

**ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE USO DE SUELOS EN LA CUENCA
ACULEO Y SU IMPACTO EN EL SECADO DE LA LAGUNA**

Mirko Thomas Cuevas Tapia

Proyecto de Título presentado al
Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática
Universidad de Concepción, Campus Los Ángeles

En cumplimiento del requisito parcial

Para obtener el título de

Ingeniero Geomático

Escrito bajo la orientación del profesor

Dr. Guido Staub

Aprobado por la comisión

Ing. José Cornejo Morales

Ing. Rubén Cabalin Carrasco

Los Ángeles

Julio, 2021

RESUMEN

La laguna Aculeo, ubicada en el centro sur de Chile desde la última década que ha presentado disminuciones en el nivel de agua, llegando al año 2018 a un secado total de su espejo superficial (Rivas, 2020). Si bien, existen registros de las condiciones climáticas que pudieron afectar a la laguna, también se tiene en cuenta la principal actividad en el sector Aculeo que es la agricultura (CED, 2008). Se hace necesario realizar un estudio del uso de suelos, principalmente de la actividad agrícola, es por esto que en este estudio se aplica un modelo matemático que ayuda a identificar y cuantificar sectores con cultivos.

Se aplica el modelo SEBAL, el cual se basa en mediciones espectrales de satélites y algunos datos meteorológicos locales, que entrega como resultado una estimación de evapotranspiración de cultivos presentes en alguna superficie en particular. Teniendo en cuenta los cultivos presentes en la zona y la demanda de agua que estos requieren, se correlacionan los resultados obtenidos por el modelo SEBAL con la laguna. En el modelo se utilizan imágenes satelitales Landsat 7, un modelo digital de elevaciones y algunos datos climáticos recolectados desde estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio.

El proyecto presentado responde a la conciencia de lo que significa la sobreexplotación de recursos naturales, como lo es la mala administración hídrica que puede generar impactos medioambientales, como la desaparición de una laguna.

Palabras claves: SEBAL, modelo, evapotranspiración, Landsat, pixel, cultivos, laguna, temperatura, velocidad del viento.

DEDICATORIA

Todo el esfuerzo dedicado desde el primer momento en la universidad hasta el día de mi proyecto de título está dedicado a mis padres Juan Cuevas Cuevas y Elestina Tapia Cuevas, que siempre confiaron en mí y me dieron los mejores consejos y ejemplos para la vida, que todo es posible conseguirlo con el mayor esfuerzo y entusiasmo. También agradecer a mi único hermano Raúl Cuevas Tapia por cuidar de mí y protegerme durante toda mi niñez y ser el mejor hermano del mundo. Dedicarles de todo corazón al cielo este logro a mis abuelitos, el papito Raúl y la mamita Lucía que sé que estarían orgullosos de mí.

Gracias de corazón a uds por sus enseñanzas y buenos consejos, los amo.



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mis mejores amigos, José Luis Higuera, Cristhian González, Yerko Rodríguez, Cristian Monge, Alvaro Ortiz, Francisco Huerta, Manuel Arias, Diego Mercado, Nelson Soto, quienes han estado conmigo en los mejores y momentos más difíciles de mi vida, acompañándome, riendo, jugando y disfrutando conmigo, dándome fuerzas y apoyando a mi familia.

Agradezco de corazón a toda mi familia, primos, tíos, amigos que jamás dejaron de confiar en mí, ustedes siempre tendrán un lugar en mi corazón, no me olvido de los consejos y apoyo que siempre me han dado. Camila Espinoza una persona muy importante en mi vida, que ha compartido lindos momentos junto a mí.

Gracias a Dios por proteger siempre a mi familia, sacarla adelante en los momentos difíciles, por mantener con trabajo estable a mis padres, por entregarnos salud y vida.

Agradecer a mi profesor guía, el Dr. Guido Staub por tener la mejor disposición durante este largo trayecto de mi proyecto de título, también a cada uno de mis profesores y colaboradores que de alguna manera me han enseñado y contribuido a ser una mejor persona hoy en día.

Cada uno de ustedes ha sido un pilar fundamental en mi vida.

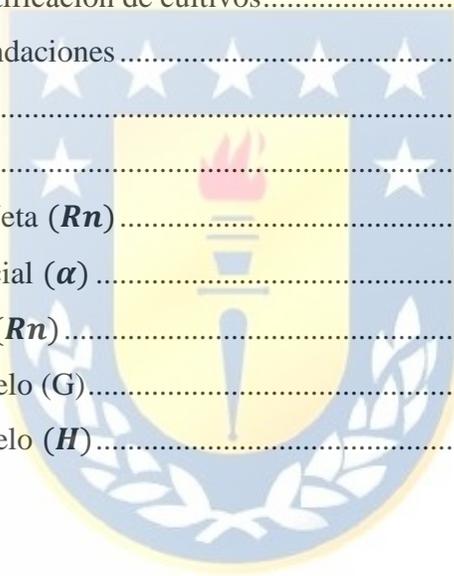
¡GRACIAS DE TODO CORAZÓN A USTEDES, MI FAMILIA!

Índice de Contenidos

1. Introducción	2
1.1. Objetivos	4
1.1.1. Objetivo General	4
1.1.2. Objetivos Específicos.....	4
2. Marco Teórico.....	5
2.1. Evapotranspiración.....	5
2.2. Factores que afectan la evapotranspiración.....	6
2.2.1. Variables climáticas	6
2.2.2. Factores de cultivo	6
2.2.3. Manejo y condiciones ambientales	7
2.3. Conceptos de Evapotranspiración	7
2.4. Modelo SEBAL.....	9
2.4.1. Flujo de radiación neta (R_n)	10
2.4.2. Flujo de calor latente (λET)	10
2.4.3. Flujo de calor sensible (H)	11
2.4.4. Flujo de calor hacia el suelo (G).....	11
2.5. Percepción remota	11
2.5.1. Espectro electromagnético	12
2.5.2. Firmas Espectrales	13
2.5.3. Resolución espectral	13
2.5.4. Resolución espacial.....	14
2.5.5. Resolución radiométrica	14
2.5.6. Resolución temporal	15
2.6. Misión LANDSAT	15
2.6.1. Características LANDSAT 7	15
3. Desarrollo del proyecto.....	19
3.1. Zona de estudio	19
3.2. Datos.....	19

3.2.1.	Datos meteorológicos.....	19
3.2.2.	Imágenes satelitales	20
3.2.3.	Superficie en estudio.....	20
4.	Metodología	22
4.1.	Procedimiento de estimación de la evapotranspiración mediante el modelo SEBAL.....	22
4.1.1.	Flujo de radiación neta superficial (R_n)	22
4.1.1.1.	Albedo superficial (α).....	24
4.1.1.2.	Etapas 6: Emisividad de superficie (ϵ_{NB} y ϵ_0).....	27
4.1.1.3.	Etapas 8: Radiación de onda larga saliente ($RL \uparrow$)	28
4.1.1.4.	Etapas 9: Radiación de onda corta entrante ($RS \downarrow$).....	28
4.1.1.5.	Etapas 10: Radiación de onda larga entrante ($RL \downarrow$).....	29
4.1.2.	Etapas 11: Calculo de la Radiación Neta (R_n).....	29
4.1.3.	Flujo de calor del suelo (G).....	30
4.1.4.	Flujo de calor sensible (H).....	30
4.1.4.1.	Velocidad del viento a una altura (u_{10})	33
4.1.4.2.	Velocidad de fricción para cada pixel (u^*)	33
4.1.4.3.	Resistencia aerodinámica para el transporte de calor (rah)	33
4.1.4.4.	Diferencias de temperatura (dT)	34
4.1.4.5.	Pixeles extremos.....	34
4.1.4.6.	Temperatura y densidad del aire	36
4.1.4.7.	Flujo de calor sensible H	36
4.1.4.8.	Efectos de flotabilidad generados por calentamiento de la superficie	37
4.1.4.9.	Valor corregido para la velocidad de fricción (u^*)	38
4.1.4.10.	Valor corregido para la resistencia aerodinámica (rah).....	38
4.1.4.11.	Proceso de iteración	38
4.1.5.	Flujo de Calor Latente (λET).....	39
4.1.6.	Evapotranspiración horaria (ETH)	39
4.1.7.	Evapotranspiración de referencia horaria (ET_{rF})	40
4.1.8.	Evapotranspiración de referencia en 24 horas (ET_{24})	40

4.2.	Evapotranspiración de referencia (ET₀)	41
4.3.	Evapotranspiración de cultivos de referencia (ET_C).....	41
4.4.	Validación de resultados	42
4.5.	Digitalización de área de estudio	43
4.6.	Identificación de cultivos	43
5.	Resultados y discusiones.....	45
5.1.	Huertos de cerezos	45
5.2.	Análisis espaciotemporal de cultivos	51
5.3.	Cultivos encontrados	56
5.4.	Clasificación y cuantificación de cultivos.....	62
6.	Conclusiones y Recomendaciones	66
7.	Referencias.....	70
8.	Anexos	73
8.1.	Calculo Radiacion Neta (R_n)	81
8.1.1.	Albedo Superficial (α)	81
8.1.2.	Radiacion neta (R_n).....	82
8.2.	Flujo de calor del suelo (G).....	83
8.3.	Flujo de calor del suelo (H).....	84



Lista de Tablas

Tabla 1 Bandas Landsat 7 ETM+	16
Tabla 2 L_{MAX} y L_{MIN} valores para LANDSAT 7 ETM+.....	24
Tabla 3 Coeficientes de ponderación, $\omega\lambda$	26
Tabla 4. Constantes $K1$ y $K2$ para LANDSAT 5, 7 y 8.	28
Tabla 5. Estimación de G/Rn para distintas superficies.....	30
Tabla 6. Algoritmo de elección de píxeles extremos.....	35
Tabla 7. Variables meteorológicas para estimar ET_0	41
Tabla 8. Evapotranspiración de cultivos referenciales.	44
Tabla 9. Diferencia de Evapotranspiración cerezos.....	45
Tabla 10 Cuantificación de cultivos encontrados.	62
Tabla 11. Estabilidad de Dt y Rah en la fecha 16/12/2013.....	75
Tabla 12. Estabilidad de Dt y Rah en la fecha 19/12/2014.....	75
Tabla 13. Estabilidad de Dt y Rah para la fecha 22/12/2015.....	76
Tabla 14. Estabilidad de Dt y Rah para la fecha 24/12/2016.....	76
Tabla 15. Estabilidad de Dt y Rah en la fecha 30/12/2018.....	77
Tabla 16. Estabilidad de Dt y Rah para la fecha 01/12/2019.....	77
Tabla 17. Coordenadas de huertos encontrados.....	80
Tabla 18. Componentes energéticas en los píxeles anclas.....	84

Lista de Figuras

Figura 1. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET.....	6
Figura 2. ET del cultivo de referencia (ET_0), bajo condiciones estándar (ET_C) y bajo condiciones no estándar ($ET_c a_j$)	8
Figura 3: Balance de energía Superficial. Fuente: Allen et al, 2002.	9
Figura 4. Balance de la radiación superficial. Fuente: Allen et al, 2002.	10
Figura 5. Energía electromagnética emitida por diferentes longitudes de onda. Fuente: Huamán, 2015	12
Figura 6. Satélite Landsat 7 ETM + en órbita.....	17
Figura 7. Falla del SLC, Landsat 7 ETM +	17
Figura 8. Ejemplo escena sin SLC, Landsat 7 ETM +.....	18
Figura 9. Capa shapefile para delimitar la zona de estudio al sector Aculeo.	21
Figura 10: Diagrama de flujo para cálculo de radiación neta.	23
Figura 11. Diagrama de flujo del proceso iterativo para el cálculo de H.	32
Figura 12. Gráfico de Regresión para estimar dT.....	36
Figura 13. Huertos de cerezos.....	42
Figura 14. Digitalización de la cuenca en estudio.	43
Figura 15. Evapotranspiración de cerezos, 2013.	45
Figura 16. Evapotranspiración de cerezos, 2014.	46
Figura 17. Evapotranspiración de cerezos, 2015.	46
Figura 18. Evapotranspiración cerezos, 2016.	47
Figura 19. Evapotranspiración de cerezos, 2018.	47

Figura 20. Evapotranspiración cerezos, 2019.	48
Figura 21. Evapotranspiración de cultivos, 2013.....	51
Figura 22. Evapotranspiración de cultivos, 2014.....	51
Figura 23. Evapotranspiración de cultivos, 2015.....	52
Figura 24. Evapotranspiración de cultivos, 2016.....	52
Figura 25. Evapotranspiración de cultivos, 2018.....	53
Figura 26. Evapotranspiración de cultivos, 2019.....	53
Figura 27. Huertos encontrados.	56
Figura 28. Huerto de paltos.....	57
Figura 29. Huerto de uvas.	58
Figura 30. Huertos de maíz y trigo.	59
Figura 31. Gráfico de cuantificación de cultivos.....	63
Figura 32. Huertos en análisis.....	63
Figura 33. Clasificación de evapotranspiración (mm/día).....	64
Figura 34. Proceso de ejecución en REF-ET.....	74
Figura 35. Resultado de H, año 2013.....	78
Figura 36. Resultado de H, año 2014.....	78
Figura 37. Resultado de H, año 2015.....	78
Figura 38. Resultado de H, año 2016.....	79
Figura 39. Resultado de H, año 2018.....	79
Figura 40. Resultado de H, año 2019.....	79
Figura 41. Ubicación de huertos encontrados.....	80
Figura 42. Resultados de albedo superficial	81

Figura 43. Resultados de Radiación Neta. 82

Figura 44. Resultados de Flujo de calor del suelo. 83



Lista de Símbolos, Nomenclatura o Abreviaciones

CED: Centro de Estudios del Desarrollo

DGA: Dirección General de Aguas

DGCA: Dirección General de Aerodinámica Civil

DMC: Dirección Meteorológica de Chile

ET: Evapotranspiración

ha: Hectáreas

LAI: Índice de Área Foliar

mm/día: milímetros por día

MDE: Modelo Digital de Elevaciones

MOP: Ministerio de Obras Públicas

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

NASA: por sus siglas en inglés, *National Aeronautics and Space Administration*

USGS: por sus siglas en inglés, *United States Geological Survey*

SAVI: Índice de Vegetación Ajustada del Suelo

SEBAL: por sus siglas en inglés, *Surface Energy Balance Algorithm for Land*

SIG: Sistemas de Información Geográfica



1. Introducción

En la actualidad, es de gran importancia un buen manejo de los recursos hídricos disponibles debido a la necesidad y la demanda que existe por parte del hombre. Por otro lado, el aumento del calentamiento global, cambios climáticos ocasionados por el ser humano o los procesos naturales, puede generar que exista un mal uso o una sobreexplotación de estos recursos naturales (PANCC, 2017).

La alta demanda de agua para riego puede agravar la escasez hídrica y deteriorar el sistema hidrológico en la cuenca de Aculeo, añadiendo problemas como la subsidencia de terrenos, deterioro de la calidad del agua y erosión de los suelos (Rivas, 2019). Además, se ha visto una disminución en las precipitaciones y un aumento en las temperaturas medias que han tenido una relación directa en las variaciones superficiales de la laguna Aculeo durante la última década, además de una evidente contaminación (Rivas, 2020).

En la actividad agrícola, el proceso de evapotranspiración permite conocer o estimar la cantidad de agua que un cultivo necesita, teniendo en cuenta el efecto del clima y las características del cultivo. La precisión dependerá si es realizado de un método directo como la instalación de lisímetros en campo, que son tanques aislados llenados con suelo disturbado o no disturbado en los que el suelo crece y se desarrolla, o bien, por métodos indirectos que pueden obtener estimaciones para áreas homogéneas o puntuales (FAO, 1990). Cuando se quiere conocer la variabilidad de la evapotranspiración a mayor escala y con diversas especies, actualmente existen métodos de estimación basados en el balance de energía e imágenes satelitales de percepción remota, como lo es la aplicación del modelo SEBAL (Bastiaanssen, 1998).

Las técnicas de percepción remota permiten realizar estimaciones espaciales a gran escala, en extensas áreas de cultivos, es por esta razón que en este proyecto de título se utilizan imágenes Landsat 7 junto con datos meteorológicos para implementar el modelo SEBAL, evaluar la cantidad de agua que evapotranspiran los cultivos en distintos años de estudio y correlacionar la importancia que tuvieron con el secado de la laguna.



1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Analizar espaciotemporalmente el uso de suelos en la cuenca de Aculeo y su impacto en el secado de la laguna.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar y digitalizar área de estudio mediante el software Google Earth Pro
- Estimar evapotranspiración de cultivos mediante aplicación de modelo SEBAL
- Estimar evapotranspiración de referencia con datos meteorológicos en software REF-ET
- Identificar cultivos y correlacionar su impacto con el secado de la laguna



2. Marco Teórico

2.1. Evapotranspiración

Se conoce la evapotranspiración a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo, según el estudio de la FAO 56 (Allen *et al*, 1998).

La evapotranspiración generalmente se expresa en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad representa la cantidad de agua perdida de la tierra cultivada, en unidades de altura del agua. También se puede expresar por la energía recibida por unidad de área. Este último se refiere a la energía o el calor necesarios para evaporar el agua. Esta energía se denomina calor latente de vaporización (λ), que es función de la temperatura del agua. Por ejemplo, a 20 ° C, 1 milímetro de agua equivale a 2,45 MJ m⁻²/día.

Existe un concepto de necesidad hídrica que está conectado íntimamente con la evapotranspiración del cultivo y que ambos se refieren a la misma cantidad de agua, no obstante existen algunas diferencias entre ellos, la evapotranspiración representa la pérdida de agua producida en un área determinada de cultivo y la necesidad de agua, la cantidad de agua que requiere el cultivo para contrarrestar estas pérdidas, en forma de lluvia o riego para alcanzar el rendimiento máximo (Huamán, 2015).

2.2. Factores que afectan la evapotranspiración

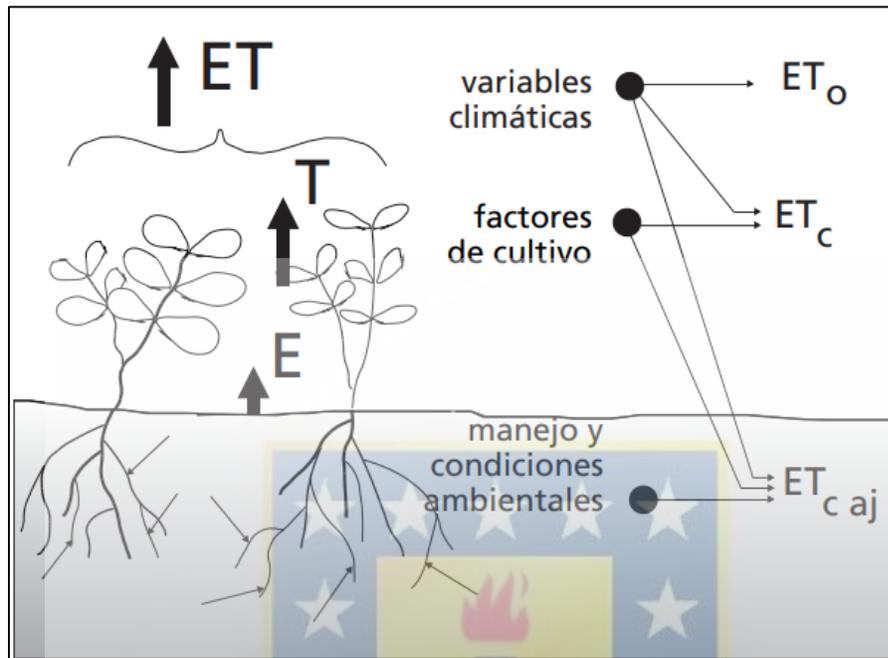


Figura 1. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET

El clima, las características de cultivo, el manejo y el medio donde se desarrollen los cultivos son factores que afectan tanto la evaporación como la transpiración. La Figura 1 presenta los conceptos relacionados a la ET y se describen a continuación.

2.2.1. Variables climáticas

Los principales factores que afectan la evapotranspiración son la radiación, temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. La fuerza evaporativa de la atmósfera es representada por la evapotranspiración del cultivo de referencia ET_0 , que representa la cantidad de agua de una superficie cultivada estándar (FAO, 1990).

2.2.2. Factores de cultivo

Cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos se deben considerar el tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo, aun cuando se desarrollen en áreas grandes y bien

manejadas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ET_C se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, características adecuadas ambientales y que alcanzan una producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas (FAO, 1990).

2.2.3. Manejo y condiciones ambientales

Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Además, se consideran la cubierta del suelo la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo (FAO, 1990).

2.3. Conceptos de Evapotranspiración

Este concepto involucra tres diferentes definiciones, las cuales son: evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_C), y la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c aj}$) (Figura 2). ET_0 es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. ET_C se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. ET_C requiere una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo (FAO, 1990).

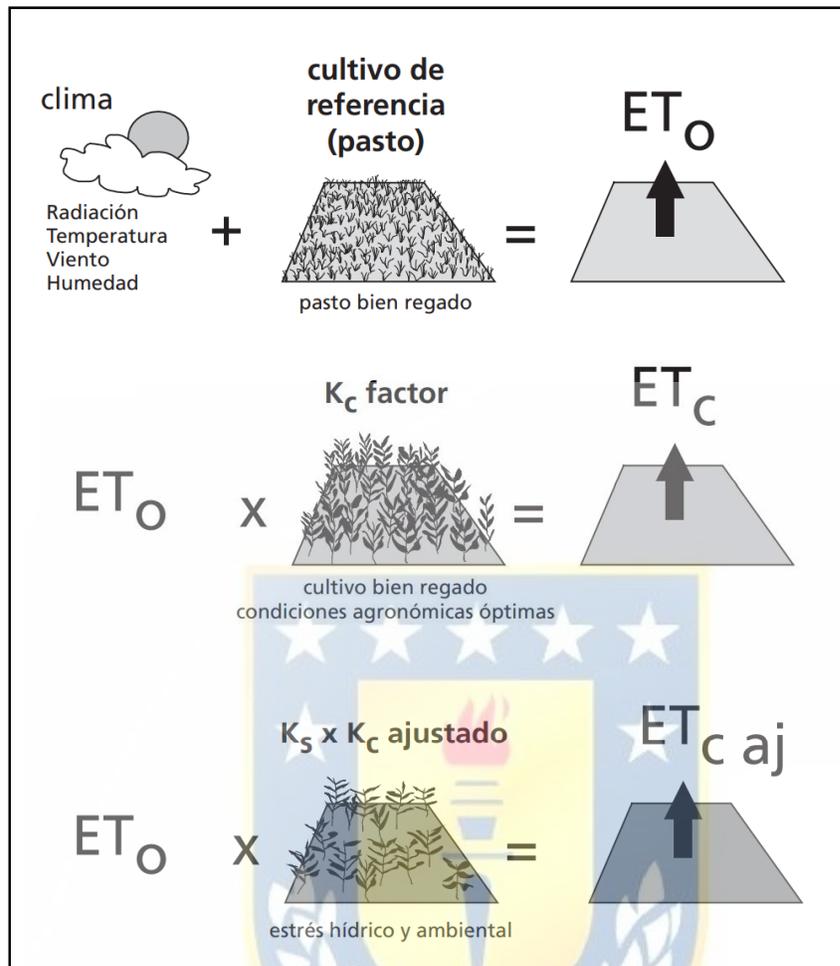


Figura 2. ET del cultivo de referencia (ET_0), bajo condiciones estándar (ET_c) y bajo condiciones no estándar ($ET_{c\ aj}$)

El valor de K_c corresponde al coeficiente de cultivo y al realizar el producto con la evapotranspiración de referencia ET_0 se obtiene la evapotranspiración del cultivo (ET_c), mientras que K_s describe el efecto de estrés hídrico en la transpiración del cultivo y se utiliza para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar. Debido a variaciones en las características del cultivo durante los periodos de crecimiento, para un determinado cultivo, K_c cambia desde la siembra hasta la cosecha (FAO, 1990).

2.4. Modelo SEBAL

El modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) es un modelo paramétrico del flujo de balance de energía y flujos de superficie, basados en mediciones espectrales de satélites y algunos datos locales (Weligepolage, 2005).

Este modelo calcula la evapotranspiración a partir de imágenes satelitales y datos meteorológicos de estaciones climáticas, utilizando el balance de energía superficial, así como se muestra en la figura 3.

La imagen satelital entrega información para el instante de captura de la imagen, por lo que SEBAL calcula el flujo de evapotranspiración instantánea para el tiempo de la imagen. Se obtiene el flujo de evapotranspiración para cada pixel de la imagen como un residuo de la ecuación del balance de energía superficial (Allen, Tasmi, Trezza & Bastiaanssen, 2002)

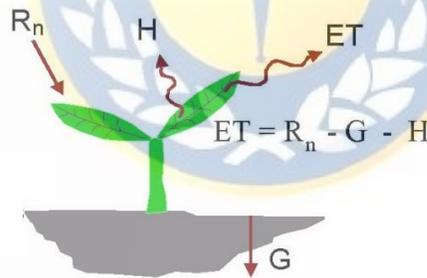


Figura 3: Balance de energía Superficial. Fuente: Allen et al, 2002.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (1)$$

La ecuación 1 presenta el balance de energía superficial donde λET es el flujo de calor latente (W/m^2), R_n es el flujo de radiación neta en la superficie (W/m^2), G es el flujo de calor hacia el suelo (W/m^2) y H es el flujo de calor sensible hacia el aire (W/m^2).

2.4.1. Flujo de radiación neta (R_n)

La radiación neta representa la radiación de energía disponible en la superficie, el cálculo representa la diferencia entre los flujos de radiación saliente y los flujos de radiación entrantes según la ecuación (2). La figura 4 presenta el balance de radiación en la superficie.

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

Donde: $R_{S\downarrow}$ es el ingreso de radiación de onda corta (W/m^2), α es el albedo superficial, $R_{L\downarrow}$ es el ingreso de radiación de onda larga (W/m^2), $R_{L\uparrow}$ es la pérdida de radiación de onda larga (W/m^2), y ε_0 es la emisividad térmica superficial.

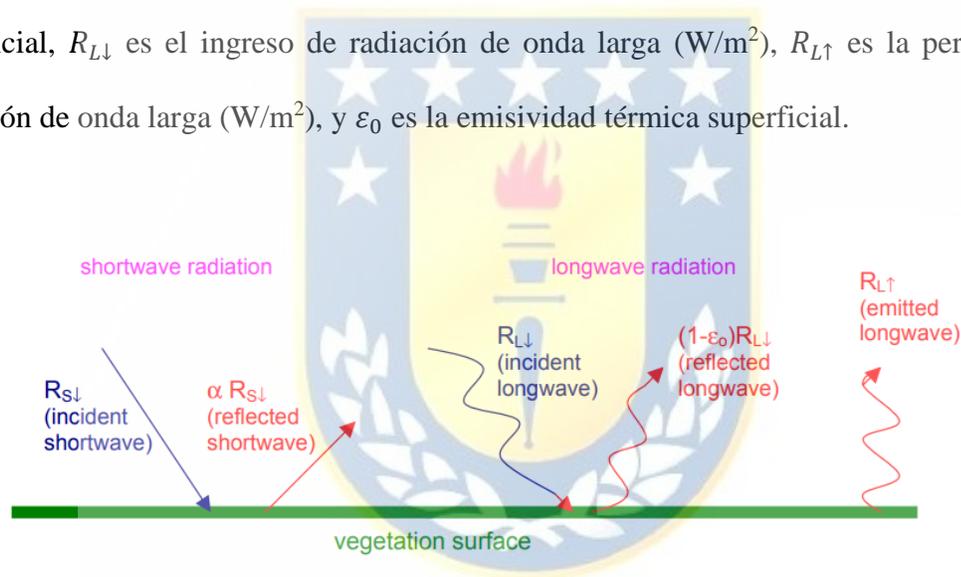


Figura 4. Balance de la radiación superficial. Fuente: Allen et al, 2002.

2.4.2. Flujo de calor latente (λET)

El flujo de calor latente (λET) es calculado para cada pixel, en la superficie terrestre el flujo de calor latente se produce por la evaporación de cuerpos de agua (e.g, lagos, ríos, lagunas, etc), de suelos húmedos, por transpiración de una planta o por la condensación. La combinación de evaporación y transpiración de la planta se conoce como evapotranspiración (Huamán, 2015).

2.4.3. Flujo de calor sensible (H)

El calor sensible (H) es la cantidad de energía necesaria para cambiar la temperatura de un cuerpo. En los ecosistemas existe un H de la superficie hacia la atmosfera y viceversa. Este flujo se produce por las diferencias de temperatura que existen entre la atmosfera y la superficie terrestre, que genera una gradiente de temperatura (Arya, 2001, citado por Huamán, 2015).

2.4.4. Flujo de calor hacia el suelo (G)

El flujo de calor hacia el suelo (G) se ve afectado principalmente por la energía recibida en la superficie terrestre, la capacidad y conductividad térmica del suelo. Normalmente, el suelo almacena calor durante el día, por lo que la energía se puede almacenar y el calor fluirá a las capas más profundas del suelo. Por la noche, el proceso se invierte, es decir, el suelo libera energía almacenada a la atmósfera y, debido al gradiente térmico, la energía fluye fuera de las capas profundas del suelo (Arya, 2001, citado por Huamán, 2015).

2.5. Percepción remota

La percepción remota es una ciencia que tiene por objetivo obtener e interpretar información a distancia, utilizando sensores que no tienen contacto físico con el objeto observado. Esta ciencia incluye observaciones aéreas, satelitales y de naves espaciales de las superficies y atmosferas de los planetas en el sistema solar, aun así la tierra es el objetivo de estudio más frecuente. La metodología consiste en detectar y medir la energía electromagnética, incluyendo la luz visible, que interactúa con la superficie de los materiales y la atmósfera (Espinoza, 2008 como se citó en Huamán, 2015).

2.5.1. Espectro electromagnético

La luz visible y la radiación son fenómenos que forman parte de un amplio rango que no posee límites interior o superior, denominado espectro electromagnético, el cual se divide en diferentes regiones. Dos parámetros son utilizados para referirse al espectro electromagnético, los cuales son frecuencia y longitud de onda (Fontal, 2005).

La figura 5, presenta la porción del espectro electromagnético que es útil en la percepción remota de la superficie terrestre. La Tierra es iluminada por la radiación electromagnética proveniente del sol, donde el máximo de energía solar se produce en el rango de longitud de onda del espectro visible, entre 0.4 y 0.7 μm .

Aunque la luz visible incluye el rango entero de colores visibles en un arco iris, subdividir las longitudes de onda al azul, verde y rojo es suficiente para estudios de percepción remota (Smith, 2001, citado por Huamán, 2015).

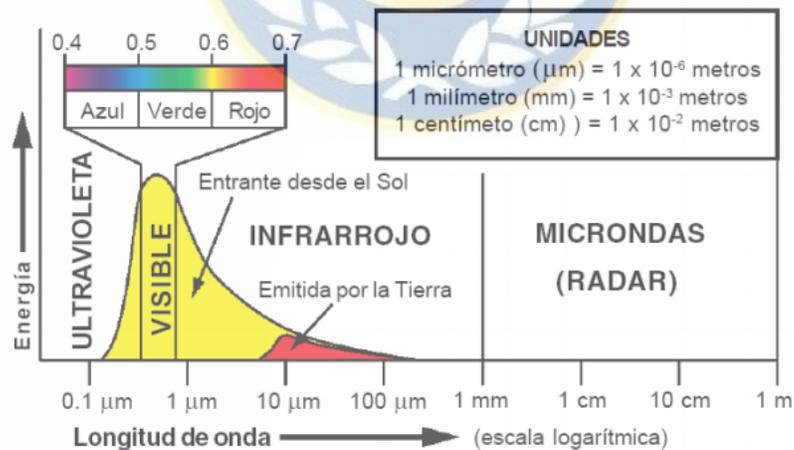


Figura 5. Energía electromagnética emitida por diferentes longitudes de onda. Fuente: Huamán, 2015

2.5.2. Firmas Espectrales

La proporción del flujo de energía incidente que es reflejado, absorbido y transmitido depende de las características del material que se observa. Ya que la proporción varía en distintas bandas del espectro electromagnético, se comporta de manera distinta en dichos materiales con diversas longitudes de onda. Para el espectro visible, el comportamiento disimilar de los objetos que constituyen la superficie terrestre, para diferentes longitudes de onda, se manifiesta en lo que se denomina color: un objeto es azul, si refleja intensamente la energía en ese rango de longitudes de onda del espectro y poco en el resto.

Las firmas espectrales presentan en una determinada cubierta que refleja o emite energía a distintas longitudes de onda. Sus curvas suelen obtenerse en laboratorio, para los principales materiales que constituyen la superficie de la tierra. Aquellas curvas se presentan en el eje de las abscisas como longitudes de onda y en el eje de las ordenadas como la reflectividad espectral o reflectancia. Algunas curvas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras que otras se comportan de manera más selectiva (Villegas, 2008).

2.5.3. Resolución espectral

Se define por el número de bandas espectrales de un sistema sensor, además del ancho del intervalo de longitud de onda cubierto por cada una. Generalmente, cuando se presentan muchas bandas, estas corresponden a un ancho menor, por lo que dan al sensor una resolución espectral mayor. Un ejemplo característico es cuando se tiene dos fotografías tomadas al mismo objeto: una en blanco y negro y otra en colores. La primera fotografía

presenta una sola banda espectral, mientras que la segunda lo muestra en tres (bandas roja, azul y verde), que cuando se combinan por superposición muestra el objeto en tres colores

Dicho esto, un sensor es más idóneo cuanto mayor número de bandas presente, ya que facilita la caracterización espectral de los diferentes materiales que constituyen la superficie terrestre. Además, conviene que las bandas sean suficientemente estrechas, para percibir aquellas señales sobre regiones coherentes del espectro electromagnético. Bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio, que puede encubrir la diferenciación espectral entre materiales de interés (Villegas, 2008).

2.5.4. Resolución espacial

El concepto de resolución espacial designa al tamaño del objeto más pequeño a ser distinguido sobre una imagen, por lo tanto, es definida como la capacidad del sistema sensor para captar objetos de la superficie terrestre, cuando menor sea el objeto a ser visto, mayor será la resolución espacial.

La resolución espacial tiene un papel fundamental en la fotointerpretación de una imagen, por cuanto marca el nivel de detalle que ofrece. Generalmente se puede afirmar que solo serán distinguibles en una imagen elementos de tamaño superior a la del pixel, por lo que está estrechamente relacionado a la escala de trabajo y con la fiabilidad obtenible de una interpretación (Villegas, 2008).

2.5.5. Resolución radiométrica

La resolución radiométrica está relacionada con la sensibilidad del sensor, es decir, a la capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Su fundamento consiste en el número de niveles digitales, representado por tonos de gris. Mientras mayor

sea el número de niveles, mayor es la resolución radiométrica. Un ejemplo para entender mejor el concepto viene dado por una imagen con dos niveles (blanco y negro) y otra con 32 tonos de gris, obviamente la cantidad de detalles perceptibles en la segunda imagen será mayor que en la primera, por lo tanto la segunda imagen presenta una mejor resolución radiométrica (Villegas, 2008).

2.5.6. Resolución temporal

Este concepto alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. En otras palabras, refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo de observación y de abertura.

La resolución temporal de los sistemas espaciales varía de acuerdo a sus objetivos planteados para el sensor. Los satélites meteorológicos deben proporcionar información muy frecuente, ya que observan fenómenos de gran dinamismo. Por otro lado, los satélites de recursos naturales ofrecen una cadencia menor, e.g 16 días en Landsat y 26 en SPOT (Villegas, 2008).

2.6. Misión LANDSAT

2.6.1. Características LANDSAT 7

Landsat 7 fue lanzada el 15 de abril de 1999, con la participación de tres organizaciones gubernamentales estadounidenses: NASA, NOAA y USGS. El satélite está equipado con ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), el cual proporciona un levantamiento terrestre en los modos VNIR (visible e infrarrojo cercano), SWIR (Infrarrojos de onda corta), PAN

(Pancromático – Rango Pancromático), TIR (Infrarrojo térmico - Rango infrarrojo térmico). Además, el instrumento ETM proporciona una banda pancromática de 15 m de resolución y un convertidor de analógico digital de 9 bits.

Esta misión proporciona un escaneo de superficie completo tomando 232 vueltas, o bien 16 días, a una altitud de 705 km. El estudio del terreno se lleva a cabo aproximadamente a las 10 am (\pm 15 minutos) de acuerdo con la hora solar local. El sensor captura 8 bandas del espectro electromagnético, las cuales se presentan en la Tabla 1. El satélite puesto en órbita se aprecia en la Figura 6.

Tabla 1
Bandas Landsat 7 ETM+

Sensor	Numero de banda	Nombre de banda	Longitud de onda (μ m)	Resolución (m)
ETM+	1	Azul	0,45-0,52	30
ETM +	2	Verde	0.52-0.60	30
ETM +	3	rojo	0,63-0,69	30
ETM +	4	NIR	0,77-0,90	30
ETM +	5	SWIR 1	1,55-1,75	30
ETM +	6	Térmico	10.40-12.50	60 * (30)
ETM +	7	SWIR 2	2.09-2.35	30
ETM +	8	Pancromático	0,52-0,90	15

Fuente: EOS, s.f. Recuperado de: <https://eos.com/landsat-7/>

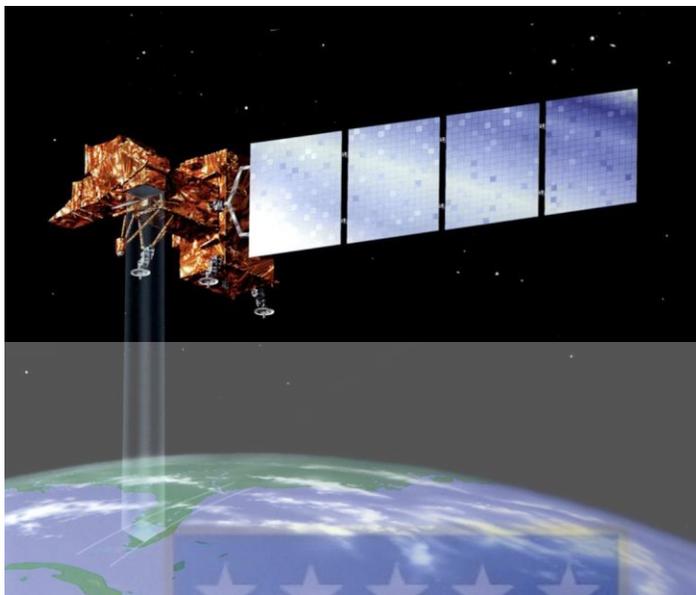


Figura 6. Satélite Landsat 7 ETM + en órbita.

Fuente: Recuperado de <https://www.usgs.gov/media/images/illustration-landsat-7-orbit>

El 31 de mayo de 2003, el sensor SLC (*Scan Line Corrector*) produce una falla en el compensador del movimiento hacia adelante del satélite. Sin un SLC operativo, la línea de visión del sensor traza un patrón en zigzag a lo largo de la trayectoria terrestre del satélite, como se muestra en las figuras 7 y 8.

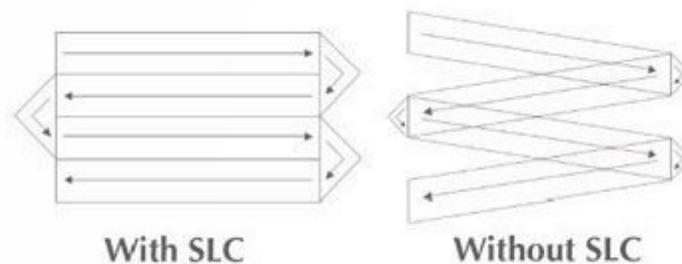


Figura 7. Falla del SLC, Landsat 7 ETM +

Fuente: Recuperado de: <https://www.usgs.gov/media/images/illustration-landsat-7-scan-line-corrector-slc-failure>

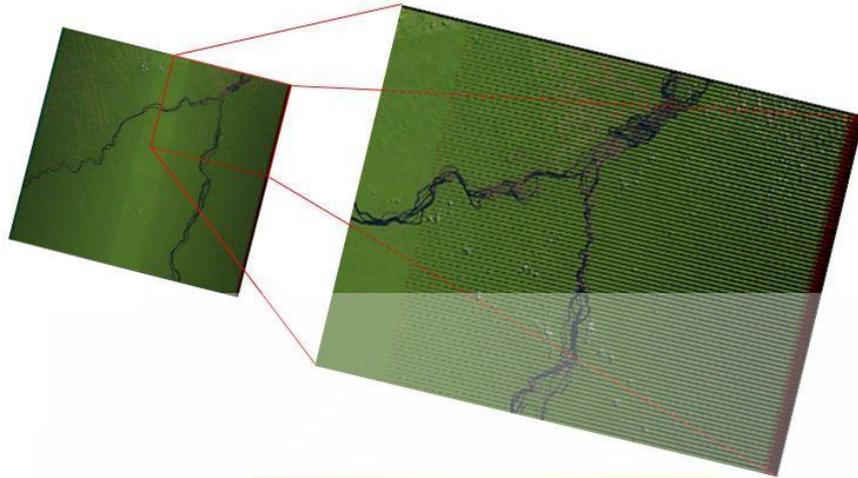


Figura 8. Ejemplo escena sin SLC, Landsat 7 ETM +

Fuente: Recuperado de: <https://www.usgs.gov/media/images/a-landsat-7-slc-scene-example>

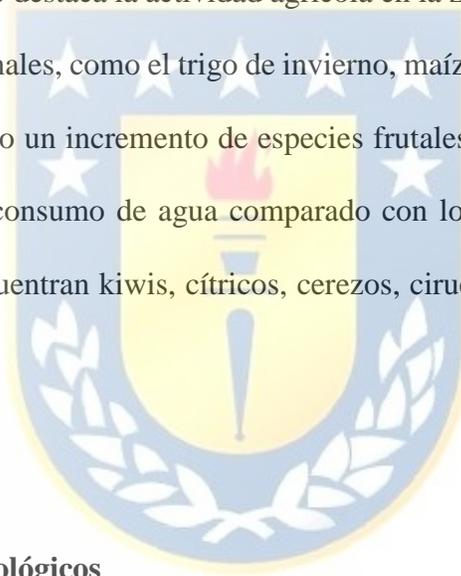


3. Desarrollo del proyecto

3.1. Zona de estudio

El estudio se realiza en la cuenca de la laguna Aculeo, situada en la comuna de Paine, de la provincia del Maipo, perteneciente a la Región Metropolitana de Santiago, Chile. A unos 70 km del suroeste de Santiago, la laguna se ubica en los 33°50'45''S, 70°50'58''W y a unos 350 metros de altitud.

El principal uso del suelo destaca la actividad agrícola en la zona, la agricultura anual intensiva de cultivos tradicionales, como el trigo de invierno, maíz y grano seco en verano. En los últimos años ha habido un incremento de especies frutales como cítricos y paltos, que requieren de un mayor consumo de agua comparado con los cultivos tradicionales. Dentro de los frutales se encuentran kiwis, cítricos, cerezos, ciruelos y parronales (CED, 2008).



3.2. Datos

3.2.1. Datos meteorológicos

Se obtienen datos de temperaturas máximas (°C), temperaturas mínimas (°C), radiación solar (W/m^2), velocidad del viento (m/s), temperatura en su punto de rocío (°C) para las fechas de análisis. Los datos se obtienen de manera gratuita del sitio web de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), para la estación EL PAICO de código nacional 330113, ubicada en 33°40'23''S, 71°00'29''W, altitud (msnm) 275.

3.2.2. Imágenes satelitales

Se tienen las imágenes satelitales con la menor presencia de nubes de los sensores *ETM+* de las misiones Landsat 7, que tienen una resolución espacial y temporal de 30 m y 16 días respectivamente. Se seleccionan imágenes del mes de diciembre para los años 2013, 2014, 2015, 2016, 2018 y 2019 de los cuales se realizan cálculos y un posterior análisis. Las imágenes se obtienen de forma gratuita del sitio web *United States Geological Survey* (USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Además se debe contar con un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que será utilizado para obtener las alturas de los píxeles anclas en los cálculos.

3.2.3. Superficie en estudio

El proyecto se desarrolla mediante la utilización de archivos *shapefile* de ESRI (.shp), los cuales se utilizan para la delimitación de la zona de estudio, además estos archivos entregan información sobre la superficie utilizada. Desde la página web de la Infraestructura de Datos Geospaciales de Chile (IDE), del Ministerio de Bienes Nacionales (MBM), se recopila el archivo .shp Acuíferos Estudiados Noviembre 2018, para tener el sector de la laguna Aculeo, el cual se presenta en la Figura 9. En color verde se encuentra la capa del sector de la laguna Aculeo, la superficie delimitada en color negro corresponde a una digitalización en Google Earth Pro que representa la zona en estudio, donde se encuentran la laguna, los cultivos y la zona urbana.

La capa de la cuenca laguna Aculeo tiene una superficie de 206.16 km² y la zona de estudio digitalizada corresponde a 40 km².

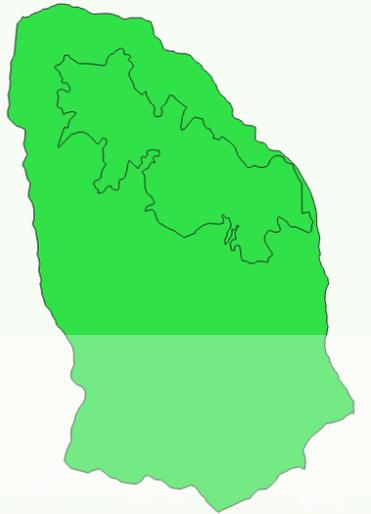


Figura 9. Capa shapefile para delimitar la zona de estudio al sector Aculeo.

Fuente: Infraestructura de Datos Geospaciales (IDE), recuperado de: <https://www.ide.cl/index.php/aguas-continentales/item/1502-acuiferos-estudiados-noviembre-2018>

Por otro lado, se cuenta con una digitalización correspondiente a los cultivos encontrados que se han visto beneficiados por el recurso de la laguna, y que han contribuido al secado de la misma. Se cuenta con 778.26 ha pertenecientes a cultivos, además de 522 ha pertenecientes a la zona urbana.

4. Metodología

4.1. Procedimiento de estimación de la evapotranspiración mediante el modelo

SEBAL

A continuación se describen los pasos del modelo SEBAL que calculan la evapotranspiración de cultivos en toda la imagen.

El modelo consiste básicamente en estimar las componentes del balance de energía como lo son la R_n , G , H , λET , de forma distribuida para el área de estudio, para ello se utiliza el software QGIS3 del cual se realiza todo el procesamiento de imágenes y posterior cálculo de evapotranspiración.

4.1.1. Flujo de radiación neta superficial (R_n)

El primer paso en el modelo SEBAL, es realizar el cálculo del flujo de radiación neta superficial (R_n) usando la ecuación (2) del balance de radiación superficial. En la Figura 10, se muestra el diagrama de flujo para el cálculo de la R_n , cada etapa es descrita en los siguientes ítems.

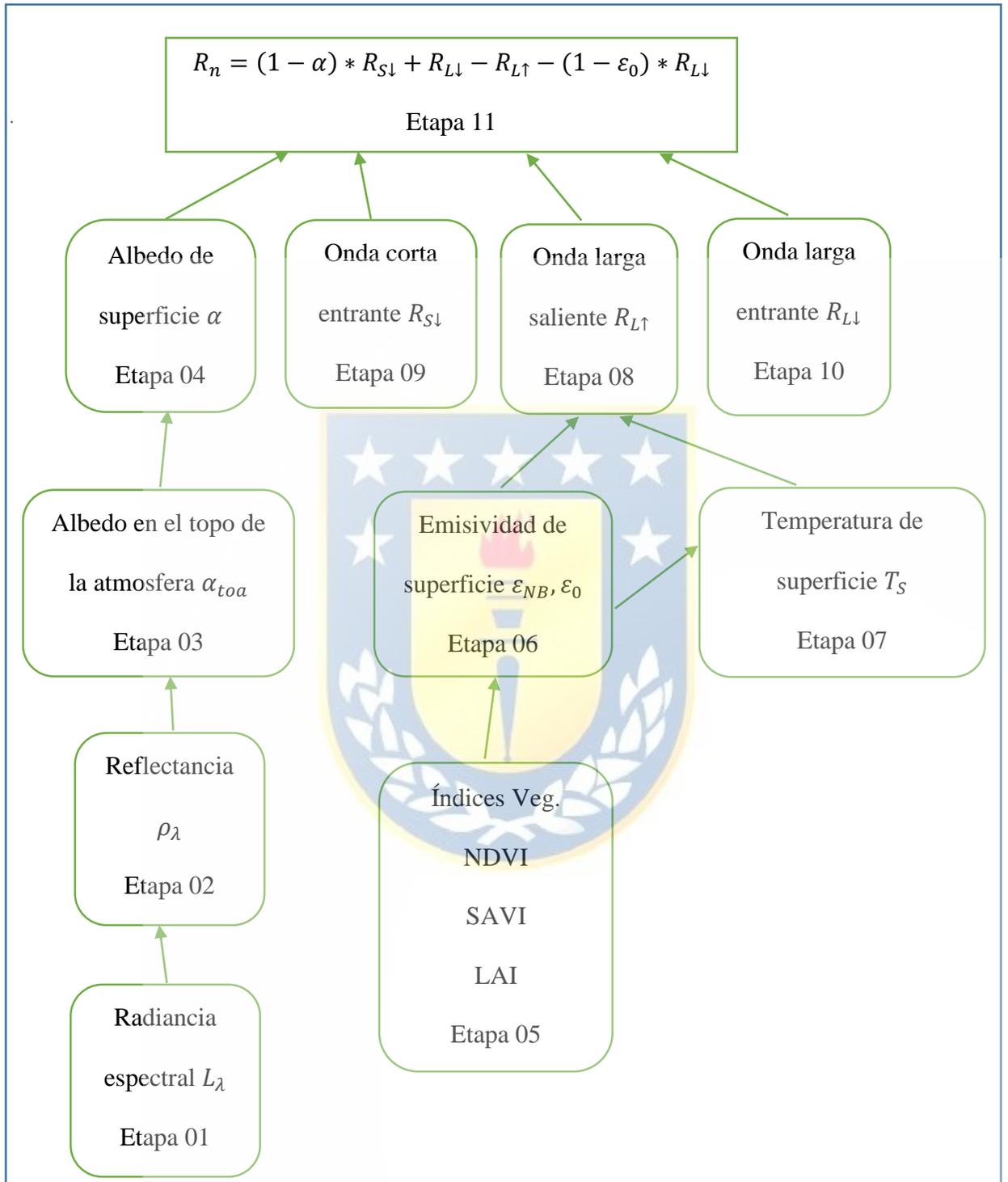


Figura 10: Diagrama de flujo para cálculo de radiación neta.

4.1.1.1. Albedo superficial (α)

El albedo superficial se define como la fracción de radiación reflejada de la onda corta entrante. Es necesario realizar previamente los cálculos de las etapas 1 a 4, según la Figura 10.

A. Etapa 1: Radiancia espectral (L_λ)

La radiancia espectral (L_λ) para cada banda es la energía de la radiación saliente de las bandas observadas en el tope de la atmosfera mediante un satélite. El cálculo es realizado mediante la ecuación adaptada para imágenes LANDSAT 5 y 7.

$$L_\lambda = \left[\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right] * (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{MIN} \quad (3)$$

Donde: L_{MAX} y L_{MIN} son las constantes de calibración. Q_{calmax} y Q_{calmin} son 255 y 1 respectivamente. Q_{cal} es el numero digital de la banda (1 a 7). En la tabla 2 se presentan los valores de L_{MAX} y L_{MIN} para LANDSAT 7.

Tabla 2
 L_{MAX} y L_{MIN} valores para LANDSAT 7 ETM+

N° Banda	L_{MIN}	L_{MAX}
1	-6.200	293.700
2	-6.400	300.900
3	-5.000	234.400
4	-5.100	241.100
5	-1.000	47.570
6.1	0.000	17.040
6.2	3.200	12.650
7	-0.350	16.540
8	-4.700	243.100

Fuente: Metadato de la imagen LANDSAT 7 ETM+ 12/12/2015

B. Etapa 2: Reflectividad para cada banda (ρ_λ)

La reflectividad (ρ_λ) se define como el cociente entre el flujo de radiación reflejada y el flujo de radiación entrante, para LANDSAT 7 es calculada usando la ecuación (4).

$$\rho_\lambda = \frac{\pi * L_\lambda}{ESUN_\lambda * \cos \theta * d_r^2} \quad (4)$$

Donde: L_λ fue calculada en la Etapa 1, $ESUN_\lambda$ es la irradiación exo-atmosférica solar media para cada banda ($W/m^2/\mu m$), $\cos \theta$ es el coseno del ángulo de incidencia solar (desde el nadir) y d_r es la inversa de la distancia de la tierra al sol. $\cos \theta$ y el término d_r son obtenidos de los metadatos.

C. Etapa 3: El albedo en el tope de la atmósfera (α_{toa})

El albedo no ajustado para la transmisividad atmosférica, se efectúa mediante la siguiente ecuación.

$$\alpha_{toa} = \sum (\omega_\lambda * \rho_\lambda) \quad (5)$$

Donde: ρ_λ es la reflectividad calculada en la Etapa 2 y ω_λ es un coeficiente de peso para cada banda, calculada con la ecuación (6).

$$\omega_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\sum ESUN_\lambda} \quad (6)$$

Los coeficientes de ponderación ω_λ fueron calculados en una planilla Excel y se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3
 Coeficientes de ponderación, ω_λ

BANDA	ω_λ
1	0.244
2	0.228
3	0.191
4	0.129
5	0.028
7	0.010
8	0.169

Fuente: Elaboración propia.

D. Etapa 4: Albedo de superficie (α)

El albedo superficial (α) corrige el α_{toa} para la transmisividad atmosférica, con la ecuación (7).

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path_radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad (7)$$

Donde: $\alpha_{path_radiance}$ es la porción media de radiación solar entrante en todas las bandas que es retrodispersada hacia el satélite antes que alcance la superficie de la tierra, según la literatura se utiliza el valor de 0.03 y τ_{sw} es la transmisividad atmosférica, calculado con la ecuación (8).

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 * 10^{-5} * Z \quad (8)$$

Dónde: Z debe representar el área de interés, por lo que se utiliza la elevación de la estación meteorológica.

E. Etapa 5: Índices de vegetación

Se calculan tres índices de vegetación necesarios para el modelo SEBAL, ellos son el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Ajustada del Suelo (SAVI) e Índice de Área Foliar (LAI)

El NDVI es la relación entre las diferencias en reflectividades entre las bandas de infrarrojo cercano (NIR), y la banda roja (RED), a continuación se presenta su ecuación.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (9)$$

Donde: ρ_{NIR} y ρ_{RED} son reflectividades para las bandas 4 y 3 de LANDSAT 7.

Los valores de NDVI varían entre -1 y +1. Las superficies verdes están entre 0 y 1, las nubes y agua usualmente son menores a 0.

El SAVI es un índice que busca disminuir los impactos de humedad, son reducidos con la ecuación (10)

$$SAVI = \frac{(1 + L) * (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(L + \rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (10)$$

Donde: L es una constante para SAVI y toma el valor de 0.5.

El LAI es un indicador de biomasa y resistencia vegetal, se calcula con la ecuación (11).

$$LAI = -\frac{\ln\left(\frac{0.69 - SAVI}{0.59}\right)}{0.91} \quad (11)$$

Dónde: SAVI se calculó con la ecuación (10), usando un valor de 0.5 para L .

4.1.1.2. Etapa 6: Emisividad de superficie (ϵ_{NB} y ϵ_0)

En SEBAL se utilizan dos emisividades superficiales; ϵ_{NB} que representa comportamientos de superficie para la emisión termal de la banda 6. Y por otro lado, ϵ_0 que lo hace en el ancho del espectro termal (6 a 14 μm). Las siguientes dos ecuaciones se utilizan las distintas emisividades.

$$\epsilon_{NB} = 0.97 + 0.0033 * LAI, \quad \text{para } LAI < 3 \quad (12)$$

$$\epsilon_0 = 0.95 + 0.01 * LAI, \quad \text{para } LAI < 3 \quad (13)$$

Cuando $LAI \geq 3$, se utiliza $\epsilon_{NB} = 0.98$ y $\epsilon_0 = 0.98$.

F. Etapa 7: Temperatura de superficie (T_S)

La temperatura superficial (T_S) se calcula con la ecuación (14).

$$T_S = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} * K_1}{L_{\lambda,i}} + 1\right)} \quad (14)$$

Donde: $L_{\lambda,i}$ es la radiancia espectral de la banda termal 6 (para LANDSAT 7). K_1 y K_2 son constantes para las imágenes LANDSAT 7 (ver Tabla 4).

Tabla 4.
Constantes K_1 y K_2 para LANDSAT 5, 7 y 8.

SATELITE	BANDA	K_1	K_2
LANDSAT 5 TM	6	607.76	1260.56
LANDSAT 7 ETM+	6	666.09	1282.71
LANDSAT 8 TIRS	10	774.89	1321.08
LANDSAT 8 TIRS	11	480.89	1201.14

Fuente: Metadatos de LANDSAT5, 7 y 8.

4.1.1.3. Etapa 8: Radiación de onda larga saliente ($R_{L\uparrow}$)

La radiación de onda larga saliente ($R_{L\uparrow}$), se obtiene mediante la ecuación de Stefan-Boltzman, ecuación (15).

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 * \sigma * T_S^4 \quad (15)$$

Donde: ε_0 es la Emisividad de cada pixel, σ es la constante de Stefan-Boltzman ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$) y T_S es la temperatura superficial ($^{\circ}\text{K}$). Estos valores se encuentran en el rango de 200-700 W/m^2 , dependiendo de la ubicación y hora de imagen.

4.1.1.4. Etapa 9: Radiación de onda corta entrante ($R_{S\downarrow}$)

La radiación de onda corta entrante ($R_{S\downarrow}$) es el flujo de radiación solar directa que alcanza la superficie de la tierra (W/m^2). Se utiliza la ecuación (16) para su cálculo.

$$R_{S\downarrow} = G_{SC} * \text{Cos } \theta * d_r * \tau_{sw} \quad (16)$$

Donde: G_{SC} es la constante solar (1376 W/m^2).

Se realizaron los cálculos en una hoja Excel y su valor es constante para toda el área de estudio.

4.1.1.5. Etapa 10: Radiación de onda larga entrante ($R_{L\downarrow}$)

La radiación de onda larga entrante ($R_{L\downarrow}$) es el descenso de la radiación termal de la atmosfera hacia la superficie (W/m^2). Calculado con la ecuación de Stefan-Boltzman.

$$R_{L\downarrow} = 0.85 * (-\ln(\tau_{sw}))^{0.09} * \sigma * T_{cold}^4 \quad (17)$$

Donde: T_{cold} es un punto de referencia, escogido en un pixel o zona bien regada, corresponde a un valor para toda la imagen.

Los valores para $R_{L\downarrow}$ varia entre 200 y 500 W/m^2 , dependiendo de la ubicación y hora de la imagen.

4.1.2. Etapa 11: Calculo de la Radiación Neta (R_n)

Finalmente se emplea la ecuación (18), del balance de radiación en la superficie.

$$R_n = (1 - \alpha) * R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0) * R_{L\downarrow} \quad (18)$$

Donde: α es el albedo de superficie, $R_{S\downarrow}$ la radiación de onda corta entrante, $R_{L\downarrow}$ radiación de onda larga entrante, $R_{L\uparrow}$ radiación de onda larga saliente, y ε_0 emisividad superficial.

Los valores de R_n varian entre 100 a 700 W/m^2 dependiendo de la superficie.

Este cálculo completa el primer paso para el procedimiento SEBAL.

4.1.3. Flujo de calor del suelo (G)

El flujo de calor del suelo (G) es la relación entre el almacenamiento de calor dentro del suelo y la vegetación debido a la conducción. En el modelo SEBAL, primero se calcula la relación G/R_n usando la siguiente ecuación.

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} * (0.038\alpha + 0.0074 * \alpha^2) * (1 - 0.98 * (NDVI)^4) \quad (19)$$

Donde: T_s es la temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$), α es el albedo superficial y $NDVI$ es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

Se verifican los valores de G/R_n bajo las condiciones de la Tabla 5.

Tabla 5.
Estimación de G/R_n para distintas superficies

Tipo de superficie	G/R_n
Agua clara y profunda	0.5
Nieve	0.5
Desierto	0.2-0.4
Agricultura	0.05-0.15
Suelo Desnudo	0.2-0.4
Cobertura total de alfalfa	0.04
Roca	0.2-0.8

Fuente: (British Columbia et al., 2002)

4.1.4. Flujo de calor sensible (H)

El flujo de calor sensible (H) se define como la relación de las pérdidas de calor hacia el aire por convección y conducción, debido a las diferencias de temperatura, esto mediante la ecuación (20).

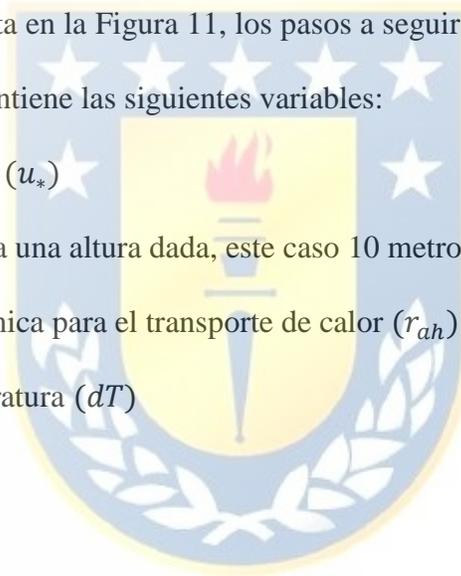
$$H = \frac{(\rho * C_p * dT)}{r_{ah}} \quad (20)$$

Dónde: ρ es la densidad del aire (W/m^2), C_p es el calor específico del aire (1004 J/kg/K), dT es la diferencia de temperatura (T_1-T_2) entre dos alturas (z_1 y z_2) en $^\circ\text{K}$, y r_{ah} es la resistencia aerodinámica para el transporte de calor (s/m).

La ecuación (20) se dificulta al resolverla ya que r_{ah} y dT son desconocidas. Es por esta razón que este cálculo utiliza dos pixeles anclas (para estimar dT y darle un valor a H) y la velocidad de viento a una altura dada.

A continuación se presenta en la Figura 11, los pasos a seguir para calcular el flujo de calor sensible (H), el cual contiene las siguientes variables:

- Velocidad de fricción (u_*)
- Velocidad del viento a una altura dada, este caso 10 metros de altura (u_{10})
- Resistencia aerodinámica para el transporte de calor (r_{ah})
- Diferencias de temperatura (dT)



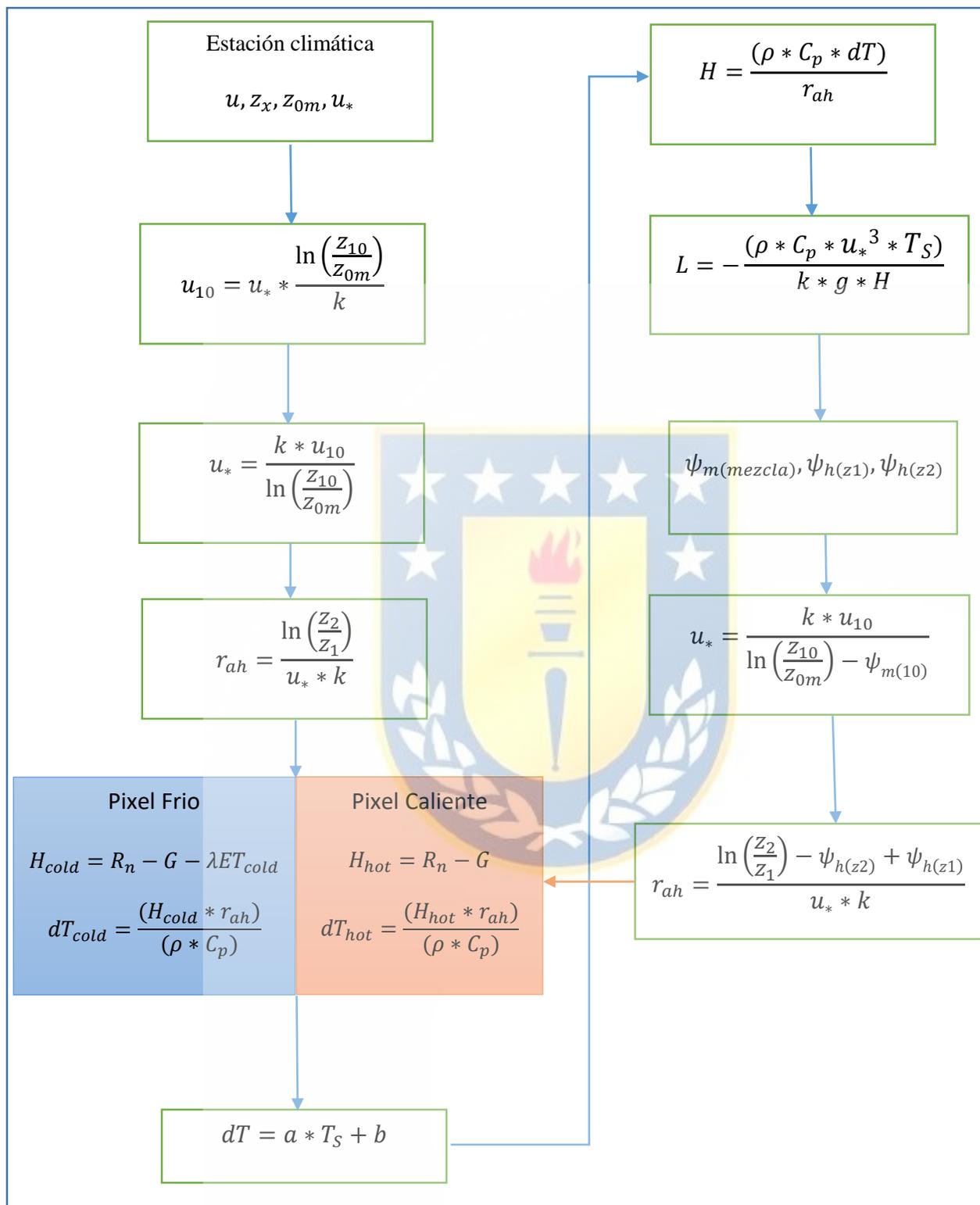


Figura 11. Diagrama de flujo del proceso iterativo para el cálculo de H.

Fuente: Modificado de Allen *et al*, 2002.

4.1.4.1. Velocidad del viento a una altura (u_{10})

La velocidad del viento a una altura de 10 metros sobre la estación climática, asume que no hay ningún efecto de la rugosidad superficial. La altura se refiere a la “altura de mezcla”, para este proyecto se usa 10 metros y se obtiene con la ecuación (21).

$$u_{10} = u_* * \frac{\ln\left(\frac{z_{10}}{z_{0m}}\right)}{k} \quad (21)$$

Donde: u_* es la velocidad de fricción de la estación climática, z_{10} es la velocidad del viento a una altura de 10 m (obtenida de datos meteorológicos) y k es la constante de Von Karman's que es igual a 0.41

4.1.4.2. Velocidad de fricción para cada pixel (u_*)

La velocidad de fricción para cada pixel es calculada en el *software QGIS3*. u_{10} puede ser asumido como constante para todos los pixeles de la imagen, ya que ocurre a una “altura de mezcla” y por esto no afecta a las características de la superficie.

$$u_* = \frac{k * u_{10}}{\ln\left(\frac{z_{10}}{z_{0m}}\right)} \quad (22)$$

Donde: z_{0m} es la longitud de rugosidad del momento para cada pixel, y se calcula con la ecuación (23), usando un mapa de uso de suelos.

$$z_{0m} = 0.018 * LAI \quad (23)$$

4.1.4.3. Resistencia aerodinámica para el transporte de calor (r_{ah})

Se requiere una serie de iteraciones para cada periodo de inestabilidad en r_{ah} y H . Se asumen condiciones neutras para calcular un r_{ah} inicial con la ecuación (24). Basado en

experiencias se usa valores de 0.1m para z_1 y 2 m para z_2 . Se calcula los valores iniciales de r_{ah} y u_* con las ecuaciones (24) y (22) respectivamente.

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* * k} \quad (24)$$

4.1.4.4. Diferencias de temperatura (dT)

Para calcular H , se necesita definir para cada pixel la diferencia de temperatura cercana superficial (dT). En SEBAL se utiliza la dT para cada pixel asumiendo una relación lineal entre dT y T_S , mediante la siguiente ecuación.

$$dT = b + a * T_S \quad (25)$$

Dónde: a y b son coeficientes de correlación, para definir esos coeficientes el modelo SEBAL usa dos pixeles “anclas” donde un valor de H es estimado confiablemente. Los valores de H y dT en los pixeles anclas son calculados en una planilla Excel.

4.1.4.5. Pixeles extremos

En el modelo SEBAL se utilizan los dos pixeles que son denominados “fríos” y “calientes” para fijar las condiciones límites del balance de energía, estos se localizan en el área de estudio. El pixel frío se selecciona en una superficie de cultivo bien regada con cobertura de suelo lleno de vegetación. La temperatura de la superficie y del aire se asume como similares para el pixel. El pixel caliente se selecciona en un campo agrícola seco y desnudo, donde la evapotranspiración es igual a cero.

Se requiere experiencia y habilidad en la selección de estos pixeles ya que la calidad y confianza de los cálculos en la evapotranspiración en SEBAL depende cuidadosamente de la elección de estos pixeles (Allen *et al*, 2002). En este estudio, para seleccionar los pixeles extremos se eligen aquellos que tienen la temperatura máxima y mínima, para el pixel caliente y frio respectivamente. Es decir, en cada imagen satelital se calcula la temperatura superficial para ubicar los pixeles extremos, en efecto para cada imagen los pixeles están ubicados en distintas partes.

La Tabla 6 presenta el algoritmo para la elección de los pixeles.

Tabla 6.
Algoritmo de elección de pixeles extremos.

Pixel Caliente	Pixel Frio
Temperatura Máxima	Temperatura Mínima
$\lambda ET = 0$	$\lambda ET = R_n - G_0$
$H = R_n - G_0$	$H = 0$
$dT = dT_{max}$	$Dt = 0$

Fuente: Modificada de Allen *et al*, 2002

Una vez encontrados estos dos pixeles, se establece una relación lineal para cada imagen, según las temperaturas máximas y mínimas captadas por la banda térmica del satélite, y se aplica esta regresión a cada pixel de la imagen analizada (Núñez, 2009). La relación lineal se esquematiza con la Figura 12.

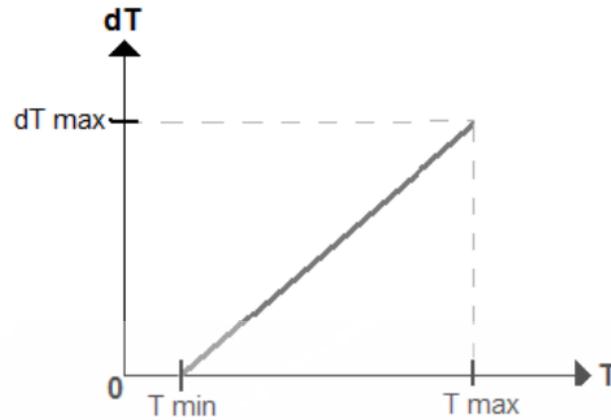


Figura 12. Gráfico de Regresión para estimar dT .

Fuente: Modificado de Núñez (2009).

4.1.4.6. Temperatura y densidad del aire

La temperatura del aire (T_a) para cada pixel es calculado con la ecuación (26) y una aproximación de la densidad del aire (ρ) es calculado con la ecuación (27), para los pixeles anclas.

$$T_a = T_S - dT \quad (26)$$

$$\rho = 349.467 * \frac{\left(\frac{T_a - 0.0065 \times Z}{T_a}\right)^{5.26}}{T_a} \quad (27)$$

4.1.4.7. Flujo de calor sensible (H)

El flujo de calor sensible es calculado con la ecuación (20), esta es la primera aproximación de H asumiendo condiciones atmosféricas neutrales, en base a valores iniciales de r_{ah} , T_S y los coeficientes de correlación a y b . El primer valor de H se guarda como $H1$.

4.1.4.8. Efectos de flotabilidad generados por calentamiento de la superficie

$$L = -\frac{(\rho * C_p * u_*^3 * T_S)}{k * g * H} \quad (28)$$

Si $L < 0$ (condición de inestabilidad)

$$\psi_{m(10m)} = 2 \ln\left(\frac{1 + X_{(10m)}}{2}\right) + \ln\left(\frac{1 + X_{(10m)}^2}{2}\right) - 2\text{ArcTan}(X_{(10m)}) + 0.5\pi \quad (29)$$

$$\psi_{h(2m)} = \ln\left(\frac{1 + X_{(2m)}^2}{2}\right) \quad (30)$$

$$\psi_{h(0.1m)} = \ln\left(\frac{1 + X_{(0.1m)}^2}{2}\right) \quad (31)$$

Donde;

$$X_{(10m)} = \left(1 - 16\frac{10}{L}\right)^{0.25} \quad (32)$$

$$X_{(2m)} = \left(1 - 16\frac{2}{L}\right)^{0.25} \quad (33)$$

$$X_{(0.1m)} = \left(1 - 16\frac{0.1}{L}\right)^{0.25} \quad (34)$$

Si $L > 0$ (Condición de estabilidad)

$$\psi_{m(10m)} = -5\left(\frac{10}{L}\right) \quad (35)$$

$$\psi_{h(2m)} = -5 \left(\frac{2}{L} \right) \quad (36)$$

$$\psi_{h(0.1m)} = -5 \left(\frac{0.1}{L} \right) \quad (37)$$

Si $L=0$ (Condición de neutralidad): $\psi_m = 0$ y $\psi_h = 0$

4.1.4.9. Valor corregido para la velocidad de fricción (u_*)

$$u_* = \frac{k * u_{10}}{\ln \left(\frac{z_{10}}{z_{0m}} \right) - \psi_{m(10m)}} \quad (38)$$

4.1.4.10. Valor corregido para la resistencia aerodinámica (r_{ah})

$$r_{ah} = \frac{\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) - \psi_{h(z_2)} + \psi_{h(z_1)}}{u_* * k} \quad (39)$$

4.1.4.11. Proceso de iteración

Una vez estimados los valores iniciales de u_* y r_{ah} , estos se someten a un proceso de iteración hasta obtener valores estables de H . El proceso iterativo para el cálculo de H se muestra en la Figura 11 y se describe a continuación.

- i. Para el proceso de iteración se debe retornar al paso 4.1.3.4 y calcular en la hoja de Excel un nuevo dT en los pixeles “frio” y “caliente” usando el r_{ah} corregido. Se calcula también los nuevos valores de a y b y luego se calcula el dT para cada pixel

- ii. Se repite el paso 4.1.3.6 para un valor revisado para la temperatura del aire (T_a) y la densidad del aire (ρ)
- iii. Se repite el paso 4.1.3.7 para calcular un valor corregido para H .
- iv. El paso 4.1.3.8 se repite para calcular una nueva corrección de estabilidad.
- v. El proceso iterativo se repite hasta que los valores sucesivos para dT y r_{ah} en el pixel “caliente” tenga estabilidad.
- vi. Finalmente, se calcula el calor corregido para H en cada pixel, que será utilizado en el cálculo de la evapotranspiración instantánea para cada pixel.

4.1.5. Flujo de Calor Latente (λET)

El flujo de calor latente (λET) es la tasa de pérdida de calor latente desde la superficie por la evapotranspiración, es calculado para cada pixel usando la ecuación (40).

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (40)$$

Dónde: λET es un valor instantáneo para el momento en que el satélite pasa (W/m^2).

4.1.6. Evapotranspiración horaria (ET_H)

La evapotranspiración horaria (ET_H) se obtiene con la ecuación (41).

$$ET_H = 3600 * \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (41)$$

Dónde: λET es el flujo de calor latente (W/m^2), λ es el calor latente de evapotranspiración de agua, y se estima con la siguiente ecuación.

$$\lambda = (2.501 - 0.00236 * (T_0 - 273)) * 10^6 \quad (42)$$

Donde: T_0 puede ser 25 °C.

4.1.7. Evapotranspiración de referencia horaria (ET_rF)

La fracción de evapotranspiración de referencia horaria (ET_rF), es aproximadamente constante durante todo el día y puede ser obtenido mediante la ecuación (43).

$$ET_rF = \frac{ET_H}{ET_r} \quad (43)$$

Donde ET_H es la evapotranspiración horaria (mm/h) y ET_r la evapotranspiración de referencia horaria, calculada a partir de los datos climáticos mediante el *Software REF-ET* (mm/h). La ET_rF es similar al conocido coeficiente de cultivo k_C y es usado para extrapolar la evapotranspiración horaria a periodos mayores como el diario.

4.1.8. Evapotranspiración de referencia en 24 horas (ET_{24})

Lo que sigue es extrapolar los resultados de evapotranspiración de referencia horaria a diaria, para tener los resultados en mm/día. SEBAL calcula la ET_{24} asumiendo que la ET_rF es el mismo que el promedio para 24 horas. Finalmente, el ET_{24} puede calcularse por la ecuación (44).

$$ET_{24} = ET_rF * ET_{r_{24}} \quad (44)$$

Dónde: ET_rF es la fracción de evapotranspiración de referencia horaria y $ET_{r_{24}}$ es la evapotranspiración de referencia acumulada en 24 horas para el día de la imagen (obtenido del *software REF-ET*). La salida será expresada en mm/día.

Este es el último paso del modelo SEBAL, se tiene la evapotranspiración diaria que luego es validada y comparada con datos de referencia.

4.2. Evapotranspiración de referencia (ET_0)

La evapotranspiración de referencia (ET_0) es entregada por el *software REF-ET*, donde se ingresan los datos climáticos para cada fecha de las imágenes, datos que son obtenidos de la estación meteorológica. La tabla 7 presenta las variables meteorológicas consideradas.

Estos datos son entregados por el programa y dependen de los datos meteorológicos que se ingresen, a esto se le multiplica un coeficiente de cultivo si se quiere conocer la evapotranspiración que debería tener tal cultivo, según la FAO-56.

Tabla 7¹.
Variables meteorológicas para estimar ET_0 .

Fecha	Temp máx (°C)	Temp min (°C)	Radiación solar (W/m ²)	Velocidad del viento (m/s)	Temp de rocío (°C)	UTC
16/12/2013	23.6	11.3	875.95	6.5	13	14:29
19/12/2014	29.4	8.7	898.8	10.5	9.6	14:32
22/12/2015	24.1	9.6	867.6	5.0	9	14:35
24/12/2016	27.8	8.5	797.3	4.7	8.3	14:36
30/12/2018	26.7	10.3	876.5	4.0	8.1	14:29
01/12/2019	32.4	8.8	891.7	9.0	8.8	14:16

Fuente: elaboración propia.

4.3. Evapotranspiración de cultivos de referencia (ET_C)

Se determina la evapotranspiración de cultivos de referencia, o de interés (ET_C) mediante la ecuación (45).

$$ET_C = ET_0 * k_C \quad (45)$$

¹ Temperatura máxima y mínima es obtenida durante todo el día, la radiación solar para la fecha y hora de la imagen, la velocidad del viento es medida a 10 metros de altura.

Donde: ET_C es la evapotranspiración de cultivo de interés, expresada en mm/día. ET_0 es la evapotranspiración de referencia y k_C es el coeficiente de cultivo, obtenido de la FAO-56.

4.4. Validación de resultados

Se identifican huertos de cerezos en el área de estudio de los “Campos Roblería Agrícola Garcés”, ubicados en sector sur de la laguna, en las coordenadas -33.8745, -70.9199. Estos fueron digitalizados con el fin de validar los resultados de evapotranspiración obtenidos con la modelo SEBAL (ecuación (44)) y compararlos con la ecuación (45) de cultivos de referencia.

Los campos de cerezos se identifican en la Figura 13, y son los polígonos que se pueden apreciar en color rojo.

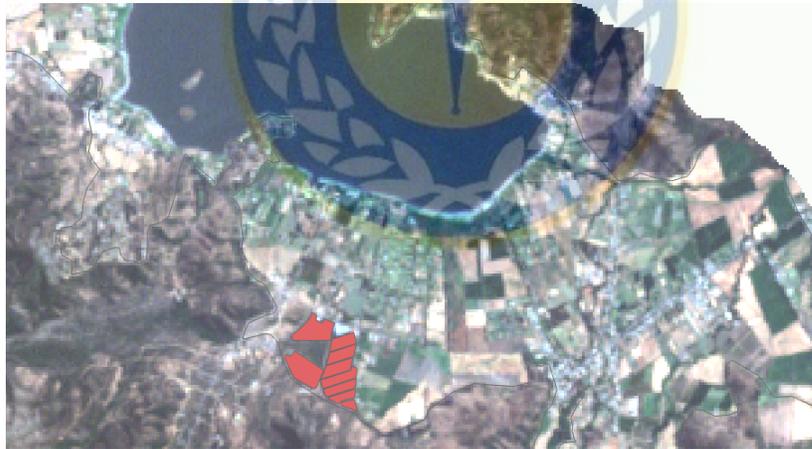


Figura 13. Huertos de cerezos

Fuente: elaboración propia

Una vez digitalizados los huertos de cerezos se ingresan a QGIS3 para analizar la evapotranspiración diaria (ET_{24}) obtenida con SEBAL, así comparar y validar los resultados con la ET_C .

4.5. Digitalización de área de estudio

En la etapa final del proyecto lo que se busca es correlacionar el uso de suelos de cultivos con la desaparición de la laguna, es por esto que en Google Earth Pro se digitaliza alrededor de la laguna todo el suelo que presenta un evidente uso, dejando fuera montañas y vegetación abundante que no se consideran relevantes para el análisis. La figura 14 muestra una digitalización del suelo que es utilizado en el estudio.

Una vez cargada la digitalización a *QGIS3* se cortan los resultados de evapotranspiración diaria para realizar los análisis correspondientes.



Figura 14. Digitalización de la cuenca en estudio.

Fuente: elaboración propia.

4.6. Identificación de cultivos

Uno de los objetivos específicos corresponde a identificar cultivos presentes en el área de estudio, esto es posible ya que se cuenta con valores referenciales de evapotranspiración (ET_C), los que se detallan en la tabla 8. Teniendo estos valores, se pueden comparar con los obtenidos por el modelo SEBAL (4.1.7.) en cada año de estudio.

Cada cultivo tiene una ET_C distinta en cada año de estudio, ya que la ET_0 es calculada considerando las variables meteorológicas para la fecha y hora de la imagen. El coeficiente de cultivo k_C fue obtenido desde el Estudio FAO Riego y Drenaje (FAO 56, 2006).

Tabla 8.
Evapotranspiración de cultivos referenciales.

Cultivo	Fecha	Evapotranspiración de referencia ET_0 (mm/día)	Coefficientes de cultivo k_C	Evapotranspiración de cultivo (mm/día) ET_C
Cerezos	16/12/2013	11.1	0.75	8.33
	19/12/2014	13.8	0.75	10.35
	22/12/2015	12.1	0.75	9.08
	24/12/2016	12.4	0.75	9.30
	30/12/2018	13.5	0.75	10.13
	01/12/2019	15.7	0.75	11.78
Maíz (grano)	16/12/2013	11.1	0.60	6.66
	19/12/2014	13.8	0.60	8.28
	22/12/2015	12.1	0.60	7.26
	24/12/2016	12.4	0.60	7.44
	30/12/2018	13.5	0.60	8.10
	01/12/2019	15.7	0.60	9.42
Trigo	16/12/2013	11.1	0.25	2.78
	19/12/2014	13.8	0.25	3.45
	22/12/2015	12.1	0.25	3.01
	24/12/2016	12.4	0.25	3.10
	30/12/2018	13.5	0.25	3.34
	01/12/2019	15.7	0.25	3.93
Aguacate (paltos)	16/12/2013	11.1	0.75	8.33
	19/12/2014	13.8	0.75	10.35
	22/12/2015	12.1	0.75	9.08
	24/12/2016	12.4	0.75	9.30
	30/12/2018	13.5	0.75	10.13
	01/12/2019	15.7	0.75	11.78
Vid (uvas)	16/12/2013	11.1	0.45	5.00
	19/12/2014	13.8	0.45	6.21
	22/12/2015	12.1	0.45	5.45
	24/12/2016	12.4	0.45	5.58
	30/12/2018	13.5	0.45	6.08
	01/12/2019	15.7	0.45	7.07

Nota: ET_0 es el obtenido con datos meteorológicos en el software ET-REF, k_C se obtuvo del libro FAO56

(FAO, 1990), ET_C es el producto de ET_0 y k_C . Fuente: elaboración propia.

5. Resultados y discusiones

5.1. Huertos de cerezos

Tabla 9.
Diferencia de Evapotranspiración cerezos.

Cultivo	Fecha	Evapotranspiración promedio obtenida (mm/día)	Evapotranspiración de referencia ET_C (mm/día)	Diferencia obtenida (mm/día)	Desviación estándar (σ)
Cerezos	16/12/2013	7.26	8.33	1.07	0.757
	19/12/2014	6.96	10.35	3.39	2.397
	22/12/2015	6.95	9.08	2.13	1.506
	22/12/2016	7.03	9.30	2.27	1.605
	30/12/2018	6.48	10.13	3.65	2.581
	01/12/2019	6.87	11.78	4.91	3.472

Fuente: elaboración propia

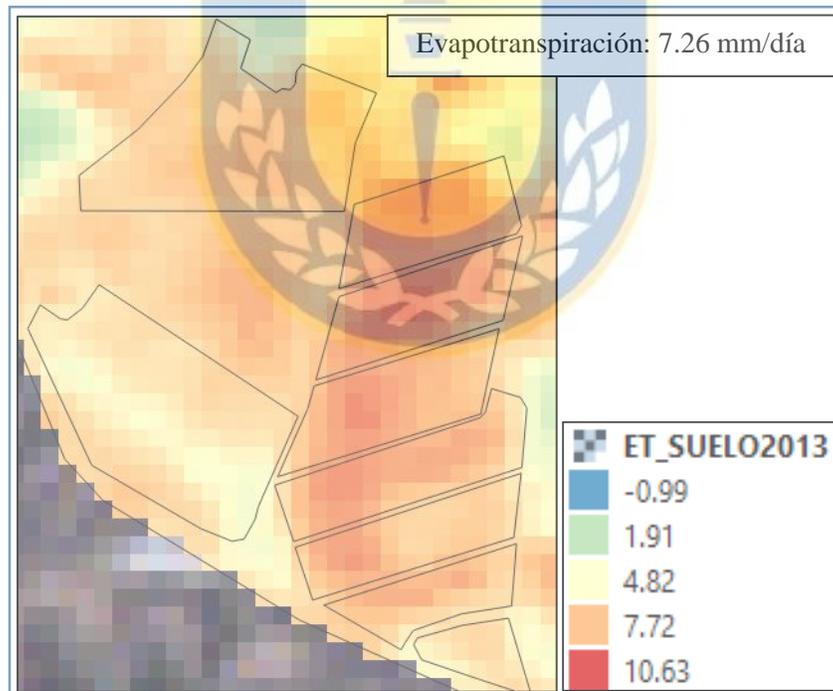


Figura 15. Evapotranspiración de cerezos, 2013.

Fuente: elaboración propia.

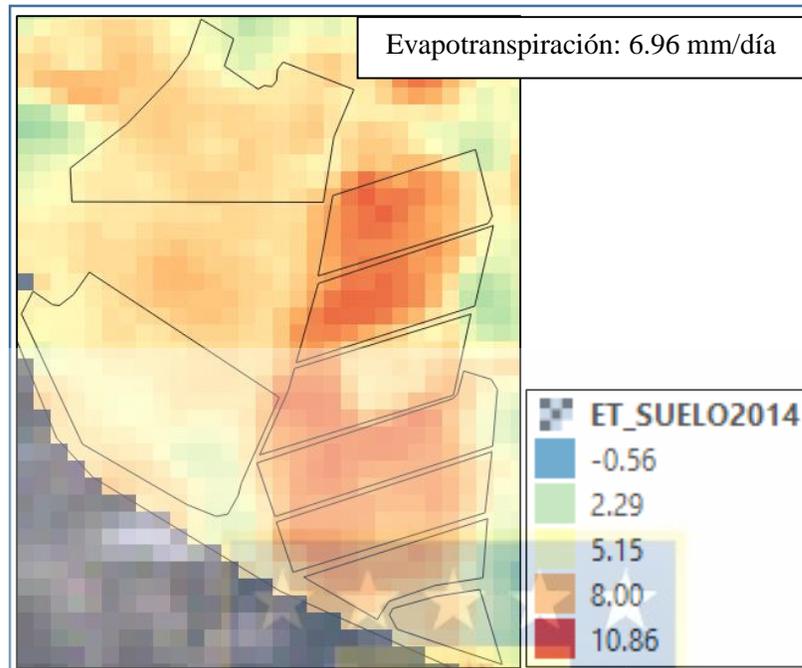


Figura 16. Evapotranspiración de cerezos, 2014.

Fuente: elaboración propia.

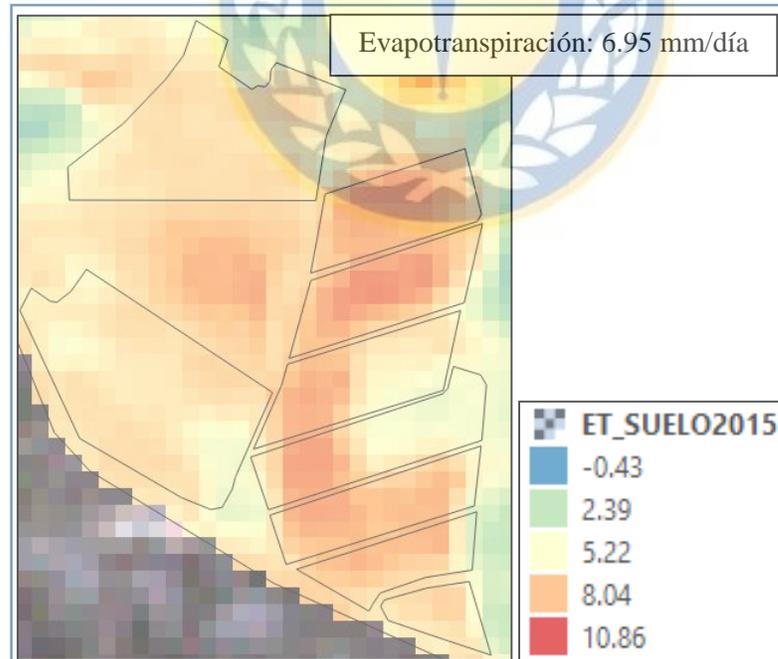


Figura 17. Evapotranspiración de cerezos, 2015.

Fuente: elaboración propia

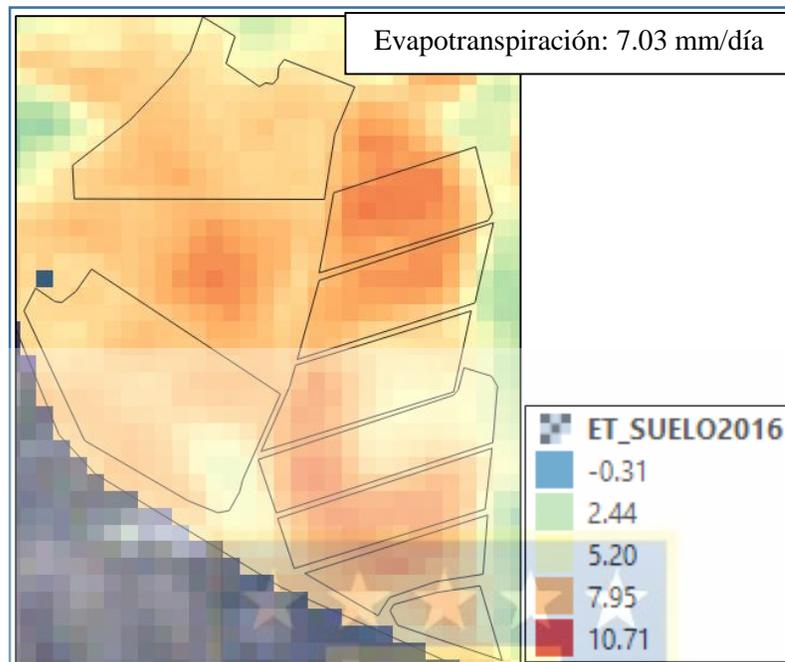


Figura 18. Evapotranspiración cerezos, 2016.

Fuente: elaboración propia.

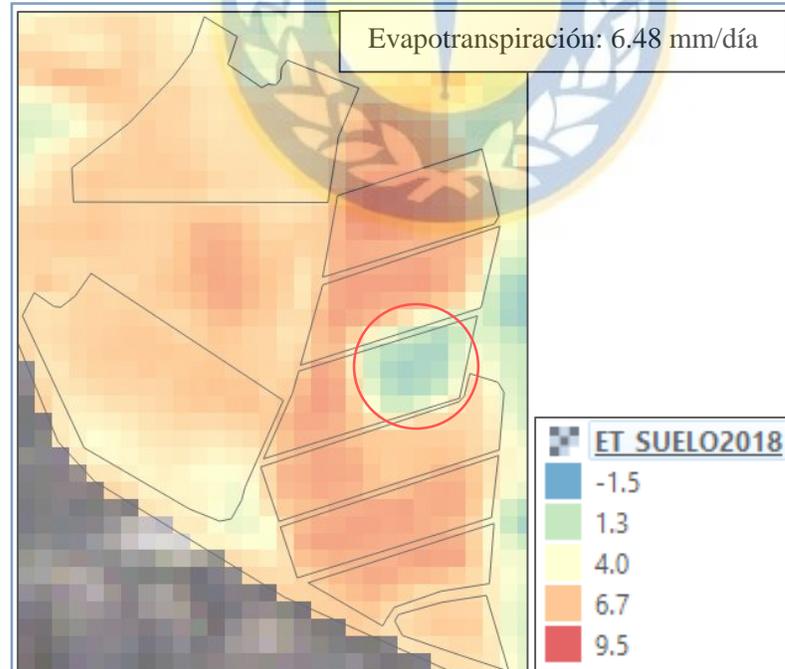


Figura 19. Evapotranspiración de cerezos, 2018.

Fuente: elaboración propia.

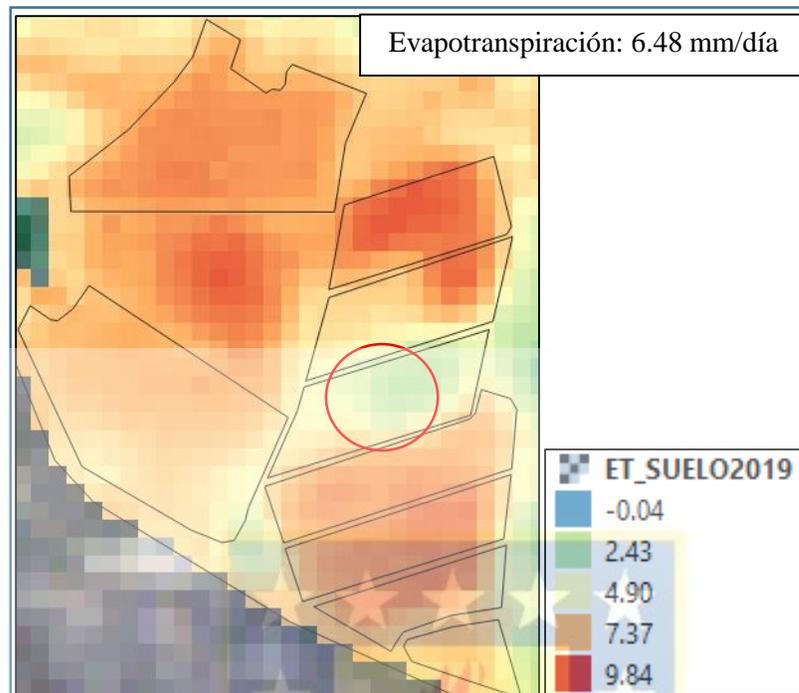


Figura 20. Evapotranspiración cerezos, 2019.

Fuente: elaboración propia

La Tabla 9 presenta las diferencias entre la evapotranspiración obtenidas por el modelo SEBAL y la evapotranspiración de referencia para los cultivos de cerezos. La evapotranspiración mostrada en las Figuras 15 a 20 corresponde al promedio de todos los huertos de cerezos digitalizados.

Se identifican huertos de cerezos en el área de estudio de los “Campos Roblería Agrícola Garcés” donde se valida la información con el administrador del campo, don Eduardo Villarroel. Obtenido de su sitio web (<https://www.garcesfruit.com/donde-estamos/oficinas/>). Estos huertos solo se utilizan para validar los resultados de evapotranspiración estimados mediante el modelo SEBAL.

De las Figuras presentadas anteriormente y la Tabla 9 se tiene lo siguiente:

- Año 2013 (Figura 15): En los huertos de cerezos se obtiene una evapotranspiración promedio de 7.26 mm/día y un valor de referencia de 8.33 mm/día, obteniendo diferencias de 1.07 mm/día. Los valores se acercan bastante a lo que se tiene como referencia de cerezos, lo que puede indicar que son huertos bien administrados con la cantidad de agua necesaria.
- Año 2014 (Figura 16): La diferencia corresponde a 3.39 mm/día para los huertos de cerezos, ya que se obtiene 6.96 mm/día respecto a su referencia (10.35 mm/día).
- Año 2015 (Figura 17): Al igual que el año 2014 la evapotranspiración promedio obtenida es similar, siendo de 6.95 mm/día para el año 2015. Su diferencia con respecto al valor referencial corresponde a 2.13 mm/día.
- Año 2016 (Figura 18): Se obtiene una evapotranspiración promedio de 7.03 mm/día y un valor referencial de 9.30 mm/día.
- Año 2018 (Figura 19): Las diferencias obtenidas en el año 2018 corresponden a 3.65 mm/día, teniendo 6.48 mm/día en la evapotranspiración promedio. El círculo marcado en color rojo de la figura indica que en ese sector probablemente no creció el cultivo ya que se ve una disminución en la presencia de agua, esto hace que el resultado de la evapotranspiración promedio sea menor.
- Año 2019 (Figura 20): Los valores referenciales de evapotranspiración para este año corresponde a 11.78 mm/día, esto no se logra alcanzar en los huertos de cerezos, se muestra un valor promedio de 6.87 mm/día, con una diferencia de 4.91 mm/día. Este año es donde existe una mayor diferencia en lo que respecta a la evapotranspiración de cultivos de cerezos con su valor referencial. Cabe destacar que el campo que contiene el círculo rojo de la figura es donde hay menor presencia

de evapotranspiración, probablemente en este campo no haya crecido de buena manera el cultivo, ya que hay menor presencia de agua en este sector, se repite lo ocurrido en el año 2018.

Las figuras presentadas en este apartado muestran como fue cambiando la evapotranspiración obtenida con el modelo SEBAL en los huertos de cerezos, se tiene la certeza de estos huertos ya que se validó la información previamente. La Tabla 9 ayuda a entender cómo se comportaron los valores obtenidos respecto a los valores referenciales (calculados con datos meteorológicos en software REF-ET). Respecto a las diferencias y la desviación estándar que se presentan, se puede ver que solo en el año 2013 hay una diferencia menor, de no más de 1.1 mm/día. Luego, las diferencias aumentan llegando hasta 3.65 mm/día en el año 2018. Durante el análisis de los años, se puede ver que la evapotranspiración promedio se mantiene constante siendo alrededor de 7.0 mm/día, hay que tomar en cuenta que el valor promedio considera todos los pixeles que se encuentran en la digitalización de los campos de cerezos. Entonces, el valor promedio ha resultado ser menor al referencial ya que se ha considerado aquellos pixeles que contienen un valor menor al resto.

También se puede destacar que todos los años se mantuvo un riego similar en estos huertos, ya que los resultados obtenidos por el modelo se mantienen constante durante el análisis.

5.2. Análisis espaciotemporal de cultivos

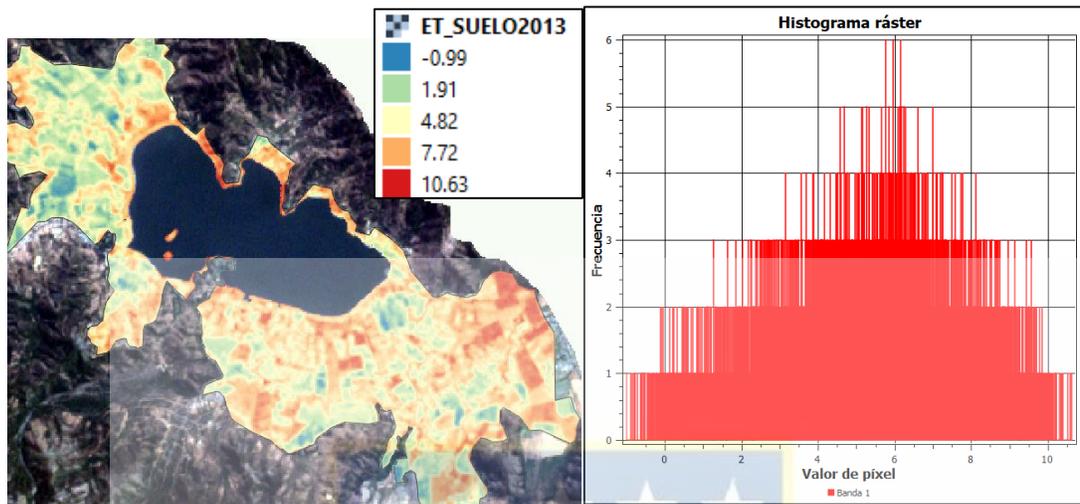


Figura 21. Evapotranspiración de cultivos, 2013

Fuente: elaboración propia.

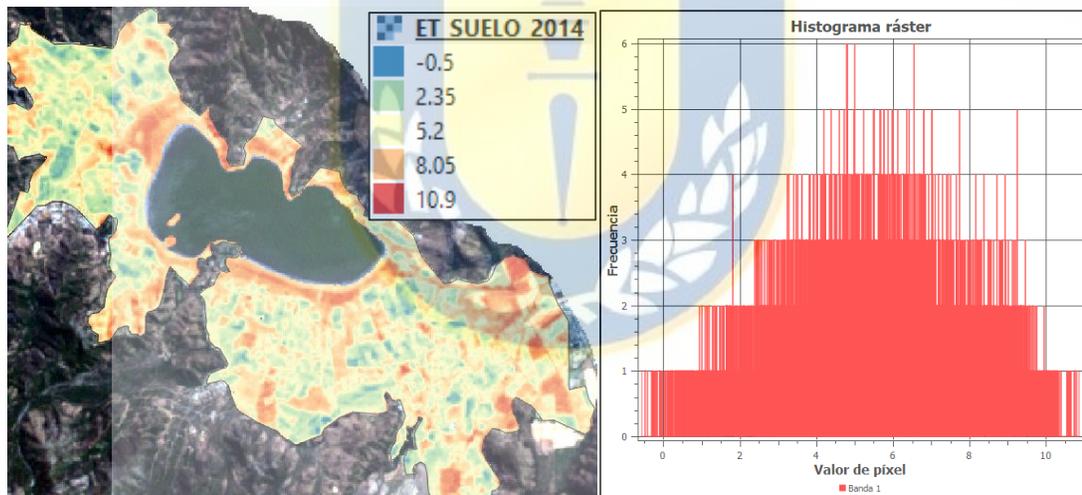


Figura 22. Evapotranspiración de cultivos, 2014.

Fuente: elaboración propia.

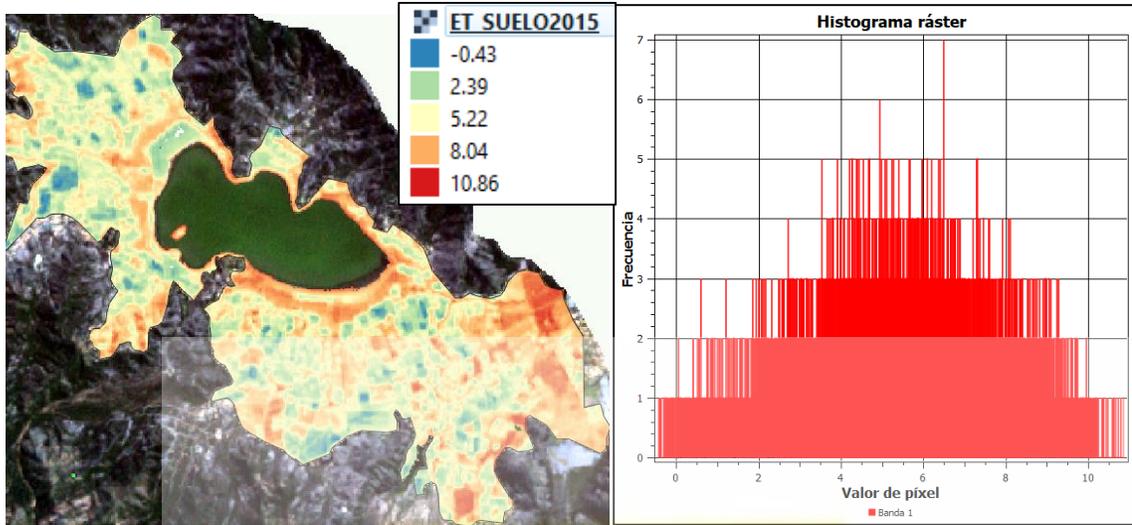


Figura 23. Evapotranspiración de cultivos, 2015.

Fuente: elaboración propia.

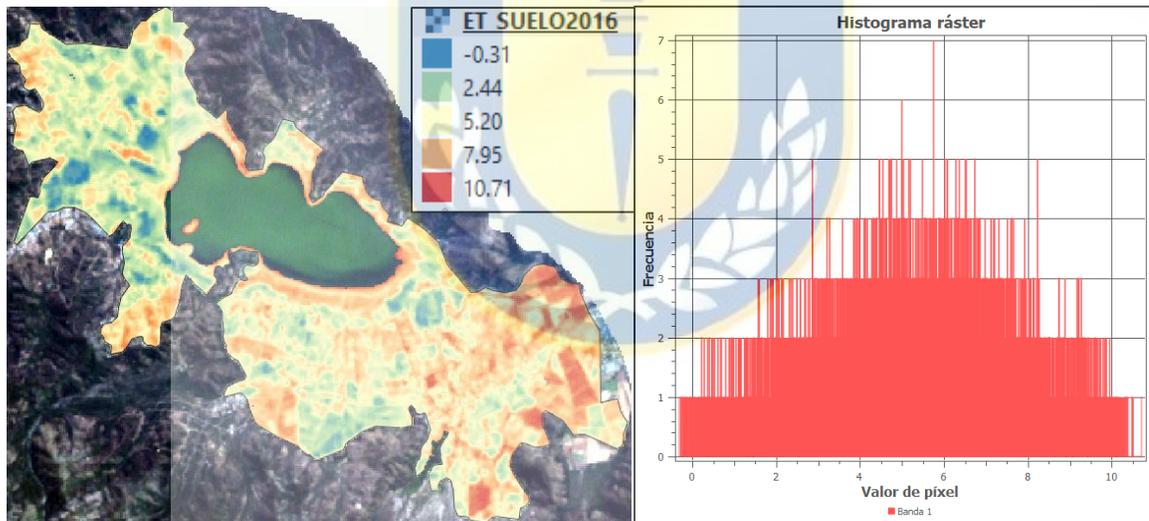


Figura 24. Evapotranspiración de cultivos, 2016.

Fuente: elaboración propia.

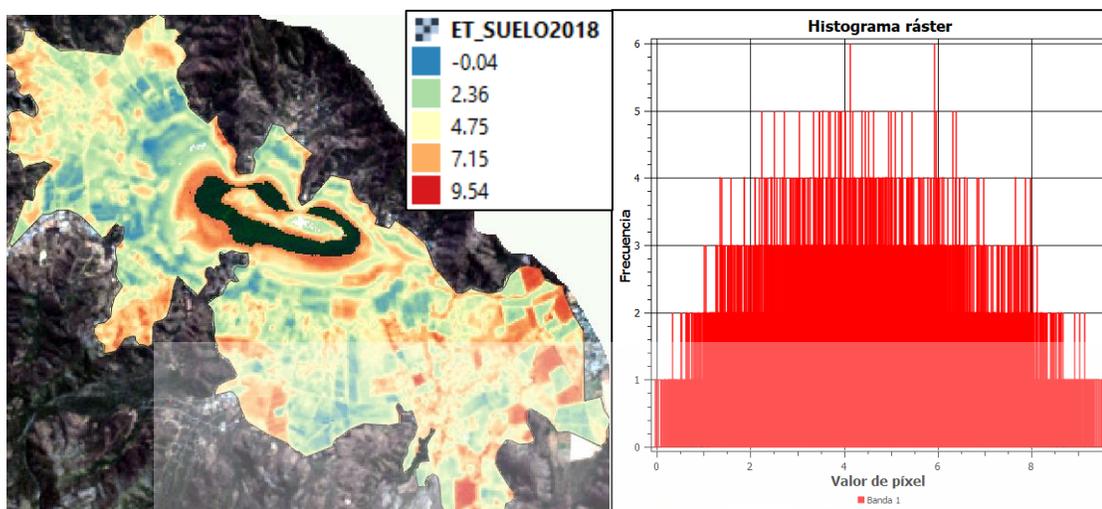


Figura 25. Evapotranspiración de cultivos, 2018.

Fuente: elaboración propia.

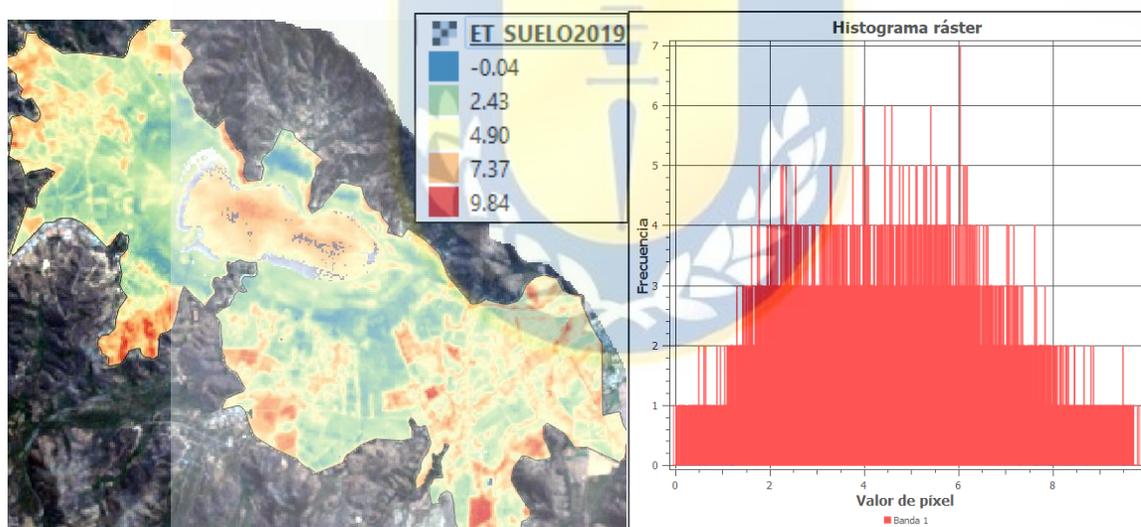


Figura 26. Evapotranspiración de cultivos, 2019.

Fuente: elaboración propia.

Las figuras presentadas en este apartado corresponden a los resultados de evapotranspiración diaria (mm/día) previamente calculadas en 4.1.7 para cada año de estudio. A la derecha de cada figura se presenta un histograma ráster que representa la

distribución de la estimación de evapotranspiración, en el eje de las abscisas se puede ver el valor del pixel que en este caso representa el valor de evapotranspiración correspondiente (mm/día), en el eje de las ordenadas se puede identificar la frecuencia con la cual se presenta en el área de estudio.

En las Figuras 21 a 26 se presenta una paleta de colores que muestra la cantidad de evapotranspiración (mm/día) correspondiente a cada año, desde el color azul que corresponde a zonas sin humedad ya que no existe evapotranspiración hasta el color rojo que corresponde a zonas o cultivos con una gran cantidad de humedad en el suelo.

A continuación se explica un análisis de cada año.

- Año 2013 (Figura 21): el área de estudio presenta bastantes zonas con evapotranspiración mayor a 3.0 mm/día, lo que indica que hay alta presencia de cultivos, específicamente en los alrededores de la laguna, cada zona de color rojo predominante presenta algún cultivo en particular. Su histograma se ve desplazado hacia la derecha, donde los valores de evapotranspiración más altos son más frecuentes.
- Año 2014 (Figura 22): según los resultados obtenidos se ha visto una disminución en estas zonas rojas y un leve aumento en zonas azules que presenta terrenos sin presencia de cultivos. Además, la laguna ha disminuido en comparación al año anterior. su histograma también se presenta más desplazado hacia el centro en comparación al año 2013.
- Año 2015 (Figura 23): se repite lo ocurrido anteriormente donde hay un leve aumento de zonas azules en el área de estudio, además de una disminución del

espejo superficial en la laguna Aculeo. El histograma ráster también está más desplazado hacia el centro.

- Año 2016 (Figura 24): se puede ver que se mantienen algunos cultivos con la mayor evapotranspiración (> 8.0 mm/día), esto ocurre en la zona sureste a la laguna. En el otro extremo, la zona noroeste a la laguna se ve un aumento de sectores más secos (color azul). Además, la laguna sigue perdiendo su espejo superficial.
- Año 2018 (Figura 25): desde el año 2016 al año 2018 bajan considerablemente los cultivos, en especial los que evapotranspiran mayor cantidad de agua (mayor a 6.0 mm/día), hay un aumento de zonas con evapotranspiración cercanas a cero. El histograma ráster desde el año 2016 a 2018 se ha desplazado considerablemente hacia la izquierda, significando que han disminuido los cultivos de mayor evapotranspiración. Además, la Laguna Aculeo ha perdido una cantidad considerable de agua.
- Año 2019 (Figura 26): en el último año del análisis se logran identificar solo algunos sectores que mantienen los cultivos de alta evapotranspiración, aumentan considerablemente las zonas con evapotranspiración cercanas a cero. En el año 2019 la laguna ya no existe, se ha perdido la totalidad del espejo superficial de agua, si bien esta superficie contiene evapotranspiración puede indicar que hay presencia de humedad.

Haciendo un análisis de cada histograma ráster, la frecuencia de cada uno se va desplazando desde la derecha hacia la izquierda en cada año y esto significa que los cultivos de mayor evapotranspiración van disminuyendo, y así, se hacen más presentes aquellos

cultivos que evapotranspiran una menor cantidad de agua. Además, hay cultivos que van desapareciendo.

5.3. Cultivos encontrados

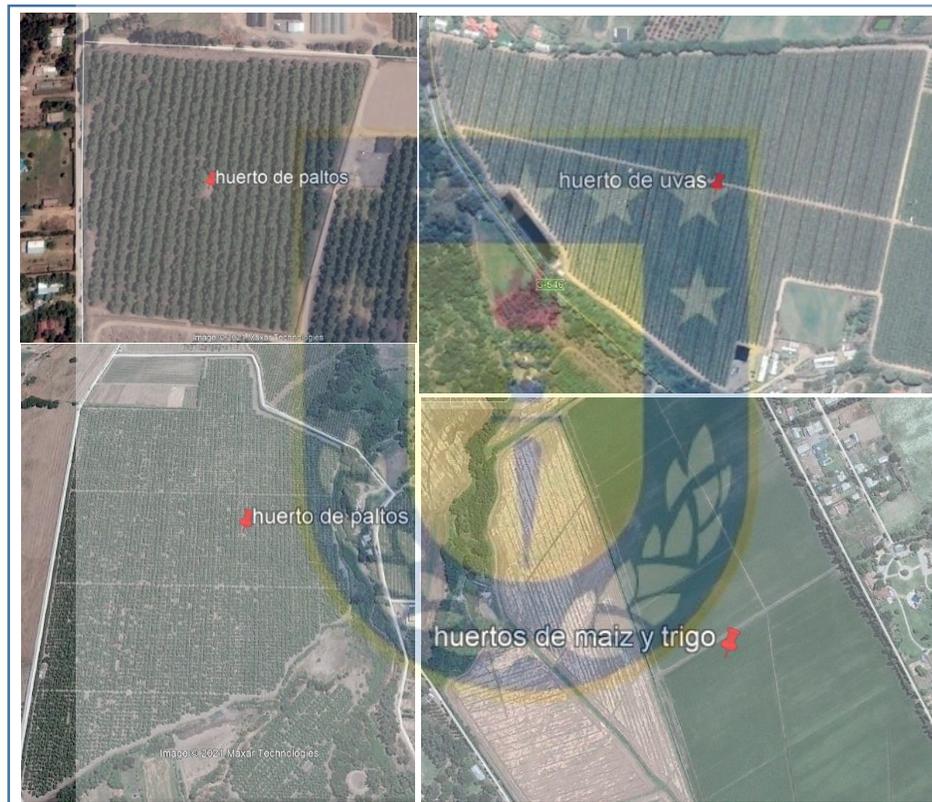


Figura 27. Huertos encontrados.

Fuente: Google Earth Pro.

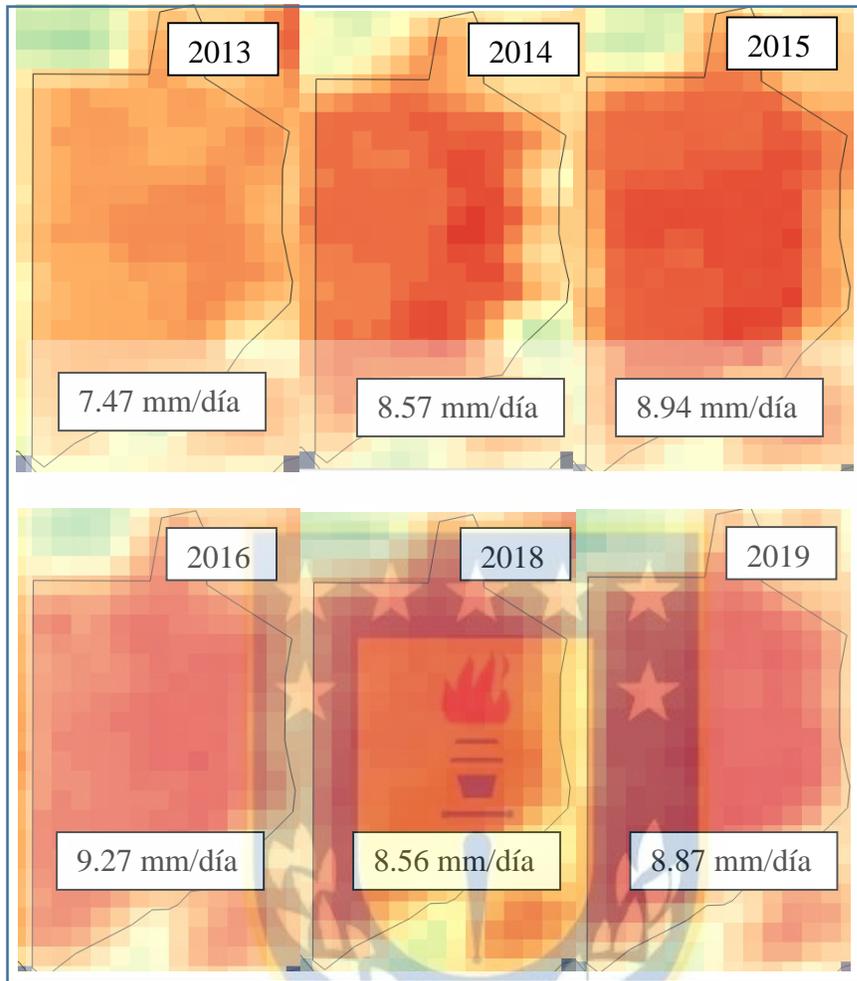


Figura 28. Huerto de paltos.

Fuente: elaboración propia.

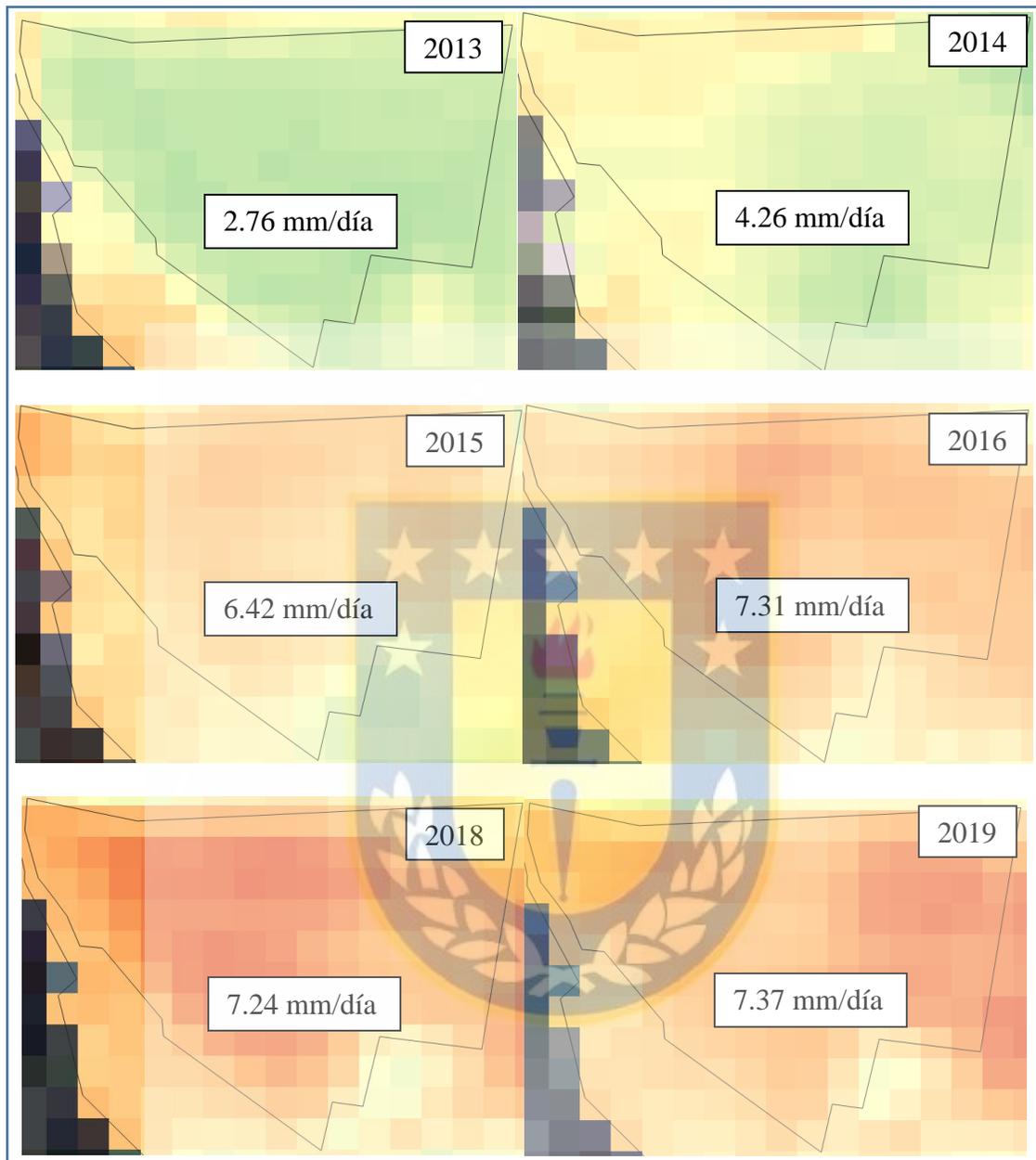


Figura 29. Huerto de uvas.

Fuente: elaboración propia.

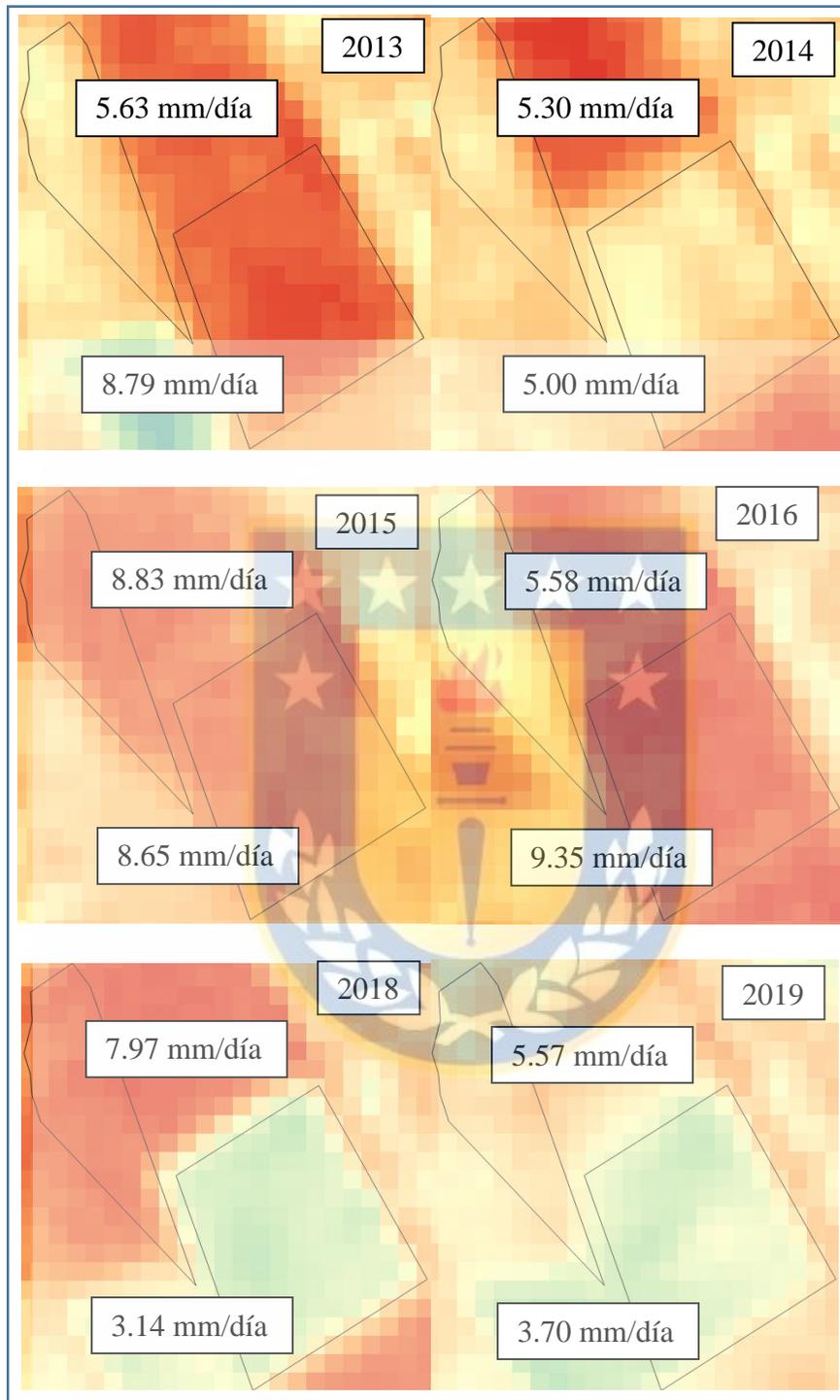


Figura 30. Huertos de maíz y trigo.

Fuente: elaboración propia.

Se digitalizaron algunos campos en Google Earth (Figura 27) para realizar un análisis e identificarlos con respecto a la Tabla 8. En el análisis se logran identificar huertos de paltos, vid, maíz y trigo. Fue posible caracterizar estos cultivos ya que los resultados de evapotranspiración obtenidos con el modelo SEBAL son similares o están dentro de un rango similar a los de cultivos referenciales. Según las estimaciones por el modelo SEBAL se tiene lo siguiente:

- Huerto de paltos (Figura 28): Este es uno de los huertos que evapotranspira la mayor cantidad de agua en toda el área de estudio, los valores promedio que se presenta en cada año indican que ha tenido un riego eficiente, ya que sus resultados se acercan bastante a los valores referenciales (Tabla 8).
- Huerto de vid (Figura 29): En los primeros años de estudio (2013 y 2014) estos campos no evapotranspiraban una cantidad de agua considerable para asociarlo a un huerto de vid, es por esta razón que se piensa que aun el cultivo no era sembrado o bien existía algún otro tipo de cultivo de menor riego. Desde el año 2015 en adelante comienza a aumentar la evapotranspiración en este campo significativamente y sus valores están en los rangos de 5.30 a 7.30 mm/día, al igual que los valores referenciales de cultivo de vid (uvas).
- Huertos de maíz y trigo (Figura 30): Estos huertos cambian bastante en los años de estudio, es por esta razón que se piensa que los cultivos de maíz y trigo se cultivan en conjunto, o que cada año se elige uno u otro cultivo para ser cosechado. En la figura los valores más altos se asocian al maíz, que tiene evapotranspiración entre 7.0 a 8.0 mm/día aproximadamente y los valores más bajos al trigo, que tiene evapotranspiración entre 2.0 a 4.0 mm/día.

Cada cultivo presenta cantidades distintas de evapotranspiración esto es debido a su naturaleza, cantidad de riego que requieren, y etapa de crecimiento. La evapotranspiración de referencia fue posible obtenerla con tan solo algunos datos climáticos por el software REF-ET, además de la evapotranspiración para toda la imagen por el modelo SEBAL. Por otro lado, se tiene el coeficiente de cultivos (K_c) que es distinto en cada cultivo y en cada etapa de crecimiento (FAO, 1990). En este proyecto se trabajó con imágenes satelitales para cada año en el mes de diciembre ya que es donde más riego necesitan la mayoría de los cultivos en Chile (Donoso *et al*, 2009 & Garcia, 2010). Además, se considera el K_c en la etapa final del cultivo.



5.4. Clasificación y cuantificación de cultivos

Tabla 10
Cuantificación de cultivos encontrados.

Año	Evapotranspiración (mm/día)	Posibles huertos	Cantidad
2013	< 2.0	sin cultivos	12
	2.01 - 4	trigo, avena	16
	4.01 - 6	trigo, vid	18
	6,01 - 8	vid, maíz, cítricos	26
	> 8,01	cerezos, paltos, peras, manzanas, kiwis	27
2014	< 2.0	sin cultivos	8
	2.01 - 4	trigo, avena	21
	4.01 - 6	trigo, vid	27
	6,01 - 8	vid, maíz, cítricos	21
	> 8,01	cerezos, paltos, peras, manzanas, kiwis	22
2015	< 2.0	sin cultivos	7
	2.01 - 4	trigo, avena	17
	4.01 - 6	trigo, vid	20
	6,01 - 8	vid, maíz, cítricos	31
	> 8,01	cerezos, paltos, peras, manzanas, kiwis	24
2016	< 2.0	sin cultivos	3
	2.01 - 4	trigo, avena	19
	4.01 - 6	trigo, vid	22
	6,01 - 8	vid, maíz, cítricos	30
	> 8,01	cerezos, paltos, peras, manzanas, kiwis	25
2018	< 2.0	sin cultivos	15
	2.01 - 4	trigo, avena	27
	4.01 - 6	trigo, vid	25
	6,01 - 8	vid, maíz, cítricos	21
	> 8,01	cerezos, paltos, peras, manzanas, kiwis	11
2019	< 2.0	sin cultivos	5
	2.01 - 4	trigo, avena	42
	4.01 - 6	trigo, vid	30
	6,01 - 8	vid, maíz, cítricos	15
	> 8,01	cerezos, paltos, peras, manzanas, kiwis	7

Fuente: elaboración propia.

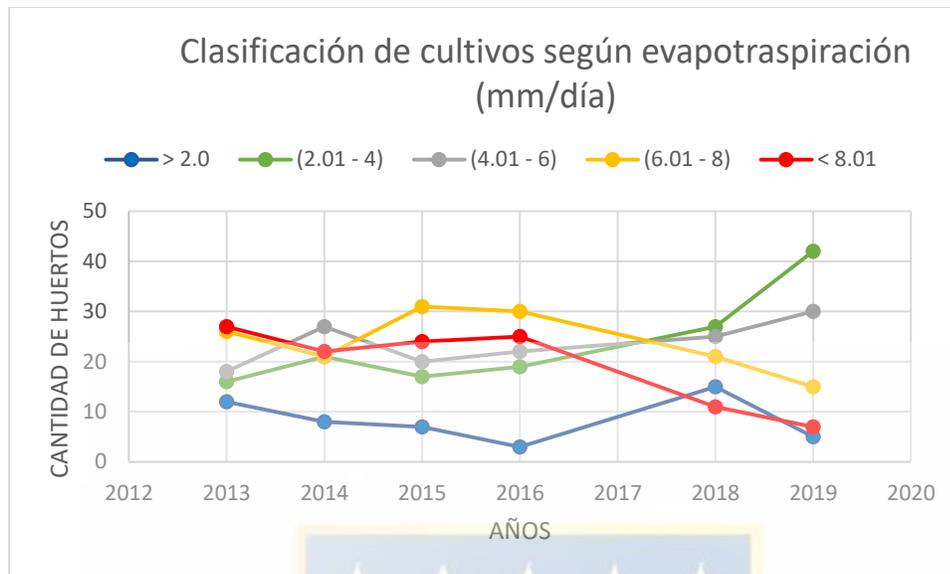


Figura 31. Gráfico de cuantificación de cultivos.

Fuente: elaboración propia.



Figura 32. Huertos en análisis.

Fuente: elaboración propia.

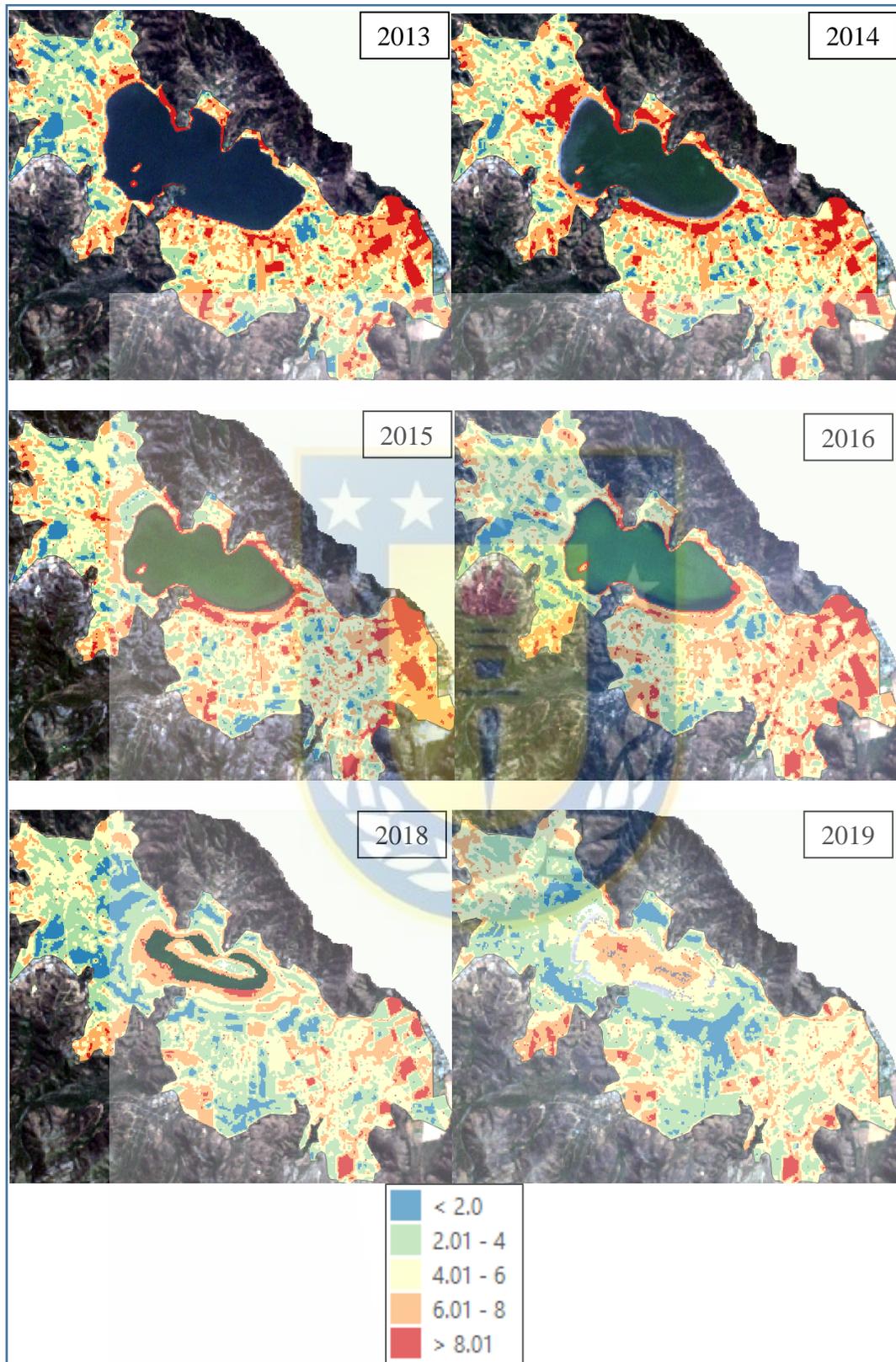


Figura 33. Clasificación de evapotranspiración (mm/día)

Fuente: elaboración propia.

La clasificación presentada en la Figura 33 permitió establecer rangos de evapotranspiración en el área de estudio para todos los años, con la finalidad de identificar donde se pueden repetir los cultivos previamente encontrados (trigo, maíz, paltos, cerezos y vid), o bien cultivos que evapotranspiran la misma cantidad de agua. Se establecieron los rangos tal y como se visualizan en la Figura 33, que ayudó a identificar y cuantificar los cultivos en análisis. Para realizar la cuantificación de una manera más rigurosa se digitalizó zona urbana para crear un polígono que excluya la información de aquel sector (polígonos en la Figura 32). Además, en la Figura 32 se puede ver la enumeración de los cultivos que luego fueron sometidos a una cuantificación para crear la Tabla 10 y el gráfico de la Figura 31.

Finalmente, en la Tabla 10 se presentan los posibles cultivos que pueden existir en estas zonas, se agregaron al análisis la avena, cítricos, peras, manzanas y kiwis, que presentan evapotranspiración similar a los cultivos encontrados previamente. Se identifican un total de 99 cultivos en toda el área de estudio, que permitió crear el gráfico lineal presentado en la figura 31. Si bien los huertos de vid no fueron identificados para el año 2013 en el apartado (5.3), estos igual se incluyen en la Tabla 10 ya que podrían existir en otro sector de área de estudio, luego de la clasificación.

6. Conclusiones y Recomendaciones

En lo que respecta al uso de suelos se puede mencionar que la agricultura es predominante en el área de estudio, y que se viene explotando desde años anteriores a los de este proyecto. Los cultivos encontrados en el área de estudio tuvieron bastantes cambios de un año a otro durante el análisis, por ejemplo el cultivo enumerado 2 (Figura 32) en el año 2016 su evapotranspiración era mayor a 8.01 mm/día, al año 2018 se encontraba en el rango de 2.01 a 4.0 mm/día. Esto ocurre prácticamente en la mayoría de los casos, aunque si se mantuvieron otros cultivos, como en el caso de cerezos y paltos.

En lo que respecta a los huertos de cerezos, estos mantienen una evapotranspiración constante durante todo el análisis, lo que indica que para estos huertos siempre se ha utilizado la misma cantidad de agua para riego.

El uso de suelo del sector Aculeo se mantuvo similar durante los años, la agricultura es una fuente de ingreso para las personas que ahí residen, lo que si fue cambiando son los cultivos que se practican, al pasar los años se fueron haciendo más presentes los cultivos que no requieren tanta agua para crecer y ser cosechados, como lo son el trigo, la avena, las uvas y algunos cítricos. Además, en el año 2019 ya no existía un espejo superficial de la laguna y hubo cultivos que desaparecieron completamente.

El gráfico presentado en la Figura 31 muestra cómo fueron cambiando los cultivos en los rangos que se muestran, por ejemplo, los cultivos mayores a 8.01 mm/día disminuyen considerablemente respecto a los cultivos de 2.01 a 4.0 mm/día, que tuvieron un aumento durante los años de estudio.

Con esto se puede afirmar que el agua de la laguna Aculeo era necesaria para administrar los huertos que se cultivaban, ya que cuando su espejo superficial fue disminuyendo,

también lo hicieron los cultivos de mayor demanda de agua presentes a su alrededor. Hoy en día la fuente de ingresos para las personas del sector Aculeo y que practican la agricultura debe estar dada en su mayoría por cultivos de trigo, avena, maíz, vid y algunos cítricos.

Este proyecto se enfoca especialmente en los cultivos de maíz, vid, cítricos, cerezos, paltos kiwis, entre otros ya que son los más predominantes en el sector Aculeo (CED, 2018).

Según el estudio de Rivas, 2020, existe una correlación entre la pérdida de agua de la laguna con respecto a la baja de precipitaciones, donde se estima que sí tuvieron influencia en el secado de la laguna, en especial en el año 2015 y 2018. Por otro lado, en su estudio se señala que las temperaturas medias no tuvieron una relación directa en el secado de la laguna. Si bien, las variables meteorológicas consideradas en este estudio (temperaturas extremas (°C), radiación solar (W/m^2), velocidad del viento (m/s) y temperatura de rocío (°C)) luego de procesarlas, resultan para cada año un aumento en la evapotranspiración de referencia (ET_0) (Tabla 8), esto implica aumentar el riego para los cultivos presentes.

La laguna ha presentado los cambios en su nivel de agua por la gran cantidad de cultivos existentes en su alrededor, desde los primeros años del análisis se identifican bastantes sectores que presentan huertos con una alta cantidad de evapotranspiración, estos huertos son los que demandan un mayor riego y son los que causan las disminuciones en el nivel de la laguna. Sin embargo, una solución fue cambiar el tipo de cultivos, a unos que demanden menos agua, esto por no contar con el suministro de la laguna, que se tenía años anteriores.

Para encontrar información sobre las variaciones superficiales de la laguna en el periodo 2006-2019 se puede acceder al estudio de Rivas, 2020. Además, se cuenta con la información sobre la correlación y comportamiento de las temperaturas y precipitaciones con respecto a la laguna.

Para realizar un análisis más riguroso, se recomienda aumentar la cantidad de años, en este estudio se necesitan datos claves como la velocidad del viento, la cual proviene de la estación meteorológica EL PAICO, esta estación cuenta con información desde el año 2013 en adelante, por lo que se limita a realizarlo desde años anteriores.

Se recomienda aplicar imágenes satelitales con una mejor resolución multiespectral LANDSAT 7 tiene una resolución de 30m, otra opción pudo haber sido aplicar una corrección pancromática para mejorar la resolución a 15m, proceso que no fue ejecutado en este proyecto.

El cálculo de la evapotranspiración con el modelo SEBAL depende mucho de la elección del pixel ancla “caliente”, ya que el pixel elegido debe responder algunas condiciones como estar ubicado en un suelo desnudo, donde se tenga la certeza de que no existe evapotranspiración y debe contener la mayor temperatura superficial. Además, el proceso de iteración debe estabilizar los valores de resistencia aerodinámica (r_{ah}) y diferencia de temperatura (dT) al máximo. En este proyecto, se considera estable hasta la iteración número 10, en los anexos desde la tabla 10 a la 16 se muestran los valores de r_{ah} y dT luego del proceso de iteración. Los valores negativos de evapotranspiración que se representan en las figuras 21 a 26 deben acercarse a 0 con una mayor cantidad de iteraciones.

Hay que considerar que los datos climáticos recopilados fueron obtenidos de una estación meteorológica que está ubicada a unos 25 km de la laguna. Por lo que pueden existir inexactitudes en las variables climáticas consideradas en este proyecto.



7. Referencias

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., (1998). Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, pp. 6541
- Allen, R., Tasmi, M., Trezza, R., & Bastiaanssen, W. (2002). Idaho Implementation Surface Energy Balance Algorithms for Land – SEBAL. Advanced Training and Users Manual, pg-98.
- CED, 2008. Centro de Estudios para el Desarrollo. Diseño y Ejecución de un Programa de Gestión Ambiental Participativo para la cuenca de Aculeo, Región Metropolitana de Santiago, Chile.
- Donoso, G., Montero, J., Meza, F., & Vicuña, S. (2009). Adaptacion a los impactos del cambio climático en la agricultura de riego en Chile central. En *Camino al Bicentenario: Propuestas para Chile*. (pp. 23-48). Santiago, Chile.
- FAO, Estudio FAO Riego y Drenaje - 56. 1990. Evaporación del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.
- Fontal, B. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. *Escuela de La Ingeniería, 1*, 24.
- Garcia, P. (2010). *Cuantificación de escenarios de escasez hídrica y su efecto sobre la disponibilidad de agua para riego en la cuenca del rio Maipo*. (Memoria de título). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Garreaud, R., Alvarez, C., Barichivich, J., Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., ... & Zambrano, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology & Earth System Sciences*, 21(12).

- Huamán, H. (2015). *Estimación espacial de la evapotranspiración real usando imágenes de satélite mediante algoritmo SEBAL caso: Irrigación majes I-arequipa*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.
- Huerta, P., & Cirila, Y. (2018). Estimación espacial de la evapotranspiración del maíz (*Zea mays*) mediante el algoritmo Sebal en el callejón de Huaylas año 2016. (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú.
- Meireles, M. (2007). Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5-TM na Bacia do Acaraú, CE. (Disertacion de Maestrado). Universidad Federal de Ceará, Brasil.
- Núñez, C. (2009). Modelación del flujo de calor del suelo y aplicación de algoritmo de cálculo de evapotranspiración mediante teledetección. (Tesis). Universidad Católica de Chile, Chile.
- PANCC. 2017. Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022. Gobierno de Chile, Chile.
- Rivas, C. (2019). *Análisis multicriterio para la recuperación de la laguna Aculeo*. (Proyecto de grado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Rivas, F. (2020). *Cuantificación de las variaciones superficiales de la laguna Aculeo en el periodo 2006-2019 e influencia climática en el desecado de su espejo de agua*. (Proyecto de Título). Universidad de Concepción, Los Ángeles, Chile.
- Villegas, H. (2008). Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas (Guías para los asistentes). Ministerio de Minas y Energía, Instituto Colombiano de Geología y Minería, Colombia.

Weligepolage, K., 2005. *Estimation of spatial and temporal distribution of evaporatranspiration by satellite remote sensing – A case study in Hupselse Beek.* 114 f. (Dissertação de Mestrado). International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Países Baixos



8. Anexos

Para No.	beg ID	end col	The following lists of items are to be read from the Data File:
1	4		Day, 1-31
2	3		Month, 1-12
3	10		Year, 0000-2099
4	19		Min Air Temp, C (daily or hourly)
5	18		Max Air Temp, C (daily or hourly)
6	27		Solar Radiation, W/m2
7	58		Ave. Wind Speed, m/s
8	41		Dewpoint Temperature, C

	1	2	3	4	5	6	7	8	
12345678901234567890	12345678901234567890	12345678901234567890	12345678901234567890	12345678901234567890	12345678901234567890	12345678901234567890	12345678901234567890	1234567890	1234567890
dia	mes	año	tmin	tmax	rad_sol	vel	td		
22	12	2015	9.6	24.1	867.6	5.0	9.0		
24	12	2016	8.5	27.8	797.3	4.7	8.3		
01	12	2019	8.8	32.4	891.7	9.0	8.8		

ET OUTPUT MODES and REFERENCE EQUATIONS

OUTPUT STYLE AND EQUATIONS

UNITS for Results

System International Units
 English Units

OUTPUT

Screen Only
 File and Screen

INTERMEDIATE FILES (in2 is recommended)

EVAPOTRANSPIRACION.in1
 EVAPOTRANSPIRACION.in2

REFERENCE CHARACTERISTICS

Alfa/Gross Ref. Ratio: (1.15 to 1.25)

(1) The following heights are for nonstandard settings in the PM full form eqs. (Varying these is not recommended)

ASCE full PM: Alf. Ref. Ht. m (0.5 m = Std.)
ASCE full PM: Grass Ht. m (0.12 m is Std.)
(These heights are used unless read from data file)

(2) The following surface resistances are for nonstandard settings in the full form PM (varying these is not recommended)

for hourly

	24-hour		Daytime		Nighttime	
Alf:	<input type="text" value="45"/>	(45)	<input type="text" value="30"/>	(30)	<input type="text" value="200"/>	(200) s/m
Gr:	<input type="text" value="70"/>	(70)	<input type="text" value="50"/>	(50)	<input type="text" value="200"/>	(200) s/m

Skip Printing 'Header' Information in The Result File

Select equations

ETr ETo

- ASCE Penman-Monteith Standardized Form (ETr and ETo)
- FAO 56 Penman-Monteith (0.12 m grass reference)
- ASCE Penman-Monteith (full form) with rs=(timestep, Ht) ←(see (1) for height info)
- ASCE Penman-Monteith (full form) with user specified rs ←(see (1),(2) for height and rs info)
- 1982,96 Kimberly Penman (var. wind func.) (ETr and ETo)
- 1972 Kimberly Penman (fixed wind function) (for ETr only)
- 1942/1963 Penman (original wind function)
- FAO 24 Corrected Penman
- FAO Plant Protection Paper 17 Penman
- CIMIS Penman (hourly only) with FAO-56 Rn, G=0
- FAO 24 Radiation
- FAO 24 Blaney-Criddle
- FAO 24 Pan Evaporation
- 1985 Hargreaves (Hargreaves and Samani)
- Priestley-Taylor (1972)
- Makink (1957)
- Turc (1961)
- ET from the data file (reported or meas.)

NOTE: Check Boxes preceded by a ● will use the specified Reference Ratio to Convert for Reference Type

Specify How to Handle Missing Data

Save Definition File Back Exit Continue

Mo	Day	Yr	Tmax C	Tmin C	Rs MJ/m ²	W/nd m/s	DewP C	ASCE StPM ETr mm/d	ASCE StPM ETo mm/d	FAO 56PM ETo mm/d
12	16	2013	23.60	11.30	75.68	6.50	13.00	12.2	11.1	11.1
12	19	2014	29.40	8.70	77.66	10.50	9.60	17.5	13.8	13.8
12	22	2015	24.10	9.60	74.96	5.00	9.00	13.7	12.1	12.1
12	24	2016	27.80	8.50	68.89	4.70	8.30	14.6	12.4	12.4
11	25	2017	24.20	8.90	75.50	7.50	10.20	13.0	11.2	11.2
12	30	2018	26.70	10.30	75.73	4.00	8.10	15.3	13.5	13.5
12	1	2019	32.40	8.80	77.04	9.00	8.80	20.1	15.7	15.7

Figura 34. Proceso de ejecución en REF-ET.

Las siguientes 6 tablas muestran los resultados de las variables r_{ah} y dT luego del proceso iterativo

Tabla 11.
Estabilidad de Dt y Rah en la fecha 16/12/2013.

coeficientes		n	ESTABILIDAD px caliente	
a	b		DT	Rah
0.1693	-50.385	1	2.781	23.078
0.1275	-37.942	2	2.094	17.532
0.1346	-40.072	3	2.212	18.477
0.1337	-39.796	4	2.197	18.355
0.1338	-39.812	5	2.198	18.363
0.1336	-39.765	6	2.195	18.342
0.1338	-39.813	7	2.198	18.363
0.1336	-39.768	8	2.195	18.343
0.1338	-39.823	9	2.198	18.367
0.1337	-39.799	10	2.197	18.357

Tabla 12.
Estabilidad de Dt y Rah en la fecha 19/12/2014.

coeficientes		n	estabilidad	
a	b		DT	Rah
0.0953	-28.178	1	1.622	13.584
0.0908	-26.849	2	1.546	12.828
0.0908	-26.841	3	1.545	12.821
0.0893	-26.387	4	1.519	12.800
0.0912	-26.965	5	1.552	13.061
0.0911	-26.939	6	1.551	13.049
0.0911	-26.946	7	1.551	13.052
0.0912	-26.955	8	1.552	13.056
0.0912	-26.927	9	1.550	13.043
0.091	-26.891	10	1.548	13.027

Tabla 13.
Estabilidad de Dt y Rah para la fecha 22/12/2015.

coeficientes		n	ESTABILIDAD px caliente	
a	b		DT	Rah
0.1848	-54.840	1	3.784	34.885
0.1075	-31.902	2	2.201	20.528
0.1223	-36.308	3	2.505	23.251
0.1197	-35.522	4	2.451	22.768
0.1200	-35.611	5	2.457	22.822
0.1199	-35.594	6	2.456	22.811
0.1201	-35.65	7	2.460	22.846
0.1200	-35.625	8	2.458	22.831
0.1201	-35.649	9	2.460	22.846
0.1200	-35.621	10	2.458	22.828

Tabla 14.
Estabilidad de Dt y Rah para la fecha 24/12/2016.

coeficientes		n	estabilidad	
a	b		DT	Rah
0.1732	-51.383	1	3.799	35.042
0.0996	-29.558	2	2.186	20.387
0.1146	-34.007	3	2.515	23.340
0.1116	-33.097	4	2.447	22.738
0.1119	-33.201	5	2.455	22.806
0.1120	-33.238	6	2.458	22.832
0.1121	-33.260	7	2.459	22.846
0.1120	-33.226	8	2.457	22.823
0.1120	-33.216	9	2.456	22.816
0.1118	-33.179	10	2.453	22.792

Tabla 15.
Estabilidad de Dt y Rah en la fecha 30/12/2018.

coeficientes		n	estabilidad	
a	b		DT	Rah
0.0665	-19.816	1	1.666	38.081
0.0461	-13.734	2	1.155	26.520
0.0495	-14.759	3	1.241	28.460
0.0490	-14.611	4	1.228	28.182
0.0491	-14.640	5	1.231	28.236
0.0491	-14.633	6	1.230	28.222
0.0491	-14.615	7	1.229	28.189
0.0489	-14.571	8	1.225	28.104
0.0491	-14.620	9	1.229	28.197
0.0490	-14.583	10	1.226	28.128

Tabla 16.
Estabilidad de Dt y Rah para la fecha 01/12/2019.

coeficientes		n	ESTABILIDAD px caliente	
a	b		DT	Rah
0.0364	-10.953	1	0.925	17.777
0.0337	-10.15	2	0.858	16.518
0.0347	-10.434	3	0.882	16.977
0.0338	-10.16	4	0.858	16.532
0.0339	-10.201	5	0.862	16.598
0.0339	-10.207	6	0.862	16.607
0.0339	-10.211	7	0.863	16.614
0.0339	-10.214	8	0.863	16.619
0.0339	-10.216	9	0.863	16.622
0.0340	-10.218	10	0.863	16.624

Resultados del Flujo de Calor Sensible (H). Donde $H1_c$ es el primer resultado, y $H10_c$ representa el resultado de H , luego de la iteración número 10.

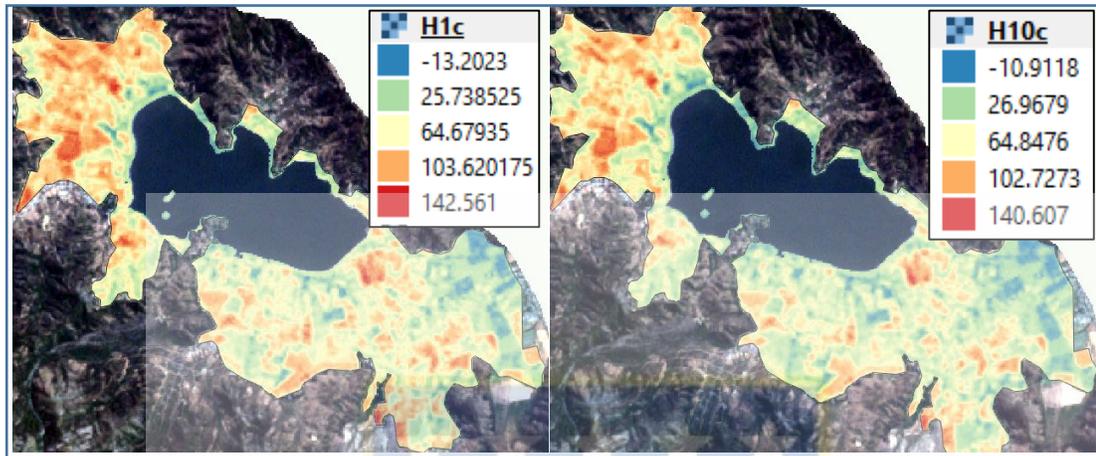


Figura 35. Resultado de H , año 2013.

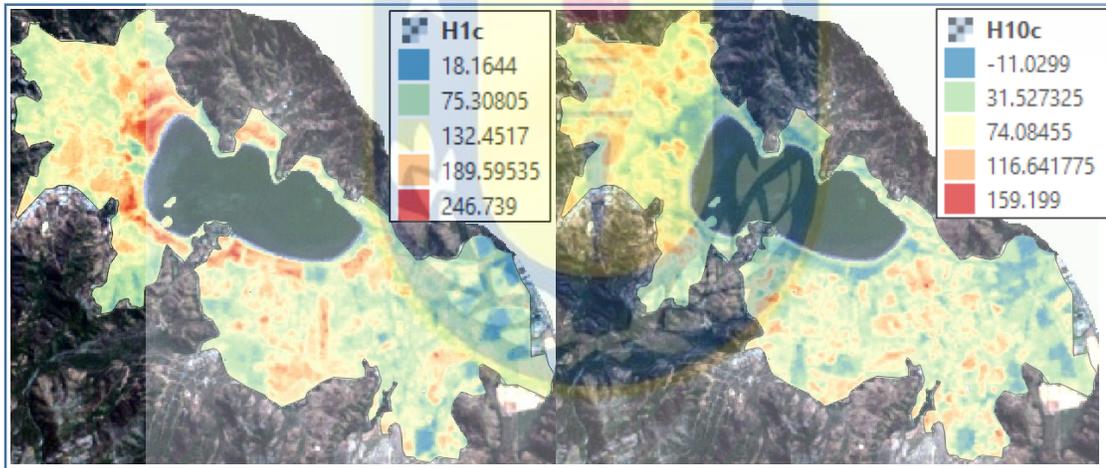


Figura 36. Resultado de H , año 2014.

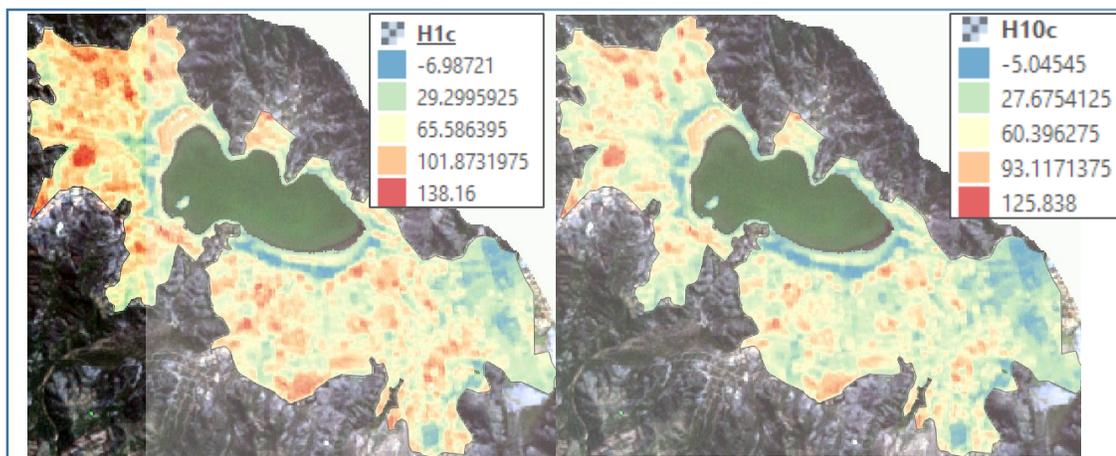


Figura 37. Resultado de H , año 2015.

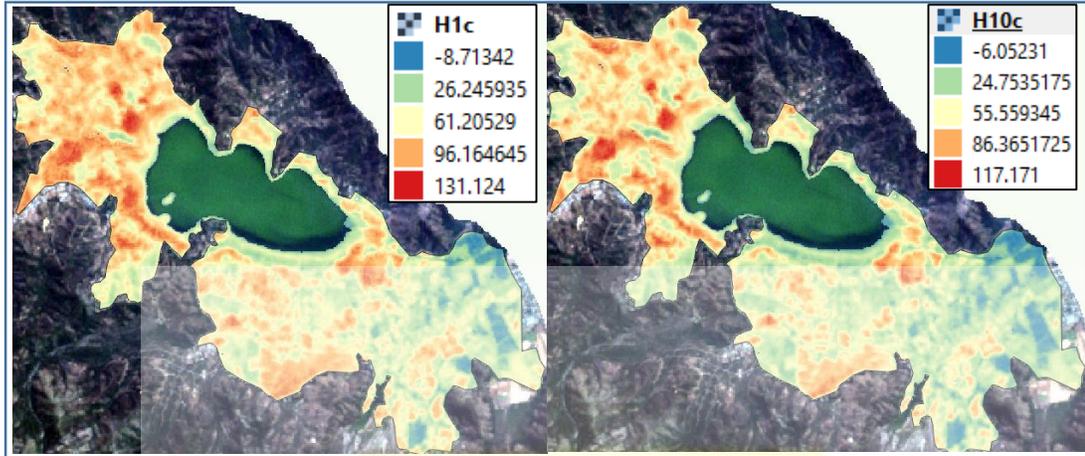


Figura 38. Resultado de H, año 2016.

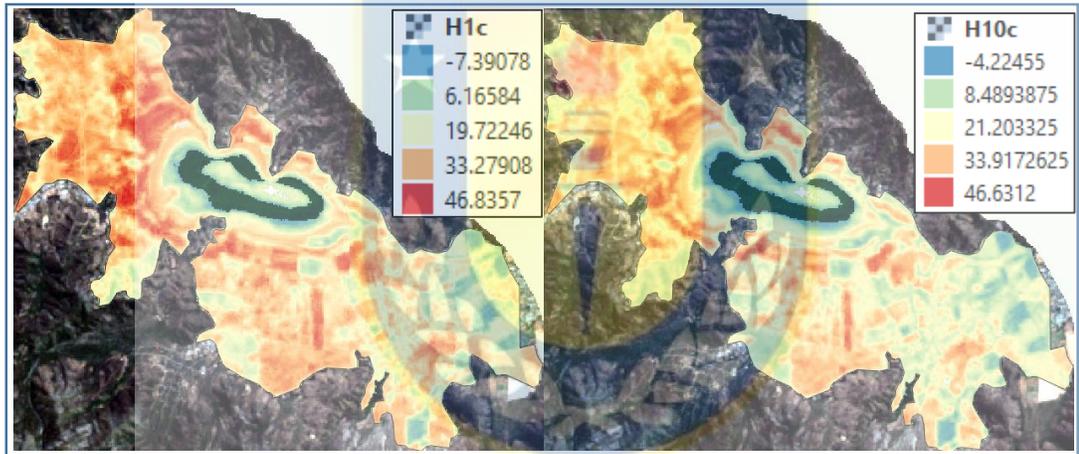


Figura 39. Resultado de H, año 2018.

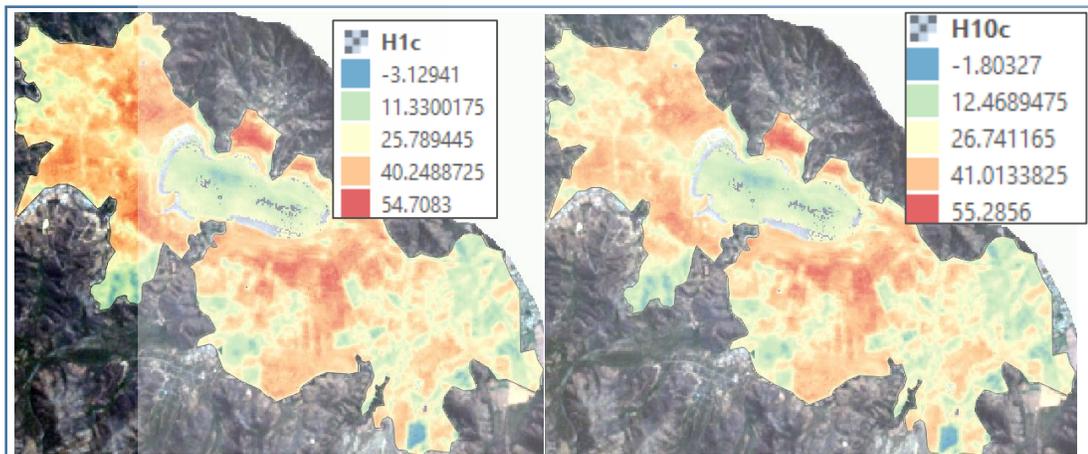


Figura 40. Resultado de H, año 2019.

Huertos de cultivos encontrados.



Figura 41. Ubicación de huertos encontrados.

Tabla 17.
Coordenadas de huertos encontrados.

Cultivo	Ubicación	
	Latitud	Longitud
Uvas	-33.863843°	-70.925276°
Cerezos	-33.873144°	-70.937482°
Paltos	-33.889937°	-70.877436°
Maíz y trigo	-33.870960°	-70.859434°

8.1. Calculo Radiacion Neta (R_n)

8.1.1. Albedo Superficial (α)

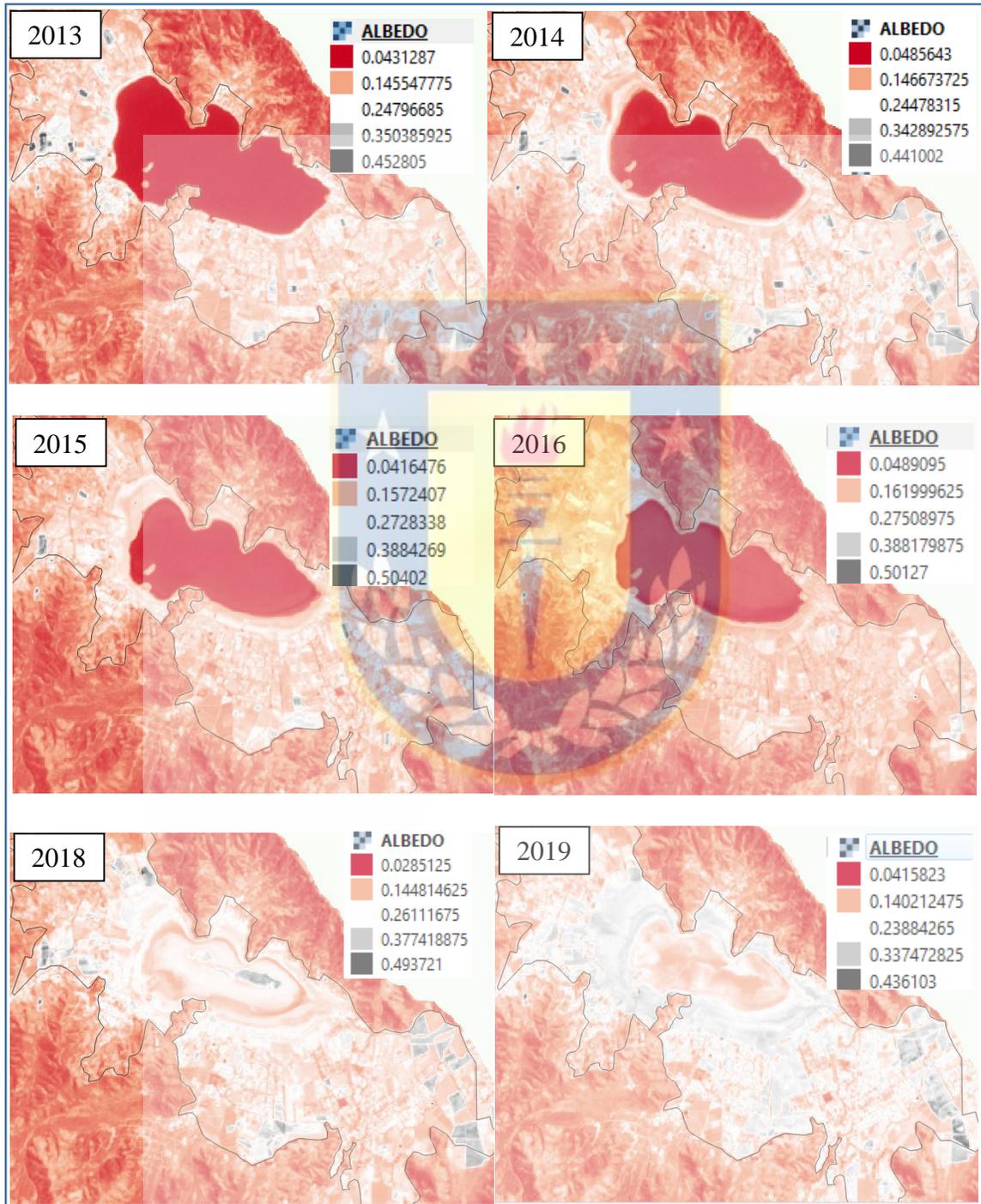


Figura 42. Resultados de albedo superficial

8.1.2. Radiacion neta (R_n)

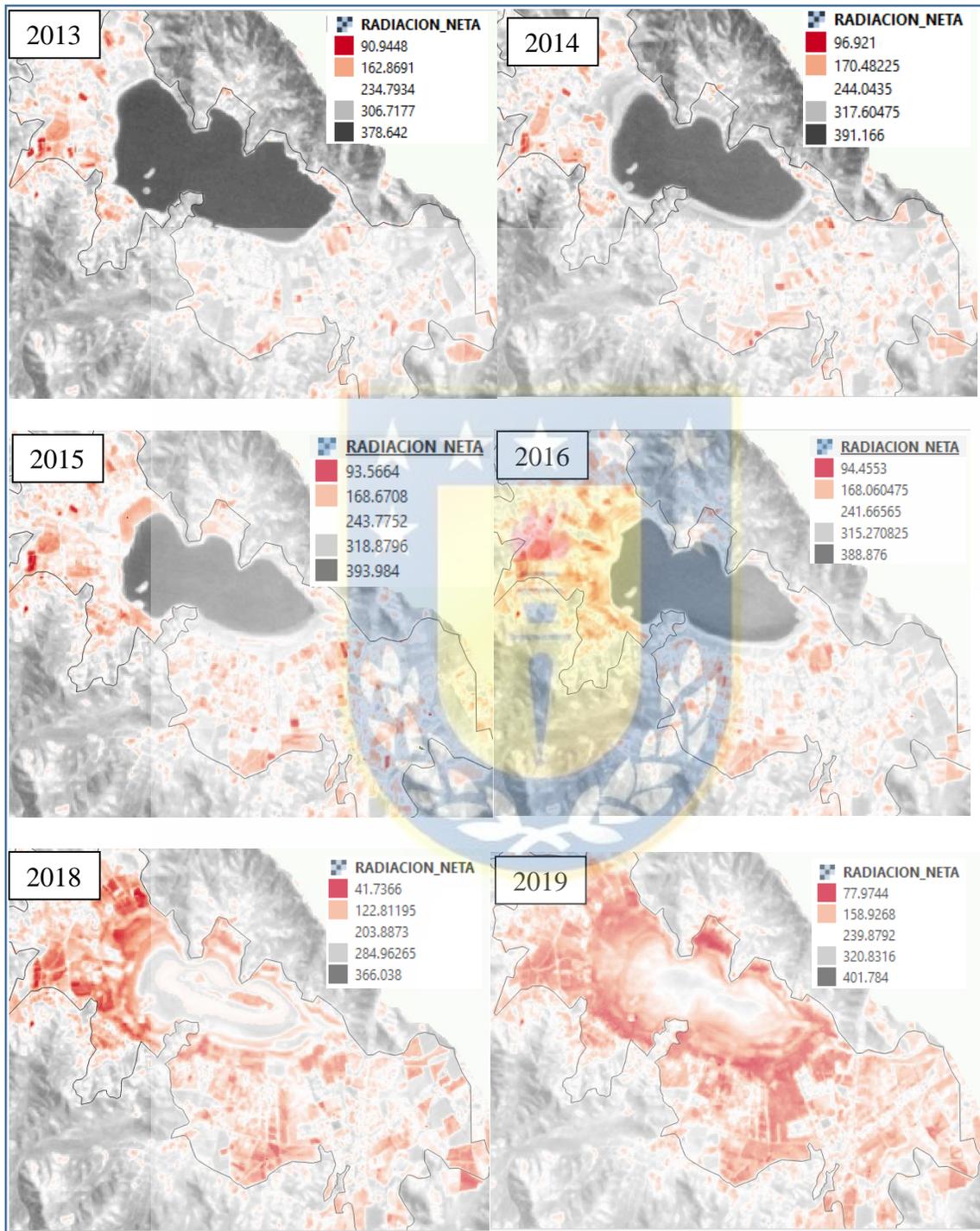


Figura 43. Resultados de Radiación Neta.

8.2. Flujo de calor del suelo (G)

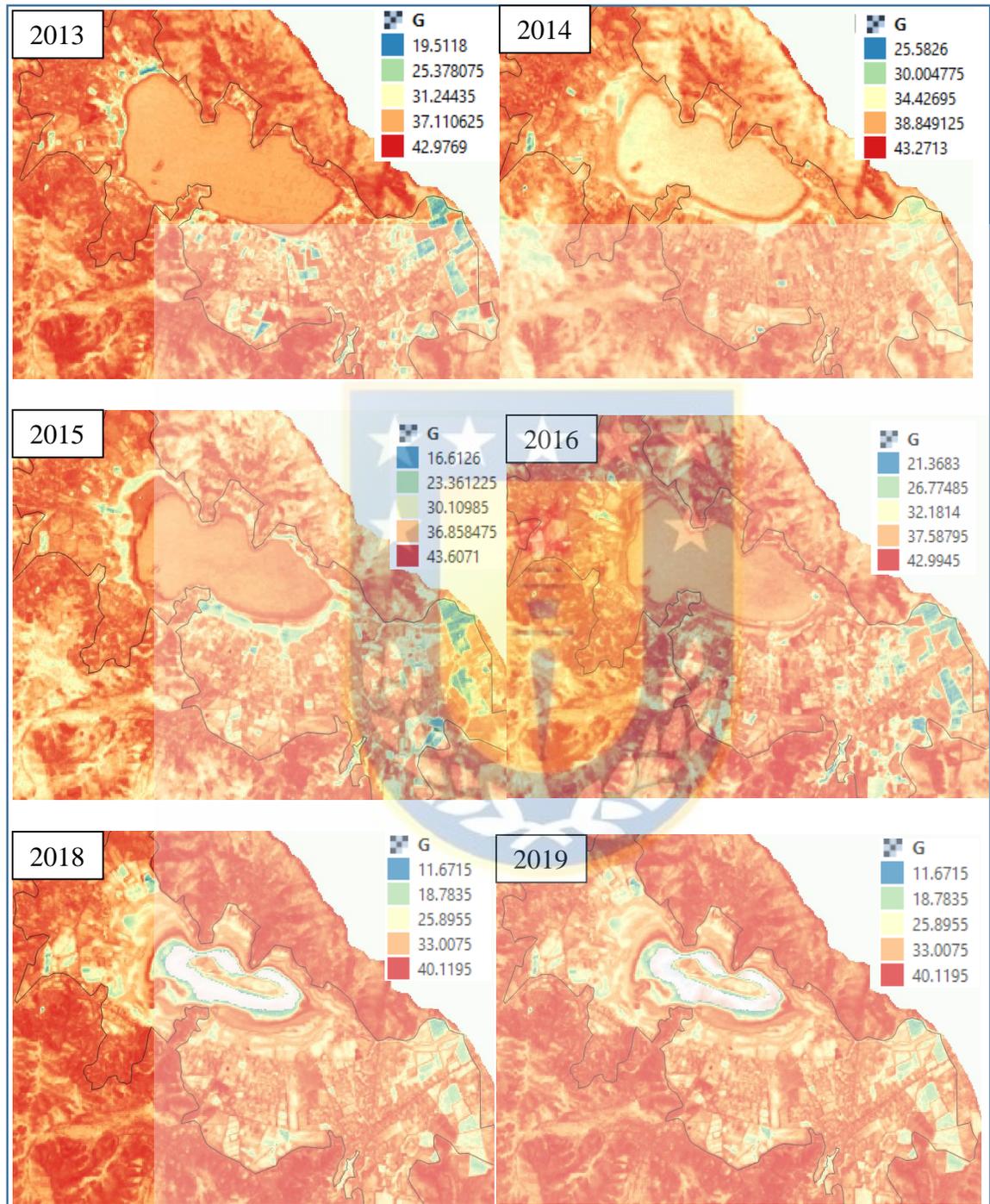


Figura 44. Resultados de Flujo de calor del suelo.

8.3. Flujo de calor del suelo (H)

Tabla 18.
Componentes energéticas en los píxeles anclas.

Pixel	Componente	Unidad	Fecha de las imágenes satelitales					
			2013	2014	2015	2016	2018	2019
Frio	Rn	w/m ²	287.20	295.05	293.76	295.48	260.23	307.53
	G	w/m ²	20.61	32.70	18.78	24.27	17.17	35.2
	λET	w/m ²	264.45	261.34	274.98	271.21	242.62	272.33
	H	w/m ²	0.14	1.01	0.14	0.16	0.45	0.87
Caliente	Rn	w/m ²	160.84	169.77	387.82	162.69	69.16	131.49
	G	w/m ²	34.48	31.40	35.35	37.18	18.91	34.67
	λET	w/m ²	-0.08	-1.01	0.06	-0.13	-0.37	-0.76
	H	w/m ²	126.44	139.38	352.47	125.64	50.62	96.82

Fuente: elaboración propia

