



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

**Estimación de evapotranspiración en remolacha azucarera (*Beta vulgaris*) y componentes del balance superficial de energía usando SEB-PV (The modified SEB model for Partially Vegetated surfaces) e imágenes de satélite.**

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

MARÍA SOLEDAD AGUIRRE

CHILLAN-CHILE

2017

Profesor Guía: Dr. Octavio Lagos Roa  
Dpto. de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

**Estimación de evapotranspiración en remolacha azucarera (*Beta vulgaris*) y componentes del balance superficial de energía usando SEB-PV (The modified SEB model for Partially Vegetated surfaces) e imágenes de satélite.**

Aprobado por:

Octavio Lagos Roa  
Ing. Civil Agrícola, Ph.D.

---

Profesor Guía

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

---

Evaluador Interno

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

---

Evaluador Externo

Pedro Aqueveque Muñoz  
Licenciado en Educación, Dr.

---

Director del Programa



## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis sobrinos Karla, Dayumak, Espartaco y Amaruk como un mensaje de superación y solamente recordarles que con valentía, constancia y dedicación no hay sueño que se resista.



*Caminante, son tus huellas  
el camino y nada más;  
Caminante, no hay camino,  
se hace camino al andar.  
Al andar se hace el camino,  
y al volver la vista atrás  
se ve la senda que nunca  
se ha de volver a pisar.  
Caminante no hay camino  
sino estelas en la mar.*

**Antonio Machado**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser la fe que me da la fortaleza de enfrentar con decisión y valentía los retos de mi vida. Gracias por la inspiración que recibo en él cada día para seguir alcanzando mis sueños.

A mi madrecita querida Gloria, a mis hermanos Stalin, Janneth, Santiago, a mi sobrina Karla, por sus preocupaciones, por las constantes oraciones, y por el apoyo incondicional que siempre me brindan en la consecución de mis objetivos.

Agradezco a la Agencia de Cooperación Internacional de Chile para el Desarrollo (AGCI), por haberme seleccionada como becaria del programa año 2015 y de esta manera darme la oportunidad de cumplir con uno de mis sueños anhelados. Gracias por brindarme la oportunidad de mejorar y ampliar mis horizontes de vida.

A mi Director de tesis, Dr. Octavio Lagos por su acertada dirección, orientaciones y por el constante apoyo brindado en la consecución de este trabajo.

A los miembros del tribunal, Dr. Mario Lillo e Ing. Waldo Lama por el soporte dado a este trabajo.

Al Director del Programa de Magister en Ingeniería Agrícola, Dr. Pedro Aqueveque Muñoz por la ayuda proporcionada para que este trabajo se concrete.

Al ItecMA2, en las personas de Viviana Gavilanes, Mathías Kuschel, Camilo Souto por la información proporcionada para el desarrollo de este trabajo.

A Alejandra, Clarita y Loreto por tener siempre esa disposición de ayuda en cada momento que la necesité.

A todos mis amigos, quienes con sus atenciones, palabras de aliento me hicieron sentir como en casa, gracias por el cariño y apoyo brindado.

## RESUMEN

La evapotranspiración total ( $ET$ ) es uno de los principales componentes del balance hídrico, y una buena estimación de  $ET$  es vital para prácticas adecuadas de gestión del agua, en actividades agrícolas eficientes. El objetivo de este trabajo fue estimar la evapotranspiración instantánea ( $ET_{ins}$ ) y los principales componentes del balance de energía superficial en remolacha azucarera con el modelo SEB-PV (The modified SEB model for Partially Vegetated surfaces) e imágenes de satélite Landsat 8 durante tres temporadas (2013-2014, 2014-2015, 2015-2016) en el centro de Chile ( $36^{\circ} 32'11''S$ ,  $72^{\circ} 8'25'' W$ , elevación 110 m). Radiación neta instantánea ( $Rn_{ins}$ ) requerida por el modelo SEB-PV fue estimado con el modelo SEBAL modificado en METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration). Los resultados fueron comparados con datos medidos cada 30 minutos por un sistema de balance superficial de energía (SEB) que fue instalado en el sitio de estudio para estimar  $ET$  como residuo de SEB. Radiación neta instantánea  $Rn_{ins}$  se estimó con un error cuadrático medio ( $RMSE$ ) de  $68.33 W.m^{-2}$  y un coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $NS$ ) de  $0.24$ ; la evapotranspiración instantánea  $ET_{ins}$  se estimó con un  $RMSE$  de  $53.23 W.m^{-2}$  y un coeficiente de  $NS$  de  $0.34$ ; el flujo instantáneo de calor sensible  $H_{ins}$  se estimado con un  $RMSE$  de  $51.20 W.m^{-2}$  y un coeficiente de  $NS$  de  $-1.12$  y el flujo instantáneo de calor en el suelo  $G_{ins}$  se estimó con un  $RMSE$  de  $31.63 W.m^{-2}$  y un coeficiente de  $NS$  de  $-20.62$ . Los resultados indican que es posible extender el uso del modelo de percepción cercana SEB-PV a su uso como modelo de percepción remota empleando imágenes de satélite para la estimación de evapotranspiración y los principales flujos de energía superficial en remolacha azucarera.

## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1    Objetivo general .....	3
2.2    Objetivos específicos.....	3
3. HIPÓTESIS.....	4
4. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	4
4.1    Materiales .....	4
4.1.1    Ubicación y descripción del sitio en estudio.....	4
4.1.2    Sensor e imágenes de satélite.....	6
4.2    Metodología.....	8
4.2.1    Corrección atmosférica de imágenes satelitales.....	8
4.2.2    Estimación de la radiación neta instantánea ( $Rn_{ins}$ ) mediante el modelo SEBAL modificado en METRIC .....	8
4.2.2.1    Conversión a radiancia en el techo de la atmósfera (TOA).....	9
4.2.2.2    Temperatura de la superficie.....	10
4.2.2.3    Albedo de la superficie ( $\alpha$ ).....	11
4.2.2.4    Radiación neta (Rn) .....	12
4.2.3    Modelo de SEB modificado para superficies parcialmente con vegetación (SEB-PV) .....	14
4.2.3.1    Resistencias del modelo SEB-PV .....	18
4.2.3.2    Entradas del modelo SEB-PV .....	19
4.2.4    Consideraciones para la simulación del modelo SEBAL modificado en METRIC y modelo SEB-PV.....	20

4.2.5 Comparación estadística entre valores medidos y estimados.....	21
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
6. CONCLUSIONES .....	37
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización geográfica del sitio en estudio.....	5
<b>Figura 2.</b> Diagrama de flujo para la obtención de radiación neta instantánea ( $R_{n_{ins}}$ ) con el uso de imágenes satelitales Landsat 8. ....	9
<b>Figura 3.</b> Flujos del modelo de balance superficial de energía (SEB) .....	15
<b>Figura 4.</b> Resistencias del modelo de balance superficial de energía (SEB) .....	19
<b>Figura 5.</b> Mapas de flujos instantáneos de a) $R_n$ b) $ET$ c) $H$ d) $G$ , en unidades ( $W \cdot m^{-2}$ ) estimados con el modelo SEBAL-METRIC y modelo SEB-PV e imágenes satelitales Landsat 8 (path/row 233/85), DOY=12, comuna de San Nicolás. ....	23
<b>Figura 6.</b> Correlación de valores estimados y medidos de flujos instantáneos de a) $R_n$ , b) $ET$ , c) $H$ , y d) $G$ y para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás. ....	25
<b>Figura 7.</b> Correlación de los componentes del balance de energía superficial medidos y estimados, para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás. ....	26
<b>Figura 8.</b> Separación del flujo de calor latente ( $\lambda E$ ) o evapotranspiración instantánea ( $ET$ ) en flujo de calor latente de la canopia ( $\lambda E_c$ ) o transpiración instantánea ( $T$ ), evaporación instantánea del suelo desnudo ( $\lambda E_{bs}$ ) y evaporación instantánea del suelo bajo la canopia ( $\lambda E_s$ ), para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás. ....	28
<b>Figura 9.</b> Separación del flujo instantáneo de calor sensible ( $H$ ) en calor sensible de la canopia ( $H_c$ ), calor sensible del suelo bajo la canopia ( $H_s$ ), calor sensible del suelo desnudo ( $H_{bs}$ ), para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás. ....	29
<b>Figura 10.</b> Separación del flujo instantáneo de calor en el suelo ( $G$ ) en calor del suelo bajo la canopia ( $G_s$ ), calor del suelo desnudo ( $G_{bs}$ ), para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás. ....	30
<b>Figura 11.</b> Índice de área foliar ( $LAI$ ), para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás. ....	31



- Figura 12.** Flujos instantáneos de ET y T estimada con el modelo SEB-PV y, ET medida por la estación SEB, para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.....32
- Figura 13.** Correlación de los componentes del balance de energía superficial estimados con los modelos SEBAL-METRIC y SEB-PV, para 10 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás. ....33
- Figura 14** Correlación de los componentes del balance de energía superficial medidos en la estación SEB y estimados con el modelo SEBAL-METRIC, para 10 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.....34
- Figura 15.** Correlación de los componentes del balance de energía superficial medidos en la estación SEB y estimados con el modelo SEB-PV, para 10 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás. ....35
- Figura 16.** Correlación de valores estimados y medidos de flujos instantáneos de a) *ET*, b) *H*, y c) *G* , y para 10 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás. ....36

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/85) seleccionadas para el procesamiento del balance de energía superficial en remolacha azucarera irrigado por pivote central, comuna de San Nicolás. ....	7
<b>Tabla 2 .</b> Coeficientes $w_b$ para imágenes satelitales Landsat 8. ....	12
<b>Tabla 3.</b> Parámetros para la evaluación del modelo SEB-PV .....	21



## INDICE DE ABREVIATURAS

$ET_{ins}$	Evapotranspiración instantánea ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$Rn$	Radiación neta ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$Rn_s$	Radiación neta absorbida por el suelo ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$Rn_c$	Radiación neta absorbida por la canopia.
$Rn_{ins}$	Radiación neta instantánea ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$R_s$	Radiación solar ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$R_s \downarrow$	Radiación de onda corta incidente ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$R_L \downarrow$	Radiación de onda larga incidente ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$R_L \uparrow$	Radiación de onda larga reflejada ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$LAI$	Índice de área foliar ( $m^2 \cdot m^{-2}$ )
$NDVI$	Índice de vegetación normalizado.
$SAVI$	Índice de vegetación ajustado al suelo.
$NDVI_s$	Índice de vegetación normalizado para el suelo.
$NDVI_v$	Índice de vegetación normalizado vegetación.
$DOS$	Sustracción del Objeto Oscuro.
$SW$	Split-Window.
$C_0-C_6$	coeficientes del algoritmo Split-Window.
$\varepsilon$	Promedio de la emisividad de la superficie de la tierra.
$\varepsilon_s$	Emisividad de suelo.
$\varepsilon_v$	Emisividad de la vegetación.
$\Delta\varepsilon$	Diferencia en emisividad de la superficie.

$\varepsilon_0$	Emisividad térmica de la superficie.
$LA$	Radiancia espectral al tope de la atmósfera ( $W \cdot m^{-2} \cdot ster^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ).
$\rho'_\lambda$	Reflectancia planetaria al tope de la atmósfera.
$F_v$	Fraccional de vegetación verde.
$ML$	Factor multiplicativo de escalado específico.
$AL$	Factor aditivo de escalado específico.
$Q_{cal}$	Producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (ND).
$G_{sc}$	Constante solar ( $1367 W \cdot m^{-2}$ ).
$dr$	Cuadrado inverso la distancia relativa tierra-sol.
$\lambda E$	Calor latente o evapotranspiración ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$\lambda E_c$	Calor latente desde la canopia ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$\lambda E_s$	Calor latente del suelo bajo la canopia ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$\lambda E_r$	Calor latente de la cubierta de residuo en el suelo bajo la canopia ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$\lambda E_{b_s}$	Calor latente del suelo expuesta a la radiación neta ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$\lambda E_{b_r}$	Calor latente del suelo cubierto de residuos expuesta a la radiación neta ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$G$	Calor en el suelo ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$G_{ins}$	Calor en el suelo instantáneo ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$G_s$	Calor del suelo bajo la canopia ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$G_r$	Calor del suelo cubierto residuo bajo la canopia ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$G_{b_s}$	Calor del suelo expuesto a la radiación neta ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$G_{b_r}$	Calor del suelo cubierto de residuos expuesto a la radiación neta ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$G_{os}$	Flujo de calor en la superficie del suelo bajo la canopia ( $W \cdot m^{-2}$ ).

$G_{or}$	Flujo de calor en la superficie del suelo cubierto de residuo bajo la canopia ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$G_{bos}$	Flujo de calor en la superficie del suelo expuesto a la radiación neta ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$G_{bor}$	Flujo de calor en la superficie del suelo cubierto por residuos expuesto a la radiación neta ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$H$	Calor sensible ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$H_{ins}$	Calor sensible instantáneo ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$H_c$	Calor sensible de la canopia ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$H_s$	Calor sensible del suelo bajo la canopia ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$H_r$	Calor sensible del suelo cubierto residuo ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$H_b$	Calor sensible del suelo expuesto a la radiación neta ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$H_{br}$	Calor latente del suelo cubierto de residuos expuesto a la radiación neta ( $W \cdot m^{-2}$ ).
$H_r$	Humedad relativa (%).
$f_r$	Fracción del suelo afectado por residuo
$C_p$	Calor específico del aire ( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ).
$e_a$	Déficit de presión de vapor del aire (kPa).
$e_b^*$	Presión de vapor saturado a nivel de la canopia (kPa).
$e_b$	Presión de vapor del aire al nivel de la canopia (kPa).
$e_{ac}$	Presión de vapor actual (kPa).
$r_{2b}$	Resistencia aerodinámica actual entre la superficie del suelo y $Z_m$ ( $s \cdot m^{-1}$ ).
$r_c$	Resistencia de la superficie del dosel arbóreo ( $s \cdot m^{-1}$ ).
$r_L$	Resistencia del flujo de calor del suelo para la capa inferior ( $s \cdot m^{-1}$ ).

$r_u$	Resistencia del flujo de calor del suelo para la capa superior ( $s \cdot m^{-1}$ ).
$r_s$	Resistencia de la superficie del suelo para el flujo del vapor de agua ( $s \cdot m^{-1}$ ).
$r_{rh}$	Resistencia residual para transferencia de calor ( $s \cdot m^{-1}$ ).
$r_r$	Resistencia residual para el flujo de vapor de agua ( $s \cdot m^{-1}$ ).
$r_{2b}$	Resistencia aerodinámica actual entre la superficie del suelo y $Z_m$ ( $s \cdot m^{-1}$ ).
$r_1$	Resistencia aerodinámica entre la canopia y el aire en el nivel de la canopia ( $s \cdot m^{-1}$ ).
$r_2$	Resistencia aerodinámica entre el suelo y el aire en el nivel de la canopía ( $s \cdot m^{-1}$ ).
$r_{as}$	Resistencia aerodinámica entre la superficie del suelo y $Z_m$ no afectada por la vegetación adyacente ( $s \cdot m^{-1}$ ).
$T_a$	Temperatura del aire ( $^{\circ}C$ ).
$T_b$	Temperatura del aire a la altura de la canopia ( $^{\circ}C$ ).
$T_m$	Temperatura del suelo en la parte inferior de la capa inferior ( $^{\circ}C$ ).
$T_s$	Temperatura en la superficie ( $^{\circ}K$ ).
$T_{B10}$	Temperatura de brillo correspondiente a las banda10 ( $^{\circ}K$ ).
$T_{B11}$	Temperatura de brillo correspondiente a la banda 11 ( $^{\circ}K$ ).
$T_{sw}$	Transmisividad atmosférica de banda ancha.
$P$	Precipitación (mm).
$u$	Velocidad del viento ( $m \cdot s^{-1}$ ).
$W$	Contenido de vapor de agua atmosférico ( $g \cdot cm^{-2}$ ).
$Z_m$	Altura de referencia (m).
$Z_o'$	Longitud de la rugosidad en la superficie (m).
$\gamma$	Constante psicrométrica ( $kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ).

$\alpha$	Albedo de la superficie.
$\theta$	Humedad del suelo ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ).
$\theta$	Ángulo cenital solar (grados).
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ).
$\rho$	Densidad del aire húmedo ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).
$k$	Constante de Von-Karman.
$\Delta$	Pendiente de vapor de saturación ( $\text{mb} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ).



## 1. INTRODUCCIÓN

La evaporación total ( $ET$ ), que incluye el consumo de agua por las plantas y la pérdida de agua superficial, humedad del suelo y superficies no vegetadas, es uno de los principales componentes del balance hídrico (Shoko *et al.*, 2016). La evaporación del suelo en superficies parcialmente vegetadas, incluye no sólo la evaporación del suelo bajo la copa, sino también la evaporación de áreas de suelo desnudo que contribuyen directamente al total de  $ET$  (Lagos *et al.*, 2012). Una buena estimación de  $ET$  es vital para las prácticas adecuadas de gestión del agua, la mejora de la eficiencia del uso del agua, la alta productividad del agua y actividades agrícolas eficientes (Hadjimitsis *et al.*, 2010).

En este contexto son muchos los modelos que fundamentados en la ecuación del balance superficial de energía, han sido desarrollados para la estimación de evapotranspiración en superficies vegetadas, como el modelo METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration) (Allen *et al.*, 2007a) basado en el modelo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) ( Bastiaanssen *et al.*, 1998a,b) y el modelo SEB (Surface Energy Balance) (Lagos *et al.*, 2009) basado en los modelos Shuttleworth-Wallace (1985) y Choudhury-Monteith (1988).

En Lagos *et al.* (2012) se propusieron mejoras a un modelo SEB para modelar  $ET$  en superficies parcialmente con vegetación dando lugar al modelo SEB-PV (The modified SEB model for Partially Vegetated Surfaces). El modelo SEB-PV, tiene cuatro capas e incorpora la evaporación de áreas de suelo desnudo que contribuyen directamente al total de  $ET$ . El modelo SEB-PV estima el calor latente ( $\lambda E$ ), sensible ( $H$ ) y del suelo ( $G$ ), y distribuye  $R_n$ ,  $H$ ,  $\lambda E$ ,  $G$  a través del sistema suelo / residuos / canopia, separa la vegetación del suelo, y toma en cuenta el efecto del residuo en la evaporación. Requiere información de radiación neta, radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento. También requiere información del índice de área foliar ( $LAI$ ), fraccional de vegetación verde ( $F_v$ ), altura del cultivo, textura y temperatura del suelo, contenido de agua, tipo y cantidad de residuos de la cosecha. Una de las grandes ventajas del



modelo SEB-PV es que divide  $ET$  total en transpiración de la canopia, evaporación del suelo bajo la canopia y evaporación del suelo directamente expuesta a la radiación neta, siendo una herramienta muy útil para determinar la transpiración y de esta manera conocer cuál es la cantidad de agua que realmente es consumida por las plantas para posteriormente ser aportada en las dosis adecuadas mediante riego.

La eficiencia de los modelos SEB Y SEB-PV ha sido evaluado por Lagos *et al.* (2009, 2012, 2013) en la determinación de  $ET$  de manera puntual para los cultivos de maíz y soja bajo condiciones de riego. El modelo SEB-PV requiere mediciones de radiación neta ( $Rn$ ) que normalmente no son comunes, sin embargo existen otros modelos basados en imágenes satelitales que permiten estimar  $Rn$  espacialmente distribuida, por lo tanto SEB-PV podría alimentarse con estimaciones de  $Rn$  desde imágenes de satélite para obtener  $ET$  distribuida espacial.

La radiación neta ( $Rn$ ) corresponde a la energía disponible proveniente del sol para ser particionada en el flujo de calor sensible intercambiado entre la superficie y el suelo ( $G$ ), en el flujo de calor sensible intercambiado entre la superficie y la atmósfera ( $H$ ) y, en la energía consumida por  $ET$  o flujo de calor latente ( $\lambda E$ ) (Flores., 2011). Una precisa estimación de  $Rn$  mejorará las estimaciones de  $ET$ .

El modelo SEBAL modificado en METRIC (SEBAL-METRIC), con el uso de técnicas de teledetección permite estimar los componentes que conforman el balance de energía superficial como son radiación neta ( $Rn$ ), flujo de calor sensible ( $H$ ) y flujo de calor en el suelo ( $G$ ) y por diferencia obtener el flujo de calor latente ( $\lambda E$ ). SEBAL-METRIC ha sido usado exitosamente para estimar los componentes del balance de energía superficial (Al-Gaadi *et al.*, 2016; Allen *et al.*, 2007b; Carrasco-Benavides *et al.*, 2014; Fonseca *et al.*, 2015; González-Piqueras *et al.*, 2015; Liaqat *et al.*, 2015).

En consecuencia, en esta investigación se estimó la evapotranspiración instantánea y los componentes del balance de energía superficial en remolacha azucarera con el uso del modelo SEB-PV y 17 imágenes de satélite Landsat 8 durante tres temporadas (2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016). Se utilizó el modelo SEBAL modificado en METRIC (Allen *et al.*, 2007a, b) en la obtención de la información requerida por el modelo SEB-PV de radiación neta ( $R_n$ ) e índice de área foliar ( $LAI$ ).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Estimar la evapotranspiración instantánea y los componentes del balance de energía superficial en remolacha azucarera con el uso del modelo SEB-PV e imágenes de satélite Landsat 8.

### 2.2 Objetivos específicos

- Estimar radiación neta instantánea en remolacha azucarera con el uso de imágenes satelitales Landsat 8 y el modelo de simulación propuesto en Bastiaanssen *et al.* (1998a, b) y modificado por Allen *et al.* (2007a).
- Determinar la evapotranspiración instantánea, flujo de calor sensible y flujo de calor en el suelo con el uso de imágenes satelitales Landsat 8 y el modelo de simulación SEB-PV.
- Comparar los resultados de radiación neta, calor sensible, calor latente y flujo de calor en el suelo con datos medidos mediante un sistema de balance superficial de energía (SEB) ubicada en el sitio de estudio.

### 3. HIPÓTESIS

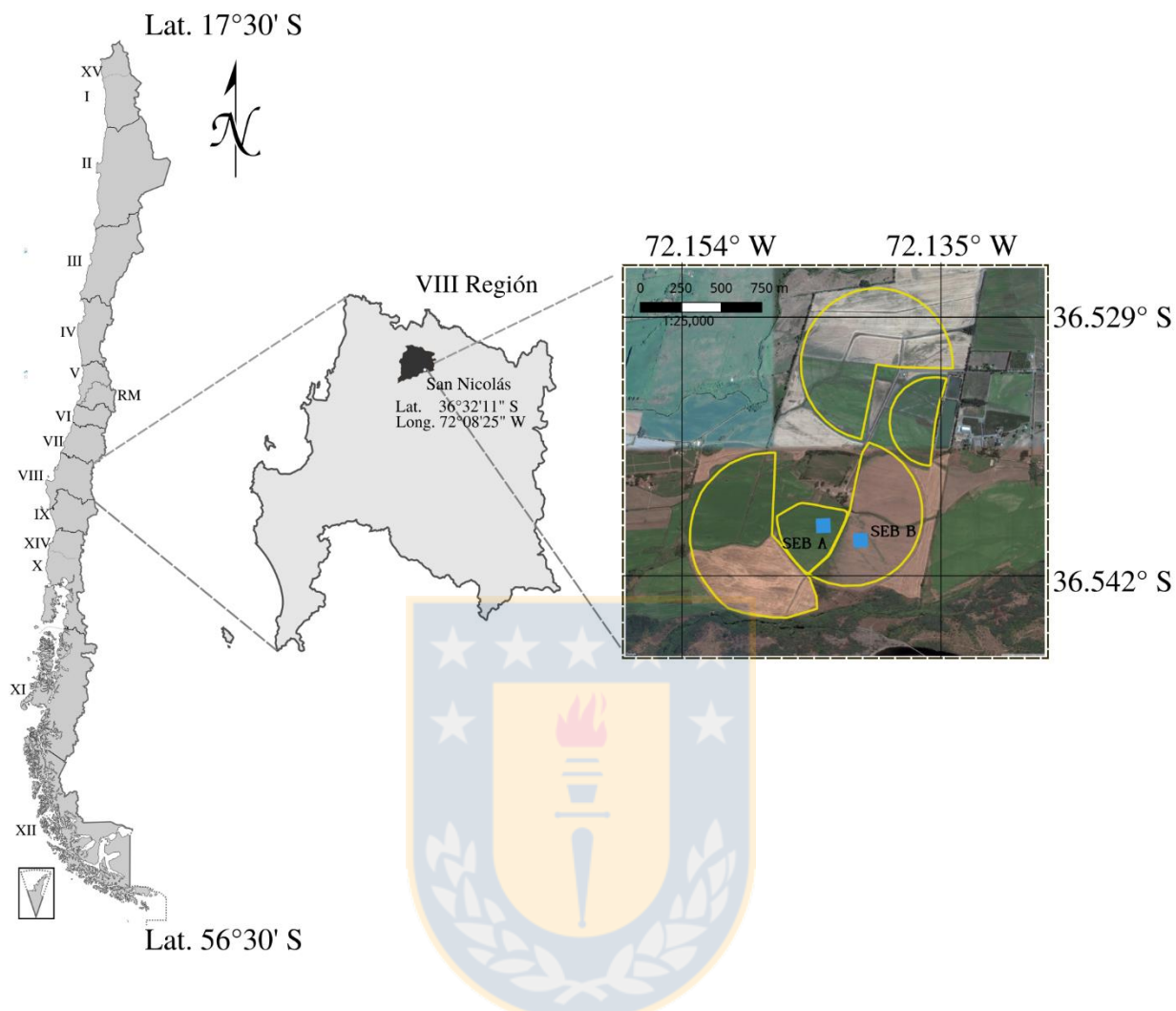
Es posible extender el uso del modelo de percepción cercana SEB-PV a su uso como modelo de percepción remota empleando imágenes de satélite para la estimación de evapotranspiración y los principales flujos de energía superficial en remolacha azucarera.

### 4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

#### 4.1 Materiales

##### 4.1.1 Ubicación y descripción del sitio en estudio

El sitio en estudio está localizado en la Región del Biobío, Provincia Ñuble, Comuna de San Nicolás (36° 32'11"S, 72° 8'25" W, 110 m.s.n.m) (Fig. 1). Corresponde a un cultivo anual de remolacha azucarera, que se cambia anualmente entre los cultivares Sandrina, Magnolia y Donella. El marco de plantación es de 0.5 m entre filas y 0.07 m entre plantas, con un sistema de riego de pivote central con emisores I-Wob. El área total de la finca es de 450 ha, y la superficie de cultivo cubierta para el pivote central (sitio de estudio) es de 17 ha. El clima es cálido templado, la temperatura media anual es de 14 ° C, con una estación seca corta y una precipitación anual que varía de 1.000 a 1.300 mm, el suelo corresponde a una serie Macal Poniente, que es Inceptisol. Este suelo está formado por sedimentos aluviales recientes con aporte de cenizas volcánicas, situados cerca del río Ñuble (Fonseca, 2015).



**Figura 1.** Localización geográfica del sitio en estudio.

**Fuente:** Elaboración propia.

El sitio de estudio (Figura 1) contó con un sistema de balance superficial de energía (estación SEB), que mide cada media hora los principales componentes del balance de energía superficial como son radiación neta ( $Rn$ ), flujo de calor sensible ( $H$ ) y flujo de calor en el suelo ( $G$ ), para estimar evapotranspiración ( $ET$ ) o flujo de calor latente como residuo de SEB Ec. [1]. Los datos medidos por la estación SEB se recogieron cada media hora usando un datalogger (CR3000, Campbell Scientific, Logan, UT, USA). La ubicación de la estación SEB cambió de acuerdo a la rotación agrícola, se ha definido SEB A para la temporada 2014-2015 y SEB B para las temporadas 2013-2014 y 2015-2016 (Figura 1).

$$\lambda E = Rn - G_o - H \quad [1]$$

La estación SEB estuvo conformado por un radiómetro neto montado a 1.5 m por encima de la canopia (Kipp & Zonen, modelo NR-Little 2, Delft, NLD net radiometer), un piranómetro (Li-Cor LI200X, Campbell Scientific, Logan, UT, USA), dos platos para medir el flujo de calor en suelo (Huxseflux, modelo HFP01SC Campbell Scientific, Logan, UT, USA); termocuplas para medir la temperatura en el suelo a 0.05 m y 0.1 m (TCAV, Campbell Scientific, Logan, UT, USA), un anemómetro sónico para mediciones del viento 3-D montado a 2.5 m por encima de la canopia (81000, R.M. Young 3D, Michigan, EE.UU), mediciones de temperatura y humedad del aire (HMP45C Campbell Scientific, Logan, UT, USA); mediciones de precipitación con un pluviómetro montado a 1.0 m por encima de la canopia (Texas Electronics, modelo TE525, Campbell Scientific, Logan, UT, USA), y mediciones de humedad en el suelo con cinco sensores a 0.05, 0.1, 0.24, 0.39 y 0.54 m de profundidad (Em5b y 10HS, Decagon Devices, Pullman, 116 WA, EE.UU.).

#### 4.1.2 Sensor e imágenes de satélite

En el presente estudio se utilizaron 17 imágenes de satélite capturadas desde la plataforma Landsat 8 (path/row 233/85) descargadas del USGS sitio oficial de glovis (<http://glovis.usgs.gov>), para tres temporadas de remolacha azucarera (2013-2014; 2014-2015 y 2015-2016). En la selección de las imágenes satelitales se consideró ausencia de nubes sobre el sitio en estudio y que la fecha de adquisición de la imagen tenga su correspondiente información en la estación SEB (Tabla 1).

El satélite Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS). OLI y TIRS miden la superficie terrestre en el visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta, e infrarrojo térmico con una resolución moderada entre 15 y 100 metros dependiendo de la longitud de onda espectral. Las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS), tienen un total de 11 bandas, OLI recoge datos de imagen de 9 bandas espectrales de onda corta, con una resolución espacial de 30 metros para las bandas 1 a 7 y 9; la resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros, la banda 1 (azul-profundo) es útil para estudios costeros y aerosoles y la banda 9 es útil para la

detección de nubes cirrus. TIRS recoge datos de dos bandas espectrales en la región térmica (10 y 11), estas bandas miden la energía térmica de la superficie de la tierra y se adquieren a una resolución de 100 metros, pero se vuelven a remuestrear a 30 metros para que coincida con las bandas multiespectrales de OLI. El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte-sur por 183 kilómetros de este a oeste. Junto con la generación de las bandas se crea el archivo de metadatos (MTL) que contiene información específica del producto, el archivo de metadatos es un texto en formato Object Description Language (ODL) (Ariza, 2013).

**Tabla 1.** Imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/85) seleccionadas para el procesamiento del balance de energía superficial en remolacha azucarera irrigado por pivote central, comuna de San Nicolás.

<b>Temporada</b>	<b>Código</b>	<b>Fecha</b>	<b>DOY*</b>	<b>Hora de Paso</b>	
<b>Estudio</b>		<b>(dd-mm-aa)</b>		<b>( Tiempo Local)</b>	
2013-2014	LC82330852013358LGN00	24-12-2013	358	11:35:56	
	LC82330852014009LGN00	09-01-2014	9	11:35:45	
	LC82330852014025LGN00	25-01-2014	25	11:35:36	
	SEB B	LC82330852014041LGN00	10-02-2014	41	11:35:23
	LC82330852014057LGN00	26-02-2014	57	11:35:10	
	LC82330852014089LGN00	30-03-2014	89	11:34:43	
2014-2015	LC82330852014329LGN00	25-11-2014	329	11:34:40	
	LC82330852014345LGN00	11-12-2014	345	11:34:33	
	LC82330852014361LGN00	27-12-2014	361	11:34:33	
	SEB A	LC82330852015012LGN00	12-01-2015	12	11:34:31
	LC82330852015044LGN00	13-02-2015	44	11:34:17	
	LC82330852015060LGN00	01-03-2015	60	11:34:15	
	LC82330852015076LGN00	17-03-2015	76	11:34:04	
2015-2016	LC82330852015364LGN00	30-12-2015	364	11:34:35	
	LC82330852016015LGN00	15-01-2016	15	11:34:34	
	SEB B	LC82330852016031LGN00	31-01-2016	31	11:34:32
	LC82330852016047LGN00	16-02-2016	47	11:34:23	

DOY\*= día del año de acuerdo día calendario. **Fuente:** USGS. (<http://glovis.usgs.gov>).

## 4.2 Metodología

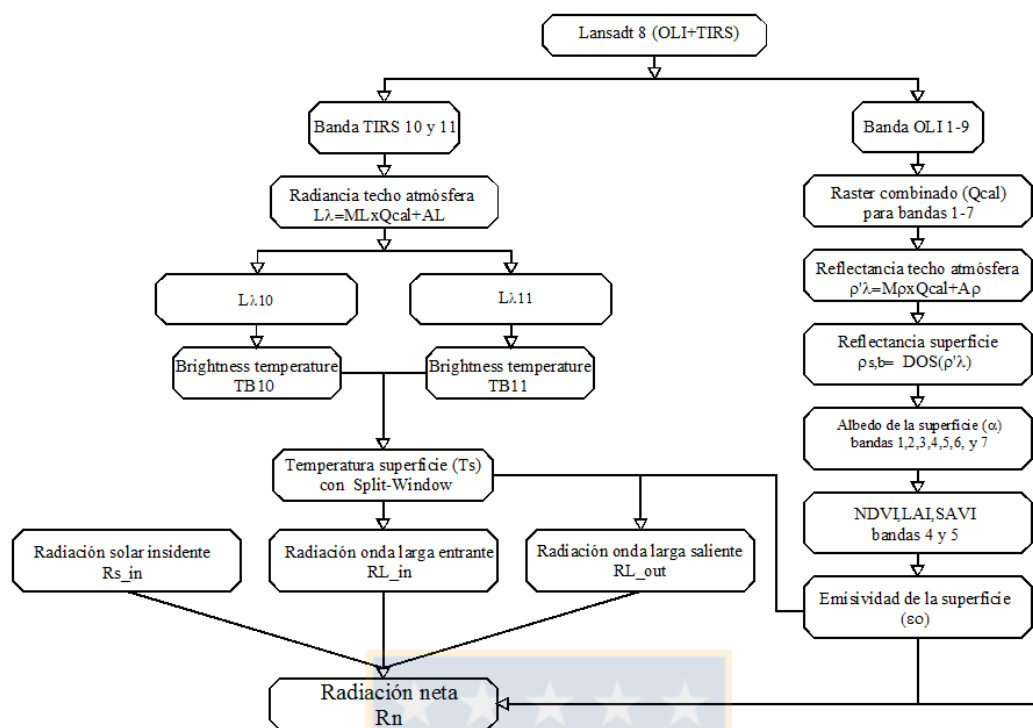
### 4.2.1 Corrección atmosférica de imágenes satelitales

La variación de las condiciones atmosféricas en el momento del sobrepaso del satélite puede originar cualquier cambio en la reflectancia superficial, por lo que es crucial corregir estas diferencias (Goslee, 2011). La corrección atmosférica consiste en determinar los verdaderos valores de reflectancia superficial, mediante la eliminación de los efectos atmosféricos de las imágenes de satélite. La corrección atmosférica es, sin duda, la parte más importante del preprocesamiento de datos de sensores remotos por satélite (Hadjimitsis *et al.*, 2010).

Se corrigió atmosféricamente la reflectancia en la superficie con el método sustracción del objeto obscuro (*DOS*) (Chavez 1988,1989; Goslee, 2011; Fonseca, 2015). El método *DOS* asume que si hay áreas en una imagen con valores muy bajos de reflectancia, cualquier reflectancia aparente debería ser producto de la dispersión atmosférica y esta información puede ser usada para calibrar el resto de la imagen (Chavez, 1988, 1989).

### 4.2.2 Estimación de la radiación neta instantánea ( $Rn_{ins}$ ) mediante el modelo SEBAL modificado en METRIC

El flujo de radiación neta actual en la superficie representa la energía radiante en la superficie que está subdividida en  $H$ ,  $G$  y  $LE$ .  $Rn$  es calculada al sustraer todos los flujos radiantes de salida de todos los flujos radiantes de entrada e incluye la radiación solar y termal (Allen *et al.*, 2007a). En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo para la obtención de  $Rn_{ins}$  con el uso de imágenes satelitales Landsat 8.



**Figura 2.** Diagrama de flujo para la obtención de radiación neta instantánea ( $Rn_{ins}$ ) con el uso de imágenes satelitales Landsat 8.

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.2.2.1 Conversión a radiancia en el techo de la atmósfera (TOA)

Los datos de las bandas Landsat 8 OLI / TIRS pueden convertirse en valores de reflectancia y radiancia espectrales ( $TOA$ ) utilizando los factores de reescalamiento de radiancia y reflectancia proporcionados en el archivo de metadatos de las imágenes y usando las Ec. [2 y 3] (Ariza, 2013).

$$L_{\lambda} = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad [2]$$

$$\rho'_{\lambda} = M_{\rho} \cdot Q_{cal} + A_{\rho} \quad [3]$$



Donde,  $L_\lambda$  es el valor de radiancia espectral (TOA) ( $W \cdot m^{-2} \cdot srad^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ) y,  $\rho'_\lambda$  es el valor de reflectancia planetaria (TOA) sin corrección por ángulo solar,  $ML$  es el factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadatos como  $RADIANCE\_MULT\_BAND\_x$ ,  $AL$  es el factor aditivo de escalado específico obtenido del metadatos como  $RADIANCE\_ADD\_BAND\_x$ ,  $M\rho$  es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadatos como  $REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_x$ ,  $A\rho$  es el factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadatos como  $REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_x$ ,  $x$  corresponde al número de la banda; y  $Q_{cal}$  es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN), este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

#### 4.2.2.2 Temperatura de la superficie

La Temperatura en la superficie ( $T_s$ ) fue calculada con el algoritmo Split-Window ( $SW$ ) (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2014; Latif, 2014). Las entradas básicas del algoritmo  $SW$  fueron las bandas termales TIRS (10, 11), y la emisividad de la superficie terrestre estimada usando el método umbral  $NDVI$ ,  $T_s$  queda definida con base en la siguiente ecuación.

$$T_s = TB_{10} + C_1 \cdot (TB_{10} - TB_{11}) + C_2 \cdot (TB_{10} - TB_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4 \cdot W) \cdot (1 - \varepsilon) + (C_5 + C_6 \cdot W) \cdot \Delta\varepsilon \quad [4]$$

Donde,  $T_s$  es la temperatura en la superficie ( $^\circ K$ ),  $C_0$ - $C_6$  son los valores de los coeficientes de  $SW$  y están ampliamente descritos en Jiménez-Muñoz *et al.* (2014),  $TB_{10}$  y  $TB_{11}$  son las temperaturas de brillo correspondientes a las bandas TIRS de Landsat 8,  $\varepsilon$  es el promedio de la emisividad de la superficie de la tierra,  $W$  es el contenido de vapor de agua atmosférico ( $g \cdot cm^{-2}$ ) y,  $\Delta\varepsilon$  es diferencia en emisividad de la superficie.

Las temperaturas de brillo se calculan aplicando la siguiente ecuación (Ariza, 2013).

$$TB = \frac{K_2}{Ln\left(\frac{K_1}{L\lambda} + 1\right)} \quad (5)$$

Donde,  $K_1$  y  $K_2$  son constantes de conversión termal de las bandas TIRS que se encuentran disponibles en el archivo de metadatos de la imagen,  $L\lambda$  es la radiancia espectral TOA de las bandas TIRS en ( $W m^{-2} ster^{-1} \mu m^{-1}$ ) y se la estima aplicando la Ec. [2].

En esta investigación se usaron los valores de  $NDVI_s = 0.16$  y  $NDVI_v = 0.99$ , para la determinación del fraccional de vegetación verde ( $F_v$ ) (Gutman y Ignatov, 1997) necesario para el cálculo de la emisividad de la superficie. Donde los valores de  $NDVI_s$  y  $NDVI_v$  corresponden a valores de  $NDVI$  de la imagen para el suelo desnudo y vegetación densa respectivamente.

$NDVI_s$  (suelo desnudo) corresponde al promedio de los valores mínimos y  $NDVI_v$  (vegetación verde) corresponde al promedio de los valores máximos de los resultados de  $NDVI$  obtenidos en esta investigación para las 17 imágenes satelitales Landsat 8. Para la obtención de los valores  $NDVI_s$  y  $NDVI_v$  se seleccionó una área representativa dentro del dominio en estudio, y en esta área se verificó que existan suelos desnudos y suelos con vegetación densa. Los valores de  $NDVI_s$  y  $NDVI_v$  obtenidos en esta investigación son similares a los determinados por Oliver *et al.* (2014), quienes obtuvieron valores de  $NDVI_s = 0.18$  y  $NDVI_v = 0.93$ .

#### 4.2.2.3 Albedo de la superficie ( $\alpha$ )

El albedo de la superficie se estimó para las bandas del sensor OLI (1-7) con base en la reflectancia superficial ( $\rho_{s,b}$ ) corregida con el método *DOS*, se obtiene aplicando la Ec. [6] (Allen *et al.*, 2007a).

$$\alpha = \sum_{b=1}^n [\rho_{s,b} \cdot w_b] \quad [6]$$

Donde,  $w_b$  es el coeficiente de ponderación o peso, que representa la fracción de radiación solar superficial que se produce dentro de la gama espectral representada por una banda específica. Los coeficientes  $w_b$  para las imágenes satelitales Landsat 8 están dados por Ke *et al.* (2016) y se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Coeficientes  $w_b$  para imágenes satelitales Landsat 8.

Sensor	Número de banda							Total
	1	2	3	4	5	6	7	
Landsat 8								
OLI	0.13	0.115	0.143	0.18	0.281	0.108	0.042	1.0

Fuente: (Ke *et al.*, 2016).

#### 4.2.2.4 Radiación neta (Rn)

El flujo de radiación neta ( $R_n$ ) se calculó aplicando la Ec. [7] (Allen *et al.*, 2007a).

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha \cdot R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o) \cdot R_{L\downarrow} \quad [7]$$

Donde  $R_{s\downarrow}$  es la radiación de onda corta incidente ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $\alpha$  es el albedo de la superficie (adimensional),  $R_{L\downarrow}$  es la radiación de onda larga incidente ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $R_{L\uparrow}$  es la radiación de onda larga reflejada ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $\varepsilon_o$  es la emisividad térmica de la superficie (adimensional) y el término  $(1 - \varepsilon_o) \cdot R_{L\downarrow}$  representa la fracción de radiación de onda larga incidente que se refleja desde la superficie.

La radiación solar incidente de onda corta ( $R_{s\downarrow}$ ), tanto directa como difusa sobre la superficie de la tierra se calculo aplicando la Ec. [8] (Allen *et al.*, 2010).

$$R_s \downarrow = G_{sc} \cdot \cos \theta \cdot dr \cdot T_{sw} \quad [8]$$

Donde  $G_{sc}$  es la constante solar ( $1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $\theta$  es el ángulo de cenital solar en grados,  $dr$  es cuadrado inverso de la distancia relativa tierra-sol y,  $T_{sw}$  es la transmisividad atmosférica de banda ancha.

El ángulo cenital solar ( $\theta$ ) se estima a partir del ángulo de elevación solar (SUN\_ELEVATION) provisto en el archivo de metadatos y aplicando la Ec. [9].

$$\theta = 90 - \text{SUN\_ELAVATION} \quad [9]$$

La radiación de onda larga saliente ( $RL\uparrow$ ), emitida desde la superficie se calcula aplicando la Ec. [10] de Stefan-Boltzmann (Allen *et al.*, 2007a).

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad [10]$$

Donde  $\varepsilon_0$  es la emisividad térmica de la superficie (adimensional),  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ ), y  $T_s$  es la temperatura de la superficie ( $^{\circ}\text{K}$ ) Ec. [4].

Para la plataforma Landsat 8, los índices de vegetación *NDVI* y *SAVI* fueron calculados con base a reflectancia de la superficie con corrección atmosférica del infrarrojo cercano ( $\rho_{S,5}$ ) correspondiente a la banda 5 y la reflectancia de la superficie con corrección atmosférica de la banda roja ( $\rho_{S,4}$ ) correspondiente a la banda 4.

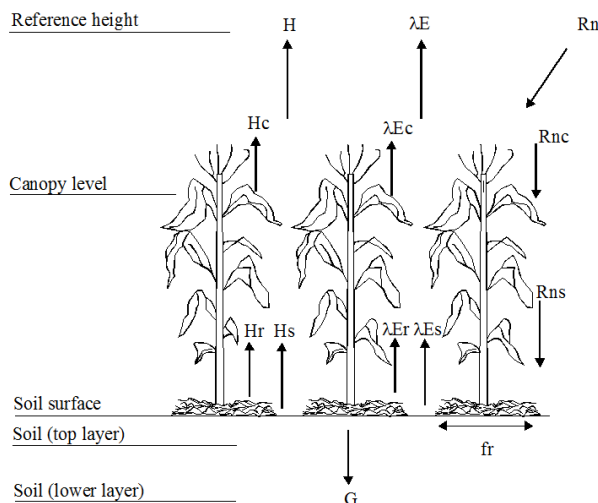
La radiación de onda larga incidente ( $W \cdot m^{-2}$ ) es el flujo de radiación termal descendente originado desde la atmósfera y es calculada usando la Ec. [11] de Stefan-Boltzmann.

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad [11]$$

Las ecuaciones para el cálculo de los índices de vegetación *SAVI* y *LAI*, así como los parámetros  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $dr$ , y  $T_{sw}$ , están ampliamente descritos en Allen *et al.* (2010).

#### 4.2.3 Modelo de SEB modificado para superficies parcialmente con vegetación (SEB-PV)

El modelo de balance de energía superficial modificado (SEB-PV) desarrollado por Lagos *et al.* (2012) tiene cuatro capas (Figura 3). La primera capa se extiende desde la altura de referencia por encima de la vegetación hasta la canopia, la segunda capa está entre el nivel de la canopia y la superficie del suelo, la tercera capa corresponde a la capa superior del suelo y la cuarta capa es el espesor inferior del suelo donde la atmósfera del suelo está saturada con vapor de agua. El modelo SEB-PV incorpora la evaporación de áreas de suelo desnudo que contribuyen directamente al total de *ET*, separa la vegetación del suelo, toma en cuenta el efecto del residuo en la evaporación y distribuye la radiación neta (*Rn*), calor sensible (*H*), el calor latente ( $\lambda E$ ), y el flujo de calor del suelo (*G*) a través del sistema suelo / residuos / canopia. Los gradientes horizontales de los potenciales se supone que son lo suficientemente pequeños para flujos laterales y no se los considera, y los términos de almacenamiento de energía físicos y bioquímicos en el sistema canopia / residuo / suelo se supone que son insignificantes. La evaporación del agua en hojas de las plantas debido a la lluvia, el riego o el rocío también se ignora (Lagos *et al.*, 2012).



**Figura 3.** Flujos del modelo de balance superficial de energía (SEB). ( $R_n$  radiación neta,  $R_{nc}$  radiación neta absorbida por la canopia,  $R_{ns}$  radiación neta absorbida por el suelo,  $H$  calor sensible,  $H_c$  calor sensible de la canopia,  $H_r$  calor sensible del suelo cubierto de residuo,  $H_s$  calor sensible del suelo desnudo,  $\lambda E$  evapotranspiración,  $\lambda E_c$  flujo de calor latente de la canopia,  $\lambda E_r$  flujo de calor latente del suelo cubierto de residuos,  $\lambda E_s$  flujo de calor latente del suelo desnudo,  $G$  flujo de calor en el suelo,  $f_r$  fracción de suelo cubierto de residuos).

**Fuente:** (Lagos, *et al.*, 2012).

En el modelo SEB-PV el flujo de calor latente total ( $\lambda E$ ) equivalente a la evapotranspiración ( $ET$ ), flujo de calor sensible ( $H$ ), flujo de calor en el suelo ( $G$ ) se estiman como:

$$\lambda E = [\lambda E_c + \lambda E_s \cdot (1 - f_r) + \lambda E_r \cdot f_r] \cdot F_V + [\lambda E_{b_s} \cdot (1 - f_r) + \lambda E_{b_r} \cdot f_r] \cdot (1 - F_V) \quad [12]$$

$$H = [H_c + H_s \cdot (1 - f_r) + H_r \cdot f_r] \cdot F_V + [H_{b_s} \cdot (1 - f_r) + H_{b_r} \cdot f_r] \cdot (1 - F_V) \quad [13]$$

$$G = [G_s \cdot (1 - f_r) + G_r \cdot f_r] \cdot F_V + [G_{b_s} \cdot (1 - f_r) + G_{b_r} \cdot f_r] \cdot (1 - F_V) \quad [14]$$

Donde,  $\lambda E_c$  es el calor latente de la canopia equivalente a la transpiración de la canopia ( $T$ ),  $\lambda E_s$  es el calor latente del suelo bajo la canopia,  $\lambda E_r$  el calor latente del suelo cubierto de residuo bajo la canopia,  $\lambda E_{b_s}$  es el calor latente del suelo expuesta a la radiación neta,  $\lambda E_{b_r}$  es el calor latente del suelo cubierto de residuos expuesta a la radiación neta,  $H_c$  es el calor sensible de la canopia,  $H_s$  es

el calor sensible del suelo bajo la canopia,  $H_r$  es el calor sensible del suelo cubierto residuo bajo la canopia,  $Hb_s$  es el calor sensible del suelo expuesto a la radiación neta,  $Hb_r$  es el calor sensible del suelo cubierto de residuos expuesto a la radiación neta,  $G_s$  es el calor del suelo bajo la canopia,  $G_r$  es el calor del suelo cubierto residuo bajo la canopia,  $Gb_s$  es el calor del suelo expuesto a la radiación neta,  $Gb_r$  es el calor del suelo cubierto de residuos expuesto a la radiación neta,  $f_r$  es la fracción del suelo afectado por residuo.  $F_v$  es el fraccional de vegetación verde que se calcula con la Ec. [15] (Johnson *et al.*, 2012).

$$F_v = 1.26 \cdot (NDVI) - 0.1 \quad [15]$$

Las expresiones propuestas por Lagos *et al.*, (2012) que definen a  $\lambda E_c$ ,  $\lambda E_s$ ,  $\lambda E_r$ ,  $\lambda Eb_s$ ,  $\lambda Eb_r$ ,  $H_c$ ,  $H_s$ ,  $H_r$ ,  $Hb_s$ ,  $Hb_r$ , son:

$$\lambda E_c = \frac{\Delta r_1 \cdot Rn_c + \rho \cdot C_p \cdot (e_b^* - e_b)}{\Delta r_1 + \gamma \cdot (r_1 + r_c)} \quad [16]$$

$$\lambda E_s = \frac{Rn_s \cdot \Delta \cdot r_2 \cdot r_L + \rho \cdot C_p \cdot [(e_b^* - e_b) \cdot (r_u + r_L + r_2) + (T_m - T_b) \cdot \Delta \cdot (r_u + r_2)]}{\gamma \cdot (r_2 + r_s) \cdot (r_u + r_L + r_2) + \Delta \cdot r_L \cdot (r_u + r_2)} \quad [17]$$

$$\lambda E_r = \frac{Rn_s \cdot \Delta \cdot (r_2 + r_{rh}) \cdot r_L + \rho \cdot C_p \cdot [(e_b^* - e_b) \cdot (r_u + r_L + r_2 + r_{rh}) + (T_m - T_b) \cdot \Delta \cdot (r_u + r_2 + r_r)]}{\gamma \cdot (r_2 + r_s + r_r) \cdot (r_u + r_L + r_2 + r_{rh}) + \Delta \cdot r_L \cdot (r_u + r_2 + r_{rh})} \quad [18]$$

$$\lambda Eb_s = \frac{(Rn \cdot \Delta \cdot (r_{2b}) \cdot r_L + \rho \cdot C_p \cdot ((e_b^* - e_b) \cdot r_u + r_L + r_{2b}) + (T_m - T_b) \cdot \Delta \cdot (r_u + r_{2b}))}{\gamma \cdot (r_{2b} + r_s) \cdot (r_u + r_L + r_{2b}) + \Delta \cdot r_L \cdot (r_u + r_{2b})} \quad [19]$$

$$\lambda Eb_r = \frac{(Rn \cdot \Delta \cdot (r_{2b} + r_{rh}) \cdot r_L + \rho \cdot C_p \cdot ((e_b^* - e_b) \cdot r_u + r_L + r_{2b} + r_{rh}) + (T_m - T_b) \cdot \Delta \cdot (r_u + r_{2b} + r_r))}{\gamma \cdot (r_{2b} + r_s + r_r) \cdot (r_u + r_L + r_{2b} + r_{rh}) + \Delta \cdot r_L \cdot (r_u + r_{2b} + r_{rh})} \quad [20]$$

$$H_c = \frac{\gamma(r_1 - r_c) \cdot Rn_c - \rho \cdot C_p \cdot (e_b^* - e_b)}{\Delta r_1 + \gamma(r_1 + r_c)} \quad [21]$$

$$H_s = \frac{Rn_s \cdot r_L \cdot \Delta - \lambda E_s \cdot [r_L \cdot \Delta + \gamma(r_2 + r_s)] + \rho \cdot C_p \cdot (e_b^* - e_b) - \rho \cdot C_p \cdot \Delta \cdot (T_b - T_m)}{r_L \cdot \Delta} \quad [22]$$

$$H_r = \frac{Rn_s \cdot r_L \cdot \Delta - \lambda E_r \cdot [r_L \cdot \Delta + \gamma(r_2 + r_s + r_r)] + \rho \cdot C_p \cdot (e_b^* - e_b) - \rho \cdot C_p \cdot \Delta \cdot (T_b - T_m)}{r_L \cdot \Delta} \quad [23]$$

$$Hb_s = \frac{Rn \cdot r_L \cdot \Delta - \lambda E_{bs} \cdot [r_L \cdot \Delta + \gamma(r_{2b} + r_s)] + \rho \cdot C_p \cdot (e_b^* - e_b) - \rho \cdot C_p \cdot \Delta \cdot (T_b - T_m)}{r_L \cdot \Delta} \quad [24]$$

$$Hb_r = \frac{Rn \cdot r_L \cdot \Delta - \lambda E_{br} \cdot [r_L \cdot \Delta + \gamma(r_{2b} + r_s + r_r)] + \rho \cdot C_p \cdot (e_b^* - e_b) - \rho \cdot C_p \cdot \Delta \cdot (T_b - T_m)}{r_L \cdot \Delta} \quad [25]$$

Donde,  $\Delta$  es la pendiente de vapor de saturación ( $mb \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  $Rn$  es la radiación neta,  $Rn_s$  es la radiación neta absorbida por el suelo ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $Rn_c$  es la radiación neta absorbida por la canopia,  $\rho$  es la densidad del aire húmedo ( $kg \cdot m^{-3}$ ),  $C_p$  es calor específico del aire ( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  $e_b^*$  es la presión de vapor saturado a nivel de la canopia,  $e_b$  es la presión de vapor del aire al nivel de la canopia,  $r_1$  es la resistencia aerodinámica entre la canopia y el aire en el nivel de la canopia ( $s \cdot m^{-1}$ ),  $r_c$  es la resistencia de la superficie del dosel arbóreo ( $s \cdot m^{-1}$ ),  $r_2$  es la resistencia aerodinámica entre el suelo y el aire al nivel de la canopia ( $s \cdot m^{-1}$ ),  $r_L$  es la resistencia del flujo de calor del suelo para la capa inferior ( $s \cdot m^{-1}$ ),  $r_u$  es la resistencia del flujo de calor del suelo para la capa superior ( $s \cdot m^{-1}$ ),  $T_m$  es la temperatura del suelo en la parte inferior de la capa inferior ( $^\circ C$ ),  $T_b$  es la temperatura del aire a la altura de la canopia ( $^\circ C$ ),  $r_s$  es la resistencia de la superficie del suelo para el flujo de vapor de agua ( $s \cdot m^{-1}$ ),  $r_{2b}$  es la resistencia aerodinámica actual entre la superficie del suelo y la altura de referencia  $Z_m$  ( $s \cdot m^{-1}$ ),  $\gamma$  es la constante psicrométrica ( $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  $r_{rh}$  es la resistencia residual para transferencia de calor ( $s \cdot m^{-1}$ ),  $r_r$  es la resistencia residual para el flujo de vapor de agua ( $s \cdot m^{-1}$ ).



Ecuaciones para el cálculo del flujo de calor en el suelo ( $G$ ) son definidas por Lagos *et al.* (2012) como: ( $G_s = G_{o_s} - \lambda E_s$ ), donde  $G_{o_s}$  es el flujo de calor en la superficie del suelo bajo la canopia y se expresa como ( $G_{o_s} = R_{n_s} - H_s$ ), donde  $R_{n_s}$  es la radiación neta absorbida por el suelo bajo la canopia; ( $G_r = G_{o_r} - \lambda E_r$ ), donde  $G_{o_r}$  es el flujo de calor en la superficie del suelo cubierto de residuos bajo la canopia y se expresa como ( $G_{o_r} = R_{n_s} - H_r$ ); ( $G_b = G_{b_o_s} - \lambda E_{b_s}$ ), donde  $G_{b_o_s}$  es el flujo de calor en la superficie del suelo expuesto a la radiación neta y se expresa como ( $G_{b_o_s} = R_n - H_{b_s}$ ); ( $G_{b_r} = G_{b_o_r} - \lambda E_{b_r}$ ), donde  $G_{b_o_r}$  es el flujo de calor en la superficie del suelo cubierta de residuos expuesto a la radiación neta y se expresa como ( $G_{b_o_r} = R_n - H_{b_r}$ ).

#### 4.2.3.1 Resistencias del modelo SEB-PV

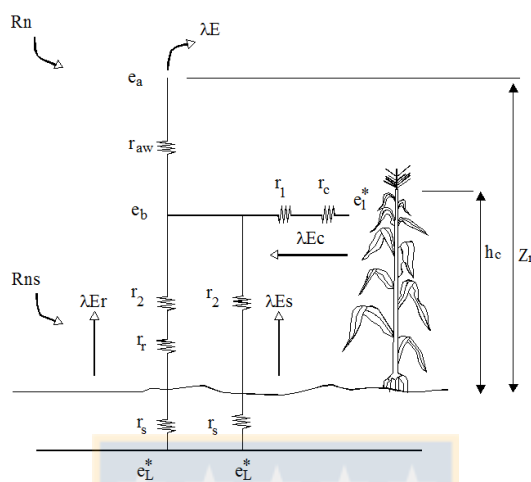
Las resistencias del modelo SEB-PV son similares a las descritas en Lagos *et al.* (2009) (Figura 4), sin embargo el modelo SEB-PV requiere una nueva resistencia aerodinámica ( $r_{2b}$ ) propuesta por Lagos *et al.* (2012) para la transferencia de flujo de calor y el agua para la superficie sin vegetación y se la determina como sigue:

$$r_{2b} = F_v \cdot (r_2) + (1 - F_v) \cdot (r_{as}) \quad [26]$$

Donde  $r_{2b}$  es la resistencia aerodinámica actual entre la superficie del suelo y  $Z_m$  ( $s \cdot m^{-1}$ ),  $r_2$  es la resistencia aerodinámica entre el suelo y el aire en el nivel de la canopia ( $s \cdot m^{-1}$ ),  $F_v$  es el fraccional de vegetación verde.,  $r_{as}$  es la resistencia aerodinámica entre la superficie del suelo y  $Z_m$  no afectada por la vegetación adyacente ( $s \cdot m^{-1}$ ) y ,  $Z_m$  es la altura de referencia ( $m$ );  $r_{as}$  se estima con base en la Ec. [27].

$$r_{as} = \frac{\ln\left(\frac{Z_m}{z_0}\right)^2}{k^2 \cdot u} \quad [27]$$

Donde,  $z_0$  es la longitud de la rugosidad en la superficie del suelo ( $m$ ),  $k$  es la constante de Von-Karman y,  $u$  es la velocidad del viento ( $m \cdot s^{-1}$ ).



**Figura 4.** Resistencias del modelo de balance superficial de energía (SEB) para el flujo de calor latente ( $\lambda E$ ).

( $R_n$  radiación neta,  $R_{ns}$  radiación neta absorbida por el suelo,  $\lambda E$  evapotranspiración,  $\lambda E_c$  flujo de calor latente de la canopia,  $\lambda E_s$  flujo de calor latente del suelo desnudo,  $G$  flujo de calor en el suelo,  $e_a$  déficit de presión de vapor del aire,  $e_b$  déficit de presión de vapor del aire al nivel de la canopia,  $e_1^*$  presión de vapor de saturación de la canopia,  $e_L^*$  presión de vapor de saturación de la parte superior de la capa húmeda,  $r_{aw}$  resistencia aerodinámica de vapor de agua,  $r_c$  resistencia de la superficie de la canopia,  $r_1$  resistencia aerodinámica entre la canopia y el aire al nivel de la canopia,  $r_2$  resistencia aerodinámica entre el suelo y el aire al nivel de la canopia,  $r_r$  resistencia residual para el flujo de vapor de agua,  $r_s$  resistencia de la superficie del suelo para el flujo del vapor de agua,  $h_c$  altura del cultivo,  $z_r$  altura de referencia).

**Fuente:** (Lagos *et al.*, 2012).

#### 4.2.3.2 Entradas del modelo SEB-PV

Las entradas requeridas para modelo SEB-PV en esta investigación fueron radiación neta ( $R_n$ ), radiación solar ( $R_s$ ), índice de área foliar ( $LAI$ ), esta información fue estimada con base el modelo SEBAL modificado en METRIC propuesto por Allen *et al.* (2007a) y corresponde a información espacial. Mediciones puntuales de temperatura del aire a la altura de la canopia ( $T_b$ ), humedad

relativa ( $Hr$ ), velocidad del viento ( $u$ ), temperatura del suelo ( $T_m$ ), humedad del suelo ( $\theta$ ), y precipitación ( $P$ ) fueron obtenidas de la estación SEB que se ubicó en el sitio de estudio durante las temporadas analizadas. También se requirió información puntual de la altura del cultivo ( $h$ ) y del fraccional de vegetación verde. ( $Fv$ ) Ec. [15].

#### 4.2.4 Consideraciones para la simulación del modelo SEBAL modificado en METRIC y modelo SEB-PV

Para evaluar el modelo SEBAL modificado en METRIC (SEBAL-METRIC) y modelo SEB-PV, se implementó rutinas de programación en MATLAB.

En la aplicación del modelo SEBAL-METRIC para la estimación de la  $Rn_{ins}$  se utilizó como dato de entrada la información de presión de vapor actual ( $e_{ac}$ ) procedente de la estación SEB. Se utilizaron imágenes satelitales capturadas desde la plataforma Landsat 8 (path/row 233/85), en condiciones de cielo despejado durante tres temporadas de remolacha azucarera (2013-2014, 2014-2015 y, 2015-2016) (Tabla 1); se verificó que la fecha de adquisición de la imagen tenga su correspondiente información de  $Rn$  en la estación SEB, para su posterior validación.

En la estimación de los flujos  $ET_{ins}$ ,  $H_{ins}$  y  $G_{ins}$ , con el uso del modelo SEB-PV se consideró que la temperatura del suelo ( $T_m$ ) registrada en la estación SEB, corresponde a la temperatura del suelo en la hilera ; que el contenido de humedad ( $\theta$ ) del suelo registrada en la estación SEB, corresponde al contenido de humedad del suelo en hilera; el cultivo de remolacha azucarera no presenta residuos sobre la superficie del suelo, por esta razón la fracción de residuos ( $fr$ ) se la considera igual a cero. En la Tabla 3, se muestran los valores de los parámetros con se evaluó en esta investigación al modelo SEB-PV, estos parámetros fueron usados por Lagos *et al.* (2012) en el análisis de sensibilidad del modelo SEB-PV a los cambios en las resistencias y parámetros del modelo.

**Tabla 3.** Parámetros para la evaluación del modelo SEB-PV

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Coefficientes de resistencia de la canopia	C1,C2;C3	5,0.005,300	
Humedad de saturación del suelo	$\theta_s$	0.5	$m^3 m^{-3}$
Porosidad del suelo	$\phi$	0.5	$m^3 m^{-3}$
Tortuosidad del suelo	$\tau_s$	1.5	
Espesor de la capa inferior del suelo	Lt	0.05	m
Espesor de la capa superior del suelo	Lm	0.5	m
Longitud de la rugosidad del suelo	Zo'	0.01	m
Coefficiente de arrastre	Cd	0.07	
Altura de referencia	Z	2.5	m
Altura del cultivo	h	0.55	m
Coefficiente de atenuación	$\alpha$	2.5	
Coefficiente de extensión	C <sub>ext</sub>	0.6	
Ancho medio de la hoja	W	0.15	m
Coefficiente de difusión de vapor de agua	Dv	$2.56 \times 10^{-5}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Parámetro de ajuste	$\beta$	6.5	
Conductividad termal de la capa inferior del suelo	K	0.8	$W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$
Conductividad termal de la capa superior del suelo	K'	1.1	$W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$

**Fuente:** (Lagos *et al.*, 2012).

#### 4.2.5 Comparación estadística entre valores medidos y estimados

Para el sitio en estudio Fonseca (2015), realizó el análisis de la huella del flujo (footprint) usando el método desarrollado en Hsieh *et al.* (2000) y concluyó que los resultados mostraron que el 90% de los flujos procedían de menos de 280 m de distancia de la estación SEB. En el sitio los flujos provienen principalmente de la dirección suroeste, en nuestro caso éstos aseguran que todos los flujos provienen de la superficie de interés. En consecuencia con lo anterior, los resultados de los componentes del balance energético instantáneo ( $Rn_{ins}$ ,  $H_{ins}$ ,  $G_{ins}$ ,  $LE_{ins}$ ) se obtuvieron promediando los valores de una ventana de 3x3 pixeles (90 m x 90 m) centrada en la estación SEB (Figura 1).

La validación del modelo SEBAL-METRIC y modelo SEB-PV se llevó a cabo utilizando la relación entre los valores estimados y medidos. En la validación de los modelos se usó la raíz del error cuadrático medio (*RMSE*) (Kilic *et al.*, 2016; Carrasco-Benavides *et al.*, 2014) Ec. [28], error absoluto medio (*MAE*) (Kilic *et al.*, 2016; Carrasco-Benavides *et al.*, 2014) Ec. [29], el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) (Kilic *et al.*, 2016) Ec. [30], diferencias relativas (*RD*) (Kjelgaard *et al.*, 1997) Ec. [31] y, coeficiente de Nash-Sutcliffe (*NS*) (Mathevet *et al.*, 2006) Ec. [32]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{OBS} - X_{EST})^2}{n}} \quad [28]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_{obs} - X_{est}|}{n} \quad [29]$$

$$R^2 = \left( \frac{n \cdot \sum X_{OBS} X_{EST} - \sum X_{OBS} \sum X_{EST}}{\sqrt{n \cdot \sum X_{OBS}^2 - (\sum X_{OBS})^2} \cdot \sqrt{n \cdot \sum X_{EST}^2 - (\sum X_{EST})^2}} \right)^2 \quad [30]$$

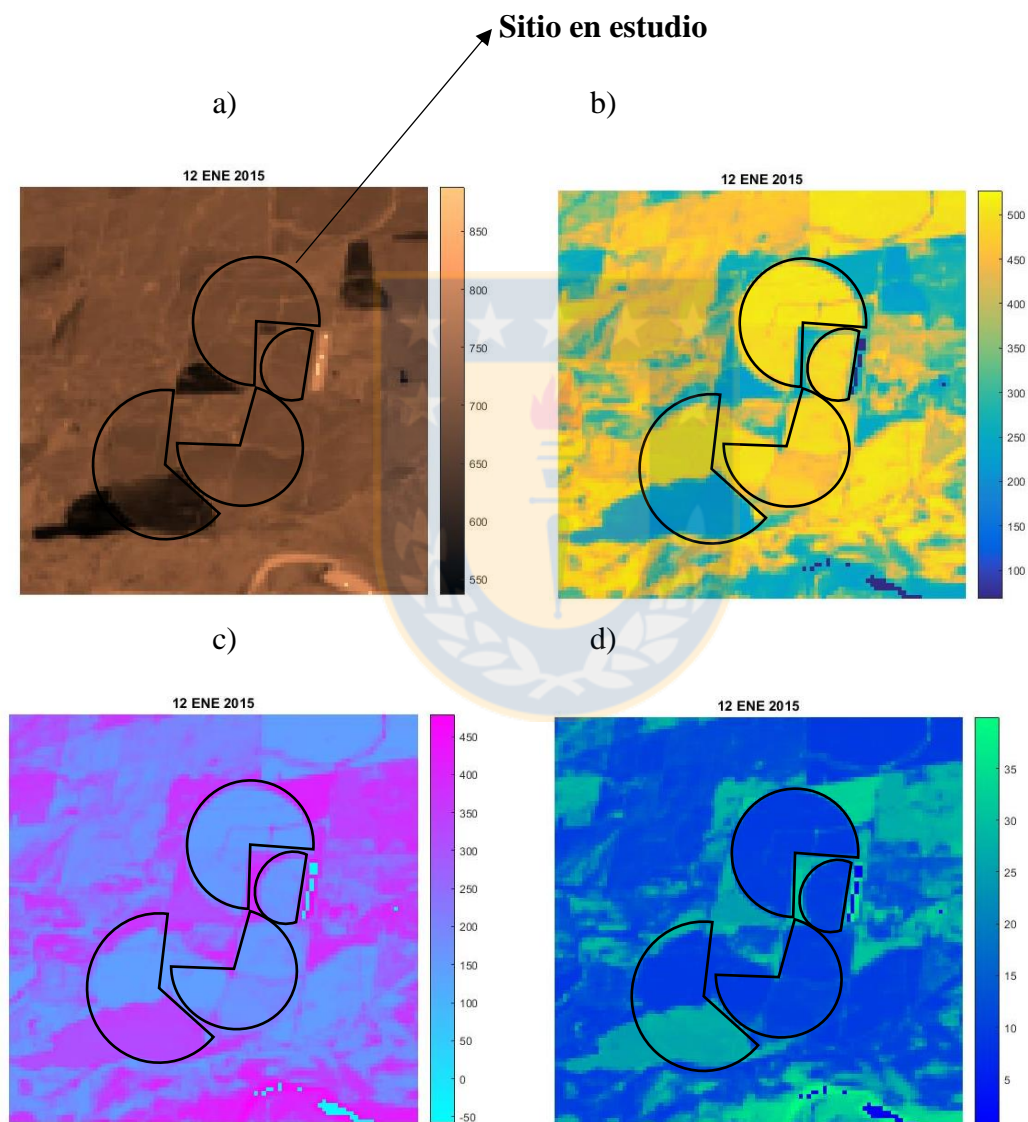
$$RD = \text{Relative RMSE} = \frac{RMSE}{X_{OBS}} \quad [31]$$

$$NS = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs} - X_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs} - \bar{X}_{obs})^2} \right] \quad [32]$$

Donde  $X_{OBS}$  corresponde a las mediciones in-situ registradas por la estación SEB,  $X_{EST}$  corresponde a las variables estimadas con los modelos SEBAL-METRIC y modelo SEB-PV; y  $n$  corresponde al número de datos considerados en el análisis.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para cada una de las 17 imágenes Landsat 8 y aplicando el modelo SEBAL-METRIC y SEB-PV se elaboraron mapas de flujos instantáneos de radiación neta ( $Rn$ ), calor latente ( $\lambda E$ ) o evapotranspiración ( $ET$ ), calor sensible ( $H$ ) y, calor en el suelo ( $G$ ). En la Fig. 5 se muestran mapas resultantes para la imagen capturada con fecha 12 de enero del 2015 (DOY=12).

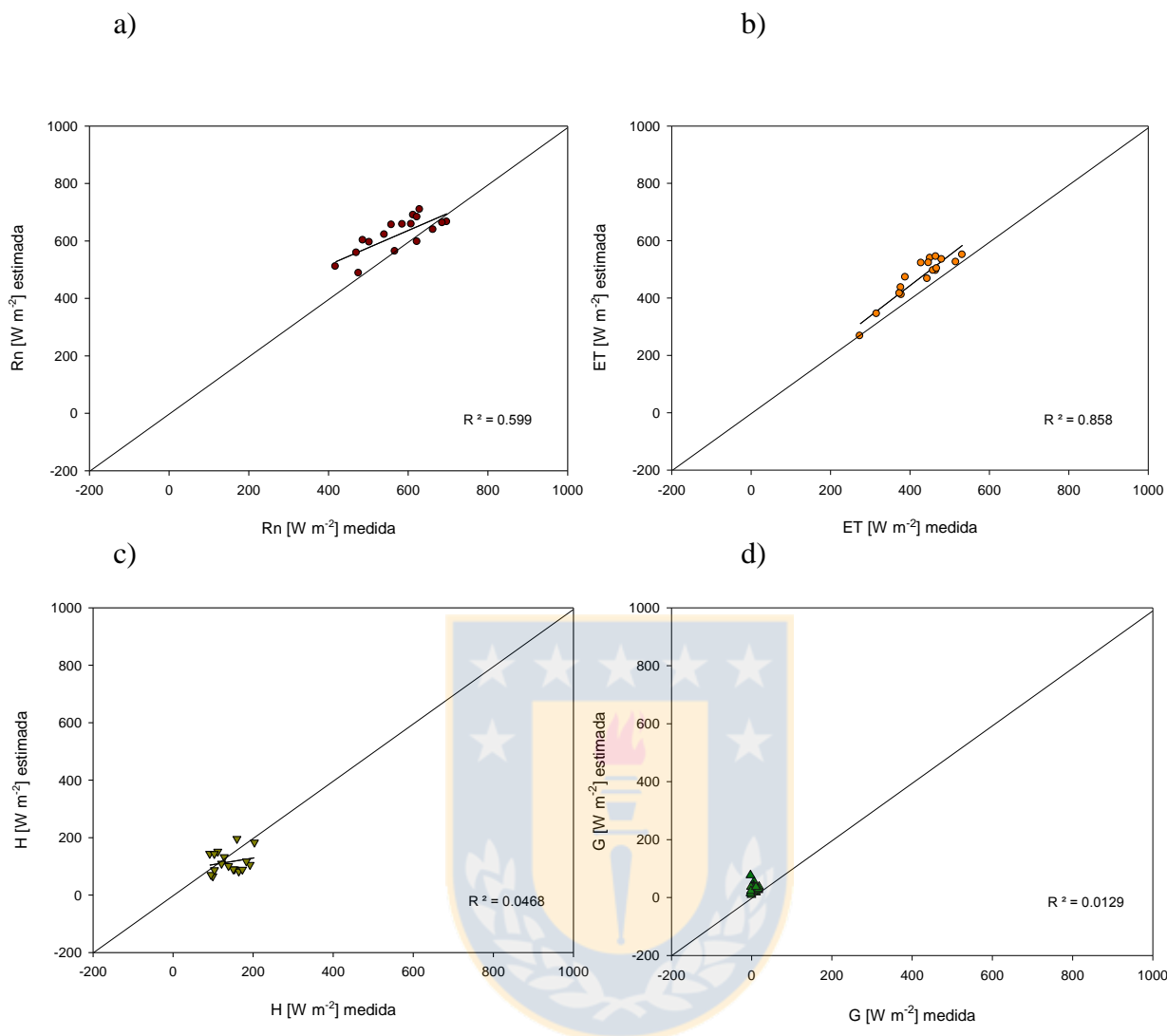


**Figura 5.** Mapas de flujos instantáneos de a)  $Rn$  b)  $ET$  c)  $H$  d)  $G$ , en unidades ( $W \cdot m^{-2}$ ) estimados con el modelo SEBAL-METRIC y modelo SEB-PV e imágenes satelitales Landsat 8 (path/row 233/85), DOY=12, comuna de San Nicolás.

**Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 6, se ilustran la correlación entre los valores medidos y estimados de flujos instantáneos de  $Rn$ ,  $ET$ ,  $H$  y  $G$  para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85), para el cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás. La evaluación mostró una eficiencia satisfactoria en la estimación de  $Rn$  mediante el modelo SEBAL-METRIC, ya que se obtuvo un coeficiente de  $NS$  de 0.24, un  $R^2$  de 0.60, un  $RMSE$  de  $68.33 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , un  $RD$  de 11.92 % y  $MAE$  de  $60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , una eficiencia satisfactoria en la estimación de  $ET$  mediante el modelo SEB-PV, ya que se obtuvo un coeficiente de  $NS$  de 0.34, un  $R^2$  de 0.86, un  $RMSE$  de  $53.23 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , un  $RD$  de 12.50 % y un  $MAE$  de  $46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . La evaluación mostró una eficiencia insuficiente en la estimación de  $H$  mediante el modelo SEB-PV, ya que se obtuvo un coeficiente de  $NS$  de -1.12, un  $R^2$  de 0.05, un  $RMSE$  de  $51,20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , un  $RD$  de 36,72 % y un  $MAE$  de  $44.70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , y una eficiencia insuficiente en la estimación de  $G$  mediante el modelo SEB-PV, ya que se obtuvo un coeficiente de  $NS$  de -20.62, un  $R^2$  de 0.01, un  $RMSE$  de  $31.63 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , un  $RD$  de 498 % y un  $MAE$  de 26.30. Fonseca (2015) estimó flujos instantáneos de  $Rn$ ,  $\lambda E$ ,  $H$  y  $G$  para el sitio en estudio con el uso de 9 imágenes de satélite Landast 7 ETM+, para dos temporadas de crecimiento de remolacha azucarera (2011-2012, 2012-2013) aplicando la metodología SEBAL-METRIC y comprobó que los componentes de  $\lambda E$  y  $Rn$  tiene mejores ajustes lineales, mientras que  $H$  y  $G$  no muestran alguna relación entre valores estimados y medidos, concluye que el efecto del error en la estimación  $G$  y  $H$  sobre  $\lambda E$  no es tan importante debido a la magnitud de  $G$  y  $H$ .  $\lambda E$  del sitio en estudio presentó un ajuste lineal con  $R^2=0.80$ , similar a los resultados obtenidos en esta investigación en la obtención de  $\lambda E$  con el modelo SEB-PV. Gaadi *et al.* (2016), obtuvo resultados análogos de correlación lineal para flujos instantáneos de  $Rn$  ( $R^2=0.54$ ) y  $LE$  ( $R^2=0.81$ ), con el uso del modelo SEBAL-METRIC e imágenes Landsat 8 y fue aplicado para un cultivo de 50 hectáreas de alfalfa en condiciones desérticas bajo sistema de riego por pivote.

De acuerdo al número datos que se ubican sobre o bajo la línea de pendiente 1:1, se puede concluir que un modelo sobrestima y subestima los resultados obtenidos en relación con los datos medidos. En la Figura 6 se observa que el modelo SEBAL-METRIC sobrestima los valores resultantes de  $Rn_{ins}$ , el modelo SEB-PV sobrestima los valores resultantes de  $ET$  y  $G$ , y SEB-PV subestima los valores resultantes de  $H$ .

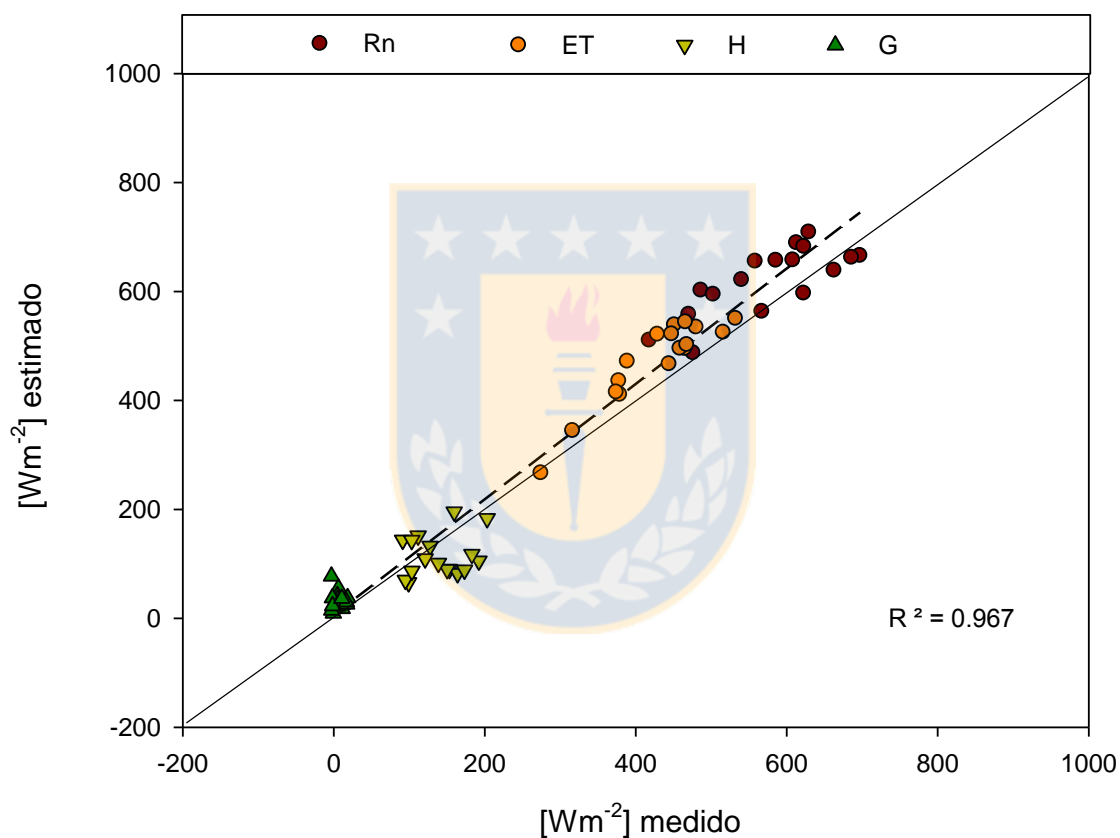


**Figura 6.** Correlación de valores estimados y medidos de flujos instantáneos de a)  $R_n$ , b)  $ET$ , c)  $H$ , y d)  $G$  y para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.

**Fuente:** Elaboración propia.



En la Figura 7, se ilustra la correlación de los componentes del balance de energía superficial medidos y estimados, para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás. La evaluación mostró una eficiencia satisfactoria en la estimación de los componentes del balance de energía superficial mediante el uso de los modelos SEBAL-METRIC y SEB-PV, ya que se obtuvo un coeficiente de *NS* de 0.95, un  $R^2$  de 0.97, un *RMSE* de  $52.73 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , un *RD* de 18.40 % y *MAE* de  $44.18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .



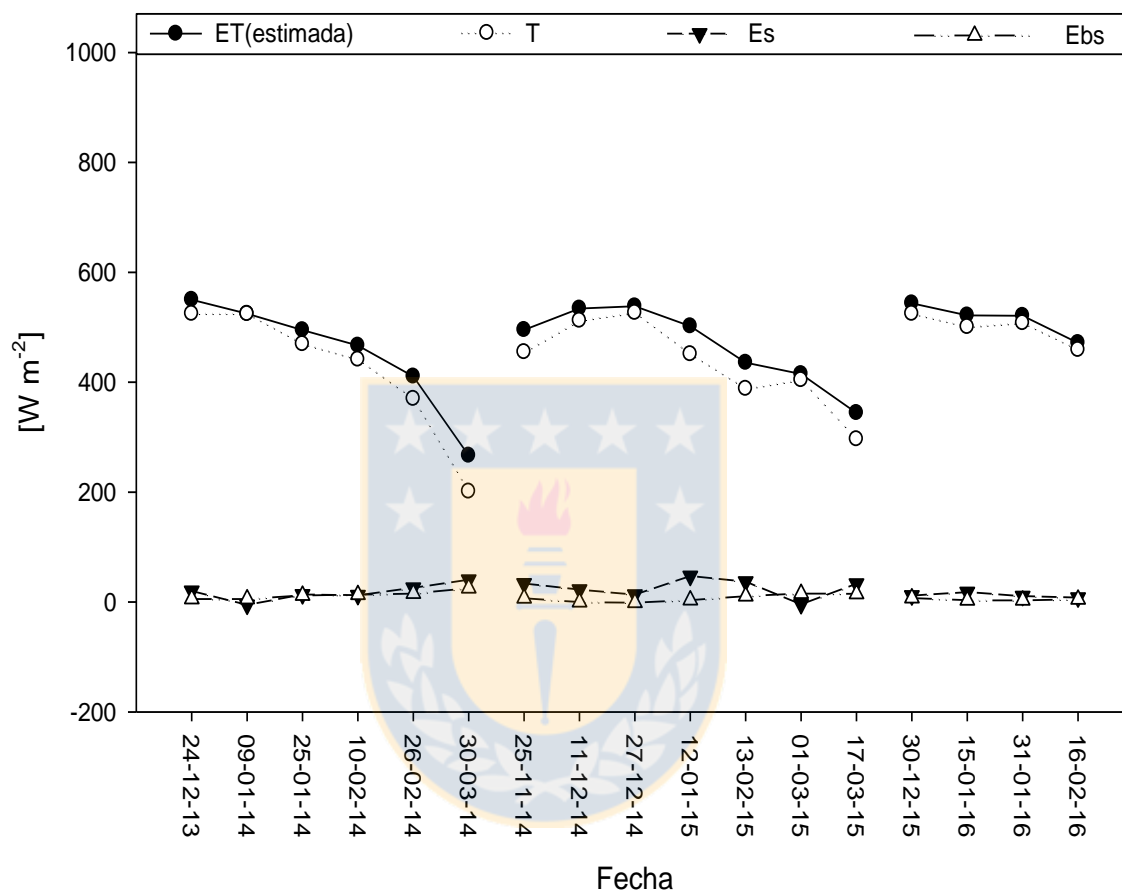
**Figura 7.** Correlación de los componentes del balance de energía superficial medidos y estimados, para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.

**Fuente:** Elaboración propia.

El modelo SEB-PV tiene la capacidad de separar el flujo de calor latente ( $\lambda E$ ) o evapotranspiración ( $ET$ ) en calor latente de la canopia ( $\lambda E_c$ ) o transpiración ( $T$ ) y la evaporación del suelo, que incluye evaporación del suelo desnudo ( $\lambda E_{b_s}$ ), evaporación del suelo bajo la canopia ( $\lambda E_s$ ), evaporación del suelo cubierto de residuos bajo la canopia ( $\lambda E_r$ ), y evaporación del suelo desnudo cubierto de residuos ( $\lambda E_{b_r}$ ); separa el calor sensible ( $H$ ) en calor sensible de la canopia ( $H_c$ ), calor sensible del suelo bajo la canopia ( $H_s$ ), calor sensible del suelo cubierto de residuos bajo la canopia ( $H_r$ ), calor sensible del suelo desnudo ( $H_{b_s}$ ) y en calor del suelo desnudo cubierto de residuos ( $H_{b_r}$ ); y separa el flujo de calor en el suelo ( $G$ ) en calor del suelo bajo la canopia ( $G_s$ ), calor del suelo cubierto de residuos bajo la canopia ( $G_r$ ), calor del suelo desnudo ( $G_{b_s}$ ) y calor del suelo desnudo cubierto de residuos ( $G_{b_r}$ ). En esta investigación no se determinaron los flujos de calor instantáneos relacionados con la presencia de residuos ya que el cultivo de remolacha azucarera no tiene residuos. En las Figuras [8,9 y 10] se muestra la separación de cada uno de los componentes del balance de energía superficial para las 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) para el cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.

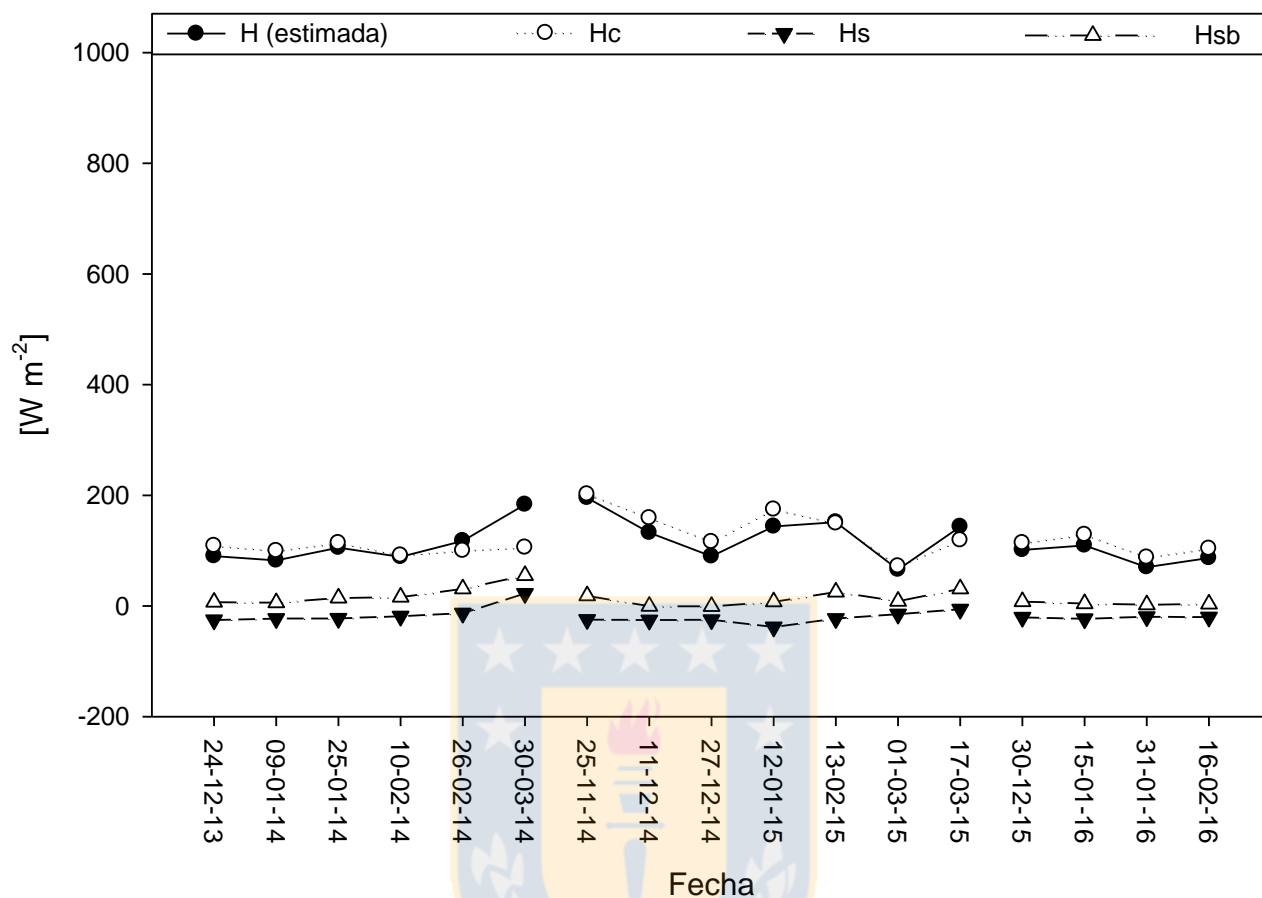
En las Figuras [8,9 y 10] se observa que la energía disponible ( $R_n$ ) se reparte en mayor proporción a los flujos de energía provenientes de la canopia como son la transpiración ( $\lambda E_c$ ) y flujo de calor sensible de la canopia ( $H_c$ ), y en menor proporción a los flujos de energía instantáneos provenientes del suelo bajo la canopia ( $H_s$  y  $G_s$ ) y suelo desnudo ( $H_{b_s}$  y  $G_{b_s}$ ), esto se puede justificar debido a que el cultivo de remolacha azucarera presenta el mayor desarrollo del área foliar en las fechas que fueron capturadas las imágenes por el satélite Landsat 8 (Figura 11), lo que origina que la radiación solar sea mayormente interceptada por la canopia, una mayor área foliar también implica un mayor número de estomas que interviene en el proceso de transpiración; las hojas también cubren en mayor proporción la superficie del suelo lo que minimiza la presencia de suelo desnudo y aumenta la cantidad de suelo bajo la canopia, de esta manera la radiación solar llega en muy poca cantidad al suelo desnudo disminuyendo de esta manera la evaporación desde el suelo y demás flujos de energía que tienen relación con el suelo desnudo y suelo bajo la canopia. Se observa también que los flujos de energía provenientes del suelo desnudo son menores a los flujos de energía provenientes del suelo bajo la canopia, debido a que la cantidad de suelo desnudo se minimiza con el incremento del área foliar. Se determinaron valores promedios instantáneos de  $ET [ 473 W \cdot m^{-2} ,$

$0.7 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  ],  $T$  [  $444.50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  ,  $0.65 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  ],  $E_s$  [  $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  ,  $0.030 \text{ mm h}^{-1}$  ],  $E_{sb}$  [  $8.40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  ,  $0.012 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  ] y el porcentaje de la  $T$  promedio instantánea de la canopia sobre el  $ET$  total fue de 94 %.



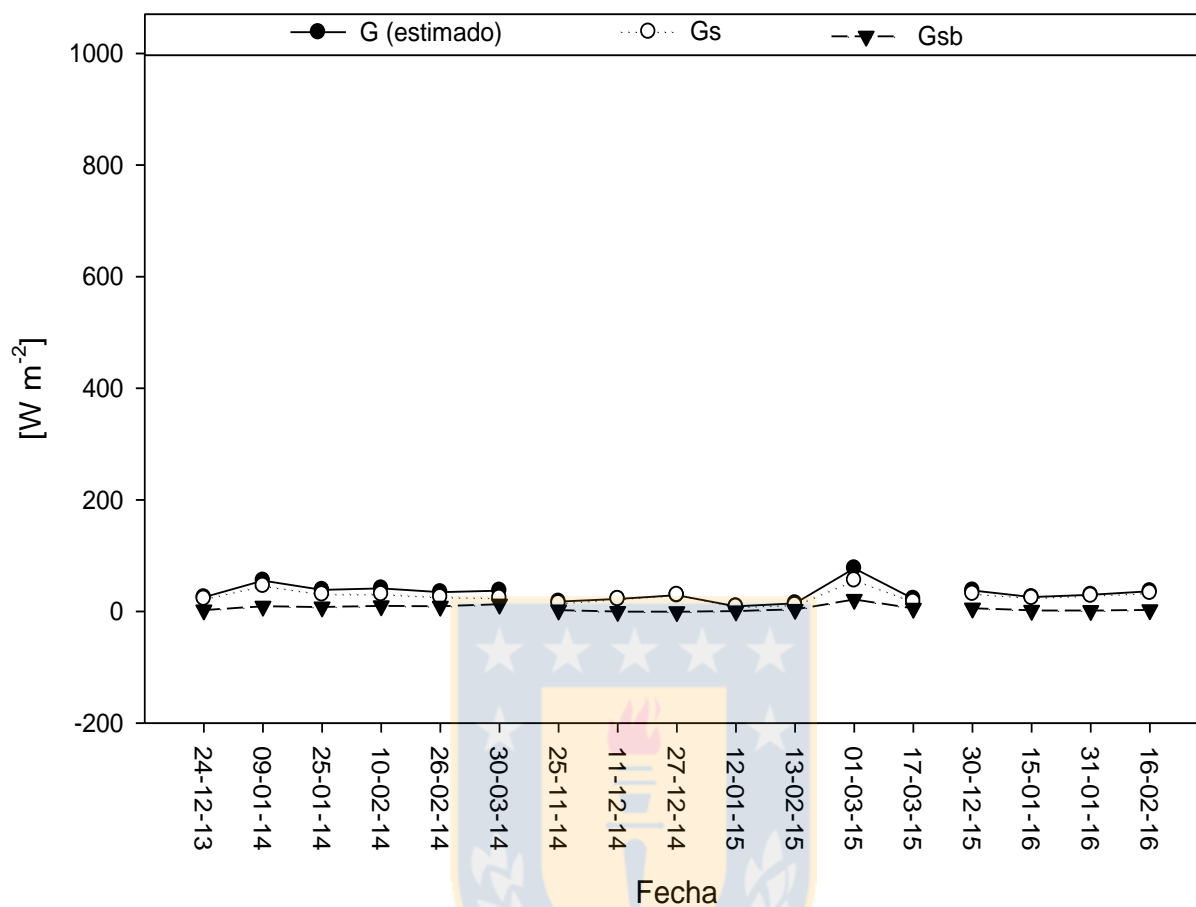
**Figura 8.** Separación del flujo de calor latente ( $\lambda E$ ) o evapotranspiración instantánea ( $ET$ ) en flujo de calor latente de la canopia ( $\lambda E_c$ ) o transpiración instantánea ( $T$ ), evaporación instantánea del suelo desnudo ( $\lambda E_{b_s}$ ) y evaporación instantánea del suelo bajo la canopia ( $\lambda E_s$ ), para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 9.** Separación del flujo instantáneo de calor sensible (H) en calor sensible de la canopia ( $H_c$ ), calor sensible del suelo bajo la canopia ( $H_s$ ), calor sensible del suelo desnudo ( $H_{sb}$ ), para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.

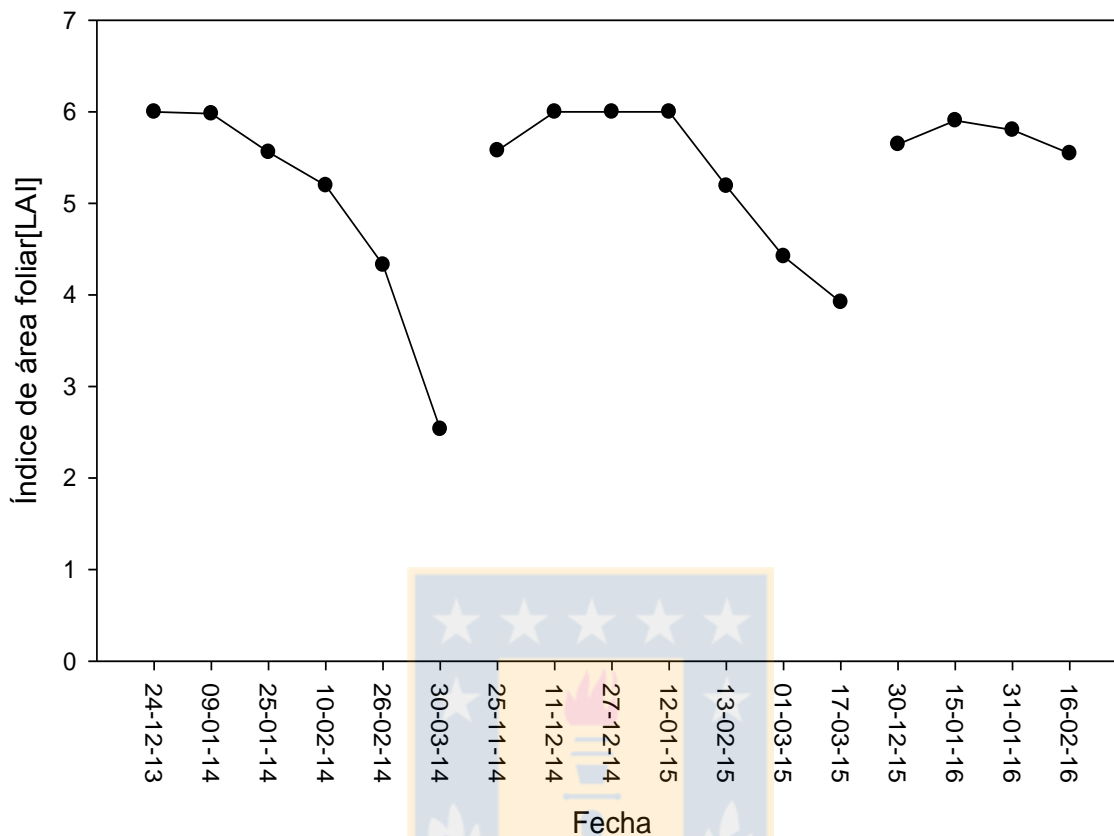
**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 10.** Separación del flujo instantáneo de calor en el suelo ( $G$ ) en calor del suelo bajo la canopia ( $G_s$ ), calor del suelo desnudo ( $G_{sb}$ ), para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.

**Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 11 se observa que para las imágenes Landsat 8 (path/row 233/ 85), capturadas en los meses de noviembre, diciembre y enero se tiene los mayores valores del Índice de Área Foliar ( $LAI$ ), con un máximo valor de  $6 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$  para el mes de diciembre y enero.  $LAI$  disminuye para el mes de febrero y marzo, obteniéndose el mínimo valor de  $LAI$  para el mes de marzo ( $2.53 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ). Durante el mes de noviembre, diciembre y enero el crecimiento vegetativo se acelera y el cultivo de remolacha azucarera alcanza su máximo desarrollo foliar y para el mes de marzo el tamaño de las hojas del cultivo de remolacha azucarera disminuye.

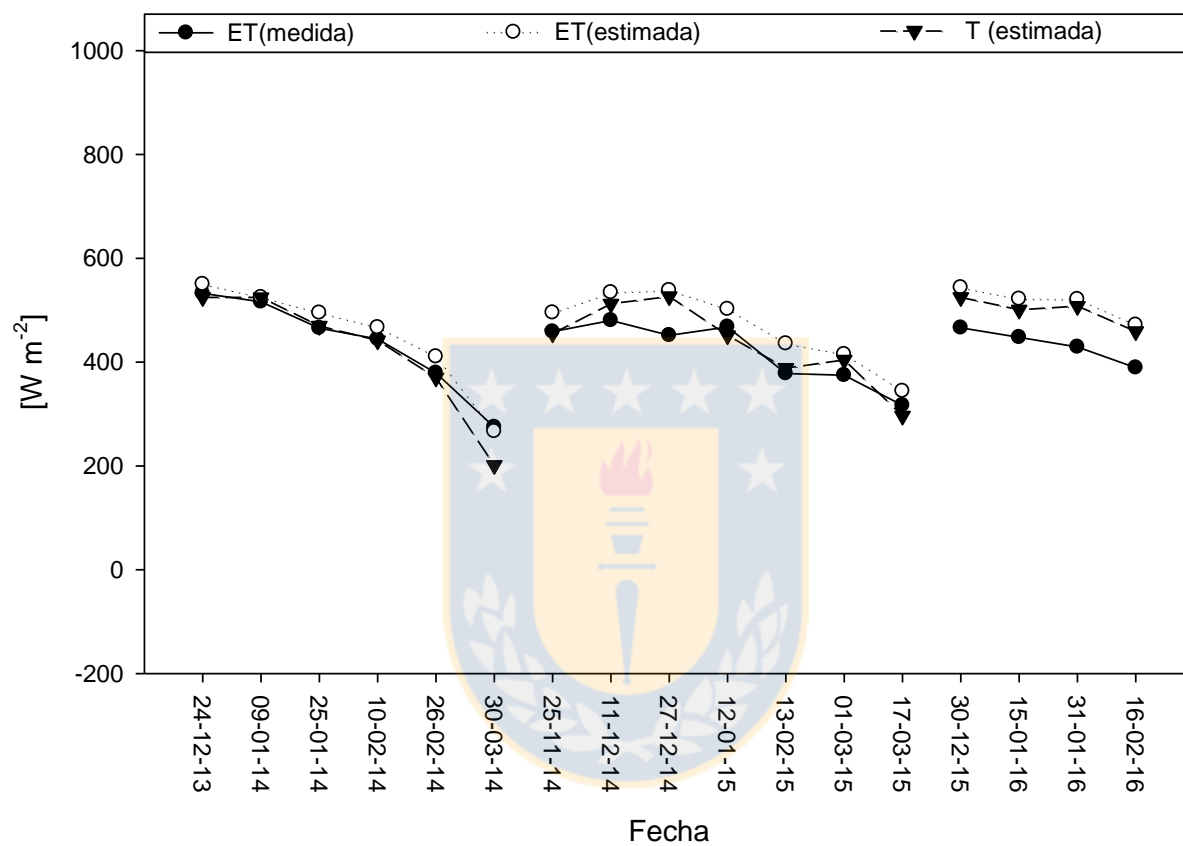


**Figura 11.** Índice de área foliar (*LAI*), para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.

**Fuente:** Elaboración propia.

El modelo SEB-PV sobrestima los valores resultantes de  $ET_{ins}$  sobre los valores medidos de  $ET_{ins}$  en la estación SEB. Se obtuvo un valor promedio de  $ET_{ins}$  estimado de  $473 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  y el valor promedio de  $ET_{ins}$  medido fue de  $428 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ; el valor promedio de  $T_{ins}$  fue de  $444.50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , teniéndose que  $T_{ins}$  calculada mediante el modelo SEB-PV supera al valor de  $ET_{ins}$  medida en la estación SEB.

En la Figura 12, se representan flujos instantáneos de  $ET$  y  $T$  estimada con el modelo SEB-PV y  $ET$  medida por la estación SEB, para las 17 imágenes satelitales Landsat 8 del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.



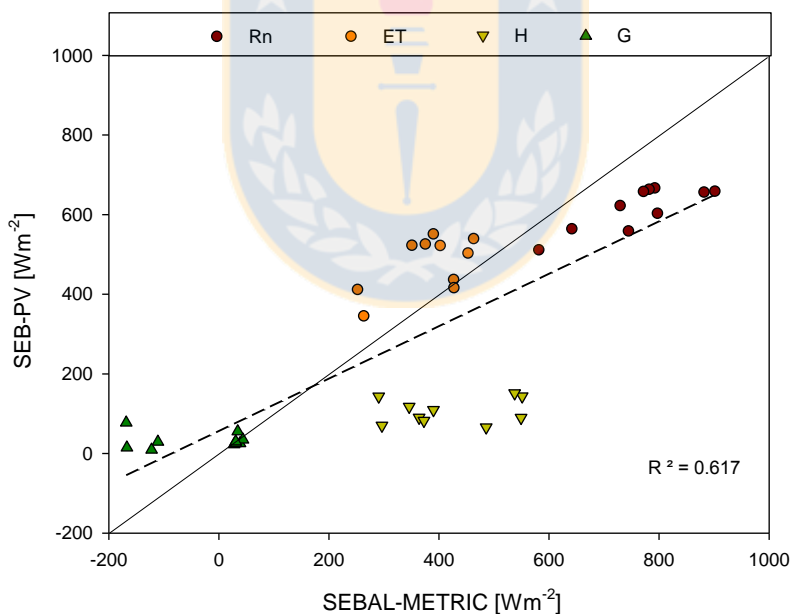
**Figura 12.** Flujos instantáneos de  $ET$  y  $T$  estimada con el modelo SEB-PV y,  $ET$  medida por la estación SEB, para 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.

**Fuente:** Elaboración propia.

Con el propósito de comparar estos resultados, se analizaron las 17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/85), usando la metodología SEBAL-METRIC implementada por Fonseca (2015) y se obtuvieron como resultado flujos instantáneos de  $R_n$ ,  $ET$ ,  $H$ ;  $G$  para 10 imágenes de satélite Landsat 8, y estos valores fueron promediados de una ventana de 6x6 píxeles (90 m x 90 m) centrada en la estación SEB (Figura 1).

Las 10 imágenes de satélite Landsat 8 que fueron evaluadas corresponden al DOY: 358, 9, 57, 361, 12, 44, 60, 76, 15, y 31.

En la Figura 13 se muestra la correlación de los componentes del balance de energía superficial estimados con el modelo SEBAL-METRIC y modelo SEB-PV para 10 imágenes de satélite Landsat 8 path/row (233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.

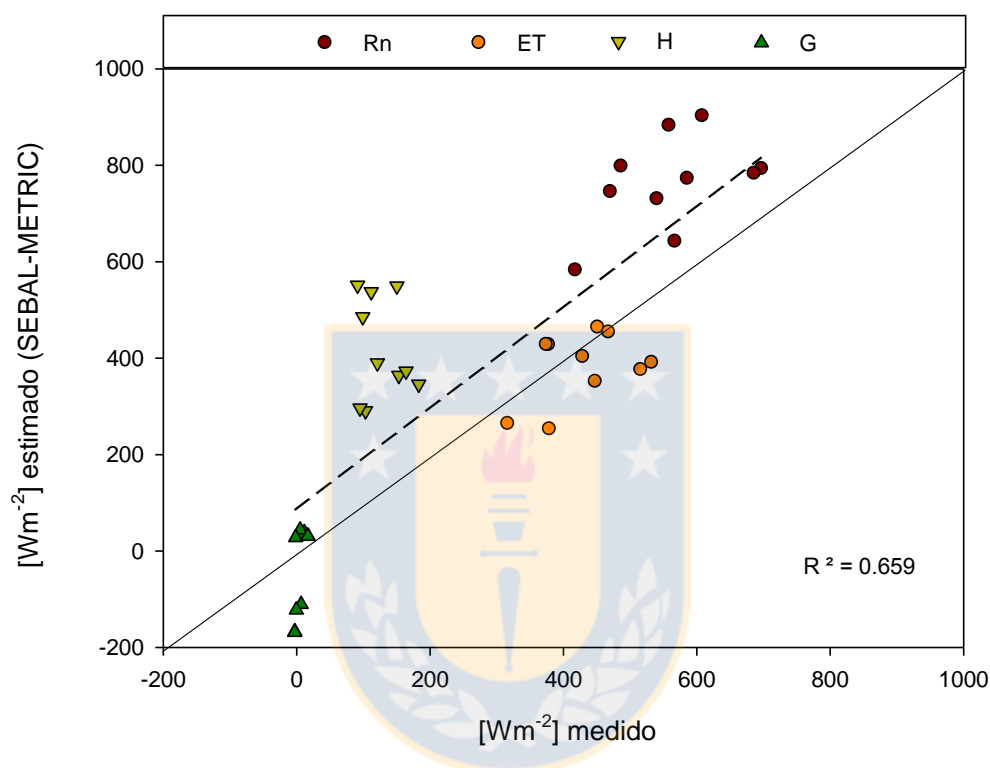


**Figura 13.** Correlación de los componentes del balance de energía superficial estimados con los modelos SEBAL-METRIC y SEB-PV, para 10 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.

**Fuente:** Elaboración propia.



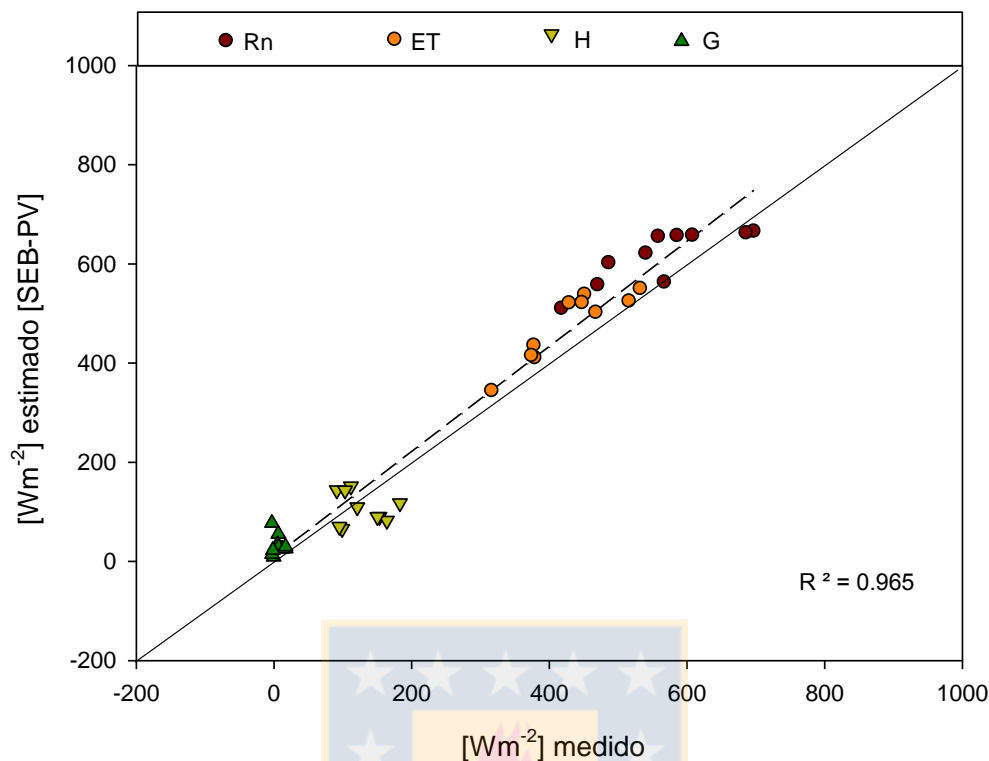
En la Figura 14, se ilustra la correlación de los componentes del balance de energía superficial medidos en la estación SEB y estimados con el modelo SEBAL-METRIC, para 10 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/85), para el cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás. Se evaluaron los valores medidos y estimados, se obtuvo un  $R^2$  de 0.66, un coeficiente de  $NS$  de 0.24, un  $RMSE$  de  $200.68 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , un  $RD$  de 71,43 % y  $MAE$  de  $158,88 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .



**Figura 14** Correlación de los componentes del balance de energía superficial medidos en la estación SEB y estimados con el modelo SEBAL-METRIC, para 10 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.

**Fuente:** Elaboración propia.

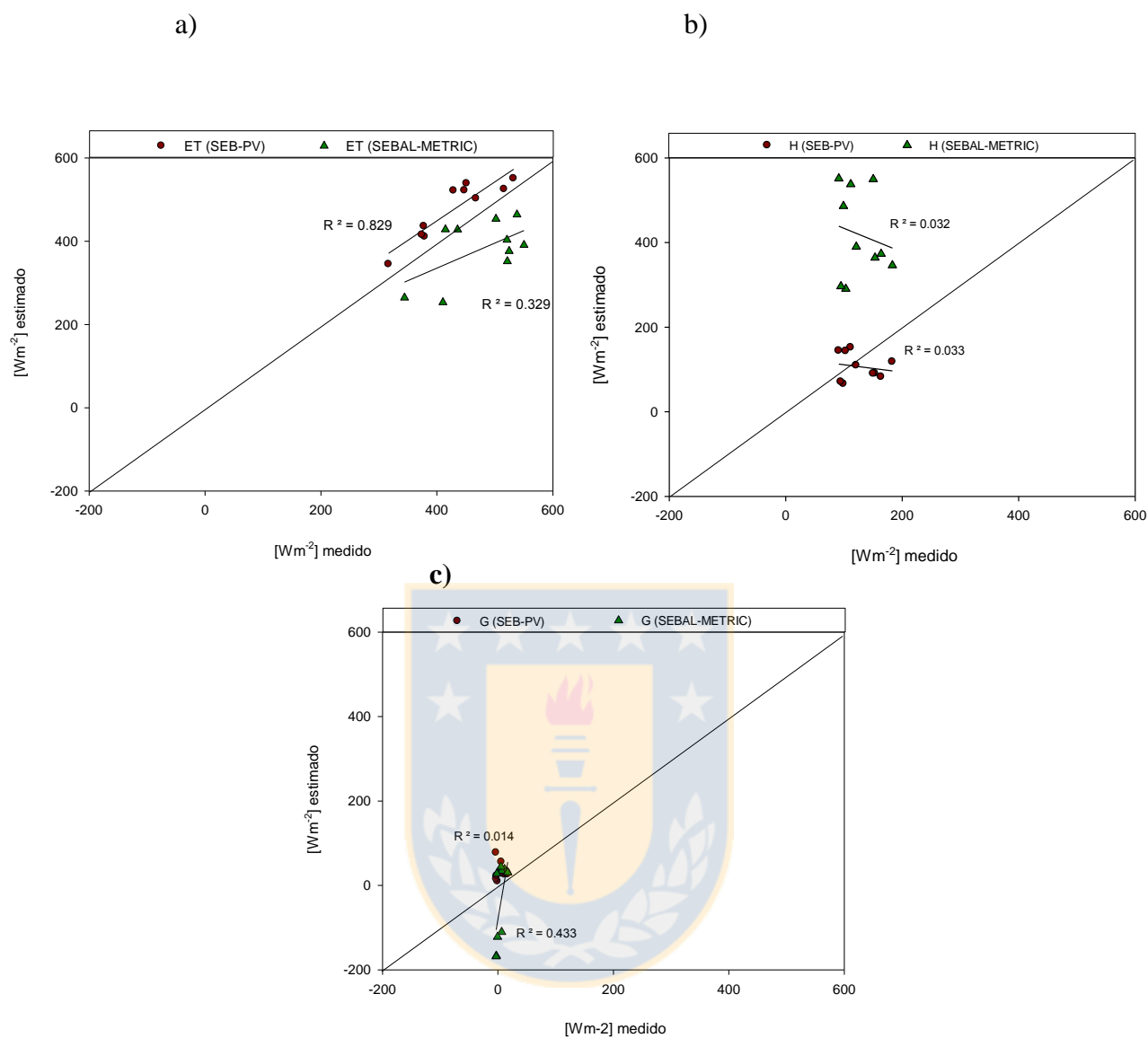
En la Figura 15, se muestra la correlación de los componentes del balance de energía superficial medidos en la estación SEB y estimados con el modelo SEB-PV, para 10 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás. Se evaluaron valores medidos y estimados, se obtuvo un  $R^2$  de 0.97, un coeficiente de  $NS$  de 0.94, un  $RMSE$  de  $55.21 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , un  $RD$  de 19,65 % y una  $MAE$  de  $46,59 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .



**Figura 15.** Correlación de los componentes del balance de energía superficial medidos en la estación SEB y estimados con el modelo SEB-PV, para 10 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/ 85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.

**Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 16 se indican las correlaciones lineales para flujos instantáneos de,  $ET$ ,  $H$  y  $G$ , para las 10 imágenes satelitales Landsat 8 (path/row 233/85) del cultivo de remolacha en la comuna de San Nicolás, se observa que el modelo SEB-PV presenta un mejor ajuste lineal en la estimación de  $ET_{ins}$  con relación al modelo SEBAL-METRIC. El modelo SEBAL-MERTRIC tuvo un mejor ajuste lineal en la estimación de  $G_{ins}$  con relación con el modelo SEB-PV, y ambos modelos no presentan una buena correlación lineal en la estimación de  $H_{ins}$ .



**Figura 16.** Correlación de valores estimados y medidos de flujos instantáneos de a) *ET*, b) *H*, y c) *G*, y para 10 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/85) del cultivo de remolacha azucarera en la comuna de San Nicolás.

**Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo a las Figuras [14, 15 y 16] y los resultados de las evaluaciones realizadas a los modelos SEBAL-METRIC y SEB-PV con el uso de 10 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/85), se concluye que el modelo SEB-PV tiene una mayor precisión en la estimación de  $ET_{ins}$  de remolacha azucarera con respecto al modelo SEBAL-METRIC.

**Fuente:** Elaboración propia.

## 6. CONCLUSIONES

El modelo SEBAL-METRIC sobrestima los valores resultantes de  $Rn_{ins}$ , el modelo SEB-PV sobrestima los valores resultantes de  $ET$  y  $G$ , y SEB-PV subestima los valores resultantes de  $H$ .

La evaluación mostró una eficiencia satisfactoria en la estimación de  $Rn$  con un coeficiente de  $NS$  de 0.24, un  $R^2$  de 0.60, una  $RMSE$  de  $68.33 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , un  $RD$  de 11.92 % y un  $MAE$  de  $60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  y, una eficiencia satisfactoria en la estimación  $\lambda E$ , con un coeficiente de  $NS$  de 0.34, un  $R^2$  de 0.86, una  $RMSE$  de  $53.23 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , un  $RD$  de 12.50 % y un  $MAE$  de  $46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , la evaluación mostró una eficiencia insuficiente en la estimación de  $H$ , ya que se obtuvo un coeficiente de  $NS$  de -1.12, un  $R^2$  de 0.05, un  $RMSE$  de  $51.20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , un  $RD$  de 36.72 % y un  $MAE$  de  $44.70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  y, una eficiencia insuficiente en la estimación de  $G$ , ya que se obtuvo un  $NS$  de -20.62, un  $R^2$  de 0.01, un  $RMSE$  de  $31.63 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , un  $RD$  de 498 %, y un  $MAE$  de  $26.30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Con la evaluación se comprobó que los componentes de  $Rn$  y  $\lambda E$  tienen mejores ajustes lineales en comparación con  $H$  y  $G$  que no muestran alguna relación entre valores estimados y medidos. El efecto del error en la estimación  $G$  y  $H$  sobre  $\lambda E$  no es tan importante debido a la magnitud de  $G$  y  $H$  en el balance superficial de energía.

La evaluación mostró una eficiencia satisfactoria en la estimación de los componentes del balance de energía superficial ya que se obtuvo un coeficiente de  $NS$  de 0.95, un  $R^2$  de 0.97, una  $RMSE$  de  $52.73 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , un  $RD$  de 18.40 %, y un  $MAE$  de  $44.18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

El modelo SEB-PV tiene la capacidad de separar el flujo de calor latente ( $\lambda E$ ) o evapotranspiración ( $ET$ ) en calor latente de la canopia ( $\lambda E_c$ ) o transpiración ( $T$ ) y la evaporación del suelo, que incluye evaporación del suelo desnudo ( $\lambda E_{bs}$ ), evaporación del suelo bajo la canopia ( $\lambda E_s$ ), evaporación del suelo cubierto de residuos bajo la canopia ( $\lambda E_r$ ), y evaporación del suelo desnudo cubierto de residuos ( $\lambda E_{br}$ ). Se determinaron valores promedios instantáneos de  $ET$  [  $472.64 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  ,  $0.7 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  ],  $T$  [  $444.46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  ,  $0.65 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  ],  $E_s$  [  $19.80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  ,  $0.030 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  ],  $E_{sb}$  [  $8.39 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  ,  $0.012 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  ]; se obtuvo un porcentaje de  $T$  promedio instantánea sobre  $ET$  de 94%, esto se justifica debido a que las 17 imágenes satelitales Landsat 8 fueron capturadas en el periodo vegetativo de mayor demanda de agua del cultivo de remolacha azucarera.  $T_{ins}$  calculada mediante el modelo SEB-PV supera al valor de  $ET_{ins}$  medida en la estación SEB.

Al comparar los resultados de las evaluaciones realizadas a los modelos SEBAL-METRIC y SEB-PV con el uso de 10 imágenes de satélite Landsat 8, se concluye que el modelo SEB-PV tiene una mayor precisión en la estimación de  $ET_{ins}$  de remolacha azucarera con respecto al modelo SEBAL-METRIC.

El modelo SEB-PV con el uso 17 de imágenes satelitales Landsat 8 y con la incorporación del modelo SEBAL modificado en METRIC en la estimación de  $R_n$ , permitió estimar flujos instantáneos de calor latente ( $\lambda E$ ), calor sensible ( $H$ ) y calor en el suelo ( $G$ ) de manera espacialmente distribuida para el cultivo de remolacha azucarera, el modelo SEB-PV permite dividir  $ET_{ins}$  total en transpiración de la canopia ( $T_{ins}$ ), evaporación del suelo bajo la canopia ( $\lambda E_s$ ) y la evaporación del suelo directamente expuesta a la radiación neta ( $\lambda E_{bs}$ ). Se concluye que el modelo SEB-PV con el uso de imágenes satelitales Landsat 8 puede ser usado confiablemente en la estimación de la evapotranspiración instantánea ( $ET_{ins}$ ) de remolacha azucarera, lo que provee de una herramienta muy útil para un uso y manejo eficiente del agua.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Gaadi, K. A., V.C. Patil, E. Tola., R. Madugundu, and P.H. Gowda. 2016. Evaluation of METRIC-derived ET fluxes over irrigated alfalfa crop in desert conditions using scintillometer measurements. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(6), 1-12.
- Allen, R., M. Tasumi, and R. Trezza. 2007a. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133 (4): 380-394.
- Allen R., M. Tasumi., A. Morse, R. Trezza, J.Wright, W.Bastiaanssen, W.Kramber, I. Lorite, and C. Robison. 2007b. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4):395–406.ISSN 0733-9437. doi: 10.1061/ (ASCE)0733-9437(2007)133:4(395).
- Allen, R., M. Tasumi, R. Trezza, and J. Kjaersgaard. 2010. METRIC<sup>tm</sup>: Mapping Evapotranspiration at High Resolution Applications Manual for Landsat Satellite Imagery. Universidad of Idaho, Kimberly, Idaho. Versión 2.0.5.
- Ariza, A. 2013. Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission).Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, versión (1), 28-42, disponible en: <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>.
- Bastiaanssen W., M. Menenti, R. Feddes, and A. Holtslag. 1998a. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213:198–212. ISSN 00221694. doi: 10.1016/S0022-1694(98)00253-4.
- Bastiaanssen, W.G.M., H. Pelgrum , J. Wang, Y. Ma, J.F. Moreno, G.J. Roerink, and T. Van der Wal. 1998b. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 2: Validation. *Journal of hydrology*, 212, 213-229.
- Chavez, P. S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, 24(3), 459-479.

- Chavez Jr, P. S. 1989. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(9), 1285-1294.
- Choudhury, B., y J. Monteith. 1988. A four layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Quarterly J Royal Meteorol Soc* 114:373-398.
- Carrasco-Benavides, M., S. Ortega-Farías, L.O. Lagos, J. Kleissl, L. Morales-Salinas, and A. Kilic. 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.
- Flores, F. 2011. Determinación de evapotranspiración a escala regional mediante imágenes satelitales MODIS (Tesis doctoral). Universidad de Concepción, Chillan, Chile.
- Fonseca, D. 2015. Estimation of spatially distributed evapotranspiration through of GEOBIA approach (Tesis doctoral). Universidad de Concepción, Chillan, Chile.
- González-Piqueras, J., J. Villodre, I. Campos, A. Calera, y C. Balbontín, .2015. Seguimiento de los flujos de calor sensible y calor latente en vid mediante la aplicación del balance de energía METRIC. *Revista-Asociación Española de Teledetección*. 43:43-54. <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.2310>.
- Goslee, S.C. 2011. Analyzing remote sensing data in R: the landsat package. *Journal of Statistical Software*, 43(4), 1-25.
- Gutman, G., and A. Ignatov. 1998. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of remote sensing*, 19(8), 1533-1543.
- Hadjimitsis, D.G., G. Papadavid, A. Agapiou, K. Themistocleous, M.G. Hadjimitsis, A. Retalis, and C.R.I Clayton. 2010. Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(1), 89-95.
- Hsieh, C.I., G. Katul, and T. W. Chi. 2000. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. *Advances in water Resources*, 23 (7), 765-772.

- Jiménez-Muñoz, J.C., J.A. Sobrino, D. Skoković, C. Mattar, and J. Cristóbal. 2014. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), 1840-1843.
- Johnson, L.F., and T.J. Trout. 2012. Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. *Remote Sensing*, 4(2), 439-455.
- Ke Y, J. Im, S. Park, and H. Gong. 2016. Downscaling of MODIS One Kilometer Evapotranspiration Using Landsat-8 Data and Machine Learning Approaches. *Remote Sensing*; 8(3):215.
- Kilic, A., R. Allen, R. Trezza, I. Ratcliffe, B. Kamble, C. Robison, and D. Ozturk. 2016. Sensitivity of evapotranspiration retrievals from the METRIC processing algorithm to improved radiometric resolution of Landsat 8 thermal data and to calibration bias in Landsat 7 and 8 surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 185, 198-209.
- Kjelgaard, J. F., C.O. Stockle, R. A. Black, and G.S. Campbell. 1997. Measuring sap flow with the heat balance approach using constant and variable heat inputs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85(3-4), 239-250.
- Lagos, L.O., D.L. Martin, S. B. Verma, A. Suyker, and S. Irmak. 2009. Surface energy balance model of transpiration from variable canopy cover and evaporation from residue-covered or bare-soil systems. *Irrigation science*, 28(1), 51-64.
- Lagos, L.O., G. Merino, D. Martin, S. Verma, and A. Suyker. 2012. *Evapotranspiration of Partially Vegetated Surfaces, Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling*, Dr. Ayse Irmak (Ed.), ISBN: 978-953-307-808-3, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/evapotranspiration-remote-sensing-and-modeling/evapotranspiration-of-partially-vegetated-surfaces>.
- Lagos, L.O., D.L. Martin, S.B. Verma, S. Irmak, A. Irmak, D. Eisenhauer, and A. Suyker. 2013. Surface energy balance model of transpiration from variable canopy cover and evaporation from residue-covered or bare soil systems: model evaluation. *Irrigation Science*, 31(2), 135-150.
- Latif, M.S. 2014. Land Surface Temperature Retrieval of Landsat-8 Data Using Split Window Algorithm-A Case Study of Ranchi District. *Int J Eng Dev Res (IJEDR)*, 2, 3840-3849.



Liaqat, U.W., and M. Choi. 2015. Surface energy fluxes in the Northeast Asia ecosystem: SEBS and METRIC models using Landsat satellite images. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214, 60-79.

Mathevet, T., C. Michel, V. Andreassian, and C. Perrin. 2006. A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins. *IAHS PUBLICATION*, 307, 211.

Shoko, C., D.J. Clark, M.G. Mengistu, H. Bulcock., and T. Dube. 2016. Estimating spatial variations of total evaporation using multispectral sensors within the uMngeni catchment, South Africa. *Geocarto International*, 31(3), 256-277.

Shuttleworth, W., y J. Wallace. 1985. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quarterly J Royal Meteorol Soc* 111:839-855.

