



**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA DE AGRONOMÍA**

**Estimación del consumo hídrico de vid cv. Cabernet Sauvignon mediante el modelo Shuttleworth y Wallace usando un vehículo aéreo no tripulado**

**Joaquín Ignacio Albornoz González**

**Talca, Chile**

**2019**



**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA DE AGRONOMÍA**

**Estimación del consumo hídrico de vid cv. Cabernet sauvignon usando cámaras termales y multiespectrales montadas en un vehículo aéreo no tripulado (VANT)**

**Por**

**Joaquín Ignacio Albornoz González**

**MEMORIA DE TITULO**

**Presentada a la universidad de Talca como parte de los requisitos para optar al título de**

**INGENIERO AGRONOMO**

**TALCA, 2019**

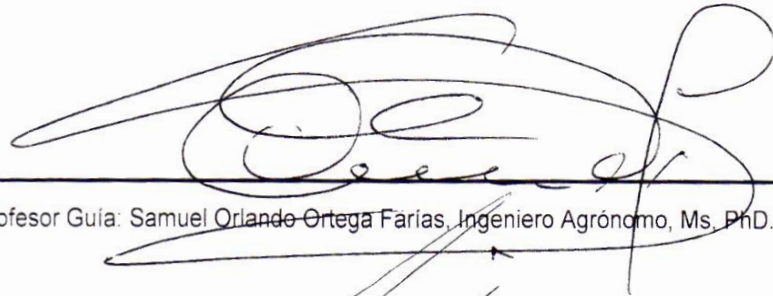
## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su unidad de procesos técnicos certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



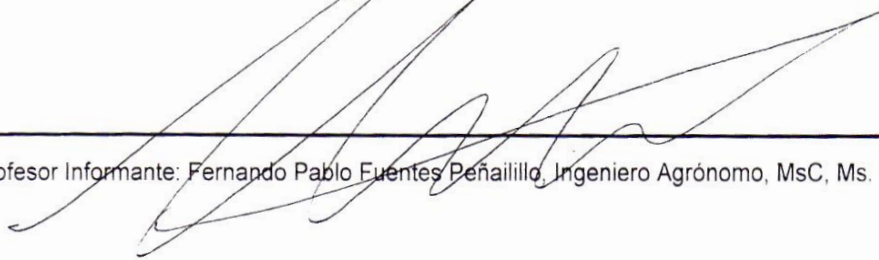
Talca, 2020

APROBACIÓN:



---

Profesor Guía: Samuel Orlando Ortega Fariás, Ingeniero Agrónomo, Ms, PhD.



---

Profesor Informante: Fernando Pablo Fuentes Peñailillo, Ingeniero Agrónomo, MSc, Ms.

Fecha de presentación de la defensa de memoria: 06/09/2019 //

A Mariana, Leonardo y María Eugenia, que estuvieron conmigo desde el comienzo. Les dedico el mayor trabajo de mi vida... hasta ahora. Nada habría sido igual sin ustedes.

## RESUMEN

Debido a la baja fracción de cobertura de viñedos conducidos en espaldera vertical simple, modelos como Penman-Monteith tienen problemas para estimar la evapotranspiración del cultivo, presentando diferencias importantes entre el valor estimado y el observado. Es por esto por lo que en este trabajo se utilizó el modelo de dos fuentes de Shuttleworth y Wallace (SW), complementado con información obtenida de un vehículo aéreo no tripulado (VANT), de tal manera de incorporar la variabilidad aportada por el suelo y el vigor del cultivo. Este trabajo se realizó en el valle de Péncahue, región del Maule, en un viñedo comercial de 6 años, conducido en espaldera vertical simple y con un sistema de riego por goteo. El modelo fue comparado con las mediciones obtenidas de un sistema de flujos turbulentos ubicado en el centro de la zona de estudio. Los indicadores utilizados para medir la correlación de ambos métodos fueron el cuadrado medio del error (RMSE), error medio absoluto (MAE) y el índice de acuerdo del modelo (d). Los resultados obtenidos indican que SW estimó con un RMSE de  $34.16 \text{ W m}^{-1}$ ,  $0.44 \text{ mm día}^{-1}$  y  $0.14 \text{ mm hora}^{-1}$  el flujo de calor latente, la evapotranspiración diaria, y la evapotranspiración horaria, respectivamente.

## ABSTRACT

Due to the low coverage fraction of vineyards grow in simple vertical trellis, models like Penman-Monteith present problems in the estimation of actual evapotranspiration of the crop, showing important differences between the estimated and observed values. To solve this problem, this study uses the two-sources Shuttleworth and Wallace model (SW), which helped by aerial information obtained from an unmanned aerial vehicle (VANT), incorporates the spatial variability of the soil and the vineyard vigor. This work was made in Pehuenhue valley, Maule region, in a simple vertical trellis conducted six years-old vineyards with a drip irrigation system. SW was compared with the measures obtained from an Eddy Covariance system. The performance of the model was evaluated with the root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE) and the index of agreement of the model (d). results show that SW estimated with a RMSE of  $34.16 \text{ W m}^{-1}$ ,  $0.44 \text{ mm day}^{-1}$  and  $0.14 \text{ mm hour}^{-1}$  the Latent heat flux, daily evapotranspiration and instant evapotranspiration, respectively.

## INDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	4
1.1. Hipótesis .....	6
1.2. Objetivo general .....	6
1.3. Objetivos específicos .....	6
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	7
2.1. Situación actual de la vid .....	7
2.2. Métodos para estimar el consumo de agua .....	8
2.3. Percepción remota como herramienta para estimar ETa .....	9
2.4. Modelos utilizados en teledetección .....	10
2.5. Aplicaciones de los drones en la estimación de ETa .....	11
2.6. Estimación del consumo hídrico con Shuttleworth & Wallace .....	12
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	14
3.1. Sitio de estudio .....	14
3.3. Mediciones realizadas por Eddy Covariance .....	15
3.4. Mediciones para Shuttleworth y Wallace realizadas por el VANT .....	16
3.6. Análisis estadístico .....	16
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	18
4.1. Condiciones durante el vuelo .....	18
4.2. Validación del modelo .....	21
5. CONCLUSIÓN .....	25
6. BIBLIOGRAFÍA .....	26



## INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Imagen aérea del lugar de estudio	14
Figura 4.1. Evapotranspiración de referencia diaria y radiación neta promedio	18
Figura 4.2. Déficit de presión de vapor promedio	19
Figura 4.3. Velocidad promedio del viento y temperatura promedio del aire	19
Figura 4.4. Cierre del balance de energía a intervalos de 30 minutos	20
Figura 4.5. Comparación de radiación neta, flujo de calor latente y flujo de calor de suelo entre Eddy Covariance con Shuttleworth y Wallace	21
Figura 4.6. Comparación de Flujo de calor latente instantáneo entre Eddy Covariance con Shuttleworth y Wallace.	22
Figura 4.7. Comparación de evapotranspiración diaria de Eddy Covariance con Shuttleworth y Wallace	23

## INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Potencial xilemático del cultivo durante periodo de estudio	19
Tabla 4.2. Análisis estadístico del flujo de calor latente, radiación neta, evapotranspiración real horaria, evapotranspiración real diaria y flujo de calor de suelo	23

## INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Evapotranspiración FAO 56	8
Ecuación 2. Calor latente modelo Shuttleworth y Wallace	12
Ecuación 3. Transpiración modelo Shuttleworth y Wallace	12
Ecuación 4. Evaporación modelo Shuttleworth y Wallace	12
Ecuación 5. Evapotranspiración instantánea modelo Shuttleworth y Wallace	13
Ecuación 6. Fracción de la evaporación de referencia	13
Ecuación 7. Evapotranspiración diaria modelo Shuttleworth y Wallace	13
Ecuación 8. Flujo de calor latente Bowen	15
Ecuación 9. Flujo de calor sensible Bowen	15
Ecuación 10. Evapotranspiración Eddy Covariance	16
Ecuación 11. Cuadrado medio del error	17
Ecuación 12. Media del error absoluto	17
Ecuación 13. Índice de acuerdo	17

## 1. INTRODUCCIÓN

Debido al cambio climático, se espera que la disponibilidad de agua disminuya de manera significativa en los próximos años (IPCC, 2014). Esto cobra gran importancia en el sector agrícola, ya que, casi el 70% del agua dulce se destina a la producción agrícola mundial (FAO, 2017). En el caso de Chile, se espera que en la zona central se produzca una disminución de hasta un 40% de las precipitaciones (CONAMA, 2006), lo que afectará considerablemente la disponibilidad de agua para riego. Lo anterior es importante para cultivos como la vid (*Vitis vinífera* Linnaeus), la que posee una superficie cultivada de 137 mil hectáreas a nivel nacional (ODEPA, 2017). Debido a los crecientes problemas de disponibilidad hídrica y a la gran superficie ocupada por la vid, es necesario el establecimiento de técnicas que permitan determinar apropiadamente el consumo hídrico de los viñedos.

Para determinar el consumo de agua de un cultivo, tradicionalmente se usa la evapotranspiración del cultivo (ETa), cuyo valor se obtiene a través del modelo Penman-Monteith (Allen et al., 1998), multiplicando la evapotranspiración de referencia (ETo) por un coeficiente de cultivo (Kc), el que es característico para cada cultivo y estado de desarrollo. Sin embargo, en la mayoría de los casos los valores de Kc usados son empíricos, y no se adaptan a las condiciones locales, ya que presentan distintas características climáticas y de suelo (Ortega-Farías et al., 2009).

Autores como Allen et al. (2007), propusieron el uso de herramientas de percepción remota como una buena alternativa para estimar ETa. Para esto, tradicionalmente se utilizan plataformas satelitales, las que integran sensores termales y multiespectrales. Sin embargo, al utilizar estos dispositivos, la obtención de información se ve limitada por la frecuencia de paso del satélite, por las condiciones climáticas del momento, especialmente nubosidad (Carrasco et al., 2013), y por la resolución de la imagen (cada pixel abarca 30m<sup>2</sup>).

Debido a las limitaciones de las plataformas satelitales, ha surgido la necesidad de utilizar herramientas que permitan evaluar y monitorizar superficies agrícolas con una mejor resolución espacial. Una alternativa consiste en realizar las mediciones con un vehículo aéreo no tripulado, VANT (Zhang & Kovacs, 2012), equipado con cámaras termales y multiespectrales. Al respecto, este sistema ha sido probado como una excelente herramienta para estimar la variabilidad espacial de la ETa de huertos y viñedos (Brenner et al., 2017; Hoffmann et al., 2016; Kustas et al., 2018; Ortega-Farías et al., 2017).

Junto al desarrollo tecnológico, se han creado diversos modelos que se basan en las herramientas de percepción remota para la estimación de ETa, donde destacan los métodos residuales del balance de energía superficial. Ejemplos de estos modelos son el “Algoritmo de balance de energía superficial” (SEBAL, Bastiaanssen et al., 1998), “Mapeo de evapotranspiración en alta resolución con calibración interna” (METRIC, Allen et al., 2007), “Modelo de balance de energía de dos fuentes” (TSEB, Kustas & Norman, 1999), y “Diferencia de temperatura dual” (DTD, Norman et al., 2000). Alternativamente, Fuentes-Peñailillo et al. (2018) han propuesto la utilización del modelo de dos capas de Shuttleworth y Wallace (SW) en combinación con percepción remota y datos climáticos obtenidos a nivel de suelo para estimar la evapotranspiración de un huerto de olivo. Al respecto, el modelo SW estima el calor latente (LE) como la suma de la evaporación de agua del suelo y la transpiración del cultivo (Shuttleworth, & Wallace, 1976).

En relación con lo anterior, el objetivo de este estudio es estimar la ETa de un viñedo comercial conducido en espaldera vertical simple, usando cámaras multiespectrales y termales montadas en un VANT. Para cumplir con el objetivo anterior, se implementó un código en R para estimar la ETa usando el modelo de dos fuentes SW, el cual utiliza imágenes de alta resolución espacial e información meteorológica.

A continuación, se plantean la hipótesis y objetivos del presente estudio:

### **1.1. Hipótesis**

El modelo de Shuttleworth y Wallace (SW) en combinación con información meteorológica e imágenes adquiridas por un vehículo aéreo no tripulado (VANT) incorporan el efecto de la variabilidad del suelo y vigor del viñedo sobre la estimación de la evapotranspiración del cultivo (ETa).

### **1.2. Objetivo general**

Determinar el consumo hídrico de un viñedo (cv. Cabernet Sauvignon) usando cámaras termales y multiespectrales montadas en un vehículo aéreo no tripulado (VANT).

### **1.3. Objetivos específicos**

Desarrollar una metodología de procesamiento de imágenes, con el fin de segmentarlas y lograr así separar la información correspondiente al cultivo de la del suelo.

Implementar un algoritmo de dos fuentes para la estimación del consumo hídrico del cultivo (Modelo de Shuttleworth y Wallace). Dicho algoritmo será desarrollado en el programa R.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Situación actual de la vid

La viticultura mundial posee una superficie plantada de 7.5 millones de hectáreas, de las cuales el 50% está ocupada por España (13%), China (11%), Francia (10%), Italia (9%) y Turquía (7%) (OIV, 2018). En cuanto a la dinámica de desarrollo del sector vitícola mundial, en el periodo 2003-2016 la superficie plantada disminuyó en 400 mil hectáreas, pero la producción aumentó en casi 12 millones de toneladas (FAO, 2019). En este contexto, Chile ocupa el noveno lugar como productor de vino del mundo (Aurand, 2017) concentrando la producción nacional en las regiones de O'Higgins y del Maule con un 33 y 38% de la superficie plantada, respectivamente (ODEPA, 2016).

Como ya se ha mencionado, gran parte de la viticultura se encuentra en la zona central del país, donde se espera que a raíz del cambio climático disminuyan considerablemente las precipitaciones (Meza & Cifuentes, 2008), lo que supone un desafío, ya que el 86.41% de la superficie vitícola nacional se encuentra bajo riego (SAG, 2017), por lo que, frente a la futura problemática de disminución del recurso hídrico disponible para uso agrícola surge la necesidad de aumentar la eficiencia del uso del agua, siendo el primer paso la determinación del consumo hídrico de las plantas.

## **2.2. Métodos para estimar el consumo de agua**

La estimación del consumo hídrico se realiza a través de la determinación de la evapotranspiración del cultivo (ETa) (Allen et al., 1998), la cual se estima a través de la siguiente expresión:

$$ETa=ETo*Kc \qquad \text{Eq. 1}$$

donde ETa= evapotranspiración del cultivo (mm día<sup>-1</sup>); ETo= evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>) y Kc= coeficiente de cultivo (adimensional). El cálculo de ETo se efectúa mediante el modelo de Penman-Monteith, que utiliza como variables de entrada la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. Por otra parte, el Kc representa el efecto del estado de crecimiento y vigor del cultivo sobre su consumo de agua. Es importante considerar que los valores de Kc dependen de la variabilidad espacial del suelo, clima y cultivo y es por ello por lo que los valores de literatura deben ser adaptados a las condiciones específicas del viñedo. Sin embargo, Cammalleri et al. (2013) señalaron que la estimación de la evapotranspiración a través de este modelo presenta limitaciones en su aplicabilidad sobre grandes superficies, ya que es difícil la estimación de las características del cultivo (porcentaje de suelo, de cultivo, altura del cultivo, estado fenológico, etc), así como relacionar estas características con el Kc de literatura. Además, la metodología presenta dificultades para estimar de manera correcta la ETa de cultivos como el viñedo, el cual presenta una baja fracción de cobertura (fc). Al respecto, Zhao et al. (2015) registraron valores de fc de 0.3 para viñedos (cv. Merlot) conducidos en espaldera vertical simple. Mientras que, Ortega-Farías & López-Olivari (2012) señalaron la importancia de considerar fc, ya que para obtener valores representativos de ETa se debe considerar la evaporación del suelo y la transpiración de la planta. Para solucionar estos problemas, autores como Ortega-Farias et al. (2016), Paço et al. (2014) y Samani et al. (2009) propusieron el uso de la percepción remota para incorporar el efecto de la variabilidad espacial en el Kc.



### **2.3. Percepción remota como herramienta para estimar ETa**

Según Allen et al. (2007), las herramientas de percepción remota se presentan como una buena alternativa para estimar ETa debido a la dificultad que presentan otros métodos para correlacionar las características vegetativas y de crecimiento de los cultivos con el Kc de tabla (especialmente en condiciones de restricción hídrica). Además, las herramientas de percepción remota poseen la capacidad de cuantificar la variabilidad espacial intracultivo, incorporando además la variabilidad temporal, permitiendo así que los datos obtenidos alimenten distintos modelos biomatemáticos. Ejemplos de este tipo de herramienta son las plataformas satelitales, vehículos aéreos y vehículos aéreos no tripulados.

Ejemplos de plataformas satelitales son LANDSAT 7 y 8, las cuales son de acceso gratuito y poseen una frecuencia de paso de 8 días entre ambos. Una serie de autores como Carrasco-Benavides et al. (2012) y Fuentes-Peñailillo et al. (2018) han demostrado la utilidad de estas herramientas en la estimación de ETa en cultivos de vid y olivo, respectivamente. A pesar de su utilidad, se presentan como grandes limitaciones de su uso: (i) La frecuencia de paso por el mismo lugar (Berni et al., 2009). (ii) La toma de datos está limitada por las condiciones climáticas del día (no se pueden conseguir en días nublados) (Matese et al., 2015). (iii) La resolución de la imagen, ya que cada pixel cubre 30m<sup>2</sup> (Clarke, 1997; Cohen et al., 2005). (iv) La dificultad de la estimación del calor sensible (H), debido a la complejidad de la parametrización de la resistencia aerodinámica total a la transferencia de calor, la que está relacionada tanto a características del dosel y ambientales (Zhuang et al., 2016). (v) Bandas con datos inválidos, esto debido a que desde el 2003, el sensor ha presentado errores que se traducen en una pérdida de cerca del 22% de la información obtenida por imagen (Fuentes-Peñailillo et al., 2019).

Por otra parte, se puede señalar a los VANT como otra herramienta de percepción remota que permite la estimación de ETa de un cultivo. Al respecto, los VANT destacan por: (i) Alta resolución espacial (Matese & Di Gennaro, 2018). (ii) La frecuencia de paso está limitada solo por la disponibilidad de baterías para realizar el vuelo. (iii) Relativamente bajo costo operacional (Zhang & Kovacs, 2012). (iv) Rápida obtención de la información (Hardin & Hardin, 2010). Dentro de los inconvenientes que presenta este instrumento está la baja capacidad del tiempo de

vuelo, ya que se ve limitado por la duración de la batería del equipo, así como la dificultad para separar la información perteneciente al cultivo de aquella que corresponde al suelo y a las sombras (Fuentes-Peñailillo et al., 2019).

#### **2.4. Modelos utilizados en teledetección**

Se han desarrollado diversos modelos que se basan en las herramientas de percepción remota para la estimación de ETa, donde destacan los métodos residuales del balance de energía superficial. Ejemplos de estos modelos son el “Algoritmo de balance de energía superficial” (SEBAL, Bastiaanssen et al., 1998), “Mapeo de evapotranspiración en alta resolución con calibración interna” (METRIC, Allen et al., 2007), “Modelo de balance de energía de dos fuentes” (TSEB, Kustas & Norman, 1999), “Diferencia de temperatura dual” (DTD, Norman et al., 2000).

SEBAL es un modelo que utiliza relaciones empíricas y parámetros físicos, además se caracteriza por necesitar una cantidad mínima de información de la superficie del cultivo (Courault et al., 2005). Este modelo fue validado por Jacob et al. (2003) en cultivos de maravilla, trigo, maíz y alfalfa, presentando valores de RMSE de 85, 44 y 21 W m<sup>-2</sup> para LE, G y Rn, respectivamente. Por otro lado, METRIC utiliza el modelo Penman-Monteith para la estimación de la evapotranspiración de referencia (Kalma et al., 2008). Al respecto, METRIC ha sido utilizado en un viñedo (cv. Merlot) por Carrasco-Benavides et al. (2014) quienes observaron que el modelo sobreestimó LE y H en un 17 y 16%, respectivamente. El modelo TSEB se basa en la separación de la temperatura radiométrica en el flujo de energía correspondiente al suelo y al cultivo (Crow & Kustas, 2005). Para este, Timmermans et al. (2007) evaluaron el modelo TSEB en dos situaciones climáticas distintas (pradera semihúmeda y pastizal semi-árido), obteniendo RMSE de G, LE y H de 35, 62 y 37 W m<sup>-2</sup>, respectivamente. Finalmente, el modelo DTD se basa en TSEB, pero considera un diferencial de las temperaturas que se realizan en el día respecto a la temperatura que hay en las mañanas, logrando así una reducción de la sensibilidad del modelo a errores en los valores de temperatura (Guzinski et al., 2013). Este modelo ha sido validado en un sector agrícola heterogéneo por Guzinski et al. (2014), quienes registraron valores de RMSE para LE y H de 100 y 87 W m<sup>-2</sup>.

## **2.5. Aplicaciones de los drones en la estimación de ETa**

Los vehículos aéreos no tripulados o VANT, son equipos que permiten realizar distintas mediciones de un área determinada al equiparse con distintos instrumentos de medición remota. Es por esto que se presentan como una buena herramienta para la determinación de la variabilidad física de la ETa de los cultivos. En este aspecto, se ha probado la eficacia de las imágenes multiespectrales y térmicas equipadas en VANT para determinar ETa. Al respecto, Hoffmann et al. (2016) condujeron un experimento en cebada, probando el modelo TSEB-PT, obteniendo valores RMSE para LE, H y G de 94, 85 y 38W m<sup>-2</sup>, respectivamente y el modelo DTD, obteniendo valores de 67, 59 y 48W m<sup>-2</sup>, respectivamente. Ortega-Farías et al. (2016) estimaron los componentes del balance de flujo de energía en un huerto de olivos, donde LE, H y G presentaron un RMSE de 50, 56 y 19W m<sup>-2</sup>, respectivamente. Por otro lado, Kustas et al. (2018) estimaron el consumo hídrico de viñedos (cv. Pinot noir), para lo que utilizó el modelo TSEB-2T, presentando un MAE de 30 y 50W m<sup>-2</sup> para H y LE, respectivamente.

Alternativamente, Fuentes-Peñailillo et al. (2018) han propuesto la utilización del modelo de dos capas de Shuttleworth & Wallace (SW) en combinación con percepción remota y datos climáticos obtenidos a nivel de suelo para estimar la evapotranspiración de un huerto de olivo. Al respecto, Zhao et al. (2015) indicaron que el modelo de SW estimó ETa en viñedos con un RMSE y MAE de 0.68 y 0.52mm día<sup>-1</sup>, respectivamente. El presente trabajo se encuentra enmarcado en la misma temática, ya que se pretende estimar la evapotranspiración de un viñedo incorporando a la vez la partición de la ETa. La novedad respecto a los proyectos anteriores radica en incorporar al modelo probado SW imágenes con una resolución espacial de 6cm x 6cm obtenidas de un VANT, para evaluar el desempeño del modelo.

## 2.6. Estimación del consumo hídrico con Shuttleworth & Wallace

El modelo SW estima el calor latente (LE) como la suma de la evaporación y la transpiración a través de las siguientes ecuaciones (Shuttleworth, & Wallace, 1976):

$$LE_i = T_i + E \quad \text{Eq.2}$$

$$T_i = C_c \frac{\Delta A_i + \left( \frac{\rho_a C_p D_i - \Delta r_a^c A_{si}}{r_a^a + r_a^c} \right)}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s^c}{(r_a^a + r_a^c)} \right)} \quad \text{Eq.3}$$

$$E_i = C_s \frac{\Delta A_i + \left( \frac{\rho_a + C_p + D_i - \Delta r_a^s (A_i - A_{si})}{r_a^a + r_a^s} \right)}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s^s}{(r_a^a + r_a^s)} \right)} \quad \text{Eq.4}$$

donde  $LE_i$  es el flujo de calor latente instantáneo usado para el modelo SW ( $W m^{-2}$ )  $T_i$  es el flujo de calor latente de la transpiración ( $W m^{-2}$ ),  $E_i$  es el flujo de calor latente de la evaporación del suelo ( $W m^{-2}$ ),  $C_c$  es el coeficiente de resistencia del dosel (adimensional)  $C_s$  es el coeficiente de resistencia del suelo (adimensional),  $\Delta$  es la pendiente de saturación de la curva del déficit de presión de vapor a la temperatura promedio ( $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ),  $A_i$  es la energía disponible que abandona el dosel ( $W m^{-2}$ ),  $A_{si}$  es la energía disponible en la superficie del suelo ( $W m^{-2}$ ),  $C_p$  es el calor específico del aire a una presión constante ( $1013 J Kg^{-1} K^{-1}$ ),  $D_i$  es el déficit de presión del agua a una altura de referencia ( $kPa$ ),  $r_a^c$  es la resistencia de la capa límite de los elementos vegetativos del dosel ( $s m^{-1}$ ),  $r_a^a$  es la resistencia aerodinámica entre la altura del dosel y nivel de referencia ( $s m^{-1}$ ),  $\gamma$  es la constante psicrométrica ( $kPa \text{ } ^\circ k^{-1}$ )  $r_s^c$  es la resistencia del dosel ( $s m^{-1}$ ),  $r_a^s$  es la resistencia aerodinámica entre el suelo y la altura de referencia ( $s m^{-1}$ ),  $r_s^s$  es la resistencia de la superficie del suelo ( $s m^{-1}$ ). Los subíndices “i” indican valores que son obtenidos al momento de vuelo del VANT.

Utilizando la información climática obtenida a nivel de suelo y las imágenes termales y multiespectrales obtenidas de herramientas de percepción remota se puede proceder a estimar la Evapotranspiración instantánea y diaria como es señalado en las siguientes ecuaciones.

$$ET_i = 3600 * \frac{LE_i}{\rho_w \lambda} \quad \text{Eq. 5}$$

$$E_F = \frac{ET_i}{ET_{oi}} \quad \text{Eq. 6}$$

$$ET_{sw} = E_F * ET_o \quad \text{Eq. 7}$$

donde,  $ET_i$  corresponde a la Evapotranspiración instantánea obtenida del modelo SW ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $LE_i$  es el flujo de calor latente instantáneo usado para el modelo SW ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $\rho_w$  es la densidad del agua ( $1000 \text{Kg m}^{-3}$ ),  $\lambda$  corresponde al calor latente de vaporización ( $\text{J Kg}^{-1}$ ),  $E_F$  corresponde a la fracción de la evapotranspiración de referencia (adimensional),  $ET_{oi}$  es la evapotranspiración instantánea de referencia ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $ET_{sw}$  corresponde a la evapotranspiración diaria estimada por el modelo de SW ( $\text{mm d}^{-1}$ ) y  $ET_o$  corresponde a la evapotranspiración diaria de referencia ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Sitio de estudio

El estudio fue realizado en el valle de Pencahue, región del Maule, Chile ( $35^{\circ}20'32.70''S$ ;  $71^{\circ}46'47.52''W$ ; 84m sobre el nivel del mar). El clima de la región es mediterráneo semiárido, con temperaturas medias de  $19.3^{\circ}C$  entre septiembre y marzo (periodo de primavera y verano). Las precipitaciones anuales en la región del Maule varían entre 688mm y 709mm, produciéndose principalmente en los meses de invierno. El verano se caracteriza por ser seco, con cerca del 2.2% de la precipitación anual, mientras que la primavera puede ser húmeda, con 16% de la precipitación anual.

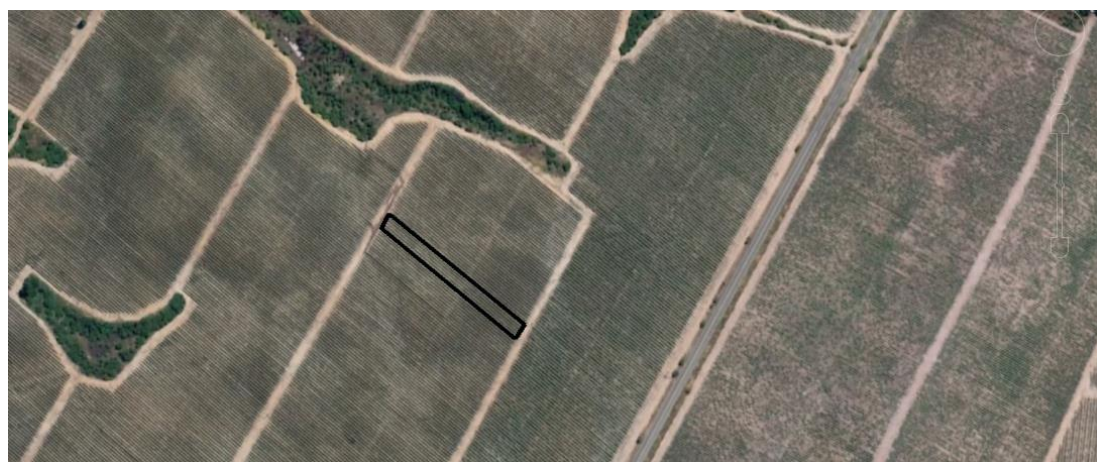


Figura 3.1. Imagen aérea del lugar de estudio en Pencahue, región del Maule. El área enmarcada corresponde a la zona sobre la que se realizaron los vuelos. Imagen obtenida de Google Earth Pro.

El estudio se realizó en un viñedo (cv. Cabernet Sauvignon), plantado en el año 2013 y conducido en espaldera vertical simple, en un marco de plantación de 2m entre hilera y 1m sobre hilera. El Sistema de riego consistía en dos líneas de goteros, con una distancia de goteros de 1m.

### **3.3. Mediciones realizadas por Eddy Covariance**

Un sistema de Eddy Covariance (EC) fue instalado en la parte central de la zona de estudio (1.4Ha) para medir los componentes del balance de energía, así como variables meteorológicas sobre la superficie del viñedo. EC midió las variables de radiación neta (Rn), flujo de calor latente (LE), flujo de calor del suelo (G), radiación solar (entrante y reflejada), temperatura del aire (Ta), humedad relativa (HR), velocidad del viento (u), dirección del viento (w), y precipitación (Pp). Las mediciones anteriores se realizaron 2.2m sobre la superficie del suelo.

Rn y LE fueron medidos usando un radiómetro tipo Fritchen (REBS-Q7, Campbell Sci., Logan, UT), un higrómetro ultravioleta Krypton (KH20, Campbell Sci., Logan, UT) y un anemómetro sónico unidimensional (CA27, Campbell Sci., Logan, UT), respectivamente. El flujo de calor de suelo se estimó utilizando cuatro platos de flujos, instalados a cada lado de la hilera y cuatro platos instalados en la entre hilera, en ambos casos a una profundidad de 0.08m.

El sistema EC fue utilizado en conjunto al VANT para comparar el modelo de SW con los valores de evaporación obtenida de las condiciones atmosféricas registradas al momento de vuelo. Con el objetivo de disminuir errores asociados a la medición de LE y H, se excluyeron aquellos días donde la relación (H+LE) a (Rn-G) estuvieran fuera de un rango comprendido entre 0.8-1.2 (López-Olivari et al., 2016). Asumiendo que las mediciones de Rn y G fueran representativas para la energía disponible sobre el viñedo al momento de vuelo, los flujos de H y LE fueron forzados al cierre de energía utilizando el enfoque de la relación de Bowen (B=H/LE):

$$LE_B = \frac{(Rn-G)}{(1+B)} \quad \text{Eq. 8}$$

$$H_B = \frac{(Rn-G)}{(1+B^{-1})} \quad \text{Eq. 9}$$

La ET del viñedo fue calculado de manera diaria de la siguiente manera:

$$ET_{EC} = \frac{\sum_{n=1}^{24} LE_{Bn}}{\lambda * \rho_w} * 1.8 \quad \text{Eq. 10}$$

donde  $ET_{EC}$  es la evapotranspiración real del viñedo, la cual es medida mediante EC ( $\text{mm d}^{-1}$ ), 1.8 es un factor de conversión,  $\lambda$  es el calor latente de vaporización ( $1013\text{MJ Kg}^{-1}$ ),  $\rho_w$  es la densidad del agua ( $1000\text{kg m}^{-3}$ ), y “n” es el número de mediciones durante un periodo de 24 horas. El subíndice “B” indica que los flujos turbulentos fueron recalculados utilizando la relación de Bowen.

#### **3.4. Mediciones para Shuttleworth y Wallace realizadas por el VANT**

A lo largo de la temporada se realizaron siete campañas, donde se voló el VANT a 30m sobre el viñedo, obteniendo imágenes termales y multiespectrales que permitieran obtener los valores para calcular el flujo de calor latente ( $LE_i$ ) sobre el viñedo como la suma de la ecuación de Penman-Monteith para la evaporación y transpiración.

Las imágenes obtenidas son procesadas para crear un único mosaico del vuelo en base al cual se puede trabajar en el modelo de SW y el programa R.

#### **3.6. Análisis estadístico**

El modelo SW usado para calcular el flujo de calor latente y la evapotranspiración diaria ( $ET_{sw}$ ) fue comparado con la información obtenida en las mediciones climáticas a nivel de suelo. La comparación del modelo se hizo con el cociente de valores estimados (promedio de los valores estimados de la imagen aérea) y observados (b), el cuadrado medio del error (RMSE), la media del error absoluto (MAE) y el índice de acuerdo (d). El test-t fue utilizado para determinar si el valor b era significativamente diferente del valor de confianza al 95%.



$$\text{RMSE} = \left[ N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0,5} \quad \text{Eq. 11}$$

$$\text{MAE} = N^{-1} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad \text{Eq. 12}$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad 0 \leq I_a \leq 1 \quad \text{Eq. 13}$$

Donde N es el número total de observaciones,  $P_i$  y  $O_i$  son los valores estimados y observados respectivamente, y  $\bar{O}$  es el promedio de los valores observados. Valores de RMSE, MAE,  $P_i$ ,  $O_i$ , y  $\bar{O}$  se encuentran en ( $\text{W m}^{-2}$ ) o en ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Condiciones durante el vuelo

A lo largo del periodo de estudio (diciembre a enero), se registraron altas temperaturas y escasas precipitaciones (0.4mm). Durante este tiempo, los promedios diarios de temperatura del aire ( $T^{\circ}$ ) y velocidad del viento ( $u$ ) variaron entre 24.26 a 14.03°C y 2.28 a 0.68m/s, respectivamente (figura 4.3). En cuanto a la  $ETo$  y  $Rn$  estimados por EC, los promedios diarios fueron de 1.9 a 7.4 mm día<sup>-1</sup> y 36.4 a 347.9W m<sup>-2</sup>, respectivamente (figura 4.1). En el periodo de mediciones el valor de  $ETo$  acumulado fué de 333mm. Complementariamente, al momento del vuelo se midió potencial xilemático, el que varió entre -0.5 a -0.675MPa (Tabla 4.1), indicando que las plantas se encontraban sin estrés hídrico al momento de vuelo (Choné et al., 2001; Williams & Araujo, 2002). En el caso del DPV, los valores registrados durante el periodo de estudio fueron de 3.03 a 1.6KPa (figura 4.2).

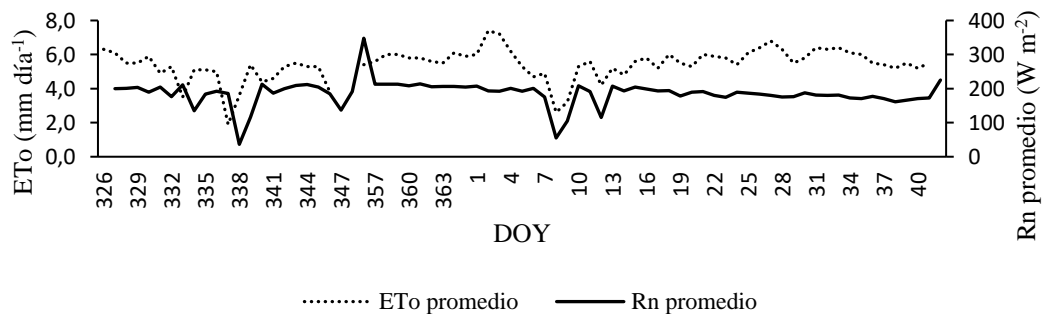


Figura 4.1. Evapotranspiración de referencia diaria ( $Eto$ ) y radiación neta promedio para cada día ( $Rn$ ). Información obtenida a partir de EC.

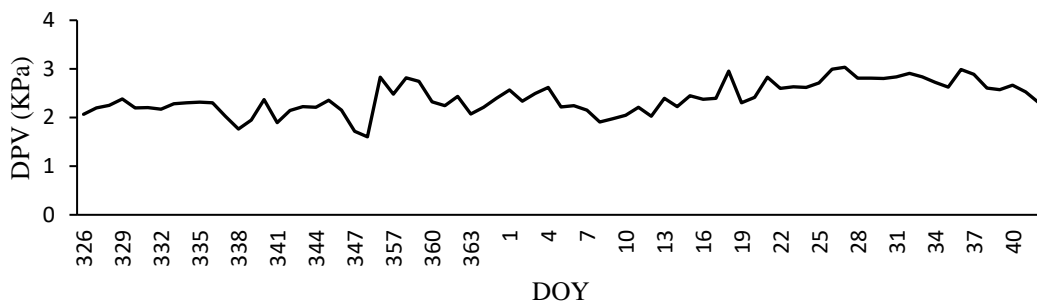


Figura 4.2 Déficit de presión de vapor promedio (DPV) a lo largo del periodo de mediciones. Se puede ver en la figura que el valor de DPV oscila entre 1.6 y 3kPa.

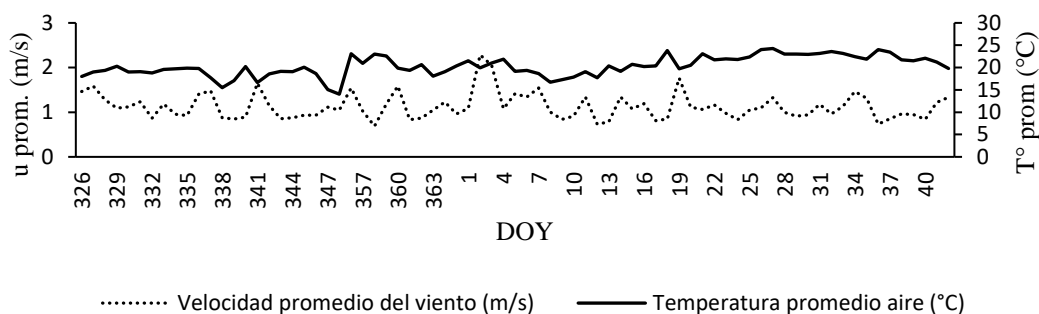


Figura 4.3 Velocidad promedio del viento (u) y temperatura promedio del aire (T°) medidos con EC a lo largo del periodo de mediciones.

Tabla 4.1 Potencial xilemático y resistencia estomática del viñedo al momento de los vuelos realizados.

DOY	FECHA	Potencial de xilema		Resistencia Estomática
		(MPa)	Desviación estándar (MPa)	(s m <sup>-1</sup> )
340	06-12-2018	-0.5	0.082	106.89
348	14-12-2018	-0.5	0.032	99.30
356	22-12-2018	-0.7	0.006	87.71
364	30-12-2018	-0.625	0.037	231.20
10	10-01-2019	-0.7	0.069	94.32
23	23-01-2019	-0.575	0.063	235.25
31	31-01-2019	-0.675	0.065	140.60

Donde, DOY= Días del año (por su sigla en inglés).

Para los días en que se voló el VANT, el cierre del balance de energía para un intervalo de 30 minutos puede ser apreciado en la figura 4.4. La relación (Rn-G) a (H+LE) es de 0.91, lo que indica que el balance de energía del viñedo se encontraba subestimado en un 9% aproximadamente. Respecto a la pendiente del cierre del balance de energía, Wilson et al. (2002) indicaron que en general, su valor es entre 0.53 y 0.99, dependiendo del cultivo evaluado. En el caso de la vid, Spano et al. (2004) indicaron valores entre 0.82 y 0.84, mientras que Sien et al. (2008) registraron valores de la pendiente cercanos a 0.8. En cuanto a este trabajo, la pendiente es de 0.91, lo que es mayor a lo registrado en los trabajos antes mencionado. Las diferencias se pueden deber a que, en este trabajo solo se consideraron los días en que se realizaron los vuelos, y no toda la temporada.

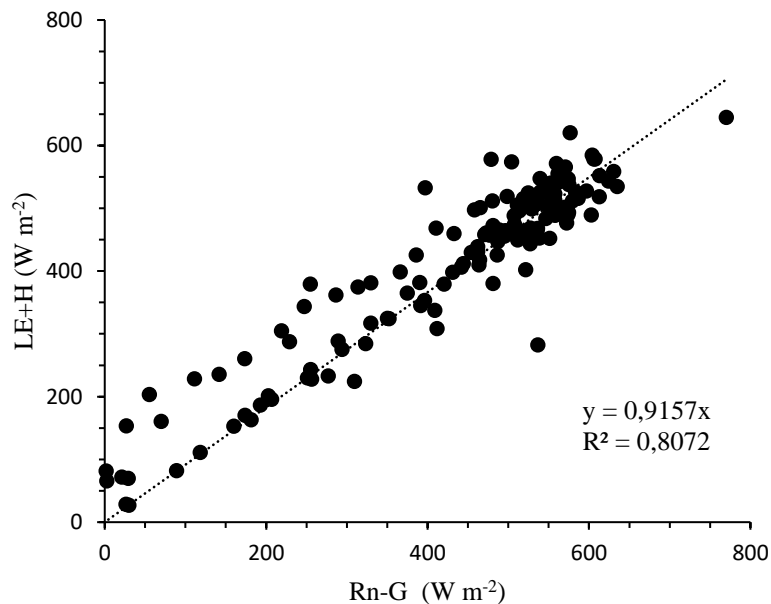


Figura 4.4 Cierre del balance de energía a intervalos de 30 minutos para los días en que se realizaron vuelos. H, LE, Rn y G corresponden al flujo de calor sensible (W m<sup>-2</sup>), flujo de calor latente (W m<sup>-2</sup>), radiación neta (W m<sup>-2</sup>) y flujo de calor de suelo (W m<sup>-2</sup>), respectivamente. La línea punteada representa la relación 1:1.

## 4.2. Validación del modelo

En la figura 4.5, se observa que los componentes del flujo de energía estimados (SW) y observados (EC) se distribuyen cerca de la relación 1:1. En el caso de LEi (figura 4.6), la regresión lineal a través del origen presenta una pendiente (b) y un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.89 y 0.52, respectivamente. Además, la validación del modelo mostró que este es capaz de estimar valores de LEi, Rni y Gi con un RMSE de  $34.16\text{W m}^{-2}$ ,  $29.03\text{W m}^{-2}$  y  $48.32\text{W m}^{-2}$ , respectivamente (Tabla 4.2). Estos valores indican que el modelo de SW logró estimar de manera adecuada los componentes del flujo de energía, tal como Fuentes-Peñailillo et al. (2018), que utilizaron el modelo SW para estimar evapotranspiración en olivo, obteniendo valores de RMSE de LEi, Rni y Gi de 26, 39 y  $33\text{W m}^{-2}$  y MAE de 20, 32 y  $27\text{W m}^{-2}$ , respectivamente.

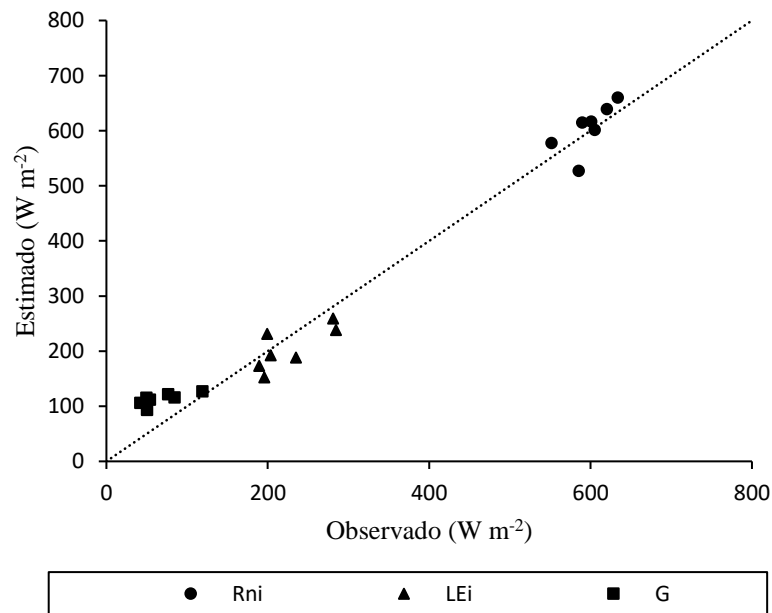


Figura 4.5 Comparación de radiación neta (Rni), flujo de calor latente (LEi) y flujo de calor de suelo (G) entre el valor observado con EC y el estimado con el modelo SW. La línea punteada representa la relación 1:1.

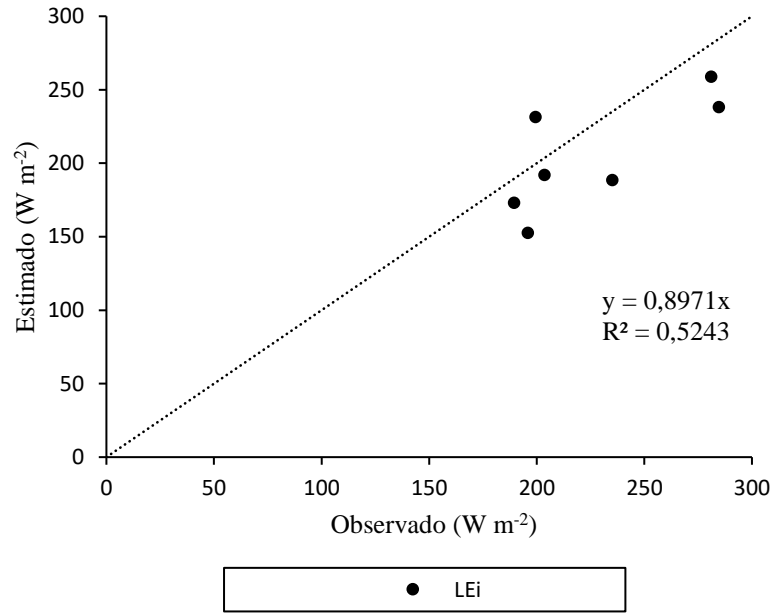


Figura 4.6 Comparación de Flujo de calor latente instantáneo según EC (observado) y SW (estimado). La línea punteada representa la relación 1:1.

En el caso de la evapotranspiración horaria (tabla 4.2), el análisis estadístico indica que en su estimación se obtuvieron valores de RMSE y MAE de  $0.14\text{mm hora}^{-1}$  y  $0.14\text{mm hora}^{-1}$ , respectivamente. Por otro lado, en la evapotranspiración diaria (figura 4.7) el valor de la pendiente es 0.923 y el coeficiente de determinación corresponde a 0.726. El RMSE y MAE de la evapotranspiración diaria corresponde a  $0.44\text{mm día}^{-1}$  y  $0.28\text{mm día}^{-1}$ , respectivamente (Tabla 4.2). En este sentido, los valores de  $ET_{\text{diaria}}$  son similares a los presentados por Ortega-Farias et al. (2007) en un viñedo (cv. Cabernet Sauvignon), donde se estimó la evapotranspiración diaria con un RMSE y MAE de  $0.42\text{mm día}^{-1}$  y  $0.36\text{mm día}^{-1}$  respectivamente. Además, Zhao et al., (2015) utilizaron el modelo SW para estimar evapotranspiración diaria en un viñedo (cv. Cabernet Sauvignon) en condiciones semi-áridas en el noroeste de China, obteniendo valores de RMSE y MAE de  $0.68\text{mm día}^{-1}$  y  $0.52\text{mm día}^{-1}$ . En cuanto a los parámetros del modelo, Ortega-Farias et al. (2007) usaron valores de LAI de  $1.1\text{m}^2\text{ m}^{-2}$  y de resistencia estomática de  $470\text{s m}^{-1}$ . Al respecto, los valores de LAI y resistencia estomática usados en este trabajo son de  $1.2\text{m}^2\text{ m}^{-2}$  y  $210\text{s m}^{-1}$ , respectivamente.

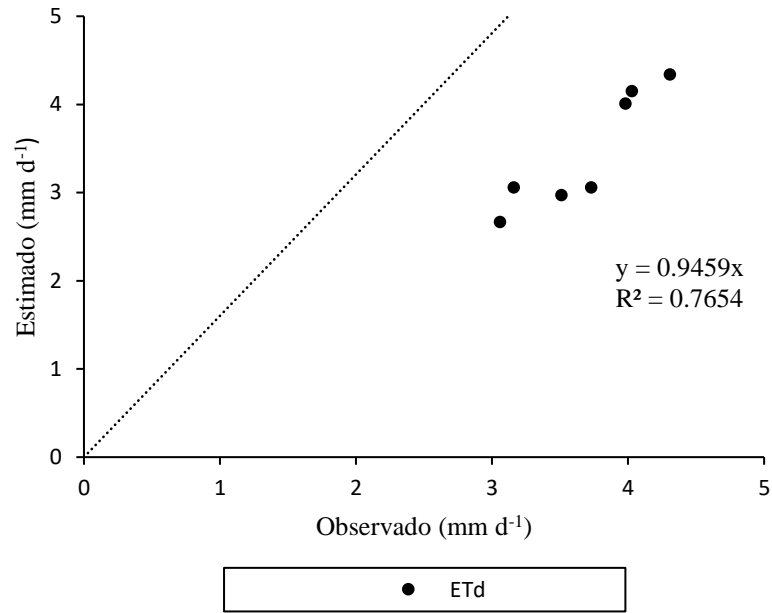


Figura 4.7 Comparación de evapotranspiración diaria (ETd) de EC (observado) y el modelo SW (estimado). Se utilizó el test t para verificar que la pendiente fuera significativa (valor  $p=0.014$ ).

La línea punteada representa la relación 1:1.

En la figura 4.7 se ve que en general todos los puntos se encuentran distribuidos sobre la línea que señala la relación 1:1. Dos de los puntos que se separan de la línea 1:1 son que corresponden al 14 y 22 de diciembre del 2018. En el caso de los días antes mencionados, se presentó un error en la medición de EC en el que no registró valores durante todo el día, pero que no involucró el periodo de vuelo en ninguno de los dos casos, pero podría ser esta la causa de la diferencia en el cálculo de ETd.

Tabla 4.2 Análisis estadístico de Flujo de calor latente (LEI), Radiación neta (Rni), Evapotranspiración real horaria (ETh), Evapotranspiración real diaria (ETd) y Flujo de calor de suelo (G).

	LEI (W m <sup>-2</sup> )	Rni (W m <sup>-2</sup> )	ETh (mm hora <sup>-1</sup> )	ETd (mm día <sup>-1</sup> )	G (W m <sup>-2</sup> )
MAE	31.3	24.5	0.14	0.28	44.41
RMSE	34.16	29.03	0.14	0.44	48.32
d	0.78	0.99	0.27	0.88	0.50

Donde MAE= Error medio absoluto, RMSE= Cuadrado Medio del Error y d= Índice de acuerdo del modelo.

En la tabla 4.2 se puede ver que la radiación neta y la evapotranspiración diaria presentaron los mejores índices de acuerdo del modelo, con valores de 0.99 y 0.88 respectivamente. Por otro lado, la evapotranspiración horaria presentó el peor índice de acuerdo, siendo este 0.27. A pesar de que ETh no obtuvo una buena asociación con el modelo, LEi y ETd si, lo que indica que el problema de su estimación puede estar en alguna variable que no sea transversal al día o a la fecha, pero que al considerar el día completo se atenúe su efecto. Un posible motivo puede ser el LAI o la resistencia estomática, por lo que sería interesante que futuros proyectos desarrollaran esta metodología considerando estos parámetros para cada situación de vuelo.



## 5. CONCLUSIÓN

En este estudio se logró separar la información correspondiente del suelo (Flujo de calor de suelo) de la del cultivo (Flujo de calor latente), de una manera satisfactoria, con RMSE de 48.32 y 34.16W m<sup>-2</sup>, respectivamente, mostrándose que, en el caso de la radiación neta y el flujo de calor de suelo, los valores estimados están sobreestimados respecto a los observados, mientras que el flujo de calor latente es subestimado. Por otra parte, el valor de evapotranspiración diaria del modelo se ajustó bien para todos los días, salvo para aquellos que estuvieron relacionados a una falla de EC. En resumen, los resultados indican que el modelo de SW es capaz de estimar los valores de evapotranspiración de un viñedo de manera satisfactoria para un periodo diario cuando se utiliza en conjunto con imágenes obtenidas desde un vehículo aéreo no tripulado.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R. G., S. P. L., Raes, D., & Martin, S. (1998). Crop evapotranspiration : Guidelines for computing crop water requirements / by Richard G. Allen ... [et al.]. *FAO Irrigation and Drainage Paper*: 56, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Allen, Richard G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L., Bastiaanssen, W., ... Robison, C. W. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 395–406. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2007\)133:4\(395\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(395))
- Aurand, J. (2017). una disminución del 8 , 2 % con respecto a 2016 Un nivel de producción en 2017 históricamente bajo , especialmente en Europa occidental , como consecuencia de las condiciones climáticas desfavorables . Retrieved from <http://www.oiv.int/public/medias/5682/es-communicu-depresse-octobre-2017.pdf>
- Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F., Roerink, G. J., & van der Wal, T. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL), Part 1: Formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213(JANUARY), 213–229. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6)
- Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Suárez, L., & Fereres, E. (2009). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 722–738. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010457>
- Cammalleri, C., Ciraolo, G., Minacapilli, M., & Rallo, G. (2013). Evapotranspiration from an Olive Orchard using Remote Sensing-Based Dual Crop Coefficient Approach. *Water Resources Management*, 27(14), 4877–4895. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0444-7>
- Carrasco-Benavides, M., Ortega-Farías, S., Lagos, L. O., Kleissl, J., Morales, L., Poblete-Echeverría, C., & Allen, R. G. (2012). Crop coefficients and actual evapotranspiration of a drip-irrigated Merlot vineyard using multispectral satellite images. *Irrigation Science*, 30(6), 485–497. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0379-4>
- Carrasco-Benavides, Marcos, Ortega-Farías, S., Lagos, L. O., Kleissl, J., Morales-Salinas, L., & Kilic, A. (2014). Parameterization of the satellite-based model (METRIC) for the estimation of instantaneous surface energy balance components over a drip-irrigated vineyard. *Remote Sensing*, 6(11), 11342–11371. <https://doi.org/10.3390/rs61111342>
- Choné, X., Van Leeuwen, C., Dubourdieu, D., & Gaudillère, J. P. (2001). Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany*, 87(4), 477–483. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1361>
- Clarke, T. R. (1997). An empirical approach for detecting crop water stress using multispectral airborne sensors. In *HortTechnology* (Vol. 7, pp. 9–16). American Society for Horticultural Science.
- Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga, Y., & Tsipris, J. (2005). Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis \*, 56(417), 1843–1852. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri174>
- Courault, D., Seguin, B., & Olioso, A. (2005). Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and Drainage Systems (2005) 19*: 223-249, 223–249. Retrieved from <http://www.cgiar.org/iwmi>.
- Crow, W. T., & Kustas, W. P. (2005). Utility of assimilating surface radiometric temperature observations for evaporative fraction and heat transfer coefficient retrieval. *Boundary-Layer Meteorology*, 115(1), 105–130. <https://doi.org/10.1007/s10546-004-2121-0>
- Fuentes-Peailillo, F., Moreno, M., Bardeen, M., Ortega-Farías, S., & Rivera, M. (2019). Comparison of vegetation indices acquired from RGB and Multispectral sensors placed on

- UAV (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/ica-acca.2018.8609861>
- Fuentes-Peñailillo, F., Ortega-Farías, S., Acevedo-Opazo, C., & Fonseca-Luengo, D. (2018). Implementation of a two-source model for estimating the spatial variability of olive evapotranspiration using satellite images and ground-based climate data. *Water (Switzerland)*, *10*(3). <https://doi.org/10.3390/w10030339>
- Fuentes-Peñailillo, F., Ortega-Farías, S., Bardeen, M., Moreno, M., & Rivera, M. (2019). Using clustering algorithms to segment UAV-based RGB images (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/ica-acca.2018.8609822>
- Guzinski, R., Anderson, M. C., Kustas, W. P., Nieto, H., & Sandholt, I. (2013). Using a thermal-based two source energy balance model with time-differencing to estimate surface energy fluxes with day-night MODIS observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, *17*(7), 2809–2825. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2809-2013>
- Guzinski, R., Nieto, H., Jensen, R., & Mendiguren, G. (2014). Remotely sensed land-surface energy fluxes at sub-field scale in heterogeneous agricultural landscape and coniferous plantation. *Biogeosciences*, *11*(18), 5021–5046. <https://doi.org/10.5194/bg-11-5021-2014>
- Hardin, P. J., & Hardin, T. J. (2010). Small-scale remotely piloted vehicles in environmental research. *Geography Compass*, *4*(9), 1297–1311. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00381.x>
- Hoffmann, H., Nieto, H., Jensen, R., Guzinski, R., Zarco-Tejada, P., & Friborg, T. (2016). Estimating evaporation with thermal UAV data and two-source energy balance models. *Hydrology and Earth System Sciences*, *20*(2), 697–713. <https://doi.org/10.5194/hess-20-697-2016>
- Jacob, F., Olioso, A., Gu, X. F., Su, Z., & Seguin, B. (2003). Mapping surface fluxes using airborne visible, near infrared, thermal infrared remote sensing data and a spatialized surface energy balance model. *Agronomie*, *22*(6), 669–680. <https://doi.org/10.1051/agro:2002053>
- James, B. W., Itleworth, S. H. U., & Wallace, J. S. (1976). Evaporation from sparse crops-an energy combination theory, (1985), 839–855.
- Kalma, J. D., McVicar, T. R., & McCabe, M. F. (2008). Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics*, *29*(4–5), 421–469. <https://doi.org/10.1007/s10712-008-9037-z>
- Kustas, W. P., Anderson, M. C., Alfieri, J. G., Knipppper, K., Torres-Rua, A., Parry, C. K., ... Hain, C. (2018). The grape remote sensing atmospheric profile and evapotranspiration experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *99*(9), 1791–1812. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0244.1>
- Kustas, W. P., & Norman, J. M. (1999). Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, *94*(1), 13–29. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00005-2)
- López-Olivari, R., Ortega-Farías, S., & Poblete-Echeverría, C. (2016). Partitioning of net radiation and evapotranspiration over a superintensive drip-irrigated olive orchard. *Irrigation Science*, *34*(1), 17–31. <https://doi.org/10.1007/s00271-015-0484-2>
- Matese, A., & Di Gennaro, S. (2018). Practical Applications of a Multisensor UAV Platform Based on Multispectral, Thermal and RGB High Resolution Images in Precision Viticulture. *Agriculture*. <https://doi.org/10.3390/agriculture8070116>
- Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., Genesio, L., Vaccari, F. P., Primicerio, J., ... Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture. *Remote Sensing*, *7*(3), 2971–2990. <https://doi.org/10.3390/rs70302971>
- Meza, F. J., & Cifuentes, L. A. (2008). Cambio climático : consecuencias y desafíos para Chile. Universidad Católica de Chile. *Centro Interdisciplinario de Cambio Global (CICG-UC)*, 21. <https://doi.org/10.1541/ieejjournal.133.679>

- Norman, J. M., Kustas, W. P., Prueger, J. H., & Diak, G. R. (2000). Surface flux estimation using radiometric temperature: A dual-temperature-difference method to minimize measurement errors. *Water Resources Research*, 36(8), 2263–2274. <https://doi.org/10.1029/2000WR900033>
- Ortega-Farías, S., Carrasco, M., Oliosio, A., Acevedo, C., & Poblete, C. (2007). Latent heat flux over Cabernet Sauvignon vineyard using the Shuttleworth and Wallace model. *Irrigation Science*, 25(2), 161–170. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0047-7>
- Ortega-Farías, S., & López-Olivari, R. (2012). Validation of a two-layer model to estimate Latent heat flux and evapotranspiration in a drip-irrigated olive orchard. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4), 1169–1178.
- Ortega-Farías, S., Zuñiga, M., Poblete-Echeverría, C., Sepúlveda, D., Kilic, A., Ortega-Salazar, S., ... Poblete, T. (2016). Estimation of Energy Balance Components over a Drip-Irrigated Olive Orchard Using Thermal and Multispectral Cameras Placed on a Helicopter-Based Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 8(8), 638. <https://doi.org/10.3390/rs8080638>
- Paço, T. A., Pôças, I., Cunha, M., Silvestre, J. C., Santos, F. L., Paredes, P., & Pereira, L. S. (2014). Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations. *Journal of Hydrology*, 519(PB), 2067–2080. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.075>
- SAG. (2017). *Catastro viticola nacional*. Retrieved from <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/catastros-fruticolas/catastro-viticola-nacional>
- Samani, Z., Bawazir, A. S., Bleiweiss, M., Skaggs, R., Longworth, J., Tran, V. D., & Pinon, A. (2009). Using remote sensing to evaluate the spatial variability of evapotranspiration and crop coefficient in the lower Rio Grande Valley, New Mexico. *Irrigation Science*, 28(1), 93–100. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0178-8>
- Sien, L., Kang, S., Zhang, L., Li, F., Zhu, Z., & Zhang, B. (2008). A comparison of three methods for determining vineyard evapotranspiration in the arid desert regions of northwest China, 4564(June), 1–12. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Situation, W. V. (2018). 2017 World Viticulture Situation oIV Statistical report on World Viticulture © OIV Statistical Report on World Viticulture OIV Statistical Report on World Viticulture ©. Retrieved from <http://www.oiv.int/public/medias/5479/oiv-en-bilan-2017.pdf>
- Spano, D., Duce, P., & Snyder, R. L. (2004). Estimate of mass and energy fluxes over grapevine using eddy covariance technique. *Acta Horticulturae*, 664(2001), 631–638. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.664.79>
- Timmermans, W. J., Kustas, W. P., Anderson, M. C., & French, A. N. (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*, 108(4), 369–384. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.028>
- Williams, L. E., & Araujo, F. J. (2002). Correlations among Predawn Leaf , Midday Leaf , and Midday Stem Water Potential and their Correlations with other Measures of Soil and Plant Water Status in *Vitis vinifera*, 127(3), 448–454.
- Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., ... Verma, S. (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 223–243. Retrieved from <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/29262>
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
- Zhao, P., Li, S., Li, F., Du, T., Tong, L., & Kang, S. (2015). Comparison of dual crop coefficient method and Shuttleworth-Wallace model in evapotranspiration partitioning in a vineyard of

northwest China. *Agricultural Water Management*, 160, 41–56.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.026>

Zhuang, Q., Wu, B., Yan, N., Zhu, W., & Xing, Q. (2016). A method for sensible heat flux model parameterization based on radiometric surface temperature and environmental factors without involving the parameter  $KB - 1$ . *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.11.015>