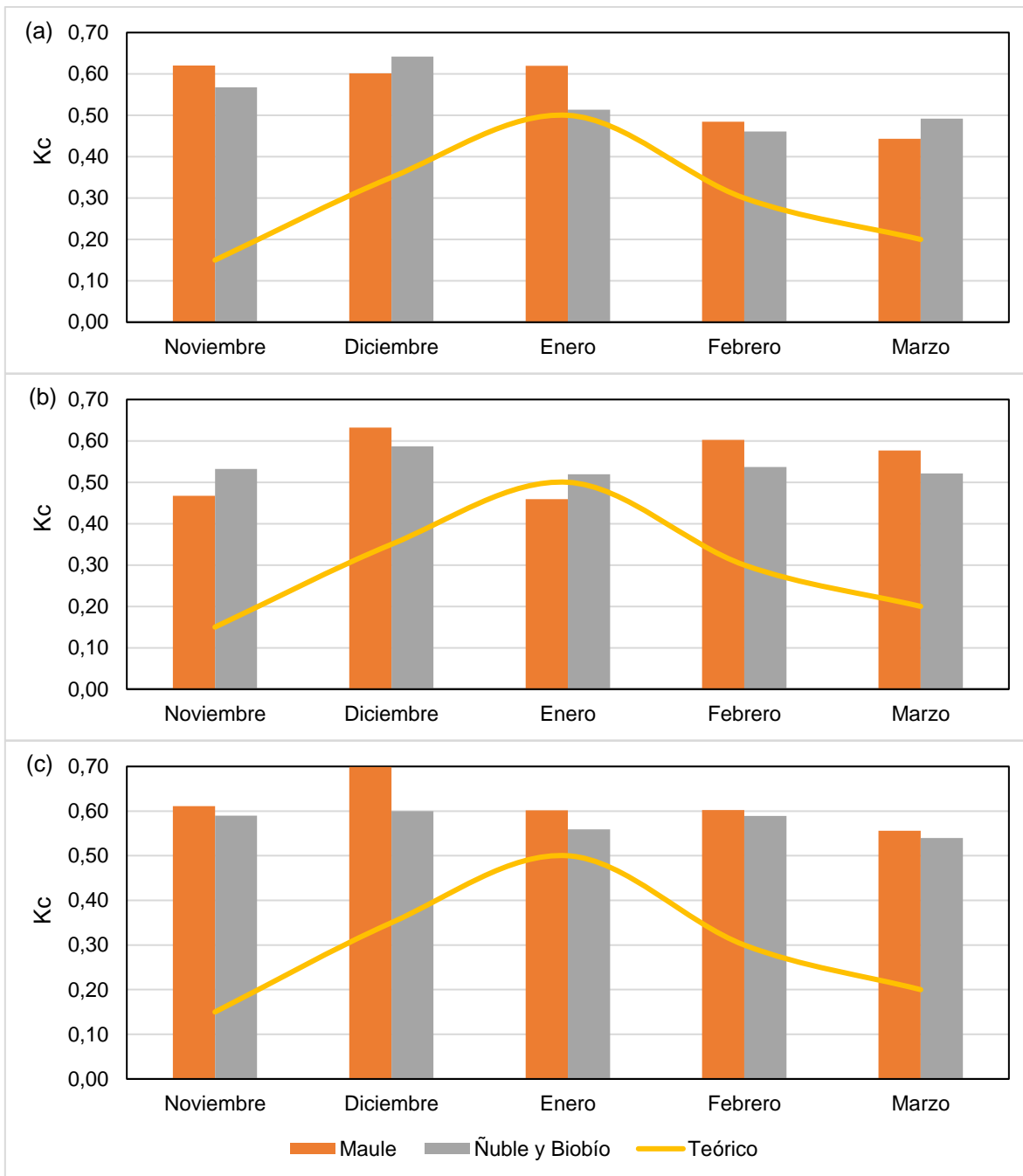


Figura 6.17 - Comparación Kc Maule, Ñuble y Biobío (a) 2015-16 (b) 2017-18 (c) 2018-19.

En la Figura 6.15, Figura 6.16 y Figura 6.17, es posible notar que no existe una forma clara que permita decir que efectivamente el clima está actuando de manera preponderante en las variaciones que se producen en las regiones como se ha mencionado. Pero si se puede observar que, en términos de Kc teórico en los extremos de la curva fenológica de la vid, existe una considerable sobreestimación de la demanda de agua en comparación al NDVI, ya que hay una diferencia importante en esos meses de noviembre y marzo, con valores de 240% y 130% respectivamente.

Dentro de los análisis de las regiones que se vieron en el capítulo 6, aparte de tener una notoria diferencia entre el Kc teórico (FAO) y las expresiones de NDVI (Campos y Campoy), en el mes de noviembre esta diferencia es aún más alta incluso con el Kc experimental (Región del Libertador General Bernardo O'Higgins). Estas sobreestimaciones ya mencionadas se aprecian más en los extremos de las regiones del Maule y Biobío.

## Capítulo 7: Análisis de resultados

En el presente trabajo se ha analizado un amplio territorio desde la Región de O'Higgins hasta la Región del Biobío logrando evidenciar que se están presentando cambios en la relación entre NDVI y Kc, posiblemente por las diferencias en el clima:

- En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se observa que el Kc obtenido mediante la literatura presenta una tendencia a ser similar a las expresiones del NDVI.
- En las regiones del Maule y Biobío, esta tendencia que se presentaba en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se comienza a perder a medida que avanza hacia la Región del Biobío.

Esta evidente tendencia que comienza a perderse de O'Higgins a Biobío puede variar debido a que el NDVI se mide en función del verdor de la planta, y mediante avanza hacia la zona sur las condiciones climáticas son más favorables que en la zona centro, ocasionando que el verdor sea mayor para que la planta y por ende tenga un mayor vigor.

Las precipitaciones que se presentan desde la región de O'Higgins hasta la región del Biobío aumentan en gran cantidad, incluso en la época de verano (Véase Figura 7.1), esto ocasiona que exista una mayor cantidad de recursos hídricos obteniendo mejores condiciones ambientales, lo que causa que las plantas mantengan su verdor, es decir un NDVI alto, pero en el caso de la vid vinífera no implica que existiendo mayor cantidad de agua sea mejor para el fruto en sí, ya que se ha demostrado que en este tipo de cultivo al aplicar un estrés hídrico en periodos específicos en el crecimiento de la vid, incrementa significativamente la calidad de los vinos, donde puede estar asociado al tamaño de la uva, la acumulación de los azúcares, intensidad de colorantes, etc.[46]

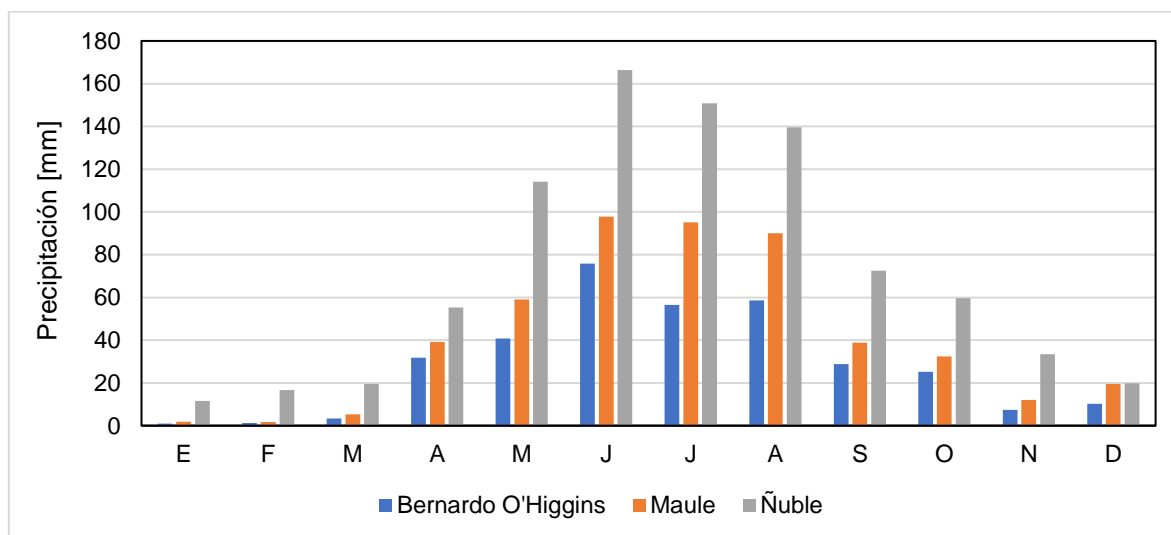


Figura 7.1 - Precipitación anual área de estudio.

En relación con lo anterior, el índice de estrés hídrico afecta de gran manera el crecimiento del fruto y no al follaje del árbol, lo cual no es posible obtener a través del NDVI directamente o mediante las expresiones existentes en la literatura. Cuando se compara el Kc obtenido mediante el NDVI y el Kc con estrés hídrico se puede observar que no presentan relación alguna, siendo una técnica que se está utilizando, pero no se está viendo reflejado en las expresiones definidas por Campos y Campoy este tipo de cultivo[16]. En realidad, para la mayoría de los cultivos mientras de mayor tamaño es el fruto tiene mejor calidad[57], [58], lo cual está vinculado con la demanda de agua que se aplica; sin embargo en el caso de la vid vinífera presenta una relación inversa, ya que mientras el fruto es de menor tamaño, el vino tiene mejor calidad como ya se ha mencionado y este efecto no se alcanza a capturar de manera adecuada mediante esta metodología de estimación del Kc.

Cabe destacar que los resultados obtenidos entre el Kc teórico y las expresiones de NDVI presentan variaciones tales como:

- El Kc teórico (FAO) de la vid vinífera tiene un comportamiento parabólico el cual es único, donde los mínimos se observan en los extremos de la curva fenológica en los meses de noviembre y marzo con valores de 0.15 en ambos, mientras que su peak se ubica en el mes de enero.
- En la región de O'Higgins se puede contemplar una curva más suave en todo el periodo, donde las diferencias entre los máximos y mínimos es menor que el caso del teórico.
- En el caso de la región Maule, Ñuble y Biobío presentan de igual manera un comportamiento similar al teórico con una curva menos pronunciada, pero en esta ocasión el valor máximo de la curva se desfasada en un mes, específicamente de enero a febrero.
- Aunque en las diferentes regiones se presentan comportamientos similares, generalmente en los extremos de la curva se observan grandes diferencias. En el caso de noviembre tiene una diferencia persistente en el tiempo, ya que la curva teórica tiene un valor de 0,15 en comparación al NDVI que tiene valores entre 0,4 y 0,7.

Además del Kc teórico (FAO) y NDVI, se observan mejores resultados entre el Kc obtenido de manera experimental y NDVI, tales como:

- En la región de O'Higgins se comparó con 5 tipos de cepas (Merlot, Pinot; Syrah; Blanc y Chardonnay) obtenidos de la región Metropolitana, donde solamente las cepas asociadas a vino blanco presentan un comportamiento similar, no solo al NDVI, sino que también al teórico.
- En la región del Maule, Ñuble y Biobío se realizó una comparación con respecto al Kc experimental obtenido en la región del Maule, el cual presenta 2 tipos de cepas (Cabernet y Merlot), en ambos casos presentan un comportamiento similar al teórico (FAO), pero con el valor máximo de la curva desfasado en un mes.
- En la región del Maule es posible notar que presenta un comportamiento semejante al experimental mientras que a medida que transcurre el tiempo, esta tendencia empieza a tener una forma similar al teórico por un corto periodo de tiempo hasta que pierde cualquier comportamiento similar al teórico o experimental.
- En las regiones del Ñuble y Biobío tienen un comportamiento similar al experimental hasta el periodo 2014 – 2015 y de igual forma que el Maule pierde su comportamiento similar al teórico o experimental.

Como se puede apreciar, existe un Kc teórico (FAO) que es único, y en comparación al Kc en función del NDVI, presenta una tendencia similar en algunos periodos de tiempo (2000 -2019 en la región de O'Higgins, 2000 – 2016 en la Región del Maule y 2000 – 2015 las regiones de Ñuble y Biobío), sin embargo, a medida que avanzan los años se ha observado que esta tendencia se pierde (2017 -2018 en la Región del Maule y 2015 – 2016 en las regiones Ñuble y Biobío). Además, aunque se presenta un comportamiento similar entre ellos, se mantienen grandes diferencias en los extremos de la curva entre lo obtenido por NDVI y el Kc teórico (FAO) y experimental.

En el capítulo 6.4 se mencionó que las diferencias que se presentan o la pérdida de tendencia que es posible observar, puede tener explicación en los diferentes factores climáticos como la precipitación, humedad relativa y temperatura. Mediante análisis de los datos registrados se pudieron verificar que el NDVI está relacionado con los factores ya mencionados, en especial manera con la precipitación, ya que es el que afecta de mayor modo al NDVI. Como se citó anteriormente, los extremos de la curva son los puntos donde se presenta mayores diferencias entre el NDVI, Kc teórico y experimental. Estas diferencias obtenidas se describen a continuación:

- En el caso de noviembre, el mes con mayor diferencia, éstos tienen relación con que en los meses anteriores existe una gran cantidad de precipitación, en otras palabras, la planta presenta un mayor nivel de verdor, pero no por una entrega de recursos externa (riego), sino por agua que recibe de manera natural.
- En el caso de marzo presenta un  $K_c$  alto, pero por razones distintas, ya que si bien existe una mínima precipitación en los meses de enero y febrero, en estos meses es el proceso de cambio de color de la vid, por lo cual es necesario aplicar una mayor demanda de agua como se puede observar mediante el  $K_r$  (coeficiente de riego) ver Figura 6.4 (O'Higgins), Figura 6.8 (Maule) y Figura 6.12 (Ñuble y Biobío). Esto se combina con que las evapotranspiraciones y temperaturas en dicho mes son más bajas, lo que favorece que la planta mantenga su verdor.

Como se presentan meses en que el  $K_c$  en función del NDVI no tiene tendencia alguna con el  $K_c$  teórico o experimental, se buscó respuesta en las otras variables climáticas antes mencionadas. Se pudo observar que además de la precipitación, esta falta de relación está vinculada con variables como la humedad relativa y la temperatura, ya que estas se encuentran ligadas con la evapotranspiración, por ejemplo, como se observa en la *Figura 7.4*, existen periodos en que hay una gran cantidad de precipitación en octubre y en los meses fenológicos de la vid (noviembre-marzo) existe una precipitación mínima, pero de igual manera el valor de  $K_c$  es alto en todos los meses. Como se puede observar en la *Figura 7.2* y *Figura 7.3*, en el periodo fenológico se presenta una humedad alta y una baja temperatura lo que eventualmente se puede traducir en una baja evapotranspiración en todo el periodo, lo cual ayuda a que se mantengan altos los niveles de humedad del suelo y también el nivel de verdor de la planta.

Dentro de todo el análisis que se realizó, en función de los datos teóricos y experimentales, se puede notar que los meses que se ajustan de mejor manera a las expresiones fueron los meses de enero y febrero en la región de O'Higgins, pero a medida que avanza el territorio hacia el sur la tendencia del  $K_c$  experimental comienza a perderse en conjunto con el aumento de la precipitación (véase *Figura 7.1*).

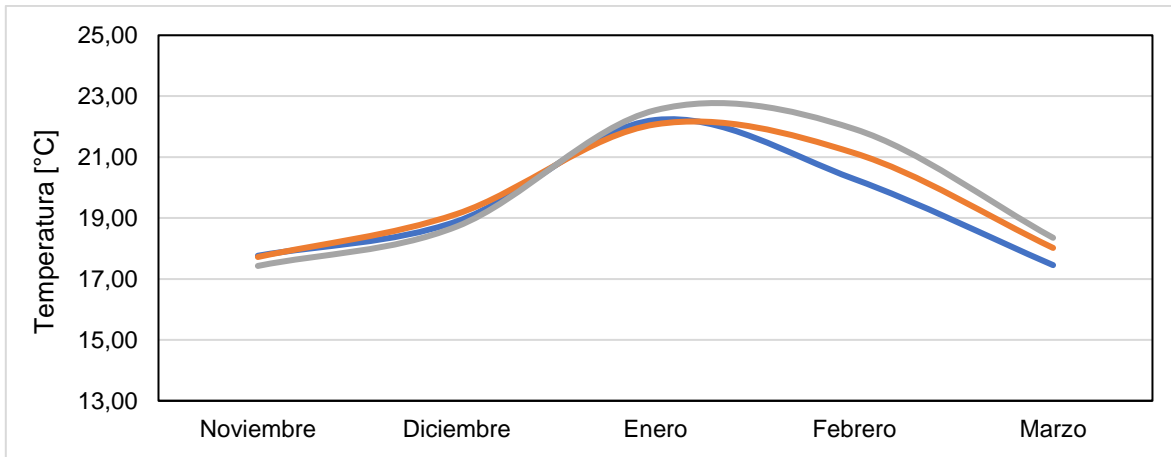


Figura 7.2 - Temperatura media 2016 - 17.

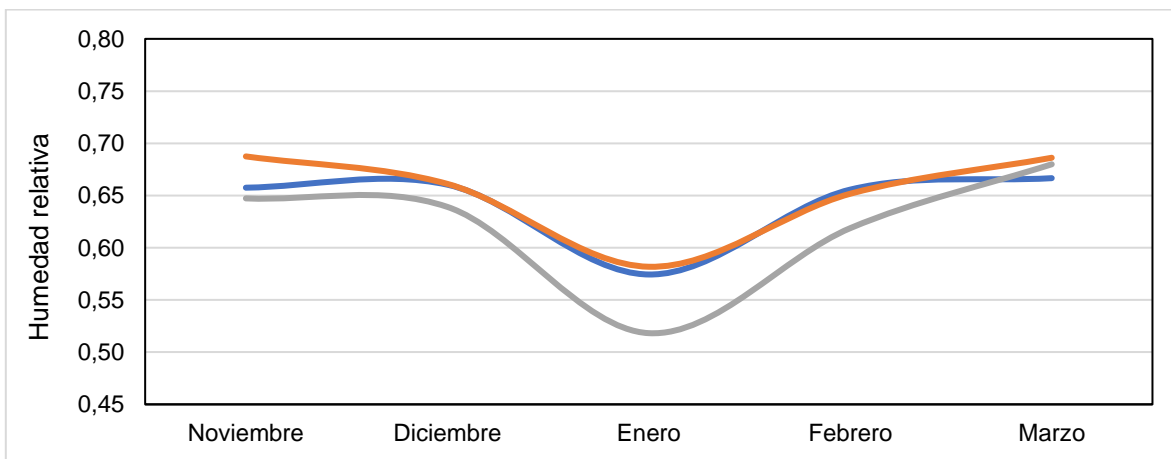


Figura 7.3 - Humedad relativa 2016 - 17.

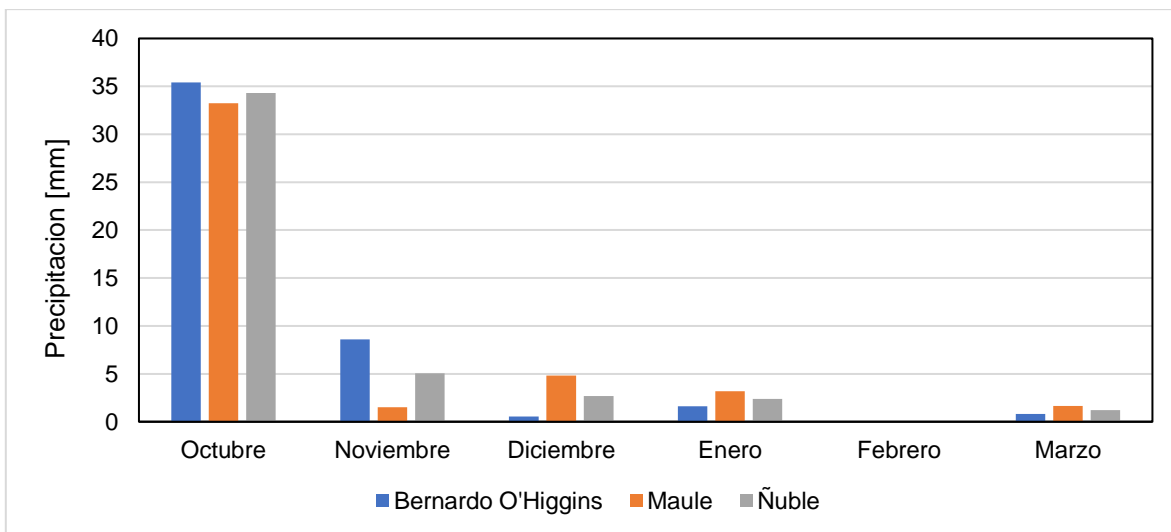


Figura 7.4 - Precipitación 2016 - 17.

Como el Kc se utiliza para la estimación de la demanda de agua que podría existir para un determinado cultivo, se realizó una prueba con los valores de la Región del Maule, debido a que ahí se tienen datos medidos in situ en la misma región. Siendo así dentro de un contexto global es posible evidenciar que la demanda de agua total del periodo que dura la producción de vid vinífera, si se estima las necesidades de agua del cultivo mediante la expresión propuesta por Campos existen una demanda de agua de 426,6 [mm] por unidad de área, en cambio mediante la expresión propuesta por Campoy, la demanda de agua es de 372,2 [mm] por unidad de área (véase Figura 7.5). Si se comparan estos valores con los que se aplican a los cultivos según el estudio [46] se obtienen las diferencias que se muestran en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 - Comparación porcentual lámina de agua a aplicar estimada vs riego real.

|                 | <b>Campos</b> | <b>Campoy</b> | <b>Teórico</b> |
|-----------------|---------------|---------------|----------------|
| <b>Cabernet</b> | 273%          | 226%          | 65%            |
| <b>Merlot</b>   | 219%          | 178%          | 41%            |

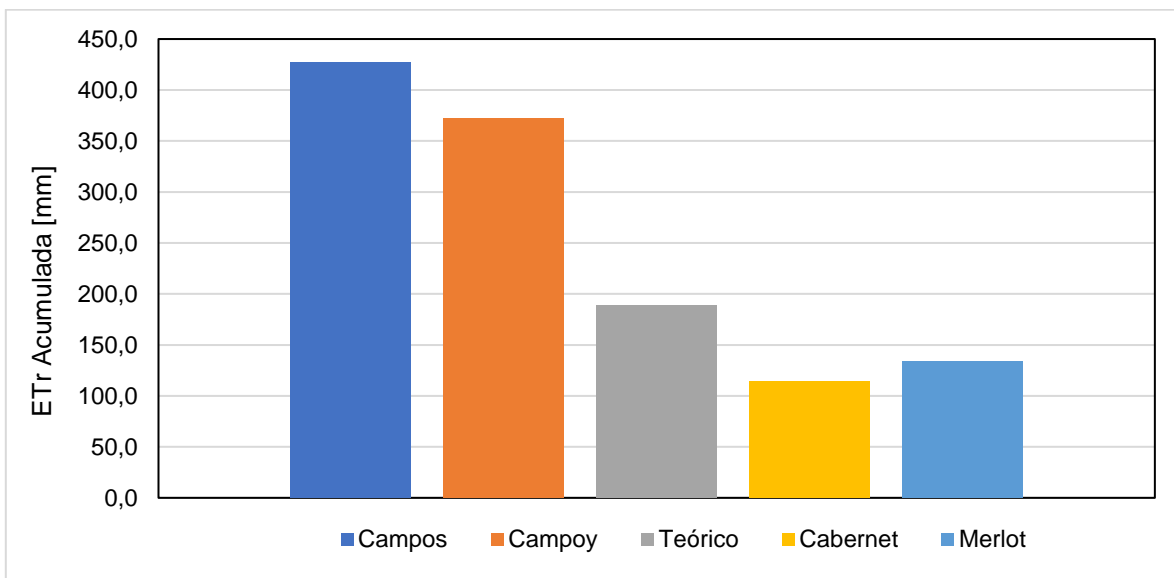


Figura 7.5 – Comparación lámina de agua a aplicar estimada vs riego real 2018 - 19.

En función de las diferencias que se obtuvieron en la Figura 7.5, se estimó un Ks mensual (índice de estrés hídrico) que debería aplicarse para tener un Kr en torno al medido para las cepas Cabernet y Merlot, es decir, una demanda de agua de dichos cultivos. En la Figura 7.6 se presentan los valores de Ks estimados para los casos mencionados y los valores que se utilizaron en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins en este trabajo, donde es posible observar que no hay similitudes a lo largo de los meses en los que se desarrolla el cultivo. Si bien no corresponden a la misma zona, se esperaría que existiera alguna coincidencia, al menos en la forma de las curvas. Estas diferencias indican que las fórmulas que utilizan el NDVI presentan ciertas deficiencias para reflejar lo que en realidad sucede en las viñas en general.

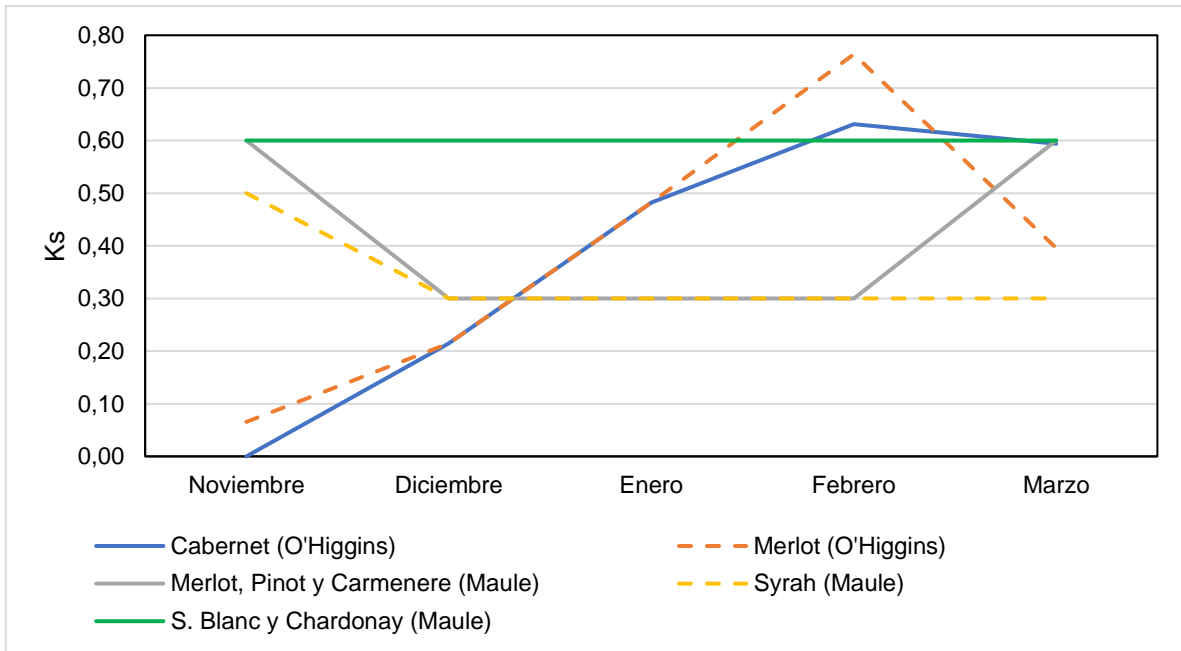


Figura 7.6 - Comparación Ks estimada Región del Maule vs real considerado en Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

## Capítulo 8: Conclusiones y comentarios

Expuestos los resultados del trabajo de título es posible concluir lo siguiente:

Mediante el análisis realizado, lo que refleja el estudio es que el Kc en función del NDVI, en términos fenológicos es más semejante y no tiene una curva tan pronunciada como la propuesta por la teoría. A lo largo de las regiones de estudio (O'Higgins a Biobío) se notó que el Kc en función del NDVI en la región de O'Higgins presenta una tendencia similar al teórico (FAO) donde la demanda máxima se produce en enero, sin embargo, mientras el territorio avanza hacia la zona sur (Biobío) esta tendencia comienza a perderse.

Por otro lado, se estimaron los valores de Kc en función del NDVI y al comparar con valores de Kc experimentales en diferentes sitios con variados tipos de cepas, es posible decir que presenta una mayor similitud con estos últimos que con la curva teórica en la región de O'Higgins, específicamente con cepas de vino blanco. Esta similitud se mantiene a lo largo del periodo de estudio, donde el Kc experimental muestra un gran parecido con las expresiones asociadas a NDVI, en comparación a las demás regiones, las que presentaron un comportamiento similar al Kc experimental por un periodo de tiempo (2007 – 2014 en Maule y 2007 – 2015 en Ñuble y Biobío), luego en el caso del Maule presento un comportamiento similar al teórico por un corto periodo (2015 – 2017), para luego dejar de presentar un comportamiento semejante al Kc teórico (FAO) o cualquier Kc experimental.

Por medio del análisis espacial se puede decir que el Kc en función del NDVI en comparación con valores teóricos y experimentales, presenta en los extremos una diferencia persistente en todas las regiones, la cual puede incurrir en una posible sobreestimación de la demanda de agua. Además de lo antes mencionado, se observa un desfase temporal desde la región del Maule hacia el sur, lo cual afecta los periodos de entrega de agua al cultivo en comparación a la serie temporal teórica.

Las diferencias antes descritas tienen relación con factores climáticos tales como humedad relativa, temperatura y precipitación. Se ha llegado a la conclusión que esta última es la variable que más afecta al NDVI, aumentando su valor en periodos en los que no hay suministro externo de agua. Se considera que en segundo plano intervienen variables como la humedad relativa y la temperatura, ya que cuando existe baja o nula precipitación, una combinación favorable de estos factores (alta humedad y menor temperatura) influye en el NDVI de manera positiva producto de una menor evapotranspiración del cultivo.

En cuanto a la demanda de agua se observó que en la región del Maule queda evidenciado que el agua que se está agregando a los cultivos es mucho menor de lo que se estima mediante los valores teóricos o cualquier expresión que utilice el NDVI. En el caso del Merlot se presenta una demanda de agua de 133,69 [mm] por unidad de área, sobreestimando la demanda en un 41 y 178% al utilizar expresiones teóricas o propuestas por Campoy respectivamente. Por otro lado, en el caso del Cabernet presenta una demanda de agua de 114,27 [mm] por unidad de área, lo que implica una sobreestimación de 65 y 226% al utilizar expresiones teóricas o propuestas por Campoy respectivamente. No solo existe una sobreestimación en términos globales de la cantidad de agua requerida para estos cultivos, sino que además existe una diferencia en los tiempos de aplicación de dicha demanda.

Finalmente se ha observado que el NDVI no es representativo de toda la extensión territorial analizada, sobre todo hacia la zona sur que es donde pierde más representatividad. Generalmente se presentan sobreestimaciones en ambas expresiones para la obtención del Kc en comparación a lo que realmente se ha registrado en los lugares donde se cultiva vid vinífera. Se considera que estas expresiones no son completamente válidas a lo largo del territorio de estudio.

Cabe destacar que las expresiones asociadas al NDVI no son la mejor herramienta para estimar apropiadamente la demanda de agua, sobre todo para la zona sur por su evidente sobreestimación. Dado que se identificó que existe una relación en el comportamiento de este índice debido a las variables climáticas como precipitación, humedad relativa y temperatura, se recomienda estudiar la

posibilidad de que las expresiones que están en función del NDVI tengan involucrados factores de estas características, incorporando de alguna manera los efectos climáticos de cada región.

## Referencias

- [1] DIRECON-PROCHILE, "Anuario de las exportaciones chilenas 2018," pp. 1–57, 2018.
- [2] M. J. Pizarro, "Boletín del Vino: Producción, precios y comercio exterior. Avance a Octubre de 2018," *ODEPA, Minist. Agric. Gob. Chile*, pp. 1–29, 2018.
- [3] ODEPA, "El cambio climático y los recursos hídricos de Chile," *Agric. Chil. reflexiones y desafíos al 2030*, pp. 147–178, 2017.
- [4] H. Fuenzalida, C. Villagran, P. Bernal, E. Fuentes, F. Santibañez, H. Peña, V. Montecinos, E. Hajek, J. Rutllant, "Cambio climático global y eventuales efectos en Chile," *Ambient. y Desarro.*, vol. V, no. 2, pp. 37–42, 1989.
- [5] Center for Climate and Resilience Research, "La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro," *Inf. a la Nación*, vol. 1, pp. 1–214, 2017.
- [6] ODEPA, "Estudio : ' Cambio Climático Impacto en la Agricultura Heladas y Sequía ,'" *Cent. Inf.*, p. 38, 2013.
- [7] C. Buzzetti Horta, "Una mirada al mercado vitivinícola nacional e internacional," *Odepa*, p. 18, 2018.
- [8] Oficina de Cambio Climático, "Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático Chile," p. 56, 2014.
- [9] R. Allen, L. Pereira, D. Raes, and M. Smith, "Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de agua de los cultivos.," *Fao*, p. 297, 2006.
- [10] B. González, *Modelación del balance hídrico, para mejorar la gestión del recurso en la cuenca del río limari (memoria de título)*. Santiago: Universidad de Chile, 2017.
- [11] P. Perry, *Efectos del cambio climático en los cultivos de palto, olivo y uva pisquera insertos dentro de un sistema de agricultura familiar campesina en la provincia del choapa (memoria de título)*. Santiago: Universidad de Chile, 2015.
- [12] J. L. Heilman, W. E. Heilman, and D. G. Moore, "(1982) Evaluating the Crop Coefficient Using Spectral Reflectance (AJ)," 1982.
- [13] Christopher M. U. Neale, Walter C. Bausch, and Dale F. Heermann, "Development of Reflectance-Based Crop Coefficients for Corn," *Trans. ASAE*, vol. 32, no. 6, p. 1891, 2013.
- [14] I. Campos, C. M. U. Neale, A. Calera, C. Balbontín, and J. González-Piqueras, "Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.)," *Agric. Water Manag.*, vol. 98, no. 1, pp. 45–54, 2010.
- [15] A. Calera Belmonte, A. M. Jochum, and A. Cuesta Garcia, "Space-assisted irrigation management: an operational perspective," *Remote Sens. Agric. Ecosyst. Hydrol. VI*, vol. 5568, p. 81, 2004.
- [16] C. Balbontín, M. Odi, R. Poblete, J. Garrido, I. Campos, and A. Calera Belmonte, "Uso de herramientas de teledetección y sig para el manejo del riego en los cultivos."
- [17] IPCC, *Informe de síntesis, Cambio Climático*. 2014.
- [18] M. I. Sánchez Martínez, "Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile," 2001.
- [19] CNR, "¿ Qué es una bandeja de evaporación Clase A ? ¿ Para que sirve ?," *Cent. Investig. y Transf. en Riego y Agroclimatol.*, p. 12, 2010.

- [20] A. R. Tenorio Urpis, *Relacion agua, suelo y planta. Informe N° 08 y 09*. Peru: Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga.
- [21] R. G. Allen, L. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*, vol. 56. 1998.
- [22] J. L. Wright, *New Evapotranspiration Crop Coefficients*, vol. 108. 1982.
- [23] R. D. Jackson, V. V. Salomonson, and T. J. Schmugge, "Irrigation management: future techniques," *Irrigation: challenges of the 80's (USA)*, vol. v. p. 197-. .
- [24] W. C. Bausch and C. M. U. Neale, "Crop coefficients derived from reflected canopy radiation - a concept," *Trans. Asae*, vol. 30, no. 3, pp. 703–709, 1987.
- [25] B. J. Choudhury, N. U. Ahmed, S. B. Idso, R. J. Reginato, and C. S. T. Daughtry, "Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations," *Remote Sens. Environ.*, vol. 50, no. 1, pp. 1–17, 1994.
- [26] D. J. Hunsaker, P. J. Pinter, E. M. Barnes, and B. A. Kimball, "Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index," *Irrig. Sci.*, vol. 22, no. 2, pp. 95–104, 2003.
- [27] W. C. Bausch, "Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn," *Remote Sens. Environ.*, vol. 46, no. 2, pp. 213–222, 1993.
- [28] H. Jayanthi, C. Neale, and J. L. Wright, *Development and validation of canopy reflectance-based crop coefficient for potato*, vol. 88. 2007.
- [29] M. González-Dugo and L. Mateos, *Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops*, vol. 95. 2008.
- [30] B. Duchemin *et al.*, "Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices," *Agric. Water Manag.*, vol. 79, pp. 1–27, 2006.
- [31] S. Er-Raki, A. Chehbouni, N. Guemouria, B. Duchemin, J. Ezzahar, and R. Hadria, *Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region*, vol. 87. 2007.
- [32] E. B. Raftn, B. Contor, and D. Ames, *Evaluation of a Method for Estimating Irrigated Crop-Evapotranspiration Coefficients from Remotely Sensed Data in Idaho*, vol. 134. 2008.
- [33] R. Singh and A. Kilic, *Estimation of Crop Coefficients Using Satellite Remote Sensing*, vol. 135. 2009.
- [34] M. González-Dugo *et al.*, *A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration*, vol. 149. 2009.
- [35] A. Cuesta, A. Montoro, A. M. Jochum, P. López, and A. Calera, "Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite," *ITEA Inf. Tec. Econ. Agrar.*, vol. 101, no. 3, pp. 212–224, 2005.
- [36] B. E. Alzate, "Capitulo II Indices De Vegetación," *Off. Sp. Sci. Appl.*, vol. 1, pp. 29–44, 2012.
- [37] J. W. Rouse Jr, R. H. Hass, J. A. Schell, D. W. Deering, and J. C. Harlan, "Monitoring the vernal advancement andretrogadation (Greenwave effect) of natural vegetation," no. September 1972, 1974.
- [38] J. J. Díaz García-Cervigón, "Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión," p. 78, 2015.
- [39] C. L. Meneses-Tovar, "El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de

la degradación del bosque,” vol. 62, pp. 39–46, 2011.

- [40] A. I. S. National Environmental Satellite, Data, “NOAA KLM User’s Guide,” vol. 33, no. 0, pp. 1–76.
- [41] USGS, “LANDSAT 7 (L7) DATA USERS HANDBOOK Version 1.0 June 2018,” vol. 7, no. June, 2018.
- [42] R. Lindsey and D. Herring, “Moderate Resolution Imaging,” pp. 1–25, 2013.
- [43] I. A. Fernandez and E. L. Herrero, “El satélite Landsat. Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ satélite Landsat,” p. 37, 2001.
- [44] IGAC-CIAF, “Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission),” *Cent. Investig. y Desarro. en Inf. Geográfica del IGAC -CIAF*, p. 46, 2013.
- [45] SEPOR, “Coeficiente de Cultivo Kc,” *Cent. Investig. y Transf. en Riego y Agroclimatología la Fac. Ciencias Agrar. la Univ. Talca*, p. 7, 2012.
- [46] S. Ortega, C. Acevedo, and M. Duarte, “Sistema de programación del riego de vides para mejorar la calidad de mostos y vino,” pp. 133–145, 2005.
- [47] G. Rojas Aguilera, “Valles Vitivinícolas de Chile,” 2011.
- [48] J. Campoy *et al.*, “Water use efficiency and light use efficiency in garlic using a remote sensing-based approach,” *Agric. Water Manag.*, vol. 219, no. March, pp. 40–48, 2019.
- [49] L. Gurovich and L. Vergara, “Riego deficitario controlado: la clave para la expresion del terroir de vinos premium.” .
- [50] R. Ferreira and G. Selles, “Manejo de riego en viñas,” 2005.
- [51] SAG, “Catastro Vitícola Nacional,” 2016.
- [52] R. Ferreyra E., G. Sellés V., R. Ruiz S., and I. Sellés M., “EFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO APLICADO EN DISTINTOS PERIODOS DE DESARROLLO DE LA VID cv. CHARDONNAY EN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DEL VINO ,” *Agricultura Técnica* , vol. 63. scielocl , pp. 277–286, 2003.
- [53] D. Santillan, “Análisis multitemporal de usos y coberturas de la tierra en el período 2005-2016 en el valle de Sico-Paulaya, Honduras,” p. 27, 2016.
- [54] M. Issn, “Estimación de la temperatura superficial en San Carlos- Estado Cojedes, Venezuela empleando sensores remotos,” *Multiciencias*, vol. 16, no. 4, pp. 363–368, 2018.
- [55] CIREN, “Informe Técnico Final Monitoreo De Cambios , Corrección Cartográfica Y Regiones De Valparaíso , Metropolitana Y Libertador Bernardo O’Higgins,” p. 131, 2013.
- [56] Corporación Nacional Forestal (CONAF), “Catastro de Uso del Suelo y Vegetación - Monitoreo y Actualización Región del Bío Bío y Región del Maule,” p. 22, 2011.
- [57] M. Cabezas-Gutiérrez and R. E. Carlos Andrés, “Técnicas hortícolas para optimizar el tamaño y la calidad del fruto del naranjo (*Citrus sinensis* L.),” *Agron. Colomb.*, vol. 28, no. 1, pp. 55–62, 2010.
- [58] G. Selles van Sch, R. Ferreyra E, I. Selles M, and G. Lemus S, “Efecto de Diferentes Regimenes de Riego Sobre la Carga Frutal, Tamaño de Fruta y Rendimiento del Olivo cv. Sevillana,” *Agric. Técnica*, vol. 66, no. 1, pp. 48–56, Mar. 2006.

## Anexo 1: Estaciones meteorológicas

➤ Región General Libertador Bernardo O'Higgins.

Tabla A1.1 - Estaciones evaporimétricas zona 1: región General Libertador Bernardo O'Higgins.

| ID | Código     | Nombre           | Periodo de Instal. | Registro Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|------------|------------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|---------|
|    |            |                  |                    |                  |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | 06015003-6 | RENGO            | 1971               | /                | 310           | 34°24'      | 70°52'  |
| 2  | 06034003-K | CONVENTO VIEJO   | 1971               | /                | 250           | 34°45'      | 71°07'  |
| 3  | 06036001-4 | LA CANDELARIA    | 1974               | /                | 320           | 34°46'      | 71°24'  |
| 4  | 06130002-3 | RANGUILI         | 1981               | /                | 130           | 34°51'      | 71°44'  |
| 5  | 06132002-4 | NILAHUE BARAHONA | 1969               | /                | 90            | 34°33'      | 71°45'  |

Tabla A1.2 - Estaciones pluviométricas zona 1: región General Libertador Bernardo O'Higgins.

| ID | Código     | Nombre                    | Periodo de Instal. | Registro Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|------------|---------------------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|---------|
|    |            |                           |                    |                  |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | 06003001-4 | RIO CACHAPOAL             | 1990               | /                | 1127          | 34°20'      | 70°22'  |
| 2  | 06006001-0 | RIO PANGAL EN PANGAL      | 2001               | /                | 1500          | 34°15'      | 70°20'  |
| 3  | 06008009-7 | CANAL. SAUZAL PTE. TERMAS | 2005               | /                | 750           | 34°14'      | 70°33'  |
| 4  | 06010015-2 | RANCAGUA (CACHAPOAL)      | 2002               | /                | 520           | 34°45'      | 70°45'  |
| 5  | 06012003-K | COLTAUCO                  | 1978               | /                | 280           | 34°16'      | 71°02'  |
| 6  | 06013005-1 | POPETA                    | 1971               | /                | 480           | 34°26'      | 70°46'  |
| 7  | 06015003-6 | RENGO                     | 1971               | /                | 310           | 34°25'      | 70°52'  |
| 8  | 06016004-K | SAN FERNANDO - DCP        | 2002               | /                | 350           | 34°58'      | 70°36'  |
| 9  | 06018010-5 | MILLAHUE                  | 1972               | /                | 220           | 34°31'      | 71°12'  |
| 10 | 06019003-8 | RIO CACHAPOAL EN PTE.     | 2002               | /                | 115           | 34°16'      | 71°22'  |
| 11 | 06019005-4 | PICHIDEGUA                | 1974               | /                | 125           | 34°17'      | 71°24'  |
| 12 | 06027003-1 | LA RUFINA                 | 1929               | /                | 735           | 34°44'      | 70°45'  |
| 13 | 06028001-0 | RIO TINGUIRIRICA EN BAJO  | 1999               | /                | 560           | 34°43'      | 70°49'  |
| 14 | 06034003-K | CONVENTO VIEJO            | 1971               | /                | 250           | 34°46'      | 71°07'  |
| 15 | 06036001-4 | LA CANDELARIA             | 1974               | /                | 320           | 34°46'      | 71°24'  |
| 16 | 06044001-8 | COCALAN                   | 1978               | /                | 130           | 34°12'      | 71°16'  |
| 17 | 06055003-4 | LITUECHE                  | 1979               | /                | 250           | 34°07'      | 71°43'  |
| 18 | 06056003-K | RAPEL                     | 1940               | /                | 25            | 33°56'      | 71°44'  |
| 19 | 06120001-0 | PICHILEMU                 | 1980               | /                | 5             | 34°23'      | 72°00'  |
| 20 | 06130001-5 | EL MEMBRILLO              | 1981               | /                | 110           | 34°48'      | 71°37'  |
| 21 | 06130002-3 | RANGUILI                  | 1981               | /                | 130           | 34°52'      | 71°44'  |
| 22 | 06132002-4 | NILAHUE BARAHONA          | 1969               | /                | 90            | 34°34'      | 71°45'  |

Tabla A1.3 - Estaciones de temperatura zona 1: región General Libertador Bernardo O'Higgins.

| ID | Código     | Nombre           | Periodo de Instal. | Registro de Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|------------|------------------|--------------------|---------------------|---------------|-------------|---------|
|    |            |                  |                    |                     |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | 06015003-6 | RENGO            | 1971               | /                   | 310           | 34°25'      | 70°52'  |
| 2  | 06020001-7 | TERMAS DEL FLACO | 1999               | /                   | 2650          | 34°53'      | 70°20'  |
| 3  | 06034003-K | CONVENTO VIEJO   | 1971               | /                   | 250           | 34°46'      | 71°07'  |

Tabla A1.4 - Estaciones de humedad relativa zona 1: región General Libertador Bernardo O'Higgins.

| ID | Nombre                      | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|-----------------------------|---------------|-------------|---------|
|    |                             |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | Mostazal                    | 500           | -34°00'     | -70°70' |
| 2  | Hidango                     | 288           | -34°11'     | -71°80' |
| 3  | Codegua Norte Ex Rancagua   | 532           | -34°11'     | -70°64' |
| 4  | Graneros Norte              | 491           | -34°06'     | -70°71' |
| 5  | Codegua                     | 516           | -34°11'     | -70°65' |
| 6  | Punta Cortes                | 475           | -34°17'     | -70°79' |
| 7  | Olivar Alto                 | 452           | -34°20'     | -70°82' |
| 8  | San Vicente TT              | 216           | -34°46'     | -71°05' |
| 9  | Coltauco                    | 299           | -34°24'     | -71°01' |
| 10 | Ventisquero-Apalta          | 245           | -34°61'     | -71°25' |
| 11 | La Estrella Sur Ex Pumanque | 286           | -34°21'     | -71°72' |
| 12 | La Estrella                 | 286           | -34°21'     | -71°72' |
| 13 | Rapel                       | 119           | -34°22'     | -71°30' |
| 14 | Sta. Brisila                | 119           | -34°30'     | -71°32' |
| 15 | Peumo Norte Ex Las Cabras   | 133           | -34°33'     | -71°26' |
| 16 | Palmilla                    | 142           | -34°55'     | -71°40' |
| 17 | Ventisquero-Peralillo       | 125           | -34°39'     | -71°45' |
| 18 | La Rosa Oeste               | 147           | -34°33'     | -71°24' |
| 19 | Montes                      | 167           | -34°34'     | -71°65' |
| 20 | Anakena                     | 389           | -34°30'     | -70°77' |
| 21 | Quinta de Tilcoco           | 301           | -34°36'     | -70°94' |
| 22 | Marchigue                   | 136           | -34°41'     | -71°61' |
| 23 | San Fernando                | 329           | -34°58'     | -70°98' |
| 24 | El Tambo                    | 244           | -34°47'     | -70°99' |
| 25 | Casa Silva-Los Lingues      | 311           | -34°50'     | -70°89' |
| 26 | Malloa                      | 467           | -34°50'     | -70°84' |
| 27 | Luis Felipe Edwards         | 216           | -34°69'     | -71°16' |
| 28 | Chimbarongo                 | 317           | -34°67'     | -71°03' |
| 29 | El Carmen                   | 354           | -34°61'     | -70°98' |
| 30 | Conosur                     | 300           | -34°72'     | -71°04' |
| 31 | Santa Cruz                  | 160           | -34°69'     | -71°40' |
| 32 | Lapostolle-Apalta           | 216           | -34°59'     | -71°30' |
| 33 | Lolol                       | 104           | -34°71'     | -71°63' |
| 34 | Hacienda Araucano-Lolol     | 116           | -34°73'     | -71°59' |
| 35 | Chépica                     | 189           | -34°74'     | -71°26' |
| 36 | Nancagua 2                  | 174           | -34°66'     | -71°28' |

➤ Región del Maule.

Tabla A1.5 - Estaciones evaporimétricas zona 2: región del Maule.

| ID | Código     | Nombre           | Periodo de Instal. | Registro Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|------------|------------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|---------|
|    |            |                  |                    |                  |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | 07116005-K | POTRERO GRANDE   | 1971               | /                | 460           | 35°10'      | 71°5'   |
| 2  | 07331002-4 | DIGUA EMBALSE    | 1947               | /                | 390           | 36°14'      | 71°32'  |
| 3  | 07337002-7 | TUTUVEN EMBALSE  | 1975               | /                | 165           | 35°53'      | 72°22'  |
| 4  | 07345001-2 | PARRAL           | 1964               | /                | 175           | 36°11'      | 71°49'  |
| 5  | 07350006-0 | BULLILEO EMBALSE | 1930               | /                | 600           | 36°17'      | 71°24'  |
| 6  | 07352003-7 | LIGUAY           | 1975               | /                | 145           | 35°56'      | 71°41'  |
| 7  | 07355007-6 | ANCOA EMBALSE    | 1957               | /                | 430           | 35°54'      | 71°17'  |
| 8  | 07357003-4 | MELOZAL          | 1959               | /                | 110           | 35°46'      | 71°47'  |
| 9  | 07358007-2 | LINARES          | 1967               | /                | 157           | 35°50'      | 71°35'  |
| 10 | 07378002-0 | TALCA U.C.       | 1982               | /                | 130           | 35°25'      | 71°37'  |
| 11 | 07378003-9 | COLORADO         | 1963               | /                | 420           | 35°38'      | 71°15'  |
| 12 | 07381003-5 | PENCAHUE         | 1976               | /                | 55            | 35°22'      | 71°50'  |

Tabla A1.6 - Estaciones pluviométricas zona 2: región del Maule.

| ID | Código     | Nombre              | Periodo de Instal. | Registro Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|------------|---------------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|---------|
|    |            |                     |                    |                  |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | 06130003-1 | LA PALMA            | 1981               | /                | 120           | 34°57'      | 71°35'  |
| 2  | 07104005-4 | EL MANZANO          | 1959               | /                | 574           | 34°57'      | 70°55'  |
| 3  | 07106007-1 | SANTA SUSANA        | 1981               | /                | 410           | 34°54'      | 71°02'  |
| 4  | 07116004-1 | MONTE OSCURO        | 1994               | /                | 645           | 35°11'      | 71°03'  |
| 5  | 07116005-K | POTRERO GRANDE      | 1971               | /                | 460           | 35°11'      | 71°05'  |
| 6  | 07118003-4 | CURICO              | 1971               | /                | 215           | 34°59'      | 71°14'  |
| 7  | 07119007-2 | LONTUE              | 1969               | /                | 215           | 35°02'      | 71°17'  |
| 8  | 07121003-0 | VILLA PRAT          | 1992               | /                | 90            | 35°05'      | 71°36'  |
| 9  | 07200001-3 | GUALLECO            | 1961               | /                | 100           | 35°14'      | 71°58'  |
| 10 | 07210001-8 | PUTU                | 1992               | /                | 36            | 35°12'      | 71°17'  |
| 11 | 07320002-4 | ARMERILLO           | 1916               | /                | 530           | 35°42'      | 71°04'  |
| 12 | 07331002-4 | DIGUA EMBALSE       | 1947               | /                | 390           | 36°14'      | 71°32'  |
| 13 | 07332003-8 | SAN MANUEL          | 1956               | /                | 270           | 36°21'      | 71°38'  |
| 14 | 07335004-2 | QUELLA              | 1961               | /                | 130           | 36°03'      | 72°05'  |
| 15 | 07336003-K | EL ALAMO            | 1994               | /                | 180           | 36°06'      | 72°25'  |
| 16 | 07337002-7 | TUTUVEN EMBALSE     | 1975               | /                | 165           | 35°53'      | 72°22'  |
| 17 | 07340002-3 | LA ESTRELLA         | 1992               | /                | 200           | 35°47'      | 72°11'  |
| 18 | 07340003-1 | LOS HUINGANES       | 1994               | /                | 132           | 35°56'      | 71°56'  |
| 19 | 07341002-9 | NIRIVILO            | 1956               | /                | 200           | 35°39'      | 71°56'  |
| 20 | 07342002-4 | HUERTA DEL MAULE    | 1992               | /                | 218           | 34°57'      | 71°35'  |
| 21 | 07345001-2 | PARRAL              | 1964               | /                | 175           | 36°11'      | 71°49'  |
| 22 | 07350006-0 | BULLILEO EMBALSE    | 1930               | /                | 600           | 36°17'      | 71°24'  |
| 23 | 07352002-9 | LA SEXTA DE LONGAVI | 1992               | /                | 220           | 36°06'      | 71°36'  |
| 24 | 07352003-7 | LIGUAY              | 1975               | /                | 145           | 35°56'      | 71°41'  |
| 25 | 07353001-6 | JUAN AMIGO          | 1992               | /                | 460           | 36°04'      | 71°23'  |

|    |            |                    |      |   |      |        |        |
|----|------------|--------------------|------|---|------|--------|--------|
| 26 | 07355006-8 | HORNILLO           | 1961 | / | 810  | 35°52' | 71°07' |
| 27 | 07355007-6 | ANCOA EMBALSE      | 1957 | / | 430  | 35°54' | 71°17' |
| 28 | 07357003-4 | MELOZAL            | 1950 | / | 110  | 35°46' | 71°47' |
| 29 | 07358007-2 | LINARES            | 1967 | / | 157  | 35°50' | 71°35' |
| 30 | 07358008-0 | COLBUN (MAULE SUR) | 1959 | / | 280  | 35°37' | 71°24' |
| 31 | 07359005-1 | SAN JAVIER         | 1970 | / | 135  | 35°35' | 71°39' |
| 32 | 07370001-9 | FUNDO EL RADAL     | 1992 | / | 685  | 35°25' | 71°02' |
| 33 | 07371002-2 | AGUAS FRIAS        | 1992 | / | 560  | 35°18' | 71°05' |
| 34 | 07373003-1 | EL GUINDO          | 1964 | / | 250  | 35°15' | 71°19' |
| 35 | 07373004-K | SAN RAFAEL         | 1992 | / | 136  | 35°18' | 71°31' |
| 36 | 07374004-5 | VILCHES ALTOS      | 1992 | / | 1039 | 35°35' | 71°05' |
| 37 | 07374005-3 | HUAPI              | 1969 | / | 250  | 35°29' | 71°17' |
| 38 | 07376002-K | EL DURAZNO         | 1992 | / | 275  | 35°29' | 71°29' |
| 39 | 07378002-0 | TALCA U.C.         | 1982 | / | 130  | 35°25' | 71°37' |
| 40 | 07378003-9 | COLORADO           | 1963 | / | 420  | 35°38' | 71°15' |
| 41 | 07381003-5 | PENCAHUE           | 1976 | / | 55   | 35°22' | 71°50' |
| 42 | 07384002-3 | CONSTITUCION       | 1992 | / | 10   | 35°19' | 72°24' |
| 43 | 08142001-7 | MANGARRAL          | 1992 | / | 150  | 36°14' | 72°22' |

Tabla A1.7 - Estaciones de temperatura zona 2: región del Maule.

| ID | Código     | Nombre                 | Periodo de Instal. | Registro Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|------------|------------------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|---------|
|    |            |                        |                    |                  |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | 07116005-K | POTRERO GRANDE         | 1971               | /                | 460           | 35°11'      | 71°05'  |
| 2  | 07301000-4 | LO AGUIRRE - DCP       | 1999               | /                | 2000          | 35°58'      | 70°34'  |
| 3  | 07317005-2 | RIO MELADO EN EL SALTO | 2003               | /                | 730           | 35°53'      | 71°01'  |
| 4  | 07321002-K | RIO MAULE EN ARMERILLO | 2001               | /                | 470           | 35°42'      | 71°07'  |
| 5  | 07331002-4 | DIGUA EMBALSE          | 1947               | /                | 390           | 36°14'      | 71°32'  |
| 6  | 07345001-2 | PARRAL                 | 1964               | /                | 175           | 36°11'      | 71°49'  |
| 7  | 07355007-6 | ANCOA EMBALSE          | 1957               | /                | 430           | 35°54'      | 71°17'  |
| 8  | 07378002-0 | TALCA U.C.             | 1982               | /                | 130           | 35°25'      | 71°37'  |
| 9  | 07378003-9 | COLORADO               | 1963               | /                | 420           | 35°38'      | 71°15'  |
| 10 | 07379002-6 | RIO CLARO EN RAUQUEN   | 1999               | /                | 60            | 35°27'      | 71°47'  |
| 11 | 07381003-5 | PENCAHUE               | 1976               | /                | 55            | 35°22'      | 71°50'  |

Tabla A1.8 - Estaciones de humedad relativa zona 2: región del Maule.

| ID | Nombre                 | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|------------------------|---------------|-------------|---------|
|    |                        |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | Teno                   | 285           | -34°88'     | -71°17' |
| 2  | Sagrada Familia - 1    | 155           | -34,00'     | -71°37' |
| 3  | Rauco                  | 204           | -34°93'     | -71°28' |
| 4  | Terramater             | 129           | -35°01'     | -71°43' |
| 5  | Viñedos Puertas        | 181           | -34°99'     | -71°28' |
| 6  | Tres Esquinas          | 307           | -35°14'     | -71°22' |
| 7  | Morza Norte Ex Peteroa | 296           | -34°84'     | -71°02' |
| 8  | Morza                  | 324           | -34°85'     | -71°02' |
| 9  | Lontué                 | 229           | -35°05'     | -71°25' |

|           |                    |     |         |         |
|-----------|--------------------|-----|---------|---------|
| <b>10</b> | Aresti             | 253 | -35°15' | -71°30' |
| <b>11</b> | San Pedro-Molina   | 223 | -35°10' | -71°34' |
| <b>12</b> | Curicó             | 215 | -34°97' | -71°22' |
| <b>13</b> | San Rafael         | 141 | -35°30' | -71°48' |
| <b>14</b> | San Pedro-Pencahue | 45  | -35°33' | -71°77' |
| <b>15</b> | Chanco             | 383 | -35°45' | -72°31' |
| <b>16</b> | Torres             | 419 | -35°57' | -72°29' |
| <b>17</b> | Pencahue           | 50  | -35°46' | -71°77' |
| <b>18</b> | Colbún             | 234 | -35°66' | -71°45' |
| <b>19</b> | San Javier         | 149 | -35°63' | -71°60' |
| <b>20</b> | Casas Patronales   | 190 | -35°49' | -71°45' |
| <b>21</b> | San Clemente       | 202 | -35°53' | -71°48' |
| <b>22</b> | J. Bouchon         | 159 | -35°57' | -71°00' |
| <b>23</b> | Maule              | 112 | -35°58' | -71°68' |
| <b>24</b> | El Aromo           | 139 | -35°54' | -71°60' |
| <b>25</b> | Villa Alegre       | 113 | -35°70' | -71°68' |
| <b>26</b> | Sauzal             | 136 | -35°71' | -72°11' |
| <b>27</b> | Yerbas Buenas 2    | 162 | -35°69' | -71°55' |
| <b>28</b> | Yerbas Buenas      | 135 | -35°76' | -71°57' |
| <b>29</b> | Coronel de Maule   | 158 | -36°06' | -72°48' |
| <b>30</b> | Santa Sofía        | 139 | -35°98' | -72°36' |
| <b>31</b> | Cauquenes          | 157 | -35°96' | -72°29' |
| <b>32</b> | Los Despachos      | 162 | -36°06' | -72°37' |
| <b>33</b> | Undurraga          | 151 | -35°99' | -72°26' |
| <b>34</b> | Odjfell            | 147 | -36°14' | -72°27' |
| <b>35</b> | Linares 2          | 191 | -35°93' | -71°57' |
| <b>36</b> | Longaví Norte      | 171 | -36°05' | -71°68' |
| <b>37</b> | Longaví Sur        | 158 | -35°95' | -71°61' |
| <b>38</b> | Parral             | 197 | -36°21' | -71°74' |
| <b>39</b> | Parral Norte       | 195 | -36°23' | -71°73' |

---

➤ Región del Ñuble

Tabla A1.9 - Estaciones evaporimétricas zona 3: región del Ñuble.

| ID | Código     | Nombre       | Periodo de Instal. | Registro Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|------------|--------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|---------|
|    |            |              |                    |                  |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | 08105004-K | CARACOL      | 1987               | /                | 620           | 36°38'      | 71°23'  |
| 2  | 08113001-9 | COIHUECO EMB | 1971               | /                | 300           | 36°38'      | 71°47'  |
| 3  | 08130006-2 | DIGUILLIN    | 1959               | /                | 670           | 36°52'      | 71°38'  |

Tabla A1.10- Estaciones pluviométricas zona 3: región del Ñuble.

| ID | Código     | Nombre                  | Periodo de Instal. | Registro Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|------------|-------------------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|---------|
|    |            |                         |                    |                  |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | 08105004-K | CARACOL                 | 1987               | /                | 620           | 36°28'      | 71°23'  |
| 2  | 08105005-8 | CAMAN                   | 1992               | /                | 660           | 36°40'      | 71°17'  |
| 3  | 08106002-9 | RIO ÑUBLE EN SAN FABIAN | 2001               | /                | 450           | 36°35'      | 71°31'  |
| 4  | 08106003-7 | SAN FABIAN              | 1956               | /                | 460           | 36°33'      | 71°32'  |
| 5  | 08113001-9 | COIHUECO EMB            | 1971               | /                | 300           | 36°39'      | 71°48'  |
| 6  | 08117002-9 | CHILLAN VIEJO           | 1977               | /                | 125           | 36°38'      | 72°06'  |
| 7  | 08118003-2 | MILLAUQUEN              | 1992               | /                | 130           | 36°22'      | 72°07'  |
| 8  | 08118004-0 | SAN AGUSTIN DE PUDUAL   | 1993               | /                | 35            | 36°25'      | 71°35'  |
| 9  | 08123004-8 | CHOLGUAN                | 1956               | /                | 225           | 37°09'      | 72°04'  |
| 10 | 08124005-1 | MAYULERMO               | 1992               | /                | 385           | 36°49'      | 71°52'  |
| 11 | 08130003-8 | FUNDO ATACALCO          | 1930               | /                | 730           | 36°55'      | 71°34'  |
| 12 | 08130004-6 | LAS TRANCAS             | 1961               | /                | 1200          | 36°54'      | 71°30'  |
| 13 | 08130006-2 | DIGUILLIN               | 1959               | /                | 670           | 36°52'      | 71°38'  |
| 14 | 08130007-0 | SAN LORENZO             | 1961               | /                | 850           | 36°58'      | 71°31'  |
| 15 | 08132002-0 | PEMUCO                  | 1971               | /                | 200           | 36°58'      | 71°06'  |
| 16 | 08133003-4 | CHILLANCITO             | 1954               | /                | 70            | 36°46'      | 72°26'  |
| 17 | 08135003-5 | NUEVA ALDEA             | 1956               | /                | 25            | 36°39'      | 71°27'  |
| 18 | 08135004-3 | CANCHA LOS LITRES       | 1993               | /                | 200           | 36°42'      | 72°34'  |
| 19 | 08140001-6 | RAFAEL                  | 1993               | /                | 210           | 36°37'      | 72°37'  |
| 20 | 08141002-K | COELEMU                 | 1961               | /                | 30            | 36°29'      | 72°42'  |

Tabla A1.11 - Estaciones de temperatura zona 3: región del Ñuble.

| ID | Código     | Nombre       | Periodo de Instal. | Registro Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|------------|--------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|---------|
|    |            |              |                    |                  |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | 08105004-K | CARACOL      | 1987               | /                | 620           | 36°38'      | 71°23'  |
| 2  | 08113001-9 | COIHUECO EMB | 1971               | /                | 300           | 36°39'      | 71°48'  |
| 3  | 08130006-2 | DIGUILLIN    | 1959               | /                | 670           | 36°52'      | 71°38'  |

Tabla A1.12 - Estaciones de humedad relativa zona 3: región de Ñuble.

| ID | Nombre                          | Altura<br>[msnm] | Coordenadas |         |
|----|---------------------------------|------------------|-------------|---------|
|    |                                 |                  | Lat. S      | Long. W |
| 1  | Ñiquén                          | 154              | -36°29'     | -71°89' |
| 2  | Ninhue                          | 78               | -36°40'     | -72°40' |
| 3  | Sta Rosa                        | 181              | -36°54'     | -71°92' |
| 4  | Los Coligues Ex - Chillán Viejo | 67               | -36°63'     | -72°23' |
| 5  | Bulnes                          | 56               | -36°74'     | -72°37' |
| 6  | Portezuelo                      | 106              | -36°53'     | -72°37' |
| 7  | Pinto                           | 301              | -36°71'     | -71°88' |
| 8  | Quillón                         | 62               | -36°75'     | -72°50' |
| 9  | Nueva Aldea                     | 71               | -36°65'     | -72°51' |
| 10 | San Ignacio                     | 175              | -36°84'     | -72°12' |
| 11 | San Nicolás                     | 112              | -36°52'     | -72°09' |
| 12 | Termas de Chillán               | 1716             | -36°90'     | -71°41' |
| 13 | Coihueco                        | 211              | -36°56'     | -71°82' |
| 14 | Trehualem Ex - San Ignacio Sur  | 366              | -36°92'     | -71°89' |
| 15 | Navidad                         | 305              | -36°91'     | -71°94' |
| 16 | Yungay                          | 259              | -37°14'     | -72°01' |

➤ Región del Biobío

Tabla A1.13 - Estaciones evaporimétricas zona 4: región del Biobío.

| ID | Código     | Nombre   | Periodo de Instal. | Registro Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|------------|----------|--------------------|------------------|---------------|-------------|---------|
|    |            |          |                    |                  |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | 08822008-0 | CONTULMO | 1987               | /                | 25            | 38°0'       | 73°13'  |
| 2  | 08318002-1 | QUILACO  | 1948               | /                | 225           | 37°40'      | 71°59'  |

Tabla A1.14 - Estaciones pluviométricas zona 4: región del Biobío.

| ID | Código     | Nombre              | Periodo de Instal. | Registro Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|------------|---------------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|---------|
|    |            |                     |                    |                  |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | 08122002-6 | TRUPAN              | 1963               | /                | 480           | 37°16'      | 71°49'  |
| 2  | 08122003-4 | TUCAPEL             | 1975               | /                | 330           | 37°17'      | 71°57'  |
| 3  | 08124004-3 | LAS CRUCES          | 1993               | /                | 650           | 37°10'      | 71°48'  |
| 4  | 08210002-4 | DICHATO             | 1980               | /                | 5             | 36°32'      | 72°55'  |
| 5  | 08220005-3 | LAS PATAGUAS        | 1993               | /                | 260           | 36°45'      | 72°53'  |
| 6  | 08220006-1 | ANDALIEN            | 2001               | /                | 40            | 36°49'      | 72°55'  |
| 7  | 08316001-2 | QUILLAILEO          | 1992               | /                | 500           | 37°37'      | 71°40'  |
| 8  | 08317003-4 | CERRO EL PADRE      | 1943               | /                | 400           | 37°46'      | 71°52'  |
| 9  | 08318002-1 | QUILACO             | 1948               | /                | 225           | 37°40'      | 71°59'  |
| 10 | 08319002-7 | SAN CARLOS DE PUREN | 1985               | /                | 150           | 37°35'      | 72°16'  |
| 11 | 08320001-4 | SAN LORENZO BIO-BIO | 1992               | /                | 930           | 37°34'      | 71°30'  |
| 12 | 08330002-7 | PILGUEN             | 1992               | /                | 300           | 37°51'      | 72°12'  |
| 13 | 08332002-8 | MULCHEN             | 1962               | /                | 130           | 37°43'      | 72°15'  |
| 14 | 08334002-9 | LOS ANGELES         | 1962               | /                | 90            | 37°30'      | 72°31'  |
| 15 | 08358004-6 | POCO A POCO         | 1992               | /                | 620           | 37°52'      | 71°59'  |
| 16 | 08364001-4 | LAS ACHIRAS         | 1964               | /                | 125           | 37°21'      | 72°23'  |
| 17 | 08367001-0 | LAJA                | 1961               | /                | 100           | 37°15'      | 72°43'  |
| 18 | 08410001-3 | CONCEPCION DGA      | 1996               | /                | 15            | 36°50'      | 73°06'  |
| 19 | 08520000-3 | CARANPANGUE         | 2001               | /                | 5             | 37°16'      | 73°15'  |
| 20 | 08700001-K | CURANILAHUE         | 1997               | /                | 160           | 37°29'      | 73°20'  |
| 21 | 08821005-0 | CAÑETE              | 1961               | /                | 50            | 37°48'      | 73°23'  |
| 22 | 08822008-0 | CONTULMO            | 1987               | /                | 25            | 38°00'      | 73°13'  |
| 23 | 08930000-2 | TIRUA               | 2001               | /                | 5             | 38°14'      | 73°29'  |

Tabla A1.15 - Estaciones de temperatura zona 4: región del Biobío.

| ID | Código     | Nombre              | Periodo de Instal. | Registro Suspen. | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|------------|---------------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|---------|
|    |            |                     |                    |                  |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | 08318002-1 | QUILACO             | 1948               | /                | 225           | 37°40'      | 71°59'  |
| 2  | 08372001-8 | ALTO MALLINES - DCP | 2002               | /                | 1770          | 37°09'      | 71°14'  |
| 3  | 08822008-0 | CONTULMO            | 1987               | /                | 25            | 38°00'      | 73°13'  |

Tabla A1.16 - Estaciones de humedad relativa zona 4: región del Biobío

| ID | Nombre         | Altura [msnm] | Coordenadas |         |
|----|----------------|---------------|-------------|---------|
|    |                |               | Lat. S      | Long. W |
| 1  | Chiguayante    | 14            | -36°91'     | -73°04' |
| 2  | Coronel        | 41            | -37°00'     | -73°14' |
| 3  | Punta Parra    | 196           | -36°67'     | -72°96' |
| 4  | Las Viñas      | 148           | -37°50'     | -72°30' |
| 5  | Human          | 190           | -37°43'     | -72°24' |
| 6  | Lebu           | 195           | -37°68'     | -73°52' |
| 7  | Mulchén        | 180           | -37°70'     | -72°22' |
| 8  | Guilisasti     | 187           | -37°65'     | -72°22' |
| 9  | Cañete         | 29            | -37°89'     | -73°41' |
| 10 | Negrete        | 85            | -37°60'     | -72°47' |
| 11 | Los Ángeles    | 87            | -37°45'     | -72°52' |
| 12 | Tierras Nobles | 87            | -37°44'     | -72°62' |

## Anexo 2: Cobertura de estaciones evaporimétricas

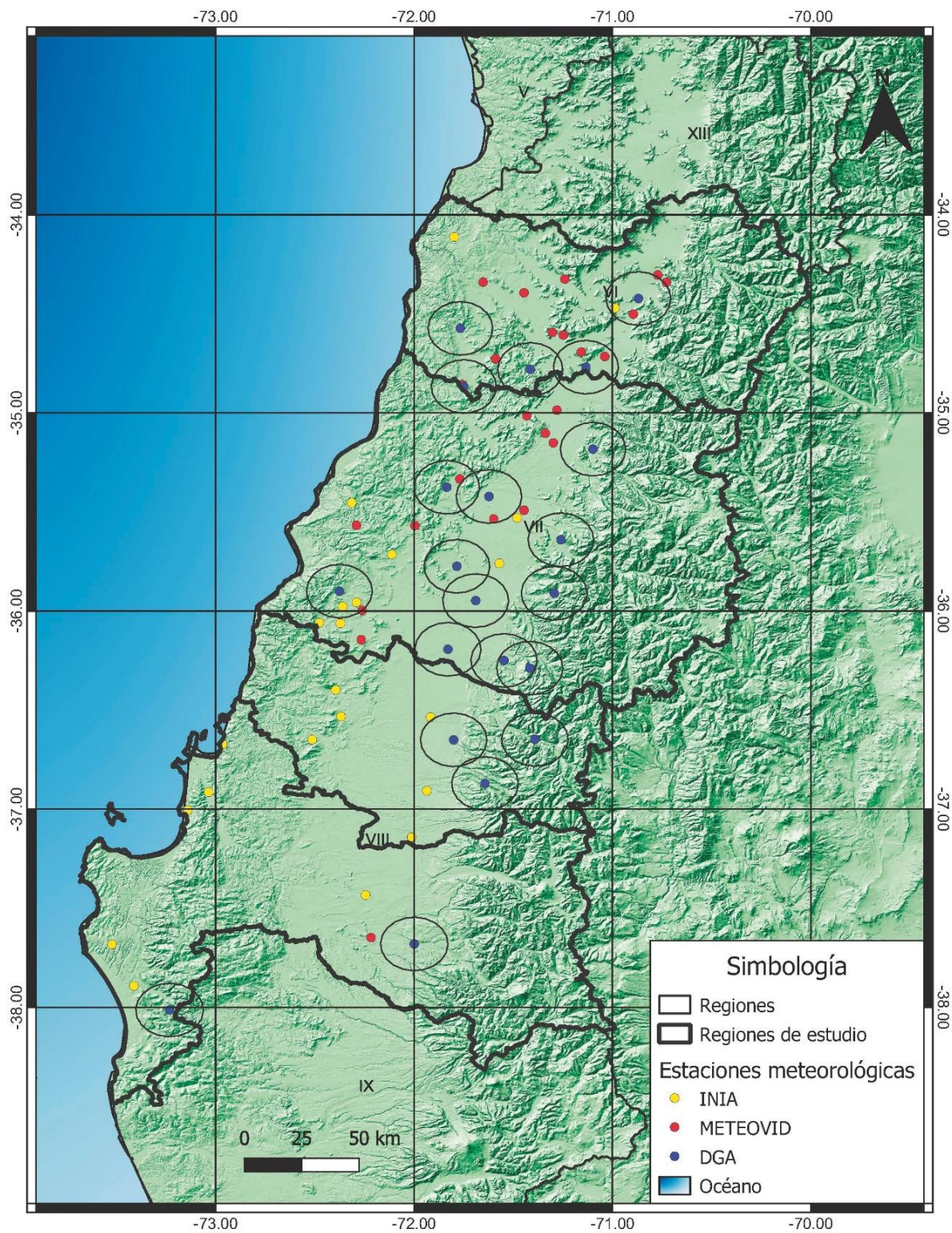


Figura A2.1 - Análisis espacial vectorial estaciones que registran evapotranspiración (DGA) a 10 Km