



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería Agrícola - Programa de Magister en Ingeniería Agrícola

**Balance anual de agua en cultivos utilizando datos
de serie de tiempo armonizados de Landsat-8 y
Sentinel- 2**

Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería Agrícola con mención
en Recursos Hídricos

VIVIANA ALEJANDRA GAVILÁN PINO

CHILLAN-CHILE

2019

Profesores Guías: Dr. Eduardo Holzapfel H.
Dr. Mario Lillo S.

Dpto. de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Balance anual de agua en cultivos utilizando datos de serie de tiempo armonizados de Landsat-8 y Sentinel-2

Aprobado por:

Eduardo Holzapfel Hoces
Ing. Agrónomo, Ph.D.

Profesor Guía

Mario Lillo Saavedra
Ing. Civil Eléctrico, Ph.D.

Profesor Guía

Waldo Lama Torres
Ing. Civil Agrícola, M.Sc.

Evaluador Externo

Javier Ferrer Valenzuela
Ing. Civil Químico, Dr.

Director del Programa



TABLA DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE TABLAS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
RESUMEN.....	vi
SUMMARY.....	vii
INTRODUCCIÓN.....	1
HIPÓTESIS.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
MATERIALES Y MÉTODOS.....	4
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
CONCLUSIÓN.....	28
REFERENCIAS.....	29

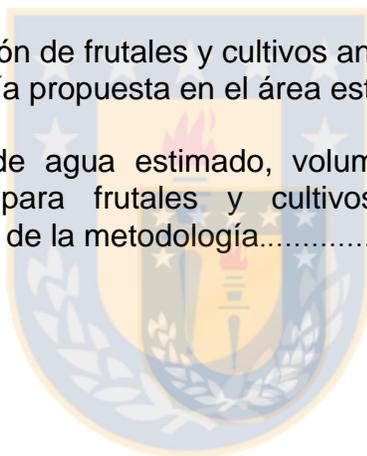
ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1:	Características técnicas de los satélites L8 y S2.....	6
Tabla 2:	Fecha de las imágenes del satélite L8 y S2.....	6
Tabla 3:	Coeficientes del ajuste lineal entre ET_{L8} y $NDVI_{L8}$ (a y b) y coeficiente de correlación de Pearson (r) para frutales y cultivos anuales en los tres días analizados.....	18

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1:	Ubicación del sitio de estudio.....	4
Figura 2:	Superficie por tipo de cubierta agrícola. A) frutales y B) cultivos anuales.....	5
Figura 3:	Esquema global de la metodología propuesta.....	7
Figura 4:	Esquema de exclusión de los puntos de muestreo fuera del rango de confianza.....	9
Figura 5:	Composición de la serie temporal de $NDVI'$ durante la temporada agrícola.....	10
Figura 6:	Esquema de asignación de las ecuaciones de ajuste lineal obtenidas a partir de la relación entre la $ET_{L8} - NDVI_{L8}$ a la serie temporal de $NDVI'$ durante la temporada.....	12
Figura 7:	Comparación del $NDVI$ de S2 y L8 para la cubierta agrícola de A) frutales y B) cultivos anuales. La línea continua es 1:1 y la línea discontinua corresponde al ajuste de mínimos cuadrados lineales.....	16
Figura 8:	Composición de la serie temporal de $NDVI'$ durante la temporada agrícola.....	17

Figura 9:	Mapas de evapotranspiración diaria (\widehat{ET}) en cuatro meses de la temporada diciembre 2017 a marzo 2018 para la cubierta agrícola del sitio de estudio. De manera ampliada se muestra; A) tomate industrial y B) ciruelos.....	19
Figura 10:	Identificación de los frutales y cultivos anuales seleccionados para mostrar el comportamiento de la ETc diaria durante la temporada analizada.....	21
Figura 11:	Estimación de la evapotranspiración de cultivo (ETc) diaria y precipitación (Pp) durante la temporada analizada, utilizando la metodología descrita.....	22
Figura 12:	Demanda anual de agua estimada y potencial para frutales y cultivos anuales representativos del sitio de estudio.....	23
Figura 13:	Identificación de frutales y cultivos anuales donde se evaluó la metodología propuesta en el área estudiada.....	25
Figura 14:	Volumen de agua estimado, volumen aplicado y volumen potencial para frutales y cultivos seleccionados en la evaluación de la metodología.....	26



Balance anual de agua en cultivos utilizando datos de serie de tiempo armonizados de Landsat-8 y Sentinel-2

RESUMEN

La gestión eficiente del agua en la agricultura requiere una estimación precisa de la evapotranspiración (ET). Aunque se pueden utilizar mediciones locales para estimar los componentes del balance de energía en la superficie, estos valores no pueden extrapolarse a grandes áreas debido a la heterogeneidad y complejidad de las condiciones en las que se desarrolla la agricultura. Un análisis espacialmente distribuido utilizando imágenes de satélite representa una alternativa eficiente y económica para proporcionar estimaciones de ET en grandes áreas, a través de la información proporcionada tanto en el rango óptico como térmico del espectro electromagnético; sin embargo, la mayoría de los sensores actuales no proporcionan esta información, pero si incluyen un conjunto de bandas espectrales que permiten determinar el comportamiento radiométrico de la vegetación y que se relacionan estrechamente con la ET. Bajo este contexto, nuestra hipótesis de trabajo afirma que es posible elaborar un balance anual de agua en cultivos utilizando datos de serie de tiempo armonizados de Landsat-8 (L8) y Sentinel-2 (S2). A través de la integración y armonización de los mapas de NDVI calculados para ambos sensores, obteniendo como resultado una serie temporal multi-modal de NDVI utilizada para la estimación de ET durante la temporada agrícola (diciembre 2017 a marzo 2018). Los resultados obtenidos permiten evidenciar adecuadamente la respuesta que tienen los cultivos a los problemas de déficit y exceso de riego asociados al manejo del agua, caracterizado a través de la demanda de agua estimada obtenida desde la implementación de la metodología y de los requerimientos potenciales de los cultivos existentes en el sitio de estudio.

Palabras claves: evapotranspiración; Landsat-8; Sentinel-2; NDVI; demanda de agua.

Annual crop water balance using harmonized Landsat-8 and Sentinel-2 time serie data

ABSTRACT

Efficient water management in agriculture requires a precise estimate of evapotranspiration (ET). Although local measurements can be used to estimate surface energy balance components, these values cannot be extrapolated to large areas due to the heterogeneity and complexity of the conditions in which agriculture develops. A spatially analysis distributed using satellite images represents an efficient and economical alternative to provide estimates of ET in large areas, through the information provided in both the optical and thermal range of the electromagnetic spectrum; however, most current sensors do not provide this information, but they do include a set of spectral bands that allow the radiometric behavior of the vegetation to be determined and which are closely related to the ET. In this context, our working hypothesis states that it is possible to perform an annual water balance in crops using harmonized time serie data from Landsat-8 (L8) and Sentinel-2 (S2). Through the integration and harmonization of the NDVI maps calculated for both S2 sensors, obtaining as a result a multi-modal time serie of NDVI used for ET estimation during the agricultural season (December 2017 to March 2018). The results obtained allow to adequately demonstrate the response of crops to the problems of deficit and excess irrigation associated with water management, characterized by the estimated water demand obtained from the implementation of the methodology and the potential requirements of the existing crops in the study site.

Keywords: evapotranspiration; Landsat-8; Sentinel-2; NDVI; water demand.

INTRODUCCIÓN

Bajo la presión constante del crecimiento de la población, el consumo de alimentos está aumentando en casi todas las regiones del mundo. Se espera que para el año 2.025 la población aumente a nueve mil millones de personas (Al-Ansari, Korre, and Shah 2014), lo que implicará un crecimiento de la superficie mundial bajo riego de 30 millones de hectáreas, con un aumento del 40% en la demanda de agua y energía para los próximos 20 años (FAO; IFAD and WFP 2015).

El mayor usuario de agua en Chile es la agricultura, con un 78% del total nacional (Aitken et al. 2016), lo que abastece a una superficie regada de 1,1 millones de hectáreas (Valdés-Pineda et al. 2014). Sin embargo, en diferentes regiones del país los derechos de aprovechamiento de agua existentes superan a la disponibilidad real del recurso (Rivera et al. 2016), lo que ha llevado a declarar diversas cuencas del país como agotadas, tanto en sus aguas superficiales como subterráneas (Aitken et al. 2016). En este sentido, la información precisa sobre la demanda de agua en la agricultura es crucial para una gestión eficiente del recurso y su productividad (Lorite, Mateos, and Fereres 2004; Levidow et al. 2014; Santos et al. 2010).

Este escenario de alta demanda hídrica ha desencadenado la búsqueda de soluciones para aliviar la brecha entre la demanda y la disponibilidad de agua para riego; en términos de cantidad, calidad, tiempos de aplicación y la incorporación de nuevas tecnologías (López-Mata et al. 2019; Nouri et al. 2019; Montoro, López-Fuster, and Fereres 2011; Dalezios et al. 2019). Este conjunto de estrategias de gestión para los recursos hídricos debe basarse en estimaciones cuantitativas precisas del consumo de agua, y una de las formas más utilizada para medir estos requerimientos es la evapotranspiración (ET). En diferentes estudios han estimado la ET y el efecto del riego en el crecimiento de los cultivos, con el objetivo de mejorar la gestión del agua de riego (Tan et al. 2017; DeJonge et al. 2012; Kloss et al. 2014; X. Li et al. 2012; Paço et al. 2012). No obstante, este procedimiento es difícil de cuantificar adecuadamente cuando se trata de áreas extensas, ya que existe una

gran variabilidad espacio temporal por la compleja interacción entre el suelo, la vegetación y el clima (Mu et al. 2007).

Actualmente, las estimaciones de ET se basan principalmente en observaciones de estaciones meteorológicas terrestres, así como en el uso de sensores remotos. La determinación de ET in situ por lisímetros es una de las técnicas de estimación más precisas; sin embargo, la escasa red de estaciones de observación limita la comprensión de ET en la escala global, e incluso a nivel de cuenca (Q. Li et al. 2018). Mientras que, la teledetección satelital representa una alternativa eficiente y económica para proporcionar estimaciones de ET en grandes áreas, permitiendo la evaluación de la variabilidad espacial (Ramírez-Cuesta et al. 2018) así como todos los procesos biofísicos que tienen lugar en nuestro planeta a múltiples escalas.

Los métodos de detección remota basados en enfoques de balance de energía de la superficie (SEB), como SEBAL (Bastiaanssen W.G.M. et al. 1998) y METRIC (Allen et al. 2007) permiten estimar ET utilizando mediciones de la temperatura de la superficie terrestre, a través de los sensores infrarrojos térmicos (Glenn et al. 2007; Timmermans et al. 2007; F. Li et al. 2006). Por este motivo sólo los sensores que proporcionen información espectral en la banda térmica pueden usar este método. Desafortunadamente, la mayoría de los sensores remotos actuales no proporcionan esta información, pero si incluyen un conjunto de bandas espectrales que permiten determinar el comportamiento radiométrico de la vegetación, enfocado en el contraste espectral que presentan las cubiertas entre las bandas del rojo e infrarrojo cercano (Tan et al. 2017). Bajo este principio se apoyan la mayor parte de los índices de vegetación, índices que se han utilizado ampliamente para monitorear los cambios en las propiedades biofísicas de las plantas, como la cobertura vegetal, el vigor y la dinámica de crecimiento (Rafn, Contor, and Ames 2008; Mulla D.J 2013; Abuzar et al. 2014). Teniendo como objetivo definir la salud de la vegetación, distinguir la vegetación del suelo y estimar la modelación de ET (Nagler et al. 2005; Rossato et al. 2006; Glenn et al. 2008; Abuzar et al. 2019; Y. Li et al. 2012; Jarchow et al. 2017), específicamente la relación entre ambas variables es la que permite construir series multitemporales de datos, lo que resulta esencial para comprender

los patrones de consumo de agua en distintos tipos de cultivos y a su vez, mantener actualizada la información de las diferentes cubiertas agrícolas.

Bajo este contexto, en la presente investigación se propone una estrategia de integración y armonización entre el NDVI obtenido a partir de los sensores L8 y S2, para obtener como resultado una serie temporal multi-modal de NDVI utilizada para la estimación de ET, que permitirá caracterizar la demanda de agua de manera continua durante una temporada de riego y su vez, elaborar un balance anual de agua a partir de la demanda de agua estimada y la estimación de los requerimientos potencial para cada uno de los cultivos del área estudiada.

1. HIPÓTESIS

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se plantea la siguiente hipótesis de trabajo: es posible elaborar un balance anual de agua en cultivos utilizando datos de serie de tiempo armonizados de Landsat-8 y Sentinel-2.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Elaborar un balance anual de agua en cultivos utilizando datos de serie de tiempo armonizados de Landsat-8 y Sentinel-2, en el sector Canal Lolol Sur.

2.2 Objetivos específicos

- Estimar la evapotranspiración (ET) a partir de una serie temporal multi-modal de NDVI.
- Comparar la demanda de agua estimada y demanda potencial para los cultivos del sector Canal Lolol Sur.
- Evaluar el balance anual de agua demandada en cultivos representativos del sector Canal Lolol Sur.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del sitio de estudio

La metodología propuesta fue aplicada en una de las zonas característica del valle central de Chile, que comprende una superficie de 70 km² y puesta bajo riego por el embalse Convento Viejo, con una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 237 millones de m³ ubicada en la Región de O'Higgins (252626.83 E y 6153791.95 S, Huso 19 Datum WGS 84) (Figura 1) denominada Canal Lolol Sur. La zona se caracteriza por tener un clima de carácter templado de tipo mediterráneo (con lluvias invernales), condición que favorece el desarrollo de diversos tipos de plantaciones; como las forestales, frutales, cereales, viñas y parronales, concentrando el 85,8% de los suelos silvoagropecuarios de la región (INE 2008).

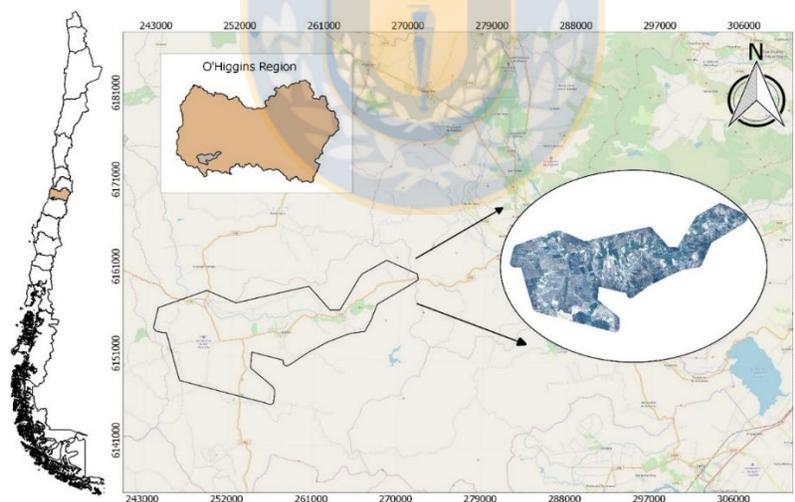


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de la investigación la zona de estudio se dividió en dos tipos de cubiertas agrícolas; frutales y cultivos anuales, con 2.715 y 1.087 ha, respectivamente. Los frutales que fueron identificados dentro de la zona de estudio son; ciruelos, olivos, almendros, arándanos, parronales y vides. Mientras que los

cultivos anuales identificados son; tomate industrial, maíz, trigo, cereales y alfalfa. La superficie que utiliza cada uno de ellos dentro de la cubierta agrícola que lo representa se muestra en la Figura 2.

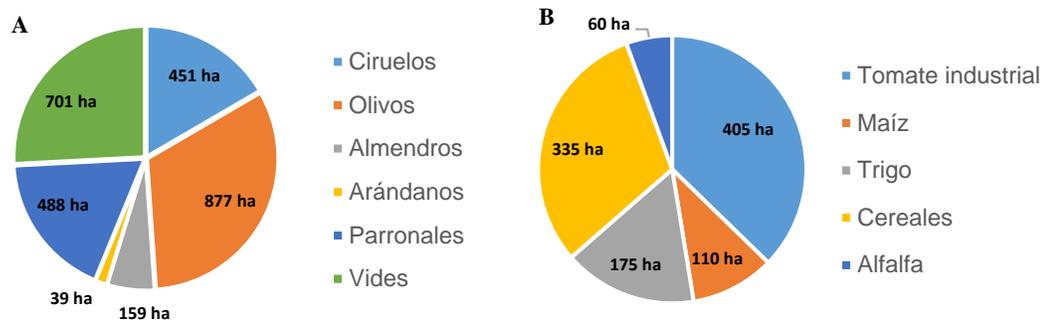


Figura 2. Superficie por tipo de cubierta agrícola. A) frutales y B) cultivos anuales.

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Imágenes satelitales

Para el análisis se utilizaron una serie de imágenes multiespectrales obtenidas del satélite Landsat-8 (L8) (nivel de procesamiento L1T, calibradas radiométricamente y ortorectificadas) (USGS 2015) y del satélite Sentinel-2 (S2) (nivel de procesamiento 1C, con valores de reflectancia al tope de la atmósfera y ortorectificadas) (ESA 2013). Imágenes que fueron descargadas de forma gratuita del servidor USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Para la selección de las imágenes se consideró la ausencia de nubes sobre el sitio de estudio, durante la temporada agrícola analizada, que comprende los meses de diciembre 2017 a marzo 2018. En la Tabla 1 se presentan las características de las bandas que componen cada satélite.

Tabla 1. Características técnicas de los satélites L8 y S2.

Landsat-8 OLI			Sentinel-2 MSI		
Resolución temporal: 16 Días			Resolución temporal: 5 Días		
Bandas (m)	Resolución Geométrica (m)		Bandas (m)	Resolución Geométrica (m)	
B1: Coastal	0,43-0,45	30	B1: Coastal	0,433-0,453	60
B2: Blue	0,45-0,51	30	B2: Blue	0,458-0,523	10
B3: Green	0,53-0,59	30	B3: Green	0,543-0,578	10
B4: Red	0,64-0,67	30	B4: Red	0,650-0,680	10
B5: NIR	0,85-0,88	30	B5: Vegetation Red Edge	0,698-0,713	20
B6: SWIR 1	1,57-1,65	30	B6: Vegetation Red Edge	0,733-0,748	20
B7: SWIR 2	2,11-2,29	30	B7: Vegetation Red Edge	0,773-0,793	20
B8: Pan	0,50 -0,68	15	B8: NIR	0,785-0,900	10
B9: Cirrus	1,36-1,38	30	B8A: Vegetation Red Edge	0,855-0,875	20
B10: TIRS 1	10,6-11,19	100	B9: Water Vapour	0,935-0,955	60
B11: TIRS 2	11,5-12,51	100	B10: SWIR-Cirrus	1,360-1,390	60
			B11: SWIR	1,565-1,655	20
			B12: SWIR	2,100-2,280	20

Fuente: (USGS 2015; ESA 2013)

Las imágenes seleccionadas durante la temporada agrícola que comprende desde el mes de diciembre 2017 al mes de marzo 2018, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Fecha de las imágenes del satélite L8 y S2.

Fecha	Satélite	Fecha	Satélite	Fecha	Satélite
10-12-2017	S2B	19-01-2018	S2B	10-03-2018	S2B
20-12-2017	S2B	08-02-2018	S2B	15-03-2018	S2A
25-12-2017	S2A	13-02-2018	S2A	20-03-2018	S2B
30-12-2017	S2B	18-02-2018	S2B	25-03-2018	L8 - S2A
04-01-2018	L8	21-02-2018	L8	30-03-2018	S2B
09-01-2018	S2A	05-03-2018	S2A		

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Metodología

En la Figura 3 se muestra el flujo de trabajo para lograr con el objetivo de la investigación. A partir de este flujo de trabajo los datos de entrada de los satélites L8 y S2 fueron preprocesados; realizando para cada una de las imágenes que componen cada sensor la conversión a reflectancia y la corrección atmosférica. Luego, las imágenes del satélite S2 con resolución espacial de 10 m fueron submuestreadas al tamaño del pixel de L8 (30 m). Posteriormente, se realizó la armonización a través del ajuste lineal entre los mapas de NDVI calculados para ambos sensores ($NDVI_{L8}/NDVI_{S2}$), obteniendo como resultado un NDVI armonizado (\widehat{NDVI}_{L8}). De esta manera, se generó una serie temporal multi-modal de NDVI' compuesta por la integración de los mapas de \widehat{NDVI}_{L8} y $NDVI_{L8}$, serie que fue utilizada para la estimación de la evapotranspiración, a través de las ecuaciones del ajuste lineal entre los mapas de ($ET_{L8}/NDVI_{L8}$) generados a partir del sensor L8, dando origen a un ET ajustado (\widehat{ET}_{L8}), el que permitió estimar ET y posteriormente la demanda de agua para los cultivos del sitio de estudio.

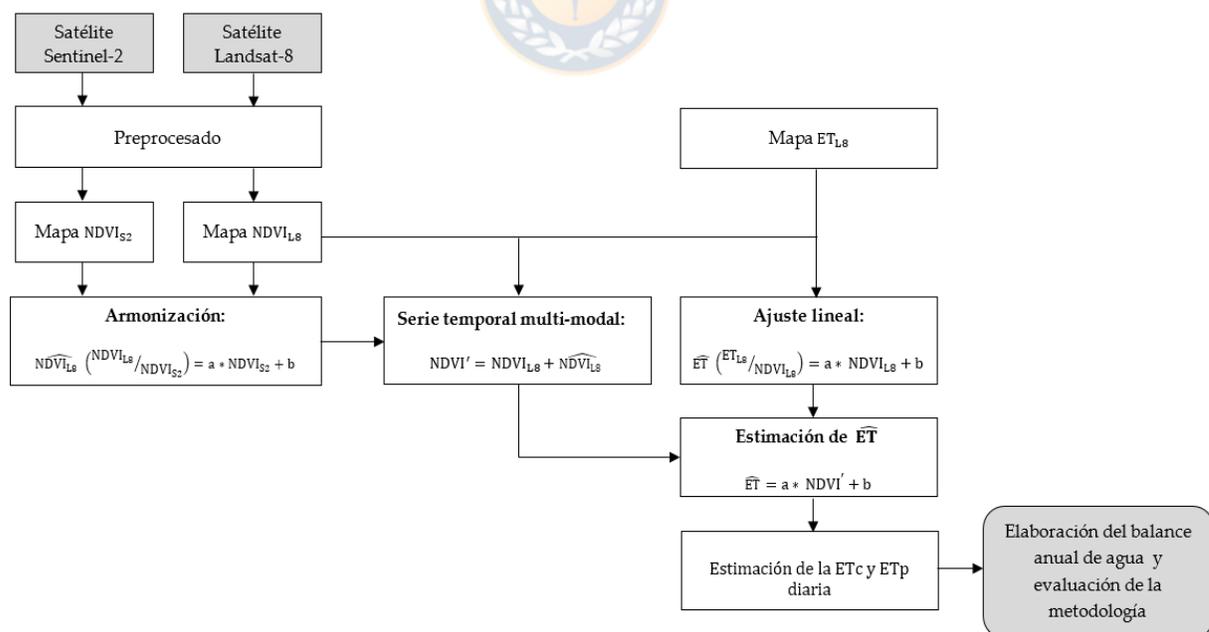


Figura 3. Esquema global de la metodología propuesta.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1 Preprocesado

Durante la etapa del preprocesado a las bandas espectrales que componen los satélites de L8 y S2 se les realizó la conversión a reflectancia y la corrección atmosférica utilizando el método Sustracción del Objeto Oscuro (DOS) (Teillet and Fedosejevs 1995), implementado en el software de código abierto (open source) QGIS 2.8.9 mediante el módulo SCP (Semi-Automatic Classification Pluggin) (L. Congedo 2016).

Luego, el corregistro de las imágenes para ambos sensores se realizó utilizando la herramienta AutoSync del software Erdas IMAGINE v.2011. Esta herramienta reconoce algebraicamente las coordenadas de puntos en común entre dos imágenes satelitales. Para llevar a cabo este proceso, se eligió como referencia la imagen satelital de L8, de tal forma que las demás imágenes se ajustaron geométricamente a ella. Mientras que, el submuestreo se realizó utilizando el método de interpolación lineal, donde las imágenes de S2 (10 m) fueron transformadas al tamaño del pixel de L8 (30 m).

4.3.2 Armonización entre el $NDVI_{L8}$ y $NDVI_{S2}$

Para obtener la armonización entre los mapas de NDVI de los sensores L8 y S2, lo primero que se realizó fue generar los mapas de NDVI (Bannari et al. 1995) durante la temporada para ambos sensores, aplicando las Ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

$$NDVI_{L8} = \frac{B5 - B4}{B5 + B4} \quad (1)$$

$$NDVI_{S2} = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (2)$$

Donde, $NDVI_{L8}$ y $NDVI_{S2}$ corresponde al Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para el sensor Landsat-8 y Sentinel-2. B4 Corresponde a la banda del rojo, B5 y B8 corresponden a la banda del infrarrojo cercano.

Para la armonización entre el $NDVI_{L8}$ y $NDVI_{S2}$ se seleccionaron conjuntos de imágenes de fechas coincidentes o que contaran con la menor separación temporal posible durante la temporada analizada. Por cada pareja de imágenes y en forma separada se seleccionaron puntos de muestreo entre la cubierta agrícola de cultivos anuales y la cubierta de frutales. Dichos puntos de muestreo fueron elegidos al azar y se eliminaron aquellos que se encontraron fuera del rango de confianza (Figura 4).

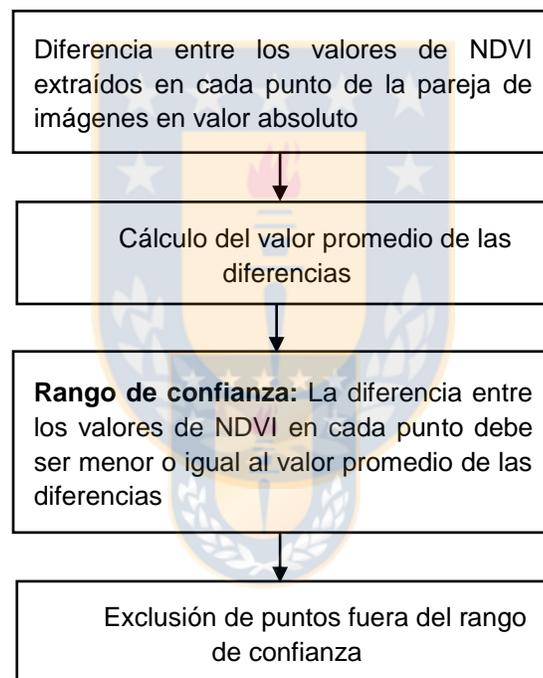


Figura 4. Esquema de exclusión de los puntos de muestreo fuera del rango de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

Con los puntos de muestreo seleccionados, se elaboró la gráfica de dispersión para ambas cubiertas agrícolas, donde el eje x representó a la variable $NDVI_{S2}$ y el eje y la variable $NDVI_{L8}$. La ecuación de ajuste entre ambas variables se obtuvo a través de la regresión de mínimos cuadrados lineales, a ello se agregó la línea 1:1 que representó el perfecto acuerdo entre los dos sensores. Además, para cada gráfico se determinó el coeficiente de correlación de Pearson (r).

En la Ecuación 3 se muestra la ecuación general que describe el NDVI armonizado (\widehat{NDVI}_{L8}) producto de la relación lineal entre el $NDVI_{L8}$ y el $NDVI_{S2}$.

$$\widehat{NDVI} \left(\frac{NDVI_{L8}}{NDVI_{S2}} \right)_{L8,i} = a * NDVI_{S2,i} + b \quad (3)$$

Donde i corresponde al tipo de cubierta agrícola (frutales o cultivos anuales), a y b a los coeficientes de ajuste lineal entre el $NDVI_{L8}$ y $NDVI_{S2}$ para la temporada analizada.

4.3.3 Serie temporal multi-modal de NDVI'

En la Figura 5 se muestra la serie temporal de NDVI' la que fue construida por la integración de los mapas de $NDVI_{L8}$ y \widehat{NDVI}_{L8} . Estas últimas fueron producto de la armonización de los mapas de $NDVI_{S2}$ a través de la Ecuación 3, para la temporada agrícola.

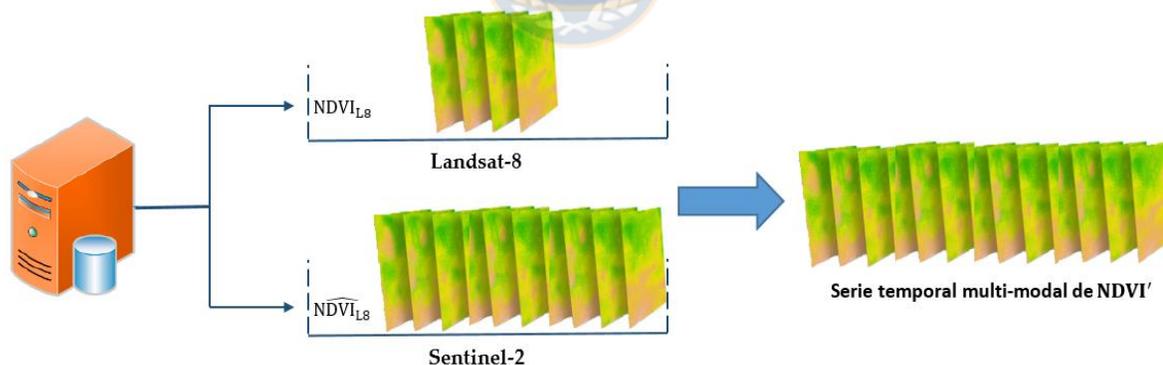


Figura 5. Composición de la serie temporal multi-modal de NDVI' durante la temporada agrícola.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4 Ajuste lineal entre la ET_{L8} y $NDVI_{L8}$

Siguiendo el flujo de trabajo planteado en la Figura 4, se obtuvo la ET ajustada (\widehat{ET}) producto de la relación lineal entre la $(ET_{L8}/NDVI_{L8})$. Los mapas de ET_{L8} se generaron partir de las imágenes del sensor L8 seleccionadas durante la temporada agrícola, utilizando la metodología propuesta en (Allen et al. 2007) e implementada por (Fonseca 2015). El que fue ejecutado en el software Matlab.

Para el ajuste lineal entre los mapas de ET_{L8} y $NDVI_{L8}$, se seleccionaron diferentes puntos de muestreo para cada tipo de cubierta agrícola (frutales y cultivos anuales). La ecuación de ajuste entre ambas variables se obtuvo a través de la regresión de mínimos cuadrados lineales. Además, para cada gráfico se determinó el coeficiente de correlación de Pearson (r). La ecuación que describe la ET ajustada (\widehat{ET}) se muestra en la Ecuación 4.

$$\widehat{ET} \left(\frac{ET_{L8}}{NDVI_{L8}} \right)_{ij} = a_{i,j} * NDVI_{L8,i,j} + b_{i,j} \quad (4)$$

Donde i corresponde al tipo de cubierta agrícola (frutal o cultivo anual) de la zona de estudio, j el día de la imagen satelital seleccionada. Mientras que, a y b corresponden a los coeficientes del ajuste lineal.

De esta manera, por cada mapa de ET_{L8} y $NDVI_{L8}$ durante la temporada analizada se obtuvieron diferentes ecuaciones de ajuste para cada tipo de frutal y cultivo dentro de la zona de estudio.

4.3.5 Estimación de la evapotranspiración (\widehat{ET})

La estimación de \widehat{ET} para cada tipo de cultivo se obtuvo reemplazando cada una de las imágenes que componen la serie temporal multi-modal de $NDVI'$ en la Ecuación 4. Como se muestra en la Ecuación 5.

$$\widehat{ET}_{i,j} = a_{i,j} * NDVI'_{i,j} + b_{i,j} \quad (5)$$

Donde i corresponde al tipo de cultivo o frutal de la zona de estudio, j la fecha de la imagen satelital seleccionada. Mientras que, a y b corresponden a los coeficientes del ajuste lineal.

De esta manera, para la temporada agrícola se obtuvieron tantas ecuaciones de ajuste para cada tipo de cultivo como imágenes L8 disponibles. Como la cantidad de imágenes que componen la serie temporal multi-modal de $NDVI'$ es mayor al número de ecuaciones del ajuste lineal entre la ET_{L8} y $NDVI_{L8}$, la asignación de los mapas de $NDVI'$ a cada ecuación de \widehat{ET} se describe a partir de la Figura 6.

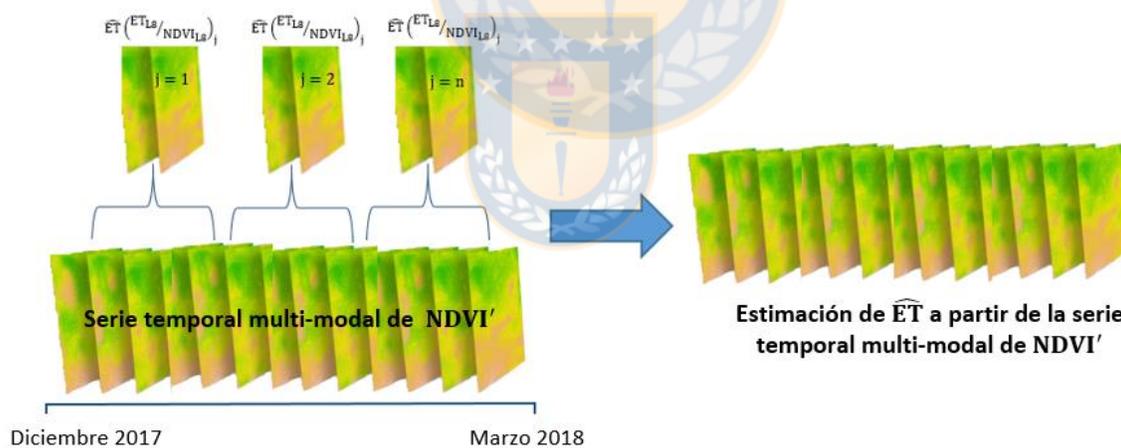


Figura 6. Esquema de asignación de las ecuaciones de ajuste lineal obtenidas a partir de la relación entre la $ET_{L8} - NDVI_{L8}$ a la serie temporal multi-modal de $NDVI'$ durante la temporada.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.6 Determinación de la evapotranspiración de cultivo (ET_c) y evapotranspiración potencial (ET_p) diaria.

Para determinar la ET_c diaria durante la temporada fue necesario obtener el factor de cultivo (F_c), el cual refleja el estado del cultivo asociado a las condiciones de manejo adoptadas en el predio. Y se define como el cociente entre la \widehat{ET} estimada o instantánea para cada una de las imágenes satelitales y la evapotranspiración de referencia (ET_r) (Ecuación 6), calculada a partir de datos meteorológicos en el momento en que el satélite captura la imagen, para lo cual se utilizó el modelo de Penman Monteith (Allen et al. 1998).

$$F_{c_i} = \frac{\widehat{ET}_i}{ET_r} \quad (6)$$

Donde i corresponde al frutal o cultivo anual analizado durante la temporada.

De esta manera, la ET_c diaria fue el resultado de la ET_r por el F_c obtenido en cada una de las imágenes de satélite y extrapoladas a la temporada agrícola analizada. La ET_c se describe a través de la Ecuación 7.

$$ET_{c_i} = ET_r * F_{c_i} \quad (7)$$

Donde i corresponde al frutal o cultivo anual analizado durante la temporada.

Mientras que, la evapotranspiración potencial (ET_p) se determinó a partir de los valores del factor de cultivo asociado al porcentaje de cobertura durante el desarrollo de la planta (Holzapfel, Hepp, and Mariño 2004; Santos et al. 2010), los que fueron ajustados a los valores de NDVI de cada cultivo durante la temporada. A este nuevo factor se le estableció con el nombre de factor de cultivo potencial (F_{cp}). Considerando lo descrito previamente, para la cubierta de frutales se estableció la diferencia entre los árboles jóvenes y árboles adultos. El F_{cp} se describe a través de la Ecuación 8.

$$F_{cp_i} = a_i * NDVI_i + b_i \quad (8)$$

Donde i corresponde al cultivo o al tipo de frutal (joven o adulto), a y b a los coeficientes del ajuste lineal.

De esta manera, la ETp diaria se determinó a partir de la ET_r por el Fcp ajustado durante la temporada agrícola y para cada cultivo del sitio de estudio. La ecuación que describe la ETp se muestra en la Ecuación 9.

$$ETp_i = ET_r * Fcp_i \quad (9)$$

Donde i corresponde al frutal o cultivo anual analizado durante la temporada

4.3.7 Balance anual de agua y evaluación de la metodología

Para elaborar el balance anual de agua durante la temporada agrícola se determinó la demanda de agua estimada y la demanda potencial en cada uno de los cultivos y frutales del sitio de estudio. Ambas demandas de agua se describen en las Ecuaciones 10 y 11, respectivamente.

$$\text{Demanda estimada}_i = \sum_{d=1}^n ETc_i^n \quad (10)$$

$$\text{Demanda potencial}_i = \sum_{d=1}^n ETp_i^n \quad (11)$$

Donde i corresponde al cultivo o frutal del sitio de estudio, d al día de inicio y n al día final de la temporada agrícola analizada.

De esta manera, el balance anual de agua está compuesto por la comparación entre la demanda de agua estimada y demanda potencial en cada uno de los cultivos del área estudiada.

La evaluación de la metodología se realizó comparando la demanda de agua estimada con el volumen de agua aplicado durante el periodo analizado. Para ello, se seleccionaron cultivos anuales y frutales representativos del sitio de estudio. Mientras que, la información del volumen aplicado fue recopilado por el registro de

los contadores volumétricos instalados en los diferentes predios. Para la comparación entre ambas variables se utilizaron dos indicadores estadísticos; el error cuadrático medio (RMSE) que mide la variación de los valores estimados con respecto a los valores observados, y el indicador del sesgo (BIAS) que proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobrestimar o subestimar una variable. Estos dos indicadores fueron calculados aplicando las Ecuaciones 12 y 13, respectivamente.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_{i\text{obs}})^2}{N}} \quad (12)$$

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_{\text{obs}})}{N} \quad (13)$$

Donde, ϕ_i corresponde al valor de la demanda estimada para el cultivo i , $\phi_{i\text{obs}}$ corresponde al valor observado o volumen aplicado para el cultivo i y N al número de días.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los mapas de NDVI_{L8} y NDVI_{S2} (tamaño del pixel 30 m) que fueron seleccionadas para la armonización durante la temporada, son:

- NDVI_{L8} 04/01/2018 y NDVI_{S2A} 09/01/2018
- NDVI_{L8} 21/02/2018 y NDVI_{S2B} 18/02/2018
- NDVI_{L8} 25/03/2018 y NDVI_{S2A} 25/03/2018

En la Figura 7 se muestran los resultados de la armonización incluyendo las tres parejas de mapas de NDVI para la cubierta agrícola de frutales y cultivos anuales.

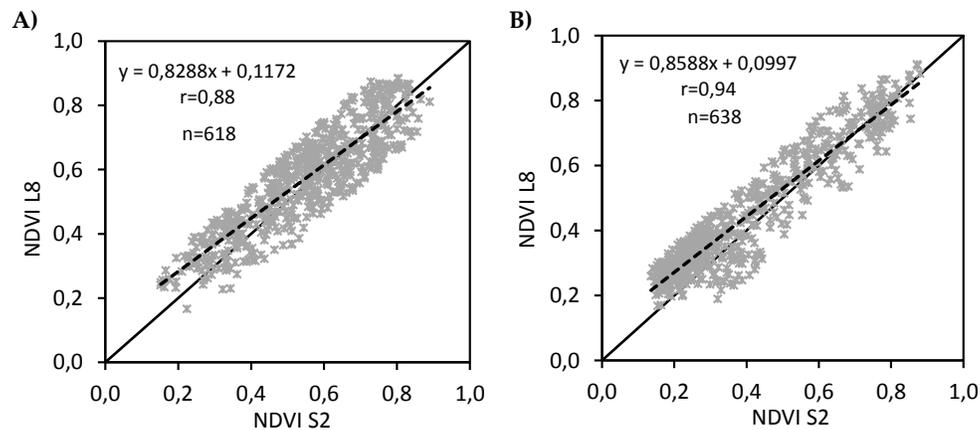


Figura 7. Comparación del NDVI de S2 y L8 para la cubierta agrícola de A) frutales y B) cultivos anuales. La línea continua es 1:1 y la línea discontinua corresponde al ajuste de mínimos cuadrados lineales.

Fuente: Elaboración propia.

Reemplazando en la Ecuación 3 se tiene que la ecuación de ajuste lineal entre el $NDVI_{L8}$ y $NDVI_{S2}$ para la cubierta agrícola de frutales es:

$$\widehat{NDVI}_{L8} = 0,8288 * NDVI_{S2} + 0,1172 \quad (14)$$

Y la ecuación de ajuste para la cubierta de cultivos anuales es:

$$\widehat{NDVI}_{L8} = 0,8588 * NDVI_{S2} + 0,0997 \quad (15)$$

Las comparaciones demuestran que el acuerdo entre el NDVI de L8 y S2 para ambas cubiertas agrícolas tienen una correlación positiva, mostrando valores de coeficiente de Pearson (r) de 0,88 para la cubierta agrícola de frutales y de 0,94 para los cultivos anuales. Además, se observa que en ambos tipos de cubiertas L8 tiende a sobreestimar los valores de NDVI con respecto a S2, condición que es más evidente para la cubierta de cultivos anuales. En Tello *et al.*, (2017) la comparación entre el NDVI de ambos sensores obtuvo como resultado un coeficiente de correlación (r) de 0,99 en una zona agrícola sin distinción entre los diferentes tipos

de vegetación. Mientras que Flood (2017) realizó la comparación entre ambos sensores en términos de reflectancia superficial y también en términos de cantidades biofísicas estimadas a partir de las reflectancias. A partir de ello, se obtuvo que el ajuste entre el NDVI aumenta la correlación y disminuye el error cuando el ajuste se realiza previamente a cada una de las bandas que componen ambos sensores, encontrándose que el indicador estadístico (RMSE) disminuye de 0.036 a 0.021. Resultado similar fue obtenido para el producto entre L8 y S2 desarrollado por la NASA (Claverie et al. 2016) y en el trabajo desarrollado por Lessio et al., (2017), evidenciando mejores resultados cuando el ajuste se realiza para cada una de las bandas de cada sensor y, además se plantea la posibilidad de que dichos ajustes deben ajustarse a nivel local, dada la variabilidad en las condiciones en que se desarrollan los cultivos.

Aplicando las Ecuaciones 14 y 15, respectivamente se armonizaron los mapas de \widehat{NDVI}_{S2} a \widehat{NDVI}_{L8} para ambas cubiertas agrícolas. De esta manera, la serie temporal multi-modal de \widehat{NDVI}' queda compuesta por la suma de los mapas de \widehat{NDVI}_{L8} y \widehat{NDVI}_{L8} , lo que hace un total de 17 imágenes durante la temporada agrícola. Como se muestra en la Figura 8.

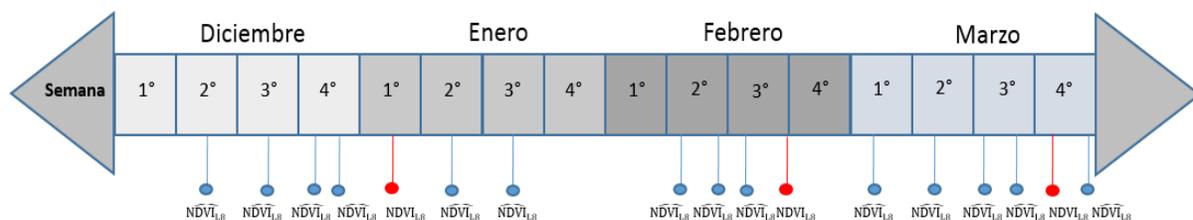


Figura 8. Composición de la serie temporal multi-modal de \widehat{NDVI}' durante la temporada agrícola.

Fuente: Elaboración propia.

Definida la serie temporal multi-modal de \widehat{NDVI}' de la temporada agrícola, fue posible obtener la estimación de \widehat{ET} para cada cultivo del área estudiada. Para ello, los resultados del ajuste lineal entre la ET_{L8} y \widehat{NDVI}_{L8} se obtuvieron para los días 04

enero, 21 febrero y 25 de marzo del año 2018, correspondiente a los días donde fue posible generar los mapas de ET_{L8} , utilizando el sensor L8.

En la Tabla 3 se muestran los coeficientes del ajuste lineal entre los mapas de ET_{L8} – $NDVI_{L8}$ y el coeficiente de correlación de Pearson, para cada tipo de cubierta agrícola.

Tabla 3. Coeficientes del ajuste lineal entre ET_{L8} y $NDVI_{L8}$ (a, b) y coeficiente de correlación de Pearson (r) para frutales y cultivos anuales en los tres días analizados.

	04-01-2018			21-02-2018			25-03-2018			
	a	b	r	a	b	r	a	b	r	
Frutales	Almendros	9,6331	-2,2964	0,95	9,5884	-2,6277	0,89	5,5133	-0,4960	0,79
	Arándanos	4,970	-0,0216	0,84	3,5310	0,2247	0,84	2,6192	0,7221	0,80
	Ciruelos	7,6880	-1,3594	0,77	6,3071	-1,1207	0,84	5,0152	-0,5987	0,79
	Olivos	8,0158	-1,8227	0,89	9,8622	-2,7053	0,77	7,5290	-1,3265	0,77
	Parronales	9,5418	-3,0590	0,94	3,1905	0,9724	0,55	3,3327	0,3498	0,86
	Vides	9,2916	-2,5368	0,96	6,0001	-1,0156	0,93	3,1834	0,9047	0,84
Cultivos anuales	Maíz	8,1881	-1,5872	0,97	5,0615	-0,4432	0,90	2,2771	1,3574	0,70
	Alfalfa	5,3963	-0,4837	0,80	4,4676	-0,6641	0,82	3,1753	0,0803	0,81
	Cereales	8,1596	-1,7149	0,98	6,6392	-1,3811	0,93	6,3676	-0,8058	0,82
	Trigo	7,8890	-1,5880	0,95	5,5146	-0,7694	0,93	3,5682	0,2759	0,63
	Tomate	8,9797	-2,1934	0,98	5,8506	-1,0944	0,94	4,2877	-0,1040	0,89

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que existe una correlación significativa entre la ET_{L8} y el $NDVI_{L8}$ en cada uno de los frutales y cultivos para los tres días analizados. Esto se refleja a través de los valores del coeficiente de correlación de Pearson (r), los que de manera global registran valores superiores a los 0,8. Al comparar esta correlación con lo que se muestra en literatura, se observa que los valores de Pearson (r) alcanzan valores similares a los registrados por Nagler *et al.*, (2005);

Rossato *et al.*, (2006); y por Glenn *et al.*, (2008), los cuales dependen del tipo de cubierta que se esté estudiando.

De esta manera, se obtuvieron en total 18 y 15 ecuaciones de ajuste para la cubierta agrícola de frutales y cultivos anuales, respectivamente. Utilizando cada una de estas ecuaciones de ajuste se logró estimar \widehat{ET} para la temporada que se extiende desde el mes de diciembre 2017 a marzo 2018, y de manera específica para cada tipo de frutal y cultivo del sitio de estudio. Sin embargo, hubiese sido posible mejorar la estimación de \widehat{ET} si para el ajuste entre la ET_{L8} y $NDVI_{L8}$ se hubieran utilizado una mayor cantidad de imágenes durante la temporada, condición que para nuestro sitio de estudio se limitó por la presencia de nubes.

Reemplazando los coeficientes en la Ecuación 5, se obtuvieron los mapas de \widehat{ET} en mm día^{-1} para cada cultivo del sitio de estudio (Figura 9).

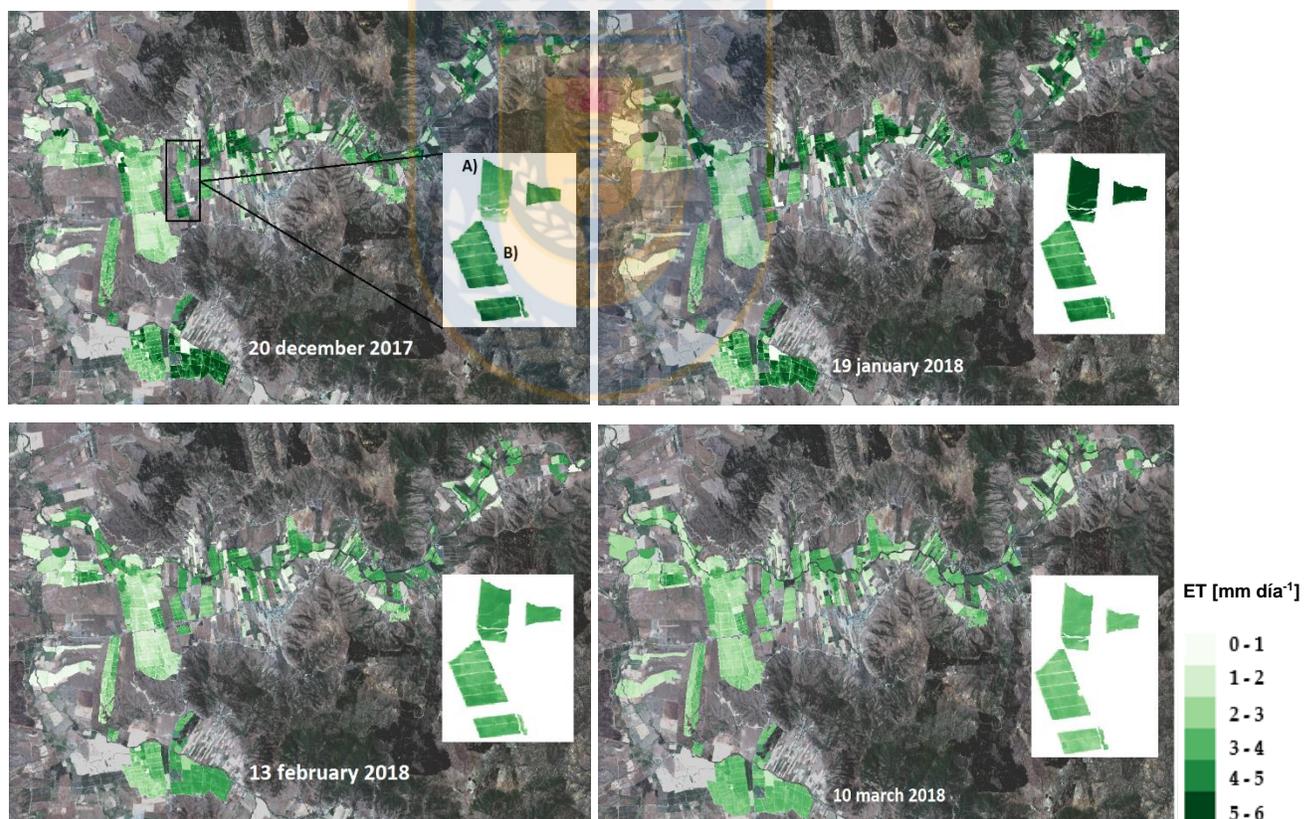


Figura 9. Mapas de evapotranspiración diaria (\widehat{ET}) en cuatro meses de la temporada diciembre 2017 a marzo 2018 para la cubierta agrícola del sitio de estudio. De manera ampliada se muestra; A) tomate industrial y B) ciruelos.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 9 se muestra la distribución temporal y espacial de \widehat{ET} representada por una imagen mensual con un tamaño de pixel de 30 m, la que fue estimada a través de las diferentes ecuaciones de ajuste entre la $ET_{L,8}$ y el $NDVI_{L,8}$ para cada tipo de frutal y cultivo anual en la zona estudiada.

Los resultados globales muestran que la \widehat{ET} registra los valores más altos para el día 20 diciembre y 19 enero, con valores entre 5 a 6 mm día⁻¹. Mientras que, para los días 13 febrero y 10 de marzo los valores se encuentran entre los 4 a 5 mm día⁻¹. Dicha disminución de \widehat{ET} a partir del día 13 de febrero se explica como consecuencia del periodo de senescencia que comienzan a tener algunas plantas, en particular para los cultivos anuales que registran periodos fenológicos más acotados que los frutales.

Para el tomate industrial (A) se presenta una variabilidad que va desde los 3 mm día⁻¹ en el mes de diciembre hasta los 6 mm día⁻¹ que los alcanza en el mes de enero, variación que coincide con el desarrollo del cultivo, hasta que alcanza la madurez a finales del mes de febrero e inicio del mes de marzo. Sin embargo, para el frutal de ciruelos (B) la diferencia en \widehat{ET} que se produce es menor al del tomate industrial, con valores entre los 3 a 5 mm día⁻¹. Condición que reafirma que los árboles frutales son relativamente homogéneos en la demanda de agua durante la estación de riego, y a su vez están fuertemente relacionados con el porcentaje de cobertura (Holzapfel, Hepp, and Mariño 2004; Santos et al. 2010).

De los mapas de \widehat{ET} que se generaron durante la temporada agrícola y siguiendo con la metodología propuesta, en la Figura 10 se identifican los cultivos seleccionados para mostrar el comportamiento de la ET_c diaria durante el periodo analizado.

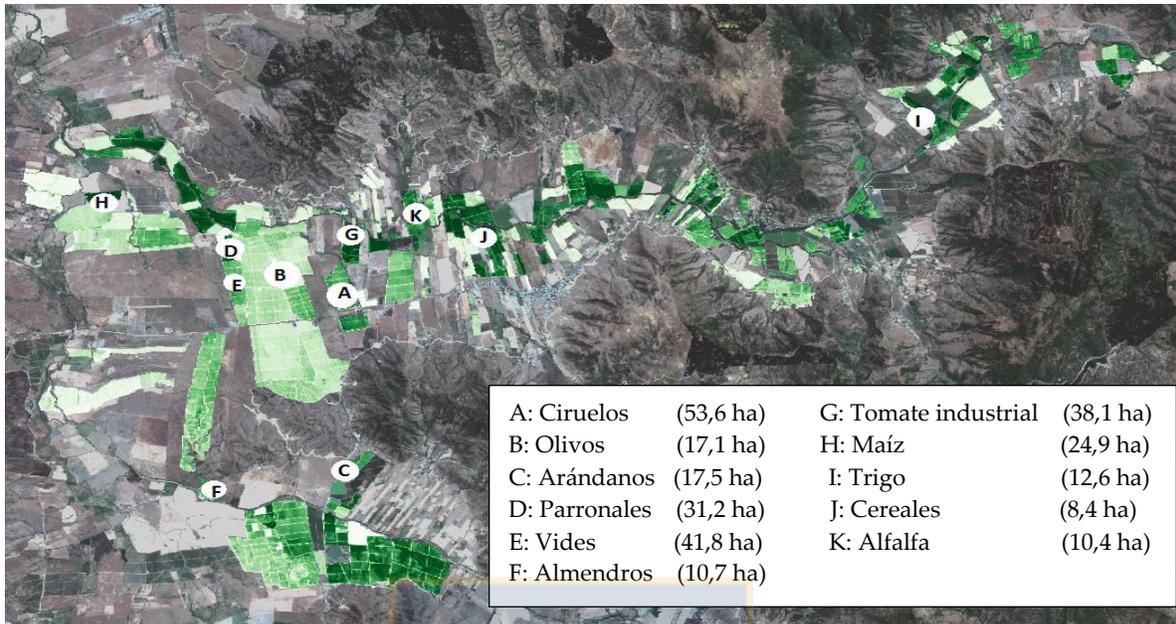
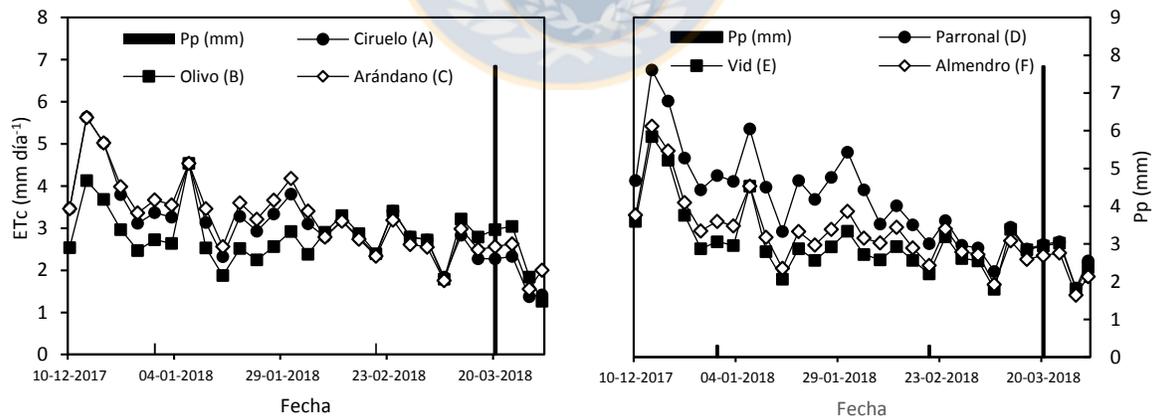


Figura 10. Identificación de los frutales y cultivos anuales seleccionados para mostrar el comportamiento de la ETc diaria durante la temporada analizada.

Fuente: Elaboración propia.



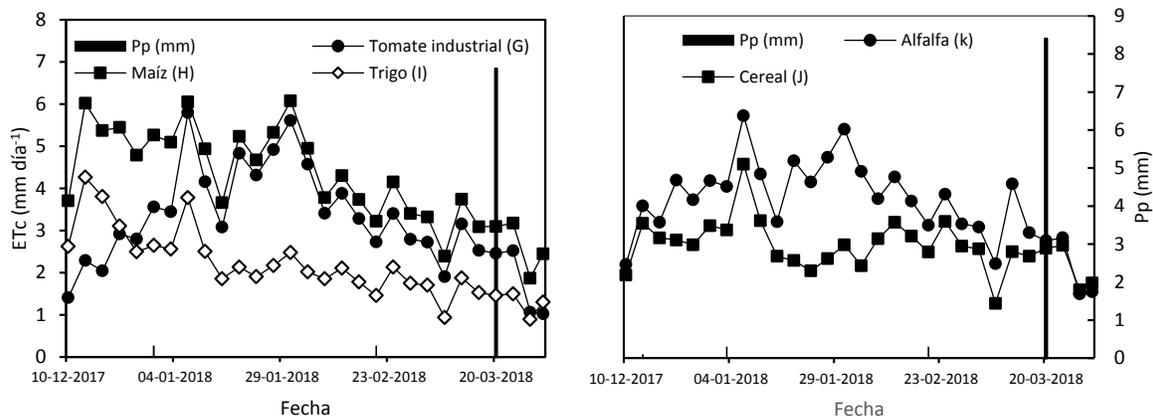


Figura 11. Estimación de la evapotranspiración de cultivo (ETc) diaria y precipitación (Pp) durante la temporada analizada, utilizando la metodología descrita.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados mostrados en la Figura 11 permiten comprender la variabilidad en la demanda de agua para distintas cubiertas agrícolas; evidenciando de manera global que entre los diferentes tipos de árboles frutales se presenta un comportamiento similar de la ETc durante la temporada, con valores que varían entre los 2 a 6 mm día⁻¹. Sin embargo, el comportamiento del parronal (D) presenta valores más altos a los registrados por el resto de los frutales, alcanzando los 7 mm día⁻¹ en el mes de diciembre. Sin embargo, para los cultivos anuales el comportamiento de la ETc es muy variable entre ellos, reflejando las diferencias naturales en la necesidades hídricas de cada cultivo, siendo el maíz (H) y el tomate industrial (G) los que registraron los mayores valores de ETc, en un rango que varía entre los 3 a 6 mm día⁻¹. A su vez, se observa que los árboles frutales durante los primeros días del mes de diciembre obtuvieron los mayores valores de ETc registrados durante la temporada. Dicha situación puede ser atribuida al aporte de la evaporación del suelo más que la transpiración de los propios árboles, o tal vez producto de un mejor manejo del riego durante ese periodo.

Además, para los cultivos ya seleccionados se obtuvo el balance anual de agua, a través de la comparación entre la demanda anual de agua estimada y la demanda anual potencial. Dicha comparación se muestra en la Figura 12.

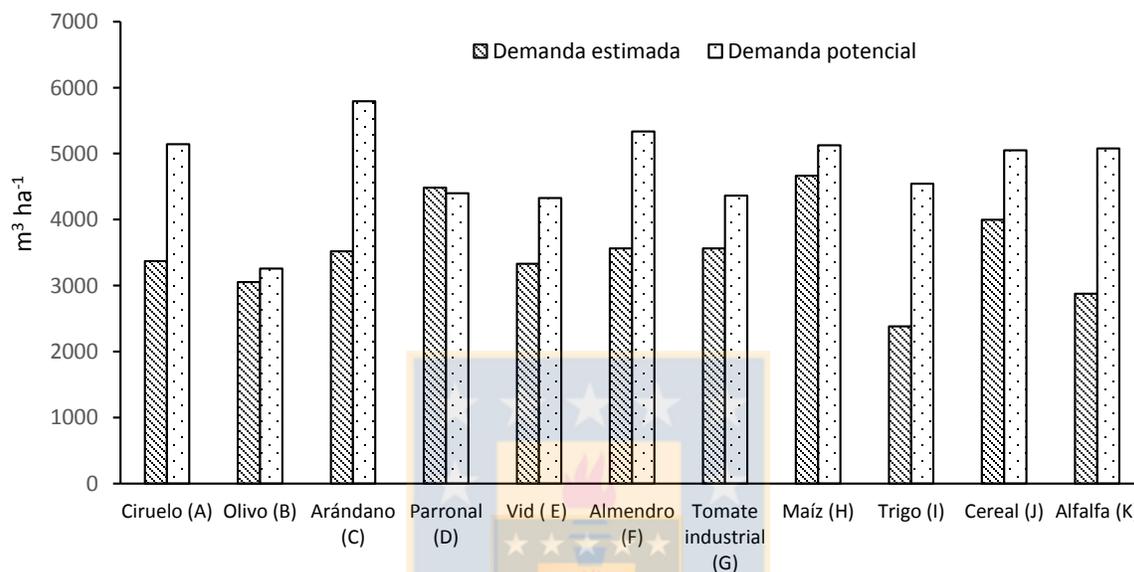


Figura 12. Demanda anual de agua estimada y potencial para frutales y cultivos anuales representativos del sitio de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

De manera global los resultados muestran que la demanda de agua estimada a través de la metodología propuesta, registra volúmenes de agua más bajos a la demanda potencial durante la temporada. Esto indica que el agua que se aplicó en los diferentes cultivos y que se vio reflejado por la demanda estimada fue deficiente o inadecuada durante la temporada.

Para la cubierta de olivo, parronal y maíz (B, D y H) la demanda de agua estimada es casi idéntica a la demanda potencial, lo que indica que la cantidad de agua aplicada durante la temporada fue la requerida por el cultivo. Dicho escenario es el menos frecuente en el área estudiada, aun cuando la disponibilidad del recurso en el sector no evidencia restricciones. Sin embargo, para el resto de las cubiertas se produce un déficit de agua estimada, que va desde un 6% a un 48% para los olivos (B) y trigo (I), respectivamente.

El déficit de agua alcanzado por las diferentes cubiertas durante el periodo analizado puede generar daños considerables en los cultivos, situación que para el trigo genera una disminución en el rendimiento del grano, sobre todo cuando la escasez de agua se produce durante las etapas sensibles de crecimiento (floración y la etapa de llenado del grano) (Pierre et al. 2012; Ayed et al. 2017). Para los arándanos el déficit hídrico en cualquier periodo del ciclo fenológico afecta al crecimiento vegetativo, reduciendo sustancialmente el rendimiento potencial y además, es un factor determinante que permite asegurar la producción en la temporada siguiente (Holzapfel, Hepp, and Mariño 2004; Bryla and Strik 2007). Los almendros se consideran tolerantes a la sequía, pero la escasez de riego es crítico para producir altos rendimientos de nueces de alta calidad, principalmente en la etapa previa a la cosecha (Torrecillas et al. 1996; Nanos et al. 2002; Goldhamer, Viveros, and Salinas 2006). Mientras que los árboles de ciruelos el estrés hídrico en las etapas finales de crecimiento del fruto disminuye significativamente el tamaño del fruto, pero acelera la maduración, incrementando la concentración de azúcar en el fruto (Naor et al. 2004). En las vides el déficit de agua en una etapa fenológica adecuada puede mejorar la calidad del vino con casi ninguna reducción en el rendimiento (Intrigliolo and Castel 2009; Girona et al. 2009; Romero et al. 2013; Munitz, Netzer, and Schwartz 2017). Por el contrario, la imposición de estrés por sequía severa en etapas fenológicas inapropiadas puede causar una pérdida de rendimiento significativa e incluso una disminución de la calidad en casos extremos (Medrano et al. 2003; Chaves et al. 2010). Como hemos visto, la respuesta que tienen las cubiertas a la falta de agua es distinta para cada tipo de cultivo y las decisiones que se deben adoptar en la gestión del riego deben ser propias para cada uno de ellos.

Para evaluar la metodología propuesta se identificaron diferentes frutales y cultivos dentro del área estudiada, los que se muestran en la Figura 13.

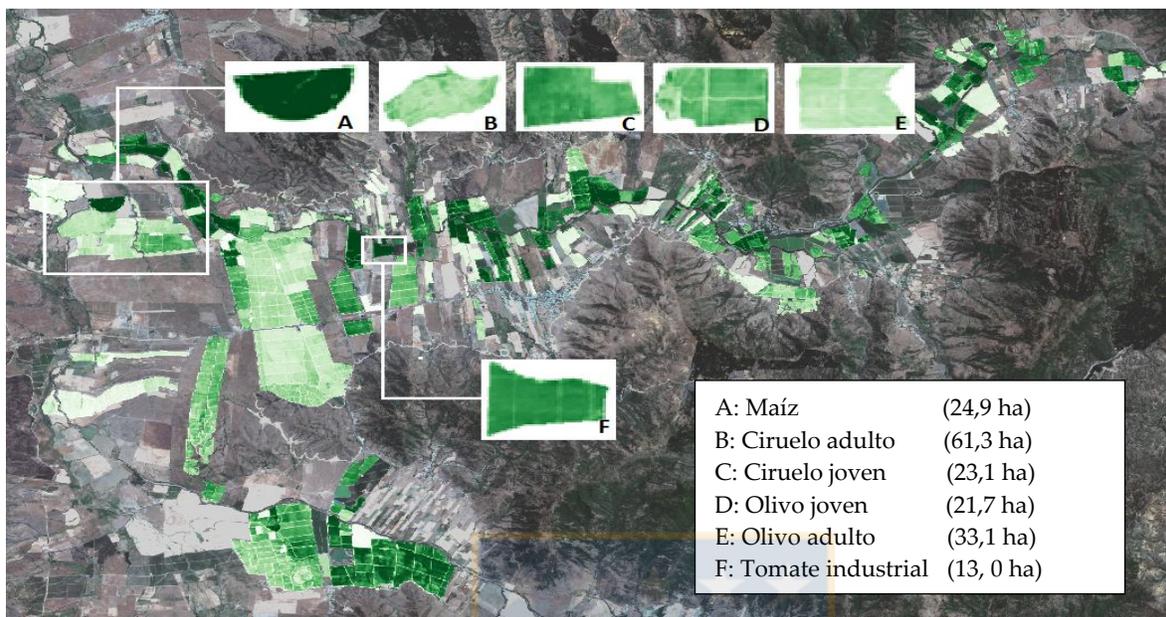


Figura 13. Identificación de frutales y cultivos anuales donde se evaluó la metodología propuesta en el área estudiada.

Fuente: Elaboración propia.

La comparación se realizó entre el volumen de agua estimado obtenido a través de la implementación de la metodología, el volumen aplicado y además se incorpora el volumen potencial estimado. Dichos resultados se muestran en la Figura 14.

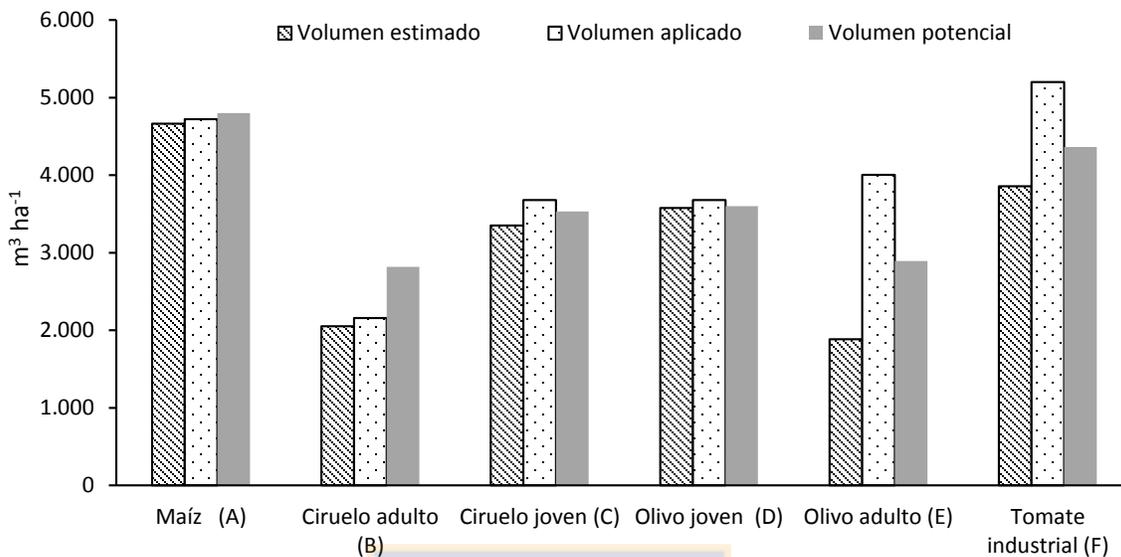


Figura 14. Volumen de agua estimado, volumen aplicado y volumen potencial para frutales y cultivos seleccionados en la evaluación de la metodología.

Fuente: Elaboración propia.

Los antecedentes muestran que el volumen estimado para la cubierta de maíz, ciruelos y olivos (A, B, C y D) reflejan el volumen aplicado durante la temporada, y satisfacen los requerimientos hídricos estimados a través de la demanda potencial. A excepción se encuentra el ciruelo adulto (B), donde el agua aplicada durante la temporada es menor a la cantidad de agua requerida por el frutal. A ello se agrega que la demanda potencial que se obtuvo para el árbol de ciruelo adulto fue menor al del ciruelo joven, condición que debería ser al revés, pero que se explica producto de la falta de riego aplicado durante la temporada. Situación que también se presentó en el huerto de olivos (D y E), donde la demanda potencial es menor para el árbol de olivo adulto que para el árbol de olivo joven. Sin embargo, esta condición no responde a la cantidad de agua aplicada entre ambos, como en el caso de los ciruelos. Donde, de los 4.000 m³ ha⁻¹ que fueron aplicados durante la temporada para el olivo adulto (E) el modelo reflejó un valor de 2.000 m³ ha⁻¹, situación que puede estar relacionada con una baja eficiencia utilizada en el manejo del riego, o algún tipo de enfermedad que esté afectando al frutal y que se refleja con valores

menores al rango normal registrado por el NDVI (Avola et al. 2019) durante la temporada, caracterizada a través de la demanda potencial.

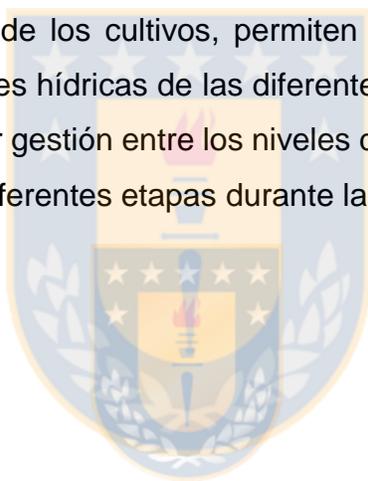
Los olivos en general son muy resistentes a la falta de agua y muestran una alta capacidad de recuperación después de periodos prolongados de sequía, pero se requiere una gestión del riego ajustado, ya que el aumento del riego, hasta cierto nivel, da como resultado un aumento del rendimiento, pero un cierto grado de estrés mejora la calidad del aceite (Agam et al. 2013; Dag et al. 2008; Ben-Gal et al. 2011). Para el cultivo de tomate industrial (F) el volumen aplicado superó en $1.300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ al volumen estimado, pero este último es casi idéntico al volumen potencial. Esto demuestra que la planta solo evapotranspira la cantidad de agua que es capaz de retenerse en el suelo y no el exceso de ella como ocurrió en este caso. El exceso de riego en el cultivo de tomate puede provocar un crecimiento foliar excesivo y las plantas con alto vigor vegetativo tienden a producir frutos de baja calidad e incluso en algunas variedades, las grandes variaciones en los niveles de humedad en el suelo durante la maduración del fruto puede causar agrietamiento del fruto, manchas, pudrición y variación en el tamaño y forma (Chapagain and Orr 2009).

En términos estadísticos la demanda de agua estimada a través de la metodología propuesta en función del volumen aplicado tuvo un RMSE de $0,6 \text{ mm día}^{-1}$ y un BIAS de $-0,4 \text{ mm día}^{-1}$ considerando la totalidad de los cultivos evaluados, lo que indica que la metodología subestima el volumen con respecto al aplicado.

Si bien la metodología implementada es capaz de reflejar efectivamente la cantidad de agua aplicada, se deja en evidencia la falta considerable del recurso durante las etapas vitales de desarrollo de la planta. Tanto la escasez de agua como las aplicaciones inadecuadas pueden combinarse con una distribución desigual del agua en el campo, a menudo debido a la baja uniformidad promedio de los sistemas de riego, especialmente cuando no están adecuadamente diseñados, evaluados y mantenidos, lo que puede ocasionar una disminución del 20% en el rendimiento de los cultivos e ingresos económicos (Zaccaria et al. 2010).

6. CONCLUSIÓN

De los resultados obtenidos se concluye que es posible construir una serie temporal multi-modal de NDVI integrando los datos de los sensores L8 y S2, que permiten la estimación de ET de manera continua durante una temporada agrícola, y evidenciar adecuadamente la respuesta que tienen los cultivos a los problemas de déficit y exceso de riego asociados al manejo del agua. Lo anterior se sustenta sobre la base de los valores del coeficiente de correlación de Pearson ($r > 0,8$) que se obtuvieron para la cubierta de frutales y cultivos anuales, respectivamente. Además, la comparación entre la demanda de agua estimada y los antecedentes de los requerimientos potenciales de los cultivos, permiten elaborar un balance hídrico actualizado a las necesidades hídricas de las diferentes cubiertas agrícolas, con la finalidad de lograr una mejor gestión entre los niveles de agua aplicada, manejo del riego y producción, en las diferentes etapas durante la estación de riego.



7. REFERENCIAS

- Abuzar, Mohammad, Kathryn Sheffield, Des Whitfield, and Andy McAllister. 2014. "Comparing Inter-Sensor NDVI for the Analysis of Horticulture Crops in South-Eastern Australia." *American Journal of Remote Sensing* 2 (1): 1–9. <https://doi.org/10.11648/j.ajrs.20140201.11>.
- Abuzar, Mohammad, Des Whitfield, Andy McAllister, and Kathryn Sheffield. 2019. "Application of ET-NDVI-Relationship Approach and Soil-Water-Balance Modelling for the Monitoring of Irrigation Performance of Treed Horticulture Crops in a Key Fruit-Growing District of Australia." *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1573337>.
- Agam, N., Y. Cohen, J. A.J. Berni, V. Alchanatis, D. Kool, A. Dag, U. Yermiyahu, and A. Ben-Gal. 2013. "An Insight to the Performance of Crop Water Stress Index for Olive Trees." *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.12.004>.
- Aitken, Douglas, Diego Rivera, Alex Godoy-Faúndez, and Eduardo Holzzapfel. 2016. "Water Scarcity and the Impact of the Mining and Agricultural Sectors in Chile." *Sustainability (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su8020128>.
- Al-Ansari, T., A. Korre, and N. Shah. 2014. "Integrated Modelling of the Energy, Water and Food Nexus to Enhance the Environmental Performance of Food Production Systems." *Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector (LCA Food 2014), San Francisco, California, USA, 8-10 October, 2014*, 1–10.
- Allen, Richard G., Masahiro Tasumi, Ricardo Trezza, James Wright, Wim Bastiaanssen, William Kramber, Ignacio Lorite, and Clarence Robinson. 2007. "Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)).
- Allen, Richard G, Luis S Pereira, Dirk Raes, Martin Smith, and W Ab. 1998. "Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56." *Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO*,

300. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>.
- Avola, Giovanni, Salvatore Filippo Di Gennaro, Claudio Cantini, Ezio Riggi, Francesco Muratore, Calogero Tornambè, and Alessandro Matese. 2019. "Remotely Sensed Vegetation Indices to Discriminate Field-Grown Olive Cultivars." *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs11101242>.
- Ayed, México, Teixeira-da Silva, Ben Younes, and Ben Salah. 2017. "Colegio de Postgraduados." *Agrociencia* 51 (1): 13–26. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30249773003>.
- Bannari, A., D. Morin, F. Bonn, and A. R. Huete. 1995. "A Review of Vegetation Indices." *Remote Sensing Reviews*. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>.
- Bastiaanssen W.G.M., M. Meneti, R.A. Feddes, a. a M Holtslag, W. G M Bastiaanssen, M. Menenti, R. a. Feddes, and a. a M Holtslag. 1998. "A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): 1. Formulation." *Journal of Hydrology*. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4).
- Ben-Gal, A., U. Yermiyahu, I. Zipori, E. Presnov, E. Hanoch, and A. Dag. 2011. "The Influence of Bearing Cycles on Olive Oil Production Response to Irrigation." *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0237-1>.
- Bryla, David R, and Bernadine C Strik. 2007. "Effects of Cultivar and Plant Spacing on the Seasonal Water Requirements of Highbush Blueberry." *J. AMER. SOC. HORT. SCI.* Vol. 132.
- Chapagain, A. K., and S. Orr. 2009. "An Improved Water Footprint Methodology Linking Global Consumption to Local Water Resources: A Case of Spanish Tomatoes." *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.06.006>.
- Chaves, M. M., O. Zarrouk, R. Francisco, J. M. Costa, T. Santos, A. P. Regalado, M. L. Rodrigues, and C. M. Lopes. 2010. "Grapevine under Deficit Irrigation: Hints from Physiological and Molecular Data." *Annals of Botany*. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq030>.
- Claverie, Martin, Jeffrey G Masek, Junchang Ju, and Jennifer L Dungan. 2016. "Harmonized Landsat-8 Sentinel-2 (HLS) Product User's Guide Authors:

Product Version: 1.3.” <http://hls.gsfc.nasa.gov/>.

- Dag, Arnon, Alon Ben-Gal, Uri Yermiyahu, Loai Basheer, Yogev Nir, and Zohar Kerem. 2008. “The Effect of Irrigation Level and Harvest Mechanization on Virgin Olive Oil Quality in a Traditional Rain-Fed ‘Souri’ Olive Orchard Converted to Irrigation.” *Journal of the Science of Food and Agriculture*. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3243>.
- Dalezios, Nicolas R., Nicholas Dercas, Nicos V. Spyropoulos, and Emmanouil Psomiadis. 2019. “Remotely Sensed Methodologies for Crop Water Availability and Requirements in Precision Farming of Vulnerable Agriculture.” *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2161-8>.
- DeJonge, K. C., J. C. Ascough, A. A. Andales, N. C. Hansen, L. A. Garcia, and M. Arabi. 2012. “Improving Evapotranspiration Simulations in the CERES-Maize Model under Limited Irrigation.” *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.08.013>.
- ESA. 2013. “Sentinel 2.” 2013. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.
- FAO; IFAD and WFP. 2015. “The State of Food Insecurity in the World.” In *Meeting the 2015 International Hunger Targets: Taking Stock of Uneven Progress*. Rome. www.fao.org/publications.
- Flood, Neil. 2017. “Comparing Sentinel-2A and Landsat 7 and 8 Using Surface Reflectance over Australia.” *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs9070659>.
- Fonseca, David. 2015. “Estimation of Spatially Distributed Evapotranspiration through of GEOBIA Approach.” Universidad de Concepción.
- Girona, J., J. Marsal, M. Mata, J. Del Campo, and B. Basile. 2009. “Phenological Sensitivity of Berry Growth and Composition of Tempranillo Grapevines (*Vitis Vinifera* L.) to Water Stress.” *Australian Journal of Grape and Wine Research*. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00059.x>.
- Glenn, Edward P., Alfredo R. Huete, Pamela L. Nagler, Katherine K. Hirschboeck, and Paul Brown. 2007. “Integrating Remote Sensing and Ground Methods to Estimate Evapotranspiration.” *Critical Reviews in Plant Sciences*.

<https://doi.org/10.1080/07352680701402503>.

- Glenn, Edward P., Alfredo R. Huete, Pamela L. Nagler, and Stephen G. Nelson. 2008. "Relationship between Remotely-Sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us about the Landscape." *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s8042136>.
- Goldhamer, David A., Mario Viveros, and Mario Salinas. 2006. "Regulated Deficit Irrigation in Almonds: Effects of Variations in Applied Water and Stress Timing on Yield and Yield Components." *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0014-8>.
- Holzapfel, E. A., R. F. Hepp, and M. A. Mariño. 2004. "Effect of Irrigation on Fruit Production in Blueberry." *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.02.008>.
- INE. 2008. "Instituto Nacional de Estadísticas. Chile." 2008. <https://www.ine.cl/estadisticas/economicas/estadisticas-agropecuarias>.
- Intrigliolo, Diego S., and Juan Ramón Castel. 2009. "Response of Grapevine Cv. 'Tempranillo' to Timing and Amount of Irrigation: Water Relations, Vine Growth, Yield and Berry and Wine Composition." *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0164-1>.
- Jarchow, Christopher J., Pamela L. Nagler, Edward P. Glenn, Jorge Ramírez-Hernández, and J. Eliana Rodríguez-Burgueño. 2017. "Evapotranspiration by Remote Sensing: An Analysis of the Colorado River Delta before and after the Minute 319 Pulse Flow to Mexico." *Ecological Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.056>.
- Kloss, Sebastian, Jens Grundmann, Sabine J. Seidel, Stefan Werisch, Jörn Trümmner, Urs Schmidhalter, and Niels Schütze. 2014. "Investigation of Deficit Irrigation Strategies Combining SVAT-Modeling, Optimization and Experiments." *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3463-7>.
- L. Congedo. 2016. "Semi-Automatic Classification Plugin Documentation Release 4.8.0.1." *Release*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>.

- Levidow, Les, Daniele Zaccaria, Rodrigo Maia, Eduardo Vivas, Mladen Todorovic, and Alessandra Scardigno. 2014. "Improving Water-Efficient Irrigation: Prospects and Difficulties of Innovative Practices." *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.012>.
- Li, Fuqin, William P. Kustas, John H. Prueger, Christopher M. U. Neale, and Thomas J. Jackson. 2006. "Utility of Remote Sensing–Based Two-Source Energy Balance Model under Low- and High-Vegetation Cover Conditions." *Journal of Hydrometeorology*. <https://doi.org/10.1175/jhm464.1>.
- Li, Qiong, Zhicai Luo, Bo Zhong, and Hao Zhou. 2018. "An Improved Approach for Evapotranspiration Estimation Using Water Balance Equation: Case Study of Yangtze River Basin." *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w10060812>.
- Li, Xingmin, Ling Lua, Wenfeng Yang, and Guodong Cheng. 2012. "Estimation of Evapotranspiration in an Arid Region by Remote Sensing—A Case Study in the Middle Reaches of the Heihe River Basin." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.09.008>.
- Li, Y, W Kinzelbach, J Zhou, G D Cheng, and X Li. 2012. "Hydrology and Earth System Sciences Modelling Irrigated Maize with a Combination of Coupled-Model Simulation and Uncertainty Analysis, in the Northwest of China." *Hydrol. Earth Syst. Sci* 16: 1465–80. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1465-2012>.
- López-Mata, E., J. M. Tarjuelo, J. J. Orenco-Valverde, J. J. Pardo, and A. Domínguez. 2019. "Irrigation Scheduling to Maximize Crop Gross Margin under Limited Water Availability." *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.013>.
- Lorite, I. J., L. Mateos, and E. Fereres. 2004. "Evaluating Irrigation Performance in a Mediterranean Environment: II. Variability among Crops and Farmers." *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-004-0096-8>.
- Medrano, Hipólito, José M. Escalona, Josep Cifre, Josefina Bota, and Jaume Flexas. 2003. "A Ten-Year Study on the Physiology of Two Spanish Grapevine Cultivars under Field Conditions: Effects of Water Availability from Leaf Photosynthesis to Grape Yield and Quality." *Functional Plant Biology*. <https://doi.org/10.1071/FP02110>.

- Montoro, A., P. López-Fuster, and E. Fereres. 2011. "Improving On-Farm Water Management through an Irrigation Scheduling Service." *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0235-3>.
- Mu, Qiaozhen, Faith Ann Heinsch, Maosheng Zhao, and Steven W. Running. 2007. "Development of a Global Evapotranspiration Algorithm Based on MODIS and Global Meteorology Data." *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.015>.
- Mulla D.J. 2013. "Twenty Five Years of Remote Sensing in Precision Agriculture: Key Advances and Remaining Knowledge Gaps." *Biosystems Engineering*. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2012.08.009>.
- Munitz, S., Y. Netzer, and A. Schwartz. 2017. "Sustained and Regulated Deficit Irrigation of Field-Grown Merlot Grapevines." *Australian Journal of Grape and Wine Research*. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12241>.
- Nagler, Pamela L., James Cleverly, Edward Glenn, Derrick Lampkin, Alfredo Huete, and Zhengming Wan. 2005. "Predicting Riparian Evapotranspiration from MODIS Vegetation Indices and Meteorological Data." *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.009>.
- Nanos, George D., Ioannis Kazantzis, Panagiotis Kefalas, Christos Petrakis, and George G. Stavroulakis. 2002. "Irrigation and Harvest Time Affect Almond Kernel Quality and Composition." *Scientia Horticulturae*. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(02\)00078-X](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00078-X).
- Naor, A., M. Peres, Y. Greenblat, Y. Gal, and R. Ben Arie. 2004. "Effects of Pre-Harvest Irrigation Regime and Crop Level on Yield, Fruit Size Distribution and Fruit Quality of Field-Grown 'Black Amber' Japanese Plum." *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511761>.
- Nouri, H., B. Stokvis, A. Galindo, M. Blatchford, and A. Y. Hoekstra. 2019. "Water Scarcity Alleviation through Water Footprint Reduction in Agriculture: The Effect of Soil Mulching and Drip Irrigation." *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.311>.
- Paço, T. A., M. I. Ferreira, R. D. Rosa, P. Paredes, G. C. Rodrigues, N. Conceição,

- C. A. Pacheco, and L. S. Pereira. 2012. "The Dual Crop Coefficient Approach Using a Density Factor to Simulate the Evapotranspiration of a Peach Orchard: SIMDualKc Model versus Eddy Covariance Measurements." *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0267-3>.
- Pierre, Carolina Saint, José L. Crossa, David Bonnett, Kazuko Yamaguchi-Shinozaki, and Matthew P. Reynolds. 2012. "Phenotyping Transgenic Wheat for Drought Resistance." *Journal of Experimental Botany*. <https://doi.org/10.1093/jxb/err385>.
- "Preliminary Tests and Results Concerning Integration of Sentinel-2 and Landsat-8 OLI for Crop Monitoring." 2017. *Journal of Imaging*. <https://doi.org/10.3390/jimaging3040049>.
- Rafn, Eric B., Bryce Contor, and Daniel P. Ames. 2008. "Evaluation of a Method for Estimating Irrigated Crop-Evapotranspiration Coefficients from Remotely Sensed Data in Idaho." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2008\)134:6\(722\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2008)134:6(722)).
- Ramírez-Cuesta, Juan Miguel, José Manuel Mirás-Avalos, José Salvador Rubio-Asensio, and Diego S. Intrigliolo. 2018. "ARamírez-Cuesta, J. M., Mirás-Avalos, J. M., Rubio-Asensio, J. S., & Intrigliolo, D. S. (2018). A Novel ArcGIS Toolbox for Estimating Crop Water Demands by Integrating the Dual Crop Coefficient Approach with Multi-Satellite Imagery. *Water (Switzerland)*. H." *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w11010038>.
- Rivera, Diego, Alex Godoy-Faúndez, Mario Lillo, Amaya Alvez, Verónica Delgado, Consuelo Gonzalo-Martín, Ernestina Menasalvas, Roberto Costumero, and Ángel García-Pedrero. 2016. "Legal Disputes as a Proxy for Regional Conflicts over Water Rights in Chile." *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.057>.
- Romero, Pascual, Rocío Gil-Muñoz, Francisco M. del Amor, Esperanza Valdés, Jose Ignacio Fernández, and Adrián Martínez-Cutillas. 2013. "Regulated Deficit Irrigation Based upon Optimum Water Status Improves Phenolic Composition in Monastrell Grapes and Wines." *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.01.007>.

- Rossato, Luciana, Regina C. S. Alvala, Nelson J. Ferreira, and Javier Tomasella. 2006. "Evapotranspiration Estimation in the Brazil Using NDVI Data." In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology VII*. <https://doi.org/10.1117/12.626793>.
- Santos, C., Ignacio J. Lorite, M. Tasumi, R. G. Allen, and E. Fereres. 2010. "Performance Assessment of an Irrigation Scheme Using Indicators Determined with Remote Sensing Techniques." *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0207-7>.
- Tan, Shen, Bingfang Wu, Nana Yan, and Weiwei Zhu. 2017. "An NDVI-Based Statistical ET Downscaling Method." *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w9120995>.
- Teillet, P. M., and C. Fedosejevs. 1995. "On the Dark Target Approach to Atmospheric Correction of Remotely Sensed Data." *Canadian Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/07038992.1995.10855161>.
- Tello, J, R Gómez-Báguena, and M A Casterad. 2017. "Comparación y Ajuste En Zonas Agrícolas de Índices de Vegetación Derivados de Landsat-8 y Sentinel-2 Comparison and Adjustment in Agricultural Areas of Vegetation Indexes Derived from Landsat-8 and Sentinel-2." <http://idearm.imida.es/aet2017>.
- Timmermans, Wim J., William P. Kustas, Martha C. Anderson, and Andrew N. French. 2007. "An Intercomparison of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Two-Source Energy Balance (TSEB) Modeling Schemes." *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.028>.
- Torrecillas, A., J. J. Alarcón, R. Domingo, J. Planes, and M. J. Sánchez-Blanco. 1996. "Strategies for Drought Resistance in Leaves of Two Almond Cultivars." *Plant Science*. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(96\)04434-2](https://doi.org/10.1016/0168-9452(96)04434-2).
- USGS. 2014. "EarthExplorer." 2014. <http://earthexplorer.usgs.gov/>.
- . 2015. "Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Sioux Falls, South Dakota: United States Geological Survey." 2015. <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook>.
- Valdés-Pineda, Rodrigo, Roberto Pizarro, Pablo García-Chevesich, Juan B. Valdés,

Claudio Olivares, Mauricio Vera, Francisco Balocchi, et al. 2014. "Water Governance in Chile: Availability, Management and Climate Change." *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>.

Zaccaria, Daniele, Ines Oueslati, Christopher M.U. Neale, Nicola Lamaddalena, Michele Vurro, and Luis S. Pereira. 2010. "Flexible Delivery Schedules to Improve Farm Irrigation and Reduce Pressure on Groundwater: A Case Study in Southern Italy." *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0186-8>.

