



**Universidad de Concepción  
Facultad de Ciencias Forestales  
Programa de Magíster en Ciencias Forestales**

**EVALUACIÓN DEL USO DE AGUA DE GENOTIPOS DE *Eucalyptus* MEDIANTE  
ESTIMACIONES DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR A PARTIR DE IMÁGENES  
MULTIESPECTRALES**

**POR: ALEJANDRO ANTONIO PINOCHET ORELLANA**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción  
para optar al grado de Magíster en Ciencias Forestales

Profesor Guía: Rafael Alejandro Rubilar Pons  
Profesor Co-guía: Santiago Paul Yépez Figueroa

Diciembre, 2024  
Concepción, Chile

© 2024

ALEJANDRO ANTONIO PINOCHET ORELLANA

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

EVALUACIÓN DEL USO DE AGUA DE GENOTIPOS DE *Eucalyptus* MEDIANTE  
ESTIMACIONES DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR A PARTIR DE IMÁGENES  
MULTIESPECTRALES

**Comisión evaluadora:**

Rafael Rubilar Pons (Profesor guía)  
Ingeniero Forestal, PhD.

---

Santiago Yépez Figueroa (Profesor co-guía)  
Ingeniero Geólogo, Dr.

---

Eduardo Acuña Carmona (Comisión evaluación)  
Ingeniero Forestal, Dr.

---

Elvis Gavilán Gutiérrez (Comisión evaluación)  
Licenciado en Matemática, Dr.

---

Efraín Duarte Castañeda (Comisión evaluación externa)  
Ingeniero Forestal, Dr.

---

**Director de Programa de Magíster**

Vicente Hernández Castillo  
Ingeniero en Maderas, Dr.

---

**Decano de la Facultad de Ciencias Forestales**

Eugenio Sanfuentes VS.  
Ingeniero Forestal, Dr.

---

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente a Dios por generar los medios para poder enfrentar este desafiante pero enriquecedor proceso.

A mi compañera, Alexandra Roco, quien en todo momento fue un sostén fundamental para cumplir con todas metas establecidas en este programa y en la vida en general.

A mis padres y hermano, quienes, a pesar de a la distancia, me apoyaron constantemente enviándome palabras de aliento y demostraciones de cariño.

A mi profesor guía Rafael Rubilar por confiar en mí al incorporarme en su proyecto Eucahydro para poder desarrollar mi tesis y por el apoyo constante en la elaboración de este documento, como en otros procesos.

A mi profesor co-guía Santiago Yépez por su orientación y acompañamiento en el aprendizaje del uso de sensores remotos, en la elaboración de este documento y en otras circunstancias. Así también, a Allen Ruminot, su ayudante.

A los profesores Elvis Rebolledo y Eduardo Acuña, y Efraín Duarte por sus valiosos aportes en la elaboración de este manuscrito, cada uno desde su perspectiva profesional.

A la profesora Darcy Ríos y Margarita Figueroa, por su respaldo en este proceso, especialmente en los momentos difíciles de pandemia.

A mis compañeros de posgrado Daniel Bozo y Juan Carlos Valverde, por sus observaciones y consejos relacionados con mi tesis.

Muchas gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULOS	PÁGINA
I ABSTRACT.....	x
II RESUMEN.....	xi
III INTRODUCCIÓN.....	12
IV MATERIALES Y MÉTODOS .....	17
4.1 Localización del área de estudio y características del sitio .....	17
4.2 Genotipo y diseño experimental .....	18
4.3 Medición del índice de área foliar en terreno .....	19
4.4 Obtención de índices de vegetación .....	20
4.5 Relación entre el IAFc y los índices de vegetación .....	24
4.6 Estimación del uso de agua .....	25
4.6.1 Cálculo de la evapotranspiración total .....	25
4.7 Análisis estadístico de los datos.....	33
V RESULTADOS .....	35
5.1 Caracterización del Índice de Área Foliar de campo (IAFc) .....	35
5.2 Índice de Área Foliar en función de los índices de vegetación.....	40
5.3 Evapotranspiración total (ET).....	47
VI DISCUSIÓN .....	54
VII CONCLUSIONES .....	62
VIII REFERENCIAS.....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 4.1</b> Distribución de bandas espectrales de Sentinel-2.....	23
<b>Tabla 4.2</b> Coeficientes de regresión y valor de los criterios estadísticos considerados para el ajuste de las ecuaciones de intercepción para cada grupo de genotipos de Eucalyptus. ....	26
<b>Tabla 5.3.</b> Índice de área foliar promedio medido en campo (IAF <sub>C</sub> ) y desviación estándar (DE) de los taxas por tratamiento hídrico. ....	35
<b>Tabla 5.4.</b> Análisis de varianza bifactorial sobre la variable dependiente (IAF <sub>C</sub> ) para ambos factores y niveles. ....	38
<b>Tabla 5.5.</b> Estadísticos y parámetros de regresión para estimar el índice de área foliar (IAF) en función de: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de relación simple (SR), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) e índice de clorofila verde (GCI) provenientes de imágenes Sentinel-2, correspondiente al tratamiento riego. ....	41
<b>Tabla 5.6.</b> Estadísticos y parámetros de regresión para estimar el índice de área foliar (IAF) en función de: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de relación simple (SR), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) e índice de clorofila verde (GCI) provenientes de imágenes dron, correspondiente al tratamiento riego.....	42
<b>Tabla 5.7.</b> Estadísticos y parámetros de regresión para estimar el índice de área foliar (IAF) en función de: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de relación simple (SR), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) e índice de clorofila verde (GCI) provenientes de imágenes Sentinel-2, correspondiente al tratamiento seco.....	43

**Tabla 5.8.** Estadísticos y parámetros de regresión para estimar el índice de área foliar (IAF) en función de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de relación simple (SR), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) e índice de clorofila verde (GCI) provenientes de imágenes dron, correspondiente al tratamiento seco. . 43

**Tabla 5.9.** Estadísticas y parámetros de regresión para estimar el índice de área foliar (IAF) en función de índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) provenientes de imágenes dron. Incluye ambos tratamientos hídricos..... 45

**Tabla 5.10.** Análisis de varianza bifactorial sobre la variable dependiente evapotranspiración total (ET)..... 49

**Tabla 5.11.** Agrupamiento de Tukey para las medias de evapotranspiración total (ET) 52

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Figura 4.1.</b> (A) Imagen digital del sitio de estudio. (B) Imagen satelital (PlanetScope) del sitio de estudio con parcelas de estudio. ....	18
<b>Figura 4.2.</b> Imagen aérea de la plantación de estudio con réplicas de árboles y regímenes hídricos (secano y riego), más parcela experimental con parcela de medición interna. 19	19
<b>Figura 4.3.</b> Curvas de respuesta espectral de MicaSense Altum.....	21
<b>Figura 4.4.</b> (A) Imagen de parcela con su delimitación en color amarillo y buffer de 2m en color rojo. (B) Imagen de parcela con su delimitación en amarillo y parcela circular de radio 4m en rojo. (C) Imagen de parcela con su delimitación en amarillo, parcela circular de radio 4m en rojo y enmascaramiento de copas en verde. ....	24
<b>Figura 5.5.</b> Variación estacional del índice de área foliar promedio (IAF <sub>C</sub> ) de los taxas por tratamiento hídrico.....	37
<b>Figura 5.6.</b> Variación del promedio anual de índice de área foliar de campo (IAF <sub>C</sub> ) de los taxas por tratamiento hídrico. ....	40
<b>Figura 5.7.</b> Relación entre el índice de área foliar de campo (IAF <sub>C</sub> ) y el índice de clorofila verde (GCI), obtenido a partir de una imagen dron, para (A) buffer de 2 m y (B) buffer de 2 m considerando un factor de corrección por maleza presente en las parcelas de estudio. ....	46
<b>Figura 5.8.</b> Evapotranspiración anual comparativa de los genotipos de <i>Eucalyptus</i> bajo tratamiento hídrico.....	48

**Figura 5.9.** Interacción entre las variables genotipo y tratamiento hídrico sobre la variable dependiente evapotranspiración..... 51

## I ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the water use (WU) of 16 selected genotypes of *Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. badjensis*, *E. smithii*, *E. nitens* × *globulus* and hybrids of *E. camaldulensis* × *globulus* established under contrasting conditions of water availability (irrigated vs. rainfed), by estimating the leaf area index (LAI) from high-resolution (0.005 m, DJI Matrice 210 RTK V2 drone) and lower resolution (10 m, Sentinel-2) multispectral images. The ground leaf area index (LAI<sub>G</sub>) was correlated with four vegetation indices (NDVI, SR, SAVI and GCI) obtained from both sensors, in order to select the best remote sensing LAI estimator (LAI<sub>RS</sub>). The models were evaluated based on R<sup>2</sup>, Syx and residual analysis statistics; the model with the highest predictive power achieved an R<sup>2</sup> of 0.23 and p-value of 2.46E-12. Given the low overall predictive power, the LAI<sub>G</sub> was used to estimate total evapotranspiration (ET) and water consumption for each genotype. The multispectral images coupled to the drone showed greater predictive accuracy than those of Sentinel-2, with the SAVI being the best predictor in irrigation conditions and the GCI in rainfed. Furthermore, ET varied according to genotypes and water treatment: *Eucalyptus smithii* and *E. badjensis* showed a high transpiration capacity, being suitable for areas with variable water availability, while *E. nitens* presented lower ET, making it ideal for minimizing water use. These findings could help optimize genotype selection based on water availability, promoting a more efficient and sustainable use of water resources in forest plantations.

## II RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el uso de agua (UA) de 16 genotipos seleccionados de *Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. badjensis*, *E. smithii*, *E. nitens* × *globulus* e híbridos de *E. camaldulensis* × *globulus* establecidos en condiciones contrastantes de disponibilidad de agua (riego vs seco), mediante la estimación del índice de área foliar (IAF) a partir de imágenes multiespectrales de alta resolución (0,05 m, dron DJI Matrice 210 RTK V2) y de menor resolución (10 m, Sentinel-2). El índice de área foliar de campo (IAF<sub>C</sub>) se correlacionó con cuatro índices de vegetación (NDVI, SR, SAVI y GCI) obtenidos de ambos sensores, con el fin de seleccionar el mejor estimador del IAF por teledetección (IAF<sub>T</sub>). Los modelos fueron evaluados en función de los estadísticos R<sup>2</sup>, Syx y análisis de residuos; el modelo con mayor poder predictivo alcanzó un R<sup>2</sup> de 0,23 y valor-p de 2,46E-12. Dado el bajo poder predictivo general, se utilizó el IAF<sub>C</sub> para estimar de la evapotranspiración total (ET) y el consumo de agua de cada genotipo. Las imágenes multiespectrales acopladas al dron mostraron una mayor precisión predictiva que las de Sentinel-2, siendo el SAVI el mejor predictor en condiciones de riego y el GCI en seco. Además, la ET varió según los genotipos y tratamiento hídrico: *Eucalyptus smithii* y *E. badjensis* mostraron una alta capacidad de transpiración, siendo adecuadas para áreas con disponibilidad variable de agua, mientras que *E. nitens* presentó menor ET, lo que lo hace ideal para minimice el uso de agua. Estos hallazgos podrían ayudar a optimizar la selección de genotipos en función de la disponibilidad de agua, promoviendo un uso más eficiente y sostenible de los recursos hídricos en plantaciones forestales.

### III INTRODUCCIÓN

Las plantaciones de *Eucalyptus sp.* ocupan más de 20 millones de hectáreas en todo el mundo (Ribeiro et al., 2015), siendo esta una de las especies forestales más intensamente manejadas a nivel global. Su gran adaptabilidad ha permitido duplicar su tasa de crecimiento en muchas zonas (Binkley et al., 2013) mediante una combinación de mejoras silvícolas y la selección de los genotipos adecuados (Du Toit & Dovey, 2005; Stape et al., 2004). Sin embargo, el déficit hídrico, exacerbado por las posibles consecuencias del cambio climático, es considerado el principal factor ambiental limitante del crecimiento y productividad de plantaciones con fines comerciales, especialmente en climas mediterráneos o en ambientes semiáridos (Chaves et al., 2003). Cuando el déficit hídrico se desarrolla lentamente, las plantas pueden presentar respuestas de aclimatación que tienen efectos sobre el crecimiento, tales como disminución de la expansión foliar y el aumento del crecimiento radicular (Potters et al., 2007; Shao et al., 2008).

En los últimos años, la mejora genética de especies de *Eucalyptus* en Chile se ha enfocado en el aumento de la productividad y mejor adaptación a condiciones de sitio limitantes para el crecimiento (Silva et al., 2017). En clones de *E. globulus* se ha observado que la disminución de la disponibilidad hídrica y temperatura constituyen precursores de la reducción de las tasas de crecimiento y del tamaño final de las hojas (Osorio et al., 1998). La selección genética, basada en indicadores de eficiencia del uso del agua y resistencia al frío, puede representar una estrategia avanzada para mantener el crecimiento de los bosques plantados sin producir efectos en la disponibilidad de agua y/o contar con bosques capaces de mantener su desarrollo en un escenario de cambio climático. Los estudios que examinan la magnitud y la estabilidad de la respuesta de crecimiento de los genotipos bajo disponibilidad manipulada de recursos o gradientes ambientales, pueden proporcionar información sobre la importancia de las interacciones

genético-ambientales bajo escenarios de cambio climático (Mummery & Battaglia, 2002; Whitehead & Beadle, 2004).

Sin embargo, la demanda de madera, agua y energía continúa creciendo, lo que representa un desafío para aumentar la productividad de las plantaciones forestales dentro de las limitaciones de agua. En los países donde los eucaliptos son especies introducidas, existe la necesidad de comprender condiciones ambientales claves. Por ejemplo, el uso del agua, relacionado al manejo y crecimiento de estas especies (Albaugh et al., 2013). El uso de agua hace referencia al agua consumida por la planta para satisfacer la evapotranspiración y para la formación de sus tejidos. La evapotranspiración (ET) es la cantidad de agua liberada a la atmósfera a través de los procesos de evaporación del suelo y transpiración de las plantas, que representa el agua utilizada por los cultivos (Allen et al., 1998). La transpiración suele ser relevante para la productividad de las plantas y está fuertemente influenciada por su fisiología, mientras que la evaporación no contribuye directamente a la producción (Kool et al., 2014). El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración (Allen et al., 2006). Entre las características del cultivo están: la conductancia estomática, la temperatura, conductancia y arquitectura del dosel, y el área foliar (AF) (Lovelli et al., 2010). El AF es la superficie en la que se intercambia energía y materia entre la planta y la atmósfera (Hernández Ramos et al., 2021).

Un determinante clave del uso del agua en las plantaciones es el índice de área foliar (IAF) (Gholz et al., 1990; White et al., 2009). El IAF se define como la superficie de área foliar unilateral por metro cuadrado de superficie de terreno ( $m^2 m^{-2}$ ) (Berger et al., 2019), y es un importante parámetro fisiológico que está relacionado con muchos procesos asociados a los ecosistemas forestales como la interceptación de la luz, la evapotranspiración, el ciclo de los nutrientes y la fotosíntesis (Almeida et al., 2015; Chen & Cihlar, 1996; Tian et al., 2007). Este índice depende de la composición de las especies,

la etapa de desarrollo, las condiciones predominantes del sitio, la estacionalidad y las prácticas de manejo (Jonckheere et al., 2004).

El IAF puede estimarse de varias maneras, descritas in-extenso por Jonckheere et al. (2004). Entre los principales métodos directos de medición del IAF está la construcción de ecuaciones alométricas mediante el muestreo destructivo de ramas y follaje, estos métodos son teóricamente más precisos que los semidirectos e indirectos. Sin embargo, los métodos directos consumen mucho tiempo en su determinación, lo que los hace prácticamente inviables para su uso a gran escala. Los métodos indirectos, en cambio, son más fáciles de utilizar, y se suelen preferir los métodos ópticos debido a su relativa rapidez y precisión (Berger et al., 2019). Estos métodos ópticos se basan en la ley de Beer-Lambert, la cual se fundamenta en que cuando una onda electromagnética atraviesa una capa de un material, la disminución relativa de la intensidad de la onda es directamente proporcional al espesor de la capa (dosel forestal) (Frazer et al., 1999). En este caso, el analizador del dosel vegetal LAI-2000 es el instrumento más utilizado para estimar la cantidad de radiación difusa que se infiltra a través del dosel, siendo la forma más práctica y sencilla de obtener estimaciones instantáneas del IAF en bosques de crecimiento rápido (Arias et al., 2007). Sin embargo, la aplicación de estos métodos a gran escala es costosa, porque exige mucho tiempo y el uso de equipos sofisticados (Hernández et al., 2014).

Debido a su importancia en muchos procesos ecológicos, especialmente en la evapotranspiración, se ha realizado una cantidad significativa de estudios para estimar el IAF a media y gran escala por medio de sensores remotos (Berger, 2014; Flores et al., 2006). Estos estudios han utilizado herramientas de teledetección para estimar la distribución espacial y temporal del IAF (Berger et al., 2009; Chen & Cihlar, 1996; Houborg et al., 2009), por medio de la relación con índices de vegetación (IVs) de los sensores de las plataformas orbitales y de vehículos aéreos no tripulados (VANT), (Berger, 2014;

Flores et al., 2006; Veneros et al., 2020), proporcionando una forma única de obtener la distribución del IAF en áreas extensas (Chen & Cihlar, 1996).

Los IVs obtenidos a partir de copas de los árboles basados en sensores remotos son algoritmos bastante simples y efectivos para evaluaciones cuantitativas y cualitativas de la cubierta vegetal, el vigor y la dinámica de crecimiento, entre otras aplicaciones (Xue & Su, 2017). El índice de vegetación (IV) ha tratado de explorar las propiedades espectrales de la vegetación (hojas y otros componentes fotosintéticamente activos), principalmente en las regiones visible e infrarroja cercana del espectro electromagnético (Berger et al., 2019). Su fundamento radica en el comportamiento antagónico de la reflectancia de la vegetación en las mencionadas regiones, con el que se pretende indicar la abundancia y actividad relativa de la cubierta vegetal (Jensen & Epiphonio, 2009; Ponzoni, 2010). Varios trabajos abordan la relación del IV obtenida por teledetección con los parámetros biofísicos de los bosques, destacando los que hacen referencia al IAF (Chen & Cihlar, 1996; Houborg et al., 2009; Jensen & Epiphonio, 2009; Song, 2013).

Entre los diversos IVs presentados por Ponzoni (2010) y Jensen y Epiphonio (2009), destacan el Índice de Relación Simple (Simple Ratio Index - SR) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) como los más utilizados para caracterizar el IAF y la biomasa de las formaciones forestales (Flores et al., 2006). El índice de vegetación ajustado al suelo (Soil Adjusted Vegetation Index - SAVI), cuya introducción de una constante busca minimizar el efecto del suelo, también se ha utilizado para las formaciones forestales (Ponzoni, 2010).

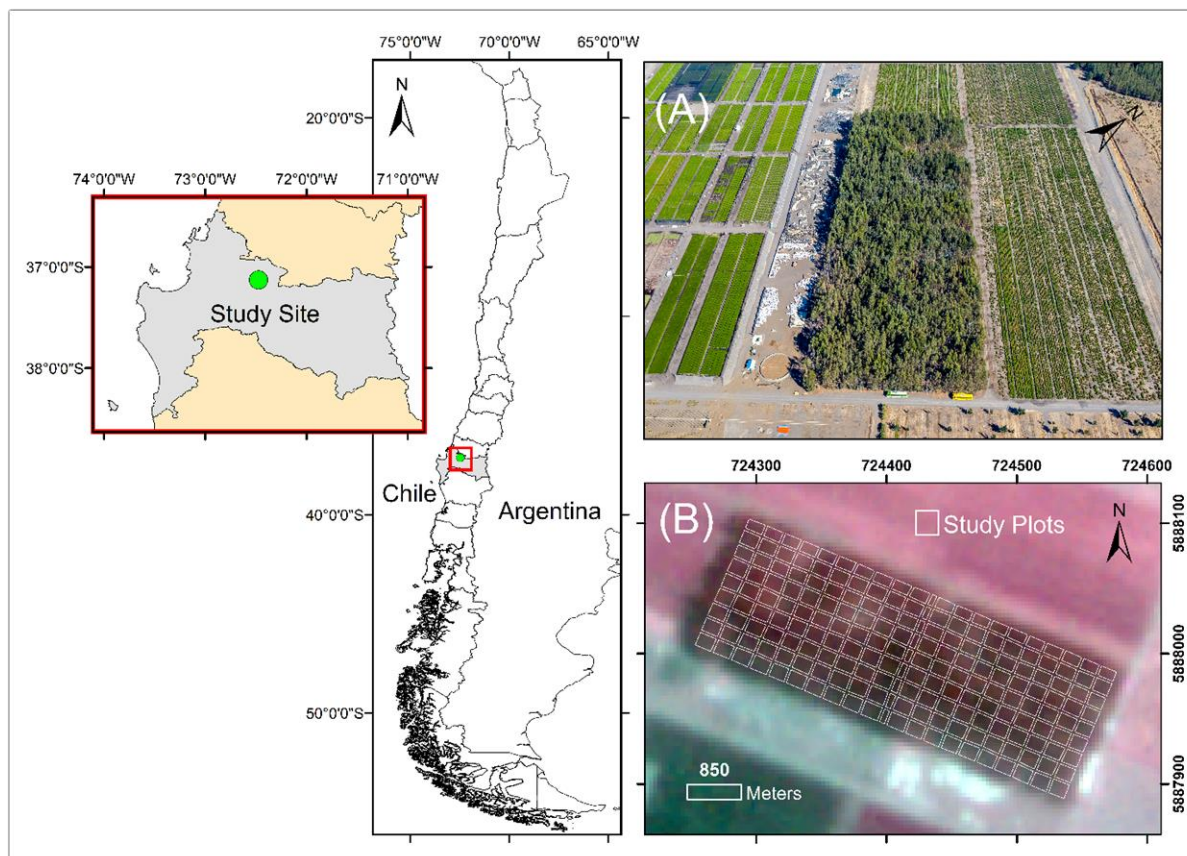
Considerando que la demanda de agua, energía y productos madereros aumenta constantemente, se requieren esfuerzos continuos para minimizar los impactos de las plantaciones forestales en los recursos hídricos, mientras se conservan las ganancias de productividad (Dye, 1999). Un componente crítico para satisfacer estas crecientes demandas es mejorar la eficiencia con la que las áreas forestadas utilizan el agua

disponible (Olbrich et al., 1993; Wise et al., 2011). En consecuencia, se hace necesario generar herramientas que permitan la estimación eficiente del uso de agua de las plantaciones forestales. De esta manera, la determinación del IAF por medio de sensores remotos puede representar una valiosa herramienta para modelar, cuantificar y proponer estrategias de manejo de masas forestales. Por esta razón, el objetivo de esta investigación fue la evaluación de las diferencias en el uso de agua de genotipos de *Eucalyptus* por medio de la determinación de su IAF a través de IV determinados vía sensoramiento remoto.

## **IV MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1 Localización del área de estudio y características del sitio**

El sitio está ubicado a 9,6 km al sur de Yumbel, región del Biobío, en la zona centro sur de Chile ( $37^{\circ} 8'0,01''S$ ,  $72^{\circ}27'34,70''W$ ) (Figura 4.1). Los suelos corresponden a la serie Arenales (CIREN, 1999), una mezcla de Xeropsammentos Dúcticos térmicos correspondientes a arenas negras volcánicas jóvenes, profundas y gruesas, de origen volcánico andesítico y basáltico, depositadas por los ríos en zonas llanas con  $< 3\%$  de pendiente. Los suelos son de drenaje muy rápido, tienen una baja capacidad de retención de agua y la textura del suelo es franca arenosa en los primeros 20 cm; los horizontes más profundos del suelo tienen una textura arenosa con un contenido creciente de grosor y grava con la profundidad (Rubilar et al., 2020). El clima regional es de tipo mediterráneo (*Cbs* según clasificación de Köppen-Geiger) (Beck et al., 2018), caracterizado por veranos calurosos, secos y mayormente despejados, e inviernos, fríos, lluviosos y parcialmente nublados. En los últimos 35 años, el sitio de estudio ha mostrado una temperatura media anual de  $13,8^{\circ}C$ , con una temperatura máxima absoluta en diciembre ( $21,8^{\circ}C$ ) y una mínima en julio ( $11,1^{\circ}C$ ). La precipitación media anual es de 1252 mm, concentradas en las estaciones de otoño e invierno (Valverde et al., 2023).

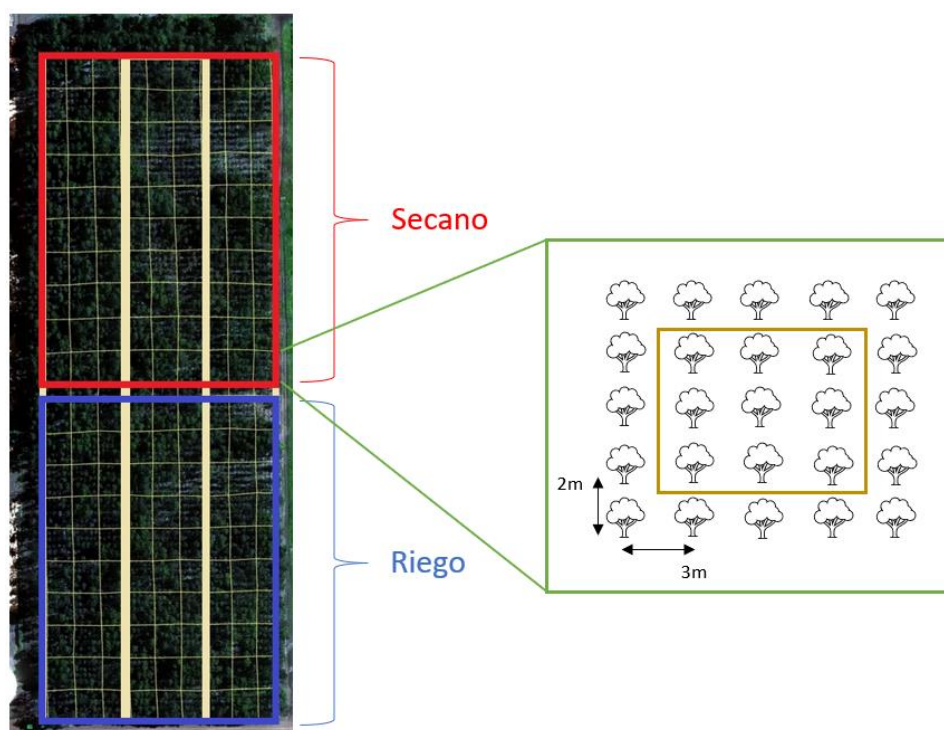


**Figura 4.1.** (A) Imagen digital del sitio de estudio. (B) Imagen satelital (PlanetScope) del sitio de estudio con parcelas de estudio.

## 4.2 Genotipo y diseño experimental

El suelo del área de estudio fue subsolado a 80 cm de profundidad por medio de un subsolador Savannah D8 para crear montículos de 15-30 cm que facilitarán el establecimiento de las plántulas. En el año 2013, un total de 30 genotipos de *Eucalyptus*, seleccionados como los mejores materiales genéticos de los programas de mejoramiento forestal de las empresas forestales CMPC y ARAUCO, fueron establecidos en un diseño en bloques completos al azar, con 3 repeticiones, considerando 2 tratamientos de disponibilidad hídrica (riego y seco). El material fitogenético consistió en 19 genotipos de *Eucalyptus globulus* (EG), 6 híbridos de *E. nitens* × *globulus* (ENG o E.gloni), 2

genotipos de *E. nitens* (EN), y genotipos de *E. camaldulensis* × *globulus* (ECG o E.camglo), *E. badjensis* (EB) y *E. smithii* (ES). Las plantas se establecieron con una separación de 3 × 2 m (1666 árboles ha<sup>-1</sup>), y las parcelas experimentales con 5 × 5 árboles con parcelas de medición internas de 3 × 3 árboles (Figura 4.2). Para este estudio, solo 16 de los 30 genotipos fueron seleccionados, considerando su potencial de productividad y adaptación a diferentes condiciones hídricas, lo que permite evaluar tanto el rendimiento en condiciones de riego como la tolerancia al estrés hídrico en seco.



**Figura 4.2.** Imagen aérea de la plantación de estudio con réplicas de árboles y regímenes hídricos (secano y riego), más parcela experimental con parcela de medición interna.

#### 4.3 Medición del índice de área foliar en terreno

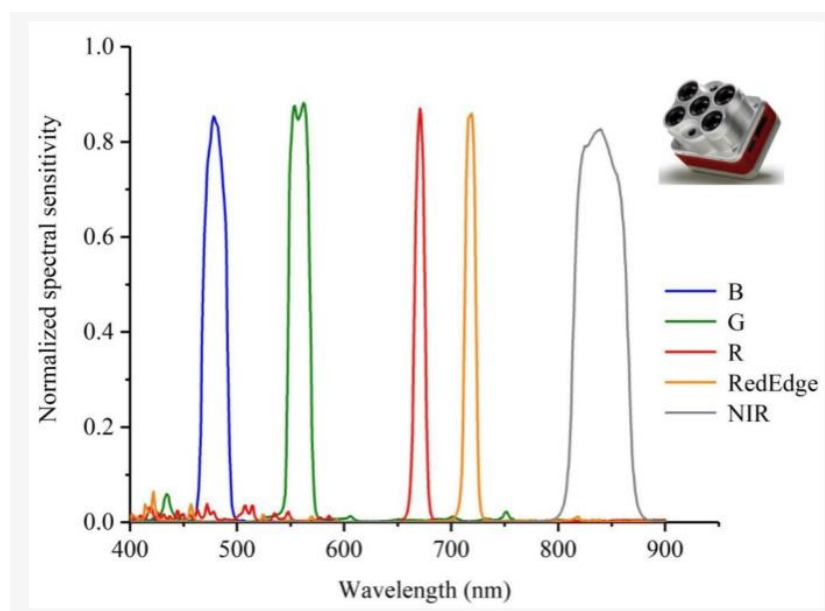
Las mediciones del índice de área foliar de campo (IAF<sub>C</sub>) se realizaron en los meses de diciembre de 2021, marzo, junio y septiembre de 2022 para representar la variación

estacional y anual del IAF, utilizando un equipo Li-Cor LAI-2200C Plant Canopy Analyzer (Licor Scientific Co). Mediciones indirectas de IAF se realizaron en seis puntos para cada parcela, entre las 08:00 y las 10:00 horas (UTC-3:00 hora de verano Chile) cuando el cielo presentaba una nubosidad uniforme. Este periodo es ideal porque minimiza la incidencia directa de la luz solar, lo cual podría afectar la precisión de las mediciones. El procedimiento consideró dos sensores en medición simultánea. El primer sensor se colocó fuera del área de estudio, en un sector abierto sin obstrucciones, para tomar medidas de control por encima del dosel. El segundo se utilizó en cada parcela de medición (medidas bajo dosel). Ambos sensores se usaron a una altura aproximada de 0,90 m con una tapa de visión horizontal de 10° para evitar la sombra del tallo en el sensor.

#### **4.4 Obtención de índices de vegetación**

Imágenes multiespectrales de 0,05 m de resolución espacial se obtuvieron de sobrevuelos que se realizaron al ensayo los meses de diciembre de 2021, marzo, junio y septiembre de 2022, mediante un dron marca DJI Matrice 210 RTK V2 equipado con cámara multiespectral y térmica modelo Altum, marca MicaSense. Los sensores multiespectrales comprenden cinco bandas (Figura 4.3): Azul (475 nm centro, 20 nm ancho de banda), verde (560 nm centro, 20 nm ancho de banda), rojo (668 nm centro, 10 nm ancho de banda), borde rojo (717 nm centro, 10 nm ancho de banda), e infrarrojo cercano (840 nm centro, 40 nm ancho de banda) (Wolff et al., 2022). La cámara Micasense Altum está equipada con sensor de intensidad de luz (Sensor de luz DLS2), módulo de sistema de posicionamiento global (GPS) y panel de calibración (Panel de reflectancia CRP2). El sensor de intensidad de luz se utiliza para corregir la influencia de los cambios de luz solar en la imagen; el módulo GPS registra simultáneamente la información de posición de cada imagen; el panel de calibración tiene información de reflectancia fija, que se utiliza para corregir la reflectancia de la imagen (Lu et al., 2022). Antes del inicio del vuelo y después del aterrizaje, se realizó una captura del panel de

calibración con la finalidad expuesta en el punto anterior. Las imágenes multispectrales se procesaron con la versión 1.6.4 de Agisoft Metashape (Agisoft LLC., San Petersburgo, Rusia). El proceso Metashape SfM (Structure From Motion) incluye dos componentes principales: (1) alineación de imágenes calculando la posición y orientación de la cámara mediante la detección de puntos clave y la correspondencia entre imágenes, y (2) generación de nubes de puntos densos utilizando mapas de profundidad calculados a partir de la correspondencia estereoscópica (Tinkham & Swayze, 2021).



Fuente: Lu et al. (2022).

**Figura 4.3.** Curvas de respuesta espectral de MicaSense Altum.

Para la obtención de los índices de vegetación, tras el procesamiento de la imagen, se emplearon las bandas 4 (flujo radiante reflejado en el rojo), 5 (flujo radiante reflejado en el infrarrojo cercano) y 2 (flujo radiante reflejado en el verde) mediante la función Math Band del programa ENVI 5.6, obteniendo así los siguientes índices de vegetación:

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V} \quad (1)$$

$$SR = \rho IVP / \rho V \quad (2)$$

$$SAVI = \left[ \frac{\rho IVP - \rho V}{\rho IVP + \rho V + L} \right] * (1 + L) \quad (3)$$

$$GCI = \left[ \frac{\rho IVP}{\rho Green - 1} \right] \quad (4)$$

Donde:  $\rho V$ ,  $\rho IVP$  y  $\rho Green$  se refieren al flujo radiante reflejado en el rojo (visible), al flujo radiante reflejado en el infrarrojo cercano y flujo radiante reflejado en el verde, respectivamente;  $L$  es la constante que minimiza el efecto del suelo. Para la constante  $L$  del SAVI, se adoptó un valor de 0,5 para una densidad de vegetación media, según Huete (1988).

Imágenes multiespectrales de 10 m de resolución espacial se obtuvieron del Programa Copernicus de la ESA usando la constelación Sentinel-2 Level 2A mediante el catálogo de datos de Google Earth Engine (GEE) (ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2\_SR\_HARMONIZED")), correspondientes a los meses de diciembre de 2021, marzo, junio y septiembre de 2022. Sentinel-2 es un par de satélites gemelos (Sentinel-2A y Sentinel-2B) en la misma órbita, con una separación de 180°, que operan a una altitud de 786 km y están diseñados para proporcionar imágenes de resolución espacial media en el monitoreo ambiental global (Wang et al., 2016). Los satélites incorporan un sensor óptico llamado "MultiSpectral Instrument" (MSI) que cuenta con 13 bandas espectrales (Tabla 4.1); 4 de ellas cuentan con una resolución espacial de 10 metros, 6 con resolución de 20 metros y 3 con resolución de 60 metros (Delegido et al., 2016).

Para procesar las imágenes de Sentinel se utilizó la plataforma GEE basada en la nube que facilita el acceso a recursos informáticos de alto rendimiento para procesar conjuntos de datos geospaciales de gran tamaño (Gorelick et al., 2017). Además, la plataforma posee un robusto conjunto de datos que incluyen imágenes satelitales, como las

colecciones Landsat, Sentinel, datos climáticos y de cobertura terrestre, entre otros (Xiong et al., 2017).

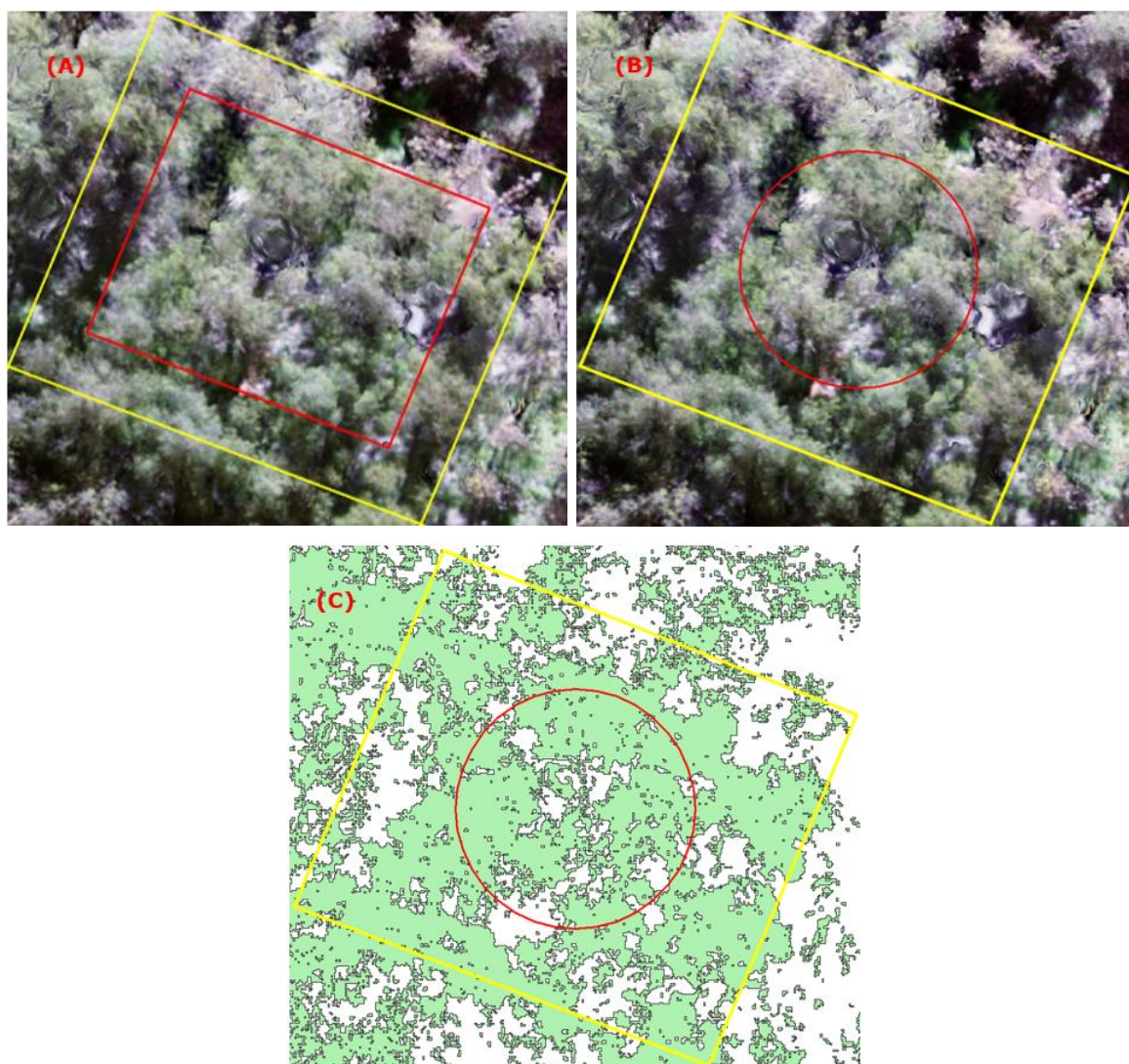
**Tabla 4.1** Distribución de bandas espectrales de Sentinel-2.

Banda espectral	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Resolución espacial (m)
B1	443	20	60
B2	490	65	10
B3	560	35	10
B4	665	30	10
B5	705	15	20
B6	740	15	20
B7	783	20	20
B8	842	115	10
B8a	865	20	20
B9	945	20	60
B10	1380	30	60
B11	1610	90	20
B12	2190	180	20

Fuente: Clevers and Gitelson (2013).

Las imágenes de Sentinel-2 fueron obtenidas y procesadas mediante un script construido en la Plataforma de GEE, el cual se estructuró de la siguiente manera: configuración de parámetros para la construcción de la imagen, obtención de imágenes Sentinel-2 según lugar y calidad, producción de imágenes por estación, conversión de las imágenes a los diferentes índices de vegetación (NDVI, SR, SAVI y GCI), exportación de las imágenes (formato raster).

Para el análisis del IAF de cada parcela se utilizó el programa ArcGIS, con la finalidad de obtener los valores de los índices de vegetación bajo los siguientes criterios: buffer de 2 metros para las parcelas de ambas imágenes multiespectrales (Figura 4.4 A), parcela circular de radio 4 m (Figura 4.4 B) y parcela circular de radio 4 m con enmascaramiento de copas (Figura 4.4 C) para las parcelas de las imágenes multiespectrales de resolución espacial 0,05 m.



**Figura 4.4.** (A) Imagen de parcela con su delimitación en color amarillo y buffer de 2m en color rojo. (B) Imagen de parcela con su delimitación en amarillo y parcela circular de radio 4m en rojo. (C) Imagen de parcela con su delimitación en amarillo, parcela circular de radio 4m en rojo y enmascaramiento de copas en verde.

#### 4.5 Relación entre el IAF<sub>c</sub> y los índices de vegetación

Se aplicó el análisis de regresión lineal simple con el fin de establecer y seleccionar las ecuaciones para estimar el IAF en función de los diferentes IVs (NDVI, SR, SAVI y GCI).

Los criterios para la selección de los mejores modelos fueron el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el error estándar de la estimación ( $S_{yx}$ ) y la distribución gráfica de los residuos, así como la significación de los coeficientes de la ecuación ( $\alpha=5\%$ ).

Los índices de vegetación seleccionados en este estudio fueron escogidos por su capacidad de reflejar con precisión el estado fisiológico de los árboles cuando están sometidas a condiciones de estrés hídrico. El NDVI y el SR fueron elegidos por su sensibilidad a la biomasa y al contenido de clorofila, indicadores clave de la salud de la vegetación (Joiner et al., 2018). El SAVI se utiliza para corregir el efecto del suelo en áreas con menor cobertura foliar, frecuentes en situaciones de estrés hídrico (Miura et al., 2001). Finalmente, el GCI se incluye por su alta sensibilidad a la clorofila, lo que lo hace adecuado para detectar cambios en la actividad fotosintética bajo sequía (Zhang & Zhou, 2015). Estos índices permiten una evaluación integral del estado hídrico y la productividad de Eucalipto en condiciones contrastantes de riego.

## **4.6 Estimación del uso de agua**

### **4.6.1 Cálculo de la evapotranspiración total**

La evapotranspiración total se estimó considerando la sumatoria de las pérdidas de agua por intercepción del dosel ( $Ic$ ) más la evapotranspiración real ( $ET_r$ ) correspondiente de cada genotipo, siguiendo la metodología del balance hídrico, basada en la ecuación de continuidad de Feller (1981):

$$ET = Ic + ET_r \quad (5)$$

Donde,  $ET$  es la evapotranspiración total (mm),  $Ic$  es la intercepción del dosel (mm) y  $ET_r$  es la evapotranspiración real (mm) para cada una de las diferentes especies o genotipos.

#### 4.6.1.1 Variables calculadas dentro de la ecuación de evapotranspiración total

##### 4.6.1.1.1 Cálculo de la variable intercepción ( $I_c$ )

Para el cálculo de la variable intercepción ( $I_c$ ) se utilizaron las ecuaciones ajustadas por Valverde et al. (2023), en este mismo ensayo, para los diferentes genotipos.

$$I_c = \beta_0 + \beta_1 Gp \quad (6)$$

Donde,  $\beta_0$  y  $\beta_1$  coeficientes de la ecuación (Tabla 4.2) para los diferentes genotipos y  $Gp$  es la precipitación (mm).

**Tabla 4.2** Coeficientes de regresión y valor de los criterios estadísticos considerados para el ajuste de las ecuaciones de intercepción para cada grupo de genotipos de *Eucalyptus*.

Variable/grupo	Coeficientes				Ajuste			
	$\beta_0$	SE	$\beta_1$	SE	R <sup>2</sup> -adj	RMSE	Bias%	SEE%
Intercepción								
Es & Eb	<b>-2.68</b>	0.33	<b>0.28</b>	0.09	0.95	1.38	9.51	8.48
EngH, EgH & Ecg	<b>-2.03</b>	0.46	<b>0.35</b>	0.82	0.82	1.60	8.22	9.06
EngL, EgL & En	<b>-1.49</b>	0.32	<b>0.47</b>	0.89	0.89	1.32	6.80	8.25

Coeficientes de regresión  $\beta_0$  y  $\beta_1$ , SE error estándar, R<sup>2</sup>-adj coeficiente de determinación ajustado, RMSE error cuadrático medio, Bias% porcentaje de error de sesgo medio, SEE% porcentaje de error estándar de la estimación. Los coeficientes en negrita indican valores significativos ( $p < 0,05$ ). Fuente: Valverde et al. (2023).

##### 4.6.1.1.2 Cálculo de la variable evapotranspiración real (ETr)

Los factores meteorológicos (precipitación, radiación solar, temperatura del aire y humedad relativa) se obtuvieron de una estación Davis Vantage Pro 2 situada a 500 m de la zona experimental.

Los parámetros atmosféricos (presión atmosférica, calor latente de vaporización y constante psicométrica) y los factores que indican la humedad del aire (presión de vapor real y pendiente de la curva de presión de saturación de vapor) se determinaron mediante ecuaciones empíricas.

La evapotranspiración real ( $ET_r$ ) se determinó mediante el modelo semi-empírico de Priestley-Taylor basado en la radiación neta ( $R_n$ ) y en el índice de área foliar ( $IAF$ ). Este modelo es derivado del modelo de Penman-Monteith, en donde se eliminan los términos aerodinámicos (velocidad del viento, altura del viento, y rugosidad de dosel de la planta).

$$ET_r = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n [\alpha_c - \alpha_c \exp(-\beta IAF) + \alpha_s(1 - c) * \exp(-\beta IAF)] \quad (7)$$

Donde:  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $\gamma$  es la constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $R_n$  es la radiación neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ );  $\beta$  es un coeficiente semi-empírico de extinción del dosel de radiación, dependiente de la distribución del ángulo de la hoja, de las temperaturas del suelo y del dosel (Kustas & Norman, 1999), con un valor de 0,5 para este estudio;  $IAF$  es el índice de área foliar; y el parámetro  $c$ , que corresponde a una fracción de senescencia de las hojas, definida como la diferencia entre la unidad y la proporción de contenido de clorofila en la etapa de madurez respecto a la del etapa de llenado, para el cual se consideró un valor de 0,3.

Los coeficientes de evaporación del suelo ( $\alpha_s$ ) y transpiración de cobertura vegetal ( $\alpha_c$ ), pertenecientes a la fórmula modificada de Priestly-Taylor, ecuación (7), se estimaron a partir de las siguientes ecuaciones:

$$(\alpha_s) = \alpha - \frac{(\alpha - 1)(1 - \tau)}{(1 - \tau_0)} \quad (8)$$

$$(\alpha_c) = \frac{(\alpha - \alpha_s \tau)}{(1 - \tau)} \quad (9)$$

Donde:  $\alpha_s$  es el coeficiente de evaporación del suelo,  $\alpha_c$  es el coeficiente de la transpiración de la cobertura vegetal,  $\alpha$  depende del tipo de cubierta vegetal y se relaciona con el flujo de calor sensible de la cubierta y el déficit de presión de vapor, con un valor de 1,26 (Sumner & Jacobs, 2005). El parámetro  $\tau$  corresponde a un factor de transmisión del dosel, que representa la relación entre la radiación neta de onda completa en la superficie del suelo y la que está por encima del dosel ( $\tau = \exp(-\beta IAF)$ ). El parámetro  $\tau_0$  es un valor crítico de  $\tau$ , indicando que el dosel está suficientemente cerrado para que la evaporación del suelo se aproxime al equilibrio. La elección de este valor puede variar entre 0,2 y 0,5; en este estudio se utilizó un valor promedio de 0,35, ya que un estudio realizado por Tanner and Jury (1976), indican que el valor exacto no es crucial para los resultados.

El cálculo de los parámetros atmosféricos pertenecientes dentro de la ecuación (7) se detallan a continuación:

- Presión atmosférica ( $P_{atm}$ ):

$$P_{atm} = 101,3 \left( \frac{296 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (10)$$

Donde:  $P_{atm}$  es la presión atmosférica (kPa) y  $z$  es la elevación sobre el nivel del mar (m).

- Constante psicrométrica ( $Y$ ):

$$\gamma = \frac{C_p * P_{atm}}{\varepsilon * \lambda} = 0,000665 * P_{atm} \quad (11)$$

Donde:  $Y$  es la constante psicométrica (kPa °C<sup>-1</sup>),  $C_p$  es el calor específico a presión constante,  $1,013 \times 10^{-3}$  (MJ Kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>),  $\lambda$  es el calor latente de vaporización, al cual se le considera un valor constante de 2,45 (MJ Kg<sup>-1</sup>) y  $\varepsilon$  es el cociente del peso molecular de vapor de agua / aire seco = 0,622.

- Presión de vapor real ( $e_a$ ):

$$e_a = \frac{e^\circ(Tmin) * \frac{HRmax}{100} + e^\circ(Tmax) * \frac{HRmin}{100}}{2} \quad (12)$$

$$e^\circ(Tmax) = 0,6108 * \exp \frac{17,27 * Tmax}{Tmax + 237,3} \quad (13)$$

$$e^\circ(Tmin) = 0,6108 * \exp \frac{17,27 * Tmin}{Tmin + 237,3} \quad (14)$$

Donde:  $e_a$  es la presión de vapor real (kPa),  $e^\circ(Tmax)$  es la presión de saturación de vapor a temperatura máxima diaria (kPa),  $e^\circ(Tmin)$  es la presión de saturación de vapor a temperatura mínima diaria (kPa),  $HRmax$  es la humedad relativa máxima (%) y  $HRmin$  es la humedad relativa mínima (%)

- Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ( $\Delta$ )

$$\Delta = \frac{4098 * \left[ 0,6108 * \exp \left( \frac{(12,27 * Tmed)}{Tmed + 237,3} \right) \right]}{(Tmin + 237,3)^2} \quad (15)$$

Donde  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>) y  $T_{med}$  es la temperatura promedio diaria (°C).

- Radiación extraterrestre para periodos diarios ( $Ra$ ):

$$Ra = \left( \frac{24 * 60}{\pi} \right) * G_{sc} * d_r * [w_s * \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \sin w_s] \quad (16)$$

Donde,  $Ra$  es la radiación extraterrestre para periodos diarios (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>),  $G_{sc}$  es la constante solar = 0,082 (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>),  $d_r$  es la distancia relativa inversa Tierra-Sol (adimensional) (ecuación 17),  $\delta$  es la declinación solar en radianes (ecuación 18),  $w_s$  es el ángulo de radiación a la puesta de sol en radianes (ecuación 19),  $\varphi$  es la latitud en radianes convertidos desde la latitud en grados (ecuación 20). La distancia relativa inversa Tierra-Sol ( $d_r$ ) y la declinación solar ( $\delta$ ) fueron dadas por:

$$d_r = 1 + 0,33 * \cos \left( \frac{2\pi * J}{365} \right) \quad (17)$$

$$\delta = 0,409 * \sin \left( \frac{2\pi * J}{365} - 1,39 \right) \quad (18)$$

Donde,  $d_r$  es la distancia relativa inversa Tierra-Sol (adimensional),  $\delta$  es la declinación solar (radianes) y  $J$  es el número de días, el cual  $\left( J = \left( 275 * \frac{M}{9} - 30 + D \right) - 2 \right)$ .

El ángulo de radiación a la hora de la puesta de sol ( $w_s$ ) se da por:

$$w_s = \cos^{-1} (-\tan \varphi * \tan \delta) \quad (19)$$

Donde,  $w_s$  es el ángulo de radiación a la puesta de sol (radianes),  $\varphi$  es la latitud (radianes) convertidos desde la latitud en grados y  $\delta$  es la es la declinación solar (radianes).

La latitud (radianes) convertidos desde la latitud en grados ( $\varphi$ ):

$$\varphi = \frac{\pi}{180} * L \quad (20)$$

Donde,  $\varphi$  es la latitud (radianes) convertidos desde la latitud en grados y  $L$  es la latitud en grados decimales.

- Radiación solar de un día despejado

$$R_{so} = (0,75 + 0,00002 * z) * R_a \quad (21)$$

Donde,  $R_{so}$  es la radiación solar de un día despejado ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $z$  es la elevación sobre el nivel del mar (m) y  $R_a$  es la radiación extraterrestre para periodos diarios ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) (ecuación 16).

- Radiación de onda corta entrante neta ( $R_{ns}$ ):

$$R_{ns} = (1 - \alpha) * R_s \quad (22)$$

Donde,  $Rns$  es la radiación de onda corta entrante neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $\alpha$  es el albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0,23 para un cultivo hipotético de referencia (adimensional) y  $Rs$  es la radiación solar entrante ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ).

- Radiación de onda larga saliente neta ( $Rnl$ )

$$Rnl = \sigma \left[ \frac{(Tmax, K^4) + (Tmin, K^4)}{2} \right] [0,34 - 0,14\sqrt{e_a}] \left[ 1,35 \frac{Rs}{Rso} - 0,35 \right] \quad (23)$$

Donde,  $Rnl$  es la radiación de onda larga saliente neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $\sigma$  es la constante Stefan-Boltzmann,  $4,903 \times 10^{-9}$  ( $\text{MJ K}^{-4} \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $Tmax, K^4$  es la temperatura máxima media diaria ( $\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,16$ ),  $Tmin, K^4$  es la temperatura mínima media diaria ( $\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,16$ ),  $Rs$  es la radiación solar entrante ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) y  $Rso$  es la radiación solar de un día despejado ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) (ecuación 21)

- Radiación neta ( $Rn$ ):

Se determinó empíricamente mediante el modelo propuesto por Allen et al. (2006) expresada en  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , y para obtener la evapotranspiración equivalente en  $\text{mm d}^{-1}$  se multiplicó la  $Rn$  por el factor 0,408.

$$Rn = Rns - Rnl \quad (24)$$

Donde,  $Rn$  es la radiación neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $Rns$  es la radiación de onda corta neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) (ecuación 22) y  $Rnl$  es la radiación de onda larga neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) (ecuación 23)

#### 4.7 Análisis estadístico de los datos

En este estudio se utilizó un análisis de varianza bifactorial considerando un modelo mixto para el diseño factorial en bloques completamente aleatorizados (DBCA). Los análisis estadísticos consideraron los tratamientos de riego y los genotipos como efectos fijos y los bloques como efectos aleatorios.

$$y_{ijl} = \mu + B_l + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijl} (i = 1, \dots, n_A; j = 1, \dots, n_B; l = 1, \dots, n_0)$$

$y_{ijl}$  = es el valor de la característica de estudio, uso de agua ( $\text{mm año}^{-1}$ ), observado en la unidad experimental con el  $i$ -ésimo nivel del factor  $A$  (tratamiento de riego), con en el  $j$ -ésimo nivel del factor  $B$  (genotipos), en el  $l$ -ésimo bloque.

$\mu$  = media general

$\alpha_i$  = efecto del  $i$ -ésimo nivel del factor  $A$

$\beta_j$  = efecto del  $j$ -ésimo nivel del factor  $B$

$B_l$  = efecto del  $l$ -ésimo bloque

$\alpha\beta_{ij}$  = efecto de la interacción del  $i$ -ésimo nivel del factor  $A$  con el  $j$ -ésimo nivel del factor  $B$

$\varepsilon_{ijl}$  = es el residuo de la  $l$ -ésima unidad experimental, con el  $i$ -ésimo nivel del factor  $A$  y  $j$ -ésimo nivel del factor aleatorio  $B$ ; los residuos se asumirán aleatorios e independientes,  $N(0, \sigma^2)$

Antes de la interpretación del análisis de varianza bifactorial, se verificaron los supuestos de normalidad de los residuos y homocedasticidad de varianzas. La normalidad de los residuos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, y la homocedasticidad entre los grupos se comprobó con la prueba de Levene.

Cada uno de los análisis estadísticos descritos anteriormente fueron realizado con el Software R versión 4.2.2 (Team, 2022).

## V RESULTADOS

### 5.1 Caracterización del Índice de Área Foliar de campo (IAF<sub>C</sub>)

Los valores promedios del IAF<sub>C</sub> fueron más altos en verano en ambos tratamientos, con valores de 4,7 (*Eb*) para el tratamiento riego y 6,0 (*Es*) para el seco (Tabla 5.3). Con respecto a los valores mínimos, estos se obtuvieron en invierno, igualmente en ambos tratamientos, cuyos valores fueron de 2,3 (*En*) correspondiente al tratamiento riego y 1,0 (*En*) para el seco.

**Tabla 5.3.** Índice de área foliar promedio medido en campo (IAF<sub>C</sub>) y desviación estándar (DE) de los taxas por tratamiento hídrico.

Tratamiento	Taxa	Estación							
		Primavera		Verano		Otoño		Invierno	
		IAF <sub>C</sub> (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	DE	IAF <sub>C</sub> (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	DE	IAF <sub>C</sub> (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	DE	IAF <sub>C</sub> (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	DE
Riego	<i>Eb</i>	4,5	0,7	4,7	0,5	3,8	0,6	3,9	0,7
	<i>Ecg</i>	4,1	0,0	4,2	0,1	3,7	0,2	3,2	0,2
	<i>Eg</i>	3,6	0,5	3,8	0,5	3,4	0,6	3,2	0,6
	<i>En</i>	2,8	0,2	3,0	0,2	2,7	0,2	2,3	0,7
	<i>Eng</i>	3,1	0,9	3,5	0,8	3,4	0,6	3,0	0,6
	<i>Es</i>	4,3	0,3	4,3	0,2	3,9	0,2	3,2	0,3
Secano	<i>Eb</i>	4,6	0,7	4,8	0,5	4,0	0,2	3,8	0,6
	<i>Ecg</i>	3,7	0,8	4,1	0,1	3,7	0,2	2,8	0,2
	<i>Eg</i>	3,2	0,8	3,5	0,7	3,1	0,7	2,7	0,7
	<i>En</i>	1,6	1,2	2,0	0,6	1,7	0,4	1,0	0,7
	<i>Eng</i>	3,2	0,7	3,6	0,7	3,3	0,6	3,1	0,8
	<i>Es</i>	5,2	1,1	6,0	0,3	5,0	0,3	4,3	0,2

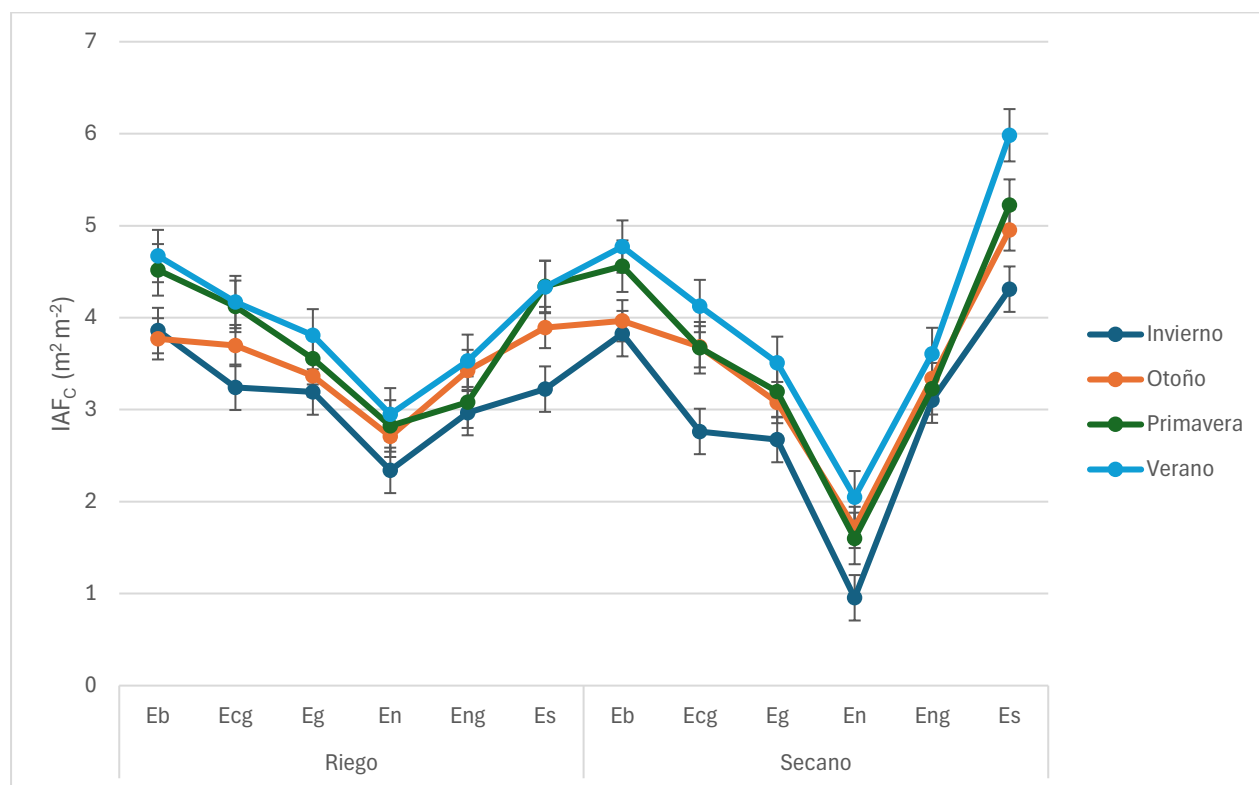
Los valores de IAF<sub>C</sub> en el tratamiento de riego muestran una mayor consistencia con menores diferencias entre máximos y mínimos a lo largo de las estaciones. En lo que respecta al tratamiento de seco, este tiene valores máximos más altos, especialmente en verano, pero también presenta los valores mínimos más bajos.

En ambos tratamientos, *Eb* muestran un crecimiento foliar bastante consistente, con valores altos en todas las estaciones y desviaciones estándar (DE) que oscilan entre 0,2 en seco durante otoño y 0,7 en otras estaciones. *Ecg* presentó valores sin grandes

fluctuaciones entre estaciones y tratamientos con una DE 0,0 bajo riego en primavera. *Eg* sostiene valores de IAF<sub>C</sub> con un comportamiento similar al de *Ecg*, con fluctuaciones moderadas y DE que varían entre 0,5 y 0,8. En lo que respecta a *En*, este taxa muestra los valores más bajos en ambos tratamientos y en todas las estaciones, especialmente bajo secano en invierno (1,0). Referente a *Eng*, no muestra grandes fluctuaciones en su crecimiento foliar. El genotipo *Es* destaca en secano, especialmente en verano, donde alcanza su valor más alto (6,0). No obstante, presenta la mayor variabilidad, junto a *En*, con una desviación estándar de 1,1 en primavera.

#### ***Variación estacional del IAF<sub>C</sub> promedio de los taxas por tratamiento hídrico***

El tratamiento de riego mantiene una cierta estabilidad en el IAF<sub>C</sub> a lo largo de todas las estaciones (Figura 5.5). Si bien es cierto que hay disminuciones estacionales, estas son suaves, y los valores del IAF<sub>C</sub> se mantienen en un rango de moderado a alto durante todo el año. En el tratamiento de riego, la estación verano mantiene los valores más altos de IAF<sub>C</sub>, seguido de primavera (a excepción del taxa *Eng*), otoño (excluyendo el taxa *Eb*) e invierno. El taxa que presenta los valores más bajos en este tratamiento es *En*, y los valores más altos *Eb* y *Es*.



**Figura 5.5.** Variación estacional del índice de área foliar promedio (IAF<sub>C</sub>) de los taxas por tratamiento hídrico.

En lo referente al tratamiento seco, los valores del IAF<sub>C</sub> son generalmente más bajos, con excepción del taxa *Es*. La variación estacional es más marcada, con una disminución importante del IAF<sub>C</sub> en invierno y un aumento considerable en verano. Bajo este tratamiento, el mayor valor del índice de área foliar corresponde al taxa *Es*, y el menor a *En*.

#### ***Análisis de varianza sobre la variable índice de área foliar medida en campo (IAF<sub>C</sub>)***

El análisis de varianza bifactorial realizado por estación demostró la existencia de diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en el índice de área foliar de campo (IAF<sub>C</sub>) para los efectos de los taxas y, en algunas estaciones, para la interacción con el tratamiento hídrico. (Tabla 5.4). Durante la primavera, el tratamiento hídrico no presentó un efecto

significativo ( $p = 0,107$ ) sobre el IAF<sub>C</sub>, mientras que los taxas mostraron diferencias altamente significativas ( $p < 0,001$ ), lo que evidencia una variabilidad notable en la respuesta entre los distintos taxas. La interacción entre tratamiento hídrico y taxas fue marginalmente significativa ( $p = 0,057$ ).

**Tabla 5.4.** Análisis de varianza bifactorial sobre la variable dependiente (IAF<sub>C</sub>) para ambos factores y niveles.

Efecto	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Tratamiento	0,107	0,357	0,108	0,013
Taxa	<,001	<,001	<,001	<,001
Tratamiento x Taxa	0,057	0,005	0,023	0,002

En el verano, aunque el tratamiento hídrico no tuvo un efecto significativo ( $p = 0,357$ ), los taxas mantuvieron un efecto altamente significativo ( $p < 0,001$ ), reafirmando la existencia de diferencias importantes en el IAF<sub>C</sub> entre los distintos taxas. La interacción entre tratamiento hídrico y taxas fue significativa ( $p = 0,005$ ), lo que sugiere que la respuesta al tratamiento varía según los taxones en esta estación.

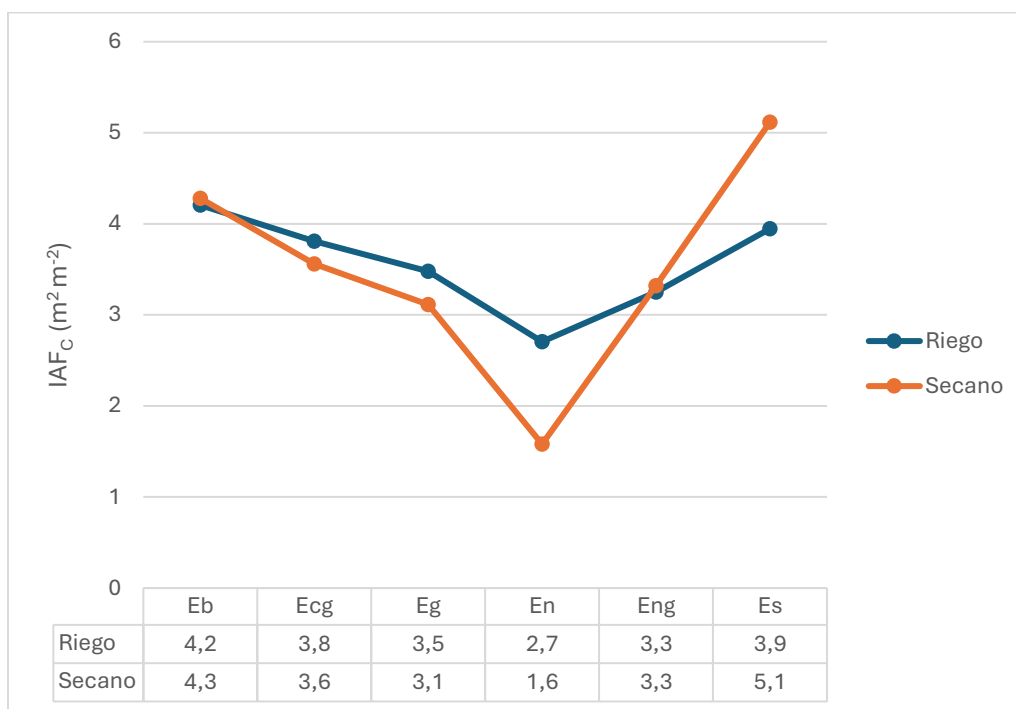
En el análisis de otoño, el tratamiento hídrico tampoco mostró un efecto significativo ( $p = 0,108$ ), pero los taxas continuaron presentando un efecto altamente significativo sobre el IAF<sub>C</sub> ( $p < 0,001$ ). La interacción entre tratamiento y taxas resultó ser significativa ( $p = 0,023$ ), evidenciando una respuesta diferenciada de los taxas al tratamiento hídrico en esta estación.

Durante el invierno, el tratamiento hídrico tuvo un efecto significativo ( $p = 0,0132$ ) sobre el IAF<sub>C</sub>, reflejando que las condiciones de riego y seco impactan notablemente en esta época. Los taxas mantuvieron un efecto altamente significativo ( $p < 0,001$ ), y la interacción entre tratamiento hídrico y taxas también fue significativa ( $p = 0,002$ ), indicando que la respuesta del IAF<sub>C</sub> varía dependiendo del tratamiento aplicado y los taxones considerados.

### ***Comportamiento del Índice de Área Foliar (IAF<sub>C</sub>) por taxa y tratamiento hídrico***

En general, el índice de área foliar de campo (IAF<sub>C</sub>) bajo condiciones de riego es consistentemente más alto que bajo condiciones de seco para la mayoría de los taxas, excepto en el caso de *Es*, donde el IAF<sub>C</sub> bajo seco es significativamente mayor, alcanzando un valor de 5,12 frente a 3,95 en riego (Figura 5.6). Para *Eb*, los valores son similares entre riego (4,21) y seco (4,28), mostrando una diferencia mínima. *Ecg* exhibe un IAF<sub>C</sub> de 3,81 bajo riego y 3,56 bajo seco, evidenciando una leve disminución.

En el caso de *Eg*, se observa una caída más pronunciada de 3,48 en riego a 3,11 en seco. Por otro lado, los taxones *En* muestran una diferencia importante, con un IAF<sub>C</sub> que disminuye de 2,71 en riego a 1,58 en seco, lo cual sugiere una alta sensibilidad a la disponibilidad de agua. Para *Eng*, los valores son bastante similares, con 3,25 en riego y 3,32 en seco.



**Figura 5.6.** Variación del promedio anual de índice de área foliar de campo ( $IAF_C$ ) de los taxas por tratamiento hídrico.

El comportamiento más distintivo se presenta en *Es*, donde el  $IAF_C$  bajo secano alcanza un valor de 5,12, superando notablemente al  $IAF_C$  bajo riego (3,95). Esta excepción podría indicar una adaptación específica de *Es* a condiciones de menor disponibilidad de agua, mientras que los otros taxas responden mejor al riego.

La mayoría de los taxas siguieron una tendencia en la que el  $IAF_C$  bajo riego es mayor que bajo secano, excepto *Es*, donde la tendencia fue inversa.

## 5.2 Índice de Área Foliar en función de los índices de vegetación

Se obtuvieron las relaciones entre los índices de vegetación, provenientes de las imágenes multispectrales de ambos sensores, con el índice de área foliar medido en campo ( $IAF_C$ ) para cada tratamiento hídrico. Con respecto a los resultados procedentes

de las imágenes de Sentinel-2, bajo el tratamiento riego, el mejor ajuste se obtuvo cuando se utilizó el SAVI\_S2 como variable independiente (Ecuación 2, Tabla 5.5),  $R^2$ : 0,07 y  $S_{yx}$ : 0,69, y el ajuste más débil se alcanzó empleando el SR\_S2,  $R^2$ : 0,005 y  $S_{yx}$ : 0,71. Estos valores sugieren que, aunque hay una correlación entre los índices de vegetación y el IAF<sub>C</sub>, el poder explicativo de estos modelos es muy bajo para imágenes Sentinel.

**Tabla 5.5.** Estadísticos y parámetros de regresión para estimar el índice de área foliar (IAF) en función de: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de relación simple (SR), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) e índice de clorofila verde (GCI) provenientes de imágenes Sentinel-2, correspondiente al tratamiento riego.

Ecuación	Índice de Vegetación (variable independiente)	Parámetros del modelo (coeficientes)		Valor-p (modelo)	$R^2$	$S_{yx}$
		$B_0$	$B_1$			
1	NDVI_S2	2,470	1,438	0,007	0,037	0,700
2	SAVI_S2	2,652	2,527	0,000	0,071	0,688
3	SR_S2	3,260	0,030	0,346	0,005	0,712
4	GCI_S2	3,077	0,077	0,053	0,020	0,707

Índice de área foliar estimado por teledetección;  $IAF_T = \beta_0 + \beta_1 + \epsilon_i$ ; Valor-p = valor de probabilidad asociado a la prueba de significancia del modelo (nivel de significancia = 0,05);  $R^2$  = coeficiente de determinación;  $S_{yx}$  = error estándar de estimación; \_S2 = buffer de 2 metros para imágenes Sentinel-2.

Referente a los resultados derivados de las imágenes de dron, bajo el mismo tratamiento hídrico y considerando un buffer de 2 metros, los valores de  $R^2$  son más altos en comparación con los modelos de Sentinel-2, lo que indica una mejor capacidad predictiva (Tabla 5.6), teniendo el modelo SAVI\_d2 el mayor  $R^2$  (0,156). Los modelos con buffer circular de 4 m muestran valores de  $R^2$  y  $S_{yx}$  similares a los de buffer de 2 m, con diferencias mínimas entre ambos. Si bien es cierto, los modelos basados en datos de dron ofrecen mejores resultados en términos de ajuste y precisión en comparación con los modelos basados en Sentinel-2, destacando particularmente el índice SAVI como el

mejor predictor del IAF en las condiciones evaluadas, igualmente el poder explicativo del mejor modelo es muy bajo.

**Tabla 5.6.** Estadísticos y parámetros de regresión para estimar el índice de área foliar (IAF) en función de: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de relación simple (SR), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) e índice de clorofila verde (GCI) provenientes de imágenes dron, correspondiente al tratamiento riego.

Ecuación	Índice de Vegetación (variable independiente)	Parámetros del modelo (coeficientes)		Valor-p (modelo)	R <sup>2</sup>	Syx
		B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>			
1	NDVI_d2	1,830	2,169	1,30E-06	0,116	0,671
2	SAVI_d2	2,362	1,870	1,51E-08	0,156	0,656
3	SR_d2	3,048	0,035	8,80E-05	0,078	0,686
4	GCI_d2	2,811	0,095	4,89E-06	0,104	0,676
5	NDVI_dcir	1,878	2,089	1,18E-06	0,117	0,671
6	SAVI_dcir	2,425	1,761	2,02E-08	0,153	0,657
7	SR_dcir	3,088	0,030	0,000151	0,073	0,687
8	GCI_dcir	2,854	0,086	7,26E-06	0,101	0,677
9	NDVI_dcir_m	3,009	0,753	0,001261	0,053	0,695
10	SAVI_dcir_m	2,919	1,155	1,38E-05	0,095	0,679
11	SR_dcir_m	3,082	0,043	0,000247	0,068	0,689
12	GCI_dcir_m	3,058	0,074	0,000252	0,068	0,689

Índice de área foliar estimado por teledetección;  $IAF_T = \beta_0 + \beta_1 + \epsilon_i$ ; Valor-p = valor de probabilidad asociado a la prueba de significancia del modelo (nivel de significancia = 0,05); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinación; S<sub>yx</sub> = error estándar de estimación; \_d2 = buffer de 2 metros; \_dcir = parcela circular; \_dcir\_m = parcela circular con enmascaramiento de copa para imágenes dron.

En el tratamiento de seco, los modelos muestran un aumento en R<sup>2</sup> comparado con riego, lo que indica una mejor relación entre los índices de vegetación y el IAF<sub>C</sub> en condiciones de seco. En cuanto a Sentinel-2, el modelo SAVI\_S2 muestra el mayor coeficiente de determinación (Tabla 5.7), mientras que SR\_S2 el menor. No obstante, ambos valores con bajo poder explicativo.

**Tabla 5.7.** Estadísticos y parámetros de regresión para estimar el índice de área foliar (IAF) en función de: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de relación simple (SR), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) e índice de clorofila verde (GCI) provenientes de imágenes Sentinel-2, correspondiente al tratamiento seco.

Ecuación	Índice de Vegetación (variable independiente)	Parámetros del modelo (coeficientes)		Valor-p (modelo)	R <sup>2</sup>	Syx
		B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>			
1	NDVI_S2	1,015	3,076	0,002	0,048	1,075
2	SAVI_S2	1,708	4,269	0,000	0,072	1,061
3	SR_S2	2,448	0,117	0,009	0,036	1,081
4	GCI_S2	2,215	0,184	0,002	0,049	1,074

Índice de área foliar estimado por teledetección;  $IAF_T = \beta_0 + \beta_1 + \varepsilon_i$ ; Valor-p = valor de probabilidad asociado a la prueba de significancia del modelo (nivel de significancia = 0,05); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinación; S<sub>yx</sub> = error estándar de estimación; \_S2 = buffer de 2 metros para imágenes Sentinel-2.

Para los modelos provenientes de imágenes de dron bajo tratamiento de seco, los resultados muestran una mejora en la capacidad predictiva en comparación con los modelos derivados de Sentinel-2 (Tabla 5.8). Los modelos basados en GCI\_dcir y GCI\_d2 presentaron los valores de R<sup>2</sup> más altos. En cuanto a los modelos con buffer circular de 4 metros, solo SR\_dcir y GCI\_dcir mostraron valores de R<sup>2</sup> levemente superiores a los obtenidos con buffer de 2 metros. En esta condición, el modelo GCI\_dcir obtuvo el mayor valor de R<sup>2</sup> (0,228).

**Tabla 5.8.** Estadísticos y parámetros de regresión para estimar el índice de área foliar (IAF) en función de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de relación simple (SR), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) e índice de clorofila verde (GCI) provenientes de imágenes dron, correspondiente al tratamiento seco.

Ecuación	Índice de Vegetación (variable independiente)	Parámetros del modelo (coeficientes)		Valor-p (modelo)	R <sup>2</sup>	Syx
		B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>			
5	NDVI_d2	-0,119	4,329	2,67E-10	0,190	0,991
6	SAVI_d2	1,009	3,501	6,47E-11	0,202	0,984
7	SR_d2	2,602	0,041	7,92E-09	0,161	1,009
8	GCI_d2	2,061	0,144	2,53E-11	0,209	0,979
9	NDVI_dcir	0,057	4,085	3,23E-10	0,188	0,992
10	SAVI_dcir	1,138	3,268	1,09E-10	0,197	0,987
11	SR_dcir	2,603	0,041	3,86E-09	0,167	1,005
12	GCI_dcir	2,018	0,149	2,42E-12	0,228	0,967
13	NDVI_dcir_m	2,813	0,674	0,060280	0,018	1,091
14	SAVI_dcir_m	2,561	1,314	0,000883	0,057	1,070
15	SR_dcir_m	2,641	0,063	0,000155	0,073	1,060
16	GCI_dcir_m	2,675	0,094	0,000877	0,057	1,070

Índice de área foliar estimado por teledetección;  $IAF_T = \beta_0 + \beta_1 + \epsilon_i$ ; Valor-p = valor de probabilidad asociado a la prueba de significancia del modelo (nivel de significancia = 0,05); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinación; S<sub>yx</sub> = error estándar de estimación; \_d2 = buffer de 2 metros; \_dcir = parcela circular; \_dcir\_m = parcela circular con enmascaramiento de copa para imágenes dron.

Los modelos bajo tratamiento de secano mostraron mayores valores de R<sup>2</sup> en comparación con los de riego, indicando un mejor ajuste en estas condiciones. Para el tratamiento de riego, los índices SAVI\_d2 y SAVI\_dcir presentaron los valores más altos de R<sup>2</sup> y los S<sub>yx</sub> más bajos, siendo los mejores índices para estimar el IAF<sub>C</sub>. En condiciones de secano, los índices GCI\_d2 y GCI\_dcir destacaron como los más precisos para estimar el IAF<sub>C</sub>. Respecto al tipo de buffer, los modelos con buffer circular de 4 metros presentaron un desempeño ligeramente superior en la mayoría de los casos. A pesar de que los índices de vegetación derivados de imágenes de dron, específicamente SAVI en riego y GCI en secano, son los mejores predictores identificados, los valores bajos de R<sup>2</sup> reflejan una capacidad predictiva limitada.

Conjuntamente, se identificó el modelo óptimo para cada genotipo, determinándose que el modelo más adecuado corresponde al genotipo G8 (*Eucalyptus globulus*), utilizando el índice de vegetación SAVI con un buffer circular (Tabla 5.9). En este proceso de selección, no se realizó una segregación de los datos en función del tratamiento hídrico al analizar las correlaciones entre los índices de vegetación, obtenidos de ambos sensores, y los índices de área foliar. Esto se debió a que dicha separación habría resultado en un conjunto de datos con únicamente 12 observaciones, lo cual sería insuficiente para garantizar la robustez estadística de los análisis.

**Tabla 5.9.** Estadísticas y parámetros de regresión para estimar el índice de área foliar (IAF) en función de índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) provenientes de imágenes dron. Incluye ambos tratamientos hídricos.

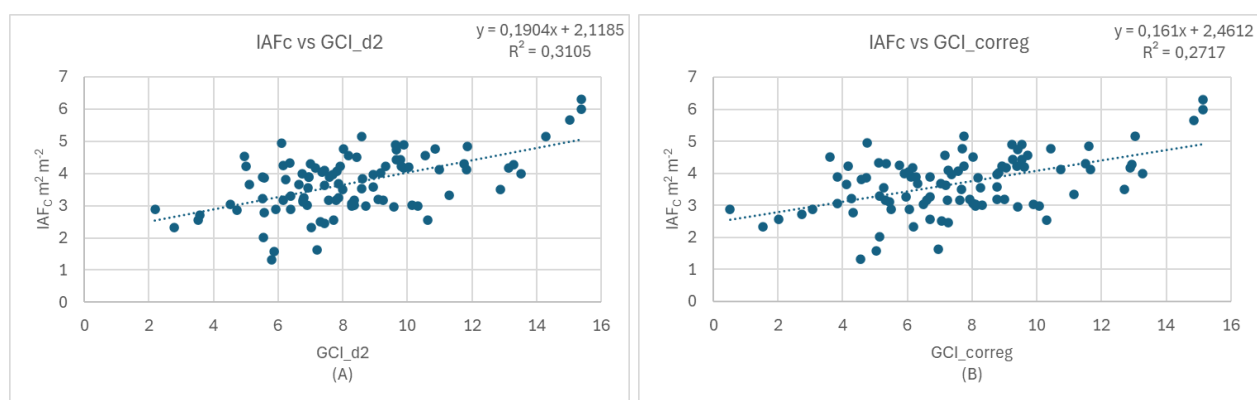
Ecuación	Índice de Vegetación (variable independiente)	Parámetros del modelo (coeficientes)		Valor-p (modelo)	R <sup>2</sup>	Syx
		B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>			
1	SAVI_dcir	1,138	3,764	2,41E-06	0,644	0,292

Índice de área foliar estimado por teledetección;  $IAF_T = \beta_0 + \beta_1 + \epsilon_i$ ; Valor-p = valor de probabilidad asociado a la prueba de significancia del modelo (nivel de significancia = 0.05); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinación; S<sub>yx</sub> = error estándar de estimación; \_dcir = parcela circular para imágenes dron.

Este modelo, que utiliza el índice de vegetación SAVI con un buffer circular, es estadísticamente significativo y presenta un poder predictivo sólido para el genotipo G8 (*Eucalyptus globulus*). Con un R<sup>2</sup> de 0.6437, el modelo explica una porción considerable (64.37%) de la variabilidad en el IAF, lo que lo convierte en una herramienta útil para estimar el IAF en este genotipo. El bajo S<sub>yx</sub> respalda aún más la precisión del modelo.

### **Corrección de malezas mediante imágenes RGB**

Se realizó una corrección de la maleza por medio de fotografías digitales (imágenes RGB) tomadas en terreno con una cámara Canon T7 y una lente de 18-55 mm, periodo de verano, de todas las parcelas consideradas en este estudio y a simple apreciación visual se les asignó un porcentaje de maleza presente en cada una de estas. Posteriormente, se extrajo el valor promedio del índice de vegetación GCI de una región con presencia exclusiva de maleza a partir de las imágenes multiespectrales capturadas por el dron en el mismo período. Esto último con la finalidad de obtener un factor de corrección por parcela, resultado de la multiplicación del promedio de dicho índice y el valor tanto por uno de maleza presente en cada parcela, el cual se le restó al valor promedio de GCI de todas las unidades experimentales. Posteriormente, se realizaron las correlaciones del IAF<sub>C</sub> con el índice de vegetación GCI\_d2, obtenido de la imagen multiespectral de dron con buffer de 2 metros, y el CGI corregido con este factor (Figura 5.7). Se eligió este índice de vegetación ya que fue el que presentó una mejor correlación con el IAF<sub>C</sub> en dicha temporada.



**Figura 5.7.** Relación entre el índice de área foliar de campo (IAF<sub>C</sub>) y el índice de clorofila verde (GCI), obtenido a partir de una imagen dron, para (A) buffer de 2 m y (B) buffer de 2 m considerando un factor de corrección por maleza presente en las parcelas de estudio.

Ambos modelos tienen un poder predictivo bajo, con valores p de 3.717E-09 y 5.175E-08 respectivamente, y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) relativamente bajos (0.3105 y 0.2717), lo que sugiere que el GCI (tanto corregido, como sin corregir) no es un predictor

fuerte del  $IAF_C$  en las condiciones evaluadas. La corrección por maleza no mejoró la correlación entre el GCI y el  $IAF_C$ , sino más bien la ha disminuido ligeramente. Esto podría indicar que el método de corrección utilizado no fue efectivo para el periodo de verano o que la presencia de maleza tiene un efecto complejo que no se capturó adecuadamente en el análisis.

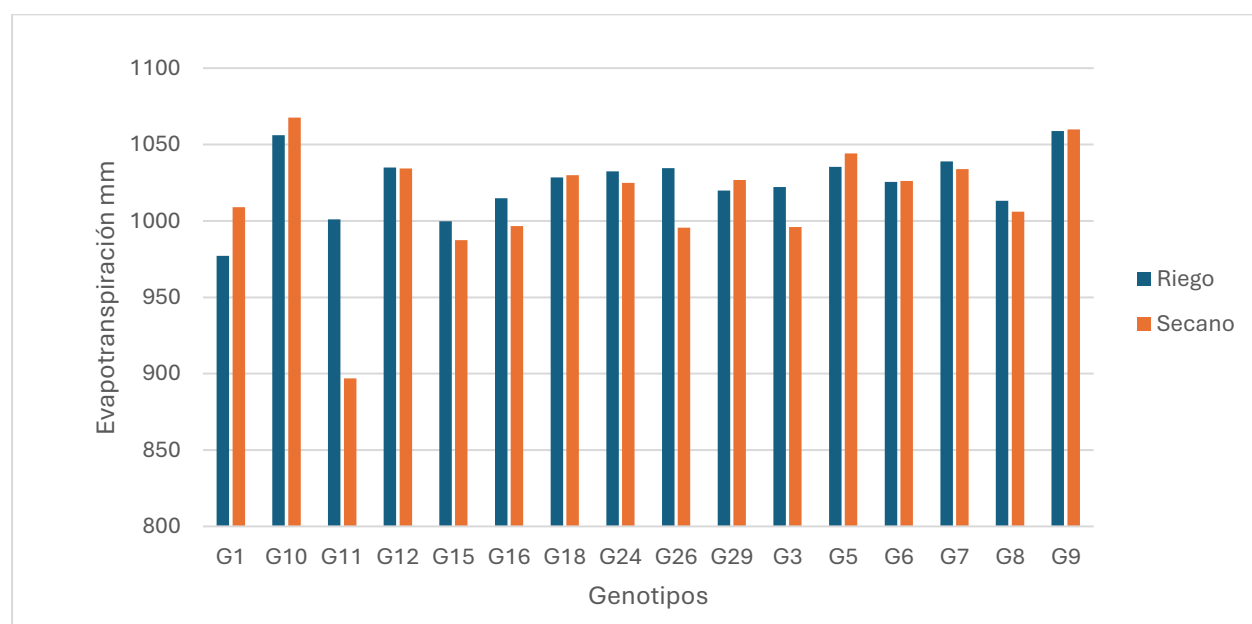
### **5.3 Evapotranspiración total (ET)**

Debido al bajo poder predictivo de los modelos provenientes de las correlaciones entre los índices de vegetación con el índice de área foliar medido en campo ( $IAF_C$ ), no se utilizó el índice de área foliar estimado por teledetección ( $IAF_T$ ). Por consiguiente, se empleó el  $IAF_C$ , en conjunto a variables ambientales, para el cálculo de la evapotranspiración total (ET).

En la estimación de la evapotranspiración total (ET), se empleó el modelo semi-empírico de Priestley-Taylor basado en la radiación neta ( $R_n$ ) y en el índice de área foliar medido en campo ( $IAF_C$ ). Aunque no se contó con mediciones directas de ET en el ensayo, la literatura respalda ampliamente el uso de este modelo para estimar la ET en sistemas forestales y de vegetación similares. Estudios previos han demostrado que el modelo de Priestley-Taylor es eficaz para capturar las variaciones de la ET en función de la disponibilidad de radiación y el área foliar, proporcionando estimaciones confiables cuando se aplican en contextos comparables (Shi et al., 2008). Investigaciones realizadas en ecosistemas forestales y en cultivos agrícolas han validado el enfoque, mostrando una medición robusta entre las estimaciones del modelo y los datos observados obtenidos mediante métodos directos, como sensores de flujo de savia y lisímetros (Ding et al., 2013; Fisher et al., 2005; Flint & Childs, 1991). Esta justificación bibliográfica respalda la aplicabilidad del modelo en el presente estudio, garantizando que las estimaciones de ET derivadas del  $IAF_C$  y la radiación neta son representativas de las condiciones observadas.

Según los valores de ET obtenidos (Figura 5.8), existen diferencias entre los genotipos, tanto en condiciones de riego como de seco. Algunos genotipos, como G10, G9, G7 y G5, presentan valores de evapotranspiración más altos en ambos tratamientos, mientras que otros, como G11 y G1, muestran valores más bajos. En términos generales, la evapotranspiración es mayor en los genotipos que se encuentran bajo condiciones de riego en comparación con los que están bajo condiciones de seco.

El genotipo G10 (*Eucalyptus smithii*) muestra valores altos de evapotranspiración tanto en riego (cerca de 1060 mm) como en seco (> 1060 mm), situación similar a lo que ocurre con el genotipo G9 (*E. badjensis*), lo que podría indicar una capacidad robusta de transpiración independientemente de la disponibilidad de agua. Caso contrario es lo que ocurre con el genotipo G11 (*E. nitens*), que presenta uno de los valores más bajos en ambos tratamientos hídricos, lo que sugiere una menor respuesta al agua disponible en comparación con otros genotipos.



**Figura 5.8.** Evapotranspiración anual comparativa de los genotipos de *Eucalyptus* bajo tratamiento hídrico.

La mayoría de los genotipos muestran una disminución en la evapotranspiración bajo condiciones de secano, lo que es esperable dado el menor suministro de agua. Sin embargo, la magnitud de esta reducción varía entre los genotipos. Por ejemplo, G10, G12 y G9 tienen una menor diferencia entre las condiciones de riego y secano, lo que podría indicar cierta eficiencia en el uso del agua o adaptación a condiciones de estrés hídrico.

***Análisis de varianza bifactorial sobre la variable dependiente evapotranspiración total (ET).***

Se efectuó un análisis de varianza (ANOVA) bifactorial a la variable evapotranspiración total (ET). Se evaluaron los efectos de genotipo (16 niveles) y tratamiento hídrico (riego vs. secano), y se consideró también la interacción entre ambos factores (Tabla 5.10).

En cuanto a los genotipos, su efecto es altamente significativo, lo que implica diferencias importantes en la evapotranspiración entre los distintos genotipos de *Eucalyptus*. Esto es consistente con las observaciones anteriores donde se notaron variaciones en la evapotranspiración entre los genotipos.

El tratamiento hídrico también tiene un efecto altamente significativo en la evapotranspiración. Esto confirma que la disponibilidad hídrica influye significativamente en la cantidad de agua transpirada por los eucaliptos.

**Tabla 5.10.** Análisis de varianza bifactorial sobre la variable dependiente evapotranspiración total (ET)

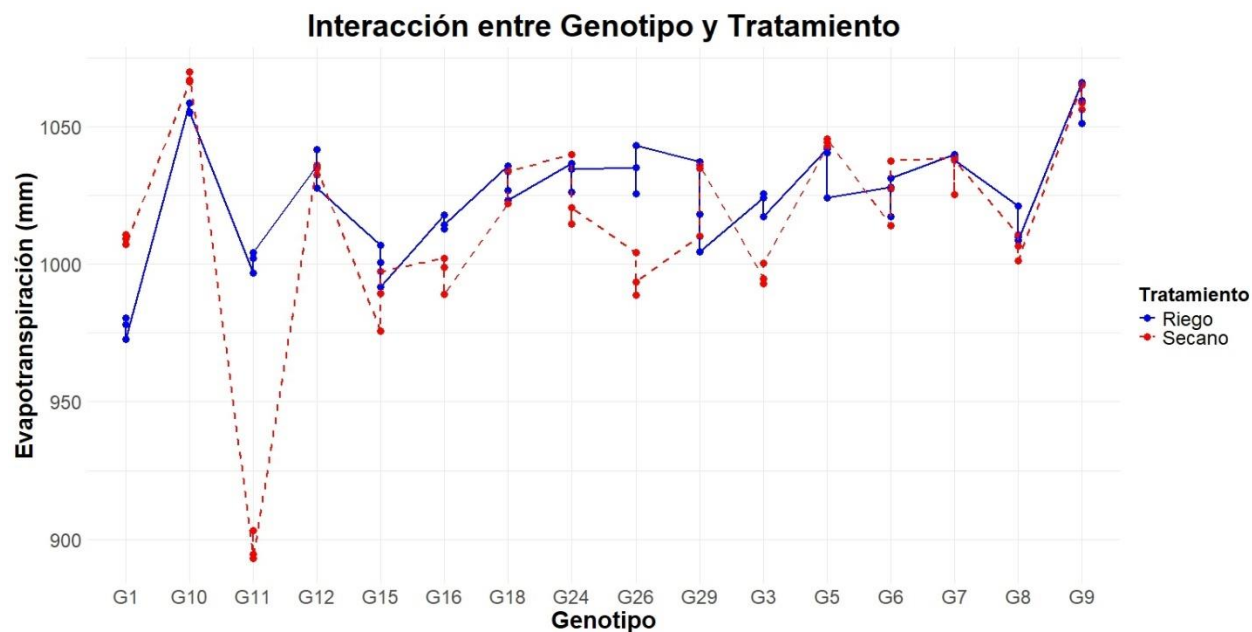
Variable	Fuente de variación	Grados de libertad	F-valor	Pr > F
ET	Genotipo	15	56,77	0,0001
	Tratamiento	1	164,9	0,0001
	Genotipo*Tratamiento	15	41,08	0,0001

F-valor = valor de significación; significativo para ( $p < 0,05$ )

De igual modo, la interacción entre genotipo y tratamiento es altamente significativa. Esto sugiere que la respuesta de la evapotranspiración al tratamiento hídrico no es la misma para todos los genotipos; es decir, algunos genotipos pueden ser más sensibles al riego que otros, y las diferencias en evapotranspiración bajo riego y seco varían según el genotipo. Este resultado es crucial porque indica que no solo el genotipo o el tratamiento hídrico individualmente afectan la evapotranspiración, sino que la combinación de ambos factores tiene un efecto particular. En consecuencia, es necesario hacer el análisis desde la interacción de ambos factores.

### ***Interacción entre las variables genotipo y tratamiento hídrico***

Se realizó un análisis gráfico para visualizar la interacción entre los genotipos y el tratamiento hídrico (riego vs seco) sobre la evapotranspiración total (Figura 5.9). Se puede apreciar en el gráfico que los genotipos G10 y G9 muestran valores relativamente altos en ambos tratamientos, con una diferencia más marcada entre riego y seco en G10. Por su parte, G11 muestra la evapotranspiración más baja en seco entre todos los genotipos; indicio que, en condiciones de baja disponibilidad de agua, G11 transpira mucho menos que los otros genotipos. Así también, es el que presenta una mayor amplitud de la diferencia entre riego y seco (104 mm aprox.); evidenciando una alta sensibilidad al riego, respondiendo de manera significativa al aumento de disponibilidad de agua. Es preciso señalar que G11 fue el que presentó una mayor mortalidad en el ensayo, lo que podría haber afectado los resultados aquí expuestos.



**Figura 5.9.** Interacción entre las variables genotipo y tratamiento hídrico sobre la variable dependiente evapotranspiración.

G1 muestra la evapotranspiración más baja, de todos los genotipos, en riego. Esto indicaría que, a pesar de recibir suficiente agua, este genotipo no transpira tanto como los demás cuando el agua es abundante. Bajo condiciones de secano, G1 también presenta una evapotranspiración baja, aunque ligeramente superior a la observada en riego. Este comportamiento sugiere que G1 podría tener una eficiencia en el uso del agua o un mecanismo que limite la transpiración incluso cuando hay abundancia de agua.

Los genotipos G24 y G29 tienen una respuesta bastante estable con poca variación entre riego y secano, sugiriendo que estos genotipos podrían ser más resilientes o eficientes en el uso del agua, manteniendo niveles de evapotranspiración relativamente constantes independientemente del tratamiento hídrico.

### ***Evapotranspiración total (ET) y genotipos***

Se realizó un análisis de medias de ET para los genotipos evaluados (Tabla 5.11) a efectos de establecer diferencias significativas en este parámetro y evaluar comunalidades.

El genotipo G11 bajo condiciones de secano presenta el menor valor de ET de manera aislada de otros genotipos, con una media de 897 mm. Este genotipo se encuentra significativamente separado del resto, lo que indica que su ET es significativamente menor en comparación con los demás genotipos y tratamientos.

**Tabla 5.11.** Agrupamiento de Tukey para las medias de evapotranspiración total (ET)

Genotipo	Tratamiento	Media	SE	df	LIIC	LSIC	Grupo
G11	Secano	897	4,32	63,6	888	906	a
G1	Riego	977	4,32	63,6	968	986	b
G15	Secano	987	4,32	63,6	979	996	bc
G26	Secano	996	4,32	63,6	987	1004	bcd
G3	Secano	996	4,32	63,6	987	1005	bcde
G16	Secano	997	4,32	63,6	988	1005	bcde
G15	Riego	1000	4,32	63,6	991	1008	bcdef
G11	Riego	1001	4,32	63,6	992	1010	bcdefg
G8	Secano	1006	4,32	63,6	997	1015	cdefgh
G1	Secano	1009	4,32	63,6	1000	1018	cdefghi
G8	Riego	1013	4,32	63,6	1005	1022	defghij
G16	Riego	1015	4,32	63,6	1006	1024	defghij
G29	Riego	1020	4,32	63,6	1011	1029	efghijk
G3	Riego	1022	4,32	63,6	1014	1031	fghijkl
G24	Secano	1025	4,32	63,6	1016	1034	ghijkl
G6	Riego	1025	4,32	63,6	1017	1034	hijkl
G6	Secano	1026	4,32	63,6	1018	1035	hijkl
G29	Secano	1027	4,32	63,6	1018	1036	hijkl
G18	Riego	1028	4,32	63,6	1020	1037	hijkl
G18	Secano	1030	4,32	63,6	1021	1038	hijkl
G24	Riego	1032	4,32	63,6	1024	1041	ijklm
G7	Secano	1034	4,32	63,6	1025	1043	klm
G12	Secano	1034	4,32	63,6	1026	1043	klm
G26	Riego	1034	4,32	63,6	1026	1043	klm
G12	Riego	1035	4,32	63,6	1026	1044	jklmn
G5	Riego	1035	4,32	63,6	1027	1044	jklmn
G7	Riego	1039	4,32	63,6	1030	1048	klmno
G5	Secano	1044	4,32	63,6	1036	1053	lmnop
G10	Riego	1056	4,32	63,6	1048	1065	mnop
G9	Riego	1059	4,32	63,6	1050	1067	nop
G9	Secano	1060	4,32	63,6	1051	1069	op
G10	Secano	1068	4,32	63,6	1059	1076	p

SE = error estándar; df = grados de libertad asociados con la estimación; LIIC = límite inferior del intervalo de confianza para la media estimada; LSIC = Límite superior del intervalo de confianza para la media estimada.

Un grupo mayor de genotipos, incluyendo G16 bajo riego, G6 (riego y seco) y G5 (riego y seco) entre otros presentaron valores similares y pueden ser catalogados de alta demanda hídrica, para seguir con genotipos que presentan valores medios de ET.

El grupo que contiene los genotipos G5 (seco), G9 (riego y seco) y G10 (riego y seco) corresponde al que tiene los valores medios más altos de ET. G9 y G10 están presentes en este grupo bajo los dos tratamientos hídrico, lo que indica que son los genotipos consistentemente con la mayor ET anual y que no presentan diferencias significativas entre ellos.

## VI DISCUSIÓN

El presente trabajo proporciona información importante referente al comportamiento de distintos genotipos de *Eucalyptus* expuestos a condiciones contrastantes de disponibilidad hídrica, mediante el uso de herramientas de teledetección para estimar el índice de área foliar (IAF) y su relación con la evapotranspiración total (ET). A continuación, se discuten los principales hallazgos y su relevancia en el manejo forestal.

Los resultados muestran que el tratamiento de riego proporciona una mayor estabilidad en el IAF a lo largo de las estaciones, con bajas diferencias entre los valores máximos y mínimos en comparación con el tratamiento de secano. Esto sugiere que el riego estabiliza las condiciones ambientales, limitando las fluctuaciones en el crecimiento foliar, lo cual coincide con estudios previos que muestran que el suministro de agua reduce el estrés hídrico y mantiene un IAF más estable en plantaciones de *Eucalyptus* (Battaglia et al., 1998). Además, la interacción entre el riego, la temperatura y la radiación solar podría contribuir a esta estabilidad, influyendo en el IAF de manera significativa. Por otro lado, el tratamiento de secano muestra una mayor variabilidad estacional, con valores máximos en verano y mínimos en invierno, indicando un estrés hídrico que acentúa las fluctuaciones en el IAF. Estudios como los de Hubbard et al. (2010) y Otto et al. (2017) también han encontrado que en condiciones de riego, las plantaciones de *Eucalyptus* presentan un IAF más alto y menos fluctuante en comparación con las plantaciones de secano, donde las fluctuaciones estacionales son más pronunciadas debido al déficit hídrico. Además, Yu et al. (2019) encontraron que la irrigación durante la temporada seca contribuye a acortar el período de crecimiento foliar máximo y a estabilizar el área foliar en plantaciones comerciales de *Eucalyptus urophylla* × *grandis*, lo que respalda los hallazgos de este estudio.

El taxa *Eucalyptus smithii* (*Es*) destaca por su rendimiento en condiciones de secano, mostrando un IAF relativamente alto en comparación con otros genotipos. Este

comportamiento podría deberse a una mayor eficiencia en el uso del agua o adaptaciones morfológicas que le permiten mantener un área foliar más estable en condiciones de baja disponibilidad hídrica. Esta característica podría ser relevante para el manejo forestal en zonas con estrés hídrico, donde la selección de especies resistentes es crucial. Estudios previos han demostrado que *E. smithii* es particularmente eficiente en la utilización de agua en ambientes con estrés hídrico, manteniendo un crecimiento estable incluso en suelos con disponibilidad limitada de agua Müller et al. (2017). En contraste, *Eucalyptus nitens* (*En*) presenta los valores de IAF más bajos, lo que sugiere una menor adaptabilidad a la falta de agua, como lo demuestran investigaciones donde esta especie mostró una reducción significativa del IAF bajo condiciones de estrés hídrico prolongado (Battaglia et al., 1998). Esta menor tolerancia podría estar relacionada con características morfológicas o fisiológicas específicas que limitan su capacidad de adaptación.

El análisis de varianza bifactorial realizado por estación confirmó que los efectos del tratamiento hídrico y los taxas tienen un impacto significativo en el índice de área foliar de campo (IAF<sub>C</sub>), aunque este impacto varía según la estación. Durante primavera y verano, el tratamiento hídrico no mostró un efecto significativo en el IAF<sub>C</sub>, lo cual sugiere que otros factores ambientales, como la capacidad de retención de humedad del suelo o el uso de reservas hídricas acumuladas durante el otoño e invierno, pueden atenuar las diferencias en el rendimiento foliar entre los tratamientos de riego y seco. Sin embargo, los resultados reflejan que los taxas presentan diferencias altamente significativas en estas estaciones, indicando que las características genéticas y la adaptabilidad de cada especie o híbrido juegan un papel fundamental en el rendimiento foliar.

En verano, la interacción significativa entre tratamiento hídrico y taxas, evidencia que la respuesta de los diferentes taxas al riego o al seco no es homogénea. Esta interacción sugiere que ciertos genotipos pueden tener una capacidad de respuesta diferente al agua disponible, lo que resulta en una variabilidad en el IAF<sub>C</sub> dependiendo del régimen hídrico aplicado. Estudios previos han reportado comportamientos similares en plantaciones de

*Eucalyptus*, donde los genotipos más resistentes al estrés hídrico presentan una respuesta adaptativa en términos de reducción de transpiración y optimización del uso del agua (Valadares et al., 2014).

En otoño, aunque el tratamiento hídrico no mostró un efecto significativo, la interacción con los taxas fue significativa. Este resultado refuerza la idea de que la capacidad de adaptación al régimen hídrico varía entre taxas, posiblemente influenciada por mecanismos como la eficiencia del uso del agua y la capacidad de almacenamiento de agua en los tejidos foliares. Los estudios de Hubbard et al. (2010) y Otto et al. (2017) han señalado que el estrés hídrico en otoño puede llevar a adaptaciones morfológicas y fisiológicas que permiten a ciertos genotipos mantener un IAF<sub>C</sub> más estable en comparación con otros.

El impacto más notable del tratamiento hídrico se produjo durante el invierno, donde el riego tuvo un efecto significativo en el IAF<sub>C</sub>. La interacción significativa entre tratamiento y taxas en invierno sugiere que algunos genotipos, como *Eucalyptus smithii*, podrían emplear estrategias de ahorro de agua más eficaces, como el cierre estomático y la reducción de transpiración, mecanismos que permiten conservar la humedad y mantener un rendimiento foliar relativamente alto en condiciones de estrés hídrico (Müller et al., 2017). Por otro lado, genotipos como *Eucalyptus nitens* parecen ser más susceptibles, presentando una disminución notable en el IAF<sub>C</sub> bajo condiciones de sequo, lo que coincide con estudios que destacan su menor capacidad de adaptación a la limitación hídrica (Battaglia et al., 1998).

Los resultados subrayan la importancia de seleccionar genotipos específicos que se adapten a distintas condiciones ambientales, optimizando así el manejo hídrico y promoviendo la sostenibilidad en las plantaciones forestales.

El análisis de los índices de vegetación derivados de las imágenes multiespectrales revela que los modelos predictivos basados en datos de dron ofrecen un mejor ajuste en comparación con los modelos derivados de Sentinel-2, especialmente bajo condiciones de secano. Esto es consistente con estudios previos que destacan las ventajas de la alta resolución espacial de las imágenes de drones para mejorar la precisión en la estimación del IAF en bosques (Tian et al., 2017). Sin embargo, el poder predictivo de estos modelos sigue siendo limitado, con valores de  $R^2$  relativamente bajos. Esto también se evidenció en estudios donde los algoritmos de estimación de IAF basados en datos de Sentinel-2 mostraron errores significativos, particularmente en áreas con suelos brillantes o copas dispersas (Fernandes et al., 2014). Esto indica la necesidad de considerar factores adicionales, como características específicas del dosel o la presencia de maleza, a pesar de los esfuerzos realizados para aminorar el efecto de esta última. Dichos esfuerzos incluyeron el enmascaramiento de copas en las imágenes multiespectrales provenientes del dron y la aplicación de un factor de corrección a las unidades experimentales. Estos pasos fueron tomados para mejorar la precisión de las estimaciones del IAF, pero los resultados sugieren que todavía hay margen para mejorar los modelos predictivos.

Es importante destacar que el índice SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) se identificó como el mejor predictor del IAF en condiciones de riego, debido a su capacidad minimizar la influencia del brillo del suelo en áreas con baja cobertura vegetal, lo que permite una estimación más precisa del IAF en suelos húmedos y bien irrigados, donde el efecto del suelo aún puede ser significativo (Huete, 1988). Por otro lado, el GCI (Índice de Clorofila Verde) mostró una mayor precisión bajo condiciones de secano. Esto puede explicarse por su alta sensibilidad al contenido de clorofila, lo que permite detectar cambios en la fotosíntesis y el estado de salud de la planta en condiciones de estrés hídrico, donde la clorofila tiende a disminuir significativamente en respuesta a la sequía (Coops et al., 2003). La elección del buffer (2 metros o circular de 4 metros) también influyó en la precisión de las estimaciones, siendo el buffer circular ligeramente superior.

Una de las razones detrás de los bajos valores de  $R^2$  en los modelos predictivos derivados de Sentinel-2 podría atribuirse a su resolución espacial de 10 m, significativamente menor que la de las imágenes de dron (0,05 m). Esta diferencia limita la capacidad de Sentinel-2 para captar variaciones sutiles en el IAF, especialmente en áreas con alta heterogeneidad del dosel (Solís-Silvan et al., 2022; Tsele et al., 2022). Además, la sensibilidad de Sentinel-2 a las variaciones de estrés hídrico puede ser menor debido a que su sensor fue diseñado principalmente para el monitoreo ambiental a gran escala (Varghese et al., 2021), lo que puede no ser óptimo en estudios donde se requiere un nivel alto de precisión y detalle.

Para mejorar la precisión en la estimación del IAF y abordar los desafíos observados en los modelos basados en Sentinel-2, se podrían implementar las siguientes estrategias en futuros estudios:

- La integración de satélites de mayor resolución espacial: la incorporación de datos satelitales como PlanetScope, que tiene una resolución de aproximadamente 3 m y adquisición diaria (Frazier & Hemingway, 2021), representa una oportunidad de complementar los datos de Sentinel-2. La alta resolución de PlanetScope permite detectar variaciones sutiles del índice de área foliar (IAF), y su frecuencia diaria es particularmente útil para observar respuestas al estrés hídrico. Estudios como los de Kluczek et al. (2023) demuestran que la fusión de datos de diferentes plataformas también facilita una validación cruzada, ajustando los resultados de Sentinel-2 y fortaleciendo su capacidad predictiva.
- Implementación de modelos de aprendizaje automático: la integración de datos adicionales, tales como variables ambientales (temperatura, humedad y radiación solar), mediante técnicas de aprendizaje automático podría mejorar la capacidad predictiva de los modelos al considerar factores más complejos y dinámicos. Resultados satisfactorios, en este sentido, han sido reportados por Le Maire et al. (2012) e Hirigoyen et al. (2021), quienes mostraron que el uso de estos modelos

permite ajustar la respuesta del IAF a variaciones ambientales, mejorando la precisión de las estimaciones bajo condiciones cambiantes.

Estas recomendaciones tienen el potencial de fortalecer los modelos predictivos y reducir las limitaciones observadas en los modelos actuales basados en Sentinel-2, incrementando así la precisión en la estimación del IAF en diversos contextos de disponibilidad hídrica.

La corrección de malezas mediante el uso de imágenes RGB y el índice GCI no mejoró significativamente la precisión en la estimación del IAF. Esto sugiere que el método de corrección empleado no capturó adecuadamente el impacto de las malezas en el IAF, o que la presencia de malezas tiene un efecto más complejo que no fue considerado en el análisis. Bulcock and Jewitt (2010) señalaron que, en ecosistemas forestales, la competencia entre especies, incluida la vegetación subyacente como las malezas, puede afectar significativamente las estimaciones de IAF debido a la heterogeneidad del dosel y las condiciones locales, como la distribución espacial y el estado del suelo. Este resultado resalta la necesidad de desarrollar métodos más efectivos para controlar y corregir la influencia de las malezas en las estimaciones de IAF mediante teledetección.

El análisis de la evapotranspiración total (ET) muestra diferencias significativas entre los genotipos de *Eucalyptus* bajo condiciones de riego y seco, con una ET mayor en genotipos que reciben riego. Este comportamiento sugiere que características fisiológicas y genéticas específicas, como la estructura del dosel, la profundidad de las raíces y la capacidad de almacenamiento de agua, juegan un papel crucial en la respuesta de cada genotipo al estrés hídrico (Whitehead & Beadle, 2004).

Genotipos como G10 (*Eucalyptus smithii*) y G9 (*E. badjensis*), que muestran altos valores de ET en ambos tratamientos, podrían tener una estructura de dosel más abierta y una mayor densidad estomática, lo que facilita una alta transpiración independientemente de

la disponibilidad de agua. Estas características fisiológicas podrían indicar una robusta capacidad para captar y transpirar agua, incluso en condiciones de secano, lo que los hace adecuados para regiones con disponibilidad hídrica variable. La profundidad de las raíces de estos genotipos también podría contribuir a su capacidad de absorber agua desde el subsuelo, manteniendo así niveles altos de ET.

Por otro lado, el genotipo G11 (*E. nitens*) presenta la ET más baja en condiciones de secano y una notable sensibilidad al riego, lo cual podría deberse a una menor profundidad de raíces o una limitada capacidad de almacenamiento de agua en sus tejidos. Esta baja ET en condiciones de estrés hídrico podría reflejar una estrategia adaptativa para conservar agua, disminuyendo la transpiración en situaciones de disponibilidad limitada de agua (Santos & Schumacher, 2016). Sin embargo, su alta sensibilidad al riego indica que responde significativamente a la disponibilidad de agua cuando está presente, posiblemente aumentando la conductancia estomática en condiciones de abundancia.

El análisis de Tukey, que agrupa los genotipos en función de sus medias estimadas de ET, aporta información adicional sobre la variabilidad en la demanda hídrica de cada genotipo. Por ejemplo, el genotipo G11, al presentar el valor de ET más bajo en secano, se agrupa de manera aislada de otros genotipos, lo que subraya su limitada capacidad de transpiración en condiciones de estrés hídrico. En contraste, G10 y G9, con altos valores de ET tanto en riego como en seco, están consistentemente entre los grupos con mayor demanda hídrica. Esta clasificación sugiere que G10 y G9 poseen adaptaciones que les permiten mantener una alta transpiración, mientras que G11 podría estar optimizado para la conservación de agua.

Finalmente, genotipos como G24 y G29, que muestran una ET estable entre ambos tratamientos, podrían tener sistemas radiculares profundos o mecanismos de regulación estomática que les permiten mantener niveles de ET relativamente constantes. Esta

estabilidad frente a diferentes niveles de disponibilidad de agua sugiere una eficiencia en el uso de los recursos hídricos, lo que podría hacerlos ideales para plantaciones en ambientes con estrés hídrico moderado a severo.

Estos hallazgos resaltan la importancia de seleccionar genotipos adaptados no solo en función de la disponibilidad hídrica, sino también considerando sus características genéticas y fisiológicas, como la profundidad de las raíces y la capacidad de almacenamiento de agua. Además, la interpretación del análisis de Tukey aporta un valor adicional al identificar genotipos con demandas hídricas diferenciadas, facilitando así la elección de genotipos para escenarios específicos de manejo hídrico.

## VII CONCLUSIONES

Este estudio aporta evidencia importante sobre la variabilidad en el comportamiento hídrico de diferentes genotipos de *Eucalyptus*, subrayando la importancia de seleccionar genotipos específicos en función de la disponibilidad hídrica y las condiciones ambientales de las áreas de plantación. Los resultados revelan que genotipos como *Eucalyptus smithii* y *E. badjensis* presentan altos niveles de evapotranspiración (ET) tanto en condiciones de riego como en seco, lo que sugiere que podrían ser candidatos ideales para áreas con alta disponibilidad de agua. Por otro lado, en zonas donde se busca minimizar el uso de agua, genotipos como *E. nitens*, que muestran una menor ET, podrían adaptarse mejor al conservar agua en situaciones de estrés hídrico. Estos hallazgos enfatizan la necesidad de una gestión estratégica que considere tanto las condiciones locales como los objetivos de manejo del recurso hídrico en plantaciones forestales.

La selección de genotipos debería basarse no solo en su capacidad de crecimiento, sino también en su consumo potencial de agua, ya que elegir genotipos con menor demanda hídrica podría mitigar el impacto sobre la disponibilidad de este recurso, especialmente en regiones donde el agua es limitada. La evaluación de la evapotranspiración mediante el Índice de Área Foliar (IAF) se presenta como una herramienta prometedora para estimar y gestionar el uso de agua en plantaciones a gran escala, en la que la teledetección y las imágenes multiespectrales desempeñan un papel crucial.

A pesar de sus ventajas, los modelos predictivos basados en teledetección enfrentan limitaciones. Aunque la alta resolución espacial de los drones ofrece mayor precisión en la estimación del IAF, es necesario mejorar la corrección de interferencias, como la presencia de malezas y la heterogeneidad del dosel, además de sincronizar los pases satelitales y vuelos de dron con las mediciones in-situ de LAI para optimizar la precisión de los modelos. La aplicación de índices específicos, como el SAVI en condiciones de

riego y el GCI en situaciones de estrés hídrico, se destaca como un enfoque eficaz, aunque el desarrollo de metodologías que aborden de manera más completa las características del entorno, como la influencia del brillo del suelo y la estructura del dosel, representan un área de oportunidad.

Para superar las limitaciones metodológicas identificadas y expandir el conocimiento en esta área, se sugieren varias líneas de investigación. En primer lugar, sería útil estudiar la respuesta de estos genotipos en otras regiones climáticas de Chile donde el establecimiento de *Eucalyptus* sea viable, como la zona centro-sur con clima mediterráneo seco o el sur húmedo, donde las condiciones ambientales presentan variaciones significativas en temperatura y humedad. Esto permitiría identificar genotipos más versátiles y resistentes ante variaciones ambientales, optimizando su selección para diversas zonas geográficas. Además, implementar estudios a largo plazo que incluyan múltiples ciclos estacionales permitiría capturar las variaciones interanuales en el IAF y la ET, proporcionando una perspectiva robusta sobre la adaptabilidad de cada genotipo a fluctuaciones climáticas.

Con el fin de mejorar la capacidad predictiva de los modelos basados en teledetección, la integración de plataformas de alta resolución como PlanetScope y el uso de algoritmos avanzados de aprendizaje automático representan enfoques prometedores. Estas herramientas permitirían una mayor precisión en la estimación del IAF y la ET al incorporar más variables y considerar de forma más detallada las condiciones ambientales específicas de cada sitio.

En conclusión, la selección de genotipos basada en su consumo potencial hídrico y el uso eficiente de herramientas de teledetección para mejorar la estimación del IAF son estrategias clave para optimizar el rendimiento de las plantaciones forestales, minimizando al mismo tiempo el impacto en la disponibilidad de agua. La incorporación de metodologías avanzadas y una gestión integral del recurso hídrico son pasos

esenciales para garantizar una producción forestal sostenible y adaptable a las condiciones cambiantes del clima.

## VIII REFERENCIAS

- Albaugh, J. M., Dye, P. J., & King, J. S. (2013). Eucalyptus and water use in South Africa. *International Journal of Forestry Research*, 2013.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Roma: FAO*, 298(0).
- Almeida, A. Q. d., Ribeiro, A., Delgado, R. C., Rody, Y. P., Oliveira, A. S. d., & Leite, F. P. (2015). Índice de área foliar de Eucalyptus estimado por índices de vegetação utilizando imagens TM-Landsat 5. *Floresta e Ambiente*, 22, 368-376.
- Arias, D., Calvo-Alvarado, J., & Dohrenbusch, A. (2007). Calibration of LAI-2000 to estimate leaf area index (LAI) and assessment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 247(1-3), 185-193.
- Battaglia, M., Cherry, M., Beadle, C., Sands, P., & Hingston, A. (1998). Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. *Tree physiology*, 18(8-9), 521-528.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, 5(1), 1-12.
- Berger, R. (2014). *Índice de área foliar estimado por ferramentas de sensoriamento remoto para a otimização de inventários de florestas plantadas*. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2014.
- Berger, R., CALDATO, S., BÁEZ, R., & TRUJILLO, R. (2009). Utilización de índice de área foliar para optimización de inventarios forestales–Estudio de caso. XIII Congreso Forestal Mundial, Buenos Aires, Argentina,
- Berger, R., Silva, J. A. A. d., Ferreira, R. L. C., Candeias, A. L. B., & Rubilar, R. (2019). Índices de vegetação para a estimativa do índice de área foliar em plantios clonais de Eucalyptus saligna Smith. *Ciência Florestal*, 29, 885-899.

- Binkley, D., Campoe, O. C., Gspaltl, M., & Forrester, D. I. (2013). Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. *Forest Ecology and Management*, 288, 5-13.
- Bulcock, H., & Jewitt, G. (2010). Spatial mapping of leaf area index using hyperspectral remote sensing for hydrological applications with a particular focus on canopy interception. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(2), 383-392.
- Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. *Functional plant biology*, 30(3), 239-264.
- Chen, J. M., & Cihlar, J. (1996). Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 153-162.
- CIREN. (1999). Publicación Centro de Información de Recursos Naturales No121. Descripción de Suelos, Materiales y Símbolos. *Estudio Agrológico VIII Región Tomo 1*, 288 p.
- Clevers, J. G. P. W., & Gitelson, A. A. (2013). Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 344-351. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.008>
- Coops, N. C., Stone, C., Culvenor, D. S., Chisholm, L. A., & Merton, R. N. (2003). Chlorophyll content in eucalypt vegetation at the leaf and canopy scales as derived from high resolution spectral data. *Tree physiology*, 23(1), 23-31.
- Delegido, J., Tenjo, C., Ruiz-Verdu, A., Pereira-Sandoval, M., Pasqualotto, N., Gibaja, G., Verrelst, J., Peña, R., Urrego, E., & Borràs, J. (2016). Aplicaciones de Sentinel-2 a estudios de vegetación y calidad de aguas continentales. Conference: XVII Simposio Internacional En Percepción Remota Y Sistemas de Información Geográfica (SELPER),
- Ding, R., Kang, S., Li, F., Zhang, Y., & Tong, L. (2013). Evapotranspiration measurement and estimation using modified Priestley–Taylor model in an irrigated maize field with mulching. *Agricultural and Forest Meteorology*, 168, 140-148.
- Du Toit, B., & Dovey, S. B. (2005). Effect of site management on leaf area, early biomass development, and stand growth efficiency of a *Eucalyptus grandis* plantation in South Africa. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(4), 891-900.
- Dye, P. J. (1999). *How efficiently do Eucalyptus plantations use rainfall?* Council for Scientific and Industrial Research.

- Feller, M. (1981). Water balances in *Eucalyptus regnans*, *E. obliqua*, and *Pinus radiata* forests in Victoria. *Australian Forestry*, 44(3), 153-161.
- Fernandes, R., Weiss, M., Camacho, F., Berthelot, B., Baret, F., & Duca, R. (2014). Development and assessment of leaf area index algorithms for the Sentinel-2 multispectral imager. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium,
- Fisher, J. B., DeBiase, T. A., Qi, Y., Xu, M., & Goldstein, A. H. (2005). Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem. *Environmental Modelling & Software*, 20(6), 783-796.
- Flint, A. L., & Childs, S. W. (1991). Use of the Priestley-Taylor evaporation equation for soil water limited conditions in a small forest clearcut. *Agricultural and Forest Meteorology*, 56(3-4), 247-260.
- Flores, F. J., Allen, H. L., Cheshire, H. M., Davis, J. M., Fuentes, M., & Kelting, D. (2006). Using multispectral satellite imagery to estimate leaf area and response to silvicultural treatments in loblolly pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(6), 1587-1596.
- Frazer, G. W., Canham, C. D., & Lertzman, K. P. (1999). Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation. *Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York*, 36.
- Frazier, A. E., & Hemingway, B. L. (2021). A technical review of planet smallsat data: Practical considerations for processing and using planetscope imagery. *Remote Sensing*, 13(19), 3930.
- Gholz, H., Ewel, K., & Teskey, R. (1990). Water and forest productivity. *Forest Ecology and Management*, 30(1-4), 1-18.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27.
- Hernández, C., Nunes, L., Lopes, D., & Graña, M. (2014). Data fusion for high spatial resolution LAI estimation. *Information Fusion*, 16, 59-67. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.inffus.2012.04.001>
- Hernández Ramos, A., Valdez Lazalde, J. R., Ángeles Pérez, G., Santos Posadas, H. M. d. I., Hernández Ramos, J., Peduzzi, A., & Carrero, O. (2021). Medición del índice

de área foliar y su dinámica estacional en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* ST Blake. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 12(63), 114-137.

Hirigoyen, A., Acosta-Muñoz, C., Salamanca, A. J. A., Varo-Martinez, M. Á., Rachid-Casnati, C., Franco, J., & Navarro-Cerrillo, R. (2021). A machine learning approach to model leaf area index in *Eucalyptus* plantations using high-resolution satellite imagery and airborne laser scanner data. *Annals of Forest Research*, 64(2), 165-183.

Houborg, R., Anderson, M., & Daughtry, C. (2009). Utility of an image-based canopy reflectance modeling tool for remote estimation of LAI and leaf chlorophyll content at the field scale. *Remote Sensing of Environment*, 113(1), 259-274.

Hubbard, R. M., Stape, J., Ryan, M. G., Almeida, A. C., & Rojas, J. (2010). Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1714-1721.

Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.

Jensen, J. R., & Epiphany, J. C. N. (2009). Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.

Joiner, J., Yoshida, Y., Anderson, M., Holmes, T., Hain, C., Reichle, R., Koster, R., Middleton, E., & Zeng, F.-W. (2018). Global relationships among traditional reflectance vegetation indices (NDVI and NDII), evapotranspiration (ET), and soil moisture variability on weekly timescales. *Remote Sensing of Environment*, 219, 339-352.

Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 19-35.

Kluczek, M., Zagajewski, B., & Zwijacz-Kozica, T. (2023). Mountain tree species mapping using Sentinel-2, PlanetScope, and airborne hypspx hyperspectral imagery. *Remote Sensing*, 15(3), 844.

Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N., Heitman, J., Sauer, T., & Ben-Gal, A. (2014). A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 56-70.

- Kustas, W. P., & Norman, J. M. (1999). Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, *94*(1), 13-29.
- Le Maire, G., Marsden, C., Nouvellon, Y., Stape, J.-L., & Ponzoni, F. J. (2012). Calibration of a species-specific spectral vegetation index for leaf area index (LAI) monitoring: example with MODIS reflectance time-series on eucalyptus plantations. *Remote Sensing*, *4*(12), 3766-3780.
- Lovelli, S., Perniola, M., Di Tommaso, T., Ventrella, D., Moriondo, M., & Amato, M. (2010). Effects of rising atmospheric CO<sub>2</sub> on crop evapotranspiration in a Mediterranean area. *Agricultural water management*, *97*(9), 1287-1292.
- Lu, Z., Deng, L., & Lu, H. (2022). An improved LAI estimation method incorporating with growth characteristics of field-grown wheat. *Remote Sensing*, *14*(16), 4013.
- Miura, T., Huete, A. R., Yoshioka, H., & Holben, B. N. (2001). An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction. *Remote Sensing of Environment*, *78*(3), 284-298.
- Müller, C., Hodecker, B. E. R., Merchant, A., & Barros, N. F. d. (2017). Nutritional efficiency of Eucalyptus clones under water stress. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *41*, e0160528.
- Mummery, D., & Battaglia, M. (2002). Data input quality and resolution effects on regional and local scale Eucalyptus globulus productivity predictions in north-east Tasmania. *Ecological Modelling*, *156*(1), 13-25.
- Olbrich, B., Le Roux, D., Poulter, A., Bond, W., & Stock, W. (1993). Variation in water use efficiency and  $\delta^{13}\text{C}$  levels in Eucalyptus grandis clones. *Journal of Hydrology*, *150*(2-4), 615-633.
- Osorio, J., Osorio, M., Chaves, M., & Pereira, J. (1998). Water deficits are more important in delaying growth than in changing patterns of carbon allocation in Eucalyptus globulus. *Tree physiology*, *18*(6), 363-373.
- Otto, M. S. G., Vergani, A. R., Gonçalves, A. N., Silva, S. R., Vrechi, A., & Stape, J. L. (2017). Impact of water supply on stomatal conductance, light use efficiency and growth of tropical Eucalyptus plantation in Brazil. *Revista Ecologia-Nutrição Florestal-ENFLO*, *4*(3), 87-93.
- Ponzoni, F. J., & Shimabukuro, Y. E. (2010). Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. *São José dos Campos: Parêntese*, 127 p.

- Potters, G., Pasternak, T. P., Guisez, Y., Palme, K. J., & Jansen, M. A. (2007). Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends in plant science*, 12(3), 98-105.
- Ribeiro, S. C., Soares, C. P. B., Fehrmann, L., Jacovine, L. A. G., & von Gadow, K. (2015). Aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal Eucalyptus trees in Southeast Brazil. *Revista Árvore*, 39, 353-363.
- Rubilar, R., Hubbard, R., & Emhart, V. (2020). Climate and water availability impacts on early growth and growth efficiency of Eucalyptus genotypes: the importance of GxE interactions. For Ecol Manag 458: 117763. In.
- Santos, K. F. d., & Schumacher, M. V. (2016). Ecophysiology and growth of Eucalyptus in drought condition.
- Shao, H.-B., Chu, L.-Y., Jaleel, C. A., & Zhao, C.-X. (2008). Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *Comptes rendus biologiques*, 331(3), 215-225.
- Shi, T., Guan, D., Wang, A., Wu, J., Jin, C., & Han, S. (2008). Comparison of three models to estimate evapotranspiration for a temperate mixed forest. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(17), 3431-3443.
- Silva, M., Rubilar, R., Espinoza, J., Yáñez, M., Emhart, V., & Quiroga, J. J. (2017). Respuesta en parámetros de intercambio gaseoso y supervivencia en plantas jóvenes de genotipos comerciales de Eucalyptus spp sometidas a déficit hídrico. *Bosque (Valdivia)*, 38(1), 79-87.
- Solís-Silvan, R., Sanchez-Gutiérrez, F., Islas-Jesús, R. E., Gerónimo-Torres, J. d. C., Pozo-Santiago, C. O., & Sanchez-Díaz, B. (2022). Estimation of the leaf area index from Sentinel images in Eucalyptus grandis W. Hill plantations. *Revista Tecnología en Marcha*, 35(2), 39-47.
- Song, C. (2013). Optical remote sensing of forest leaf area index and biomass. *Progress in Physical Geography*, 37(1), 98-113.
- Stape, J. L., Binkley, D., & Ryan, M. G. (2004). Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 193(1-2), 17-31.
- Sumner, D. M., & Jacobs, J. M. (2005). Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 308(1-4), 81-104.

- Tanner, C., & Jury, W. (1976). Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover 1. *Agronomy Journal*, 68(2), 239-243.
- Team, R. C. (2022). R: A language and environment for statistical computing R Foundation for Statistical Computing, version 4.2. 2. *Vienna, Austria*.
- Tian, J., Wang, L., Li, X., Gong, H., Shi, C., Zhong, R., & Liu, X. (2017). Comparison of UAV and WorldView-2 imagery for mapping leaf area index of mangrove forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 61, 22-31.
- Tian, Q.-j., Luo, Z., Chen, J., Chen, M., & Hui, F. (2007). Retrieving leaf area index for coniferous forest in Xingguo County, China with Landsat ETM+ images. *Journal of environmental management*, 85(3), 624-627.
- Tinkham, W. T., & Swayze, N. C. (2021). Influence of Agisoft Metashape parameters on UAS structure from motion individual tree detection from canopy height models. *Forests*, 12(2), 250.
- Tsele, P., Ramoelo, A., Qabaqaba, M., Mafanya, M., & Chirima, G. (2022). Validation of LAI, chlorophyll and FVC biophysical estimates from sentinel-2 level 2 prototype processor over a heterogeneous savanna and grassland environment in South Africa. *Geocarto international*, 37(26), 14355-14378.
- Valadares, J., Paula, N. F. d., & Paula, R. C. d. (2014). Physiological changes in eucalyptus hybrids under different irrigation regimes. *Revista Ciência Agronômica*, 45, 805-814.
- Valverde, J. C., Rubilar, R., Barrientos, G., Medina, A., Pincheira, M., Emhart, V., Zapata, Á., Bozo, D., Espinoza, Y., & Campoe, O. C. (2023). Differences in rainfall interception among Eucalyptus genotypes. *Trees*, 37(4), 1189-1200.
- Varghese, D., Radulović, M., Stojković, S., & Crnojević, V. (2021). Reviewing the potential of Sentinel-2 in assessing the drought. *Remote Sensing*, 13(17), 3355.
- Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia (Arica)*, 38(4), 99-107.
- Wang, Q., Shi, W., Li, Z., & Atkinson, P. M. (2016). Fusion of Sentinel-2 images. *Remote Sensing of Environment*, 187, 241-252.
- White, D., Battaglia, M., Bruce, J., Benyon, R., Beadle, C., McGrath, J., Kinal, J., Crombie, S., & Doody, T. (2009). Water-use efficient plantations—separating the wood from

the leaves: Forest & Wood Products Australia Ltd Report. *Forest & Wood Products Australia, Canberra, Australia. PNC073-0708.*

- Whitehead, D., & Beadle, C. L. (2004). Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. *Forest Ecology and Management, 193*(1-2), 113-140.
- Wise, R. M., Dye, P. J., & Gush, M. B. (2011). A comparison of the biophysical and economic water-use efficiencies of indigenous and introduced forests in South Africa. *Forest Ecology and Management, 262*(6), 906-915.
- Wolff, W., Francisco, J. P., Flumignan, D. L., Marin, F. R., & Folegatti, M. V. (2022). Optimized algorithm for evapotranspiration retrieval via remote sensing. *Agricultural water management, 262*, 107390.
- Xiong, J., Thenkabail, P. S., Gumma, M. K., Teluguntla, P., Poehnelt, J., Congalton, R. G., Yadav, K., & Thau, D. (2017). Automated cropland mapping of continental Africa using Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 126*, 225-244.
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of sensors, 2017*.
- Yu, F., Truong, T. V., He, Q., Hua, L., Su, Y., & Li, J. (2019). Dry season irrigation promotes leaf growth in Eucalyptus urophylla × E. grandis under fertilization. *Forests, 10*(1), 67.
- Zhang, F., & Zhou, G. (2015). Estimation of canopy water content by means of hyperspectral indices based on drought stress gradient experiments of maize in the north plain China. *Remote Sensing, 7*(11), 15203-15223.