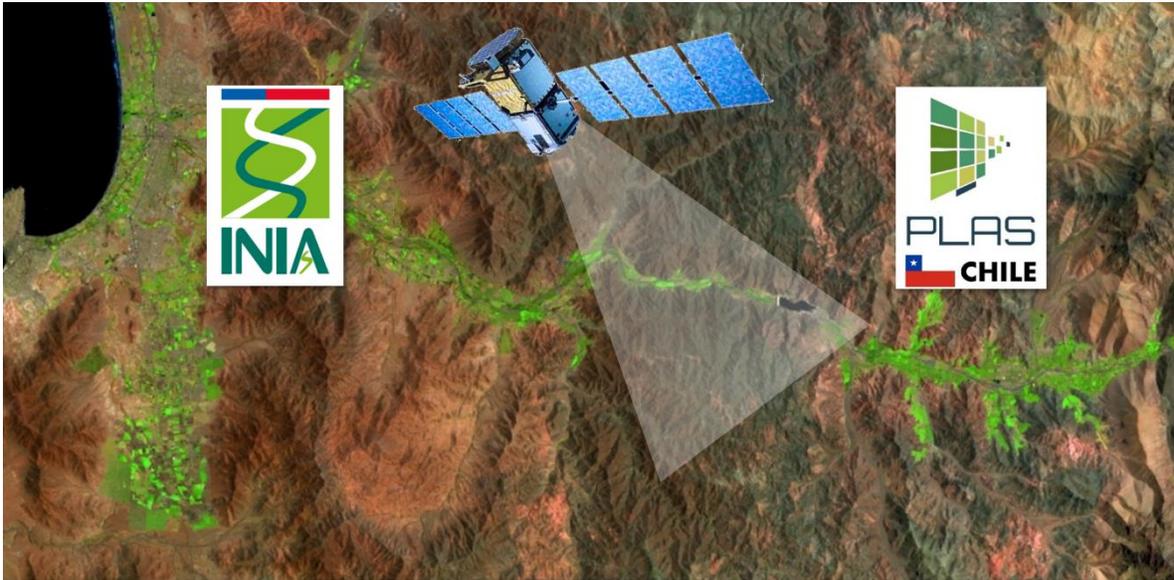




CONSULTORIA PARA EL MANEJO EFICIENTE DEL RIEGO





Informe Consultoría en Riego INIA

Productor: OLIVOS DE CASUTO

**Equipo Proyecto PLAS – INIA Intihuasi
Jefe de proyecto - Claudio Balbontín Nesvara
Profesional de Apoyo – Jael Montecinos Castro**

Informe Consultoría Manejo del Riego

OLIVOS DE CASUTO

Introducción

Con objeto de implementar un trabajo colaborativo entre el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA y la Asociación de Productores de Aceite Oliva ChileOliva, se implementó un trabajo de consultoría en la cual se analizaron las metodologías para la definición de las necesidades de riego del cultivo y aspectos asociados al manejo agronómico del cultivo de olivos.

El principal objetivo de la consultoría es transferir un marco conceptual estandarizado para la definición de las necesidades de riego, junto a la capacitación en el uso de nuevas tecnologías para el monitoreo del cultivo y de los factores ambientales que influyen en el consumo hídrico y por tanto en la programación del riego.

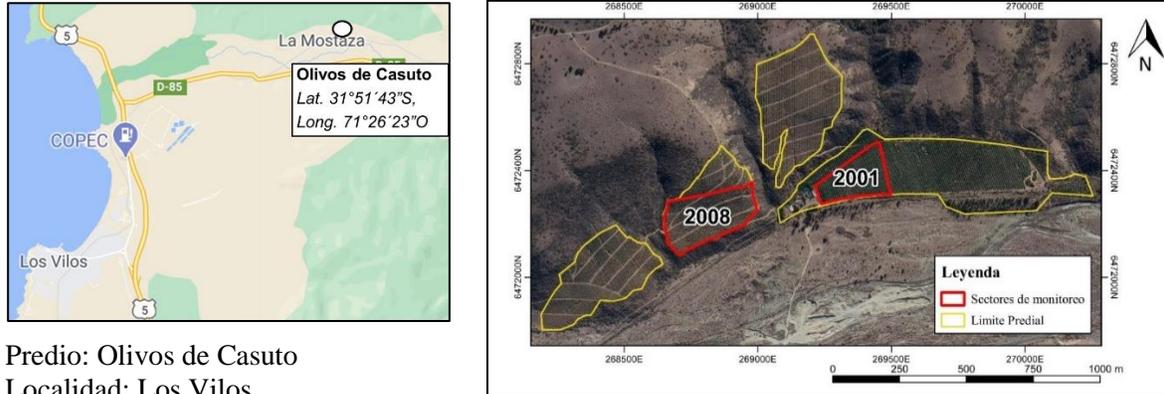
En este trabajo se elaboró un análisis comparativo entre los criterios utilizados actualmente por el productor para definir los volúmenes de riego aportados al cultivo (manejo tradicional del riego) y las necesidades de riego estimadas a partir del marco conceptual propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998), con la innovación tecnológica del uso del índice de vegetación satelital NDVI para estimar un Coeficiente de Cultivo y el uso de información de la demanda ambiental del sitio para estimar la tasa de transpiración máxima del cultivo.

De este modo, en el siguiente informe se analiza el desarrollo del cultivo utilizando información del índice de vegetación satelital NDVI, factores ambientales que influyen en el consumo hídrico del cultivo, las metodologías para la definición de las necesidades de riego en el campo y asistido con información satelital y la variabilidad espacial de la tasa de transpiración del cultivo dentro de los sectores analizados.



Sitio de análisis

Los trabajos fueron realizados en un predio ubicado en la localidad de Quebrachal, comuna de Los Vilos, Región de Coquimbo. En la Figura 1 se indica la ubicación geográfica del campo, así como de los sectores analizados.



Predio: Olivos de Casuto
Localidad: Los Vilos
Comuna: Los Vilos
Provincia: Choapa
Región: Coquimbo
Chile

Figura 1. Ubicación del predio y sitios analizados (Olivos de Casuto, Los Vilos).

Los sectores analizados corresponden a dos cuarteles de la variedad Arbequina, establecidos el año 2001 (Sector Borrega) y 2008 (Sector Quebrachal/Bloque 1). En el Cuadro 1 se indica un resumen de las características de los sitios analizados en este trabajo.

Cuadro 1. Equipo, superficie, variedades, año de plantación y marcos de plantación de los sitios bajo análisis.

Sector	Superficie (ha-SIG)	Variedad	Año de Plantación	Marco de plantación (m)	Plantas/ha
Borrega	3,69	Arbequina	2001	7 x 4	357
Quebrachal/ Bloque 1	5,69	Arbequina	2008	6 x 3	556

Características climáticas zona de estudio

La zona del Quebrachal se encuentra dentro del distrito agroclimático Los Vilos (Figura 2, Agrimed, 2017). El clima corresponde a estepa con influencia marina y régimen de humedad árido. La temperatura del aire varía entre máximos de 23,4 °C en el mes de enero y mínimos en el mes de julio de 7,4 °C. Dentro del mismo distrito se registran valores máximos que oscilan entre 26 °C y 21,3 °C y mínimos entre 8,2 °C y 6,3 °C. En promedio el distrito presenta 365 días consecutivos libres de heladas por lo cual no se registran heladas y el período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa de los cultivos tiene una longitud de 12 meses. La sumatoria térmica anual es 1.505 días grados (Base 10) y 128 horas de frío (acumuladas hasta el 31 de Julio).

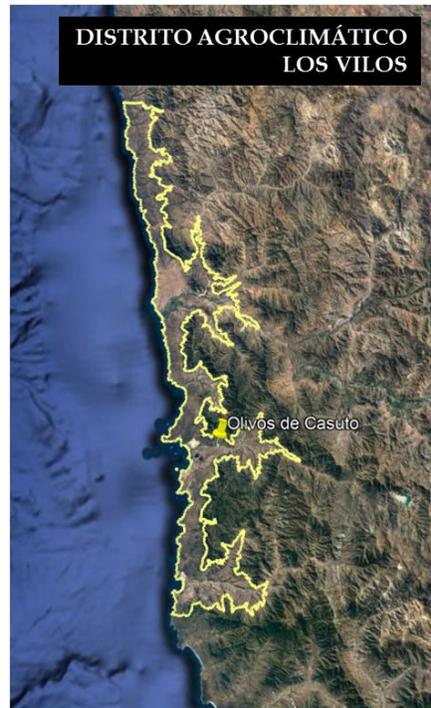


Figura 2. Distrito agroclimático Los Vilos (Agrimed, 2017).

Para el análisis de los datos meteorológicos locales se consideró la estación Quilimarí, perteneciente a la Red Agrometeorológica Nacional de INIA (Figura 3), que si bien no se encuentra en la misma cuenca, sirve como aproximación del comportamiento de las condiciones ambientales anuales. De acuerdo a estos registros se observa que el comportamiento de la temperatura del aire se caracteriza por alcanzar valores máximos en torno a los 22°C en los meses de verano (con máximos en febrero) y temperaturas mínimas invernales en torno a 4,3°C en los meses de invierno, con eventos extremos de -1,7°C en julio de 2018 y -1,7°C en septiembre de 2019. En cuanto a las precipitaciones, la media anual se sitúa en 209 mm/año, con un período seco de 10 meses de duración y un déficit hídrico de 1056 mm/año. No presenta período húmedo, por lo que no se produce excedente hídrico (Agrimed, 2017).

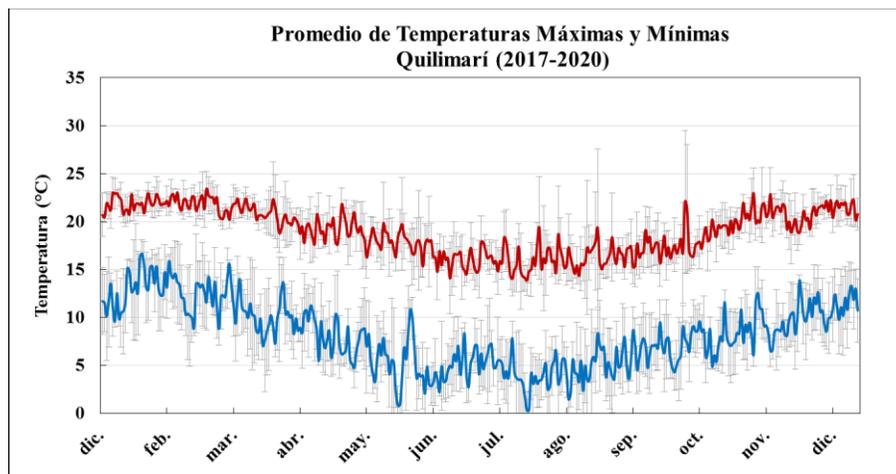


Figura 3. Comportamiento de temperaturas máximas y mínimas en la zona de estudio. Estación Quilimarí INIA (<https://agrometeorologia.cl>).

En los últimos dos años, el monto anual de las precipitaciones alcanzó en promedio 121 mm/año, con montos anuales de 32,1 mm para la temporada 2019/20 y 175 mm en lo que va de la temporada 2020/21

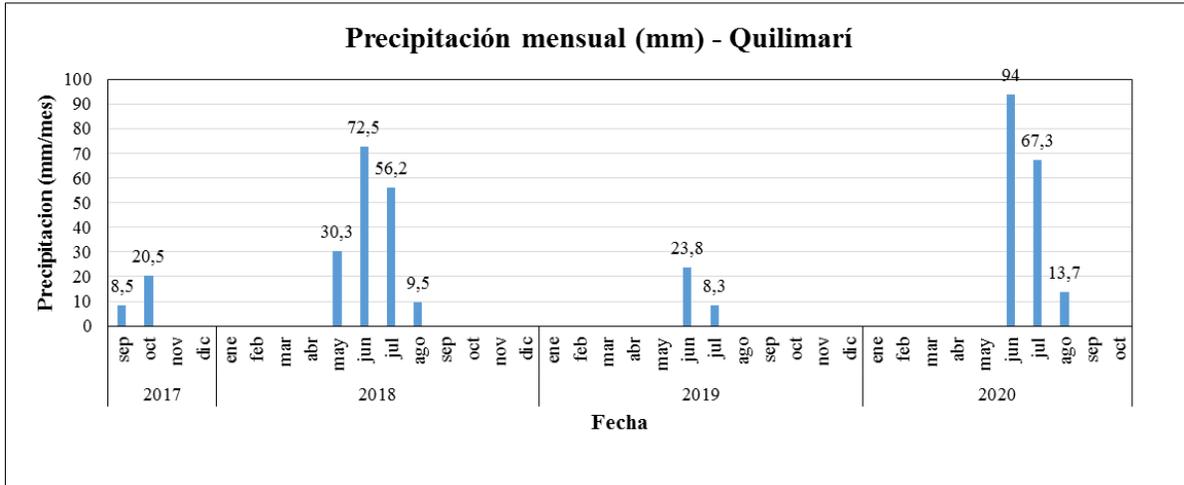


Figura 4; Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

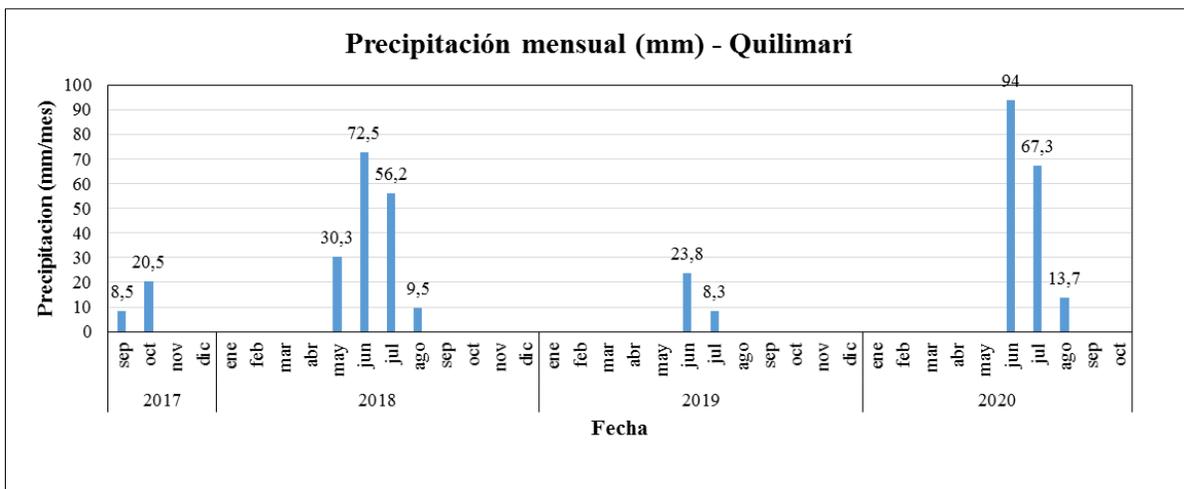


Figura 4. Precipitaciones mensuales Quilimarí, período 2017 al 2020 (Estación Agrometeorológica Quilimarí INIA, www.agrometeorología.cl).

De este modo y de acuerdo a los datos históricos de precipitaciones, se evidencia una tendencia a la disminución de los montos anuales de las lluvias durante los últimos años. En este sentido, el año 2019 correspondió a un año con valores bajos extremos (32 mm/año), aumentando las precipitaciones durante el presente año. A pesar de este aumento y de acuerdo a los pronósticos de cambio climático es esperable una disminución de los montos anuales de las lluvias, disminución de las reservas de agua en el suelo y por tanto mayores requerimientos de aporte de riego (Figura 5).

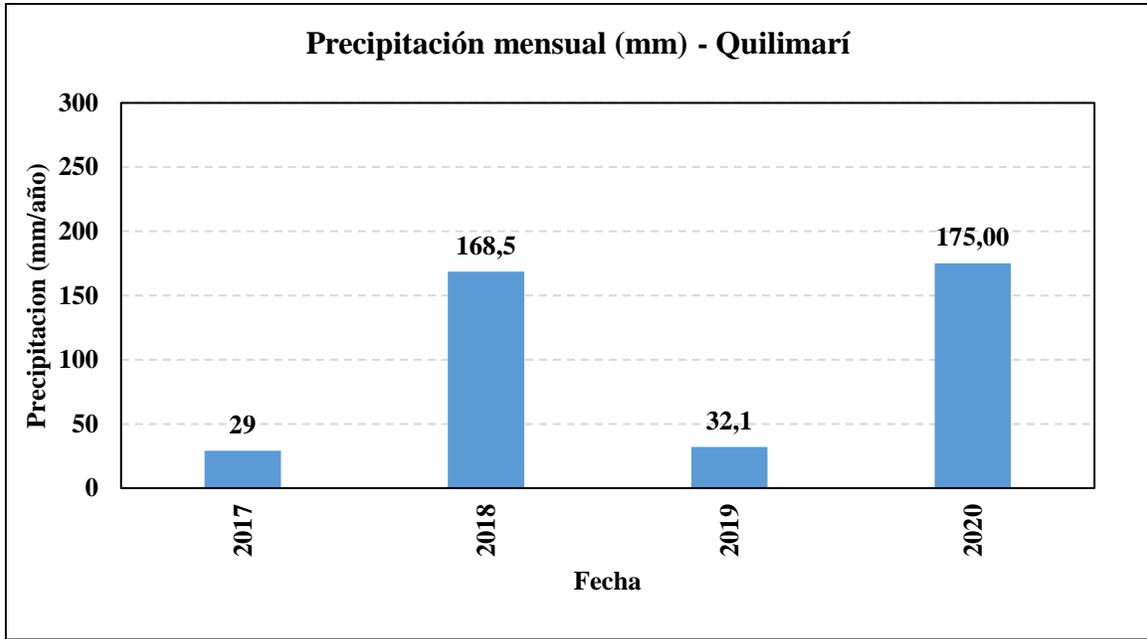


Figura 5. Precipitaciones anuales período 2017 al 2020. Estación Agrometeorológica Quilimarí INIA (www.agrometeorologia.cl).

En cuanto a la distribución anual de la demanda ambiental, representada por la variable evapotranspiración de referencia (ET_o), esta alcanza valores anuales de 990 mm/año, con valores máximos diarios en torno a 5,2 mm/día en el verano (máximo absoluto de 5,7 mm/día) y mínimos en torno a 1,2 mm/día, durante los meses invernales de junio y julio. En la Figura 6; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se señala el promedio de 2 años del comportamiento anual de la ET_o, registrada en la estación Quilimarí INIA.

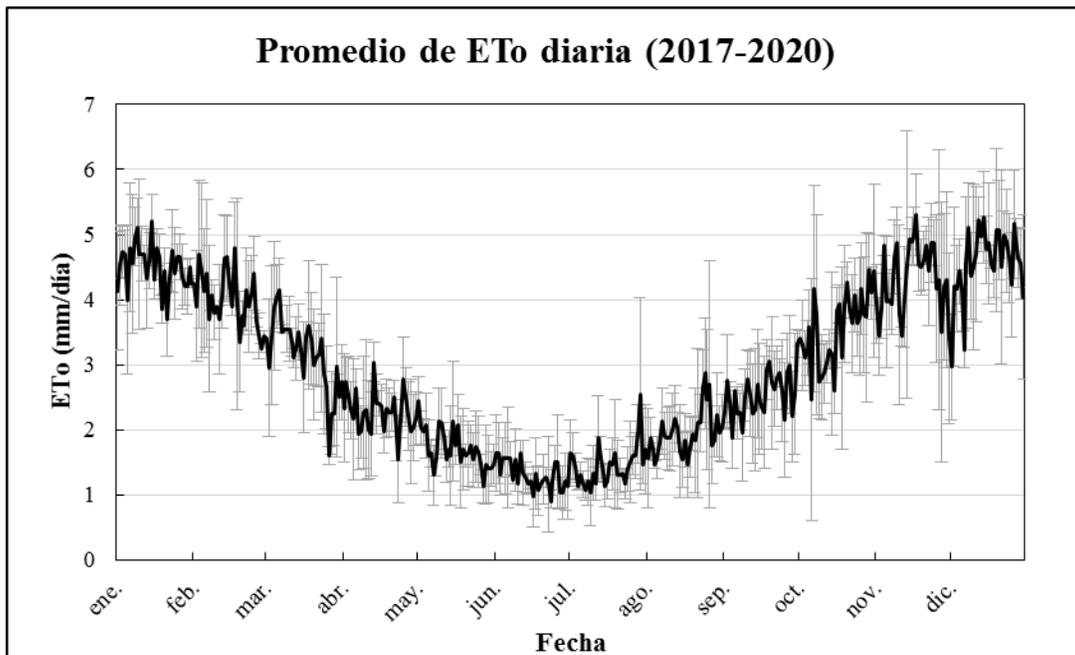
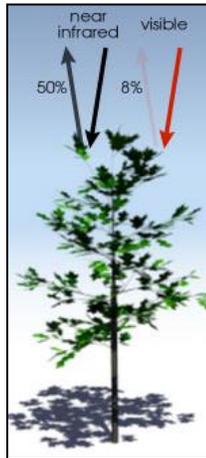


Figura 6. Evapotranspiración de referencia diaria (promedio período 2017 - 2020, estación Quilimarí, www.agrometeorología.cl).

Caracterización del desarrollo del cultivo

Para la caracterización del desarrollo anual del cultivo se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) obtenido a partir de series temporales de imágenes satelitales. Este índice de vegetación permite estimar la absorción de la radiación solar por parte del cultivo en ciertos espectros de la radiación solar, eliminando la respuesta de otros elementos en el terreno. La fórmula de cálculo se señala en la Figura 7.



$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada

NIR: Reflectividad en el infrarrojo cercano

R: Reflectividad en el rojo

Figura 7. Ecuación de cálculo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI y representación esquemática de las longitudes de onda involucradas en su cálculo.

Los satélites utilizados en el análisis del cultivo fueron el Sentinel 2A, Sentinel 2B y Landsat 8. En el Cuadro 2 se señalan las principales características de los satélites utilizados en el estudio.

Cuadro 2. Características de las imágenes satelitales utilizados en el estudio.

Programa	Satélite	Cobertura imagen (km)	Resolución temporal (días entre visita)	Resolución espacial (metros)
Landsat (NASA)	Landsat 8	185 x 185	16 días	30
Copernicus (ESA)	Sentinel 2A	100 x 100	10 días	10
	Sentinel 2B			

Así mismo, el análisis de la variabilidad espacial del cultivo dentro del sector de análisis permite identificar y cuantificar diferencias en su desarrollo entre distintas zonas. Estas diferencias serán analizadas conjuntamente con el productor de manera de identificar factores que podrían estar induciendo la des uniformidad observada, como pueden ser características edáficas del sitio, inadecuada operación del equipo de riego u otros factores adversos que puedan limitar el desarrollo del cultivo.

En las **Figura 7** y **Figura 8** se señala el comportamiento anual del índice de vegetación NDVI en el sector Borrega (2001) y Bloque 1 (2008) respectivamente, indicando zonas con alto, medio y bajo desarrollo del cultivo durante la temporada 2019-20.

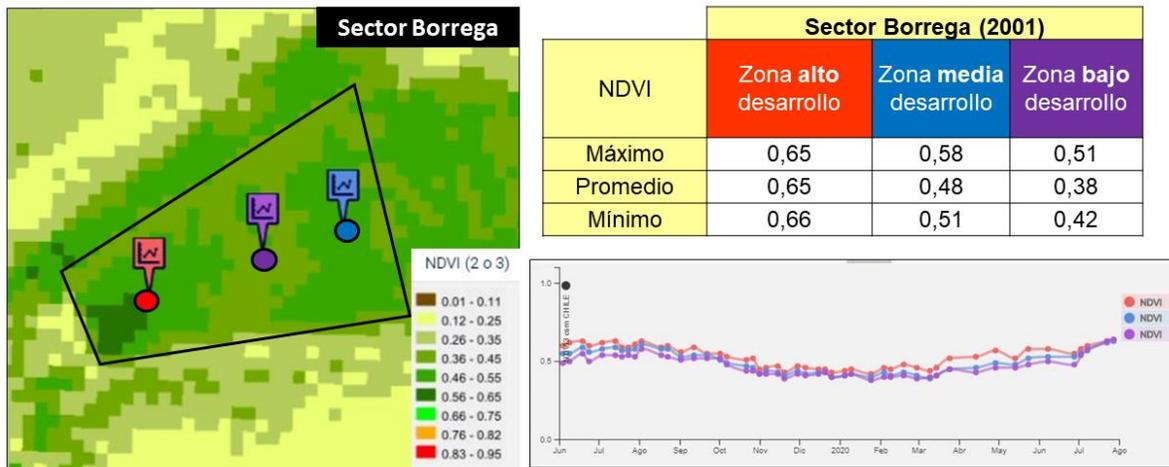


Figura 7. Vista general índice NDVI en el Sector Borrega. Olivos de Casuto, Los Vilos.

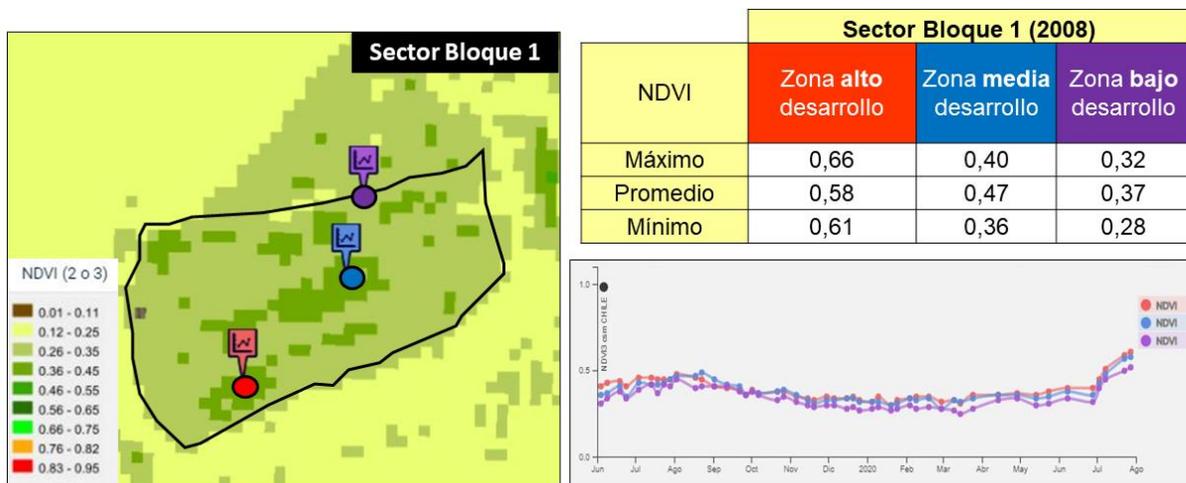


Figura 8. Vista general índice NDVI en el Sector Bloque 1 (2008), Olivos de Casuto, Los Vilos.

Como se puede apreciar los valores promedio más altos del índice NDVI se alcanzan en la zona oeste del sector Borrega, indicando el mayor desarrollo foliar de las plantas ahí presentes. Más detalles de la variabilidad espacial de las plantas dentro del sector de riego serán analizados en el capítulo *Distribución espacial de la Transpiración*.



Manejo del riego

La determinación de las necesidades de riego de los cultivos se realizó utilizando el marco conceptual “evapotranspiración de referencia-coeficiente de cultivo”, propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998): La fórmula que resume su cálculo se indica a continuación:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Donde;

ET_c: Evapotranspiración de cultivo (mm/día)

K_c: Coeficiente de cultivo (adimensional)

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Para alimentar esta fórmula, se utilizaron por una parte los valores de la *ET_o* estimados por las estaciones de la Red Agrometeorológica Nacional (RAN MINAGRI), disponible en el sitio web <https://agrometeorologia.cl/>. De este modo se descargó la variable *Evapotranspiración de Referencia* (*ET_o*), estimada a partir de los registros meteorológicos diarios de la temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar incidente y velocidad del viento y utilizando la ecuación conocida como Penman-Monteith (PM).

Por otro lado, para obtener valores del *K_c* se utilizó la información disponible en la Plataforma Agrícola Satelital PLAS (<http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=plas>), estimado a partir del índice de vegetación NDVI.

Coeficientes de cultivo

En este trabajo, para estimar el nivel de desarrollo de las plantas en el terreno se utilizó el índice de vegetación satelital NDVI y para estimar el potencial transpirativo del cultivo se definió un coeficiente de cultivo basal (*K_{cb}*) de acuerdo a lo propuesto por la literatura científica (Campos et al., 2010; Bausch, 1993; Bausch, 1995; Bausch and Neale, 1987; Heilman et al., 1982; Neale, et al., 1989). La relación utilizada para obtener el *K_{cb}* se indica en la siguiente fórmula:

$$K_c = 1,51 \times NDVI - 0,23$$

En las Figura 9 y Figura 10 se señala el comportamiento anual del coeficiente de cultivo promedio para las plantas de la variedad Arbequina de los sectores Borrega (2001) y Bloque 1 (2008). A partir del comportamiento anual del *K_c* se puede observar que en el período invernal los valores del *K_c* son más altos indicando posiblemente mayor desarrollo del cultivo durante ese período (menor demanda ambiental) o la presencia de malezas. Así mismo, los menores valores del *K_c* se observan en los meses de fines de primavera y verano (octubre a diciembre), probablemente debido a la mayor demanda del ambiente y el efecto de déficit del aporte hídrico sobre el cultivo.

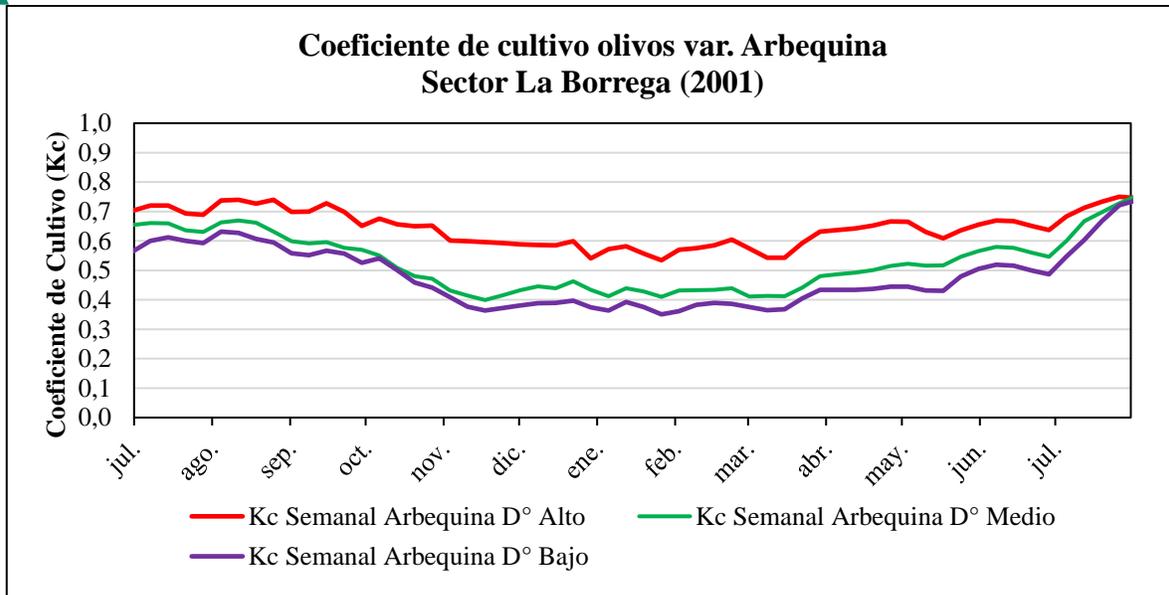


Figura 9. Comportamiento anual del Kc durante la temporada 2019/20 en el sector Borrega (2001), var. Arbequina. Olivos de Casuto, Los Vilos.

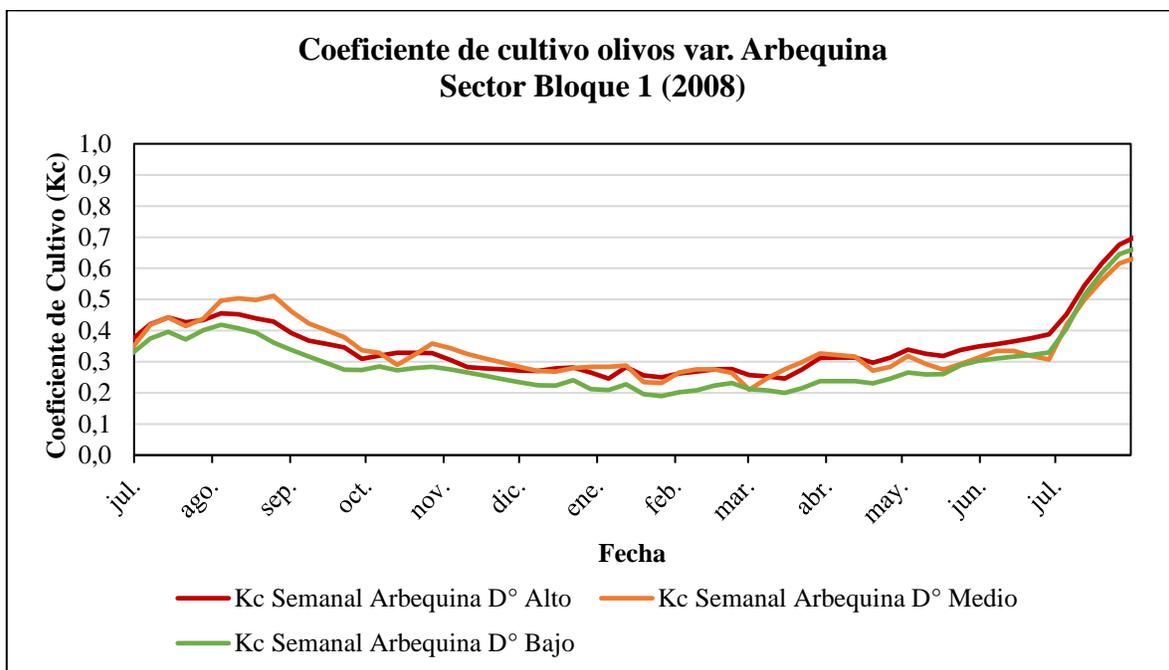


Figura 10. Comportamiento anual del Kc durante la temporada 2019/20 en el sector Bloque 1 (2008), var. Arbequina. Olivos de Casuto, Los Vilos.

En el Cuadro 3 se presenta un resumen de valores de Kc para cada sector de vigor alto, medio y bajo identificado.

Cuadro 3. Resumen de valores de Kc máximo, mínimo y promedio en el sector analizado para zonas con distinto nivel de desarrollo.

Variedad	Sector	Año Plantación	Nivel Desarrollo	Kc Satelital		
				Máximo	Promedio	Mínimo
Arbequina	Borrega	2001	Alto	0,75	0,53	0,65
			Medio	0,75	0,35	0,50
			Bajo	0,76	0,40	0,54
	Bloque 1	2008	Alto	0,76	0,25	0,37
			Medio	0,65	0,33	0,48
			Bajo	0,69	0,19	0,32

Como se puede observar, en la variedad Arbequina de año plantación 2001 se presentan valores de Kc máximo están en el rango 0,76 a 0,75, mientras que los valores mínimos se sitúan en el rango 0,65 a 0,5. Para la variedad Arbequina de año plantación 2008, presentó valores de Kc máximos de 0,76 a 0,65, mientras que los valores mínimos se sitúan en el rango de 0,48 a 0,32. El Kc promedio anual estimado en Arbequina fue 0,52. La proporción de cada zona se analiza en el capítulo de variabilidad de la transpiración.

Demanda de riego modelada

Con base en la metodología “coeficiente de cultivo- evapotranspiración de referencia” descrita anteriormente se modeló la transpiración potencial del cultivo, correspondiente a la estimación de necesidades de riego del cultivo de manera de mantener el cultivo en un óptimo de disponibilidad hídrica (sin déficit). Como se señaló anteriormente el parámetro Kc fue obtenido del índice de vegetación NDVI desde la Plataforma Agrícola Satelital PLAS y los datos de ETo de la estación Quebrachar de la Red Agroclima.

Por otro lado, se recopiló información del manejo real del riego en el cultivo durante la temporada 2019/20 y el volumen real de riego aportado al cultivo por el productor, de manera de contrastarlo con el análisis modelado. El Cuadro 4 presenta un resumen de los volúmenes de riego aportados en campo y las estimaciones de acuerdo al monitoreo satelital del cultivo y de la demanda ambiental de la zona. En las Figura 9 y Figura 9 se detalla el comportamiento del aporte hídrico en comparación al déficit hídrico respectivo para zonas de distinto nivel de desarrollo para los sectores Borrega (2001) y Bloque 1 (2008), respectivamente.

Cuadro 4. Transpiración potencial del cultivo y volumen de riego aportado al cultivo en sector analizado para distintos niveles de desarrollo.

Variedad	Sector	Año Plantación	Nivel Desarrollo	Transpiración (m3/ha/temp)	Volumen Aplicado (m3/ha/temp)	Déficit hídrico Aplicado
Arbequina	La Borrega	2001	Alto	7992	4068	51%
			Medio	6371	4068	64%
			Bajo	5786	4068	70%
	Bloque 1 /Quebrachal	2008	Alto	4217	1786	42%
			Medio	4194	1786	43%
			Bajo	3557	1786	50%

*: Temporada agrícola considerada fue Julio a Junio.

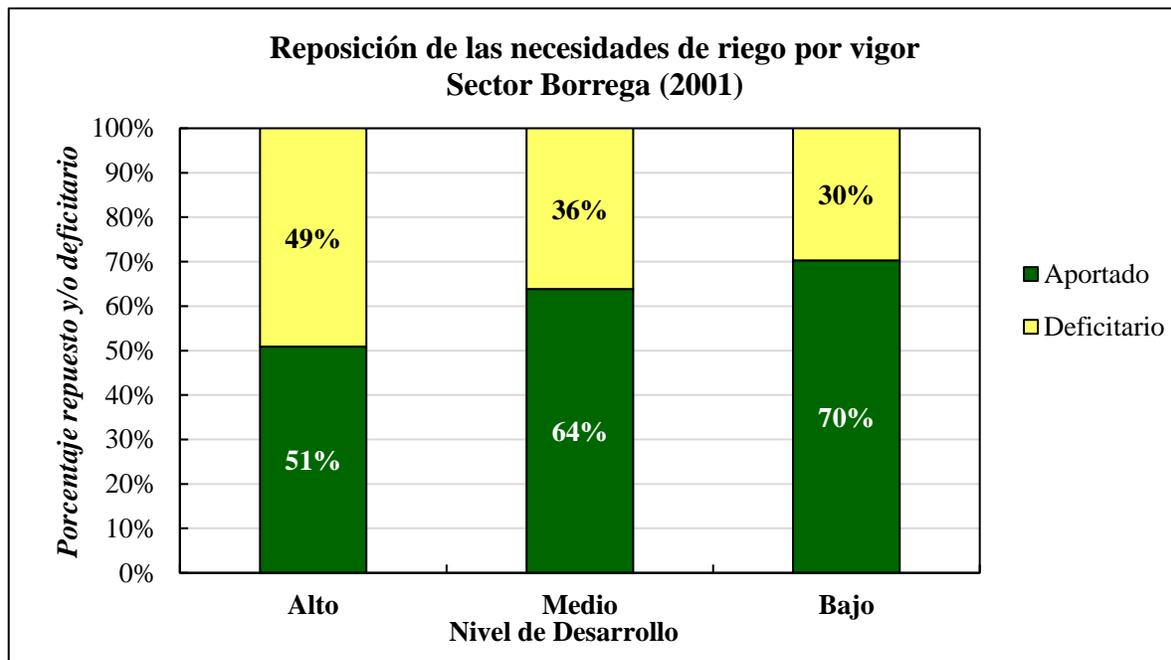


Figura 11. Comportamiento de aportes y déficit hídricos aplicados según vigor en sector Borrega (2001), var. Arbequina. Olivos de Casuto, Los Vilos.

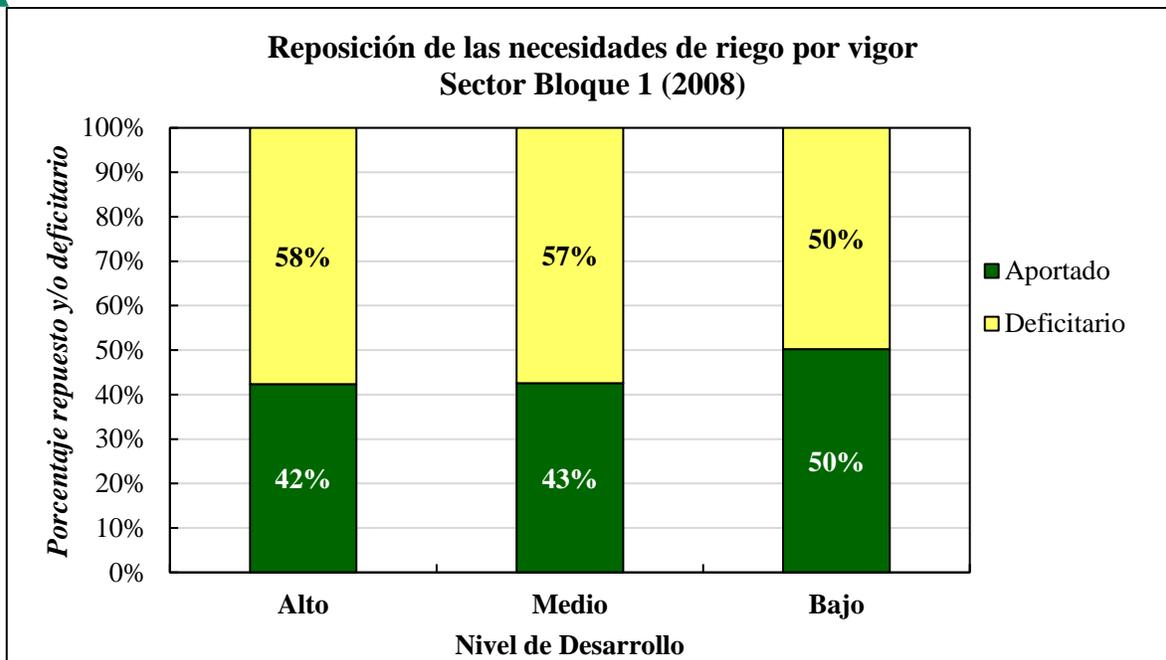


Figura 12. Comportamiento de aportes y déficit hídricos aplicados según vigor en sector Bloque 1 (2008), var. Arbequina. Olivos de Casuto, Los Vilos.

Como se puede observar en ambos sectores analizados, el volumen de riego aportado fue menor al estimado mediante el uso del coeficiente de cultivo modelado para los todos los niveles de desarrollo presentes en los sectores. Debido a que todo el sector recibe el mismo volumen de riego, se presentan para ambos sectores valores de déficit hídrico variable y más acrecentado a aquellas zonas donde los olivos presentan mayor vigor. De este modo, donde es más evidente esta variabilidad es en el sector Borrega (2001) en donde, de acuerdo a los registros de campo, se aprecia que en las zonas de alto vigor se aportó un 51% de las necesidades de riego modeladas, lo cual representó un déficit de 49%, mientras que en las zonas con bajo vigor se aportó un 70% de las necesidades, lo cual representó un 30% de déficit. Para el caso del sector Bloque 1 (2008) la variabilidad es menor, inclusive entre las zonas consideradas de alto a medio vigor, las cuales presentan un aporte hídrico del 42-43%, lo que representa un déficit hídrico de 58-57% respectivamente, mientras que las zonas de bajo vigor cuentan con un aporte hídrico del 50%, con su respectivo déficit de 50%.

Cabe resaltar el hecho de que si bien el sector Bloque 1 (2008) presenta menor demanda hídrica durante la temporada, el déficit hídrico aplicado en comparación al sector Borrega (2001) es mayor, como se muestra en el Cuadro 4 anteriormente presentado.

Para analizar mensualmente las condiciones del aporte de riego en los sectores analizados y estimar la magnitud del déficit de riego por época del año, a continuación, se gráfica el volumen de riego aportado mensualmente durante la temporada 2019/20 junto a las necesidades estimadas de acuerdo a la metodología descrita para niveles de vigor alto y bajo de los sectores (Figuras 13 y 14).

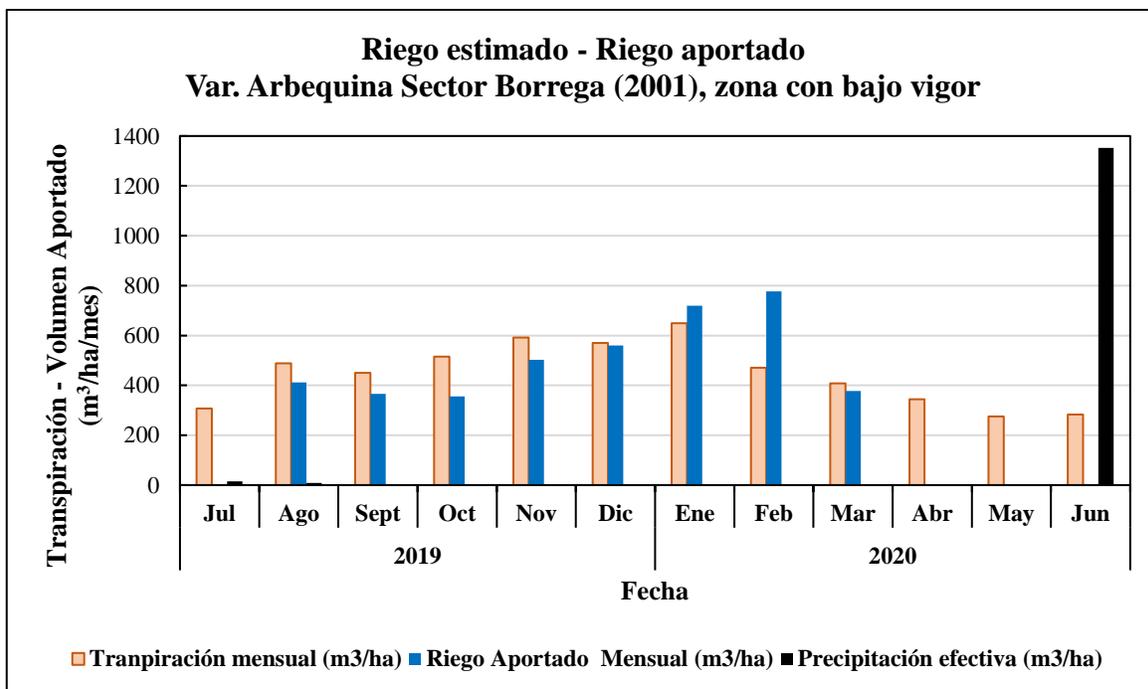
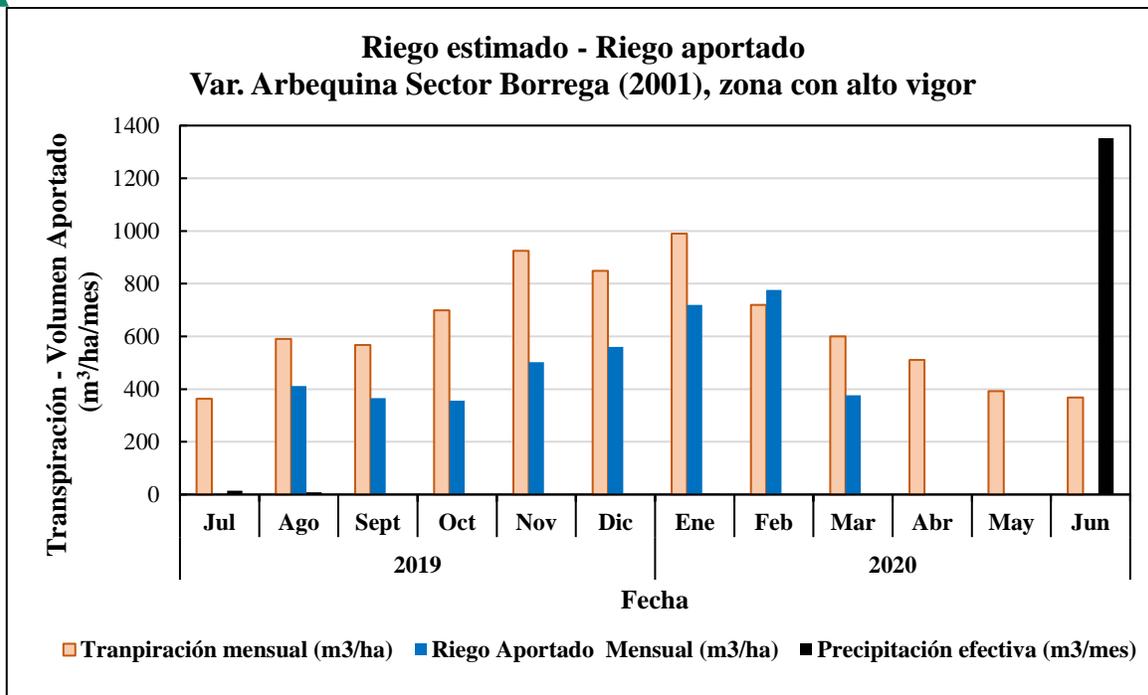


Figura 13. Comparación entre el volumen mensual de riego aportado y el volumen estimado para el Sector Borrega (2001). Desarrollo (vigor) alto y bajo, temporada 2019/20. Olivos de Casuto.

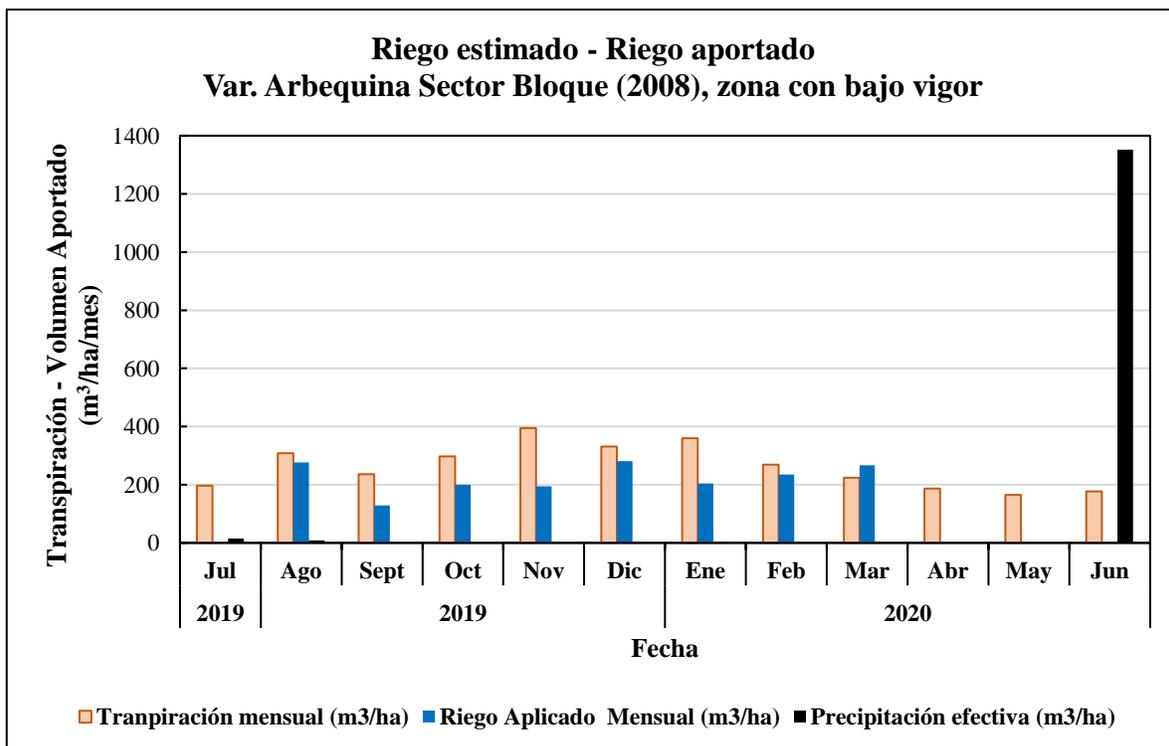
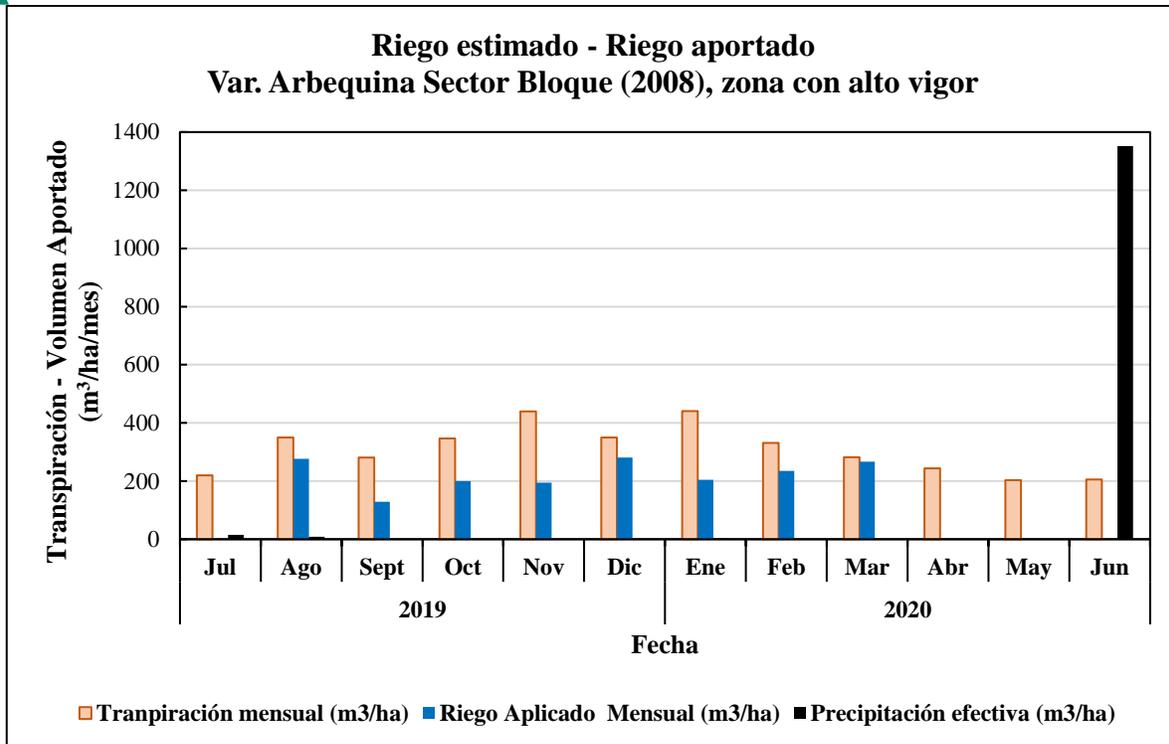


Figura 14. Comparación entre el volumen mensual de riego aportado y el volumen estimado para el Sector Bloque 1 (2008). Desarrollo (vigor) alto y bajo, temporada 2019/20. Olivos de Casuto.

Considerando la acumulación mensual de necesidades hídricas a reponer y el volumen de riego realmente aportado, se observó que existen diferencias deficitarias entre la tasa de transpiración estimada y el riego aportado durante todos los meses de la temporada analizada.

Con objeto de cuantificar las diferencias entre el riego aportado y las necesidades de riego estimadas y los aportes de las lluvias, se calculó un factor de déficit (K_s) de acuerdo a la siguiente relación:

$$K_s = 1 - \frac{\text{riego aplicado} + \text{lluvia}}{\text{riego estimado por satélite}}$$

de este modo los valores de K_s cercanos a 100 indican que se suplieron las necesidades de transpiración, ya sea por riego y/o lluvia y el déficit hídrico es mínimo. Por el contrario, cuando el valor de K_s es cercano a 0 indica que las necesidades de transpiración no fueron repuestas con el aporte de riego y/o precipitaciones y el déficit hídrico fue máximo.

Como se puede apreciar en la Figuras 15 y Figura 16, para el sector Borrega (2001) de alto desarrollo, durante la mayor parte de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit hídrico no superior al 49%, exceptuando los meses de marzo y julio. Durante estos meses fueron los únicos momentos de la temporada en donde el cultivo dispuso de la totalidad de las necesidades hídricas y no tuvo valores deficitarios, en el caso del mes de julio producto del excedente hídrico aportado por precipitación. Por el contrario, los meses de agosto, mayo y junio presentan los menores balances hídricos, con déficit de 96 a 100%.

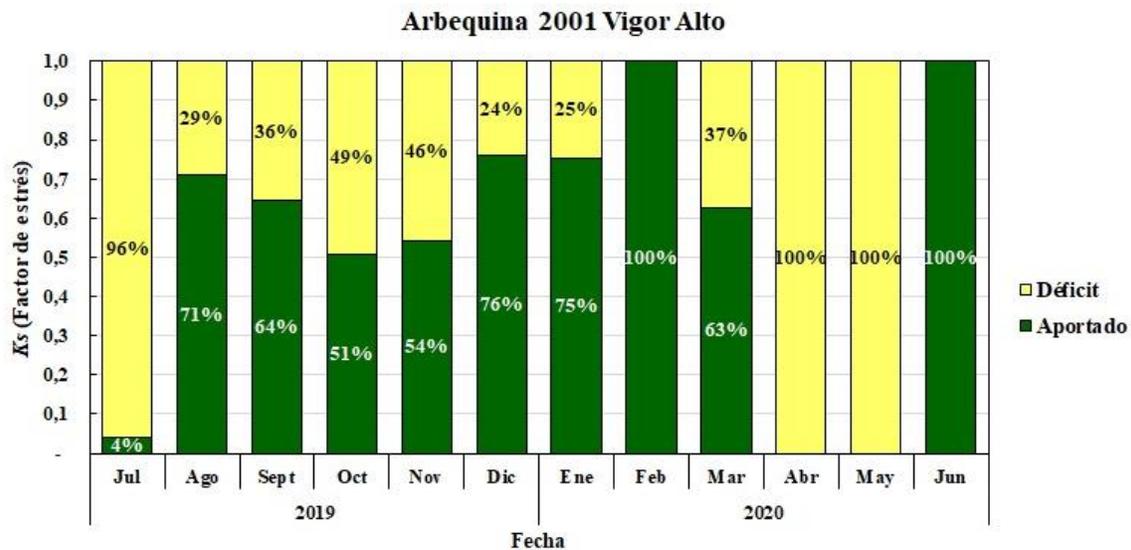


Figura 8. Factor de déficit (K_s) estimado en sector Borrega (2001) de alto desarrollo durante la temporada 2019/20. Olivos de Casuto, Los Vilos.

Al tomar en cuenta los niveles de aporte y déficit para la zona de bajo vigor del sector Borrega (2001), el déficit a lo largo de la temporada no supera el 33-23% en general, a excepción de los meses de agosto, mayo y junio con los menores balances hídricos de la temporada, con déficit del 95 al 100%.

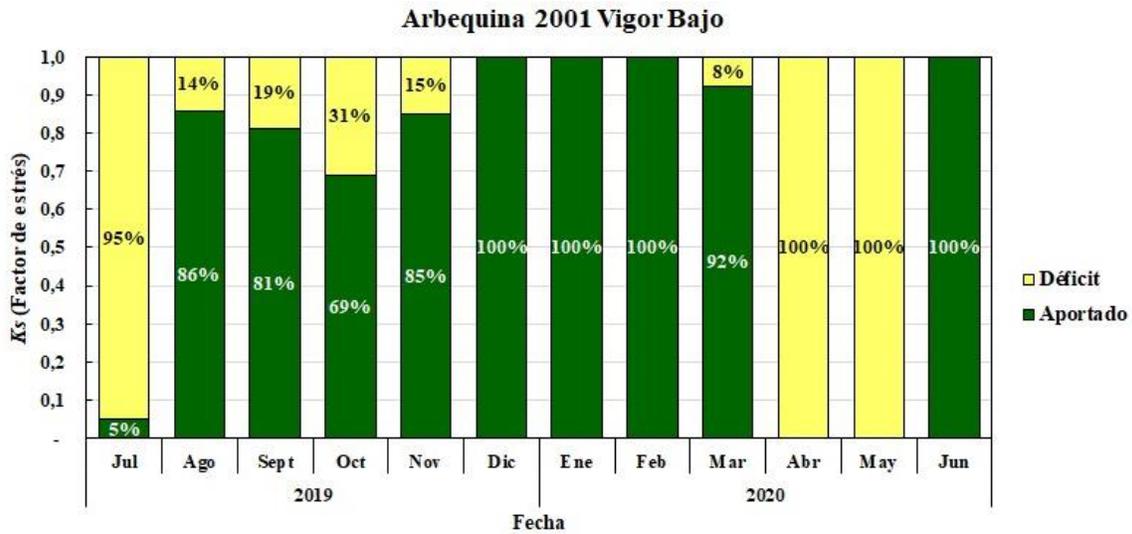


Figura 9. Factor de déficit (K_s) estimado en sector Borrega (2001) de bajo desarrollo durante la temporada 2019/20. Olivos de Casuto, Los Vilos.

Ahora analizando el comportamiento de zonas de alto y bajo vigor para el sector Bloque 1 (2008), como se puede apreciar en la Figura 17 y Figura 18, durante gran parte de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit hídrico mayor al 55%, exceptuando los meses de abril y julio. Durante estos meses fueron los únicos momentos de la temporada en donde el cultivo dispuso de la mayoría o la totalidad de las necesidades hídricas y no presentó valores deficitarios, en el caso del mes de julio producto del excedente hídrico aportado por precipitación. Por el contrario, los meses de agosto, mayo y junio presentan los menores balances hídricos, con déficit de 93 al 100%.

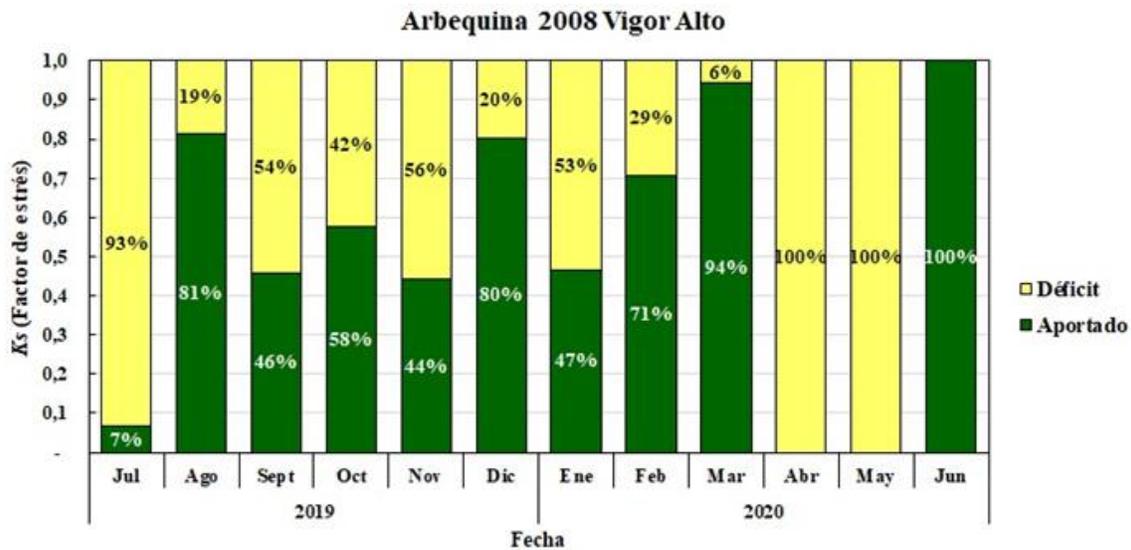


Figura 10. Factor de déficit (K_s) estimado en sector Bloque 1 (2008) de alto desarrollo durante la temporada 2019/20. Olivos de Casuto, Los Vilos.

Los niveles de aporte para la zona de bajo vigor del sector Bloque 1 (2008) se manifiestan dentro del rango de 49% a 92%, exceptuando mes de abril y julio con aporte hídrico del 100%. El déficit a lo largo de la temporada de riego no supera el 51%, a excepción de los meses de agosto, mayo y junio con los menores balances hídricos de la temporada, con déficit del 92 al 100%.

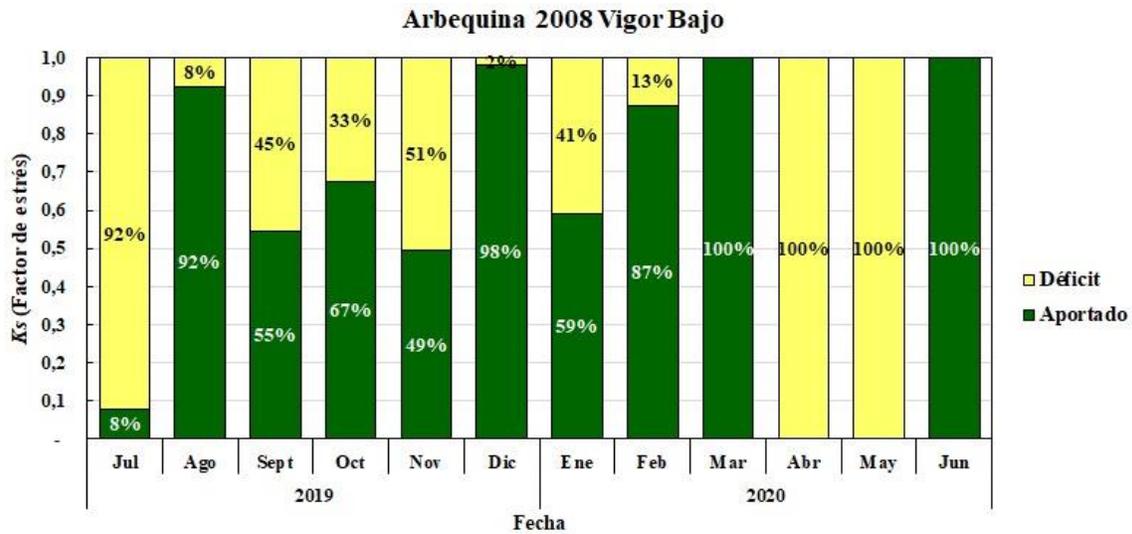
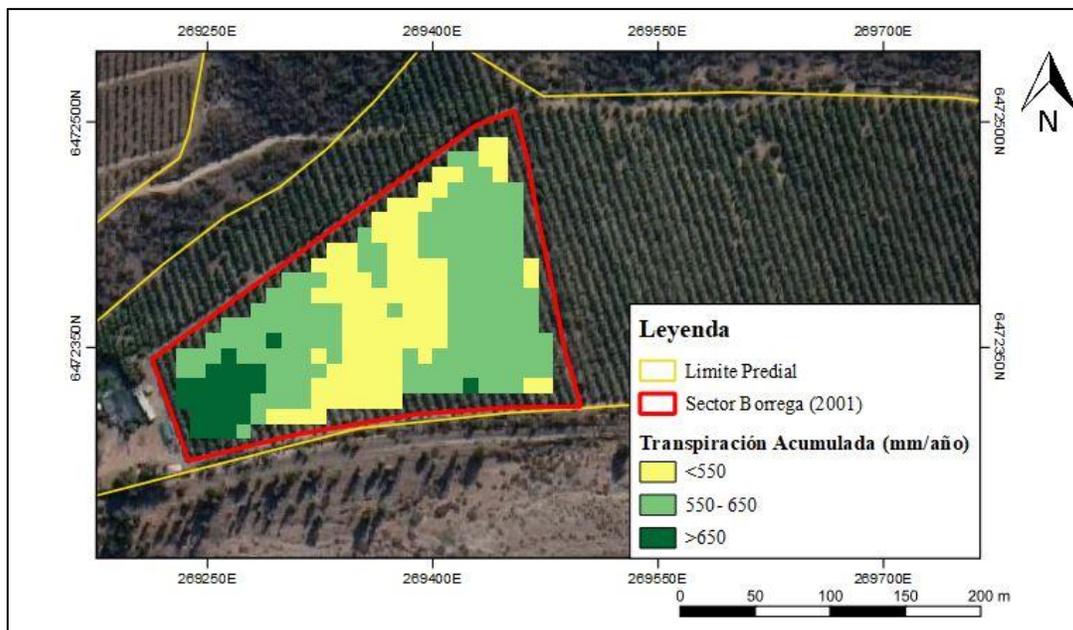


Figura 11. Factor de déficit (K_s) estimado en sector Bloque 1 (2008) de bajo desarrollo durante la temporada 2019/20. Olivos de Casuto. Los Vilos.

Distribución espacial de la Transpiración

Al analizar el comportamiento de la transpiración acumulada durante la temporada completa en los sectores monitoreados, se pudo estimar que el valor promedio de transpiración para el Sector Borrega (2001) fue de 578 mm/año, con un valor máximo de 802 mm/año y mínimo de 458 mm/año.

A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 38%, 1,4 ha) se concentra en el rango de 600 mm a 650 mm al año, seguido del rango de 550 - 600 mm de transpiración anual en un 28% de la superficie (1,03 ha). En la Figura 12 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.



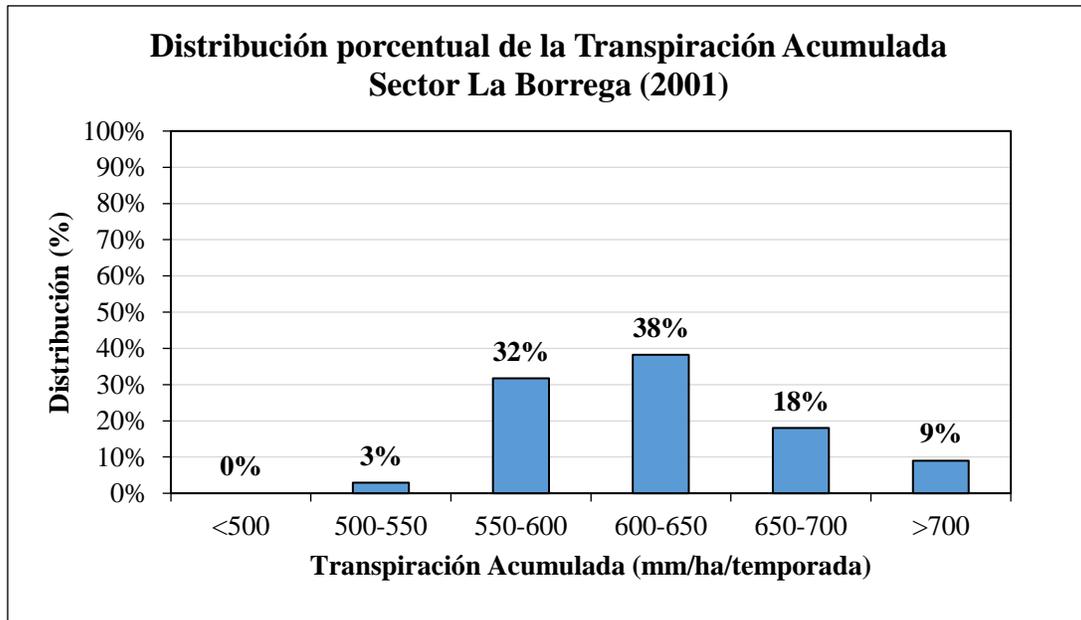


Figura 12. Distribución de los rangos de transpiración acumulada para el sector Borrega (2001). Olivos de Casuto, Los Vilos.

Para el caso del Sector Bloque 1 (2008) se pudo estimar que el valor promedio de transpiración para el Sector Borrega fue de 336 mm/año, con un valor máximo de 441 mm/año y mínimo de 173 mm/año. Estos valores se encuentran muy por debajo de lo demostrado en desarrollo por el sector Borrega, principalmente por el marco de plantación establecido en ambos sectores, sin desestimar el hecho de la diferencia de edad de ambos sectores.

A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 40%, 2,2 ha) se concentra en el rango de 400 mm a 450 mm al año, seguido del rango de 350 - 400 mm de transpiración anual en un 32% de la superficie (1,82 ha). En la Figura 12 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

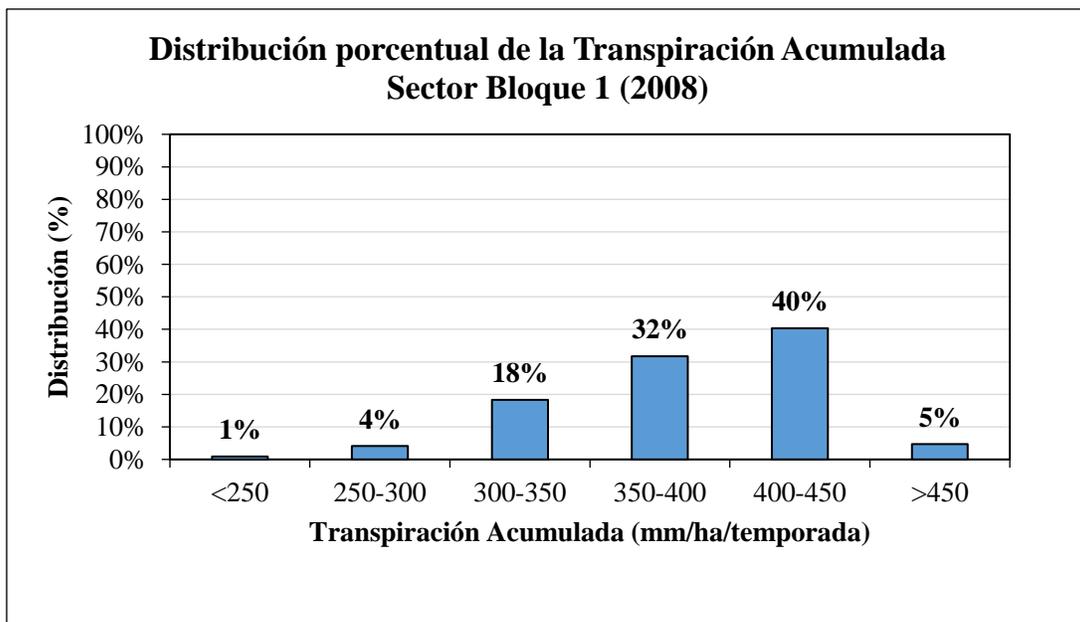
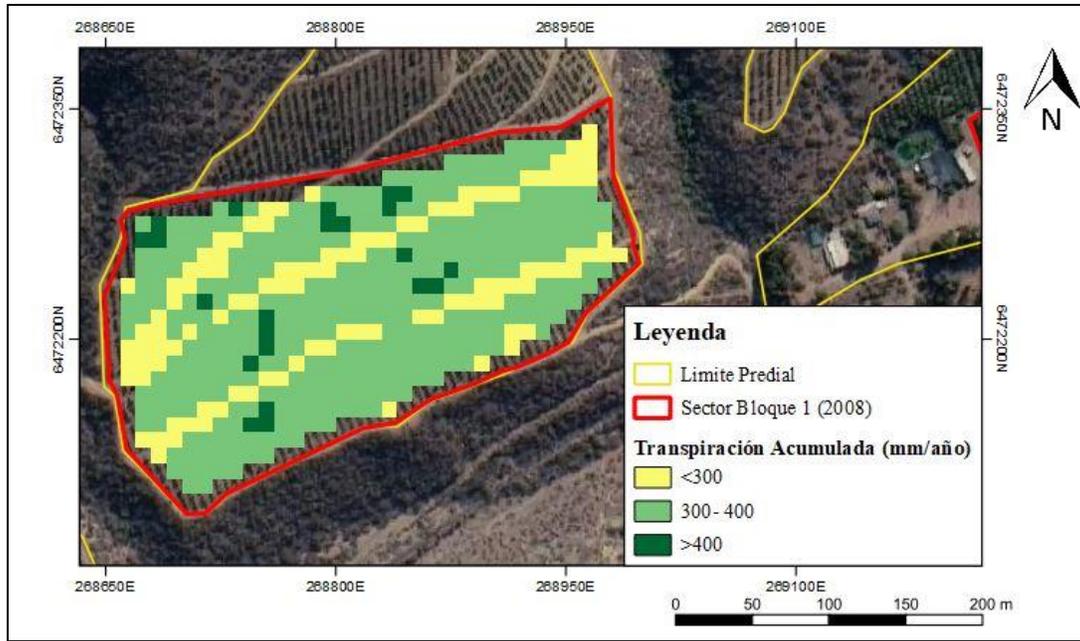


Figura 13. Distribución de los rangos de transpiración acumulada para el sector Bloque 1 (2008). Olivos de Casuto, Los Vilos.



Literatura citada

Agrimed, 2017. Atlas Agroclimático de Chile, estado actual y tendencias del clima. Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED). Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Chile.

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 - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manage.* 98, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011>.

Bausch, W.C., 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46, 213–222. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90096-G](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90096-G).

Bausch, W.C., 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manage.* 27, 55–68. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01125-3](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01125-3).

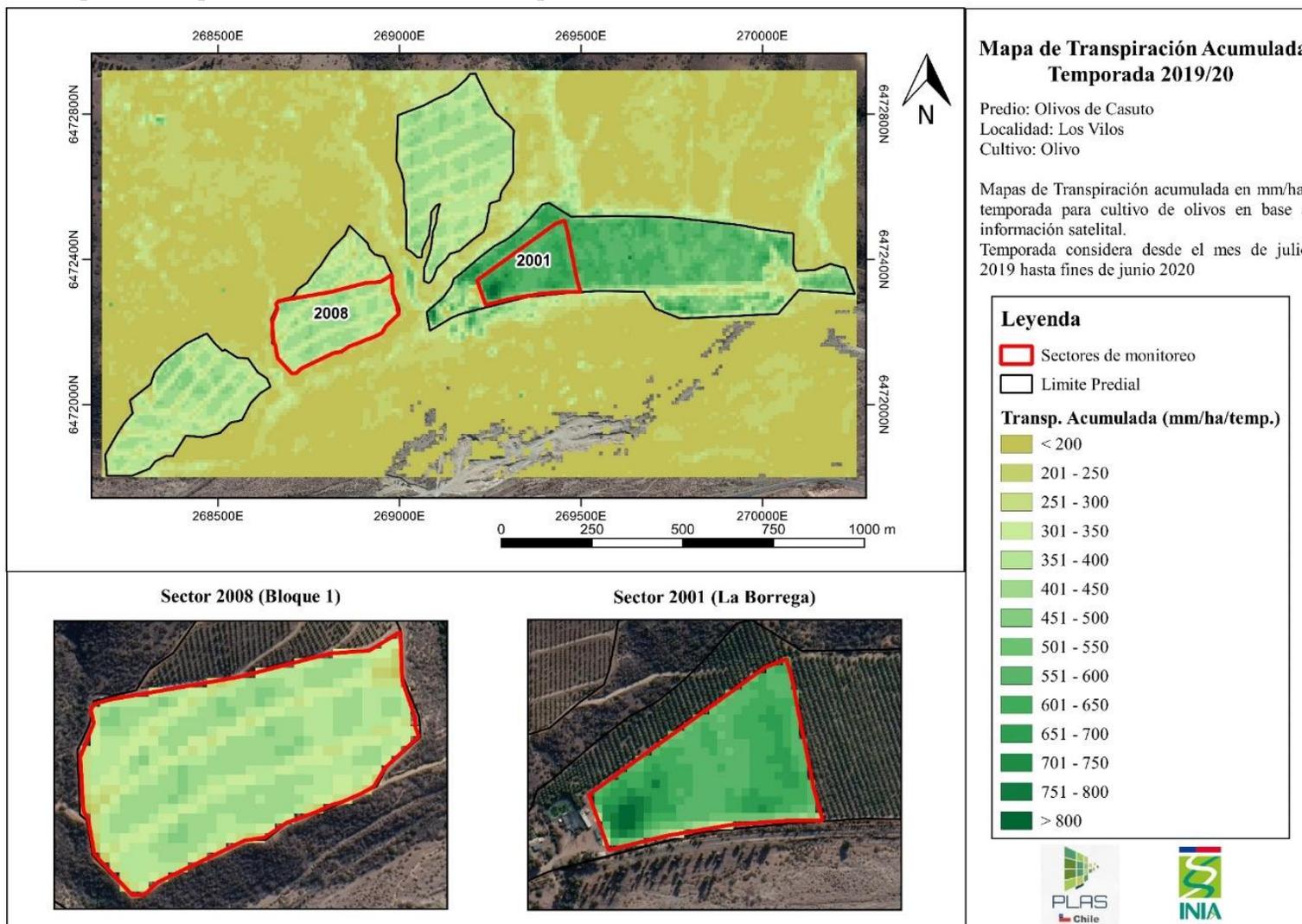
Bausch, W.C., Neale, C.M.U., 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Trans. ASAE* 30, 703–709. <https://doi.org/10.13031/2013.30463>.

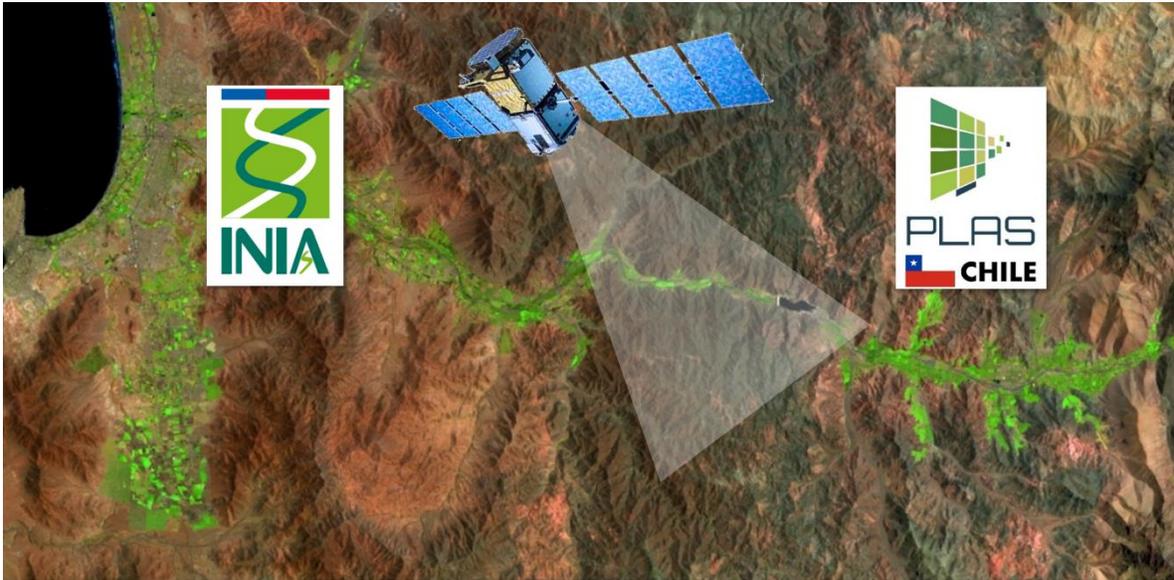
Heilman et al., 1982 Heilman, J.L., Heilman, W.E., Moore, D.G., 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agron. J.* 74, 967–971. <https://doi.org/10.2134/agronj1982>.

Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heermann, D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. ASAE* 32, 1891–1899.

Anexo

Mapa de Transpiración Acumulada durante Temporada 2019/20. Sectores Monitoreo, Predio Olivos de Casuto, Los Vilos.





Informe Consultoría en Riego INIA

Productor: OLIVOS OLIMPO

Autores

Equipo Proyecto PLAS - INIA Intihuasi

Jefe de proyecto - Claudio Balbontín Nesvara

Profesional de Apoyo - Jael Montecinos Castro

Informe Consultoría Manejo del Riego

OLIVOS OLIMPO

Introducción

Con objeto de implementar un trabajo colaborativo entre el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA y la Asociación de Productores de Aceite Oliva ChileOliva, se implementó un trabajo de consultoría en la cual se analizaron las metodologías para la definición de las necesidades de riego del cultivo y aspectos asociados al manejo agronómico del cultivo de olivos.

El principal objetivo de la consultoría es transferir un marco conceptual estandarizado para la definición de las necesidades de riego, junto a la capacitación en el uso de nuevas tecnologías para el monitoreo del cultivo y de los factores ambientales que influyen en el consumo hídrico y por tanto en la programación del riego.

En este trabajo se elaboró un análisis comparativo entre los criterios utilizados actualmente por el productor para definir los volúmenes de riego aportados al cultivo (manejo tradicional del riego) y las necesidades de riego estimadas a partir del marco conceptual propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998), con la innovación tecnológica del uso del índice de vegetación satelital NDVI para estimar un Coeficiente de Cultivo y el uso de información de la demanda ambiental del sitio para estimar la tasa de transpiración máxima del cultivo.

De este modo, en el siguiente informe se analiza el desarrollo del cultivo utilizando información del índice de vegetación satelital NDVI, factores ambientales que influyen en el consumo hídrico del cultivo, las metodologías para la definición de las necesidades de riego en el campo y asistido con información satelital y la variabilidad espacial de la tasa de transpiración del cultivo dentro de los sectores analizados.



Sitio de análisis

Los trabajos fueron realizados en un predio ubicado en la localidad de Ovalle y comuna de Ovalle, Región de Coquimbo. En la Figura 1 se indica la ubicación geográfica del predio, así como de los sectores analizados.



Predio: Olivos Olimpo
Localidad: Ovalle
Comuna: Ovalle
Provincia: Limarí
Región: Coquimbo
Chile

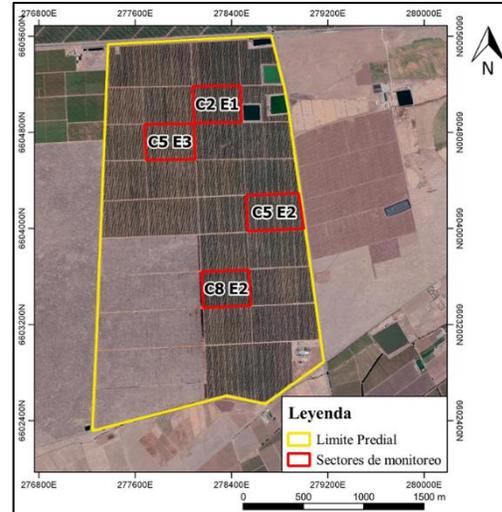


Figura 1. Ubicación del predio y sitios analizados (Olivos Olimpo, Ovalle).

Los sectores analizados corresponden a cuatro cuarteles con la variedad Arbequina, Frantoio y Coratina. Dentro de cada cuartel, la distribución de las variedades es una hilera de la var. Coratina seguida de once hileras de la var. Arbequina y luego una hilera de Frantoio. Esta distribución se repite en todos los sectores analizados. En el Cuadro 1 se señala un resumen de las características de los sitios analizados en el trabajo.

Cuadro 1. Equipo, superficie, variedades y marcos de plantación de los sitios bajo análisis.

Sector	Superficie (ha-SIG)	Variedad	Año de Plantación	Marco de plantación (m)	Plantas/ha
C2 E1	12	Arbequina, Frantoio, Coratina	2007	4 x 1,5	1.667
C5 E3	12,3	Arbequina, Frantoio, Coratina	2010	4 x 1,5	1.667
C3 E2	13,2	Arbequina, Frantoio, Coratina	2009	4 x 1,5	1.667
C8 E2	11,9	Arbequina, Frantoio, Coratina	2009	4 x 1,5	1.667

Características climáticas zona de estudio

El predio analizado se encuentra dentro del distrito agroclimático Ovalle (Agrimed, 2017) (Figura 2). El clima corresponde a desértico con influencia marina, y régimen de humedad xérico. La temperatura del aire varía entre máximos en el mes de enero de 26,3 °C y mínimos en el mes de julio de 7,4 °C. Dentro del distrito se registran valores máximos que oscilan entre 28,7 °C y 23,4 °C y valores de la temperatura mínima entre 9,5 °C y 4,5 °C. En promedio el distrito presenta 345 días consecutivos libres de heladas y al año no se registran heladas. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa de los cultivos tiene una longitud de 12 meses. La sumatoria anual de días grados es de 2.065 y 91 horas de frío (acumuladas hasta el 31 de Julio). En cuanto a las precipitaciones, la media anual se sitúa en 66 mm/año, con un período seco de 12 meses de duración y un déficit hídrico de 1.382 mm/año (Figura 1). No presenta período húmedo, por lo cual no se produce un excedente hídrico (Agrimed, 2017).



Figura 2. Distrito Agroclimático de Ovalle (Agrimed, 2017).

Para el análisis de los datos meteorológicos locales se consideró información de la estación Camarico, perteneciente a la RAN Agrometeorológica Nacional de INIA (www.agrometeorologia.cl). De acuerdo a estos registros se observa que el comportamiento de la temperatura del aire se caracteriza por alcanzar valores máximos en torno a los 30,1°C en los meses de verano (con máximos en enero y febrero y un peak de 37,6°C en agosto de 2019) y temperaturas mínimas invernales en torno a 0,88°C en los meses de invierno, con eventos extremos de -4,6°C en mayo de 2019 y -3,9°C en mayo de 2019 (Figura 3).

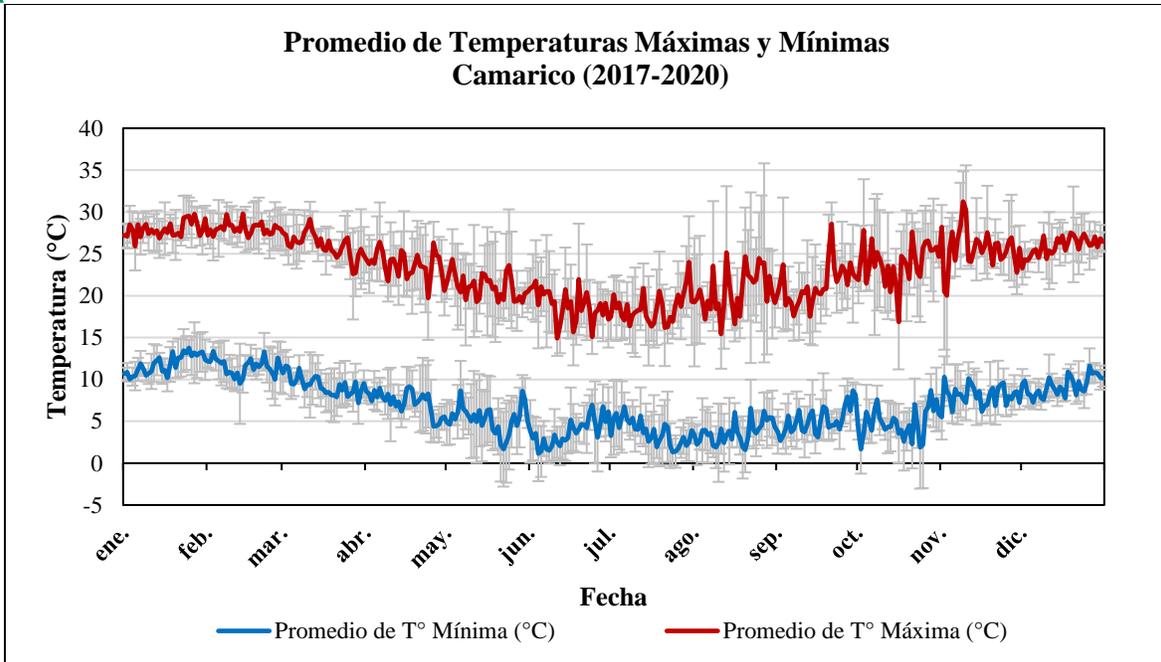


Figura 3. Comportamiento de temperaturas máximas y mínimas en la zona de estudio. Estación INIA Camarico (www.agrometeorologia.cl).

En los últimos cuatro años, el monto anual de las precipitaciones alcanzó en promedio 107 mm/año, con montos anuales de 80 mm para la temporada 2019/20 y 6 mm en lo que va de la temporada 2020/21 (temporada se considera de julio a junio) (Figura 4).

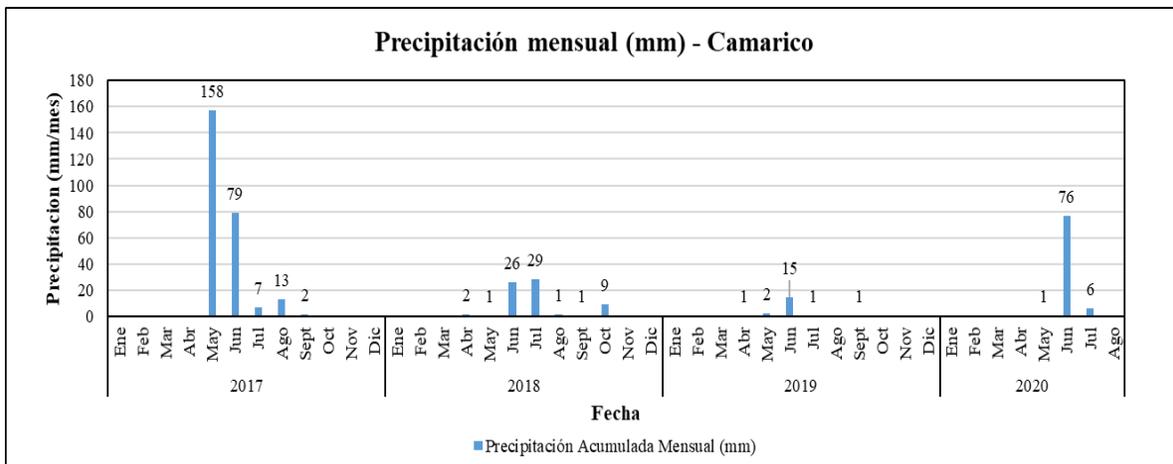


Figura 4. Precipitaciones mensuales período 2017 – 2020 (Estación Agrometeorológica Camarico, Ovalle. www.agrometeorologia.cl).

En este sentido y de acuerdo a los datos históricos de precipitaciones, el año 2019 correspondió a un año con valores bajos extremos (20 mm), aumentando las precipitaciones durante el presente año. A pesar de este aumento, la evidencia muestra una tendencia a la disminución de los montos anuales de las lluvias, por lo cual es esperable una disminución de las reservas de agua en el suelo Figura 5.

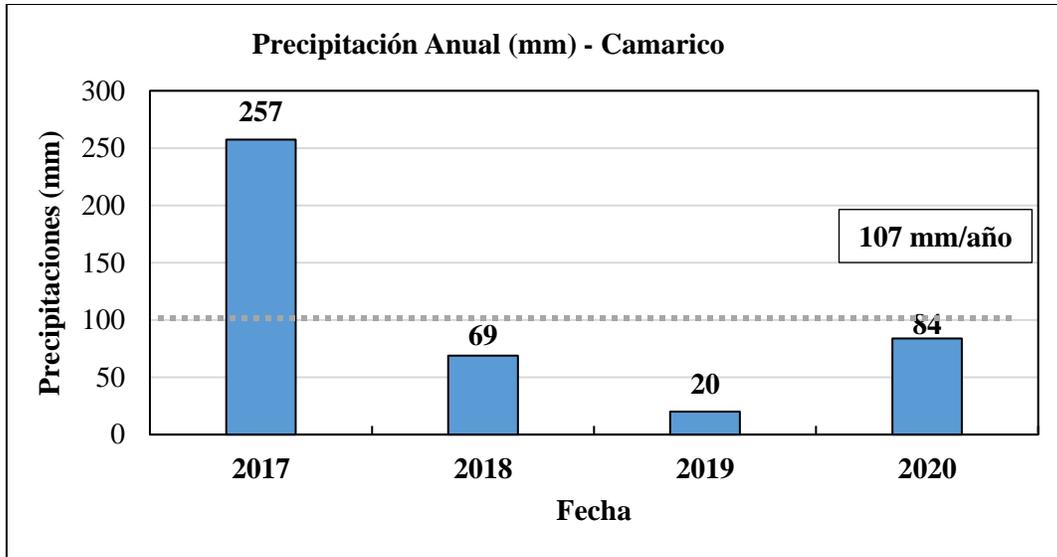


Figura 5. Precipitaciones anuales durante el período 2017 al 2020 registradas en la Estación Agrometeorológica INIA Camarico. (www.agrometeorologia.cl).

En cuanto a la distribución anual de la demanda ambiental, representada por la variable evapotranspiración de referencia (ET_o, Penman Monteith), esta alcanza valores anuales de 1138 mm/año, con valores máximos diarios en torno a 5,8 mm/día en el verano (máximo absoluto de 6,6 mm/día) y mínimos en torno a 0,76 mm/día, durante los meses invernales de junio a julio. En la Figura 6 se compara el comportamiento anual de la ET_o registrada por la estación de Llanos de San Julián y la estación agrometeorológica Camarico perteneciente a INIA (agrometeorologia.cl). De este modo se pudo comprobar el buen funcionamiento de ambas estaciones y su utilidad para estimar la demanda ambiental y por tanto la programación del riego.

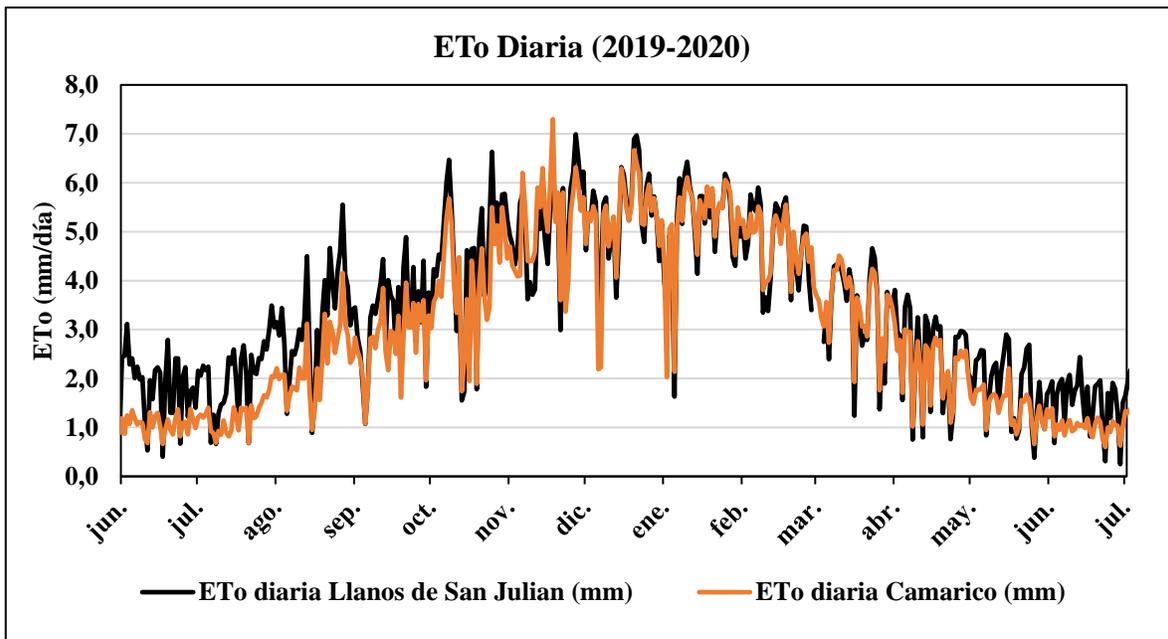
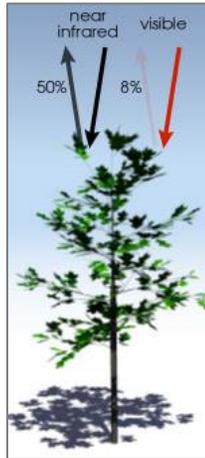


Figura 6. Evapotranspiración de referencia diaria (ET_o), período 2019 - 2020, estaciones Llanos de San Julian y Camarico (www.agrometeorologia.cl).

Caracterización del desarrollo del cultivo

Para la caracterización del desarrollo anual del cultivo se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) obtenido a partir de series temporales de imágenes satelitales. Este índice de vegetación permite estimar la absorción de la radiación solar por parte del cultivo en ciertos espectros de la radiación solar, eliminando la respuesta de otros elementos en el terreno. La fórmula de cálculo se señala en la Figura 7.



$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada

NIR: Reflectividad en el infrarrojo cercano

R: Reflectividad en el rojo

Figura 7. Ecuación de cálculo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI y representación esquemática de las longitudes de onda involucradas en su cálculo.

Los satélites utilizados en el análisis del cultivo fueron el Sentinel 2A, Sentinel 2B y Landsat 8. En Cuadro 2 se señalan las principales características de los satélites utilizados en el estudio.

Cuadro 2. Características de las imágenes satelitales utilizados.

Programa	Satélite	Cobertura imagen (km)	Resolución temporal (días entre visita)	Resolución espacial (metros)
Landsat (NASA)	Landsat 8	185 x 185	16 días	30
Copernicus (ESA)	Sentinel 2A	100 x 100	10 días	10
	Sentinel 2B			

Así mismo, el análisis de la variabilidad espacial del cultivo dentro de los sectores analizados permite identificar y cuantificar diferencias en su desarrollo entre distintas zonas. Estas diferencias serán analizadas conjuntamente con el productor de manera de identificar factores que podrían estar induciendo la des-uniformidad observada, como pueden ser características edáficas del sitio, inadecuada operación del equipo de riego u otros factores adversos que puedan limitar el desarrollo del cultivo.

En las Figura 8, Figura 9, Figura 10 y Figura 11 se señala el comportamiento anual del índice de vegetación NDVI para los sectores C2E1, C5E3, C5E2 y C8E2, respectivamente, indicando zonas con alto y bajo desarrollo del cultivo para la variedad Arbequina durante la temporada 2019-20.

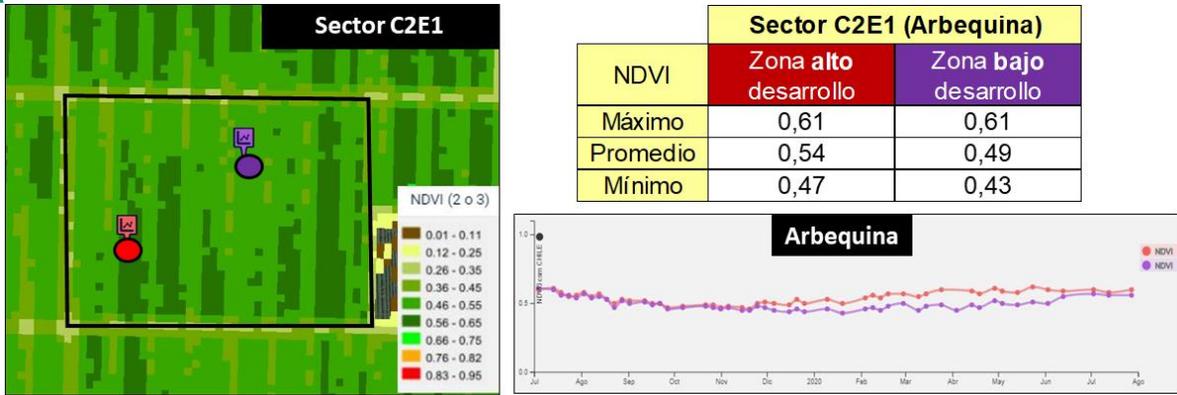


Figura 8. Vista general índice NDVI en el Sector C2E1 (Olivos Olimpo, Ovalle).

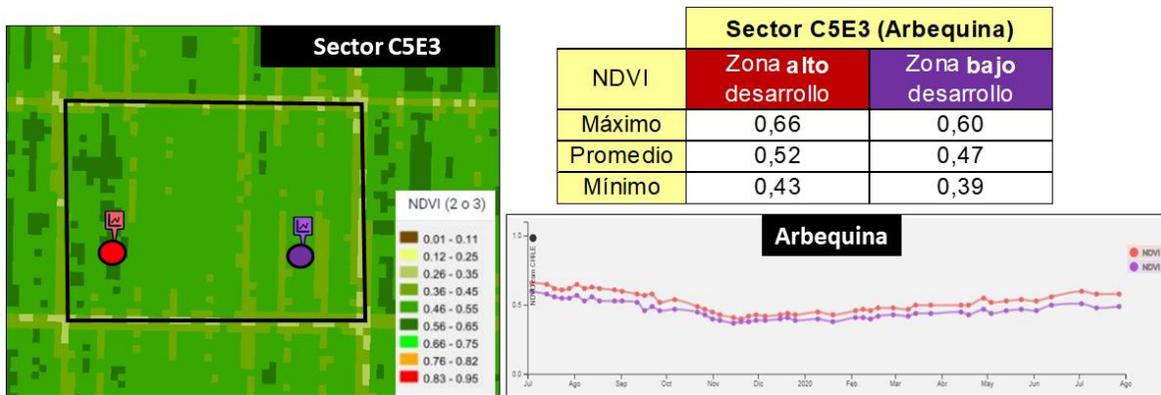


Figura 9. Vista general índice NDVI en el Sector C5E3 (Olivos Olimpo, Ovalle).

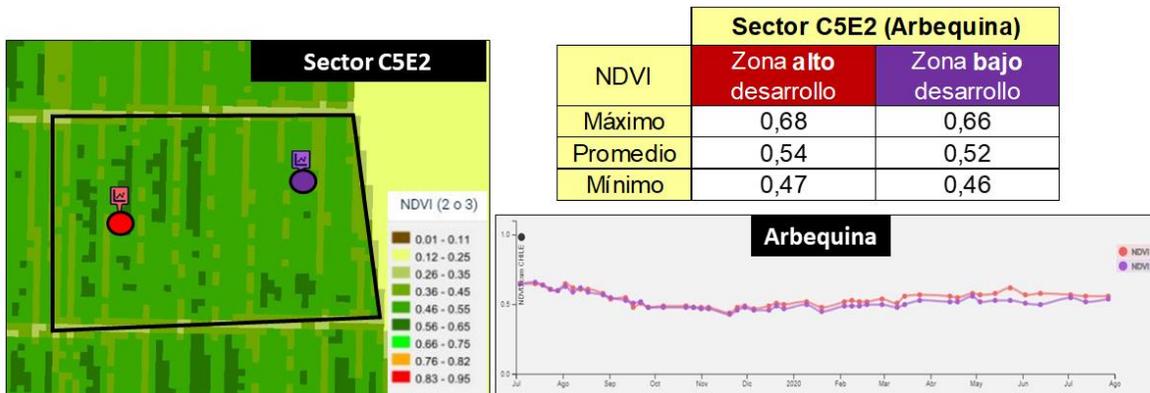


Figura 10. Vista general índice NDVI en el Sector C5E2 (Olivos Olimpo, Ovalle).

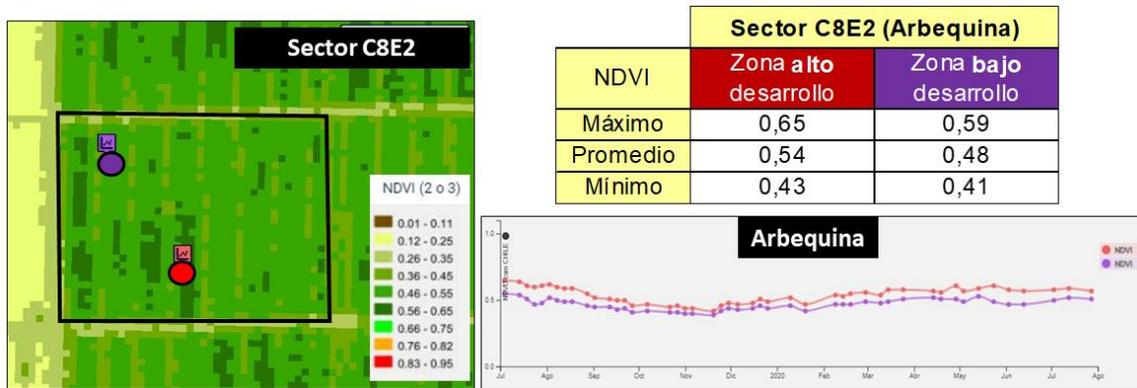


Figura 11. Vista general índice NDVI en el Sector C8E2 (Olivos Olimpo, Ovalle).

Como se puede apreciar los valores promedio más altos del índice NDVI se alcanzan en el Sector C5E2 (Figura 10), indicando el mayor desarrollo foliar de las plantas ahí presentes de la variedad Arbequina. Más detalles de la variabilidad espacial de las plantas dentro de los sectores de riego serán analizados en el capítulo necesidades de riego del cultivo.

Manejo del riego

La determinación de las necesidades de riego de los cultivos se realizó utilizando el marco conceptual “evapotranspiración de referencia-coeficiente de cultivo”, propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998): La fórmula que resume su cálculo se indica a continuación:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Donde;

ET_c: Evapotranspiración de cultivo (mm/día)

K_c: Coeficiente de cultivo (adimensional)

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Para alimentar esta fórmula, se utilizaron por una parte los valores de la *ET_o* estimados por estaciones propias del productor y por las estaciones de la Red Agrometeorológica Nacional (RAN MINAGRI), disponible en el sitio web <https://agrometeorologia.cl/>. De este modo se descargó la variable *Evapotranspiración de Referencia (ET_o)*, estimada a partir de los registros meteorológicos diarios de la temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar incidente y velocidad del viento y utilizando la ecuación conocida como Penman-Monteith (PM).

Por otro lado, para obtener valores del *K_c* se utilizó la información disponible en la Plataforma Agrícola Satelital PLAS (<http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=plas>), estimado a partir del índice de vegetación NDVI.

Coeficientes de cultivo

En este trabajo, para estimar el nivel de desarrollo de las plantas en el terreno se utilizó el índice de vegetación satelital NDVI. Por su parte, para estimar el potencial transpirativo del cultivo se definió un coeficiente de cultivo basal de acuerdo a lo propuesto por la literatura científica (Campos et al., 2010; Bausch, 1993; Bausch, 1995; Bausch and Neale, 1987; Heilman et al., 1982; Neale, et al., 1989). La relación utilizada para la obtención del *K_c* se indica en la siguiente fórmula:

$$K_c = 1,51 \times NDVI - 0,23$$

En la Figura 12 se señala el comportamiento anual del coeficiente de cultivo promedio para las plantas de la variedad Arbequina de los sectores C2E1, C5E3, C5E2 y C8E2. A partir del comportamiento anual del *K_c* se puede observar que en el período invernal los valores del *K_c* son más altos indicando

posiblemente mayor desarrollo del cultivo durante ese período (menor demanda ambiental) o la presencia de malezas. Así mismo, los menores valores del Kc se observan en los meses de fines de primavera y verano (octubre a diciembre), probablemente debido a la mayor demanda del ambiente y el efecto de déficit del aporte hídrico sobre el cultivo.

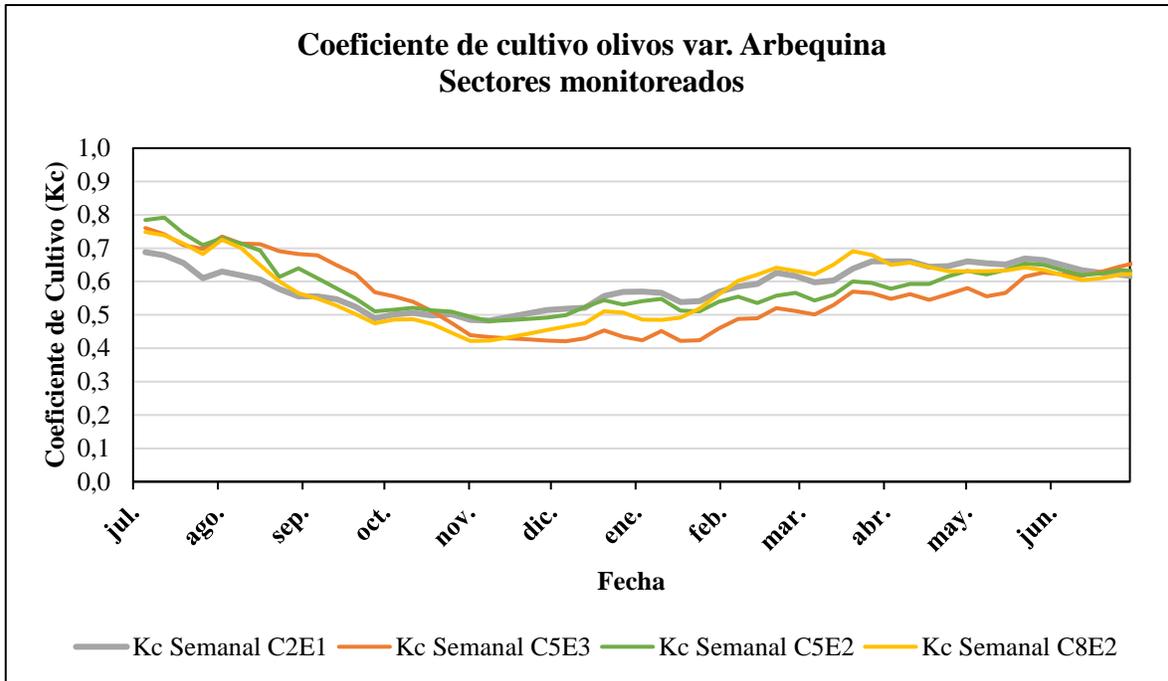


Figura 12. Comportamiento anual del Kc durante la temporada 2019/20 en los sectores monitoreados, var. Arbequina. Olivos Olimpo, Ovalle.

En el Cuadro 3 se presenta un resumen de valores de Kc para cada sector de vigor alto, medio y bajo identificado.

Cuadro 3. Resumen de valores de Kc máximo, mínimo y promedio en los sectores analizados para zonas de distinto nivel de desarrollo.

Variedad	Sector	Nivel Desarrollo	Kc Satelital		
			Máximo	Promedio	Mínimo
Arbequina	C2E1	Alto	0,69	0,59	0,48
		Bajo	0,69	0,51	0,43
	C5E3	Alto	0,76	0,56	0,42
		Bajo	0,68	0,47	0,36
	C5E2	Alto	0,79	0,59	0,48
		Bajo	0,76	0,55	0,46
	C8E2	Alto	0,75	0,58	0,42
		Bajo	0,65	0,49	0,38
		Promedio	0,72	0,54	0,43

Como se puede observar, en la variedad Arbequina los valores de Kc máximo están en el rango 0,79 a 0,65, mientras que los valores mínimos se sitúan en el rango 0,48 a 0,36. El Kc promedio anual

estimado en Arbequina fue 0,54. La proporción de cada zona se analiza en el capítulo de variabilidad de la transpiración.

Considerando la información de los aportes de riego realizados durante la temporada 2019/20 en el cuartel analizado, se estimaron los valores del Coeficiente de cultivo (K_c) utilizados en la programación del riego. Estos valores se comparan con el valor modelado para la variedad Arbequina en los sectores con vigor alto y bajo. De este modo se apreciaron las diferencias de K_c , que al momento de estimar el consumo hídrico del cultivo se traducen en diversas intensidades de déficit en el aporte del riego. Las Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Figura 16 comparan los valores de K_c obtenido con la modelación satelital y los estimados a partir de los aportes de riego mensuales informados, para los sectores C2E1, C5E3, C5E2 y C8E2, respectivamente.

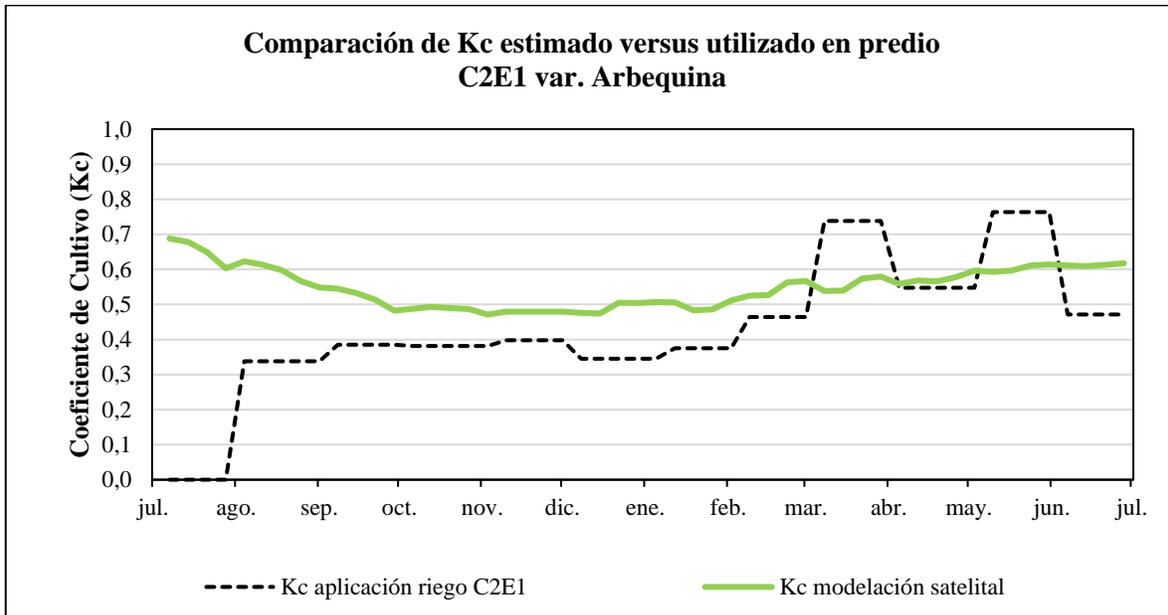


Figura 13. Comparación de las curvas K_c promedio por variedad obtenidas con el monitoreo satelital y el K_c utilizado operativamente en el predio, Sector C2E1 (Olivos Olimpo, Ovalle)

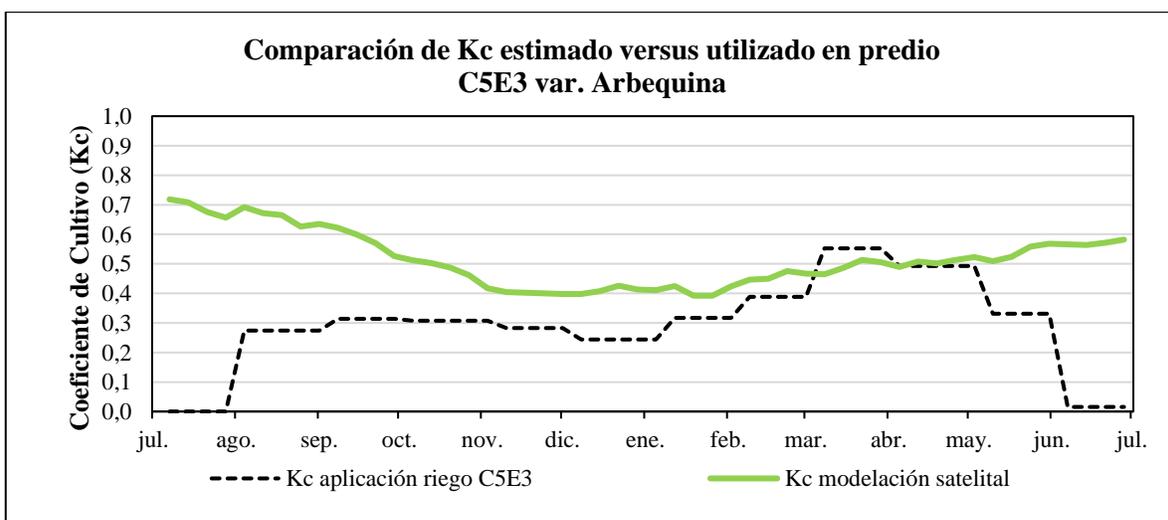


Figura 14. Comparación de las curvas K_c promedio por variedad obtenidas con el monitoreo satelital y el K_c utilizado operativamente en el predio, Sector C5E3 (Olivos Olimpo, Ovalle).

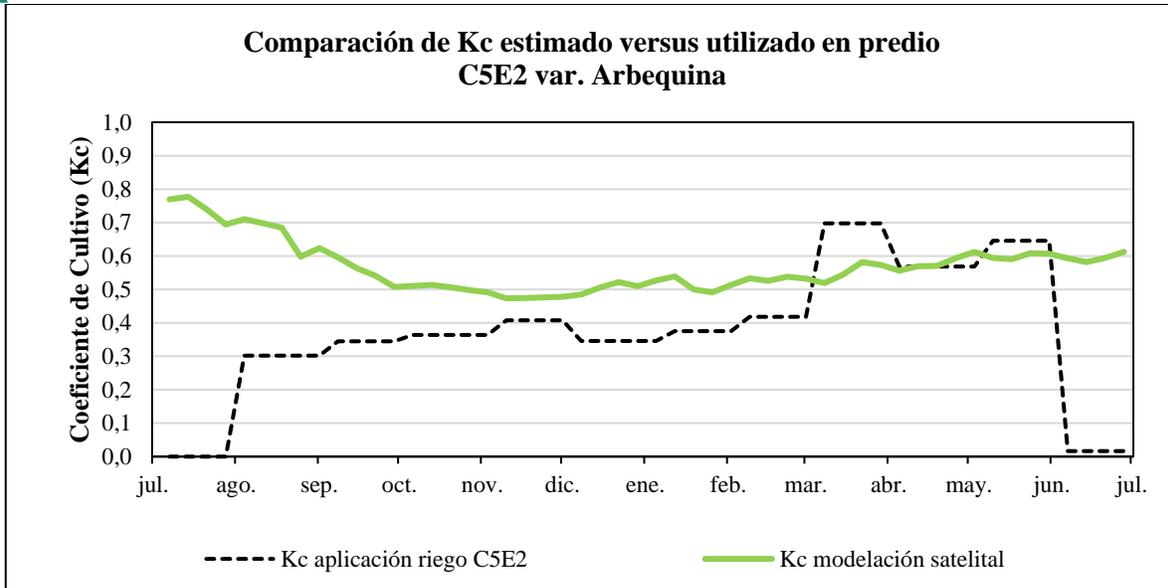


Figura 15. Comparación de las curvas Kc promedio por variedad obtenidas con el monitoreo satelital y el Kc utilizado operativamente en el predio, Sector C5E2 (Olivos Olimpo, Ovalle).

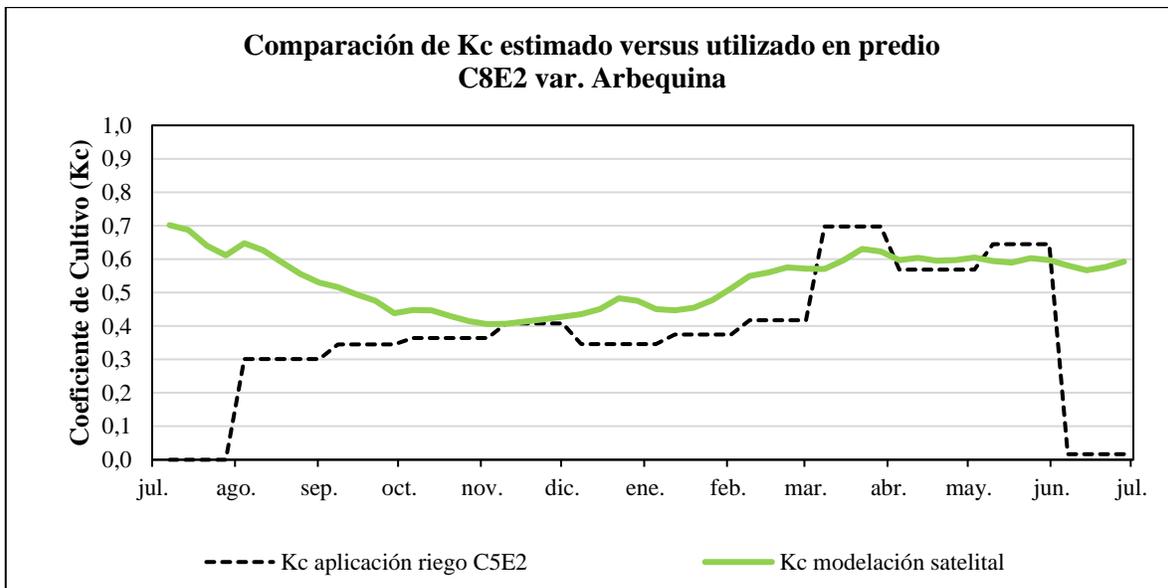


Figura 16. Comparación de las curvas Kc promedio por variedad obtenidas con el monitoreo satelital y el Kc utilizado operativamente en el predio, Sector C8E2 (Olivos Olimpo, Ovalle).

Demanda de riego modelada

Con base en la metodología “coeficiente de cultivo- evapotranspiración de referencia” descrita anteriormente se modeló la transpiración potencial del cultivo, correspondiente a la estimación de necesidades de riego del cultivo de manera de mantener el cultivo en un óptimo de disponibilidad hídrica (sin déficit). Como se señaló anteriormente el parámetro Kc fue obtenido del índice de vegetación NDVI desde la Plataforma Agrícola Satelital PLAS y los datos de ETo desde el mapa dinámico de ETo semanal disponible en la plataforma satelital PLAS.

Por otro lado, se recopiló información del manejo real del riego en el cultivo durante la temporada 2019/20 y el volumen real de riego aportado al cultivo por el productor, de manera de contrastarlo con el análisis modelado. El Cuadro 4 presenta un resumen de los volúmenes de riego aportados en campo y las estimaciones de acuerdo al monitoreo satelital del cultivo y de la demanda ambiental de la zona. Se aprecian diferencias en el comportamiento de la transpiración acumulada durante la temporada y entre sectores, alcanzando para la variedad Arbequina valores promedio de transpiración de 6.627 m³/ha/temporada.

Cuadro 4. Transpiración potencial del cultivo y volumen de riego aportado al cultivo en sector analizado para distintos niveles de desarrollo.

Variedad	Equipo	Sector	Transpiración (m ³ /ha/temp)	Volumen Aplicado (m ³ /ha/temp)	Deficit	Aporte
Arbequina	C2E1	Alto	7.266	5.395	26%	74%
		Bajo	6.267	5.395	14%	86%
	C5E3	Alto	6.716	3.950	41%	59%
		Bajo	5.753	3.950	31%	69%
	C5E2	Alto	7.189	4.953	31%	69%
		Bajo	6.762	4.953	27%	73%
	C8E2	Alto	7.049	5.746	18%	82%
		Bajo	6.014	5.746	4%	96%
Promedio			6.627	5.011	24%	76%

*: Temporada agrícola considerada fue Julio a Junio.

En las Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 20 y Figura 21 se detalla el comportamiento de los aportes y los déficit para los distintos sectores, considerando zonas de distinto nivel de desarrollo para la variedad Arbequina en cada sector analizado.

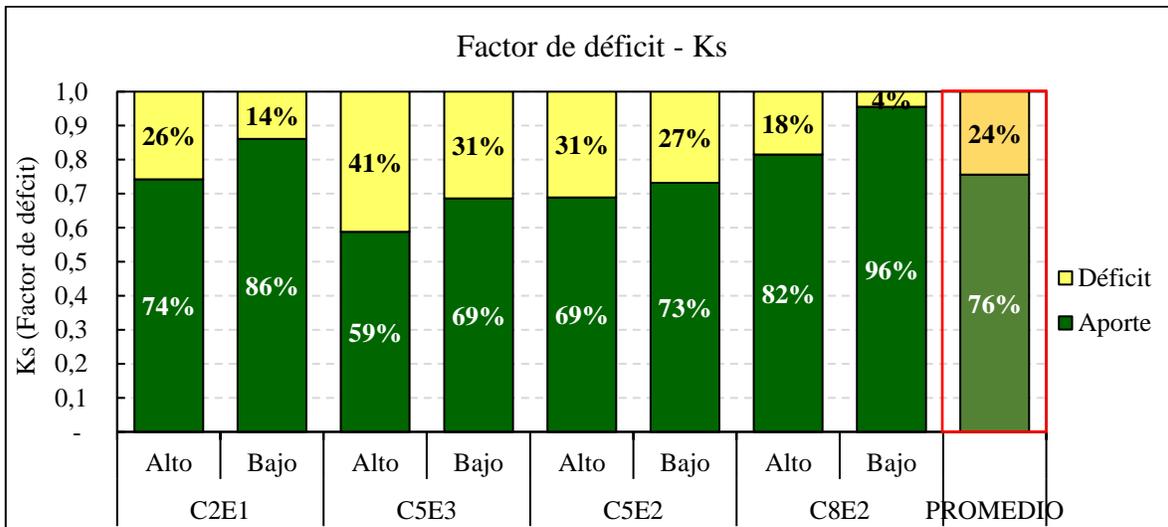


Figura 17. Comportamiento de aportes y déficit según vigor, sector C2E1 var. Arbequina (Olivos Olimpo, Ovalle).

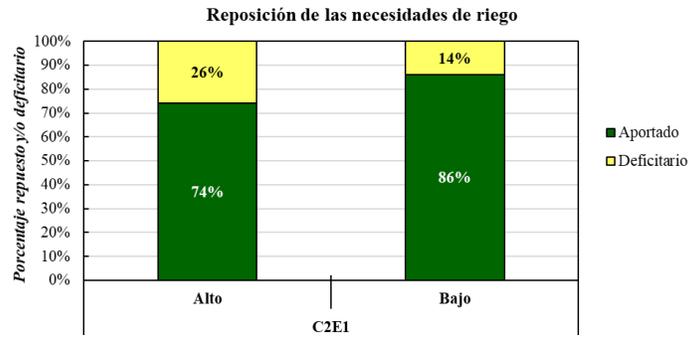


Figura 18. Comportamiento de aportes y déficit según vigor sector C2E1 var. Arbequina (Olivos Olimpo, Ovalle).

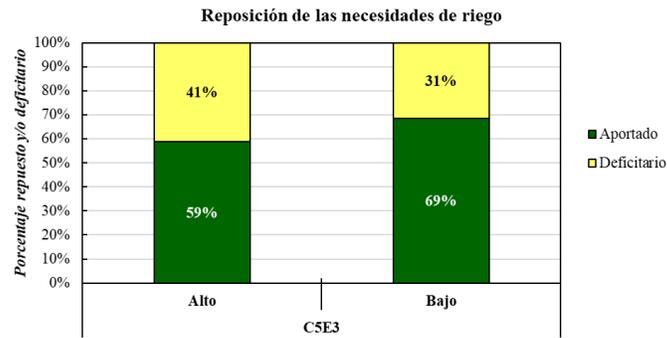


Figura 19. Comportamiento de aportes y déficit según vigor sector C5E3 var. Arbequina (Olivos Olimpo, Ovalle).

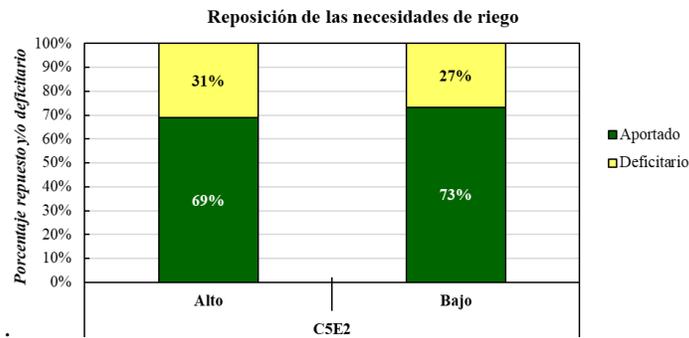


Figura 20. Comportamiento de aportes y déficit según vigor en sector C5E2 var. Arbequina Olivos Olimpo, Ovalle).

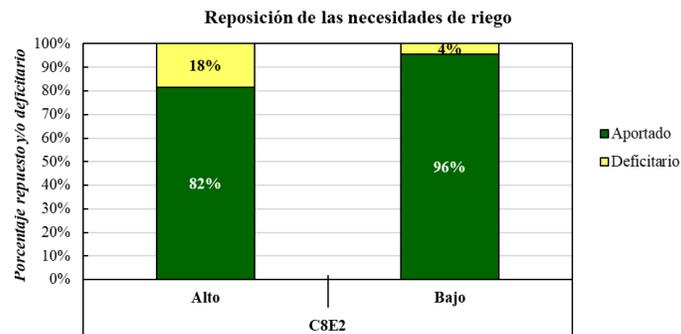
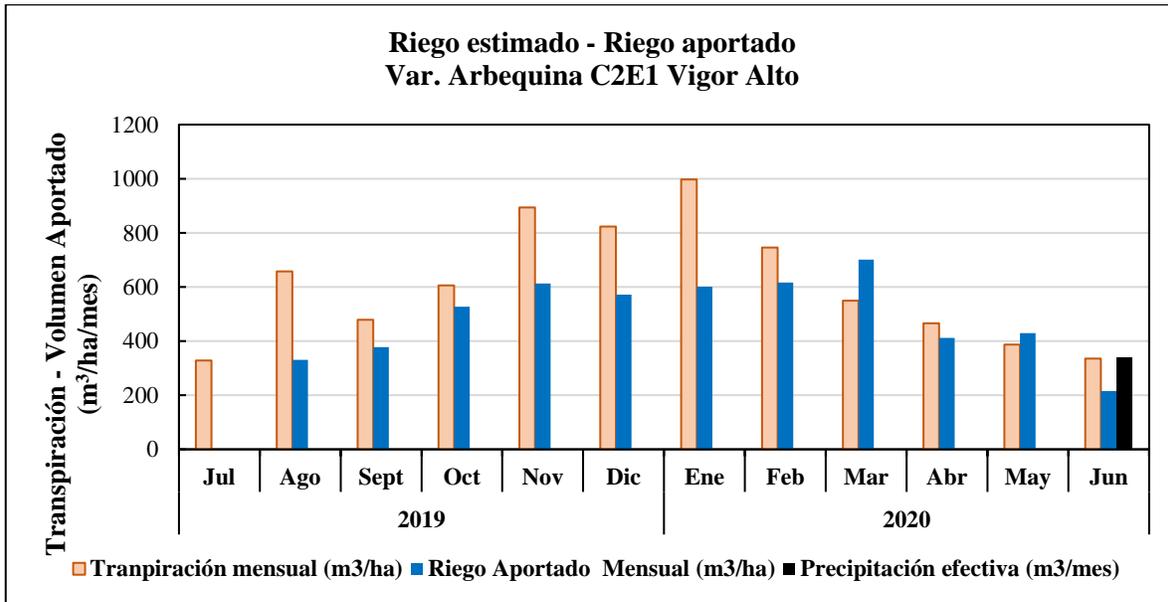


Figura 21. Comportamiento de aportes y déficit según vigor en sector C8E2 var. Arbequina. Olivos Olimpo, Ovalle.



Como se puede observar en todos los sectores analizados, el volumen de riego aportado fue menor al estimado mediante el uso del coeficiente de cultivo modelado para la mayoría de los niveles de desarrollo presentes en los sectores, a excepción del Sector C8E2 con bajo desarrollo, en el cual se suple el 96% de las necesidades de riego. Debido a que todo el sector recibe el mismo volumen de riego, se presentan valores de déficit hídrico variable y más acrecentado a aquellas zonas donde los olivos presentan mayor vigor, dándose este fenómeno en todos los sectores. De este modo, donde es más evidente esta variabilidad es en el Sector C8E2 en donde, de acuerdo a los registros de campo, se aprecia que en las zonas de alto vigor se aportó un 82% de las necesidades de riego modeladas, lo cual representó un déficit de 18%, mientras que en las zonas con bajo vigor se aportó un 96% de las necesidades, por ende, presentando un déficit de 4%. Para el caso del Sector C5E2, la variabilidad es menor, donde las zonas de alto vigor presentan un aporte hídrico del 69% para var. Arbequina, lo que representa un déficit hídrico de 31% en el sector, mientras que las zonas de bajo vigor cuentan con un aporte hídrico del 73%, con su respectivo déficit de 27%.

Para analizar mensualmente las condiciones del aporte de riego en los sectores analizados y estimar la magnitud del déficit de riego por época del año, a continuación, se gráfica el volumen de riego aportado mensualmente durante la temporada 2019/20 junto a las necesidades estimadas de acuerdo a la metodología descrita para zonas con niveles de vigor alto y bajo de los sectores (Figura 22, Figura 23, Figura 24 y Figura 25).



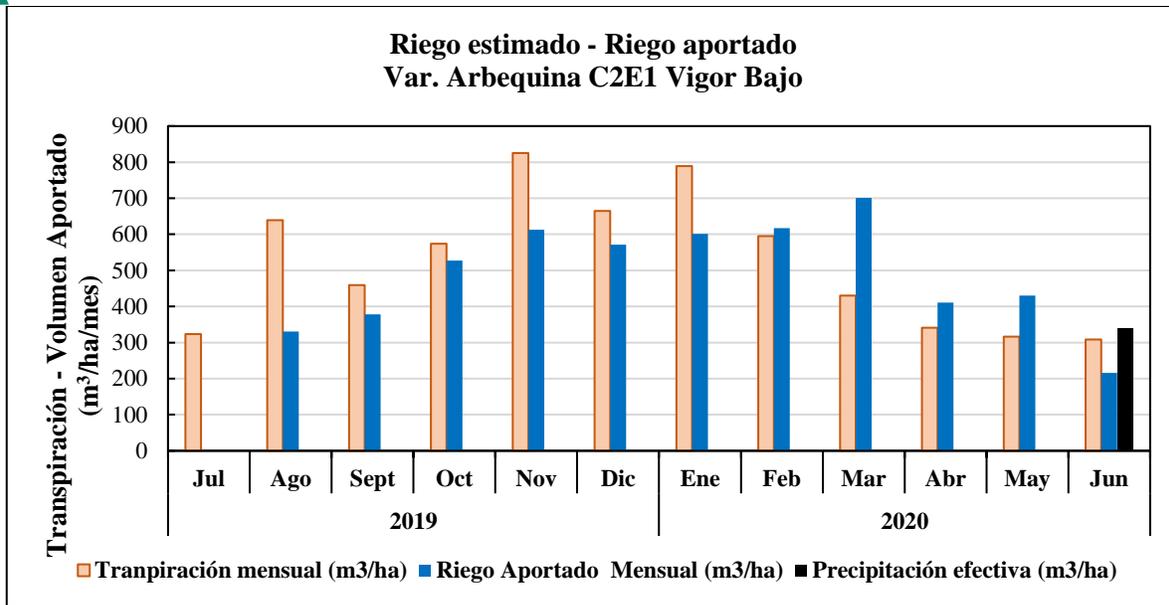
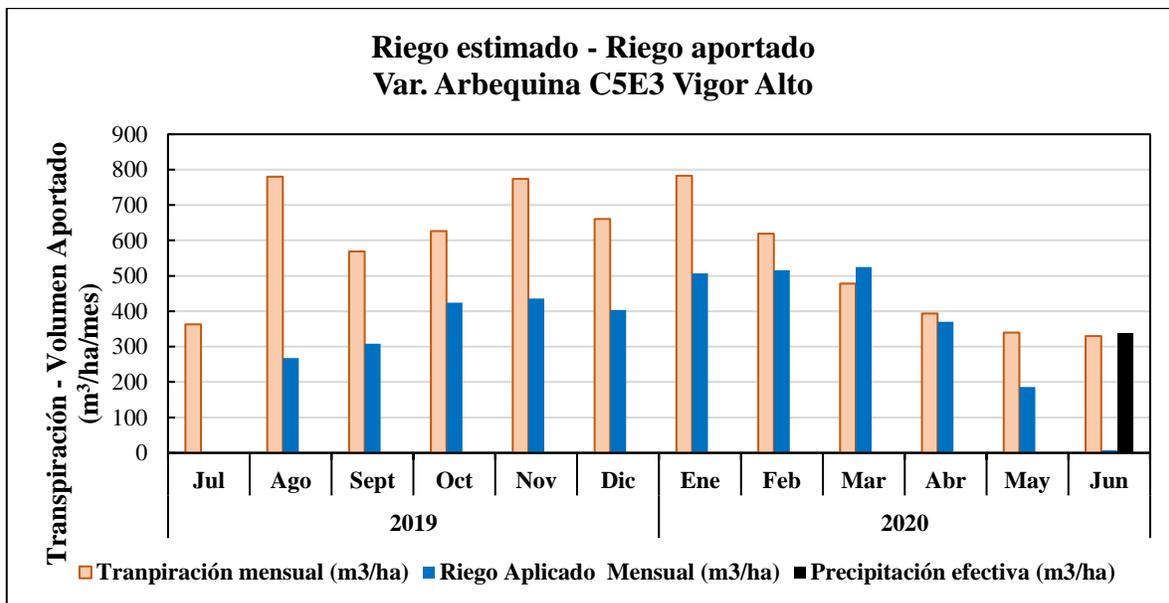


Figura 22. Comparación entre el volumen mensual de riego aportado y el volumen estimado para el Sector C2E1, var. Arbequina vigor alto y bajo (Olivos Olimpo, Ovalle).



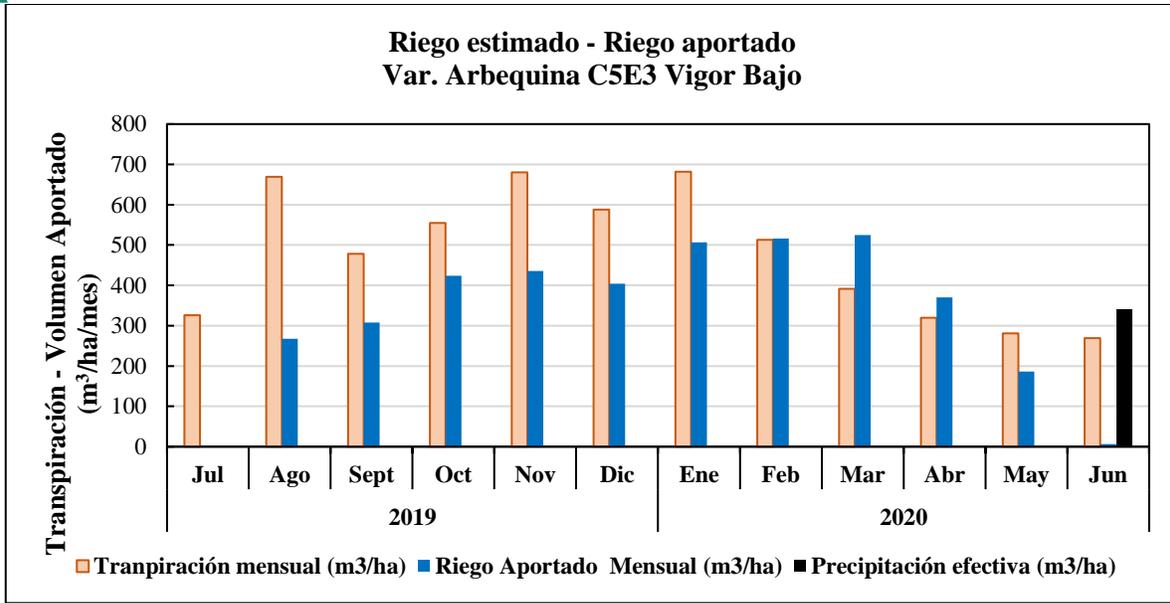
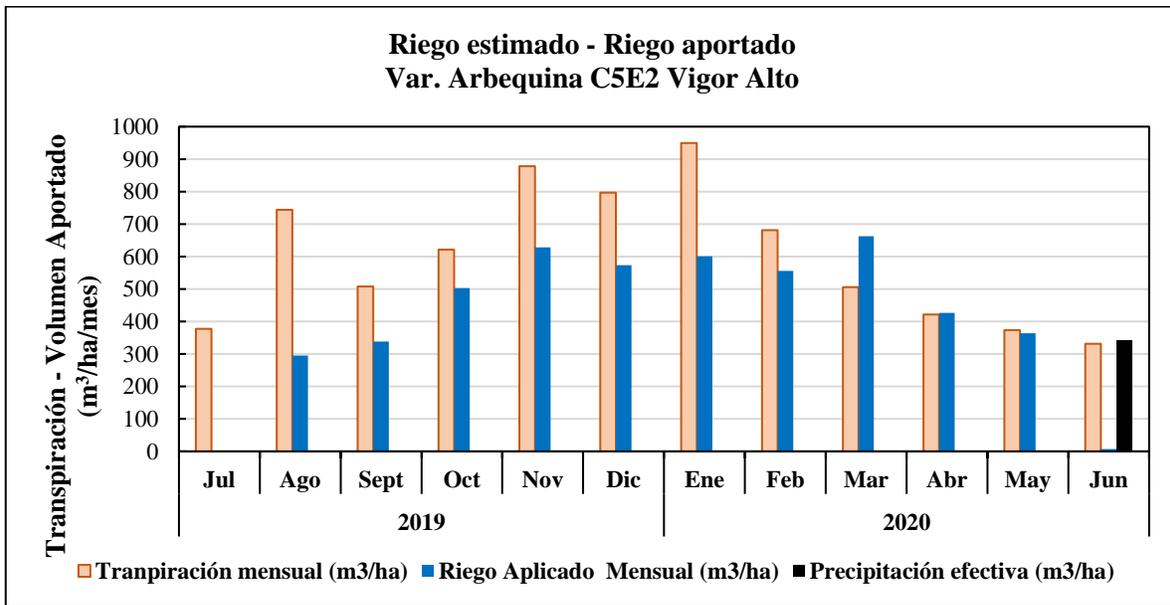


Figura 23. Comparación entre el volumen mensual de riego aportado y el volumen estimado para el Sector C5E3, var. Arbequina vigor alto y bajo (Olivos Olimpo, Ovale).



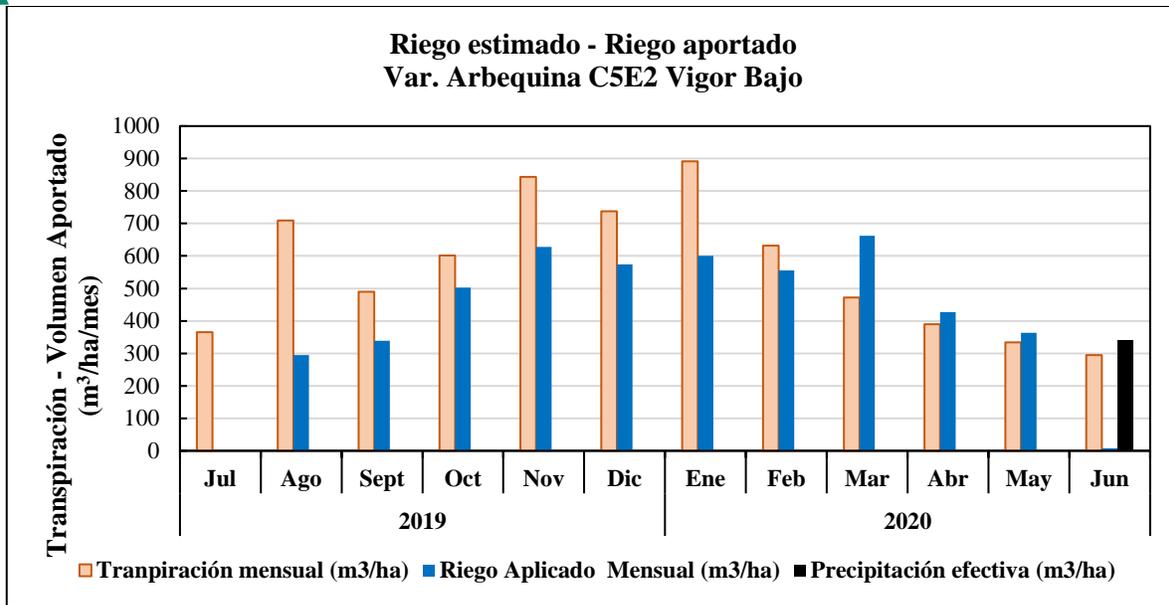
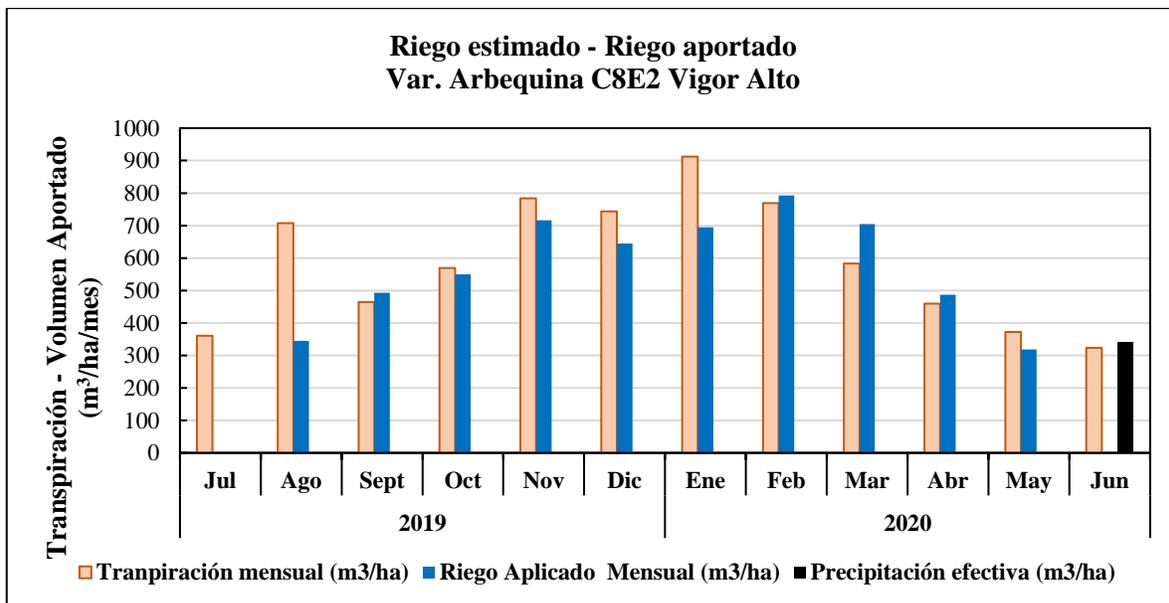


Figura 24. Comparación entre el volumen mensual de riego aportado y el volumen estimado para el Sector C5E2, var. Arbequina vigor alto y bajo (Olivos Olimpo, Ovale).



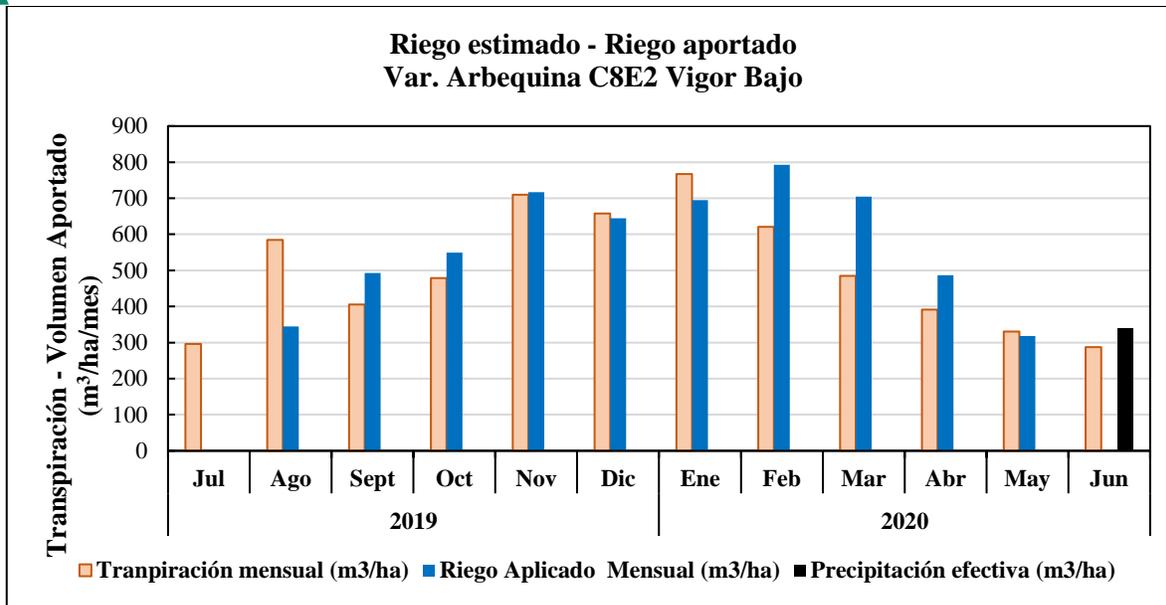


Figura 25. Comparación entre el volumen mensual de riego aportado y el volumen estimado para el Sector C8E2, var. Arbequina vigor alto y bajo (Olivos Olimpo, Ovale).

Considerando la acumulación mensual de necesidades hídricas a reponer y el volumen de riego realmente aportado, se observó que existen diferencias deficitarias entre la tasa de transpiración estimada y el riego aportado durante todos los meses de la temporada analizada.

Con objeto de cuantificar las diferencias entre el riego aportado y las necesidades de riego estimadas y los aportes de las lluvias, se calculó un factor de déficit (K_s) de acuerdo a la siguiente relación:

$$K_s = 1 - \frac{\text{riego aplicado} + \text{lluvia}}{\text{riego estimado por satelite}}$$

de este modo los valores de K_s cercanos a 100 indican que se suplieron las necesidades de transpiración, ya sea por riego y/o lluvia y el déficit hídrico es mínimo. Por el contrario, cuando el valor de K_s es cercano a 0 indica que las necesidades de transpiración no fueron repuestas con el aporte de riego y/o precipitaciones y el déficit hídrico fue máximo.

Como se puede apreciar en la Figura 26 para el Sector C2E1 de alto desarrollo para la variedad Arbequina, durante la mayor parte de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit hídrico no superior al 31%, exceptuando los meses de marzo, mayo y junio 2020. Durante estos meses fueron los momentos de la temporada en donde el cultivo dispuso de la totalidad de las necesidades hídricas y no tuvo valores deficitarios, en el caso del mes de junio producto del excedente hídrico aportado por precipitación. Por el contrario, los meses de julio y agosto presentan los menores balances hídricos, con déficit de 50 a 100%.

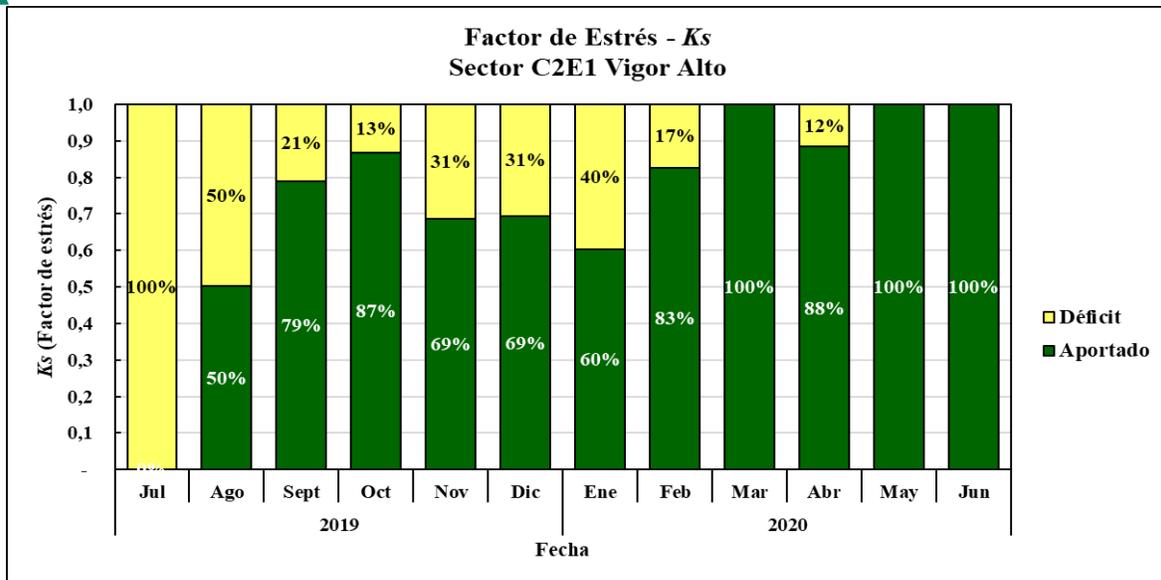


Figura 26. Factor de déficit (K_s) estimado en sector C2E1 var. Arbequina alto vigor durante la temporada 2019/20. Olivos Olimpo. Localidad Ovalle.

Al tomar en cuenta los niveles de aporte y déficit para la zona de bajo vigor del Sector C2E1, el déficit a lo largo de la temporada no supera el 26% en general, a excepción de los meses de julio y agosto con los menores balances hídricos de la temporada, con déficit del 50 a 100%, el resto de la temporada se suplen las necesidades en un 74 a 100% de la zona de bajo vigor del sector (Figura 27).

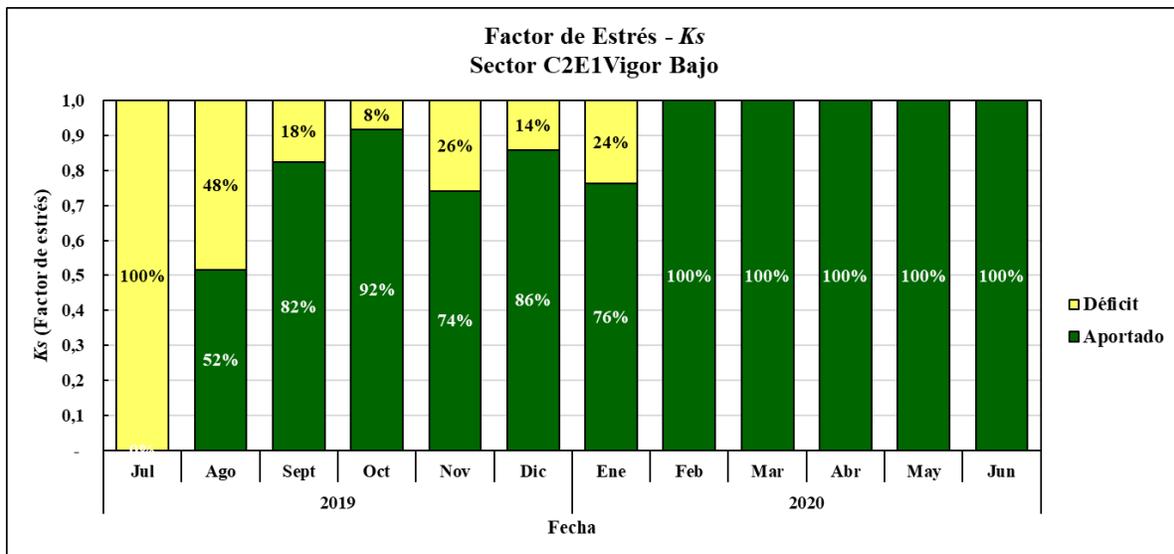


Figura 27. Factor de déficit (K_s) estimado en sector C2E1 var. Arbequina de bajo desarrollo durante la temporada 2019/20. Olivos Olimpo. Localidad Ovalle.

Ahora analizando las zonas de alto (Figura 28) y bajo desarrollo (Figura 29) en el Sector C5E3, se aprecia que durante la mitad de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit mayor al 39%, exceptuando los meses desde marzo a junio 2020, meses donde el cultivo dispuso de la mayoría o la totalidad de las necesidades hídricas y no presentó valores deficitarios. Por el contrario, los meses de julio y agosto presentan los menores balances hídricos, con déficit de 66% al 100%.

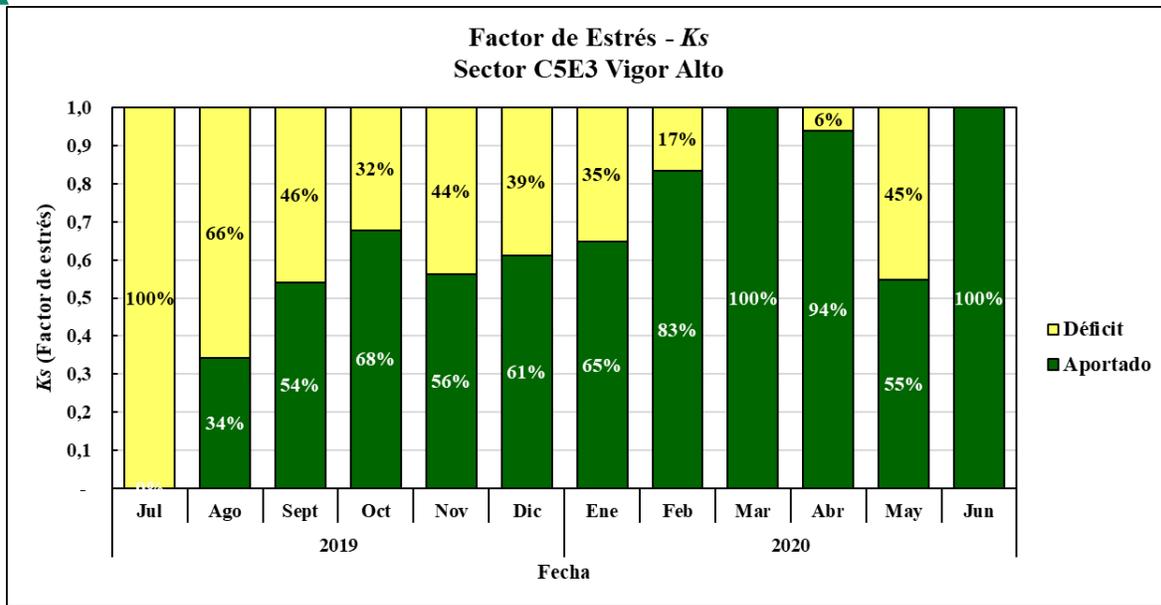


Figura 28. Factor de déficit (K_s) estimado en sector C5E3 var. Arbequina de alto desarrollo durante la temporada 2019/20 (Olivos Olimpo, Ovalle).

Los niveles de aporte para la zona de bajo vigor del Sector C5E3 se manifiestan dentro del rango de 40% a 76%, exceptuando meses de febrero a abril, y a junio 2020 con aporte hídrico del 100%. El déficit a lo largo de la temporada de riego supera el 31% y alcanza valores de 100%, correspondiente al mes de julio, con el menor balance hídrico de la temporada.

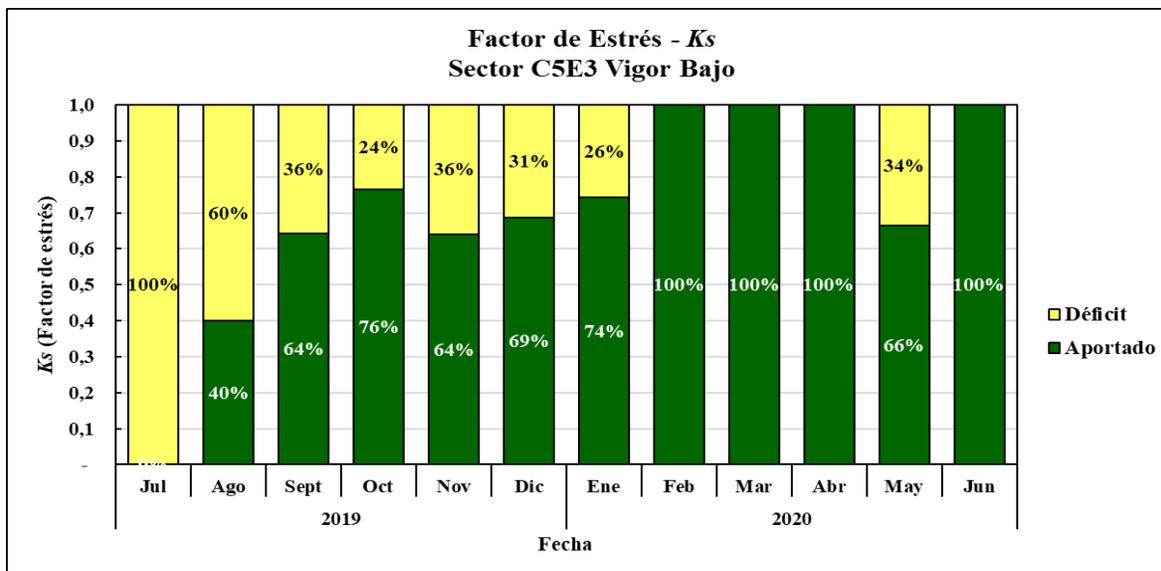


Figura 29. Factor de déficit (K_s) estimado en sector C5E3 var. Arbequina de bajo desarrollo durante la temporada 2019/20 (Olivos Olimpo, Ovalle).

Analizando el Sector C5E2 en su comportamiento de zonas de alto vigor (Figura 30) y bajo vigor (Figura 31), durante la mitad de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit hídrico mayor al 19%, exceptuando los meses de marzo a junio 2020. Durante estos meses el cultivo dispuso de la mayoría o la totalidad de las necesidades hídricas y no presentó valores deficitarios, en el caso del

mes de junio 2020 producto del excedente hídrico aportado por precipitación. Por el contrario, los meses de julio y agosto presentan los menores balances hídricos, con déficit de 60 al 100%.

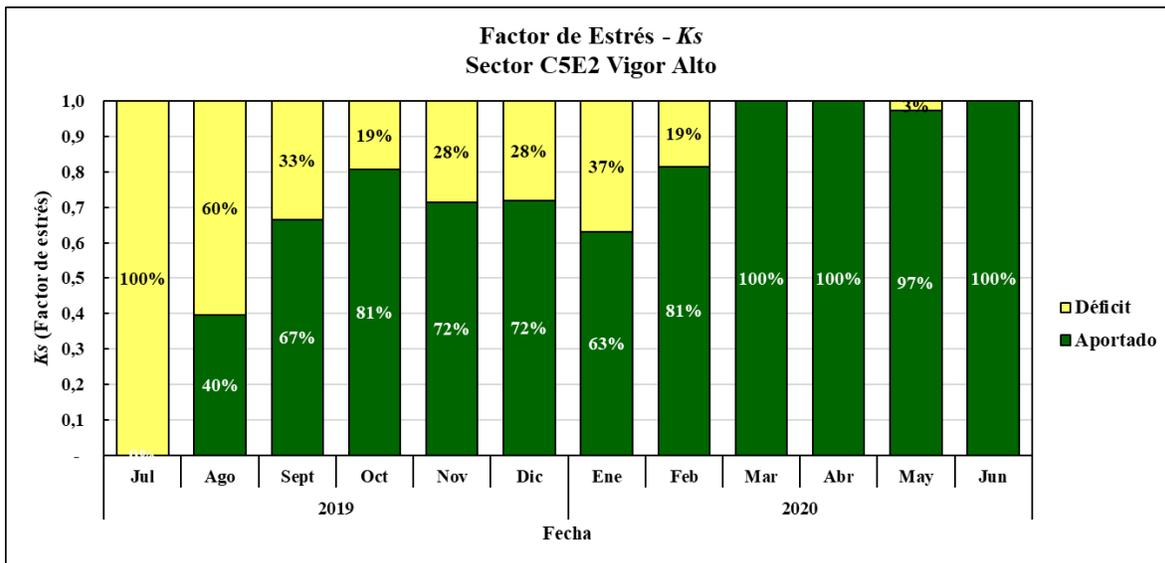


Figura 30. Factor de déficit (K_s) estimado en sector C5E2 var. Arbequina de alto desarrollo durante la temporada 2019/20 (Olivos Olimpo, Ovalle).

Para la zona de bajo vigor del Sector C5E2 los niveles de aporte se manifiestan dentro del rango de 12% a 58%, exceptuando mes marzo a junio 2020 con aporte hídrico del 100%. El déficit a lo largo de la temporada de riego supera el 26% y alcanza valores de 100% para el mes de julio con el menor balance hídrico de la temporada.

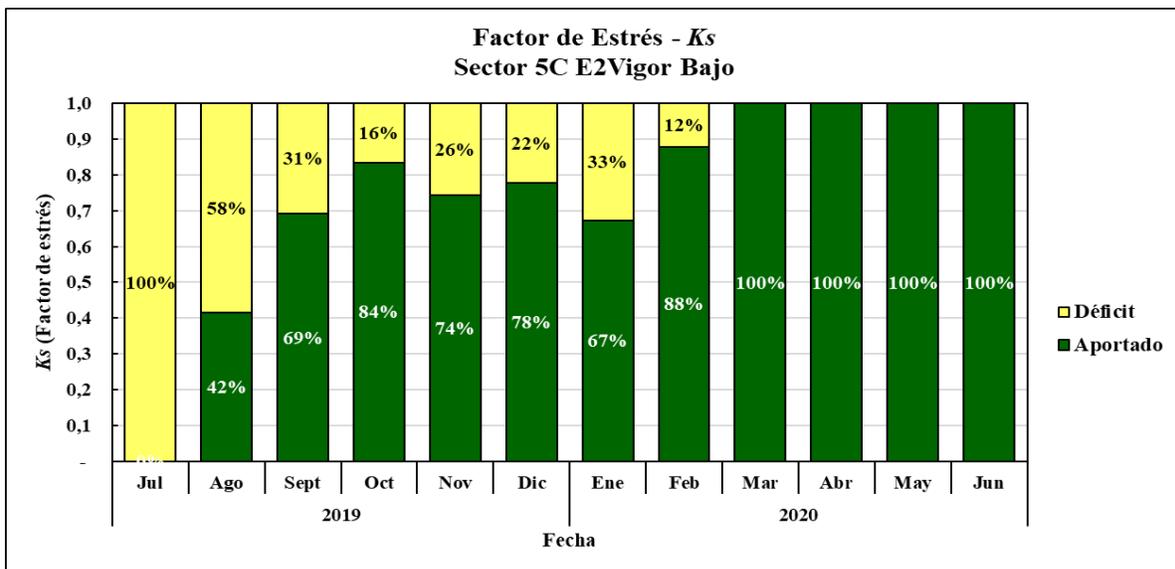


Figura 31. Factor de déficit (K_s) estimado en sector C5E2 var. Arbequina de bajo desarrollo durante la temporada 2019/20 (Olivos Olimpo, Ovalle).

Por último, se analiza el comportamiento de zonas de alto vigor (Figura 32) y bajo vigor (Figura 33) para el Sector C8E2, durante menos de la mitad de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit hídrico entre el 4% al 24%, exceptuando los meses de septiembre 2019, y desde febrero a junio

2020. Durante estos meses el cultivo dispuso de la mayoría o la totalidad de las necesidades hídricas y no presentó valores deficitarios. Por el contrario, los meses de julio y agosto presentan los menores balances hídricos, con déficit de 51% al 100%.

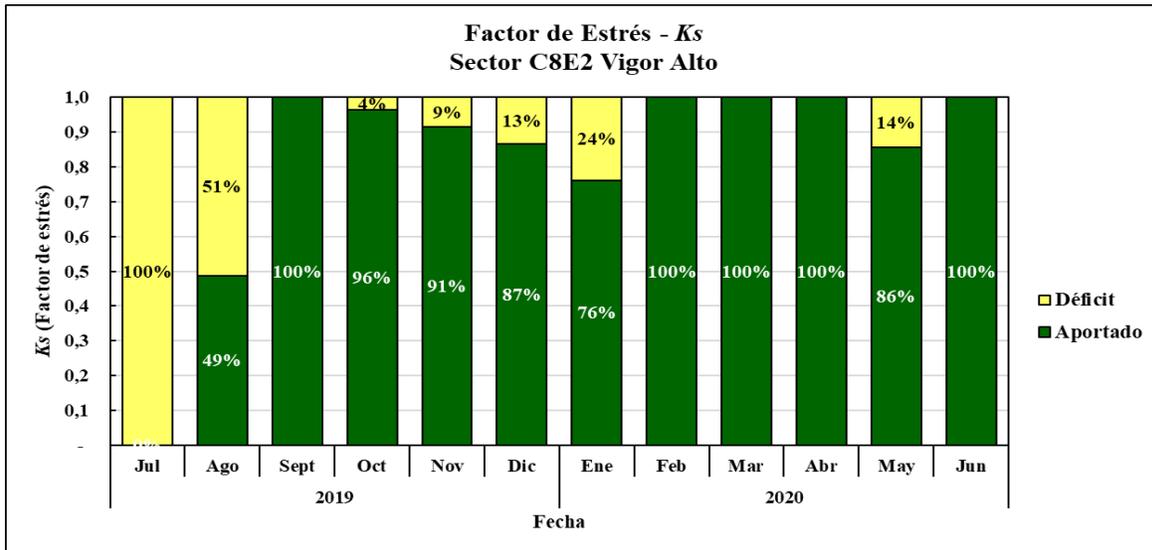


Figura 32. Factor de déficit (K_s) estimado en sector C8E2 var. Arbequina de alto desarrollo durante la temporada 2019/20 (Olivos Olimpo, Ovalle).

Los niveles de aporte para la zona de bajo vigor del Sector C8E2 se manifiestan dentro del rango de 91% a 98% durante la mayor parte de la temporada, con aporte hídrico del 100% para los meses de septiembre a noviembre, febrero a abril y junio de 2020. El déficit a lo largo de la temporada de riego supera el 40% solo durante el inicio, y alcanza valores de 100% para el mes de julio con el menor balance hídrico de la temporada.

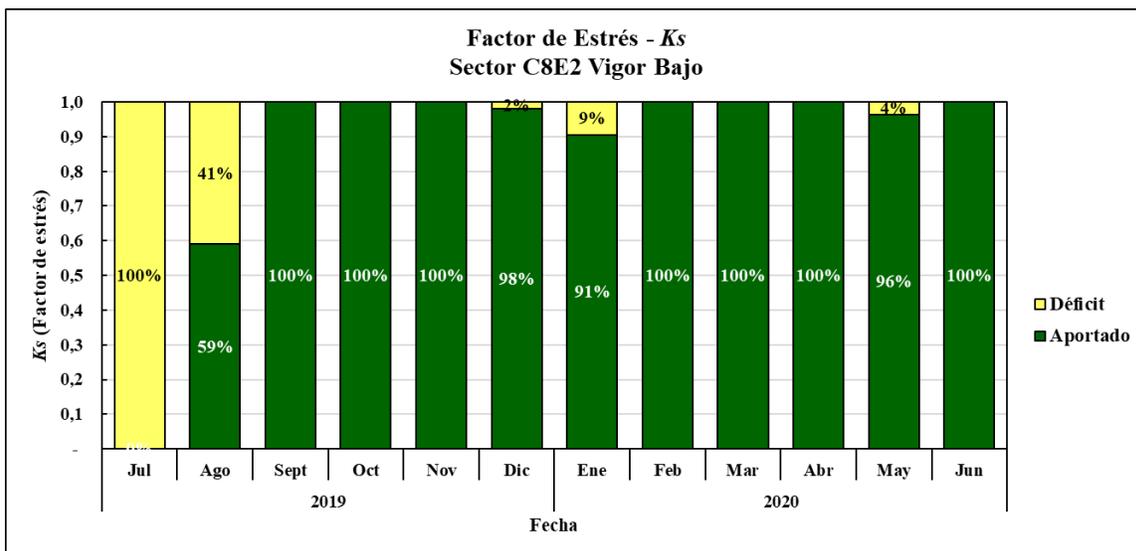


Figura 33. Factor de déficit (K_s) estimado en sector C8E2 var. Arbequina de bajo desarrollo durante la temporada 2019/20 (Olivos Olimpo, Ovalle)..

Distribución espacial de la Transpiración

Al analizar el comportamiento de la transpiración acumulada durante la temporada completa en los sectores monitoreados, se pudo estimar que el valor promedio de transpiración para el Sector C2E1 fue de 635 mm/año, con un valor máximo de 776 mm/año y mínimo de 443 mm/año.

A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 33%, 3,96 ha) se concentra en el rango de 650 mm a 700 mm al año, seguido del rango de 600 a 650 mm de transpiración anual en un 32% de la superficie (3,84 ha). En la Figura 34 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

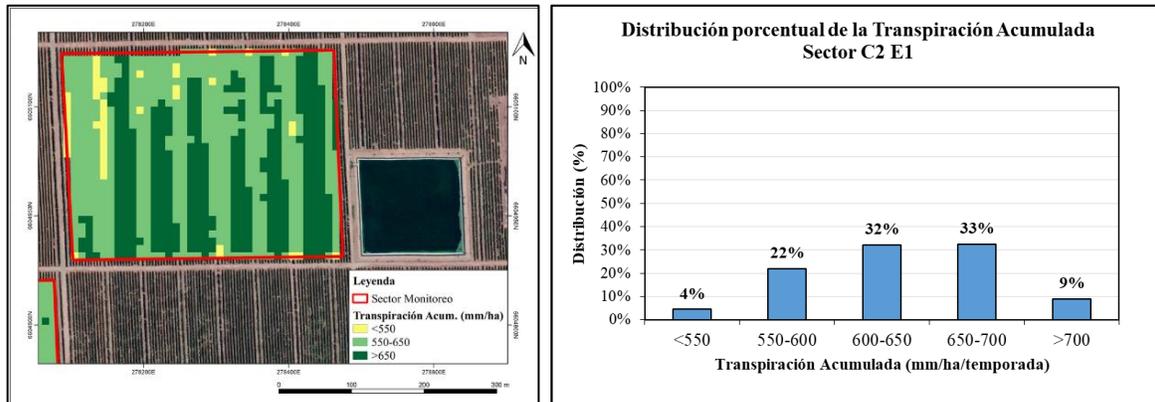


Figura 34. Distribución de los rangos de transpiración acumulada para el Sector C2E1 (Olivos Olimpo, Ovalle).

Para el caso del Sector C5E3 se pudo estimar que el valor promedio de transpiración de 602 mm/año, con un valor máximo de 756 mm/año y mínimo de 456 mm/año. A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 40%, 4,92 ha) se concentra en el rango de 600 mm a 650 mm al año, seguido del rango de 550 - 600 mm de transpiración anual en un 27% de la superficie (3,3 ha). En la Figura 34 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

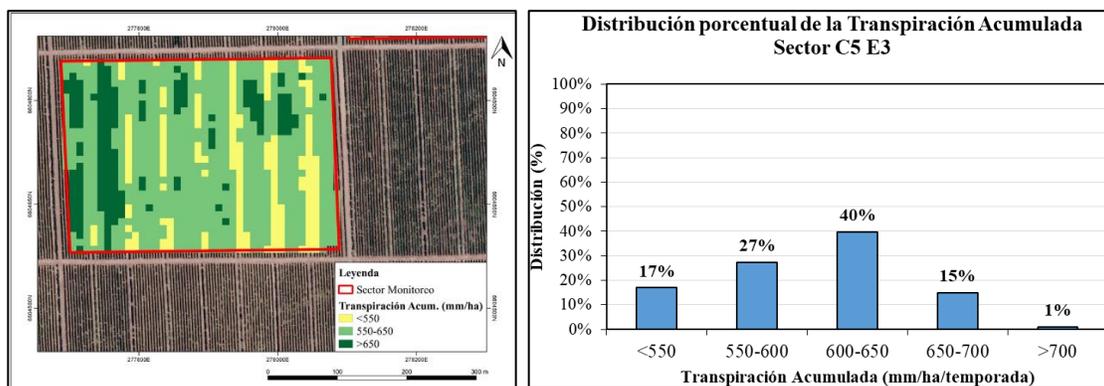


Figura 35. Distribución de los rangos de transpiración acumulada para el Sector C5E3 (Olivos Olimpo, Ovalle).

En el Sector C5E2 se pudo estimar un valor promedio de transpiración de 653 mm/año, con un valor máximo de 767 mm/año y mínimo de 500 mm/año. A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 32%, 4,2 ha) se concentra en el rango de 650 mm a 700 mm al año, seguido de los rangos de 600 mm a 650

mm de transpiración anual en un 24% de la superficie (3,16 ha), al igual que el rango de más de 700 mm de transpiración anual, al cual le corresponde el mismo porcentaje (24%, 3,16 ha). En la Figura 36 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

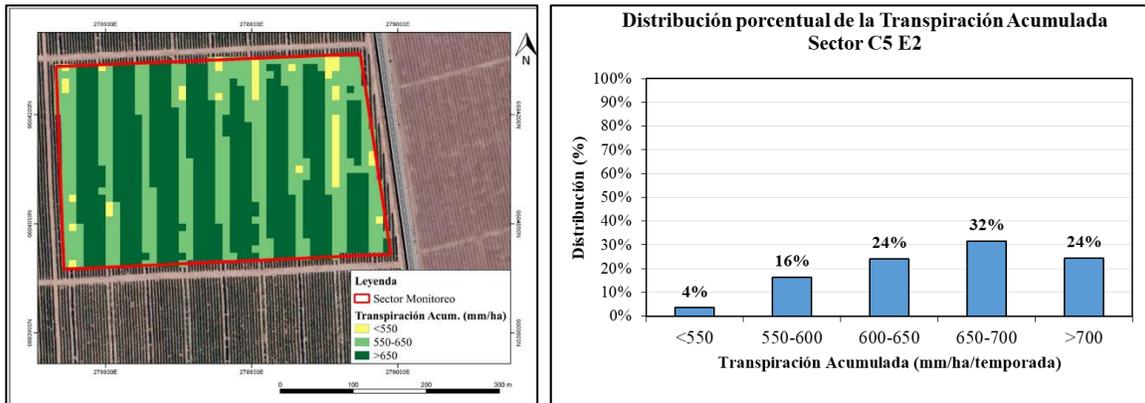


Figura 36. Distribución de los rangos de transpiración acumulada para el Sector C5E2, Olivos Olimpo, Ovalle.

Por último, para el Sector C8E2 se pudo estimar que el valor promedio de transpiración es de 628 mm/año, con un valor máximo de 743 mm/año y mínimo de 450 mm/año. A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 34%, 4,04 ha) se concentra en el rango de 600 mm a 650 mm al año, seguido del rango de 650 a 700 mm de transpiración anual en un 33% de la superficie (3,92 ha). En la Figura 37 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

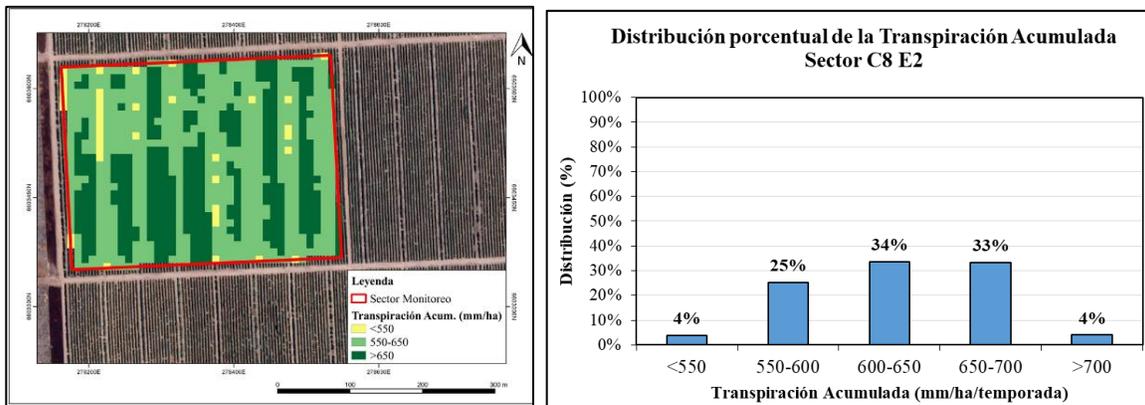


Figura 37. Distribución de los rangos de transpiración acumulada para el Sector C8E2, Olivos Olimpo, Ovalle.



Literatura citada

Agrimed, 2017. Atlas Agroclimático de Chile, estado actual y tendencias del clima. Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED). Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Chile.

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 - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manage.* 98, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011>.

Bausch, W.C., 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46, 213–222. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90096-G](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90096-G).

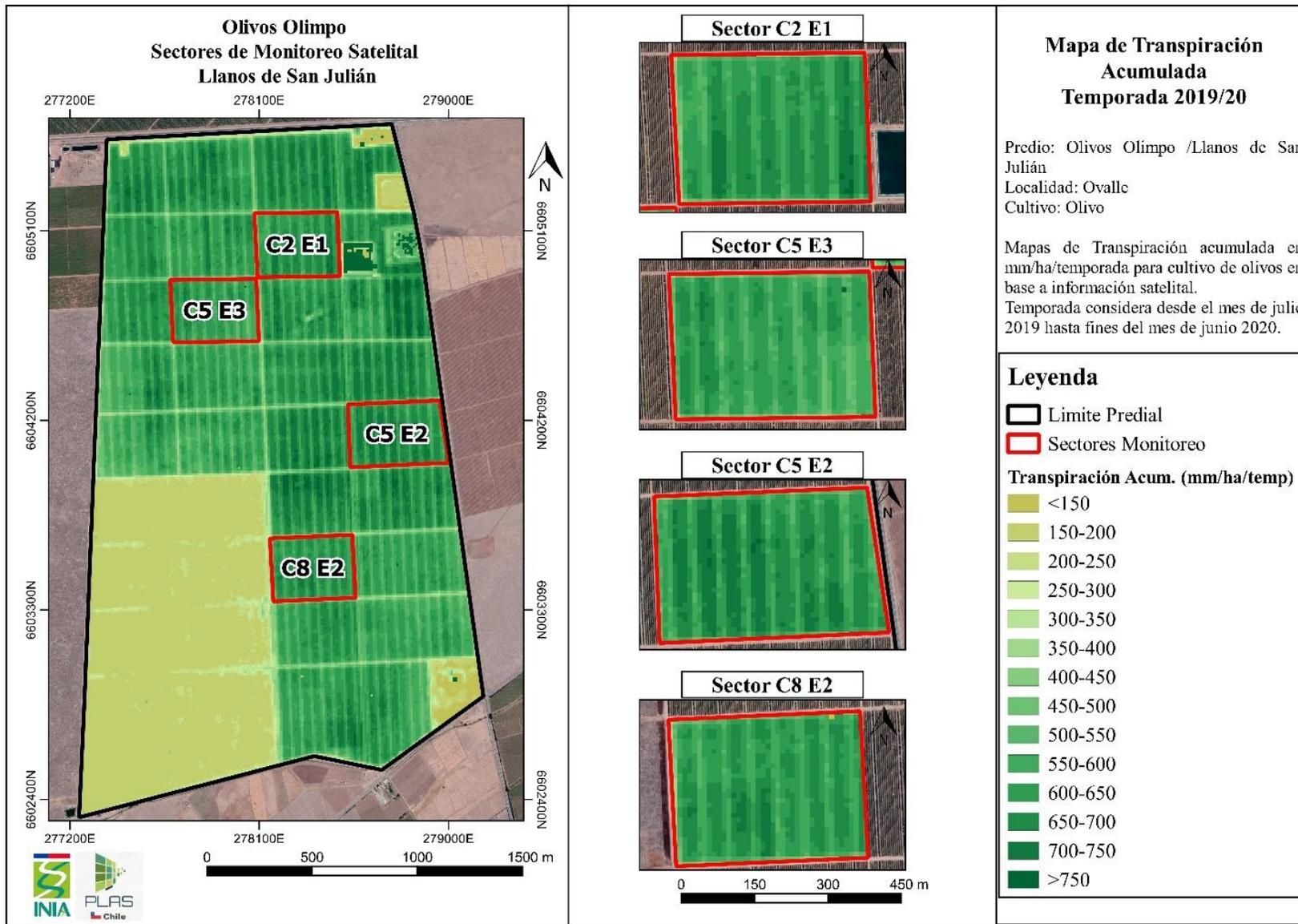
Bausch, W.C., 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manage.* 27, 55–68. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01125-3](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01125-3).

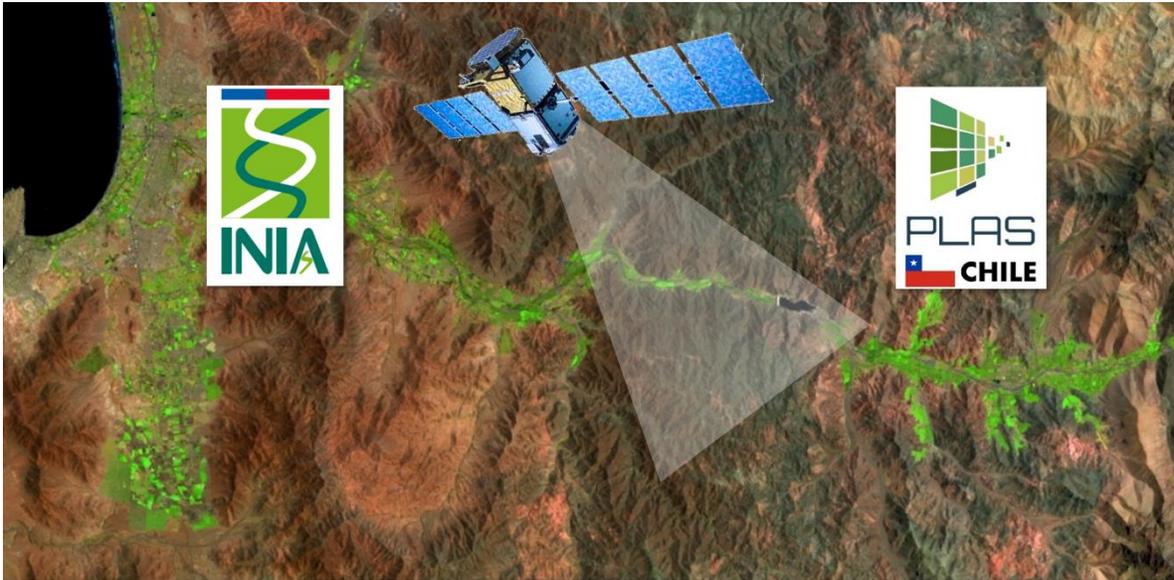
Bausch, W.C., Neale, C.M.U., 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Trans. ASAE* 30, 703–709. <https://doi.org/10.13031/2013.30463>.

Heilman et al., 1982 Heilman, J.L., Heilman, W.E., Moore, D.G., 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agron. J.* 74, 967–971. <https://doi.org/10.2134/agronj1982>.

Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heermann, D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. ASAE* 32, 1891–1899.

Mapa de Transpiración Temporada 2019/20. Sectores Llanos de San Julián, Olivos Olimpo (Ovalle).





Informe Consultoría en Riego

INIA

Productor: Pino Azul S.A.

Autores

Equipo Proyecto PLAS - INIA Intihuasi

Jefe de proyecto - Claudio Balbontín Nesvara

Profesional de Apoyo - Rodolfo Poblete Toro

Informe Consultoría Manejo del Riego

Pino Azul S.A

Introducción

Con objeto de implementar un trabajo colaborativo entre el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA y la Asociación de Productores de Aceite Oliva ChileOliva, se implementó un trabajo de consultoría en la cual se analizaron las metodologías para la definición de las necesidades de riego del cultivo y aspectos asociados al manejo agronómico del cultivo de olivos.

El principal objetivo de la consultoría es transferir un marco conceptual estandarizado para la definición de las necesidades de riego, junto a la capacitación en el uso de nuevas tecnologías para el monitoreo del cultivo y de los factores ambientales que influyen en el consumo hídrico y por tanto en la programación del riego.

En este trabajo se elaboró un análisis comparativo entre los criterios utilizados actualmente por el productor para definir los volúmenes de riego aportados al cultivo (manejo tradicional del riego) y las necesidades de riego estimadas a partir del marco conceptual propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998), con la innovación tecnológica del uso del índice de vegetación satelital NDVI para estimar un Coeficiente de Cultivo y el uso de información de la demanda ambiental del sitio para estimar la tasa de transpiración máxima del cultivo.

De este modo, en el siguiente informe se analiza el desarrollo del cultivo utilizando información del índice de vegetación satelital NDVI, factores ambientales que influyen en el consumo hídrico del cultivo, las metodologías para la definición de las necesidades de riego en el campo y asistido con información satelital y la variabilidad espacial de la tasa de transpiración del cultivo dentro de los sectores analizados.



Sitio de análisis

Los trabajos fueron realizados en el Fundo El Encanto, ubicado en la localidad de Rengo, Región de O'Higgins. En la Figura 1 se indica la ubicación geográfica del campo, así como el sector analizado.



Predio: El Encanto (Lat. 34°26'22,0"S;
70°49'22,6"O)

Localidad: Rengo

Comuna: Rengo

Provincia: Cachapoal

Región: O'Higgins

Chile

Figura 1. Ubicación del predio y sitio de análisis (El Encanto, Rengo).

El sector analizado corresponde a un cuartel de la variedad Arbequina conocido como sector El Perro. En el Cuadro 1 se señala un resumen de las características del sector en análisis.

Cuadro 1. Cuartel, superficie, variedad, año de plantación y marcos de plantación del sitio bajo análisis.

Cuartel	Superficie (ha-SIG)	Variedad	Año de Plantación	Marco de plantación (m)	Plantas/ha
El Perro	1,5	Arbequina	2016	6,0 x 4,0	416

Características climáticas zona de estudio

La zona de Rengo se encuentra en el distrito agroclimático Rancagua (Figura 2), el cual presenta un clima templado cálido supratermal con régimen de humedad semi-árido. La temperatura varía entre máximos en enero de 29,7 °C (máxima 31,3 °C y mínima 27,6 °C dentro del distrito) y temperaturas mínimas en julio de 3,9 °C (máxima 4,4 °C y mínima 3,2 °C dentro del distrito). En promedio el distrito tiene 234 días libres de heladas con un promedio de 15 heladas al año. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa se prolonga por 9 meses. Anualmente se registran 1.777 días grado (DG, Base 10) y 714 horas de frío (acumuladas hasta el 31 de julio). La media anual de las precipitaciones es 407 mm/año. El período seco tiene una duración de 8 meses, con un déficit hídrico de 764 mm/año. El período húmedo dura 2 meses, durante los cuales se produce un excedente hídrico de 62 mm (Agrimed, 2017).

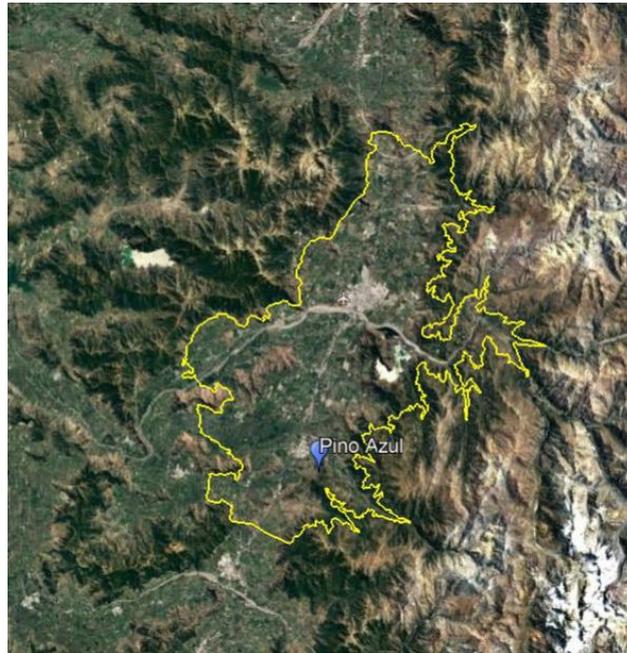


Figura 2. Distrito agroclimático Rancagua (Agrimed, 2017).

Para analizar el comportamiento de las condiciones meteorológicas locales y actuales, se utilizó la información registrada desde el año 2015 al 2020 por la estación agroclimática El Tambo INIA, perteneciente a la Red Agroclimática Nacional de MINAGRI (www.agrometeorologia.cl) y ubicada en la localidad de Rengo. A partir de estos datos se pudo observar que la temperatura máxima del aire se situaron en torno a los 34 °C (con peak de 37°C en enero de 2020) y temperaturas mínimas en torno a 1,4 °C en los meses de invierno, con eventos extremos de -2,5°C en julio de 2018 (Figura 3).

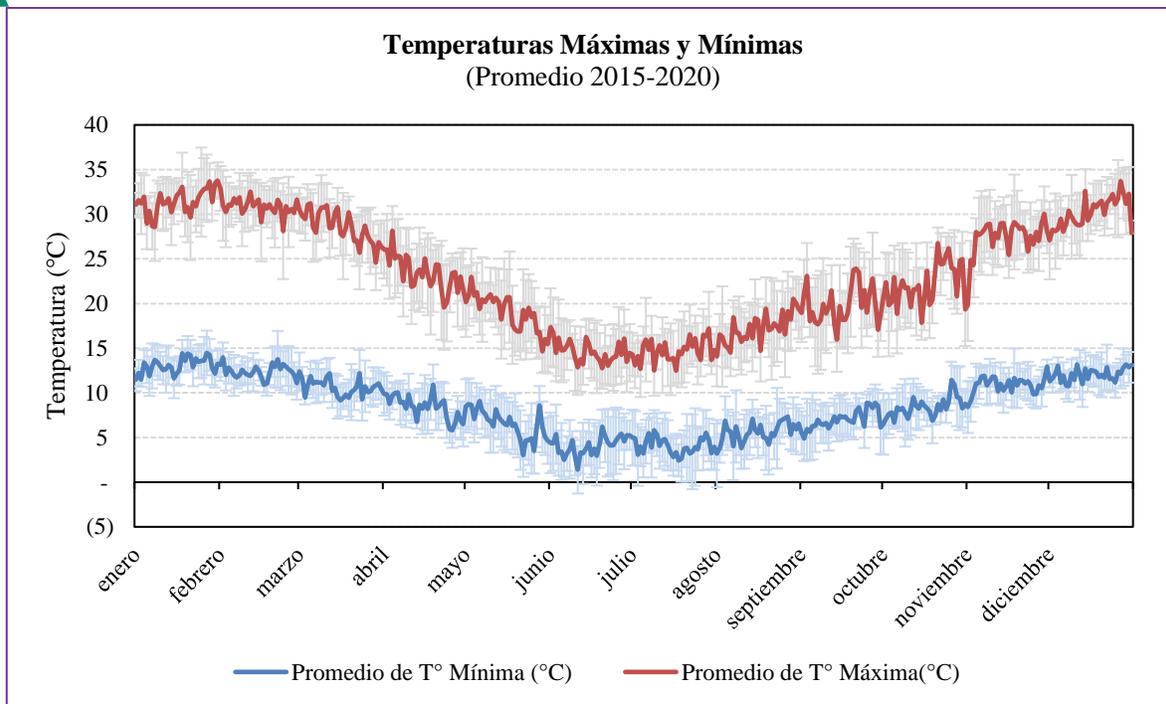


Figura 3. Comportamiento anual de temperaturas máximas y mínimas. Estación agrometeorológica El Tambo INIA (www.agrometeorologia.cl).

En el mismo período de tiempo (últimos cinco años) el monto anual de las precipitaciones alcanzó 516 mm para la temporada 2015/16, 409 mm en 2016/17, 360 mm en 2017/18, 302 mm en 2018/19 y 295 mm en lo que va de la temporada 2019/20 (Figura 4), lo cual da un promedio de 386 mm al año.

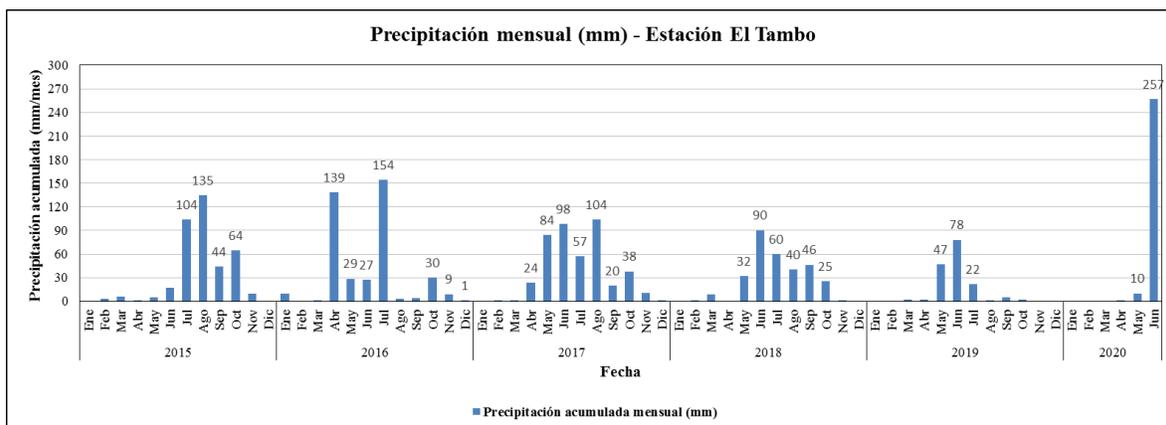


Figura 4. Precipitaciones mensuales periodo 2015-2020. Estación agrometeorológica El Tambo INIA (www.agrometeorologia.cl).

La tendencia de los montos anuales de las lluvias durante los cinco últimos años evidencia una disminución de los montos anuales y la tendencia a la disminución de las reservas de agua en el suelo (Figura 5)

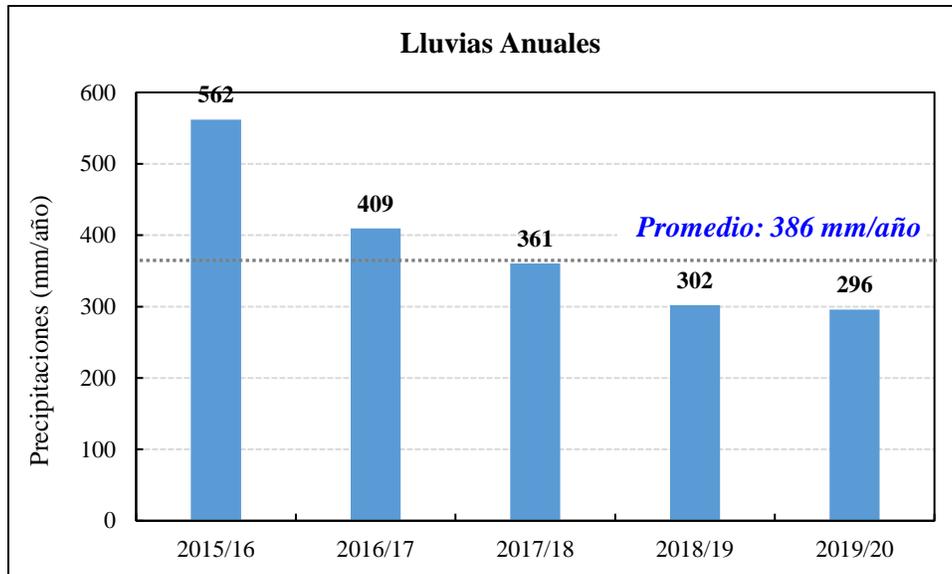


Figura 5. Precipitaciones anuales durante el período 2015 al 2020 registradas en la Estación Agrometeorológica El Tambo. (www.agrometeorología.cl).

En cuanto a la distribución anual de la demanda ambiental representada por la variable evapotranspiración de referencia (ET_o), esta alcanza 1.171 mm/año y máximos promedio de 6,7 mm/día durante el verano (diciembre-enero) y mínimos en torno a 1,0 mm/día, durante los meses invernales (junio y julio). En la Figura 6 se señala el promedio de 5 años del comportamiento anual de la ET_o registrada en la estación agrometeorológica El Tambo INIA.

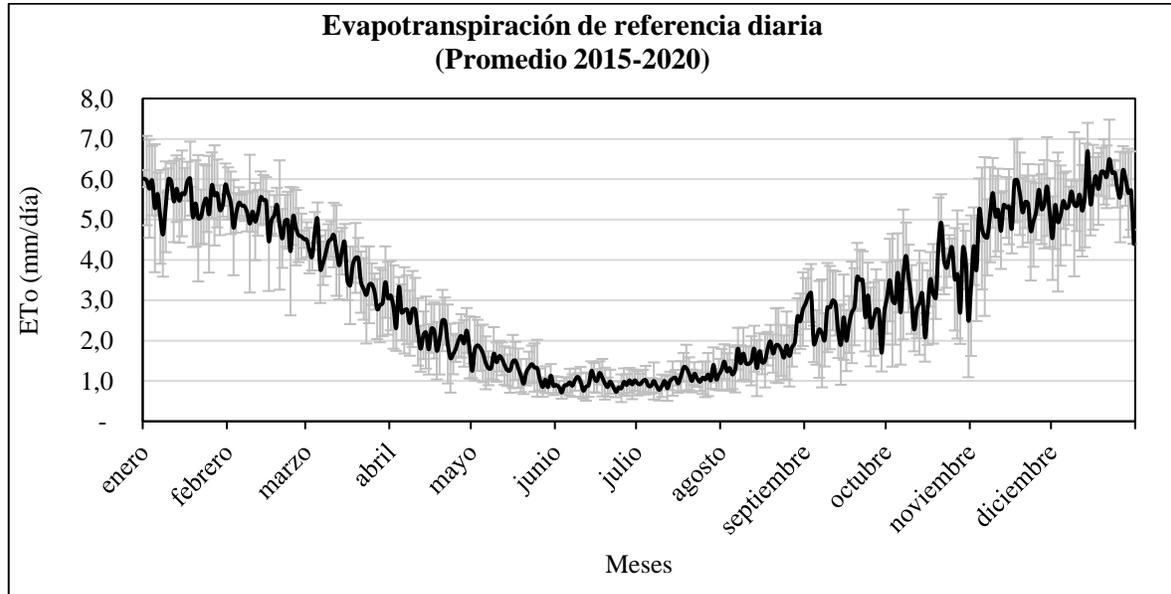
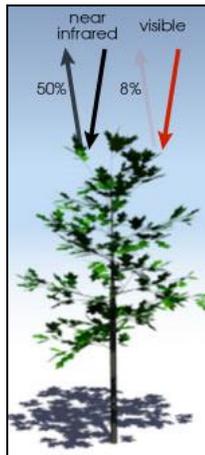


Figura 6. Evapotranspiración de referencia promedio diario estimado en base a 5 años de registro durante el período 2015 al 2020 en la estación agrometeorológica El Tambo. (www.agrometeorología.cl).

Caracterización del desarrollo del cultivo

Para la caracterización del desarrollo anual del cultivo se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) obtenido a partir de series temporales de imágenes satelitales. Este índice de vegetación permite estimar la absorción de la radiación solar por parte del cultivo en ciertos espectros de la radiación solar, eliminando la respuesta de otros elementos en el terreno. La fórmula de cálculo se señala en la Figura 7.



$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada

NIR: Reflectividad en el infrarrojo cercano

R: Reflectividad en el rojo

Figura 7. Ecuación de cálculo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI y representación esquemática de las longitudes de onda involucradas en su cálculo.

Los satélites utilizados en el análisis del cultivo fueron el Sentinel 2A, Sentinel 2B y Landsat 8. En el Cuadro 2 se señalan las principales características de los satélites utilizados en el estudio.

Cuadro 2. Características de las imágenes satelitales utilizados en el estudio.

Programa	Satélite	Cobertura imagen (km)	Resolución temporal (días entre visita)	Resolución espacial (metros)
Landsat (NASA)	Landsat 8	185 x 185	16 días	30
Copernicus (ESA)	Sentinel 2A	100 x 100	10 días	10
	Sentinel 2B			

Así mismo, el análisis de la variabilidad espacial del cultivo dentro del sector de análisis permite identificar y cuantificar diferencias en su desarrollo entre distintas zonas. Estas diferencias serán analizadas conjuntamente con el productor de manera de identificar factores que podrían estar induciendo la des uniformidad observada, como pueden ser características edáficas del sitio, inadecuada operación del equipo de riego u otros factores adversos que puedan limitar el desarrollo del cultivo.

En la Figura 8 se señala el comportamiento del índice NDVI en el sector de análisis, indicando el valor promedio, máximo y mínimos alcanzados durante el año.

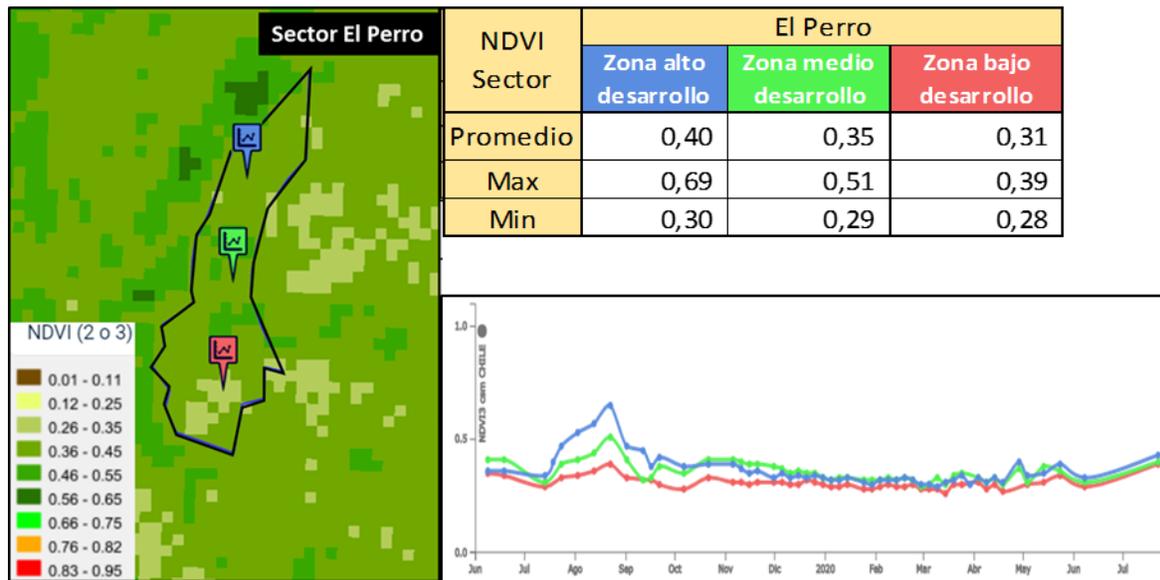


Figura 8. Vista general del índice NDVI sector El Perro (El Encanto, Rengo).

Como se puede apreciar los valores promedio del índice NDVI es del orden de 0,31 a 0,40, con un mínimo que no baja de 0,28. Más detalles de la variabilidad espacial de las plantas dentro de los sectores de riego serán analizados en el capítulo necesidades de riego del cultivo.

Manejo del riego

La determinación de las necesidades de riego los cultivos se realizó utilizando el marco conceptual “evapotranspiración de referencia-coeficiente de cultivo”, propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998): La fórmula que resume su cálculo se indica a continuación:

$$ETc = Kc \times ETo$$

Donde;

ETc: Evapotranspiración de cultivo (mm/día)

Kc: Coeficiente de cultivo (adimensional)

ETo: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Para alimentar esta fórmula, se utilizaron por una parte los valores de la *ETo* estimados por las estaciones de la Red Agrometeorológica Nacional (RAN MINAGRI), disponible en el sitio web <https://agrometeorologia.cl/>. De este modo se descargó la variable *Evapotranspiración de Referencia* (*ETo*), estimada a partir de los registros meteorológicos diarios de la temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar incidente y velocidad del viento y utilizando la ecuación conocida como Penman-Monteith (PM).

Por otro lado, para obtener valores del *Kc* se utilizó la información disponible en la Plataforma Agrícola Satelital PLAS (<http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=plas>), estimado a partir del índice de vegetación NDVI.

Coeficientes de cultivo

En este trabajo, para estimar el nivel de desarrollo de las plantas en el terreno se utilizó el índice de vegetación satelital NDVI y para estimar el potencial transpirativo del cultivo se definió un coeficiente de cultivo basal (*Kcb*) de acuerdo a lo propuesto por la literatura científica (Campos et al.,

2010, Bausch, 1993, Bausch, 1995, Bausch and Neale, 1987, Heilman et al., 1982; Neale, et al., 1989). La relación utilizada para obtener el K_{cb} se indica en la siguiente fórmula:

$$K_c = 1,51 \times NDVI - 0,23$$

En la Figura 9 se señala el comportamiento anual del coeficiente de cultivo promedio para las plantas de la variedad Arbequina del sector E2, se seleccionó una zona de alto desarrollo y una de bajo desarrollo, que es posible diferenciarla en las imágenes.. A partir del comportamiento anual del K_c se puede observar que en el período invernal los valores del K_c son más altos indicando posiblemente mayor desarrollo del cultivo durante ese período (menor demanda ambiental) o la presencia de malezas. Así mismo, los menores valores del K_c se observan en los meses de verano (noviembre, diciembre), probablemente debido a la mayor demanda del ambiente y el efecto del déficit hídrico sobre el cultivo.

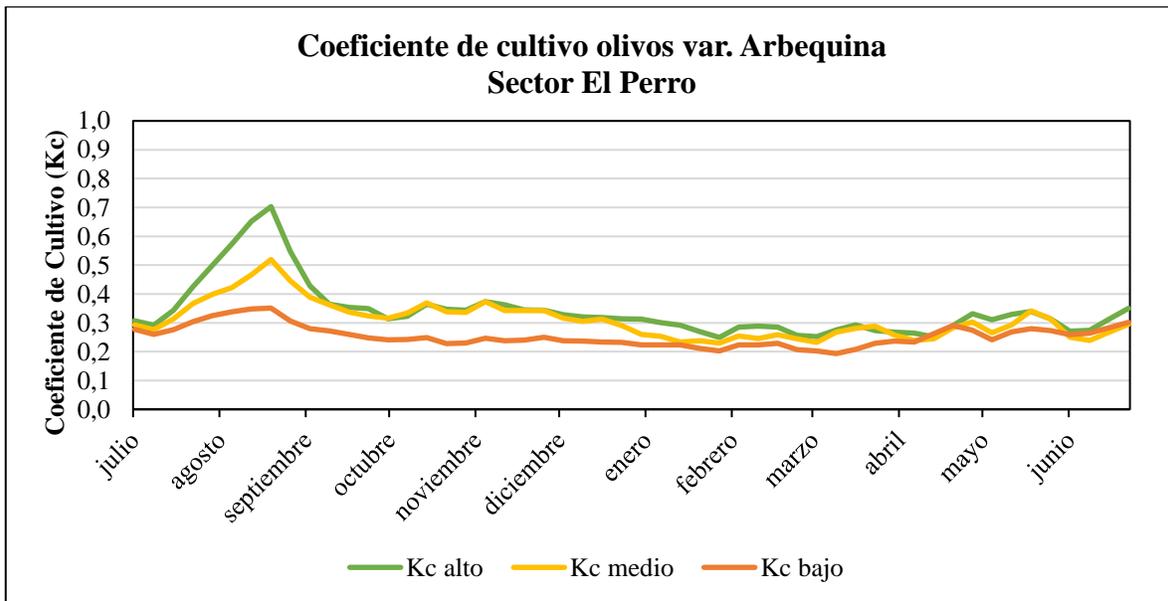


Figura 9. Curvas de K_c en la var. Arbequina durante la temporada 2019/20 sector El Perro (Fundo El Encanto, Rengo).

En el Cuadro 3 se presenta un resumen de valores de K_c registrados en cada sector de análisis.

Cuadro 3. Resumen de valores de K_c máximo, mínimo y promedio en el sector analizado.

Variedad	Sector	Kc Modelado		
		Máximo	Mínimo	Promedio
Arbequina	Alto	0,70	0,25	0,34
	Medio	0,52	0,23	0,31
	Bajo	0,35	0,19	0,25

Como se puede observar en el sector de análisis, el valor de K_c máximo varía entre 0,35 a 0,72. Por su parte el K_c mínimo se encuentra entre 0,19 a 0,25. El K_c promedio anual estimado se encuentra entre 0,25 a 0,34.

Demanda de riego modelada

Con base en la metodología “coeficiente de cultivo- evapotranspiración de referencia” descrita anteriormente se modeló la transpiración potencial del cultivo, correspondiente a la estimación de necesidades de riego del cultivo de manera de mantener el cultivo en un óptimo de disponibilidad hídrica (sin déficit). Como se señaló anteriormente el parámetro Kc fue obtenido del índice de vegetación NDVI desde la Plataforma Agrícola Satelital PLAS y los datos de ETo de la estación El Tambo INIA.

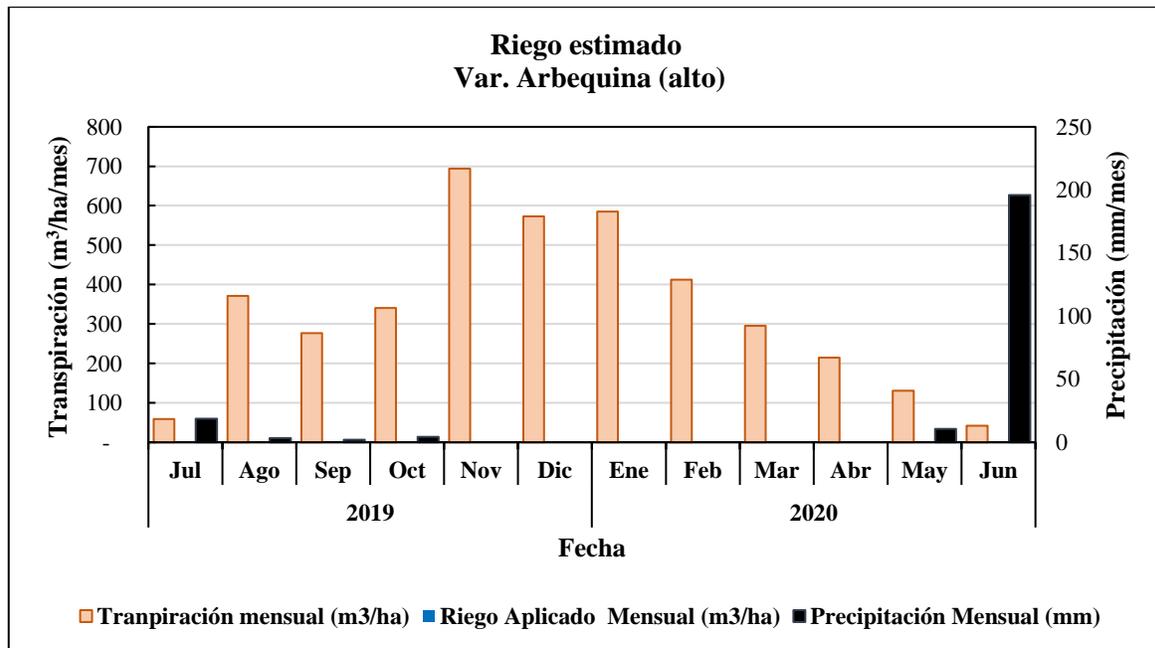
El Cuadro 4 presenta un resumen de los volúmenes de riego estimados de acuerdo al modelamiento satelital del cultivo y de la demanda ambiental de la zona.

Cuadro 4. Transpiración potencial del cultivo en cada sector analizado.

Variedad	Sector	Vigor	Plataforma Satelital
			Transpiración (m ³ /ha/temporada)
Arbequina	El Perro	Alto	3.993
		Medio	3.685
		Bajo	2.924

Como se puede observar en el sector de análisis, existen diferencias en la transpiración de hasta 1000 m³/ha en la temporada en función del nivel de desarrollo del cultivo.

Para analizar las necesidades hídricas a reponer, para el sector analizado se construyó una gráfica de las necesidades estimadas de acuerdo a la metodología descrita (Figura 10), diferenciándolo para las zonas de alto, medio y bajo índice NDVI.



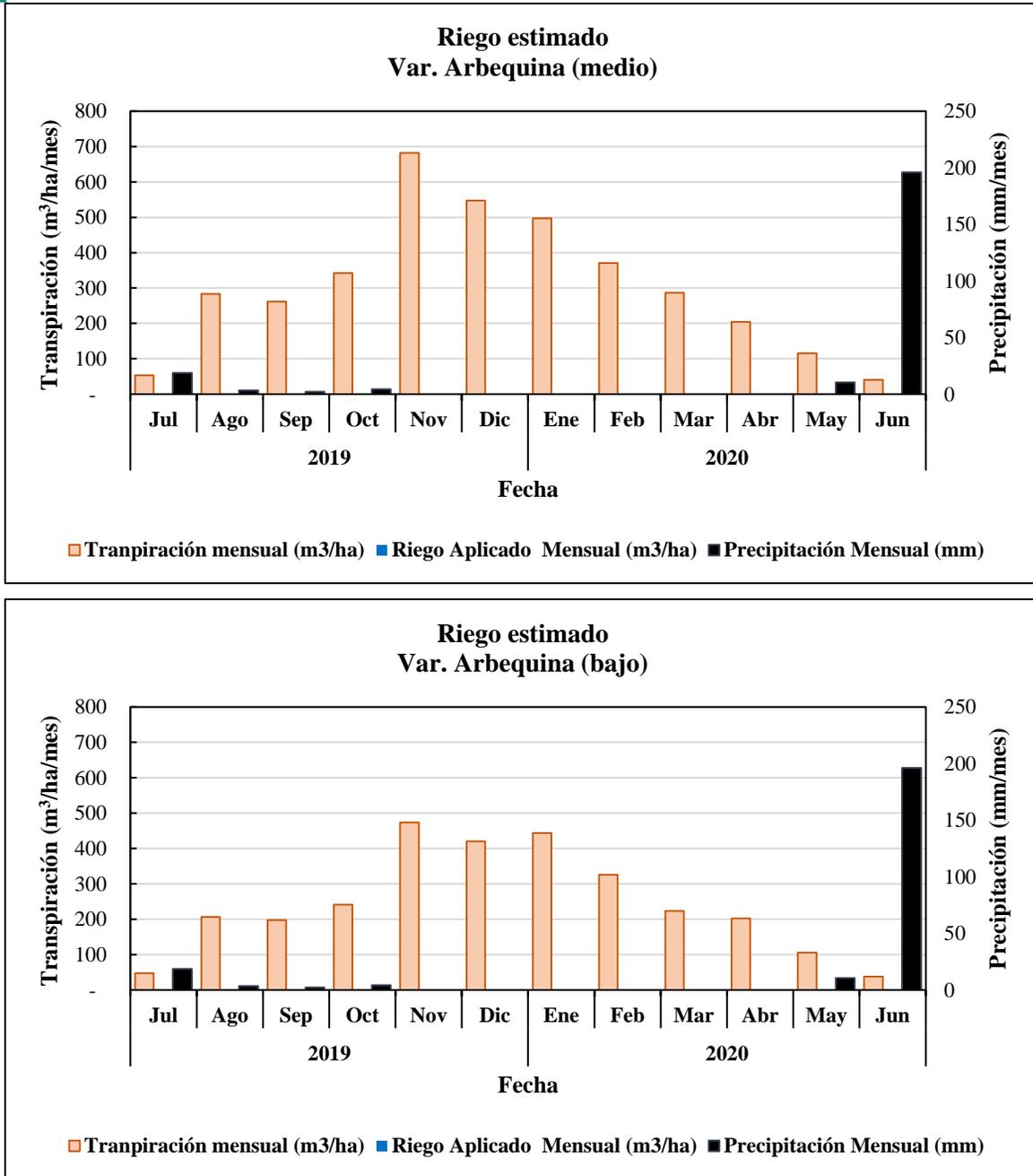


Figura 10. Consumo modelado del cultivo de olivos en el sector El Perro durante la temporada 2019/20 (Fundo El Encanto, Rengo).

Considerando la acumulación mensual de necesidades hídricas del cultivo se puede observar que existen diferencias entre los niveles de desarrollo en el sector analizado, las cuales se hacen más evidentes en los meses de máxima demanda (verano). En promedio el sector de bajo NDVI demanda un 24% menos que el sector de mayor demanda.

Para contrastar la información de horas de riego aportadas al cultivo durante la temporada 2019/20, se transformaron el consumo hídrico modelado a horas de riego semanales (Figura 11). De este modo se observa que lo aportado es inferior a lo modelado durante gran parte de la temporada, incluso en aquellos sectores donde se presenta un bajo vigor en el cultivo.

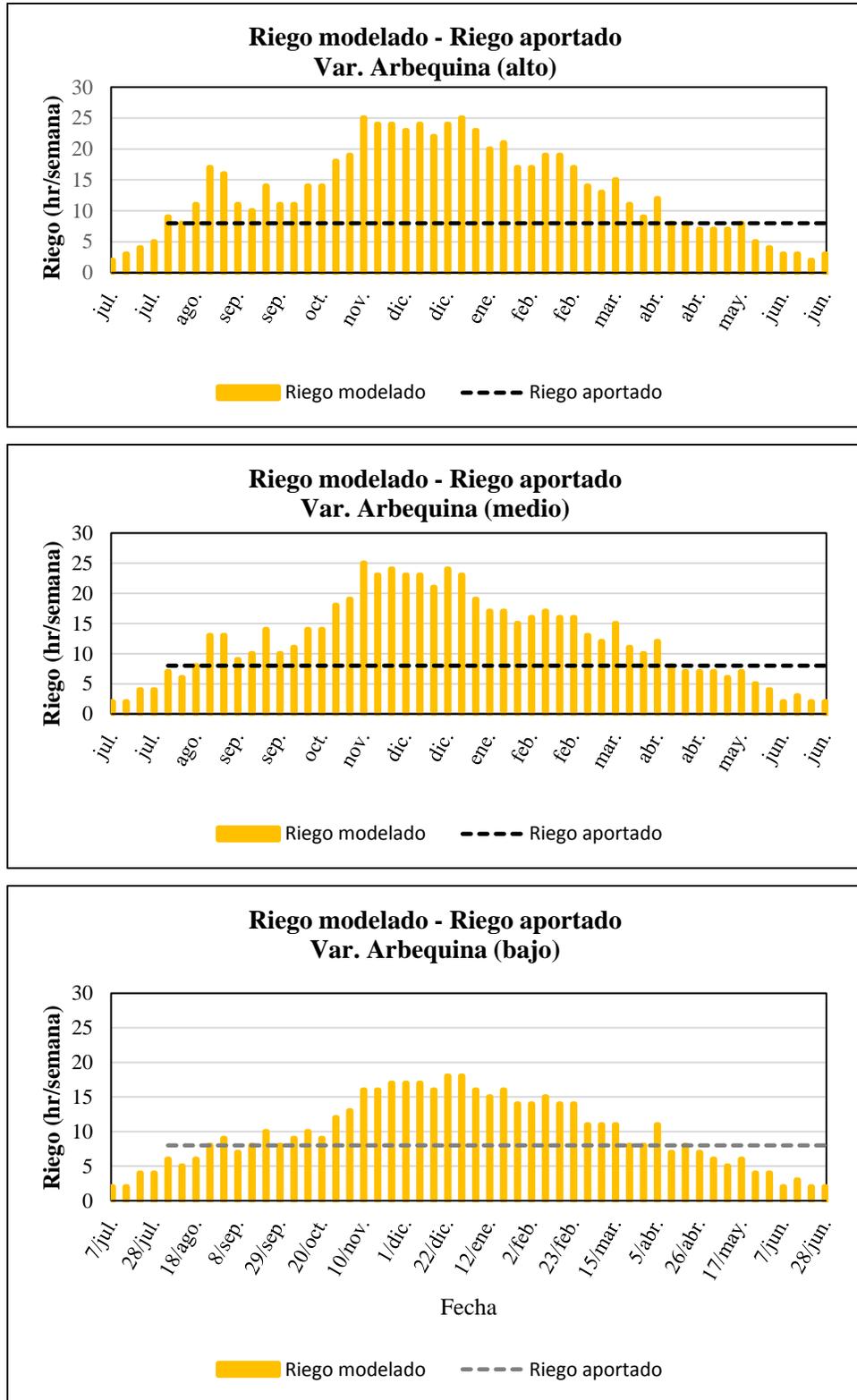


Figura 11. Comparación de horas de riego modelado versus información de horas de riego aportadas.

Distribución espacial de la transpiración

Al analizar el comportamiento de la transpiración acumulada durante la temporada completa en el sector El Perro, se pudo estimar que el valor promedio de transpiración es de 368 mm/año, con un valor máximo de 528 mm/año y mínimo de 286 mm/año.

A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 44%, 0,7 ha) se concentra en el rango de 350 mm a 400 mm al año, seguido del rango de 350 - 400 mm de transpiración anual en un 29% de la superficie (0,5 ha). En la Figura 12 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

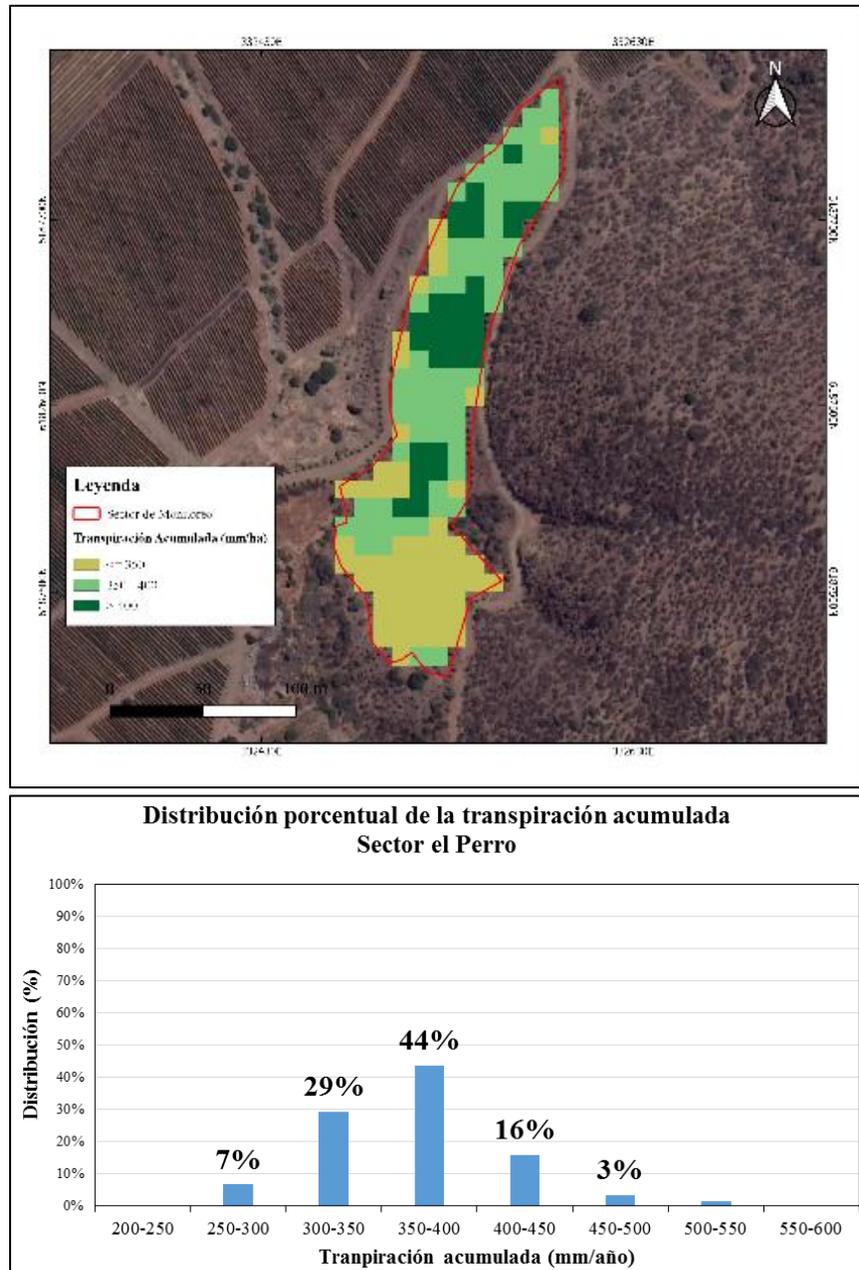


Figura 12. Distribución de los rangos de transpiración acumulada en el sector El Perro. Fundo El Encanto, Rengo.



Literatura citada

Agrimed, 2017. Atlas Agroclimático de Chile, estado actual y tendencias del clima. Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED). Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Chile.

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 - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manage.* 98, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011>.

Bausch, W.C., 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46, 213–222. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90096-G](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90096-G).

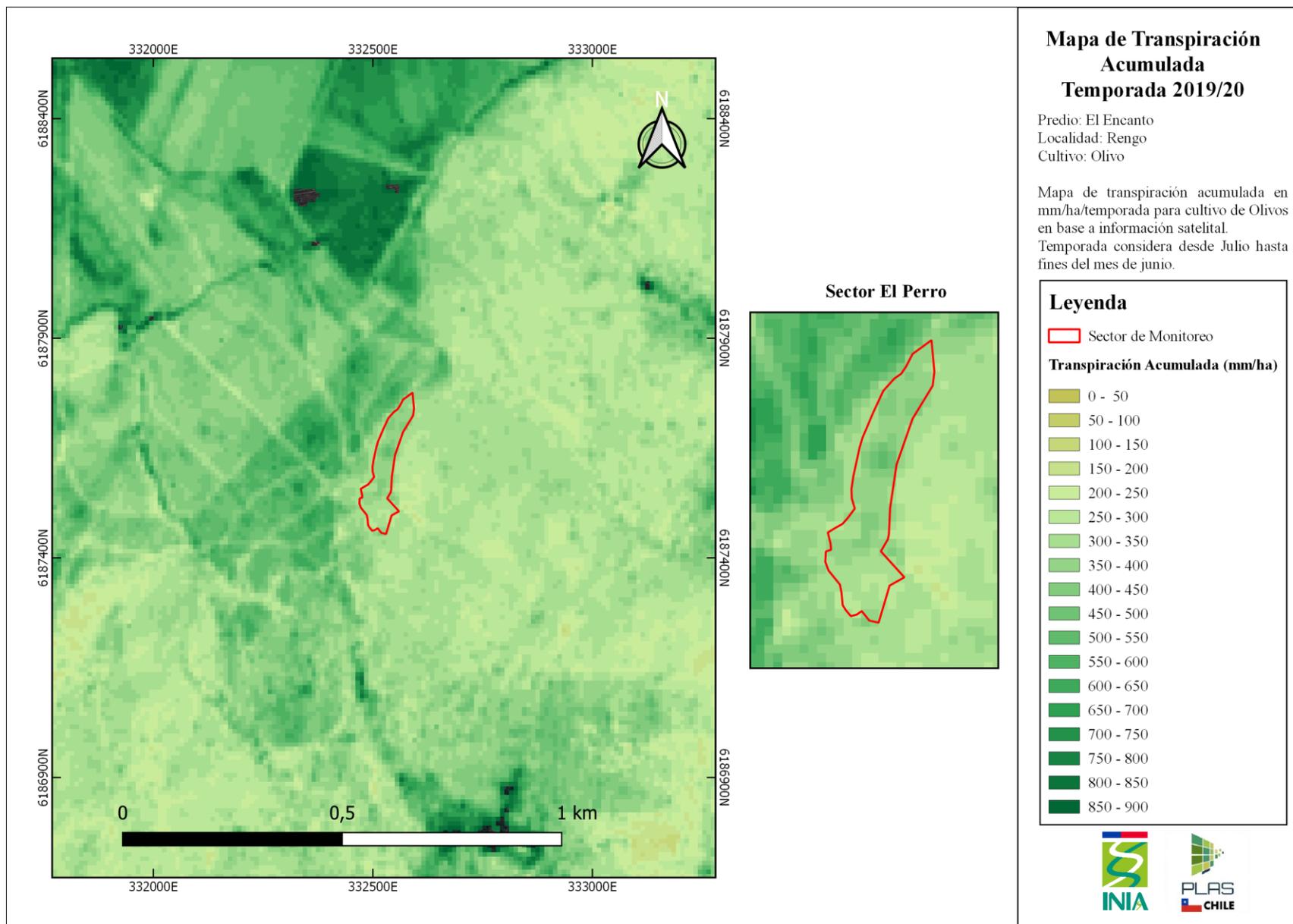
Bausch, W.C., 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manage.* 27, 55–68. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01125-3](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01125-3).

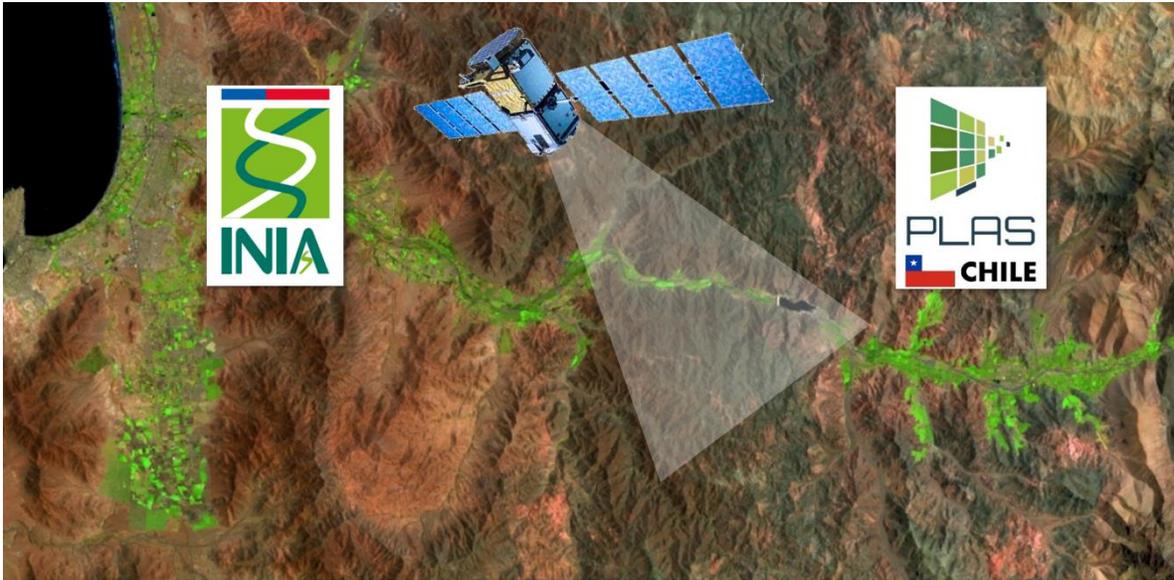
Bausch, W.C., Neale, C.M.U., 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Trans. ASAE* 30, 703–709. <https://doi.org/10.13031/2013.30463>.

Heilman et al., 1982 Heilman, J.L., Heilman, W.E., Moore, D.G., 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agron. J.* 74, 967–971. <https://doi.org/10.2134/agronj1982>.

Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heermann, D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. ASAE* 32, 1891–1899.

Mapa de Transpiración Acumulada durante Temporada 2019/20. Sector El Perro, Fundo El Encanto, Rengo





Informe Consultoría en Riego

INIA

Productor: AGROINDUSTRIAL SIRACUSA

Autores

Equipo Proyecto PLAS - INIA Intihuasi

Jefe de proyecto - Claudio Balbontín Nesvara

Profesional de Apoyo - Jael Montecinos Castro

Informe Consultoría Manejo del Riego

AGROINDUSTRIAL SIRACUSA

Introducción

Con objeto de implementar un trabajo colaborativo entre el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA y la Asociación de Productores de Aceite Oliva ChileOliva, se implementó un trabajo de consultoría en la cual se analizaron las metodologías para la definición de las necesidades de riego del cultivo y aspectos asociados al manejo agronómico del cultivo de olivos.

El principal objetivo de la consultoría es transferir un marco conceptual estandarizado para la definición de las necesidades de riego, junto a la capacitación en el uso de nuevas tecnologías para el monitoreo del cultivo y de los factores ambientales que influyen en el consumo hídrico y por tanto en la programación del riego.

En este trabajo se elaboró un análisis comparativo entre los criterios utilizados actualmente por el productor para definir los volúmenes de riego aportados al cultivo (manejo tradicional del riego) y las necesidades de riego estimadas a partir del marco conceptual propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998), con la innovación tecnológica del uso del índice de vegetación satelital NDVI para estimar un Coeficiente de Cultivo y el uso de información de la demanda ambiental del sitio para estimar la tasa de transpiración máxima del cultivo.

De este modo, en el siguiente informe se analiza el desarrollo del cultivo utilizando información del índice de vegetación satelital NDVI, factores ambientales que influyen en el consumo hídrico del cultivo, las metodologías para la definición de las necesidades de riego en el campo y asistido con información satelital y la variabilidad espacial de la tasa de transpiración del cultivo dentro de los sectores analizados.



Sitio de análisis

Los trabajos fueron realizados en un predio ubicado en la localidad de Villa Prat y comuna de Sagrada Familia, Región del Maule. En la Figura 1 se señala la ubicación geográfica del campo, así como de los sectores analizados.

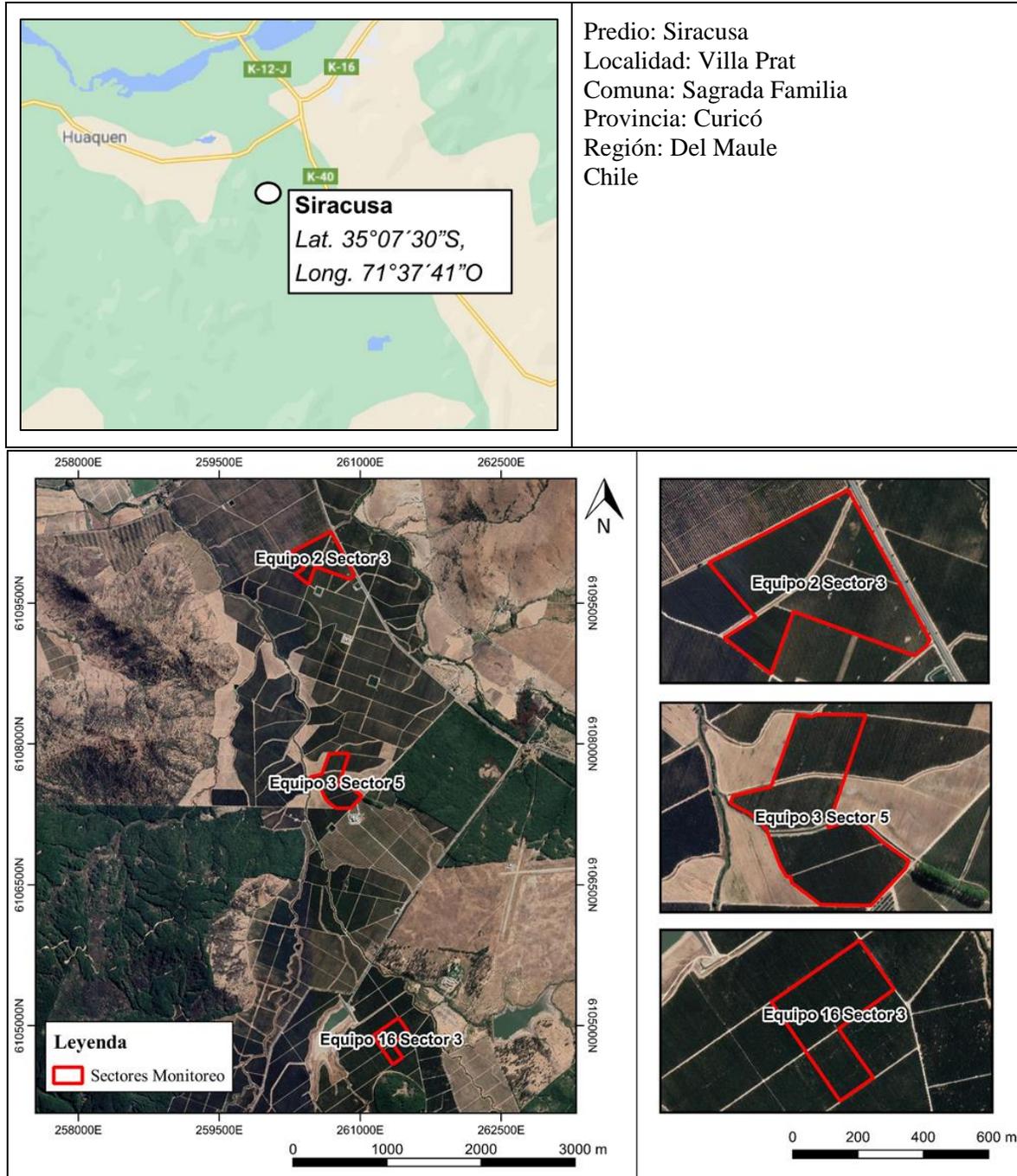


Figura 1. Ubicación del predio y sitios analizados (Siracusa, Sagrada Familia).

Los sectores analizados corresponden a dos cuarteles con la variedad Arbequina y un cuartel con la variedad Arbosana. En el Cuadro 1 se señala un resumen de las características del cultivo dentro de los sitios analizados en el predio.

Cuadro 1. Equipo, superficie, variedades y marcos de plantación de los sitios bajo análisis.

Equipo	Sector	Superficie (ha-SIG)	Variedad	Año de Plantación	Marco de plantación (m)	Plantas/ha
2	3	19,3	Arbequina	2007	3,8 x 1,8	1.462
3	5	15,3	Arbequina	2007	3,8 x 1,8	1.462
16	3	8,8	Arbosana	2009	3,8 x 1,3	2.024

Características climáticas zona de estudio

La zona de Sagrada Familia se encuentra dentro del distrito agroclimático Lolol (Agrimed, 2017) (Figura 2). El clima corresponde a templado cálido supratermal, y régimen de humedad semiárido. La temperatura del aire varía entre máximos en el mes de enero de 29,7 °C y mínimos en el mes de julio de 5,2 °C. Dentro del distrito se registran valores máximos que oscilan entre 30,9 °C y 28,1 °C y valores de la temperatura mínima entre 6,1 °C y 4,4 °C. En promedio el distrito presenta 281 días consecutivos libres de heladas y al año se registran en promedio 5 heladas. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa de los cultivos tiene una longitud de 9 meses. La sumatoria anual de días grados es de 1.802 y 490 horas de frío (acumuladas hasta el 31 de Julio). Por otro lado, la media anual de precipitaciones se sitúa en 645 mm/año, con un período seco de 7 meses de duración y un déficit hídrico de 1027 mm/año. El período húmedo dura 4 meses, durante los cuales se produce un excedente hídrico de 220 mm (Agrimed, 2017).



Figura 2. Distrito Agroclimático Lolol (Agrimed, 2017).

Para el análisis de las condiciones climáticas locales, se consideró información registrada con una estación meteorológica propia y para analizar la fiabilidad de los registros se comparó con la estación San Jorge Los Niches, perteneciente a la Red Agrometeorología Nacional de INIA (www.agrometeorologia.cl), ubicada a 45 km.

De acuerdo a los registros, el comportamiento de la temperatura del aire se caracteriza por alcanzar valores máximos en torno a los 35°C en los meses de verano (con máximos en enero y febrero y un peak de 37,5°C en enero de 2019) y temperaturas mínimas invernales en torno a 3°C en los meses de invierno, con eventos extremos de -3,4°C en junio de 2019 (Figura 3).

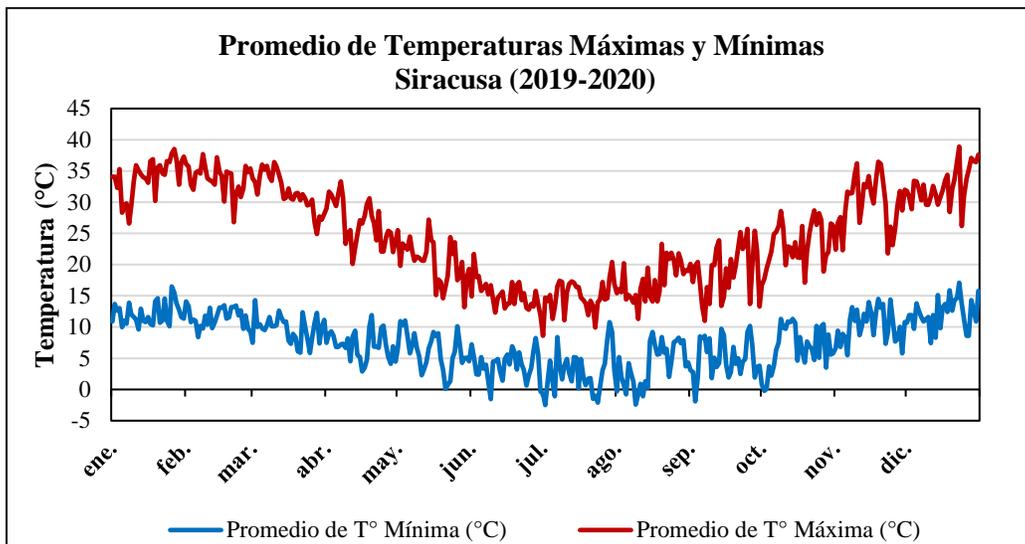


Figura 3. Comportamiento anual de temperaturas máximas y mínimas en la zona de estudio (estación propia, predio Siracusa).

De acuerdo a la información de las precipitaciones registrada por la estación meteorológica propia, el año 2019 llovió 280 mm, mientras que en la presente temporada los valores alcanzan 309 mm (Figura 4). De este modo se observaron pequeñas diferencias entre los registros propios y la estación San Jorge de INIA, generalmente inferiores lo cual puede deberse a las distancia entre ambas estaciones. En general se aprecia un buen funcionamiento de la estación propia.

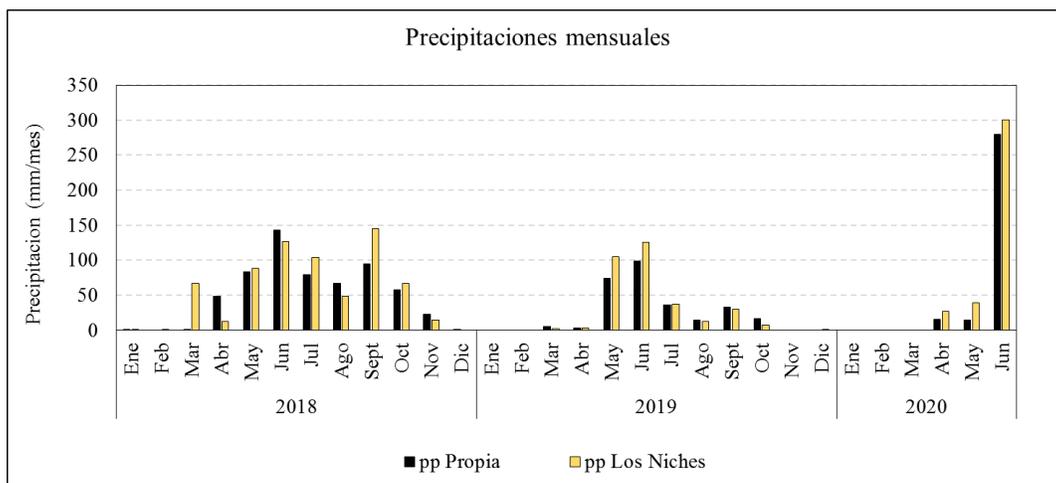


Figura 4. Precipitaciones mensuales años 2019 al 2020 en la zona de Sagrada Familia (Estación Agrometeorológica propia, Siracusa).



En los últimos tres años, de acuerdo a registros de estación INIA San Jorge Los Niches, de la Red Agrometeorológica Nacional de INIA, el monto anual de las precipitaciones alcanzó en promedio 498 mm/año, con montos anuales de 321 mm para el año 2019 y 500 mm en lo que va del año 2020 (Figura 5). En este sentido y de acuerdo a los datos históricos de precipitaciones, se evidencia una tendencia a la disminución de los montos anuales de las lluvias durante los últimos años. En este sentido, el año 2019 correspondió a un año con valores bajo el promedio por lo que es esperable una disminución de las reservas de agua en el suelo en años con menor pluviometría.

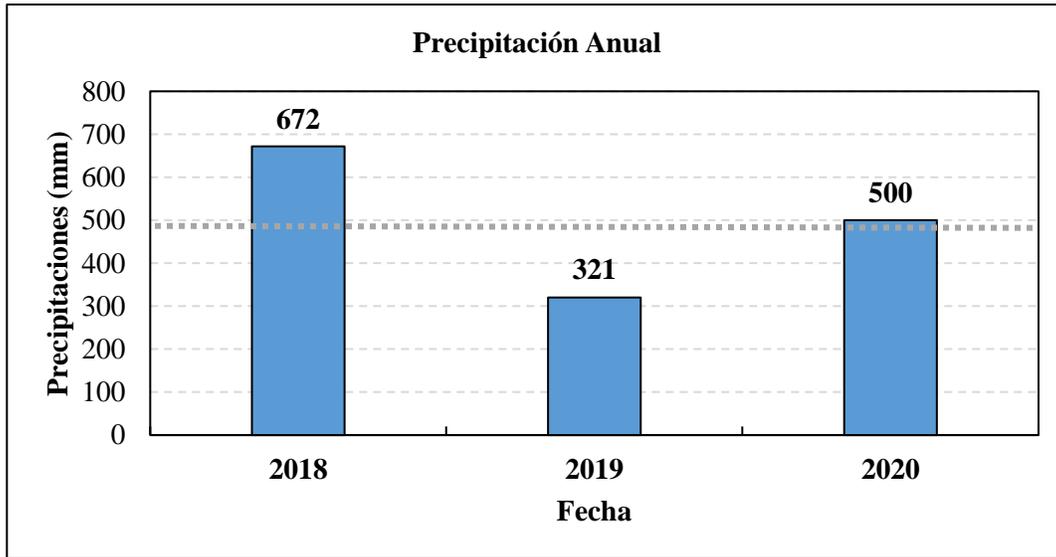


Figura 5. Precipitaciones anuales durante el período 2018 al 2020 registradas en la Estación Agrometeorológica INIA San Jorge Los Niches. (www.agrometeorologia.cl).

En cuanto a la distribución anual de la demanda ambiental, representada por la variable evapotranspiración de referencia (ET_o), esta alcanza valores anuales de 1124 mm/año, con valores máximos diarios en torno a 6,1 mm/día en el verano (máximo absoluto de 6,5 mm/día) y mínimos en torno a 1,3 mm/día, durante los meses de mayo a julio. En la Figura 6 se señala el comportamiento anual de la ET_o, registrada en la estación propia de Siracusa, el cual se compara con valores de ET_o diaria recopiladas desde la estación meteorológica de INIA San Jorge Los Niches, perteneciente a la RAN Agrometeorología Nacional de INIA (agrometeorologia.cl). Los datos considerados para realizar las estimaciones de demanda hídrica y mapas de variabilidad de transpiración acumulada en las respectivas secciones a lo largo de este informe corresponden a los facilitados por el productor desde su estación propia.

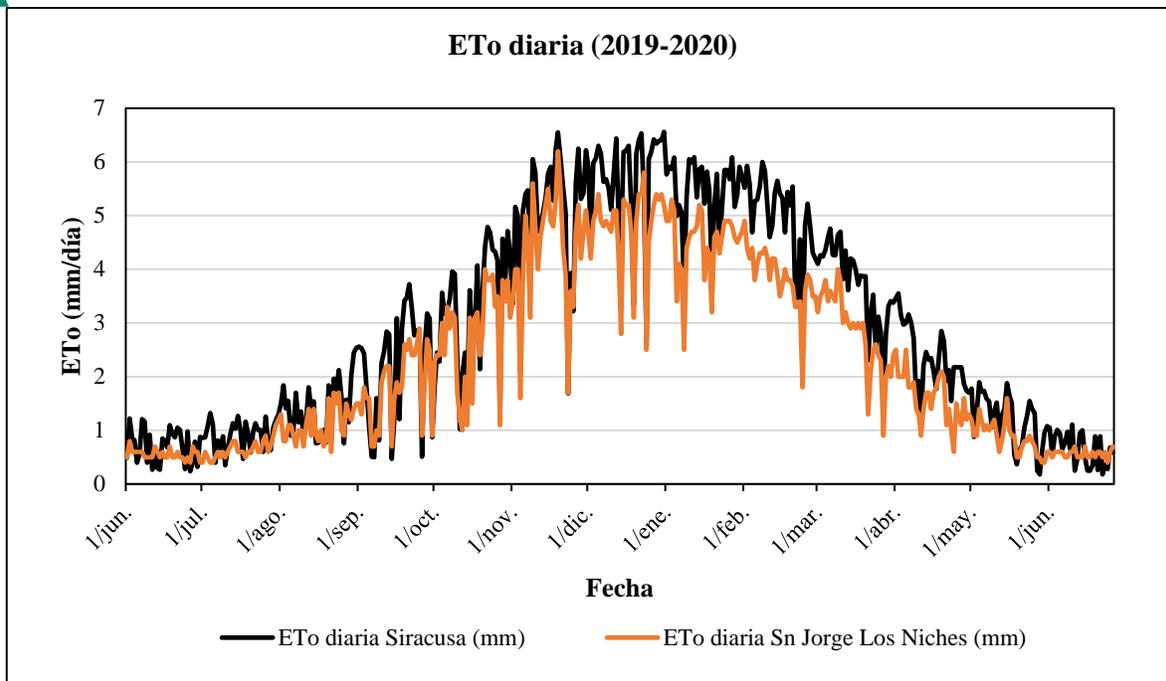
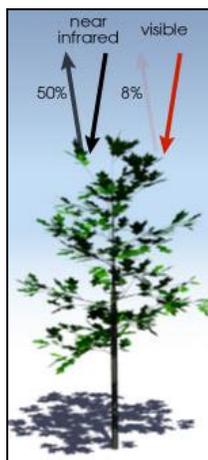


Figura 6. Evapotranspiración de referencia diaria, período 2019 - 2020, estación propia Siracusa y estación agrometeorológica INIA San Jorge Los Niches (www.agrometeorologia.cl).

Las diferencias observadas pueden deberse a la distancia entre ambas estaciones, por lo cual se considera adecuado el funcionamiento de la estación propia para la variable evapotranspiración de referencia ETo.

Caracterización del desarrollo del cultivo

Para la caracterización del desarrollo anual del cultivo se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) obtenido a partir de series temporales de imágenes satelitales. Este índice de vegetación permite estimar la absorción de la radiación solar por parte del cultivo en ciertos espectros de la radiación solar, eliminando la respuesta de otros elementos en el terreno. La fórmula de cálculo se señala en la Figura 7:



$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada

NIR: Reflectividad en el infrarrojo cercano

R: Reflectividad en el rojo

Figura 7. Ecuación de cálculo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI y representación esquemática de las longitudes de onda involucradas en su cálculo.

Los satélites utilizados en el análisis del cultivo fueron el Sentinel 2A, Sentinel 2B y Landsat 8. En Cuadro 2 se señalan las principales características de los satélites utilizados en el estudio.

Cuadro 2. Características de las imágenes satelitales utilizados.

Programa	Satélite	Cobertura imagen (km)	Resolución temporal (días entre visita)	Resolución espacial (metros)
Landsat (NASA)	Landsat 8	185 x 185	16 días	30
Copernicus (ESA)	Sentinel 2A	100 x 100	10 días	10
	Sentinel 2B			

Así mismo, el análisis de la variabilidad espacial del cultivo dentro del sector de análisis permite identificar y cuantificar diferencias en su desarrollo entre distintas zonas. Estas diferencias serán analizadas conjuntamente con el productor de manera de identificar factores que podrían estar induciendo la des uniformidad observada, como pueden ser características edáficas del sitio, inadecuada operación del equipo de riego u otros factores adversos que puedan limitar el desarrollo del cultivo.

En las Figura 8, Figura 9 y Figura 10 se señala el comportamiento anual del índice de vegetación NDVI para los sectores E2-S3, E3-S5 y E16-S3, respectivamente, indicando zonas con alto, medio y bajo desarrollo del cultivo para las variedades Arbequina y Arbosana según corresponda, durante la temporada 2019-20.

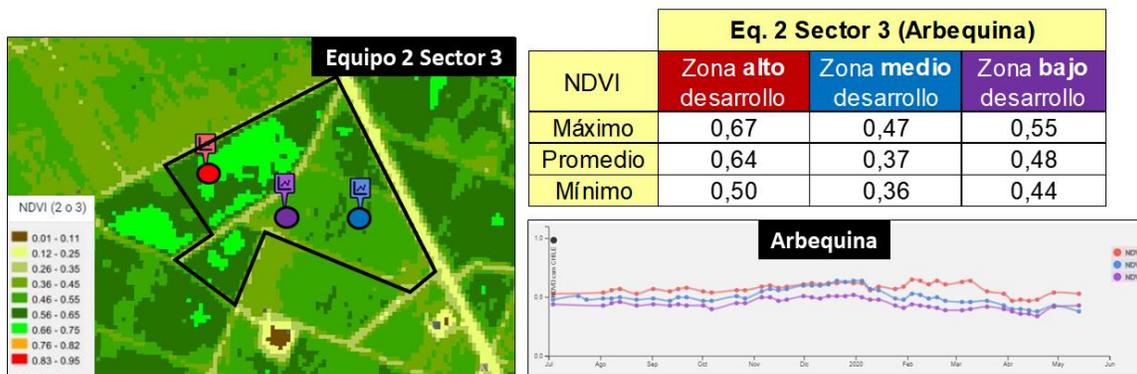
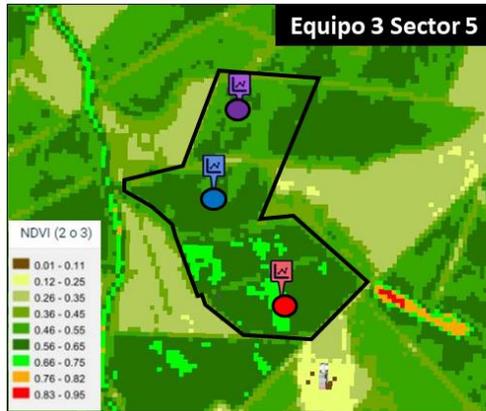


Figura 8. Vista general índice NDVI en el Equipo 2 Sector 3, Siracusa, Villa Prat.



Eq. 3 Sector 5 (Arbequina)			
NDVI	Zona alto desarrollo	Zona medio desarrollo	Zona bajo desarrollo
Máximo	0,72	0,42	0,55
Promedio	0,66	0,39	0,51
Mínimo	0,60	0,38	0,47

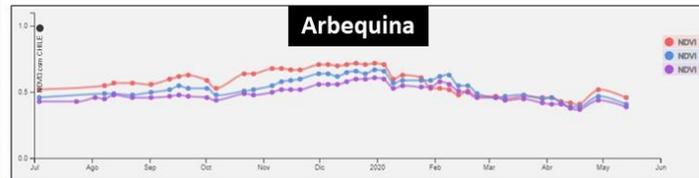
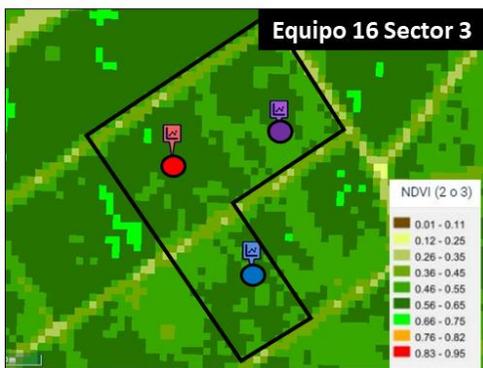


Figura 9. Vista general índice NDVI en el Equipo 3 Sector 5, Siracusa, Villa Prat.



Eq. 16 Sector 3 (Arbosana)			
NDVI	Zona alto desarrollo	Zona medio desarrollo	Zona bajo desarrollo
Máximo	0,69	0,47	0,58
Promedio	0,64	0,46	0,54
Mínimo	0,62	0,42	0,52

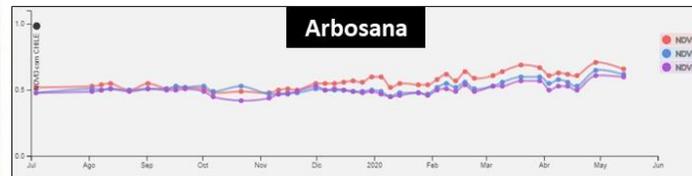


Figura 10. Vista general índice NDVI en el Equipo 16 Sector 3, Siracusa, Villa Prat.

Como se puede apreciar los valores promedio más altos del índice NDVI se alcanzan en el Eq. 3 Sector 5 (E3-S5) (Figura 9), indicando el mayor desarrollo foliar de las plantas ahí presentes de la variedad Arbequina. Más detalles de la variabilidad espacial de las plantas dentro de los sectores de riego serán analizados en el capítulo necesidades de riego del cultivo.

Manejo del riego

La determinación de las necesidades de riego de los cultivos se realizó utilizando el marco conceptual “evapotranspiración de referencia-coeficiente de cultivo”, propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998): La fórmula que resume su cálculo se indica a continuación:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Donde;

ET_c : Evapotranspiración de cultivo (mm/día)

K_c : Coeficiente de cultivo (adimensional)

ET_o : Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Para alimentar esta fórmula, se utilizaron por una parte los valores de la ET_o estimados por estaciones propias del productor y por las estaciones de la Red Agrometeorológica Nacional (RAN MINAGRI), disponible en el sitio web <https://agrometeorologia.cl/>. De este modo se descargó la variable *Evapotranspiración de Referencia* (ET_o), estimada a partir de los registros meteorológicos diarios de la temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar incidente y velocidad del viento y utilizando la ecuación conocida como Penman-Monteith (PM).

Por otro lado, para obtener valores del Kc se utilizó la información disponible en la Plataforma Agrícola Satelital PLAS (<http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=plas>), estimado a partir del índice de vegetación NDVI.

Coeficientes de cultivo

En este trabajo, para estimar el nivel de desarrollo de las plantas en el terreno se utilizó el índice de vegetación satelital NDVI y para estimar el potencial transpirativo del cultivo se definió un coeficiente de cultivo basal (*Kcb*) de acuerdo a lo propuesto por la literatura científica (Campos et al., 2010; Bausch, 1993; Bausch, 1995; Bausch and Neale, 1987; Heilman et al., 1982; Neale, et al., 1989). La relación utilizada para obtener el *Kcb* se indica en la siguiente fórmula:

$$Kc = 1,51 \times NDVI - 0,23$$

En la Figura 11 y Figura 12 se señala el comportamiento anual del coeficiente de cultivo promedio para las plantas de las var. Arbequina y Arbosana de los sectores E2-S3, E3-S5 y E16-S3. A partir del comportamiento anual del Kc se puede observar que en el período invernal los valores del Kc son más bajos que el resto de la temporada. Así mismo, los mayores valores del Kc se observan en los meses de fines de primavera e inicios de verano (noviembre a febrero), esto ocurre para ambas variedades, Arbequina y Arbosana.

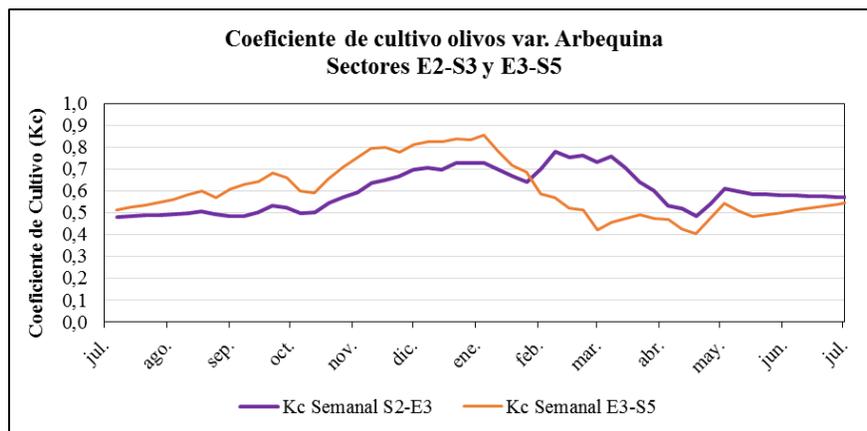


Figura 11. Comportamiento anual del Kc durante la temporada 2019/20 en los sectores E2-S3 y E3-S5, var. Arbequina. Siracusa, Villa Prat.

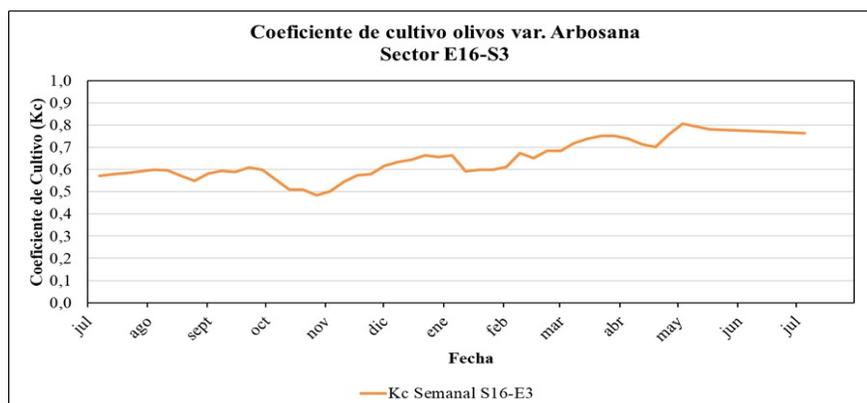


Figura 12. Comportamiento anual del Kc durante la temporada 2019/20 en el sector E16-S3, var. Arbosana. Siracusa, Villa Prat.

En el Cuadro 3 se presenta un resumen de valores de Kcb para cada sector de vigor alto, medio y bajo identificado.

Cuadro 3. Resumen de valores de Kc máximo, mínimo y promedio en los sectores analizados para zonas de distinto nivel de desarrollo.

Variedad	Equipo	Sector	Nivel Desarrollo	Kcb Satelital		
				Máximo	Promedio	Mínimo
Arbequina	2	3	Alto	0,78	0,48	0,60
			Medio	0,74	0,33	0,50
			Bajo	0,53	0,31	0,43
	3	5	Alto	0,85	0,40	0,60
			Medio	0,76	0,36	0,54
			Bajo	0,67	0,34	0,48
Promedio				0,72	0,37	0,52
Arbosana	16	3	Alto	0,81	0,49	0,65
			Medio	0,73	0,46	0,59
			Bajo	0,70	0,41	0,55
			Promedio	0,75	0,45	0,60

Como se puede observar, en la variedad Arbequina los valores de Kc máximo están en el rango 0,85 a 0,74, mientras que los valores mínimos se sitúan en el rango 0,6 a 0,43. Para la variedad Arbosana se presentan valores de Kc máximos de 0,81 a 0,7, mientras que los valores mínimos se sitúan en el rango de 0,65 a 0,55. El Kcb promedio anual estimado en Arbequina fue 0,37, mientras que para Arbosana fue de 0,45. La proporción de cada zona se analiza en el capítulo de variabilidad de la transpiración.

Considerando la información disponible de aplicación de riegos, se realiza la estimación de los valores de Coeficiente de cultivo (Kcb) utilizados en la programación del riego del predio. Estos valores se comparan con los valores promedios de las variedades Arbequina y Arbosana según corresponda por cada sector, siendo posible apreciar grandes diferencias que finalmente se traducen en diversas intensidades de déficit en el aporte del riego, como se detallará en la siguiente sección del informe. Las Figura 14, Figura 15, Figura 16 comparan los valores de Kc obtenido por modelación satelital, y los estimados en relación a los aportes de riego mensuales informados, para los sectores E2-S3, E3-S5 y E16-S3, respectivamente.

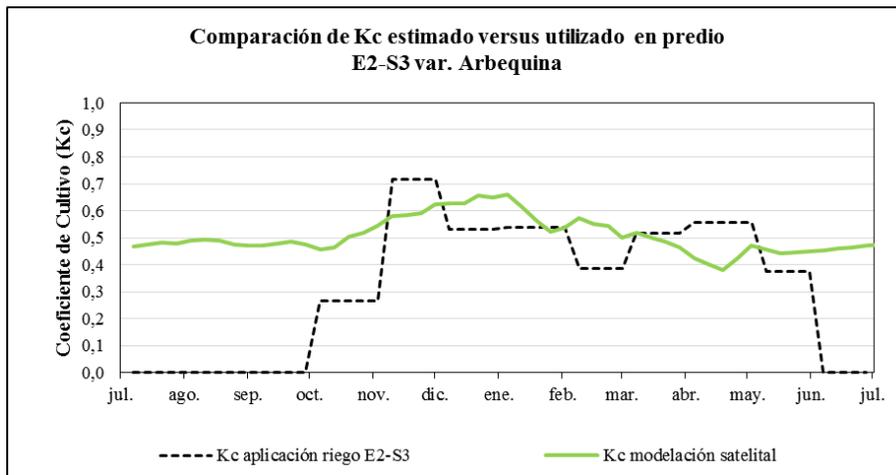


Figura 13. Comparación de las curvas Kc promedio por variedad obtenidas con el monitoreo satelital y el Kc utilizado operativamente en el predio, Equipo 2 Sector 3, Siracusa, Villa Prat.

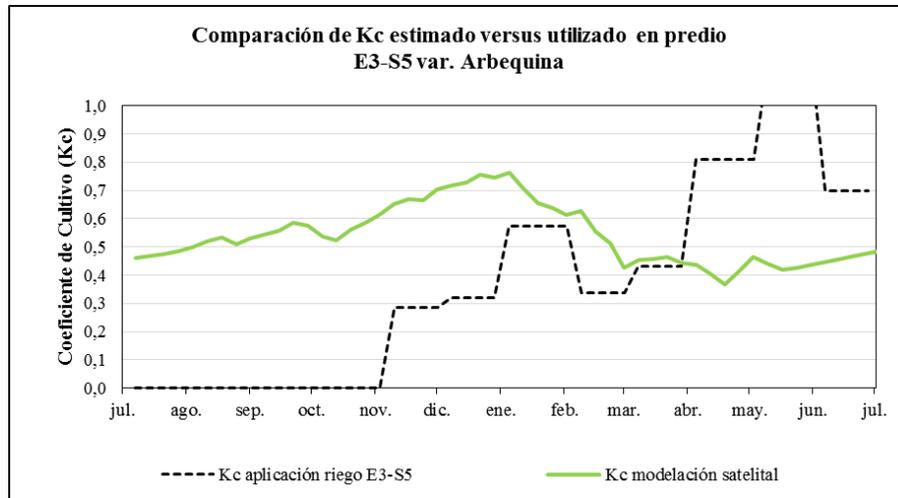


Figura 14. Comparación de las curvas Kc promedio por variedad obtenidas con el monitoreo satelital y el Kc utilizado operativamente en el predio, Equipo 3 Sector 5, Siracusa, Villa Prat.

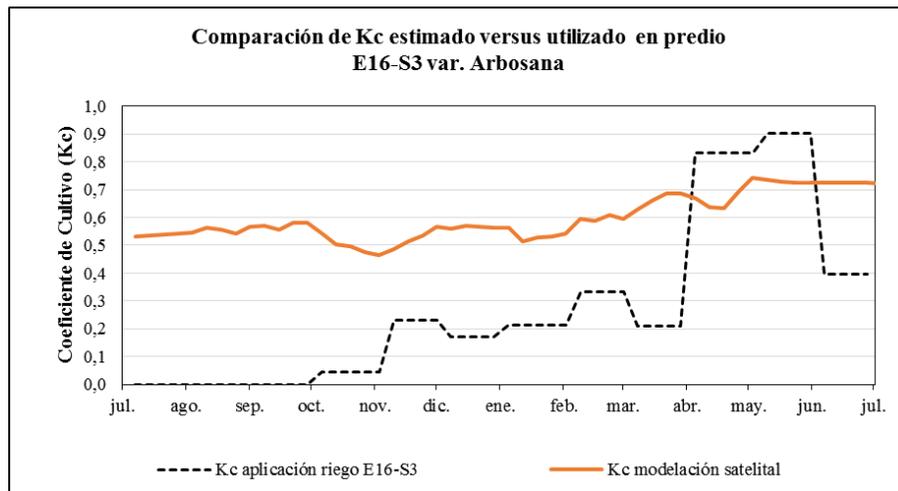


Figura 15. Comparación de las curvas Kc promedio por variedad obtenidas con el monitoreo satelital y el Kc utilizado operativamente en el predio, Equipo 16 Sector 3, Siracusa, Villa Prat

Demanda de riego modelada

Con base en la metodología “coeficiente de cultivo- evapotranspiración de referencia” descrita anteriormente se modeló la transpiración potencial del cultivo, correspondiente a la estimación de necesidades de riego del cultivo de manera de mantener el cultivo en un óptimo de disponibilidad hídrica (sin estrés). Como se señaló anteriormente el parámetro Kc fue obtenido del índice de vegetación NDVI desde la Plataforma Agrícola Satelital PLAS y los datos de ETo desde el mapa dinámico de ETo semanal disponible en la plataforma satelital PLAS.

Por otro lado, se recopiló información del manejo real del riego en el cultivo durante la temporada 2019/20 y el volumen real de riego aportado al cultivo por el productor, de manera de contrastarlo con el análisis modelado. El Cuadro 4 presenta un resumen de los volúmenes de riego aportados en campo y las estimaciones de acuerdo al monitoreo satelital del cultivo y de la demanda ambiental de la zona.

Cuadro 4. Transpiración potencial del cultivo y volumen de riego aportado al cultivo en sector analizado para distintos niveles de desarrollo.

Variedad	Equipo	Sector	Nivel de Desarrollo	Transpiración (m3/ha/temp.)	Volumen Aplicado (m3/ha/temp.)	Déficit hídrico Aplicado
Arbequina	2	3	Alto	7.231	4.898	68%
			Medio	6.116	4.898	80%
			Bajo	4.875	4.898	100%
	3	5	Alto	7.303	4.085	56%
			Medio	6.597	4.085	62%
			Bajo	5.933	4.085	69%
Promedio				6.342	4.492	73%

Arbosana	16	3	Alto	7.140	2.771	39%
			Medio	6.313	2.771	44%
			Bajo	5.890	2.771	47%
			Promedio	6.448	2.771	43%

*: Temporada agrícola considerada fue Julio a Junio.

En la Figura 16, Figura 17 y Figura 18 se detalla dicha comparación (aportes versus necesidades modeladas) para los distintos sectores analizados, considerando zonas de distinto nivel de desarrollo para las variedades Arbequina y Arbosana en cada sector.

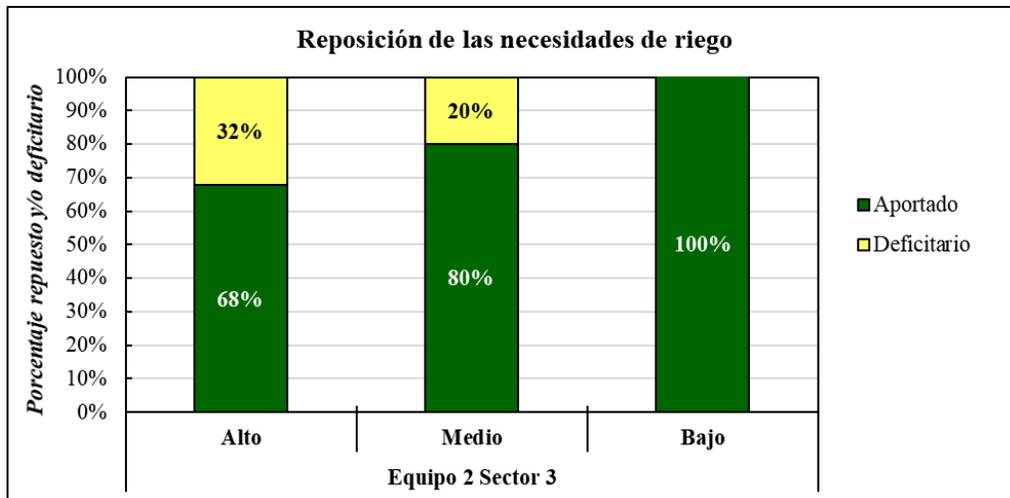


Figura 16. Comparación aportes de riego y necesidades modeladas de acuerdo al vigor del cultivo (Equipo 2 Sector 3 var. Arbequina. Siracusa, Villa Prat).

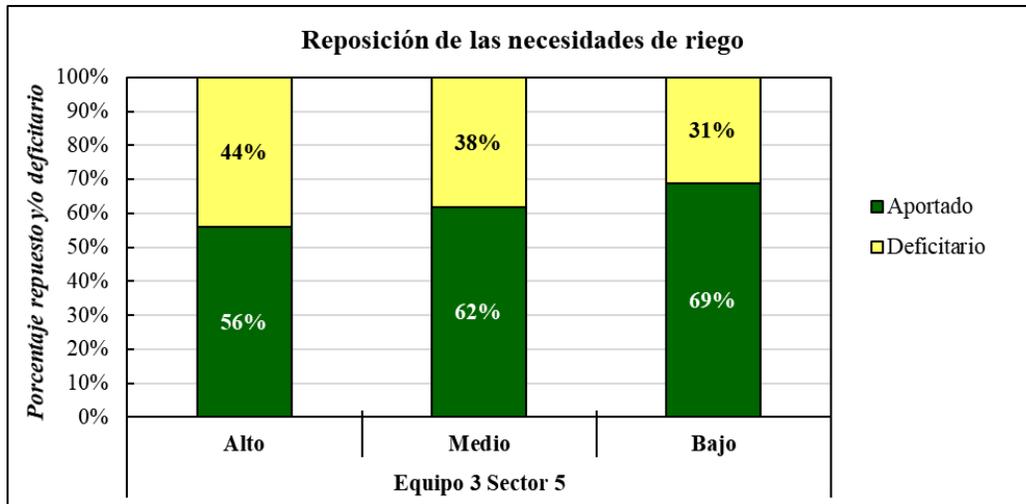


Figura 17. Comparación aportes de riego y necesidades modeladas de acuerdo al vigor del cultivo (Equipo 3 Sector 5 var. Arbequina. Siracusa, Villa Prat.)

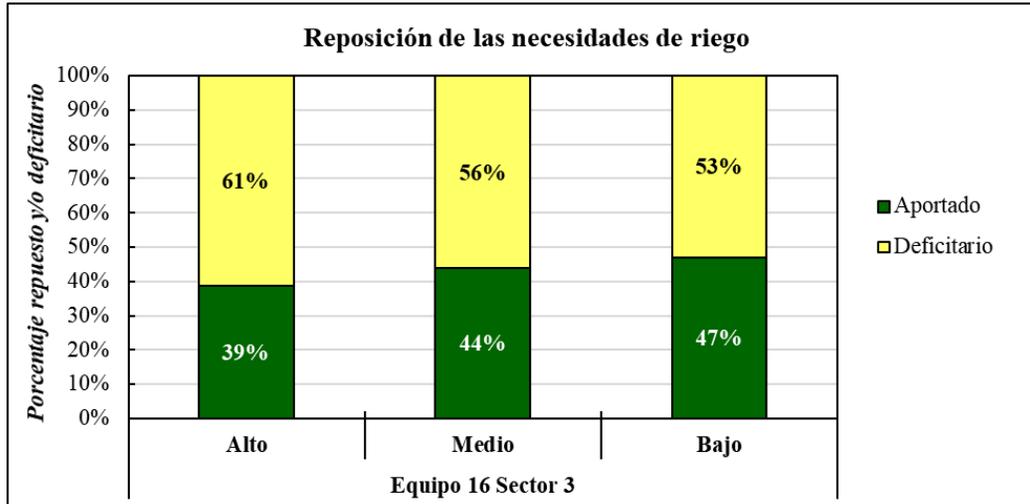


Figura 18. Comparación aportes de riego y necesidades modeladas de acuerdo al vigor del cultivo (Equipo 16 Sector 3 var. Arbequina. Siracusa, Villa Prat.)

Como se puede observar en todos los sectores analizados, el volumen de riego aportado fue menor al estimado mediante el uso del coeficiente de cultivo modelado para la mayoría de los niveles de desarrollo presentes en los sectores, a excepción del equipo 2 Sector 3 con bajo desarrollo, en el cual se suple el 100% de las necesidades de riego. Debido a que todo el sector recibe el mismo volumen de riego, se presentan valores de déficit hídrico variable y más acrecentado a aquellas zonas donde los olivos presentan mayor vigor, dándose este fenómeno en todos los sectores. De este modo, donde es más evidente esta variabilidad es en el Equipo 2, sector 3 en donde, de acuerdo a los registros de campo, se aprecia que en las zonas de alto vigor se aportó un 68% de las necesidades de riego modeladas, lo cual representó un déficit de 32%, mientras que en las zonas con bajo vigor se aportó un 100% de las necesidades, por ende, sin presentar déficit. Para el caso del Eq. 3 Sector 5, la variabilidad es menor, donde las zonas de alto vigor presentan un aporte hídrico del 56% para var. Arbequina, lo que representa un déficit hídrico de 44% en el sector, mientras que las zonas de bajo vigor cuentan con un aporte hídrico del 69%, con su respectivo déficit de 31%. Para el Eq. 16 Sector 3, también presenta una baja variabilidad para la var. Arbosana, presentado las zonas de alto vigor un aporte hídrico del 39%, lo que representa un déficit hídrico del 61%, el más alto de los sectores

monitoreados, mientras que para las zonas de bajo vigor se presenta un aporte hídrico del 47%, con su respectivo déficit hídrico del 53%.

Se aprecian diferencias en el comportamiento durante la temporada para ambas variedades, producto del mayor desarrollo expresado en la variedad Arbequina durante los meses de verano, que no se presenta tan marcado en la variedad Arbosana. Se alcanzan valores de transpiración acumulada más altos en la variedad Arbosana, con un promedio de transpiración de 6.448 m³/ha/temporada, en comparación a la variedad Arbequina con un promedio levemente más bajo de 6.342 m³/ha/temporada.

Para analizar mensualmente las condiciones del aporte de riego en los sectores analizados y estimar la magnitud del déficit de riego por época del año, a continuación, se gráfica el volumen de riego aportado mensualmente durante la temporada 2019/20 junto a las necesidades estimadas de acuerdo a la metodología descrita para zonas con niveles de vigor alto y bajo de los sectores (Figura 19, Figura 20, Figura 21).

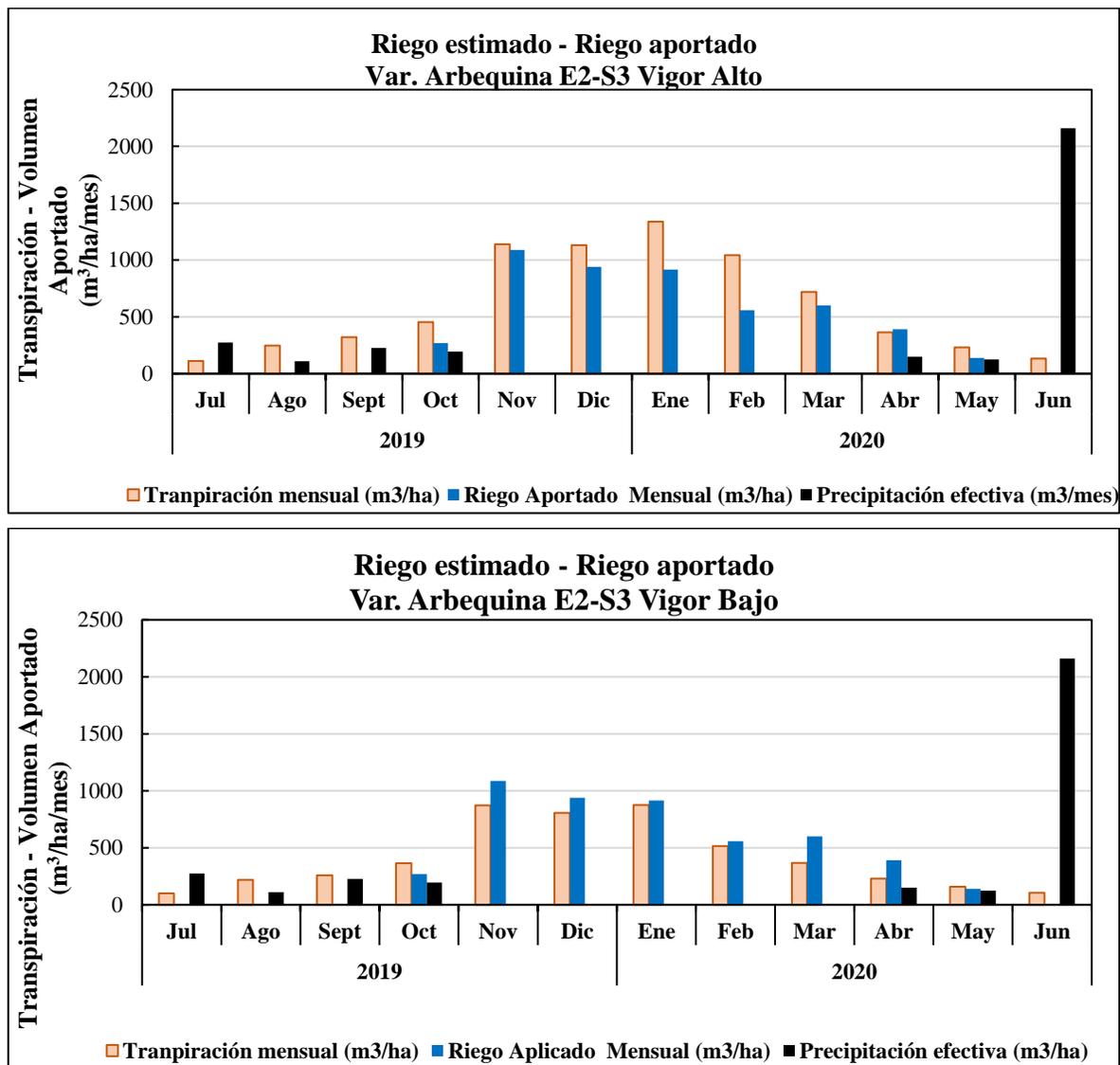


Figura 19. Comparación mensual aportes de riego y necesidades modeladas de acuerdo al vigor del cultivo (Sector E2-S3, var. Arbequina, temporada 2019/20. Siracusa, Villa Prat).

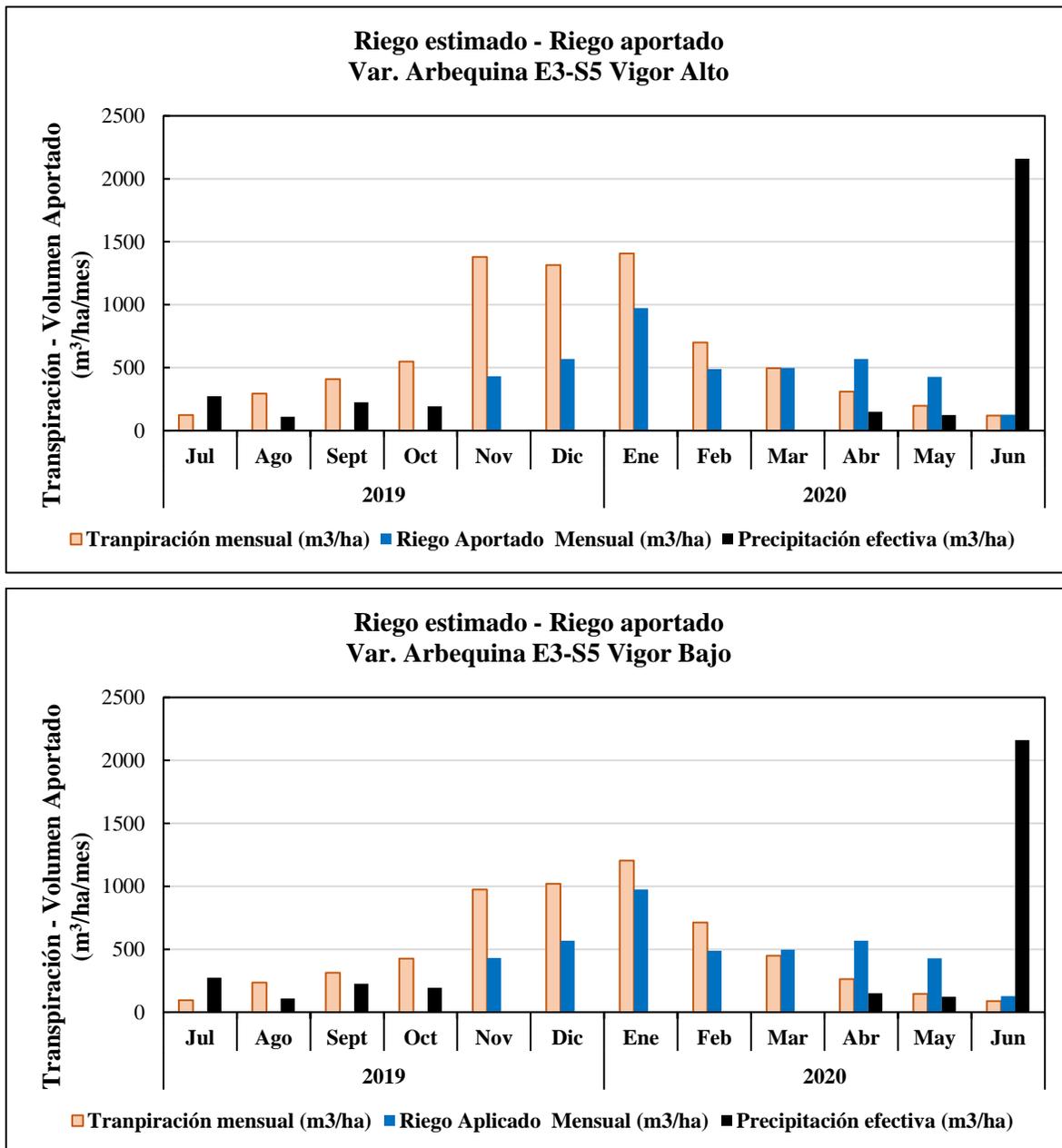


Figura 20. Comparación mensual aportes de riego y necesidades modeladas de acuerdo al vigor del cultivo (Sector E3-S5, var. Arbequina, temporada 2019/20. Siracusa, Villa Prat).

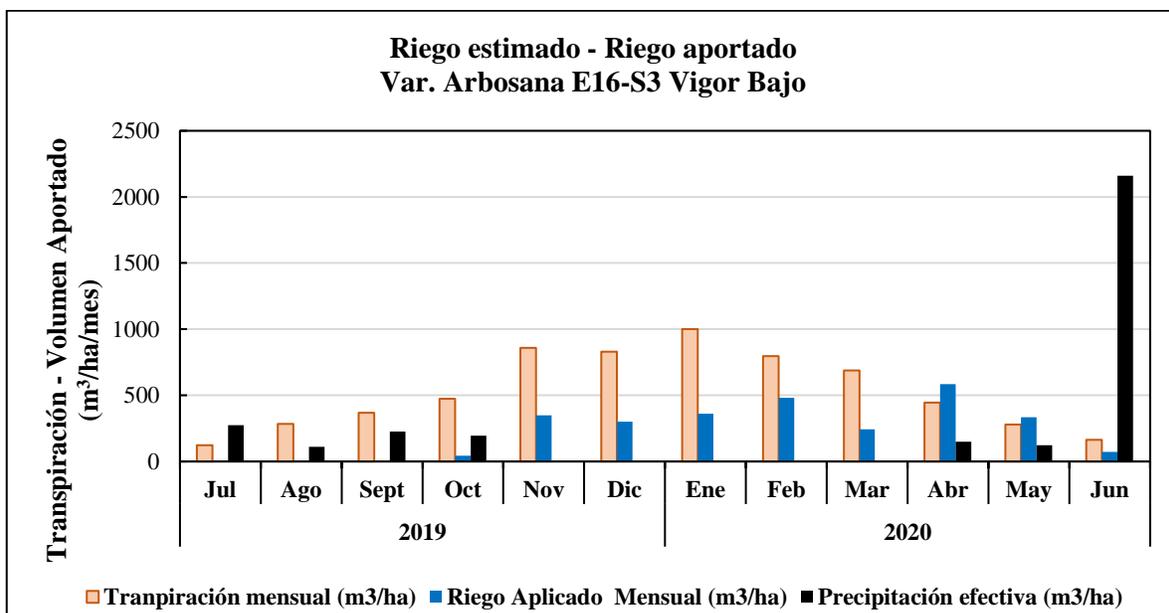
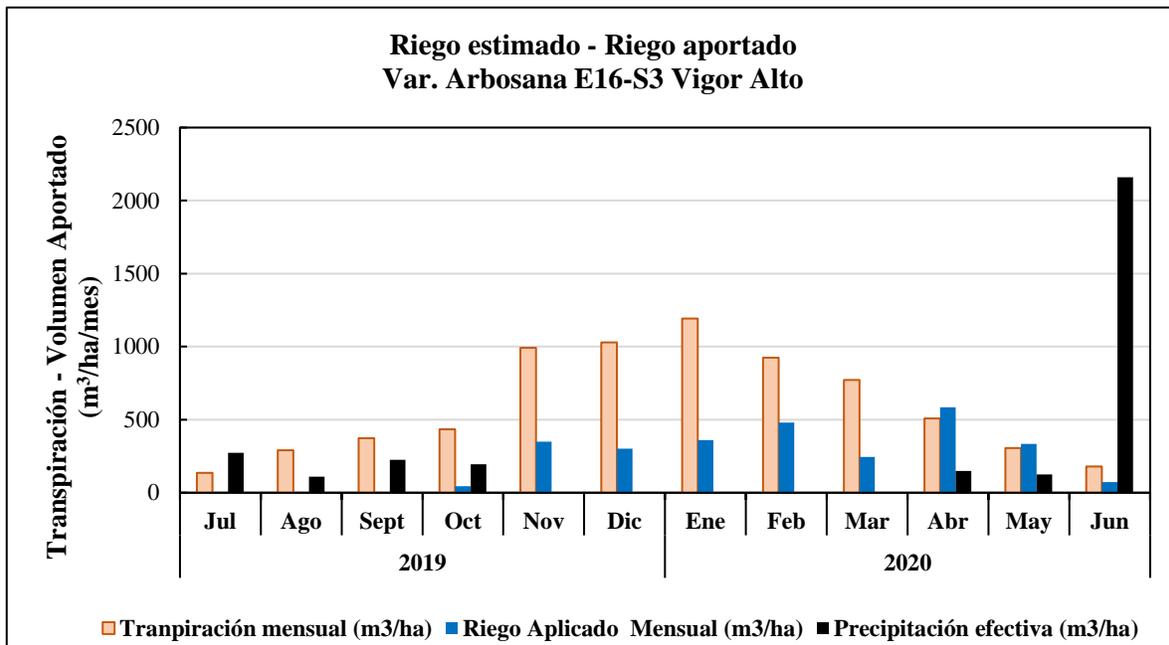


Figura 21. Comparación mensual aportes de riego y necesidades modeladas de acuerdo al vigor del cultivo (Sector E16-S3, var. Arbosana. Temporada 2019/20. Siracusa, Villa Prat).

Considerando la acumulación mensual de necesidades hídricas a reponer y el volumen de riego realmente aportado, se observó que existen diferencias deficitarias entre la tasa de transpiración estimada y el riego aportado durante todos los meses de la temporada analizada.

Con objeto de cuantificar las diferencias entre el riego aportado y las necesidades de riego estimadas y los aportes de las lluvias, se calculó un factor de déficit (K_s) de acuerdo a la siguiente relación:

$$K_s = 1 - \frac{\text{riego aplicado} + \text{lluvia}}{\text{riego estimado por satelite}}$$

de este modo los valores de K_s cercanos a 100 indican que se suplieron las necesidades de transpiración, ya sea por riego y/o lluvia y el déficit hídrico es mínimo. Por el contrario, cuando el valor de K_s es cercano a 0 indica que las necesidades de transpiración no fueron repuestas con el aporte de riego y/o precipitaciones y el déficit hídrico fue máximo.

Como se puede apreciar en las Figura 22 y Figura 23, para el Eq. 2 Sector 3 de alto desarrollo para la variedad Arbequina, durante la mayor parte de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit hídrico no superior al 31%, exceptuando los meses de julio y octubre 2019, y desde abril a junio 2020. Durante estos meses fueron los momentos de la temporada en donde el cultivo dispuso de la totalidad de las necesidades hídricas y no tuvo valores deficitarios, en el caso del mes de julio producto del excedente hídrico aportado por precipitación, así como para el mes de junio 2020. Por el contrario, los meses de agosto y febrero presentan los menores balances hídricos, con déficit de 44 a 54%.

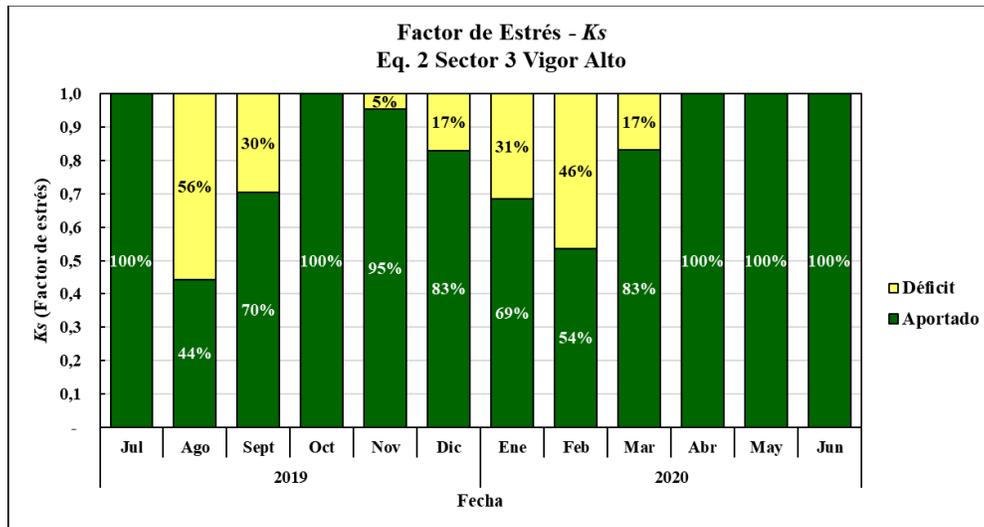


Figura 22. Factor de déficit (K_s) estimado en sector E2-S3 var. Arbequina de alto desarrollo durante la temporada 2019/20. Siracusa, Villa Prat.

Al tomar en cuenta los niveles de aporte y déficit para la zona de bajo vigor del Eq. 2 Sector 3, el déficit a lo largo de la temporada no supera el 13% en general, a excepción del mes de agosto con el menor balance hídrico de la temporada, con déficit del 50, el resto de la temporada se suplen por completo las necesidades de la zona de bajo vigor del sector (Figura 23).

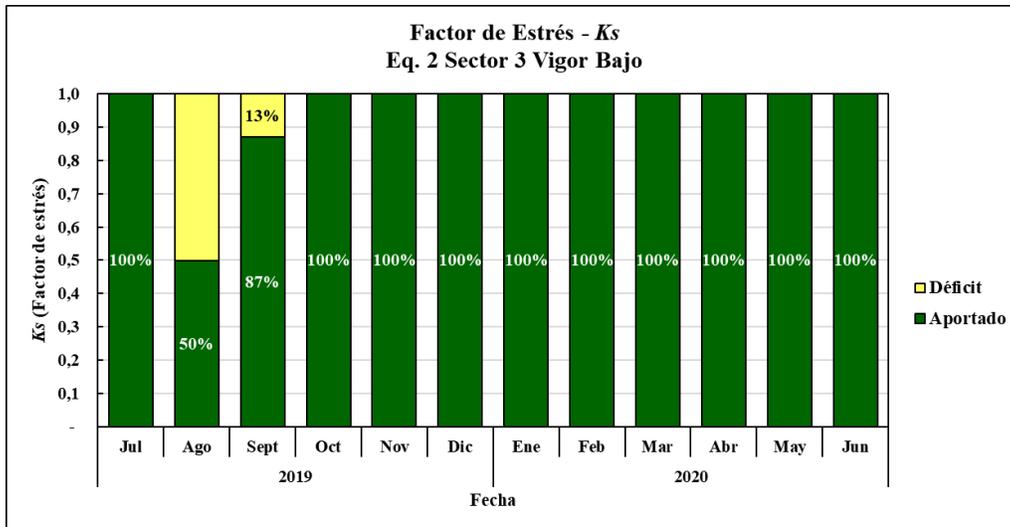


Figura 23. Factor de déficit (K_s) estimado en sector E2-S3 var. Arbequina de bajo desarrollo durante la temporada 2019/20. Siracusa, Villa Prat.

Ahora analizando el comportamiento de zonas de alto vigor (Figura 24) y bajo vigor (Figura 25) para el Eq. 3 Sector 5, durante la mitad de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit hídrico mayor al 45%, exceptuando los meses de julio 2019, y desde marzo a junio 2020. Durante estos meses el cultivo dispuso de la mayoría o la totalidad de las necesidades hídricas y no presentó valores deficitarios, en el caso del mes de julio 2019 y junio 2020 producto del excedente hídrico aportado por precipitación. Por el contrario, los meses de agosto a diciembre presentan los menores balances hídricos, con déficit de 45 al 69%.

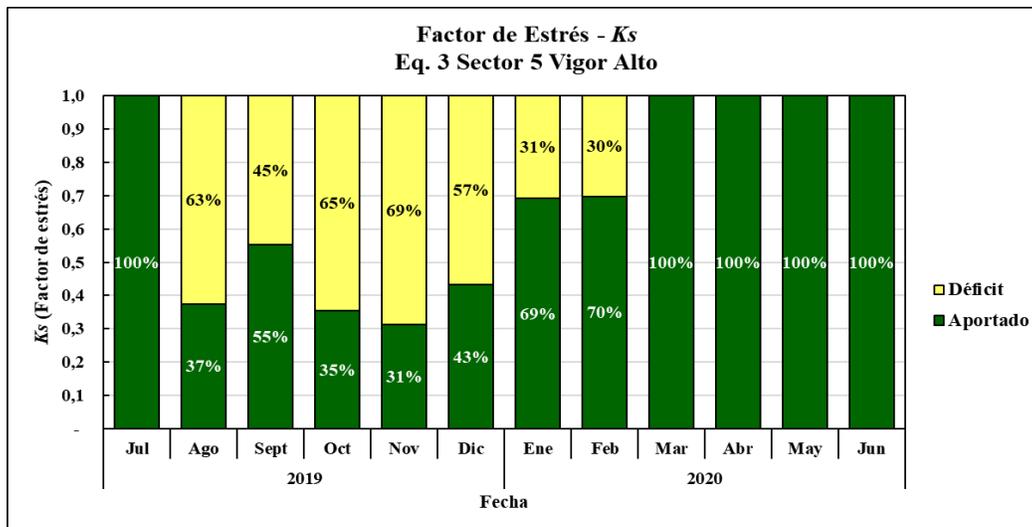


Figura 24. Factor de déficit (K_s) estimado en sector E3-S5 var. Arbequina de alto desarrollo durante la temporada 2019/20. Siracusa, Villa Prat.

Los niveles de aporte para la zona de bajo vigor del Eq. 3 Sector 5 se manifiestan dentro del rango de 44% a 81%, exceptuando mes de julio 2019 y marzo a junio 2020 con aporte hídrico del 100%. El déficit a lo largo de la temporada de riego supera el 32% y alcanza valores de 56%, correspondiente al mes de noviembre, con el menor balance hídrico de la temporada.

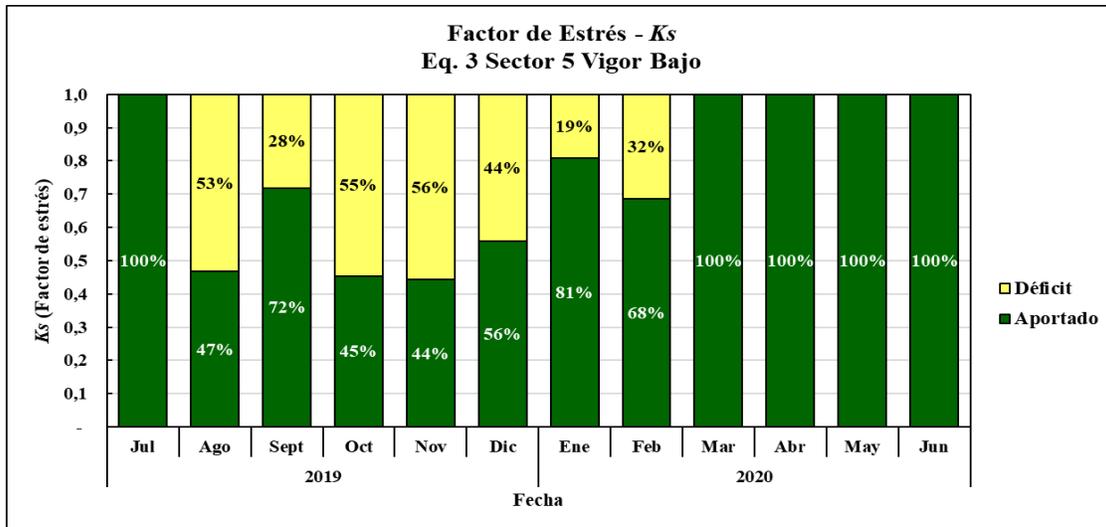


Figura 25. Factor de déficit (K_s) estimado en sector E3-S5 var. Arbequina de bajo desarrollo durante la temporada 2019/20. Siracusa, Villa Prat.

Por último, se analiza el comportamiento de zonas de alto vigor (Figura 26) y bajo vigor (Figura 27) para el Eq. 16 Sector 3, durante gran parte de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit hídrico mayor al 39%, exceptuando los meses de julio 2019, y abril a junio 2020. Durante estos meses el cultivo dispuso de la mayoría o la totalidad de las necesidades hídricas y no presentó valores deficitarios, en el caso del mes de julio 2019 y junio 2020 producto del excedente hídrico aportado por precipitación. Por el contrario, los meses de agosto, noviembre, diciembre y enero presentan los menores balances hídricos, con déficit de 62 al 71%.

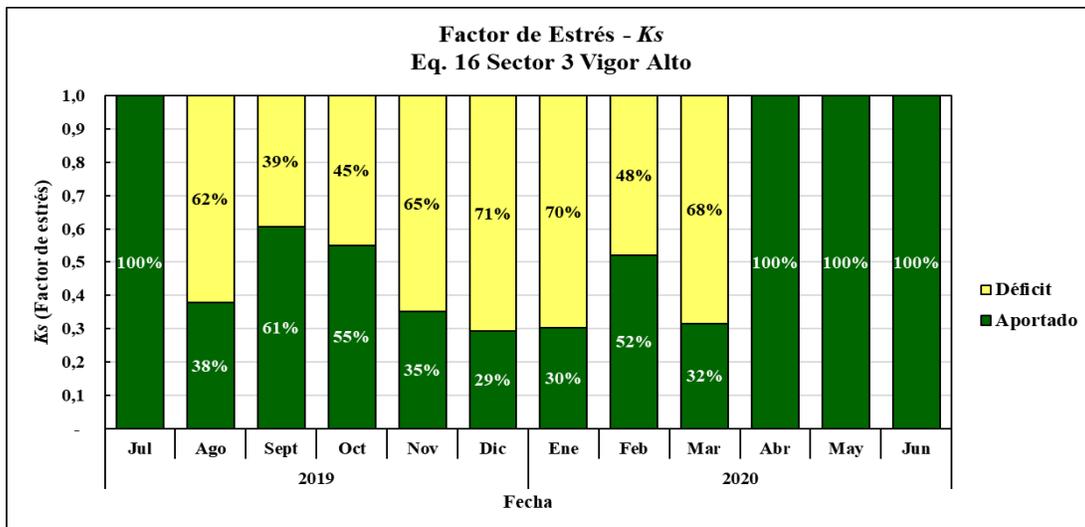


Figura 26. Factor de déficit (K_s) estimado en sector E16-S3 var. Arbequina de alto desarrollo durante la temporada 2019/20. Siracusa, Villa Prat.

Los niveles de aporte para la zona de bajo vigor del Eq. 16 Sector 3 se manifiestan dentro del rango de 36% a 69%, exceptuando mes de julio 2019 y abril a junio 2020 con aporte hídrico del 100%. El déficit a lo largo de la temporada de riego supera el 35% y alcanza valores de 64% para el mes de diciembre con el menor balance hídrico de la temporada.

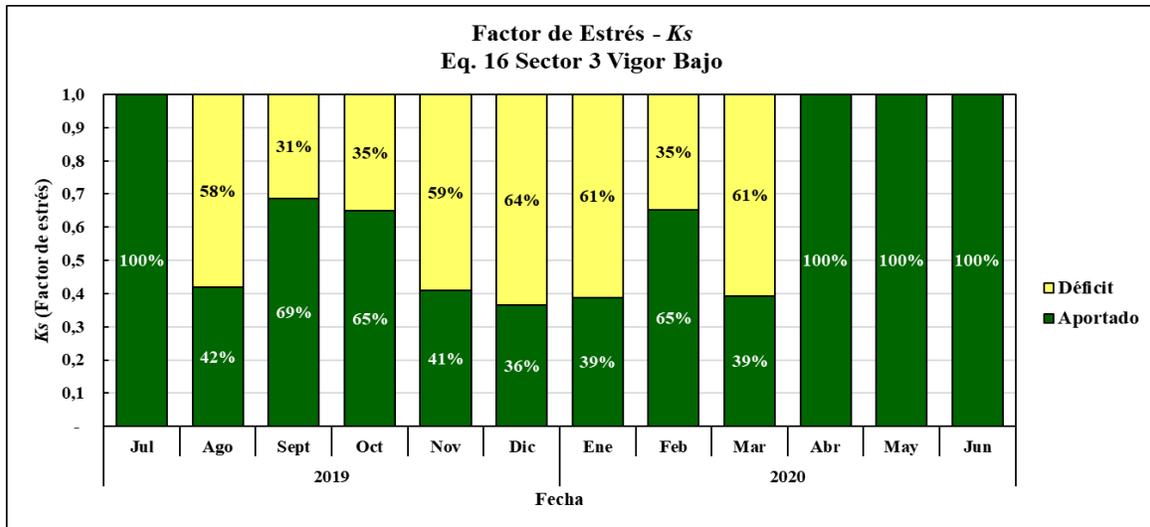


Figura 27. Factor de déficit (K_s) estimado en sector E16-S3 var. Arbequina de bajo desarrollo durante la temporada 2019/20. Siracusa, Villa Prat.

Distribución espacial de la Transpiración

Al analizar el comportamiento de la transpiración acumulada durante la temporada completa en los sectores monitoreados, se pudo estimar que el valor promedio de transpiración para el Eq. 2 Sector 3 fue de 638 mm/año, con un valor máximo de 808 mm/año y mínimo de 321 mm/año.

A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 27%, 5,21 ha) se concentra en el rango de 600 mm a 650 mm al año, seguido del rango de más de 700 mm de transpiración anual en un 25% de la superficie (4,8 ha). En la Figura 28 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

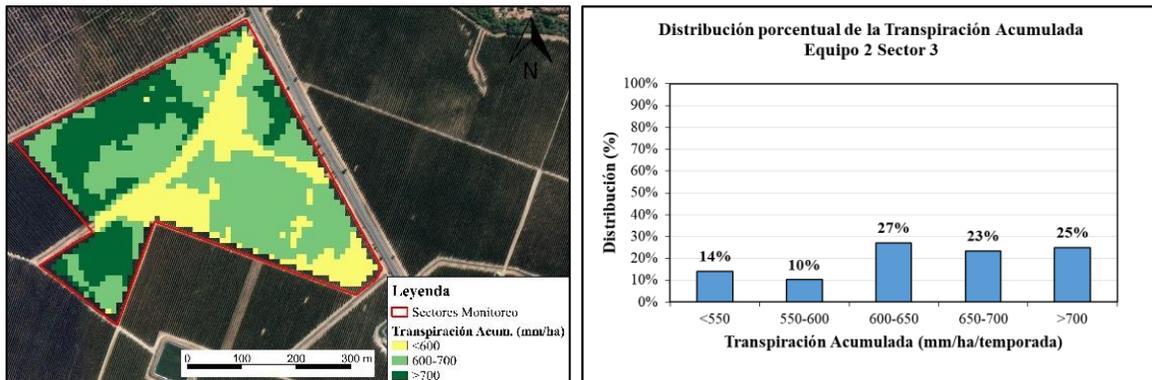


Figura 28. Distribución de los rangos de transpiración acumulada para el Eq. 2 Sector 3, Siracusa, Villa Prat.

Para el caso del Eq. 3 Sector 5 se pudo estimar que el valor promedio de transpiración de 676 mm/año, con un valor máximo de 817 mm/año y mínimo de 381 mm/año. A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 31%, 4,74 ha) se concentra en el rango de 700 mm a 750 mm al año, seguido del rango de 650 - 700 mm de transpiración anual en un 30% de la superficie (4,59 ha). En la Figura 28 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

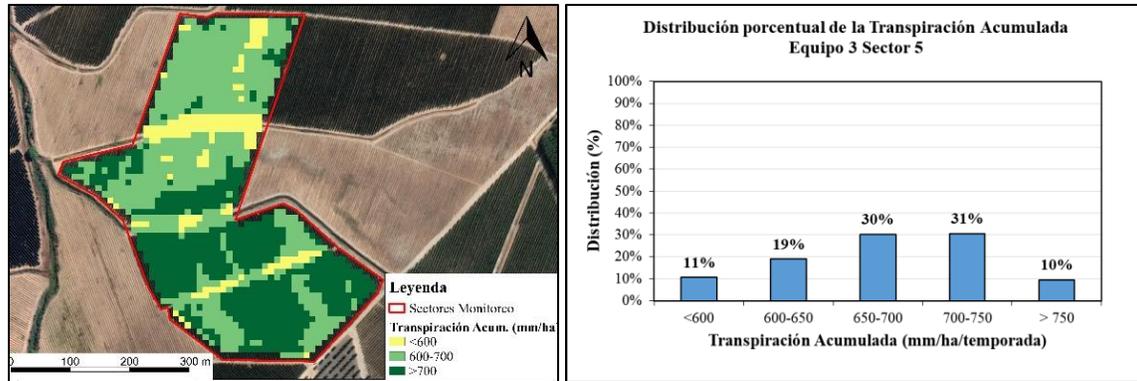


Figura 29. Distribución de los rangos de transpiración acumulada para el Eq. 3 Sector 5, Siracusa, Villa Prat.

Por último, el Eq. 16 Sector 3 se pudo estimar que el valor promedio de transpiración de 619 mm/año, con un valor máximo de 772 mm/año y mínimo de 361 mm/año. A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 56%, 4,91 ha) se concentra en el rango de 600 mm a 650 mm al año, seguido del rango de 550 - 600 mm de transpiración anual en un 20% de la superficie (1,75 ha). En la Figura 28 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

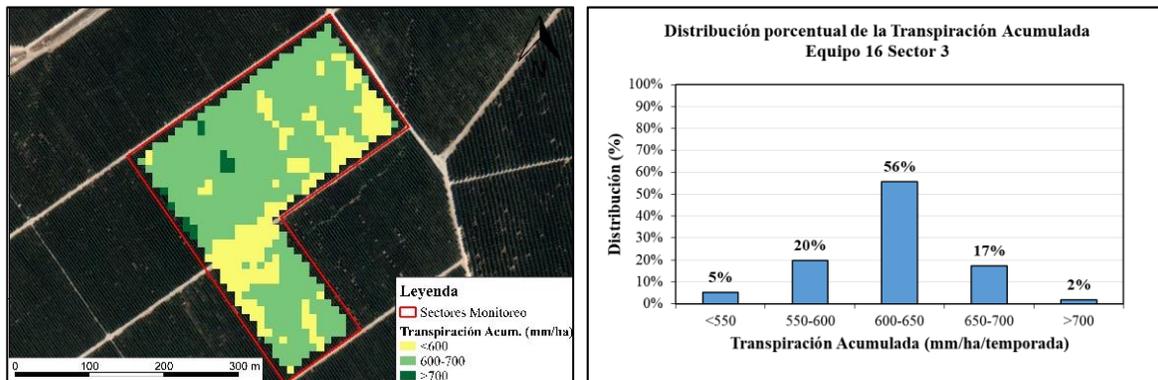


Figura 30. Distribución de los rangos de transpiración acumulada para el Eq. 16 Sector 3, Siracusa, Villa Prat.



Literatura citada

Agrimed, 2017. Atlas Agroclimático de Chile, estado actual y tendencias del clima. Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED). Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Chile.

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 - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manage.* 98, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011>.

Bausch, W.C., 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46, 213–222. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90096-G](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90096-G).

Bausch, W.C., 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manage.* 27, 55–68. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01125-3](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01125-3).

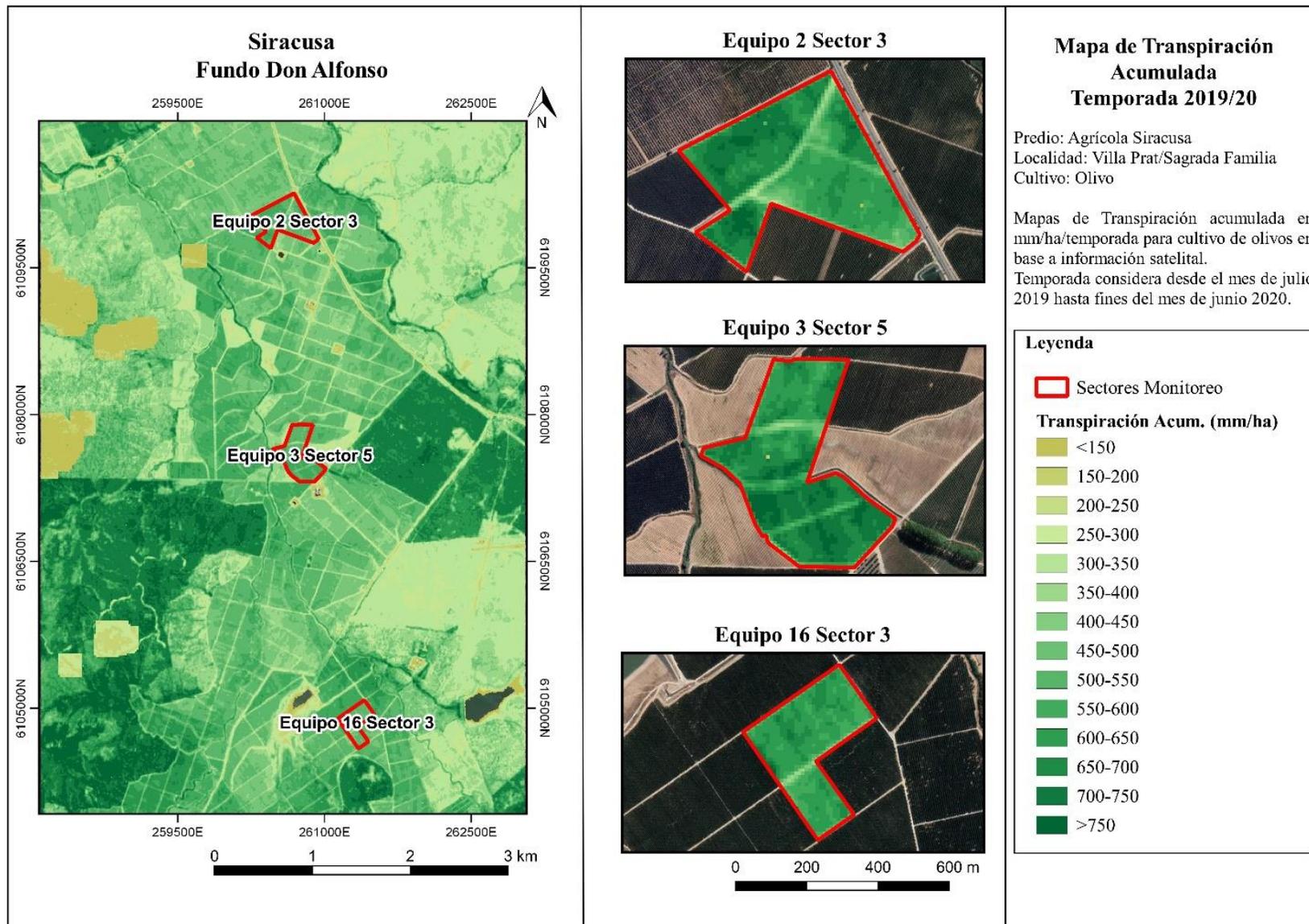
Bausch, W.C., Neale, C.M.U., 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Trans. ASAE* 30, 703–709. <https://doi.org/10.13031/2013.30463>.

Heilman et al., 1982 Heilman, J.L., Heilman, W.E., Moore, D.G., 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agron. J.* 74, 967–971. <https://doi.org/10.2134/agronj1982>.

Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heermann, D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. ASAE* 32, 1891–1899.

Anexo

Mapa de Transpiración Temporada 2019/20. Sectores Fundo Don Alfonso, Siracusa, Villa Prat.



Informe Consultoría Manejo del Riego AGRÍCOLA ÍZARO

Introducción

Con objeto de implementar un trabajo colaborativo entre el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA y la Asociación de Productores de Aceite Oliva ChileOliva, se implementó un trabajo de consultoría en la cual se analizaron las metodologías para la definición de las necesidades de riego del cultivo y aspectos asociados al manejo agronómico del cultivo de olivos.

El principal objetivo de la consultoría es transferir un marco conceptual estandarizado para la definición de las necesidades de riego, junto a la capacitación en el uso de nuevas tecnologías para el monitoreo del cultivo y de los factores ambientales que influyen en el consumo hídrico y por tanto en la programación del riego.

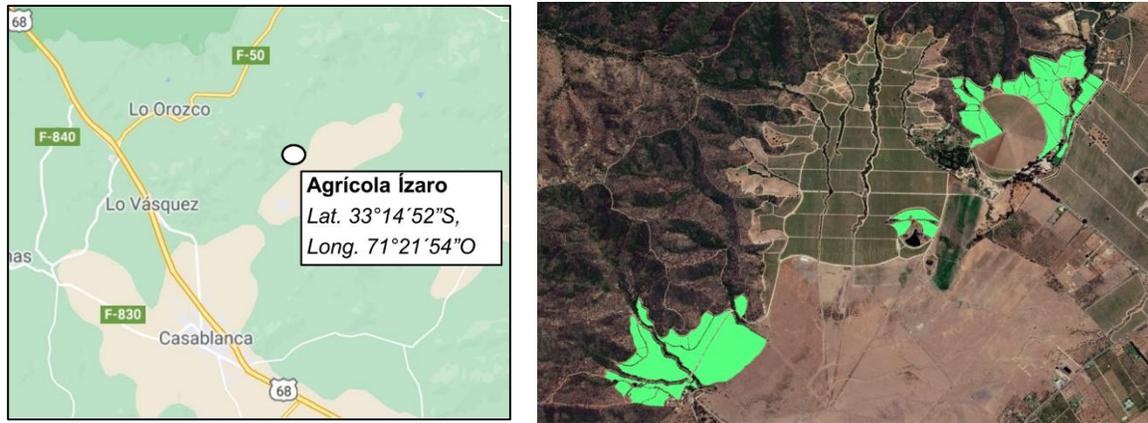
En este trabajo se elaboró un análisis comparativo entre los criterios utilizados actualmente por el productor para definir los volúmenes de riego aportados al cultivo (manejo tradicional del riego) y las necesidades de riego estimadas a partir del marco conceptual propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998), con la innovación tecnológica del uso del índice de vegetación satelital NDVI para estimar un Coeficiente de Cultivo y el uso de información de la demanda ambiental del sitio para estimar la tasa de transpiración máxima del cultivo.

De este modo, en el siguiente informe se analiza el desarrollo del cultivo utilizando información del índice de vegetación satelital NDVI, factores ambientales que influyen en el consumo hídrico del cultivo, las metodologías para la definición de las necesidades de riego en el campo y asistido con información satelital y la variabilidad espacial de la tasa de transpiración del cultivo dentro de los sectores analizados.



Sitio de análisis

Los trabajos fueron realizados en un predio ubicado en la comuna de Casablanca, Región de Valparaíso. En la Figura 2 se indica la ubicación geográfica del campo, así como sectores analizados y su distribución espacial.



Predio: Agrícola Ízaro
 Localidad: Casablanca
 Comuna: Casablanca
 Provincia: Valparaíso
 Región: Valparaíso
 Chile

Figura 1. Ubicación del predio y sitio de análisis (Agrícola Ízaro, Casablanca).

Los sectores analizados corresponden a cuatro cuarteles, plantados con las variedades Arbequina, Frantoio, Arbosana y Leccino (Figura 2). En el Cuadro 1 se indica un resumen de las características de los sitios analizados en el trabajo.

Cuadro 1. Equipo, superficie, variedades y marcos de plantación de los sitios bajo análisis.

Sector	Superficie (ha-SIG)	Variedad(es)	Marco de plantación (m)	Plantas/ha
H1	5,0	Arbequina, Frantoio, Leccino, Arbosana	6 x 4	417
H2	5,2	Arbequina, Frantoio, Leccino, Arbosana	6 x 4	417
H3	6,1	Arbequina, Frantoio, Leccino	6 x 4	417
H4	4,4	Arbequina, Frantoio, Leccino, Arbosana	6 x 4	417

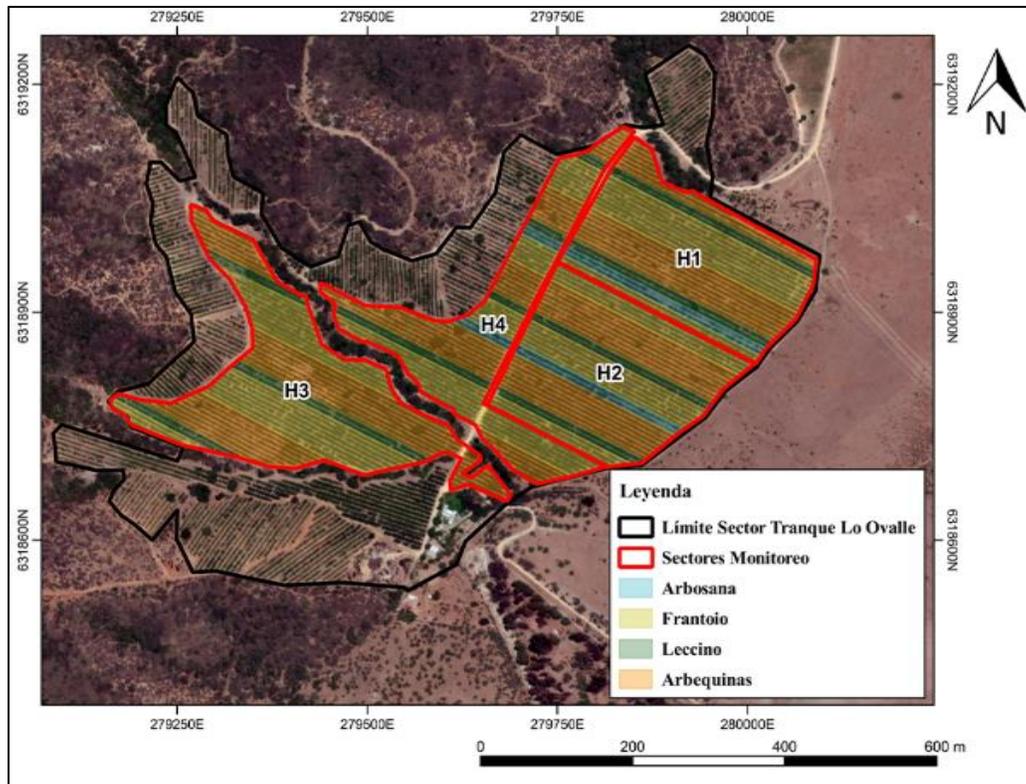


Figura 2. Ubicación del predio y sitios analizados (Agrícola Izaro, Casablanca).

Características climáticas zona de estudio

El predio analizado se encuentra en el límite sur del distrito agroclimático denominado Quillota (Agrimed, 2017) (Figura 3). El clima del distrito corresponde a templado cálido supratermal y régimen de humedad semiárido. La temperatura del aire promedio varía entre máximos en el mes de enero de 27,5 °C y mínimos en el mes de julio de 5,4 °C. Dentro del distrito se registran valores máximos que oscilan entre 30 °C y 25,9 °C y valores de la temperatura mínima entre 7 °C y 4,8 °C. En promedio el distrito presenta 339 días consecutivos libres de heladas y al año se registran en promedio 5 heladas. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa de los cultivos tiene una longitud de 12 meses. La sumatoria anual de días grados es de 1.754 y 351 horas de frío (acumuladas hasta el 31 de Julio). Por su parte, La media anual de precipitaciones se sitúa en 429 mm/año, con un período seco de 8 meses de duración y un déficit hídrico de 1017 mm/año. El período húmedo dura 3 meses, durante los cuales se produce un excedente hídrico de 96 mm (Agrimed, 2017).

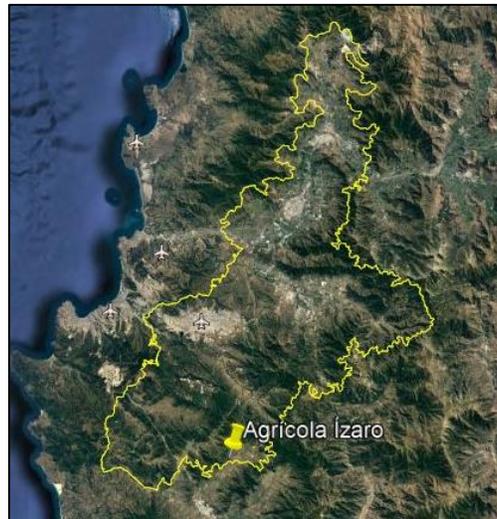


Figura 3. Distrito Agroclimático Quillota (Agrimed, 2017).

Para el análisis de los datos meteorológicos instantáneos (locales) se consideró la estación Casablanca de Agroclima perteneciente a la red meteorológica de la Fundación para el Desarrollo Frutícola FDF (Figura 4). De acuerdo a estos registros se observa que el comportamiento de la temperatura del aire se caracteriza por alcanzar valores máximos en torno a los 30°C en los meses de verano (con máximos en enero y febrero y un peak de 34,4°C en enero de 2017) y temperaturas mínimas invernales en torno a 3,1°C en los meses de invierno, con eventos extremos de -4,8°C en julio de 2018 y -4,4°C en mayo de 2019.

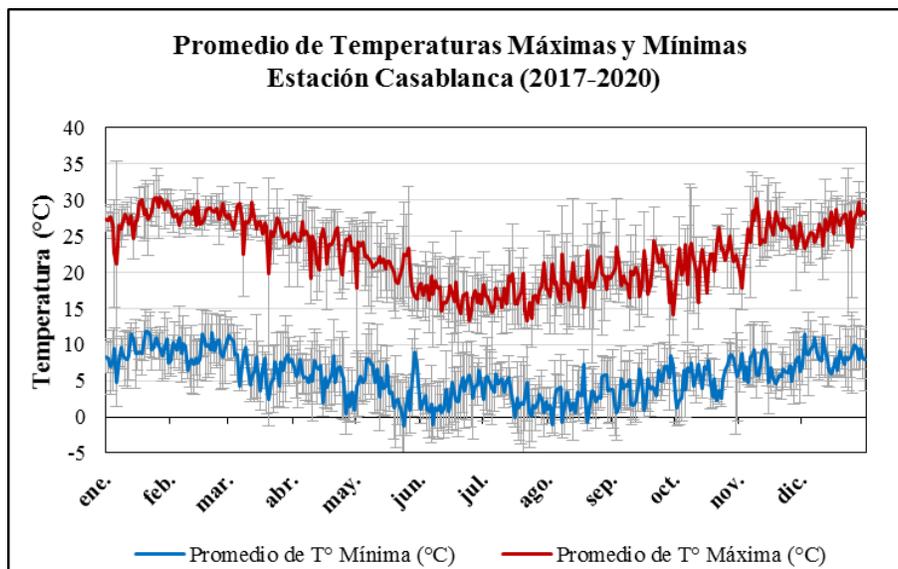


Figura 4. Comportamiento anual de las temperaturas máximas y mínimas en la zona de estudio. Estación Agroclima Casablanca (<https://agroclima.cl>).

En cuanto a las precipitaciones anuales, en los últimos cuatro años el monto anual de las precipitaciones alcanzó en promedio 247 mm/año, con montos anuales de 176,2 mm para la temporada 2019/20 y 79 mm en lo que va de la temporada 2020/21 (Figura 5).

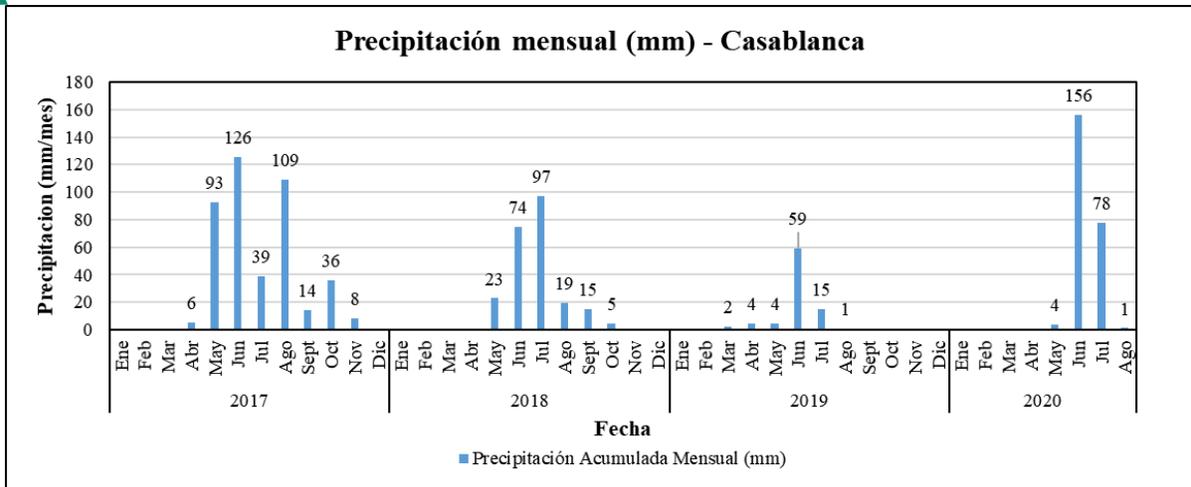


Figura 5. Precipitaciones mensuales años 2017 al 2020 en la zona de Casablanca (Estación Agrometeorológica Casablanca, www.agromet.cl).

En este sentido y de acuerdo a los datos históricos de precipitaciones, se evidencia una tendencia a la disminución de los montos anuales de las lluvias durante los últimos años. En este sentido, el año 2019 correspondió a un año con valores bajos extremos (85,2 mm), aumentando las precipitaciones durante el presente año. A pesar de este aumento es esperable una disminución de las reservas de agua en el suelo (Figura 6).

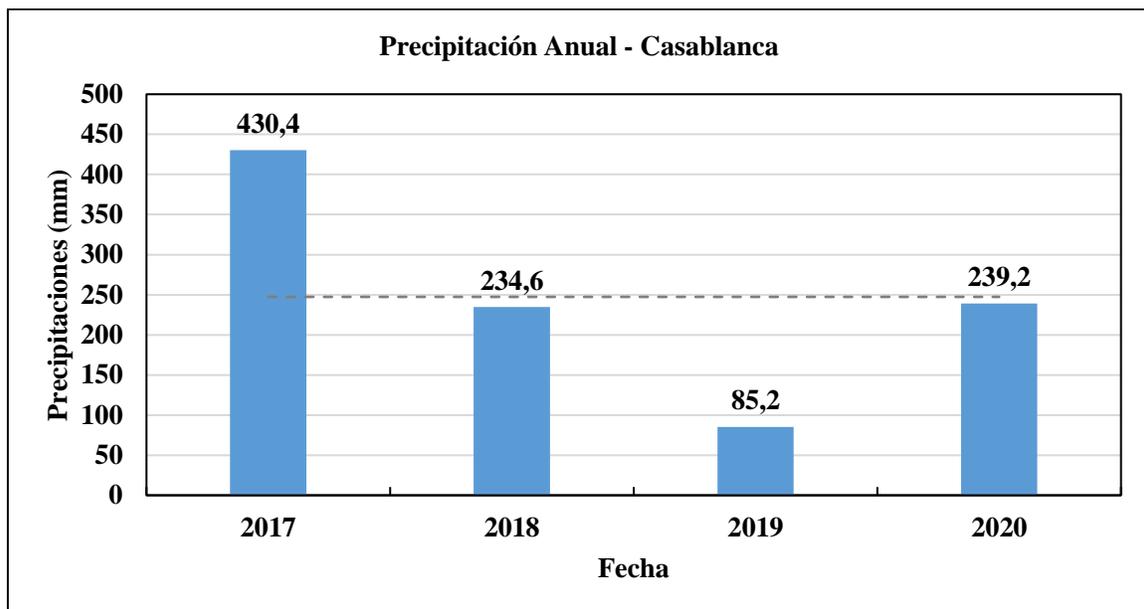


Figura 6. Precipitaciones anuales durante el período 2017 al 2020 registradas en la Estación Agrometeorológica Casablanca. (www.agromet.cl).

En cuanto a la distribución anual de la demanda ambiental representada por la variable evapotranspiración de referencia (E_{To} , Penman Monteith), esta alcanza valores anuales de 1115 mm/año, con valores máximos diarios en torno a 4,7 mm/día en el verano (máximo absoluto de 6,1 mm/día) y mínimos en torno a 1,4 mm/día, durante los meses invernales de junio y julio. En la Figura 7 se señala el promedio comportamiento anual de la E_{To} durante los meses de octubre a abril registrada por la estación Casablanca (RAN Agroclima.cl).

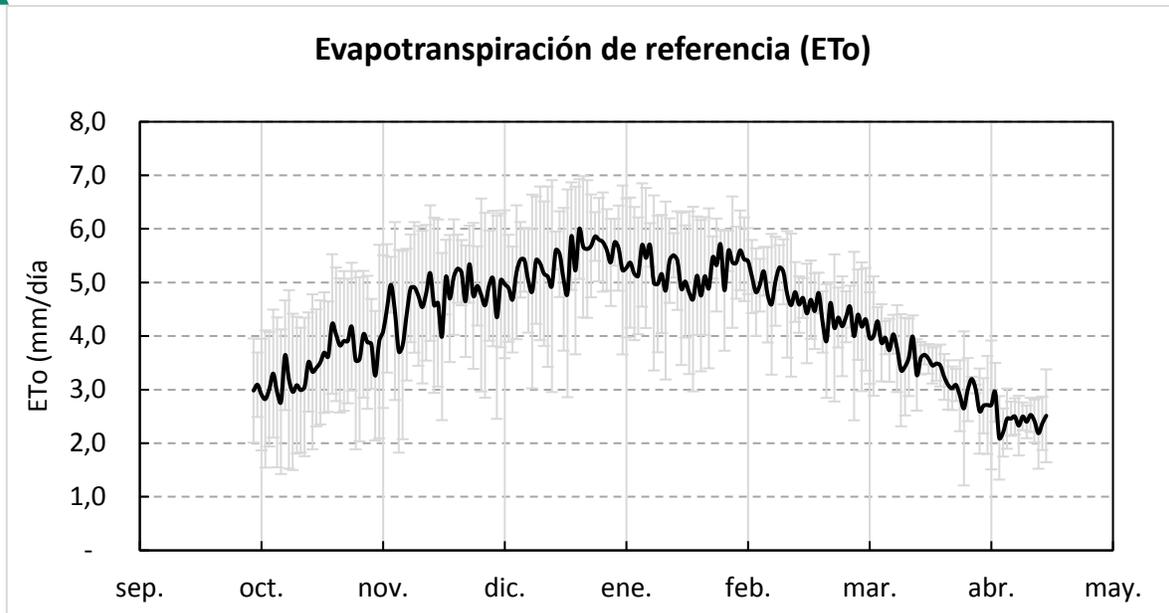
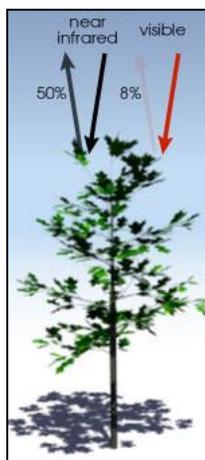


Figura 7. Evapotranspiración de referencia diaria (estación Casablanca, www.agroclima.cl).

Caracterización del desarrollo del cultivo

Para la caracterización del desarrollo anual del cultivo se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) obtenido a partir de series temporales de imágenes satelitales. Este índice de vegetación permite estimar la absorción de la radiación solar por parte del cultivo en ciertos espectros de la radiación solar, eliminando la respuesta de otros elementos en el terreno. La fórmula de cálculo se señala en la Figura 8:



$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada

NIR: Reflectividad en el infrarrojo cercano

R: Reflectividad en el rojo

Figura 8. Ecuación de cálculo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI y representación esquemática de las longitudes de onda involucradas en su cálculo.

Los satélites utilizados en el análisis del cultivo fueron el Sentinel 2A, Sentinel 2B y Landsat 8. En Cuadro 2 se señalan las principales características de los satélites utilizados en el estudio.

Cuadro 2. Características de las imágenes satelitales utilizados.

Programa	Satélite	Cobertura imagen (km)	Resolución temporal (días entre visita)	Resolución espacial (metros)
Landsat (NASA)	Landsat 8	185 x 185	16 días	30
Copernicus (ESA)	Sentinel 2A Sentinel 2B	100 x 100	10 días	10

Así mismo, el análisis de la variabilidad espacial del cultivo dentro del sector de análisis permite identificar y cuantificar diferencias en su desarrollo entre distintas zonas. Estas diferencias serán analizadas conjuntamente con el productor de manera de identificar factores que podrían estar induciendo la des uniformidad observada, como pueden ser características edáficas del sitio, inadecuada operación del equipo de riego u otros factores adversos que puedan limitar el desarrollo del cultivo.

En la Figura 9, Figura 10, Figura 11 y Figura 12 se señala el comportamiento anual del índice de vegetación NDVI en el sector H1, H2, H3 y H4, respectivamente, indicando zonas con alto, medio y bajo desarrollo del cultivo para las variedades Arbequina y Frantoio, durante la temporada 2019/20.

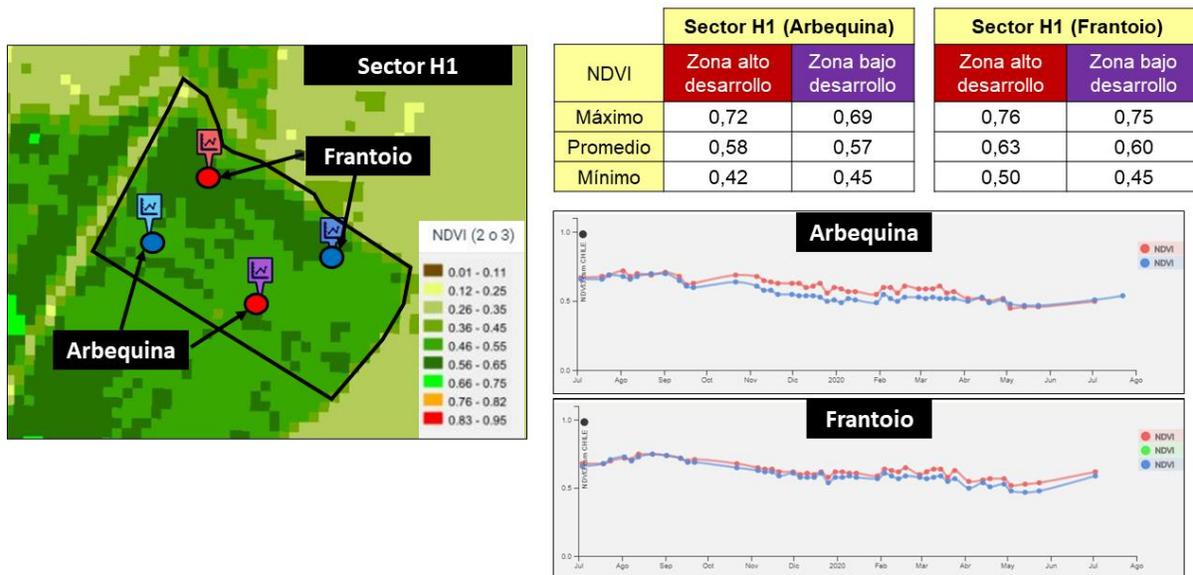


Figura 9. Vista general índice NDVI en el Sector H1, Agrícola Ízaro, Casablanca.

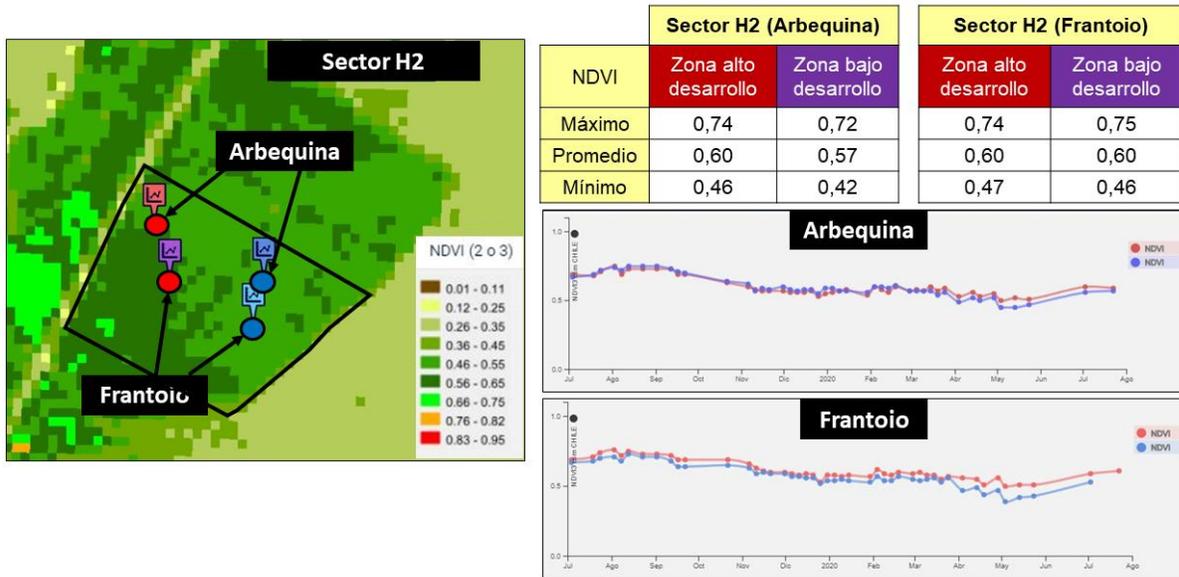


Figura 10. Vista general índice NDVI en el Sector H2, Agrícola Ízaro, Casablanca.

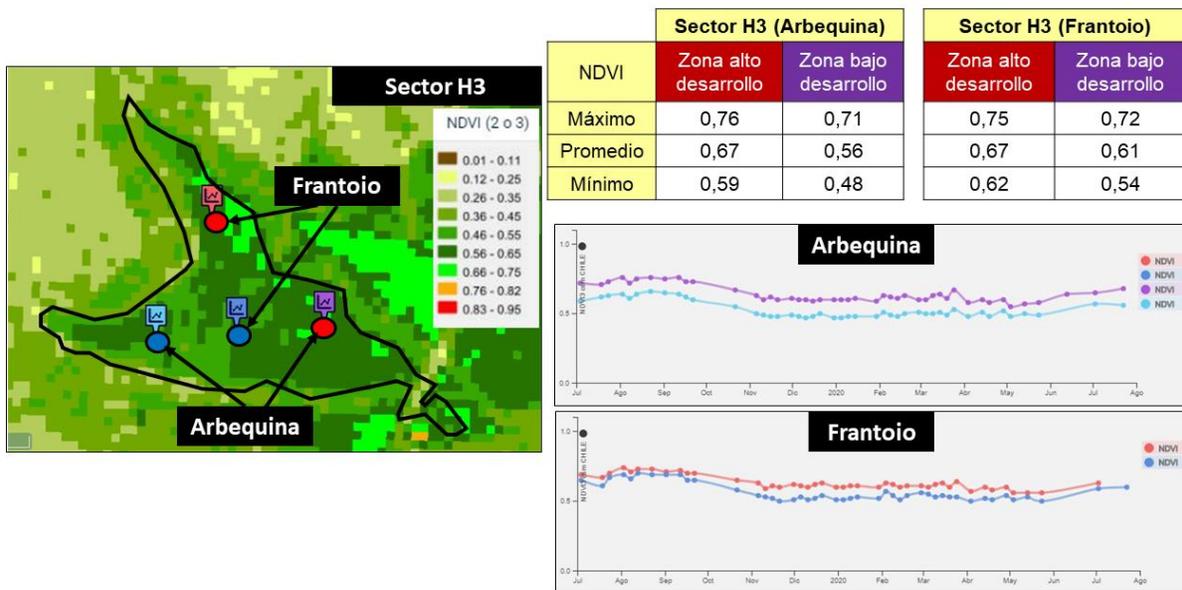


Figura 11. Vista general índice NDVI en el Sector H3, Agrícola Ízaro, Casablanca.

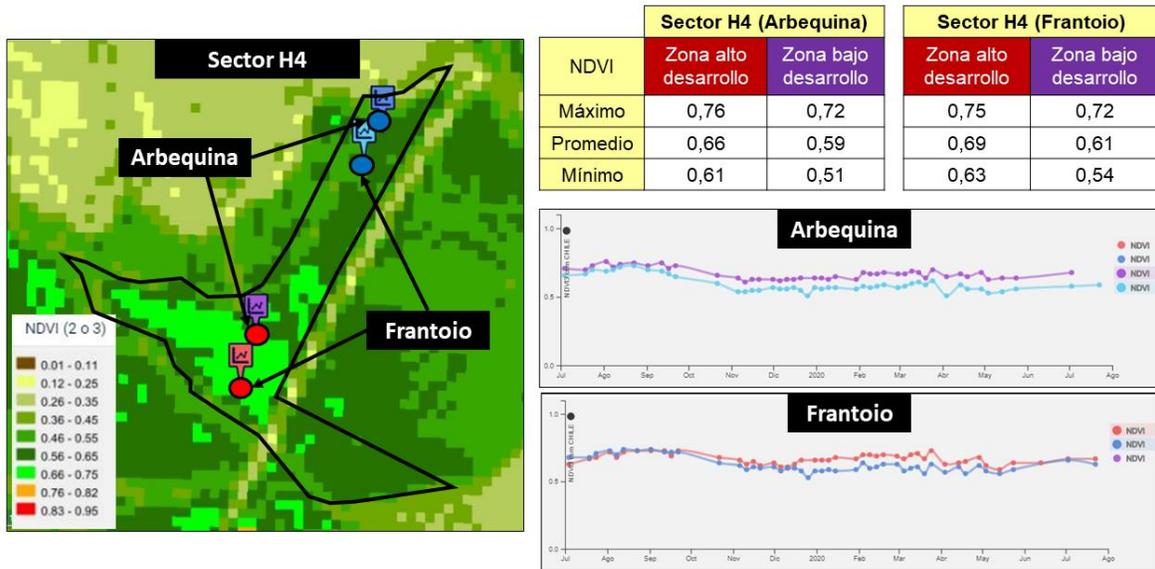


Figura 12. Vista general índice NDVI en el Sector H4, Agrícola Ízaro, Casablanca.

Como se puede apreciar los valores promedio más altos del índice NDVI se alcanzan en el sector H3 y H4, indicando el mayor desarrollo foliar de las plantas ahí presentes tanto de la variedad Arbequina como Frantoio. Más detalles de la variabilidad espacial del vigor del cultivo dentro de los sectores de riego, serán analizados en el capítulo necesidades de riego.

Manejo del riego

La determinación de las necesidades de riego de los cultivos se realizó utilizando el marco conceptual “evapotranspiración de referencia-coeficiente de cultivo”, propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998): La fórmula que resume su cálculo se indica a continuación:

$$ETc = Kc \times ETo$$

Donde;

ETc: Evapotranspiración de cultivo (mm/día)

Kc: Coeficiente de cultivo (adimensional)

ETo: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Para alimentar esta fórmula, se utilizaron por una parte los valores de la *ETo* estimados por las estaciones de la Red Agrometeorológica Nacional (RAN MINAGRI), disponible en el sitio web <https://agrometeorologia.cl/>. Debido a la falta de información para la temporada 2019/20, se recurrió a la información de la *ETo* histórica, disponible en la Plataforma PLAS. Esta información corresponde al promedio de la variable durante el periodo 1985 al 2015. Por otro lado, para los valores del *Kc* en cada sitio analizado, se utilizó la información disponible en la Plataforma Agrícola Satelital PLAS (<http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=plas>).

Coefficientes de cultivo

En este trabajo, para estimar el nivel de desarrollo de las plantas en el terreno se utilizó el índice de vegetación satelital NDVI y para estimar el potencial transpirativo del cultivo se definió un coeficiente de cultivo basal (*Kcb*) de acuerdo a lo propuesto por la literatura científica (Campos et al., 2010; Bausch, 1993; Bausch, 1995; Bausch and Neale, 1987; Heilman et al., 1982; Neale, et al., 1989). La relación utilizada para obtener el *Kcb* se indica en la siguiente fórmula:

$$Kc = 1,51 \times NDVI - 0,23$$

En las Figura 13, Figura 14, se señala el comportamiento anual del coeficiente de cultivo promedio para las plantas de las variedades Arbequina y Frantoio de los sectores H1, H2, H3 y H4. A partir del comportamiento anual del Kcb se puede observar que en el período invernal los valores del Kcb son más altos indicando posiblemente mayor desarrollo del cultivo durante ese período (menor demanda ambiental) o la presencia de malezas. Así mismo, los menores valores del Kcb se observan en los meses de fines de primavera y verano (octubre a diciembre), probablemente debido a la mayor demanda del ambiente y el efecto de déficit del aporte hídrico sobre el cultivo.

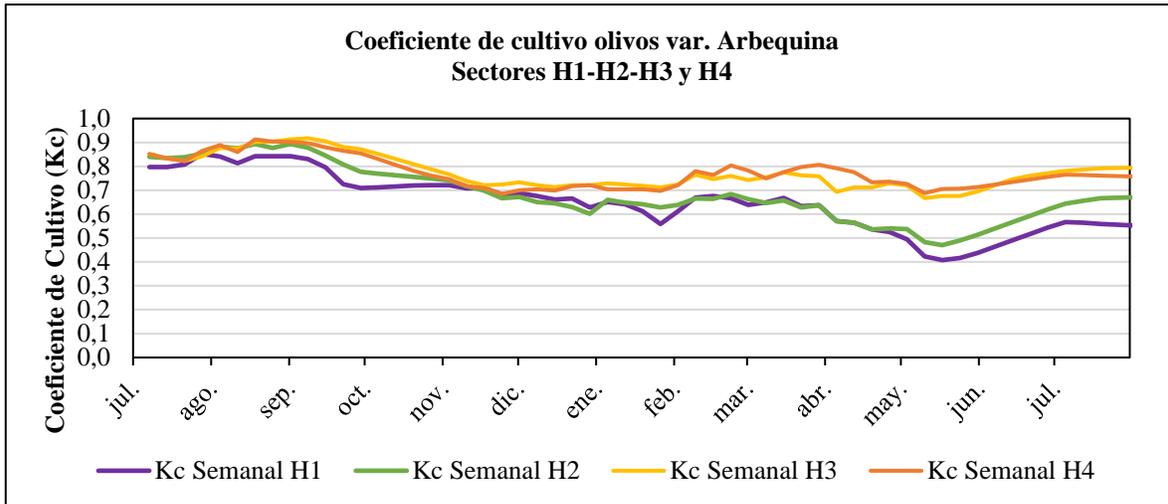


Figura 13. Comportamiento anual del Kc durante la temporada 2019/20 en los sectores H1, H2, H3 y H4, var. Arbequina. Agrícola Ízaro, Casablanca.

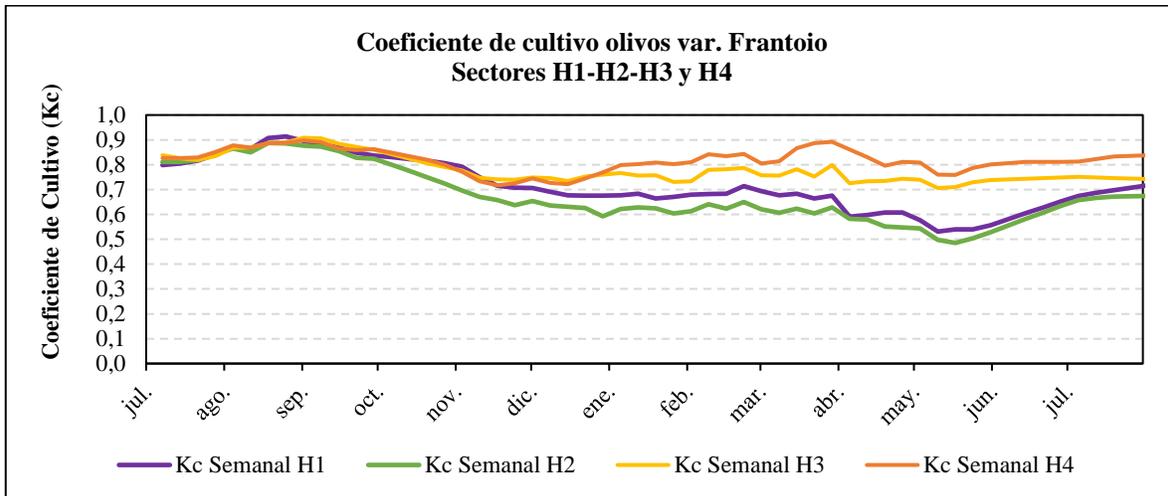


Figura 14. Comportamiento anual del Kc durante la temporada 2019/20 en los sectores H1, H2, H3 y H4, var. Frantoio. Agrícola Ízaro, Casablanca.

En el Cuadro 3 se presenta un resumen de valores de Kc para cada sector y específicamente dos variedades (Arbequina y Frantoio), de vigor alto y bajo identificado.

Cuadro 3. Resumen de valores de Kc máximo, mínimo y promedio en los sectores analizados para zonas de distinta variedad y con distinto nivel de desarrollo.

Variedad	Sector	Nivel Desarrollo	Kc Satelital			
			Máximo	Promedio	Mínimo	
Arbequina	H1	Alto	0,85	0,65	0,41	
		Bajo	0,81	0,63	0,45	
	H2	Alto	0,89	0,68	0,47	
		Bajo	0,85	0,62	0,40	
	H3	Alto	0,92	0,77	0,67	
		Bajo	0,84	0,61	0,50	
	H4	Alto	0,91	0,77	0,68	
		Bajo	0,86	0,67	0,55	
	Promedio			0,87	0,68	0,52

Frantoio	H1	Alto	0,91	0,72	0,53	
		Bajo	0,90	0,67	0,45	
	H2	Alto	0,89	0,68	0,49	
		Bajo	0,90	0,68	0,47	
	H3	Alto	0,91	0,78	0,71	
		Bajo	0,86	0,69	0,58	
	H4	Alto	0,90	0,82	0,72	
		Bajo	0,85	0,69	0,58	
	Promedio			0,89	0,72	0,57

Como se puede observar, en la variedad Arbequina los valores de Kc máximo están en el rango 0,91 a 0,81, mientras que los valores mínimos se sitúan en el rango 0,68 a 0,4. Para la variedad Frantoio se presentan valores de Kc máximos de 0,91 a 0,85, mientras que los valores mínimos se sitúan en el rango de 0,71 a 0,45. El Kc promedio anual estimado en Arbequina fue 0,68, mientras que para Frantoio fue de 0,72. La proporción de cada zona se analiza en el capítulo de variabilidad de la transpiración.

Con objeto de comparar los valores de coeficiente de cultivo utilizados en el manejo tradicional del riego en el campo, con los valores promedios estimados a partir del índice de vegetación satelital, se analizó la información aportada por el productor relativa al manejo del riego durante la temporada 2019/2020. A partir de este análisis, se observó que existen diferencias entre ambos, que se traducen en diversas intensidades de déficit en el aporte del riego durante la temporada. En las Figuras 14, Figura 15, Figura 16 y Figura 17 comparan los valores de Kc obtenido a través del modelamiento satelital y los estimados en relación a los aportes de riego mensuales informados, para los sectores H1, H2, H3 y H4, respectivamente.

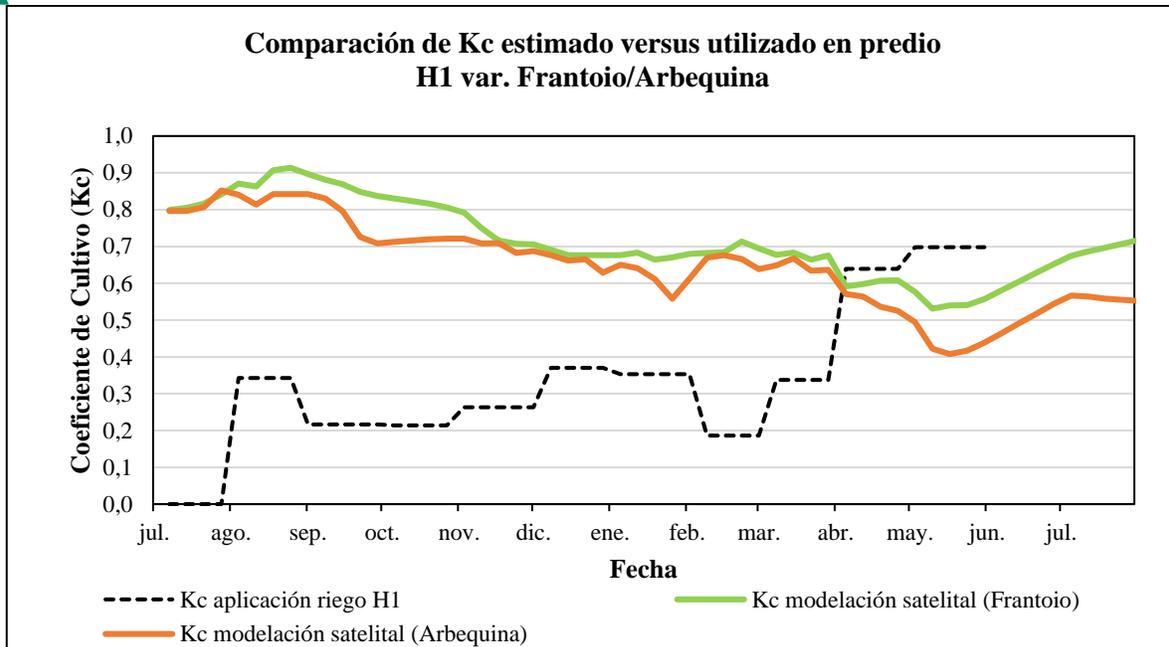


Figura 15. Comparación del coeficiente de cultivo Kc estimado a través del modelamiento satelital y el utilizado operativamente en el riego del predio (Sector H1). Agrícola Ízaro, Casablanca.

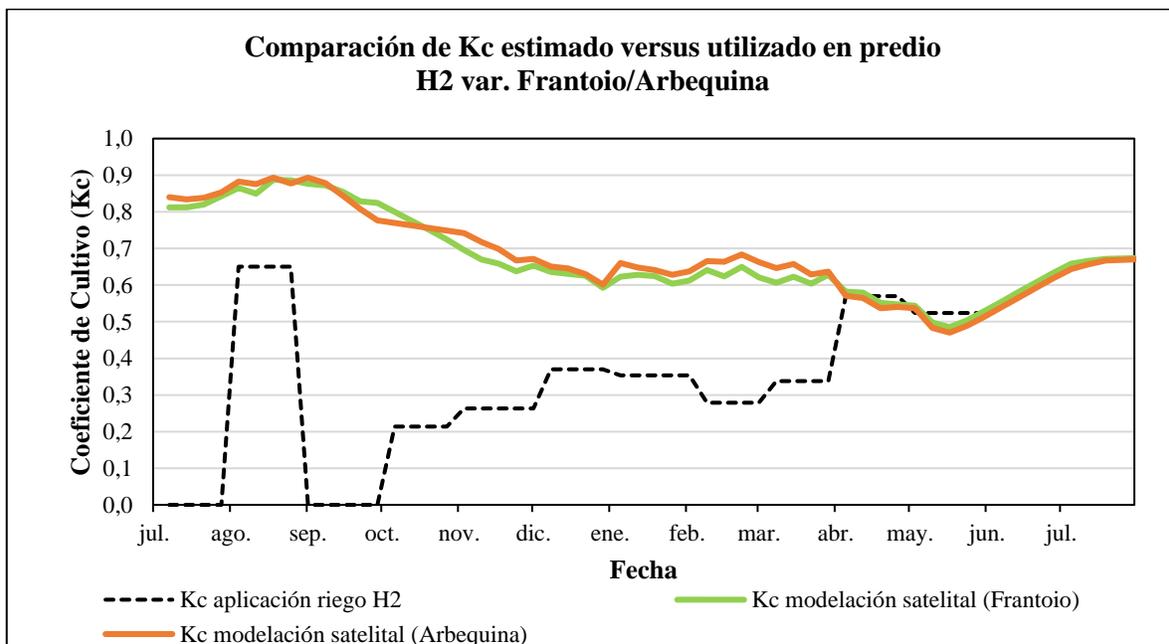


Figura 16. Comparación del coeficiente de cultivo Kc estimado a través del modelamiento satelital y el utilizado operativamente en el riego del predio (Sector H2). Agrícola Ízaro, Casablanca.

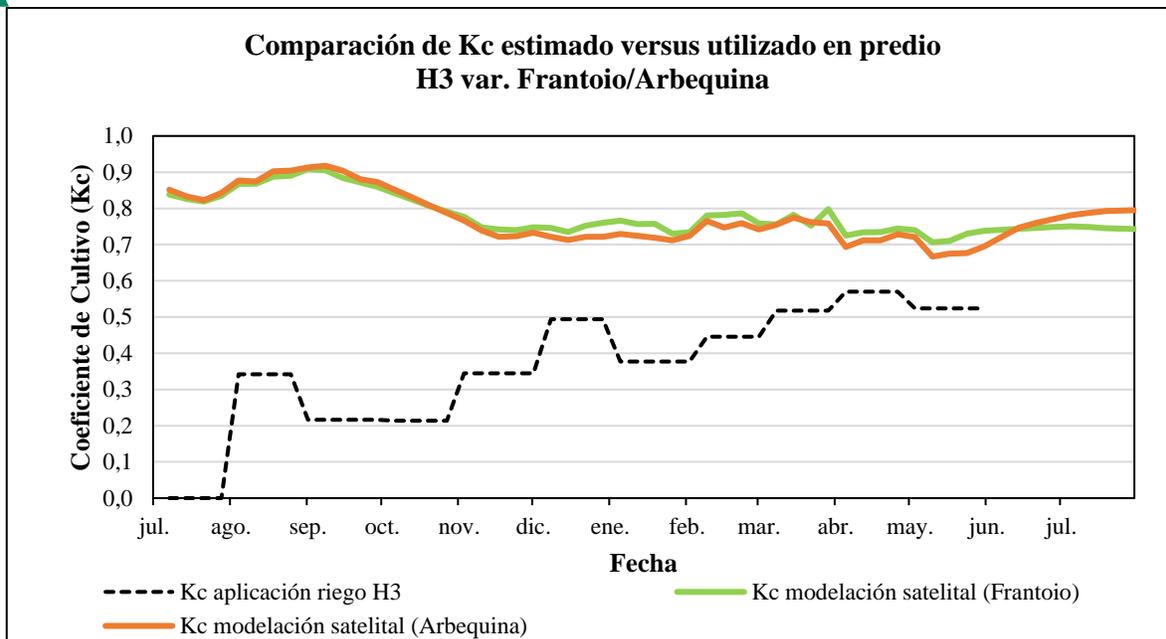


Figura 17. Comparación del coeficiente de cultivo Kc estimado a través del modelamiento satelital y el utilizado operativamente en el riego del predio (Sector H3). Agrícola Ízaro, Casablanca.

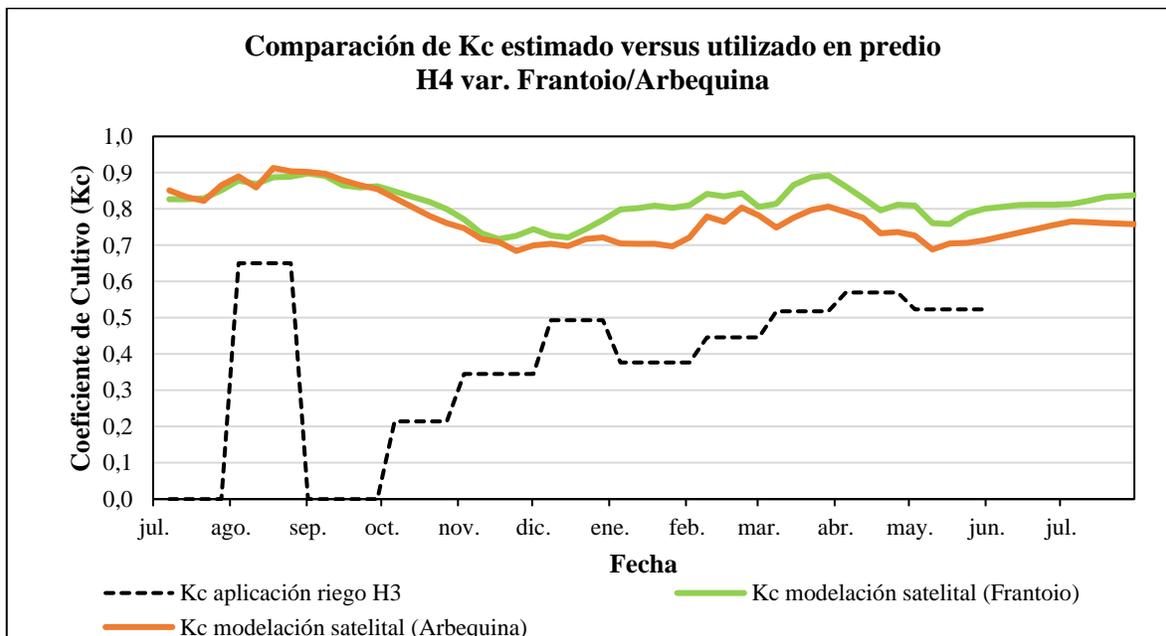


Figura 18. Comparación del coeficiente de cultivo Kc estimado a través del modelamiento satelital y el utilizado operativamente en el riego del predio (Sector H4). Agrícola Ízaro, Casablanca.

Demanda de riego modelada

Con base en la metodología “coeficiente de cultivo- evapotranspiración de referencia” descrita anteriormente, se modeló la transpiración potencial del cultivo, correspondiente a la estimación de necesidades de riego del cultivo de manera de mantener el cultivo en un óptimo de disponibilidad hídrica (sin estrés). Como se señaló anteriormente el parámetro Kc fue obtenido del índice de

vegetación NDVI desde la Plataforma Agrícola Satelital PLAS y los datos de ETo desde el mapa dinámico de ETo semanal disponible en la plataforma satelital PLAS.

Por otro lado, se recopiló información del manejo del riego en el cultivo durante la temporada 2019/20 y el volumen real de riego aportado al cultivo por el productor, de manera de contrastarlo con el análisis modelado. El Cuadro 4 presenta un resumen de los volúmenes de riego aportados en campo y las estimaciones de acuerdo al monitoreo satelital del cultivo y de la demanda ambiental de la zona.

Cabe resaltar el hecho de que la variedad Arbequina presenta un marco de plantación de 6 x 2 metros, en comparación a la variedad Frantoio con un marco de plantación de 6 x 4 metros. No se aprecian diferencias importantes en el comportamiento durante la temporada para ambas variedades, pero sí se alcanzan valores de transpiración acumulada más altos en la variedad Frantoio, con un promedio de transpiración de 8.206 m³/ha/temporada, en comparación a la variedad Arbequina con un promedio levemente más bajo de 7.773 m³/ha/temporada.

Cuadro 4. Transpiración potencial del cultivo y volumen de riego aportado al cultivo en sector analizado para distintos niveles de desarrollo.

Variedad	Sector	Nivel Desarrollo	Transpiración (m ³ /ha/temp)	Volumen Aplicado (m ³ /ha/temp)	Déficit hídrico Aplicado	
Arbequina	H1	Alto	7.706	3.670	48%	
		Bajo	7.441	3.670	49%	
	H2	Alto	7.860	3.670	47%	
		Bajo	7.163	3.670	51%	
	H3	Alto	8.845	4.458	50%	
		Bajo	6.755	4.458	66%	
	H4	Alto	8.825	4.458	51%	
		Bajo	7.591	4.458	59%	
	Promedio			7.773	4.064	53%

Frantoio	H1	Alto	8.266	3.670	44%
		Bajo	7.724	3.670	48%
	H2	Alto	7.692	3.670	48%
		Bajo	7.872	3.670	47%
	H3	Alto	9.020	4.458	49%
		Bajo	7.900	4.458	56%
	H4	Alto	9.389	4.458	47%
		7434	7.786	4.458	57%
	8.206			4.064	50%

*: Temporada agrícola considerada fue Julio a Junio.

De este modo se puede establecer el porcentaje de reposición del consumo hídrico del cultivo y el déficit de riego no repuesto para cada variedad y sector. En las Figura 19 y Figura 20 se detalla el comportamiento de los aportes hídricos y el déficit hídrico respectivo para los distintos sectores analizados, considerando zonas de distinto nivel de desarrollo para las variedades Arbequina y Frantoio en cada sector.

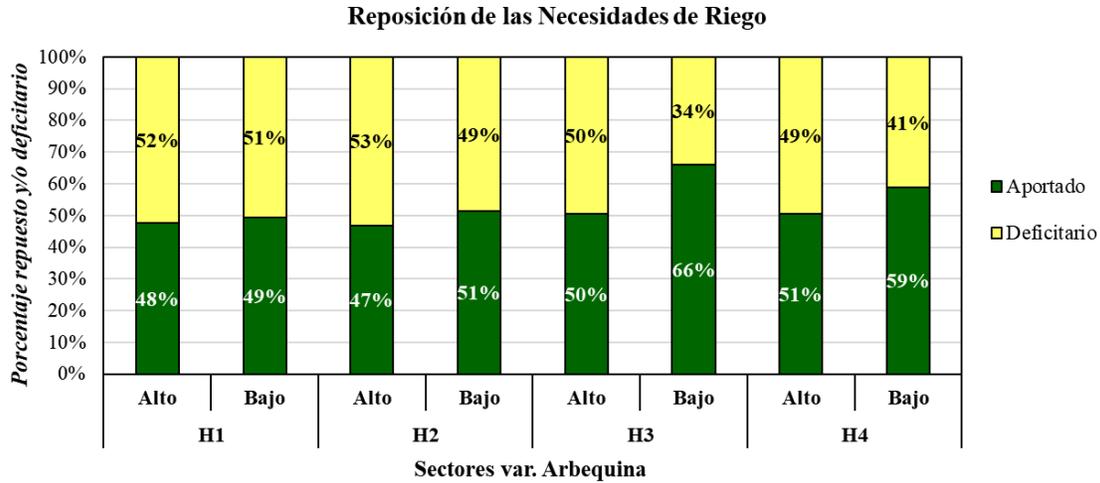


Figura 19. Comportamiento de los aportes y déficit de riego según vigor en sectores H1, H2, H3 y H4 para hileras de la var. Arbequina. Agrícola Ízaro, Casablanca.

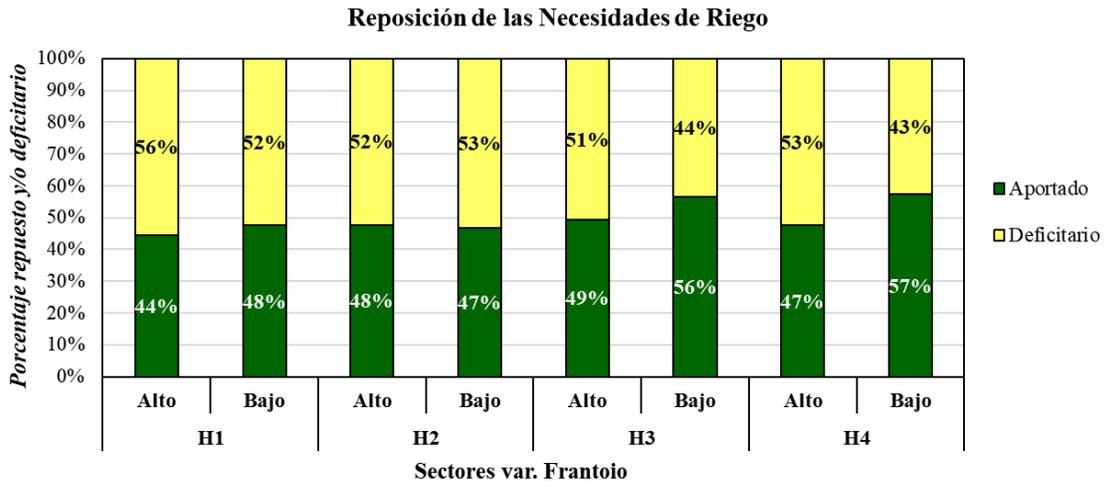


Figura 20. Comportamiento de los aportes y déficit de riego según vigor en sectores H1, H2, H3 y H4 para hileras de la var. Frantoio. Agrícola Ízaro, Casablanca.

Como se puede observar en todos los sectores analizados y en ambas variedades, el volumen de riego aportado fue menor al estimado mediante el uso del coeficiente de cultivo modelado, para todos los niveles de desarrollo presentes (Cuadro 4). Debido a que todo el sector recibe el mismo volumen de riego, se presentan valores de déficit hídrico variable y más acrecentado a aquellas zonas donde los olivos presentan mayor vigor, dándose este fenómeno en la mayoría de los sectores.

De este modo, en el sector H3 y de acuerdo a los registros de campo, en la variedad Arbequina con alto vigor se aportó un 50% del consumo, mientras que en Frantoio el aporte fue de un 51%, lo cual representa un déficit de 50% y 49%, respectivamente. Por su parte, en zonas con bajo vigor se aportó un 66% (Arbequina) y un 56% (Frantoio) de las necesidades, lo cual representó un 34% a 44% de déficit, respectivamente.

Para el caso de los sectores H1 y H2, la variabilidad dentro del sector fue menor e inclusive entre las zonas de alto a bajo vigor. De este modo las zonas con alto vigor presentan un aporte hídrico del 44-48% para la var. Arbequina y Frantoio, lo que representa un déficit hídrico de 56 - 52% en ambos sectores H1 y H2. En las zonas de bajo vigor, el aporte hídrico fue entre un 49% y 51%, con su

respectivo déficit de 51-49% en var. Arbequina, mientras que para la var. Frantoio, el aporte hídrico representó entre un 47%-48%, con el respectivo déficit de 53-52%.

Para analizar mensualmente las condiciones del aporte de riego en los sectores analizados y estimar la magnitud del déficit de riego por época del año, a continuación, se gráfica el volumen de riego aportado mensualmente durante la temporada 2019/20 junto a las necesidades estimadas de acuerdo a la metodología descrita para zonas con variedad Arbequina y Frantoio, con niveles de vigor alto de los sectores (Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 23).

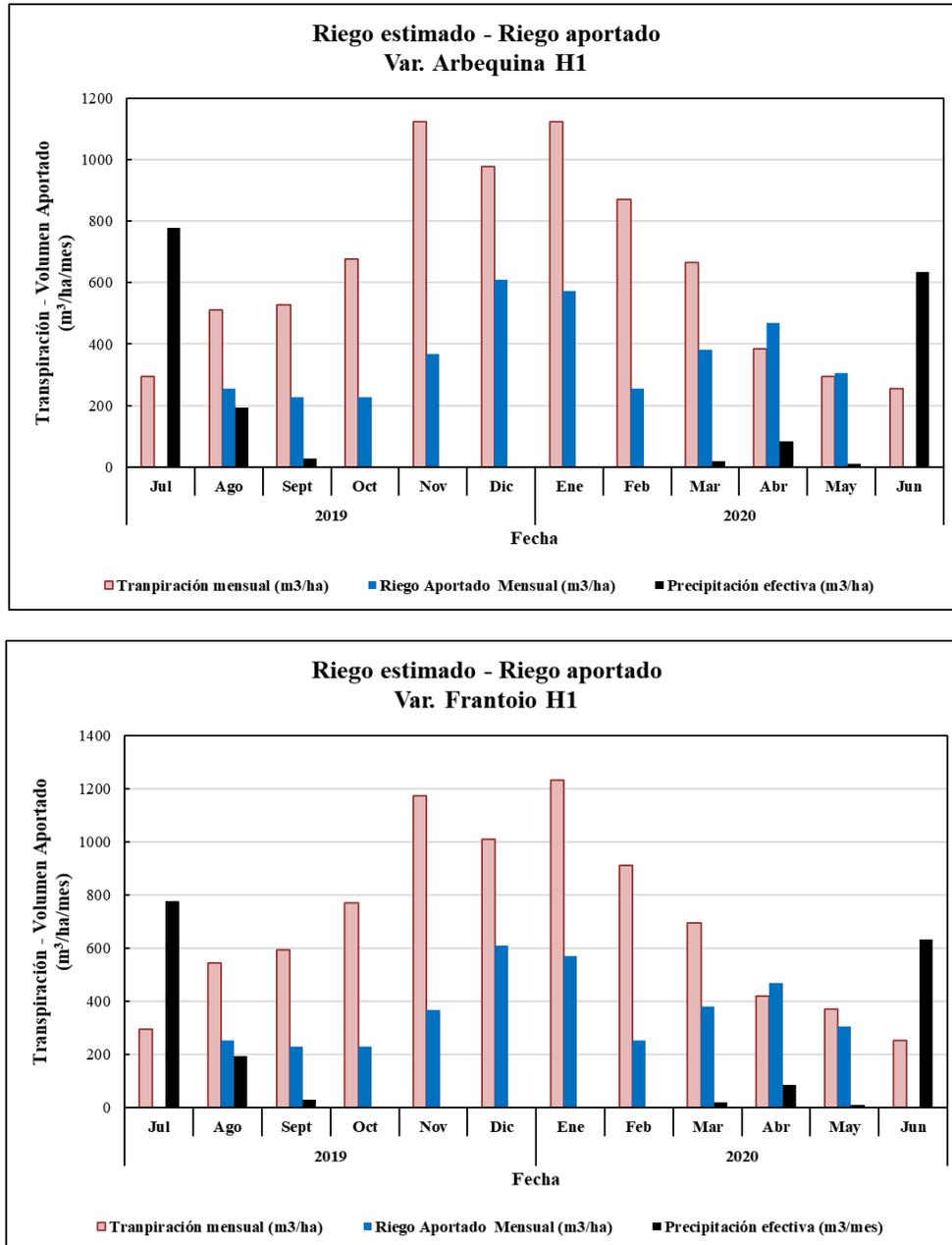


Figura 21. Comparación entre el volumen mensual de riego aportado y el volumen estimado para el Sector H1, var. Arbequina y Frantoio. Desarrollo (vigor) alto, temporada 2019/20. Agrícola Ízaro.

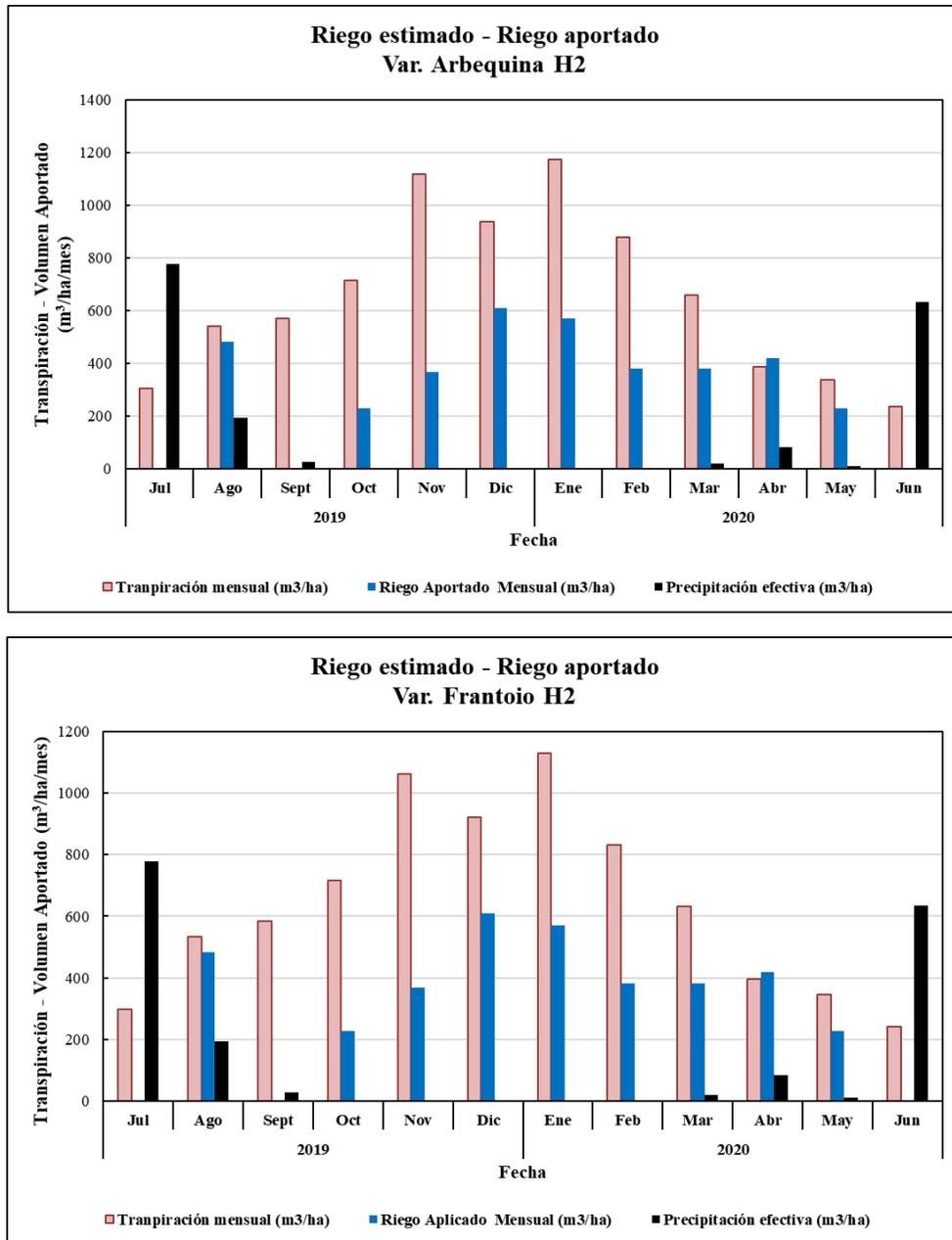


Figura 22. Comparación entre el volumen mensual de riego aportado y el volumen estimado para el Sector H2, var. Arbequina y Frantoio. Desarrollo (vigor) alto, temporada 2019/20. Agrícola Ízaro, Casablanca.

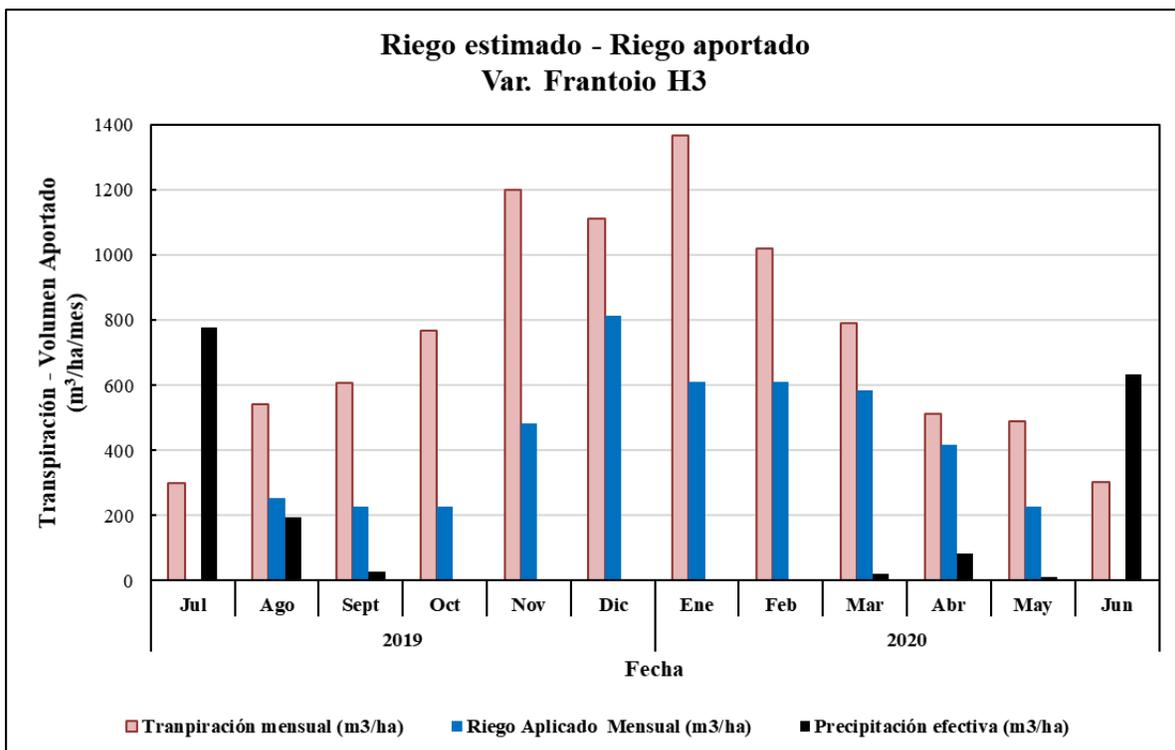
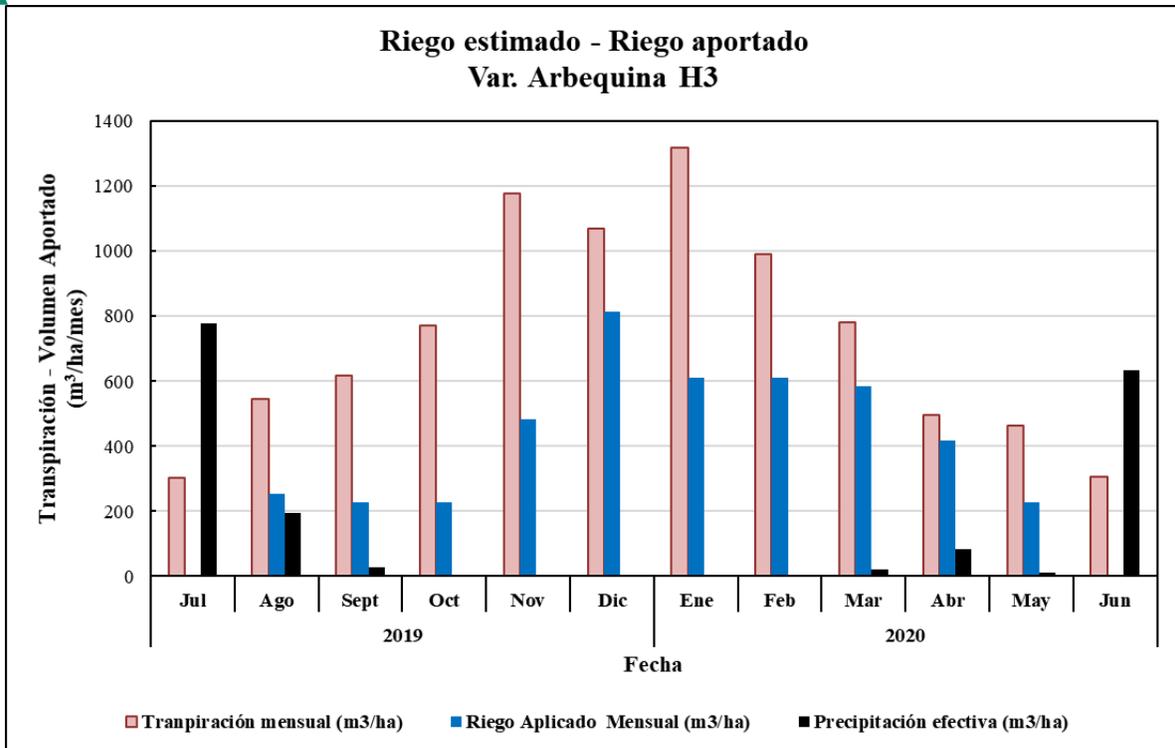


Figura 23. Comparación entre el volumen mensual de riego aportado y el volumen estimado para el Sector H3, var. Arbequina y Frantoio. Desarrollo (vigor) alto, temporada 2019/20. Agrícola Ízaro, Casablanca.

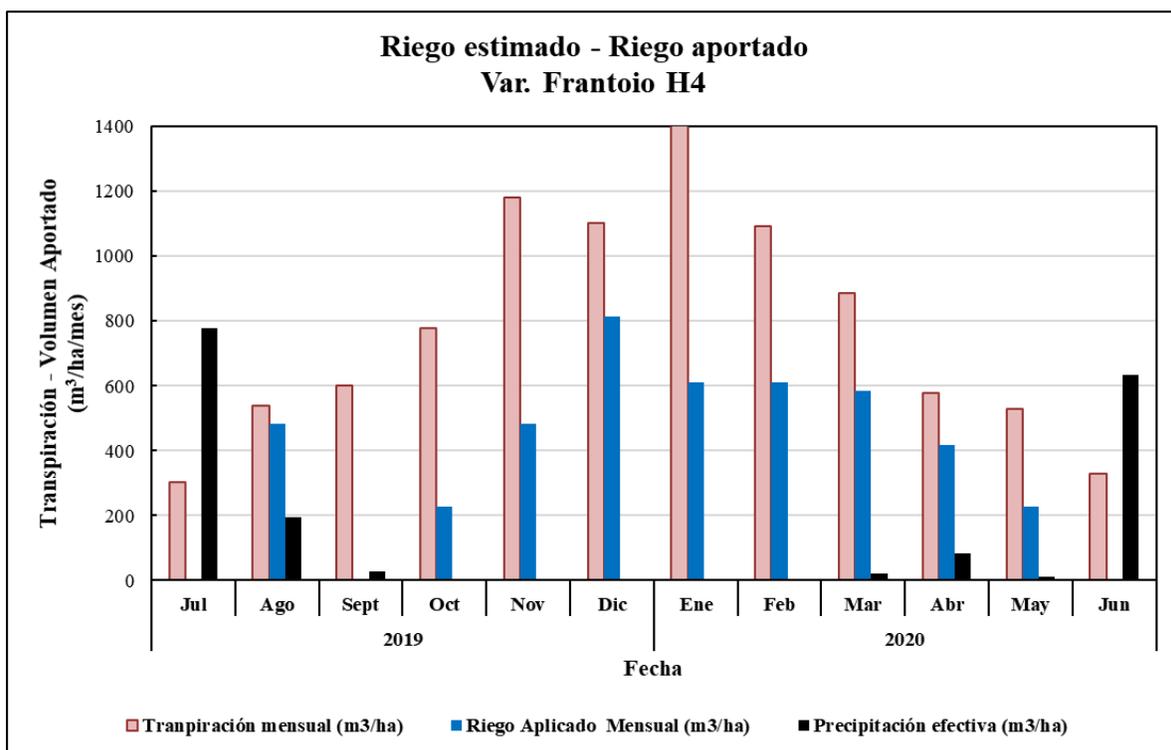
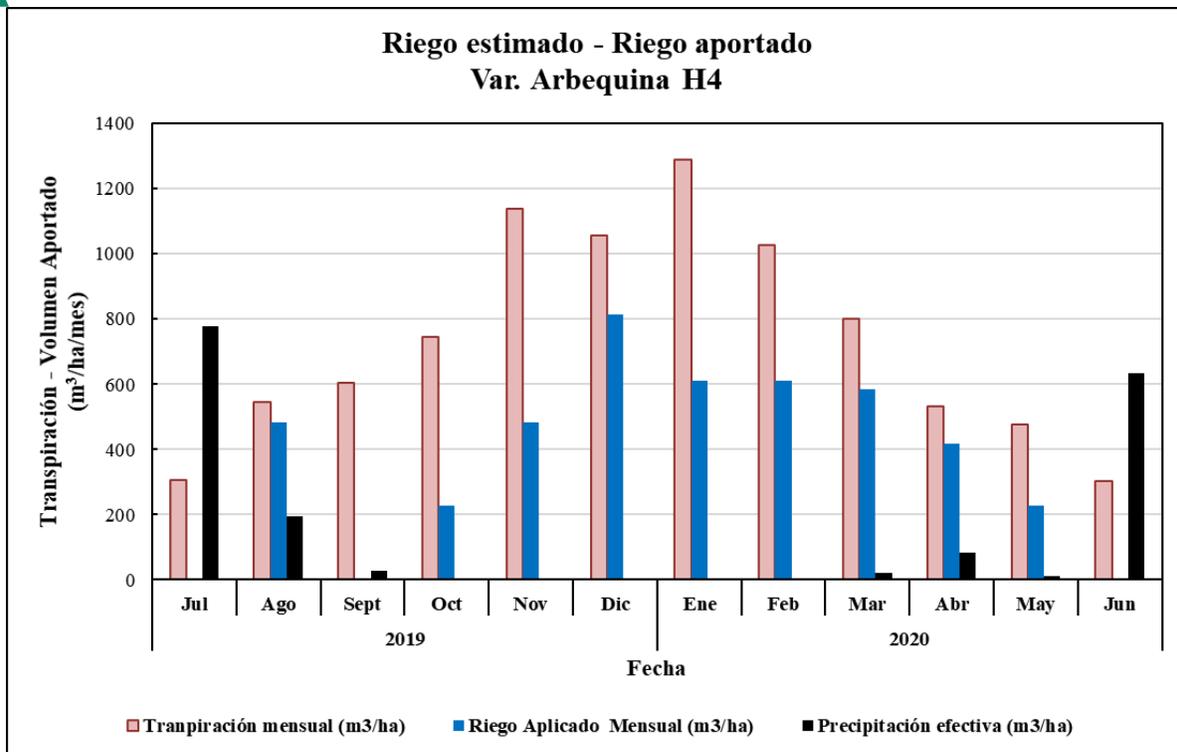


Figura 24. Comparación entre el volumen mensual de riego aportado y el volumen estimado para el Sector H4, var. Arbequina y Frantoio. Desarrollo (vigor) alto, temporada 2019/20. Agrícola Ízaro.

Considerando la acumulación mensual de necesidades hídricas a reponer y el volumen de riego realmente aportado, se observó que existen diferencias deficitarias entre la tasa de transpiración estimada y el riego aportado durante todos los meses de la temporada analizada.

Con objeto de cuantificar las diferencias entre el riego aportado y las necesidades de riego estimadas y los aportes de las lluvias, se calculó un factor de déficit (K_s) de acuerdo a la siguiente relación:

$$K_s = 1 - \frac{\text{riego aplicado} + \text{lluvia}}{\text{riego estimado por satélite}}$$

de este modo los valores de K_s cercanos a 100 indican que se suplieron las necesidades de transpiración, ya sea por riego y/o lluvia y el déficit hídrico es mínimo. Por el contrario, cuando el valor de K_s es cercano a 0 indica que las necesidades de transpiración no fueron repuestas con el aporte de riego y/o precipitaciones y el déficit hídrico fue máximo.

Como se puede apreciar en la Figuras 24 y Figura 25, para el sector H1 de alto desarrollo para la variedad Arbequina, durante la mayor parte de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit hídrico no superior al 49%, exceptuando los meses de julio 2019 y desde abril a junio 2020. Durante estos meses fueron los únicos momentos de la temporada en donde el cultivo dispuso de la totalidad de las necesidades hídricas y no tuvo valores deficitarios, en el caso del mes de julio producto del excedente hídrico aportado por precipitación. Por el contrario, los meses de septiembre, octubre, noviembre y febrero presentan los menores balances hídricos, con déficit de 51 a 71%.

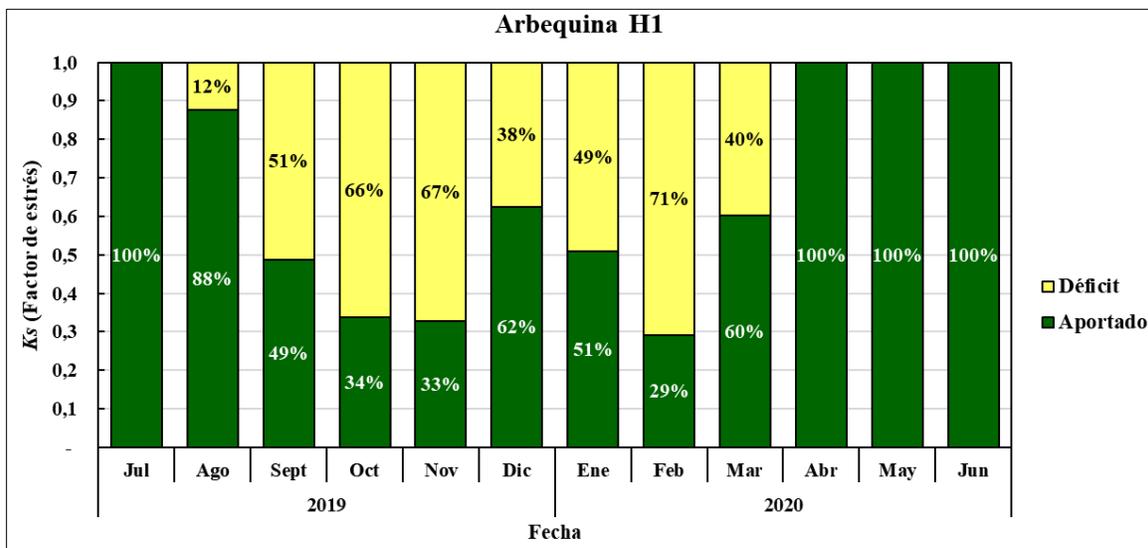


Figura 25. Factor de déficit (K_s) estimado en el sector H1 var. Arbequina de alto vigor durante la temporada 2019/20. Agrícola Ízaro, Casablanca.

Al tomar en cuenta los niveles de aporte y déficit para la zona de var. Frantoio del sector H1, el déficit a lo largo de la temporada no supera el 54% en general, a excepción de los meses de septiembre, octubre, noviembre y febrero con los menores balances hídricos de la temporada, con déficit del 51 al 72% (Figura 20).

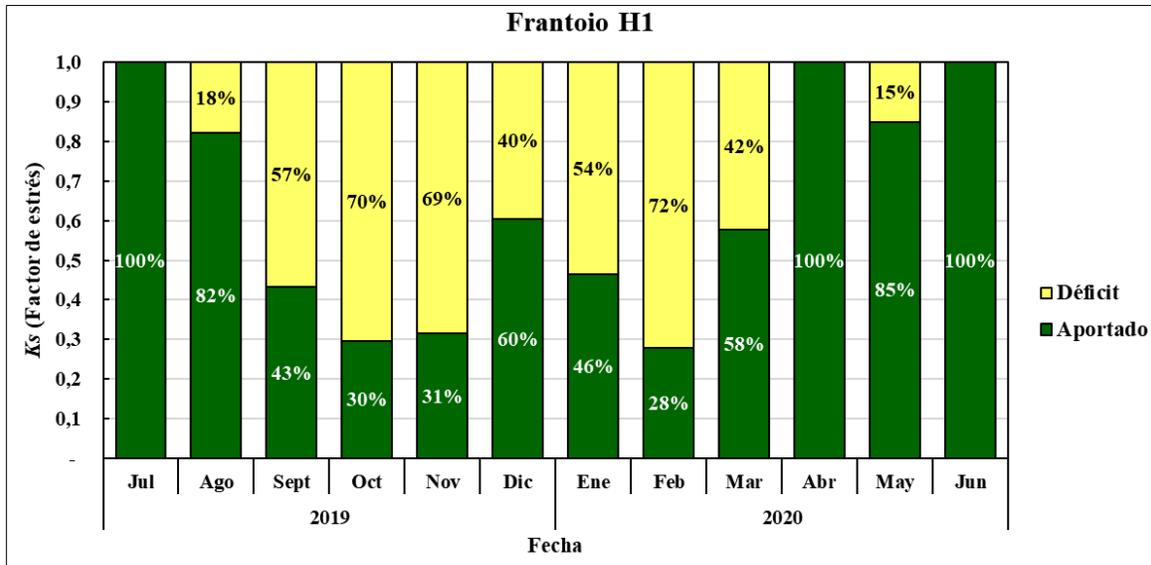


Figura 26. Factor de déficit (K_s) estimado en el sector H1 var. Frantoio con alto vigor durante la temporada 2019/20. Agrícola Ízaro, Casablanca.

Ahora analizando el comportamiento de zonas de alto vigor para variedades Arbequina (Figura 26) y Frantoio (Figura 27) para el sector H2, durante gran parte de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit hídrico mayor al 51%, exceptuando los meses de julio y agosto 2019, y abril y junio 2020. Durante estos meses el cultivo dispuso de la mayoría o la totalidad de las necesidades hídricas y no presentó valores deficitarios, en el caso del mes de julio producto del excedente hídrico aportado por precipitación. Por el contrario, los meses de septiembre, octubre y noviembre presentan los menores balances hídricos, con déficit de 67 al 68%, siendo crítico durante el mes de septiembre con un 95%.

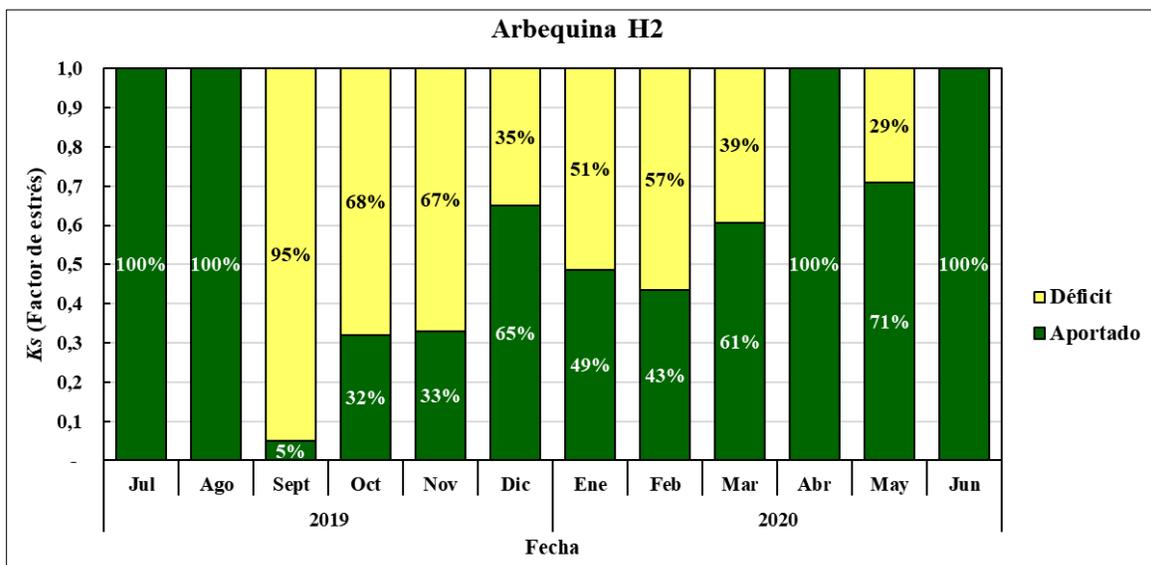


Figura 27. Factor de déficit (K_s) estimado en el sector H2 var. Arbequina con alto vigor durante la temporada 2019/20. Agrícola Ízaro, Casablanca.

Los niveles de aporte para la zona de var. Frantoio del sector H2 se manifiestan dentro del rango de 34% a 95%, exceptuando mes de abril y junio 2020 con aporte hídrico del 100%, así como julio y

agosto 2019. El déficit a lo largo de la temporada de riego supera el 54% y alcanza valores de 68%, a excepción del mes de septiembre con el menor balance hídrico de la temporada, con déficit del 95%.

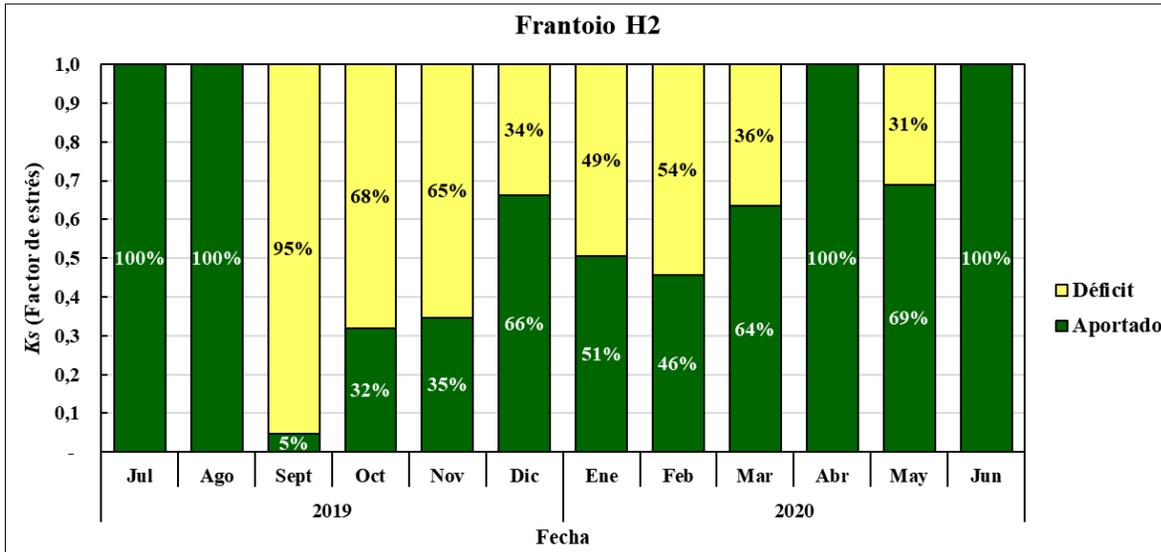


Figura 28. Factor de déficit (K_s) estimado en el sector H2 var. Frantoio de alto vigor durante la temporada 2019/20. Agrícola Ízaro, Casablanca.

Se analiza el comportamiento de zonas de alto vigor y variedades Arbequina (Figura 28) y Frantoio (Figura 29) para el sector H3, durante gran parte de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit hídrico mayor al 49%, exceptuando los meses de julio 2019, y junio 2020. Durante estos meses el cultivo dispuso de la mayoría o la totalidad de las necesidades hídricas y no presentó valores deficitarios, en el caso del mes de julio producto del excedente hídrico aportado por precipitación. Por el contrario, los meses de septiembre, octubre y noviembre presentan los menores balances hídricos, con déficit de 58 al 70%.

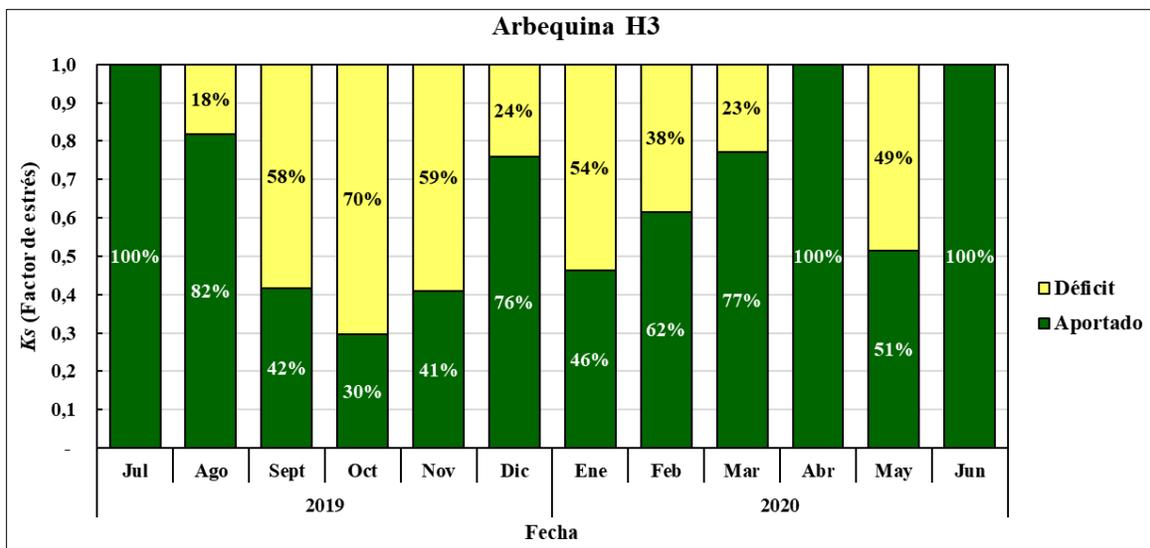


Figura 29. Factor de déficit (K_s) estimado en el sector H3 var. Arbequina de alto vigor durante la temporada 2019/20. Agrícola Ízaro, Casablanca.

Los niveles de aporte para la zona de var. Frantoio del sector H3 se manifiestan dentro del rango de 2% a 70%, exceptuando mes de julio 2019 y junio 2020 con aporte hídrico del 100%. El déficit a lo largo de la temporada de riego supera el 50% y alcanza valores de 70% para el mes de octubre con el menor balance hídrico de la temporada.

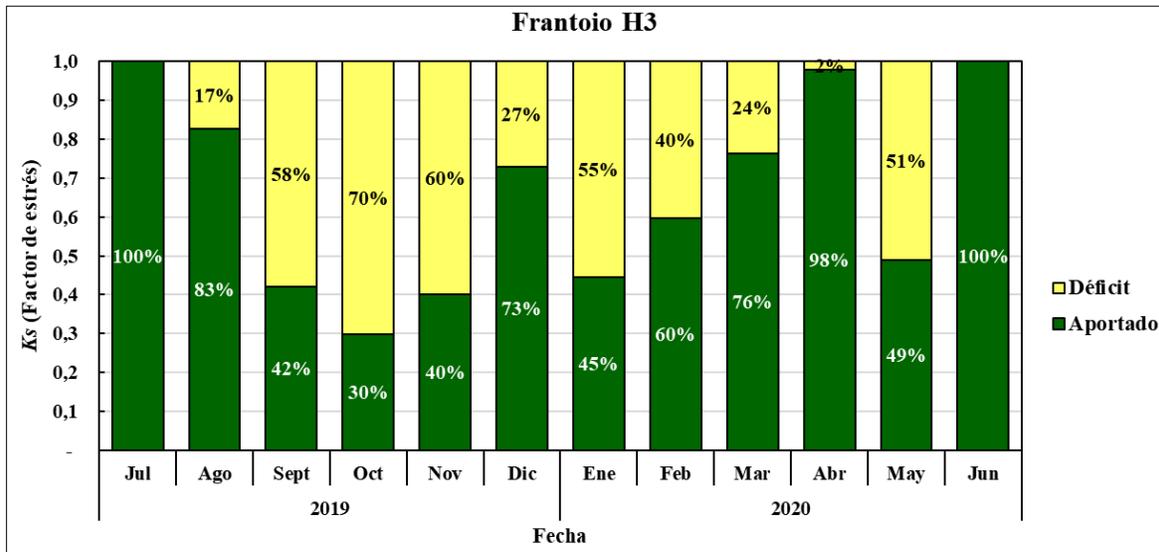


Figura 30. Factor de déficit (K_s) estimado en el sector H3 var. Frantoio de alto vigor durante la temporada 2019/20. Agrícola Ízaro, Casablanca.

Por último, se presenta el comportamiento de zonas de alto vigor para el sector H4, para las variedades Arbequina (Figura 30) y Frantoio (Figura 31), durante gran parte de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit hídrico mayor al 41%, exceptuando los meses de julio y agosto 2019, y junio 2020. Durante estos meses el cultivo dispuso de la mayoría o la totalidad de las necesidades hídricas y no presentó valores deficitarios, en el caso del mes de julio producto del excedente hídrico aportado por precipitación. Por el contrario, los meses de septiembre, octubre y noviembre presentan los menores balances hídricos, con déficit de 58 al 95%.

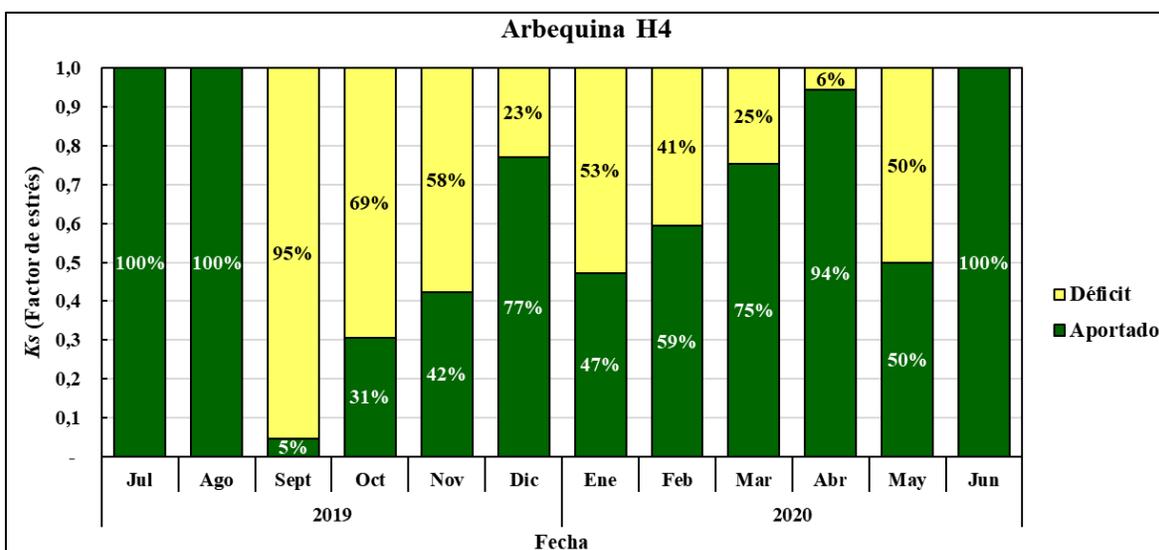


Figura 31. Factor de déficit (K_s) estimado en el sector H4 var. Arbequina de alto vigor durante la temporada 2019/20. Agrícola Ízaro, Casablanca.

Los niveles de aporte para la zona de var. Frantoio del sector H4 se manifiestan dentro del rango de 21% a 95%, exceptuando mes de junio 2020 con aporte hídrico del 100%, así como julio y agosto 2019. El déficit a lo largo de la temporada de riego supera el 44% y alcanza valores de 71%, a excepción del mes de septiembre con el menor balance hídrico de la temporada, con déficit del 95%.

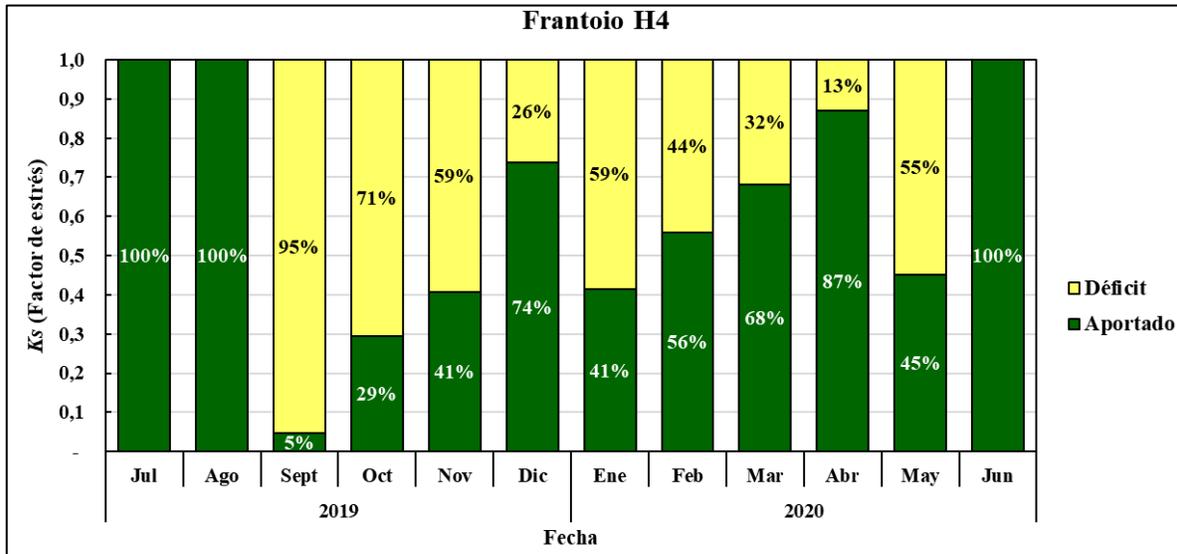


Figura 32. Factor de déficit (K_s) estimado en el sector H4 var. Frantoio de alto vigor durante la temporada 2019/20. Agrícola Ízaro, Casablanca.

Distribución espacial de la Transpiración

Al analizar el comportamiento de la transpiración acumulada durante la temporada completa en los sectores monitoreados, se pudo estimar que el valor promedio de transpiración para el Sector H1 fue de 742 mm/año, con un valor máximo de 854 mm/año y mínimo de 567 mm/año.

A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 43%, 2,15 ha) se concentra en el rango de 750 mm a 800 mm al año, seguido del rango de 800 - 850 mm de transpiración anual en un 35% de la superficie (1,6 ha). En la Figura 33 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

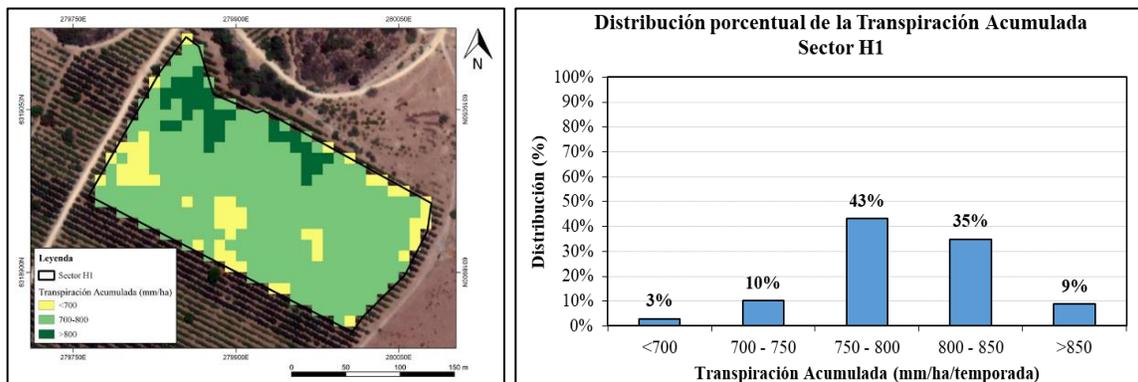


Figura 33. Distribución de los rangos de transpiración acumulada en el sector H1, Agrícola Ízaro, Casablanca.

Para el caso del Sector H2 se pudo estimar que el valor promedio de transpiración de 741 mm/año, con un valor máximo de 864 mm/año y mínimo de 157 mm/año. A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 41%, 2,13 ha) se concentra en el rango de 750 mm a 800 mm al año, seguido del rango de 800 - 850 mm de transpiración anual en un 36% de la superficie (1,87 ha). En la Figura 34 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

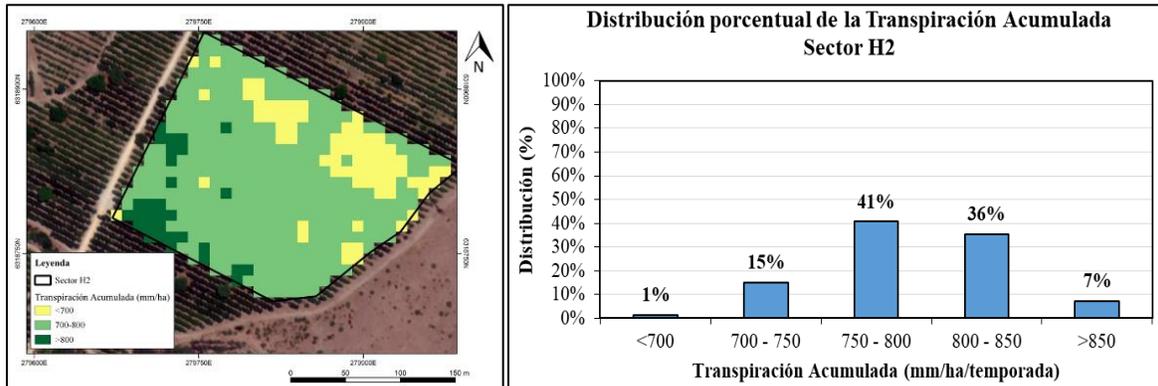


Figura 34. Distribución de los rangos de transpiración acumulada en el sector H2, Agrícola Ízaro, Casablanca.

En el Sector H3 se pudo estimar que el valor promedio de transpiración de 754 mm/año, con un valor máximo de 920 mm/año y mínimo de 560 mm/año. A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 35%, 2,13 ha) se concentra en el rango de más de 850 mm al año, seguido del rango de 800 - 850 mm de transpiración anual en un 20% de la superficie (1,22 ha). En la Figura 35 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

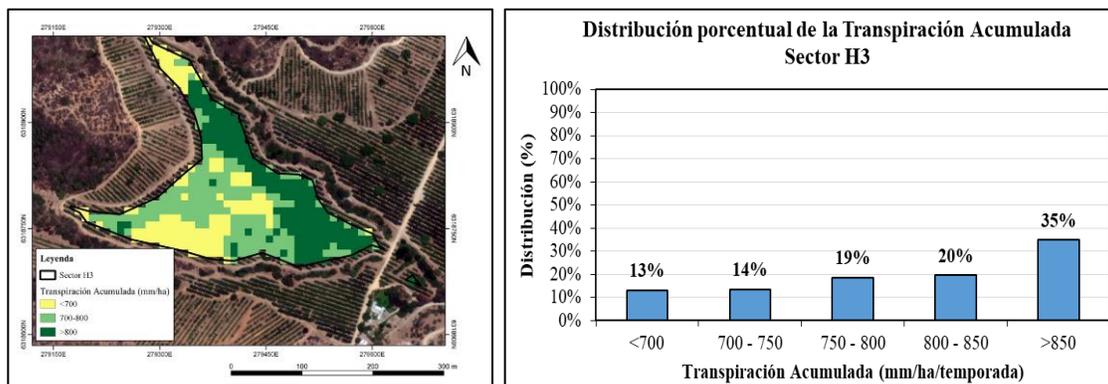


Figura 35. Distribución de los rangos de transpiración acumulada en el sector H3, Agrícola Ízaro, Casablanca.

Finalmente, para el Sector H4 se pudo estimar que el valor promedio de transpiración de 813 mm/año, con un valor máximo de 929 mm/año y mínimo de 361 mm/año. A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 35%, 1,54 ha) se concentra en el rango de más de 900 mm al año, seguido del rango de 850 - 900 mm de transpiración anual en un 32% de la superficie (1,4 ha). En la Figura 36 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

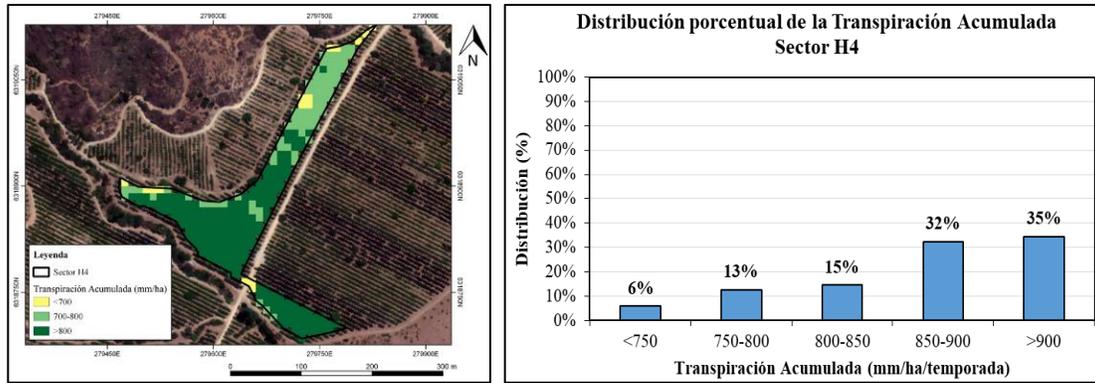


Figura 36. Distribución de los rangos de transpiración acumulada en el sector H4, Agrícola Ízaro, Casablanca.



Literatura citada

Agrimed, 2017. Atlas Agroclimático de Chile, estado actual y tendencias del clima. Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED). Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Chile.

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 - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manage.* 98, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011>.

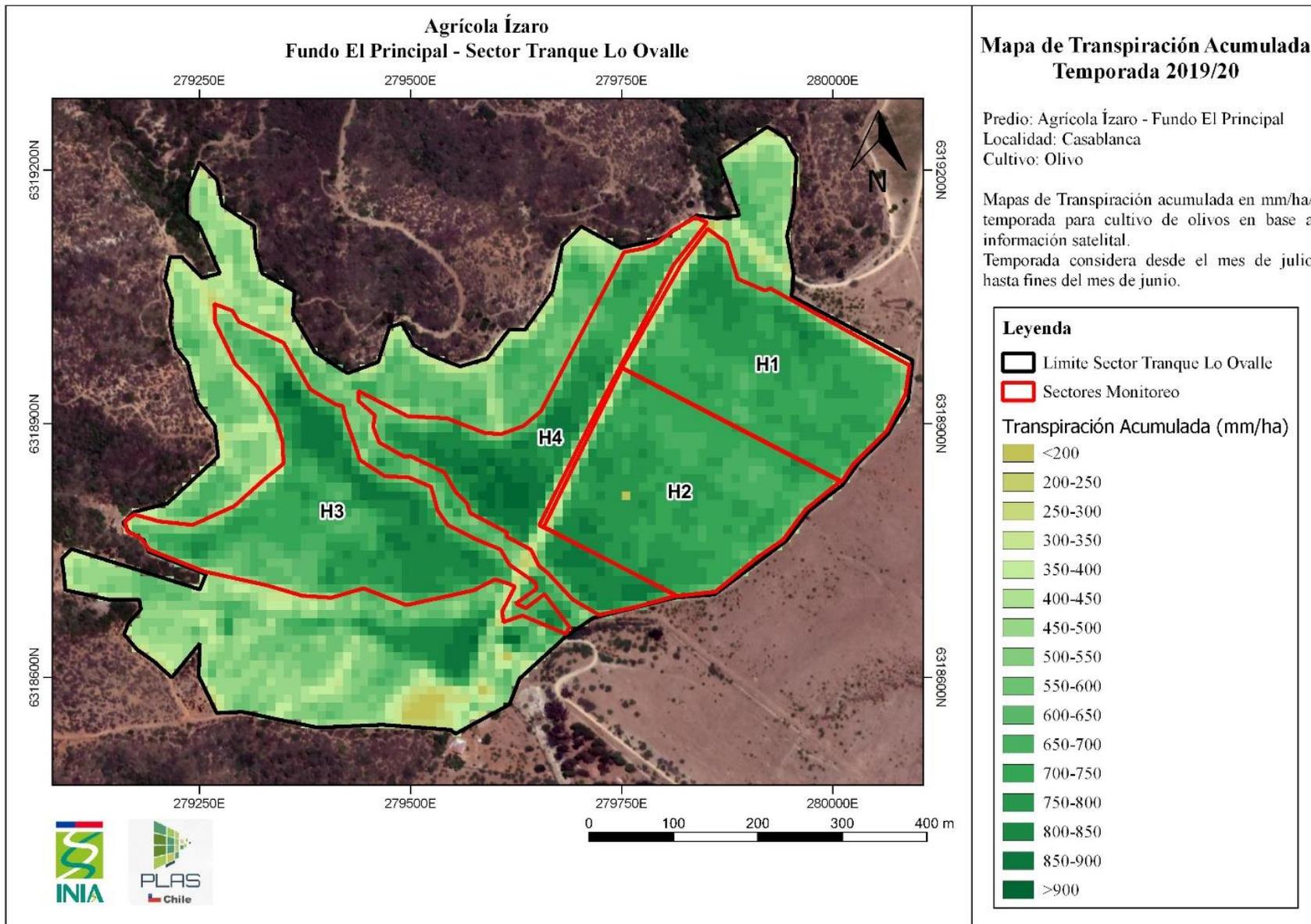
Bausch, W.C., 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46, 213–222. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90096-G](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90096-G).

Bausch, W.C., 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manage.* 27, 55–68. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01125-3](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01125-3).

Bausch, W.C., Neale, C.M.U., 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Trans. ASAE* 30, 703–709. <https://doi.org/10.13031/2013.30463>.

Heilman et al., 1982 Heilman, J.L., Heilman, W.E., Moore, D.G., 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agron. J.* 74, 967–971. <https://doi.org/10.2134/agronj1982>.

Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heermann, D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. ASAE* 32, 1891–1899.



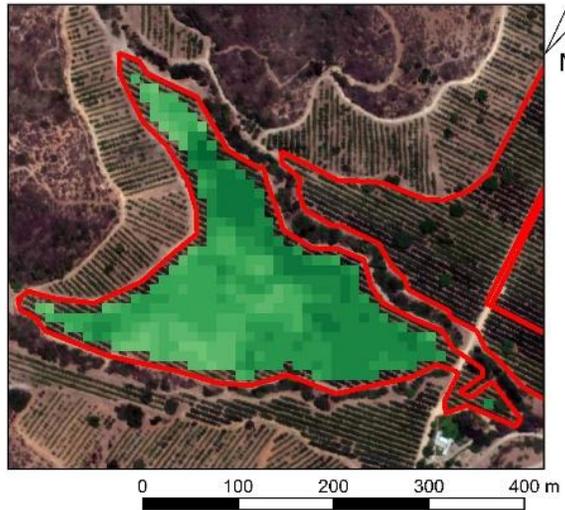
Sector H1



Sector H2



Sector H3



Sector H4



Mapa de Transpiración Acumulada Temporada 2019/20

Predio: Agrícola Ízaro - Fundo El Principal
Localidad: Casablanca
Cultivo: Olivo

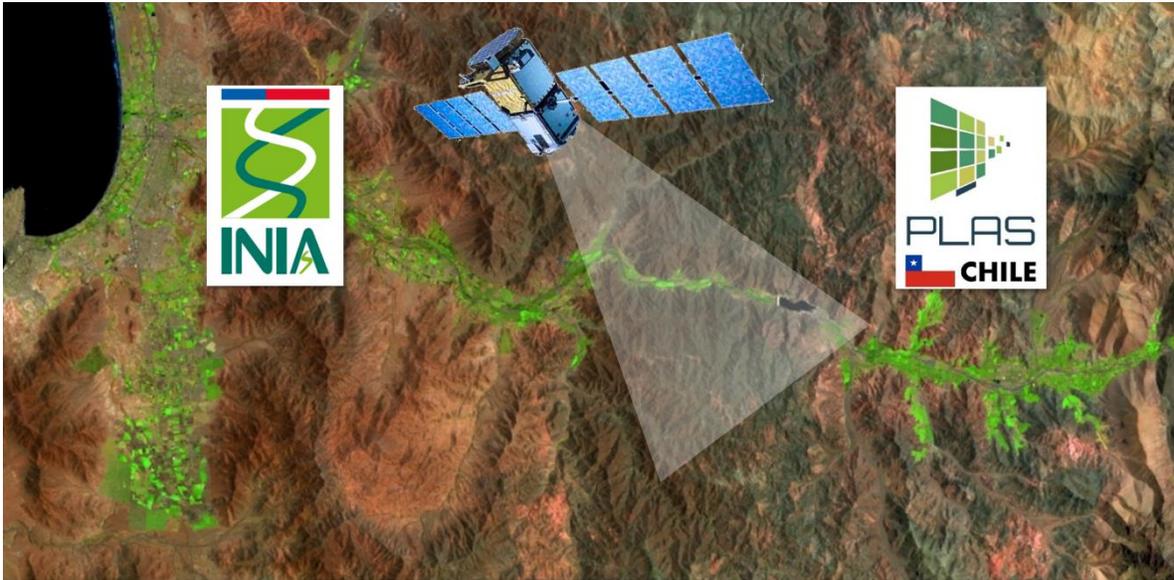
Mapas de Transpiración acumulada en mm/ha/ temporada para cultivo de olivos en base a información satelital.
Temporada considera desde el mes de julio hasta fines del mes de junio.

Leyenda

-  Limite Sector Tranque Lo Ovalle
-  Sectores Monitoreo

Transpiración Acumulada (mm/ha)

-  <200
-  200-250
-  250-300
-  300-350
-  350-400
-  400-450
-  450-500
-  500-550
-  550-600
-  600-650
-  650-700
-  700-750
-  750-800
-  800-850
-  850-900
-  >900



Informe Consultoría en Riego INIA

Productor: AGROMARCHIGUE S.A

Autores

Equipo Proyecto PLAS - INIA Intihuasi

Jefe de proyecto - Claudio Balbontín Nesvara

Profesional de Apoyo - Rodolfo Poblete

Informe Consultoría Manejo del Riego

Agromarchigue S.A.

Introducción

Con objeto de implementar un trabajo colaborativo entre el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA y la Asociación de Productores de Aceite Oliva ChileOliva, se implementó un trabajo de consultoría en la cual se analizaron las metodologías para la definición de las necesidades de riego del cultivo y aspectos asociados al manejo agronómico del cultivo de olivos.

El principal objetivo de la consultoría es transferir un marco conceptual estandarizado para la definición de las necesidades de riego, junto a la capacitación en el uso de nuevas tecnologías para el monitoreo del cultivo y de los factores ambientales que influyen en el consumo hídrico y por tanto en la programación del riego.

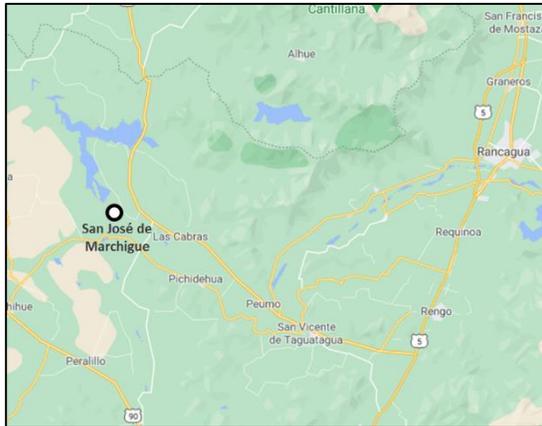
En este trabajo se elaboró un análisis comparativo entre los criterios utilizados actualmente por el productor para definir los volúmenes de riego aportados al cultivo (manejo tradicional del riego) y las necesidades de riego estimadas a partir del marco conceptual propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998), con la innovación tecnológica del uso del índice de vegetación satelital NDVI para estimar un Coeficiente de Cultivo y el uso de información de la demanda ambiental del sitio para estimar la tasa de transpiración máxima del cultivo.

De este modo, en el siguiente informe se analiza el desarrollo del cultivo utilizando información del índice de vegetación satelital NDVI, factores ambientales que influyen en el consumo hídrico del cultivo, las metodologías para la definición de las necesidades de riego en el campo y asistido con información satelital y la variabilidad espacial de la tasa de transpiración del cultivo dentro de los sectores analizados.



Sitios de análisis

Los trabajos de análisis fueron realizados en un predio ubicado en la localidad de San José de Marchigue, comuna de Pichidegua, Región de O'Higgins. En la Figura 1 se indica la ubicación geográfica del campo, así como los sectores analizados.



Predio: Agromarchigue
(Lat. 34°17'41.53"S Long. 71°27'55.70"O)
Localidad: San José de Marchigue
Comuna: Pichidegua
Provincia: Cachapoal
Región: O'Higgins
Chile

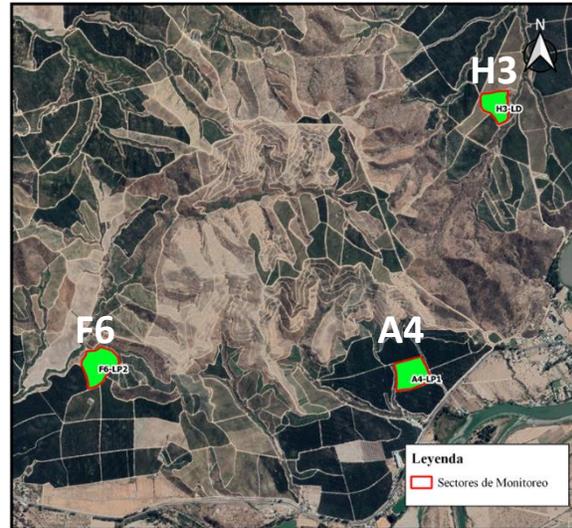


Figura 1. Ubicación del predio y sitios analizados. Agromarchigue, San José de Marchigue, Pichidegua.

Los sectores analizados correspondieron a los cuarteles denominados A4-LP1, F6-LP2 y H3-LD todos plantados con la variedad Arbequina. En el Cuadro 1 se indica un resumen de las características del cultivo en los sitios analizados en el trabajo.

Cuadro 1. Equipo, superficie, variedades, año de plantación y marcos de plantación de los sitios bajo análisis.

Sector	Superficie (ha-SIG)	Variedad	Año de Plantación	Marco de plantación (m)	Plantas/ha
A4-LP1	3,9	Arbequina	2007	3,5 x 1,5	1.904
F6-LP2	4,2		2008	4,0 x 1,5	1.626
H3-LD	2,9		2008	4,0 x 1,5	1.626

Características climáticas zona de estudio

La localidad de San José de Marchigue se encuentra en el distrito agroclimático Santa Cruz (Figura 2, Agrimed, 2017), el cual presenta un clima templado cálido supratermal, con régimen de humedad semiárido y temperatura del aire que varía entre valores máximos de 30,2 °C en enero y mínimos de 4,8 °C en el mes de julio. Dentro del distrito se registran valores de temperaturas máximas que oscilan entre 32°C y 29,2°C y valores de temperaturas mínimas entre 5,7 °C y 4,1 °C. En promedio el distrito presenta 263 días libres de heladas (consecutivos) y al año se registran 8 heladas. El período de temperaturas favorables para la actividad vegetativa de los cultivos tiene una longitud de aproximadamente 9 meses. La sumatoria de días grados alcanza 1.873 días grado y las horas de frío 544 (acumuladas hasta el 31 de Julio). Por su parte, la media de las precipitaciones anuales es de 562 mm/año y el período seco tiene una duración de 7 meses, con un déficit hídrico de 504 mm/año. El período húmedo dura 4 meses, durante los cuales se produce un excedente hídrico de 157 mm (Agrimed, 2017).



Figura 2. Ubicación campo Agromarchigue en el distrito agroclimático Santa Cruz (Agrimed, 2017).

Para el análisis del comportamiento de las condiciones meteorológicas actuales en el sitio, se utilizó la información registrada en el mismo campo durante los últimos años 10 años. De este modo, se observó que la temperatura del aire se sitúa en valores máximos promedio en torno a 32,7°C (con un peak de 41,2 °C en diciembre de 2016) y mínimos promedio en torno a 2,2°C en los meses de invierno, con un evento extremo de -6,4°C en julio de 2011 (Figura 3).

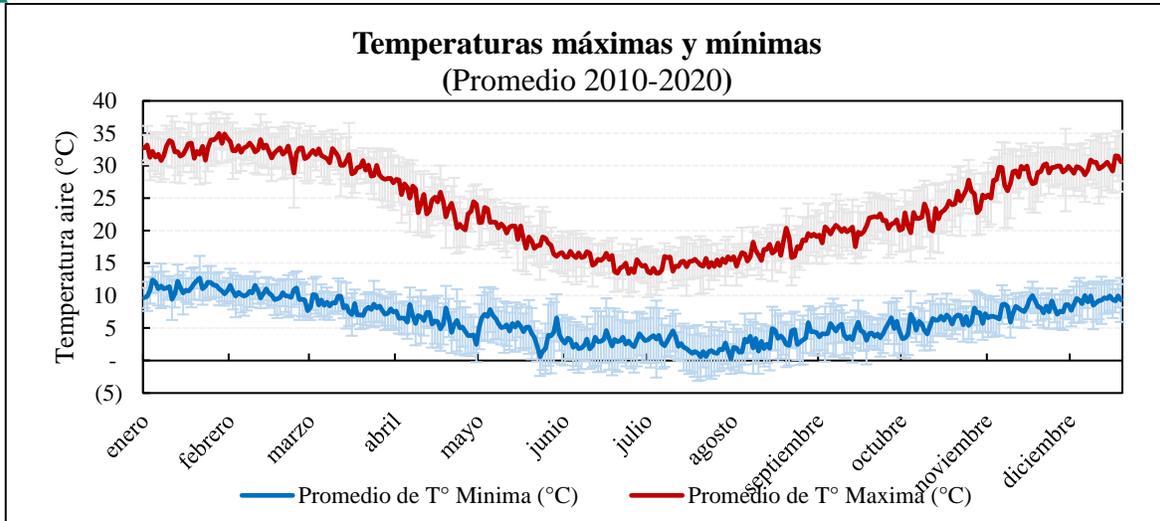


Figura 3. Comportamiento anual de los promedios de las temperaturas máximas y mínimas durante el período 2010-2020 en el campo Agromarchigue, San José de Marchigue (elaborado con datos estación propia).

Por su parte, el monto anual de las precipitaciones alcanzó en promedio 409 mm/año en los últimos cinco años, con montos anuales de 513 mm para la temporada 2015/16, 519 mm en 2016/17, 380 mm en 2017/18, 329 mm en 2018/19 y 306 mm en lo que va de la temporada 2019/20 (Figura 4).

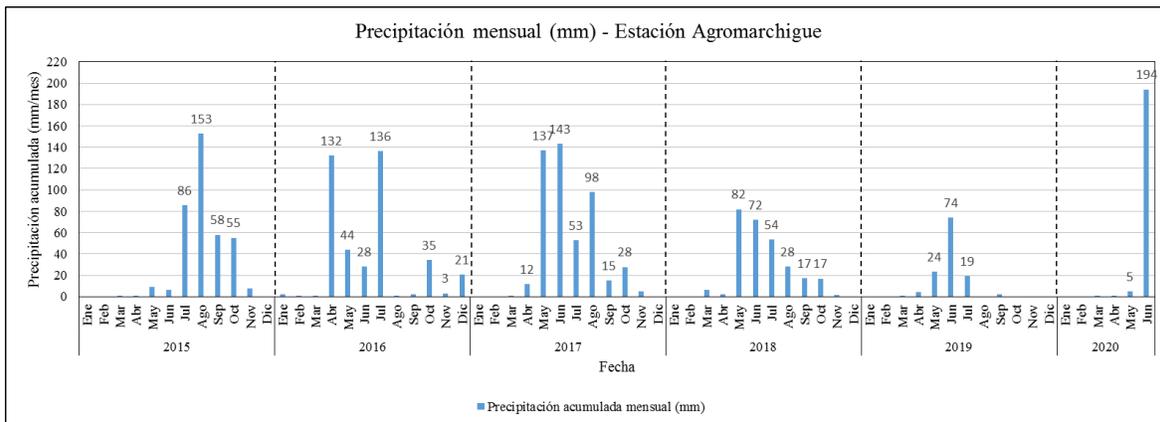


Figura 4. Precipitaciones mensuales acumuladas para la zona de San José de Marchigue (Datos estación presente en el predio).

De este modo, la tendencia de los montos anuales de las lluvias durante los cinco últimos años evidencia una disminución en la pluviometría en la zona y por tanto una probable disminución de las reservas de agua en el suelo que deben ser repuestas con mayores montos de riego (Figura 5).

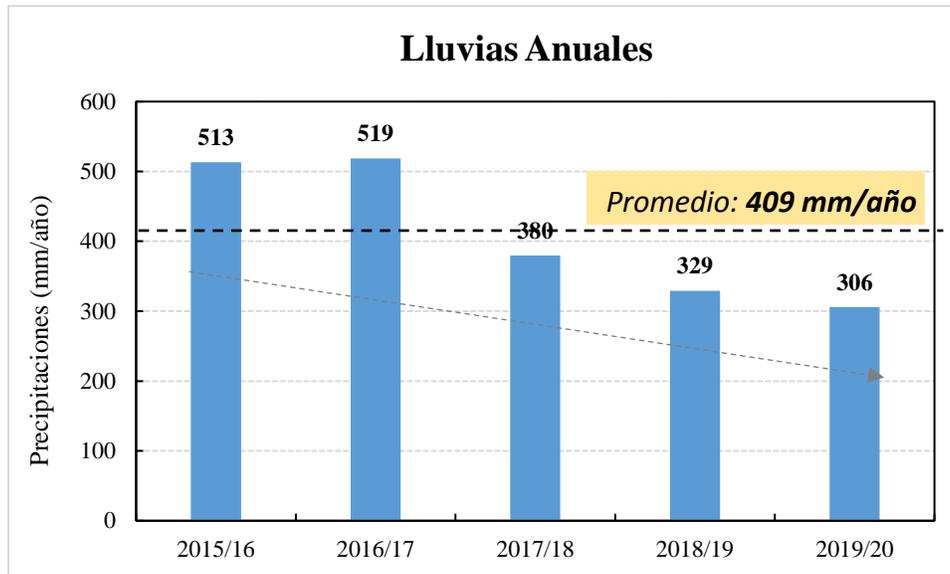
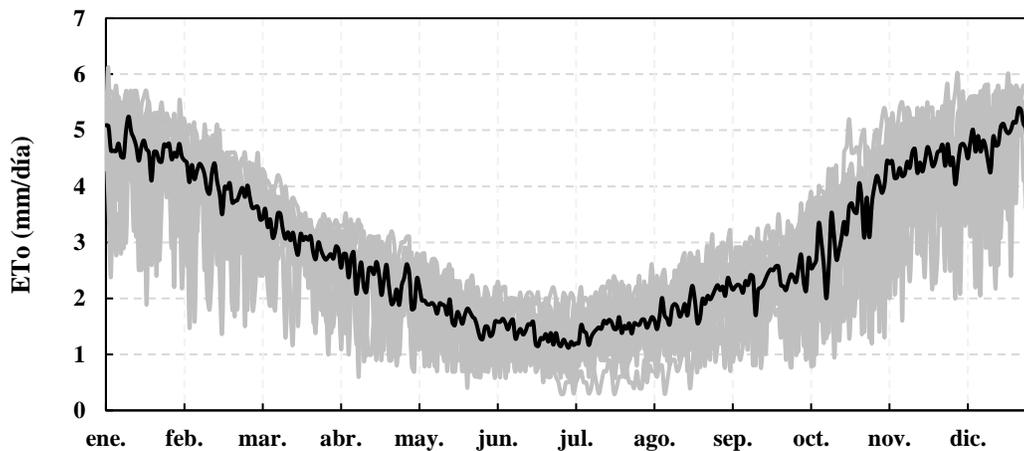


Figura 5. Precipitaciones anuales período 2015 - 2020 (registros estación meteorológica propia).

Por su parte, la distribución anual de la demanda ambiental representada por la variable evapotranspiración de referencia (ET_o), alcanza valores anuales promedio de 1.066 mm/año y máximos promedio de 5,4 mm/día durante el mes de diciembre (máximo absoluto de 6,4 mm/día y mínimo de 0,3 mm/día, durante los meses invernales de junio y julio. En la Figura 6 se señala el promedio de 10 años del comportamiento anual de la ET_o diaria y semanal, registrada en la estación presente en el predio.

Evapotranspiración Referencia (ET_o)



Evapotranspiración de Referencia Semanal

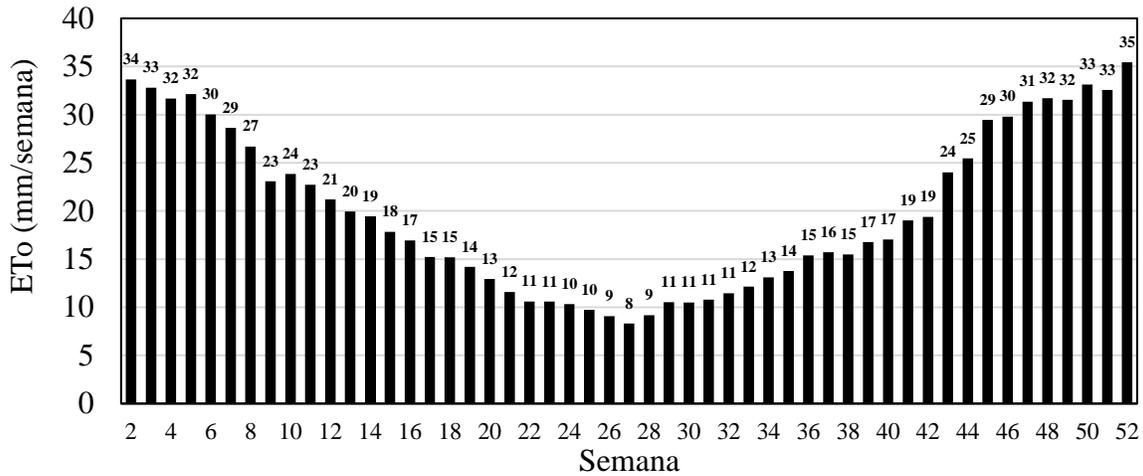


Figura 6. Evapotranspiración de referencia promedio período 2010-2020 (Elaborado con base en registros estación meteorológica propia).

Para confirmar el desempeño de la estación meteorológica al día de hoy, se realizó una comparación entre los datos de ETo obtenidos desde la estación y la estación Liceo Jean Buchanan, perteneciente a la Red Agroclimática de INIA (www.agrometeorologia.cl, Figura 7). De acuerdo a esta comparación, se puede indicar que los valores de ETo estimados con la estación propia son inferiores a los estimados por la estación de INIA durante los meses de verano. Esta situación se invierte a partir de abril, donde los valores ETo son superiores en la estación propia.

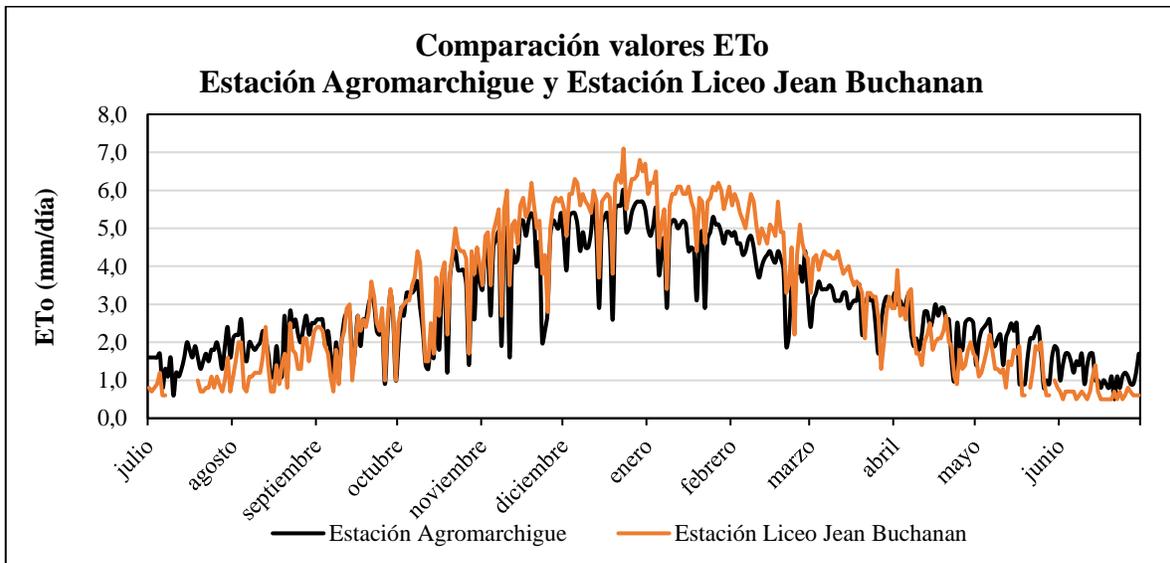


Figura 7. Comparación valores ETo Estación Agromarchigue y Estación INIA Liceo Jean Buchanan (Temporada 2019/).

Al acumular estas diferencias en períodos mensuales se puede indicar que en el mes de mayor demanda (enero) las diferencias pueden llegar a ser 31 mm/mes y en periodo octubre-marzo 132 mm. Esto será importante porque representan subestimaciones de la demanda ambiental

justamente en los períodos de mayor importancia. En los meses invernales, cuando se invierte la tendencia, no es tan importante ya que la demanda del ambiente es menor.

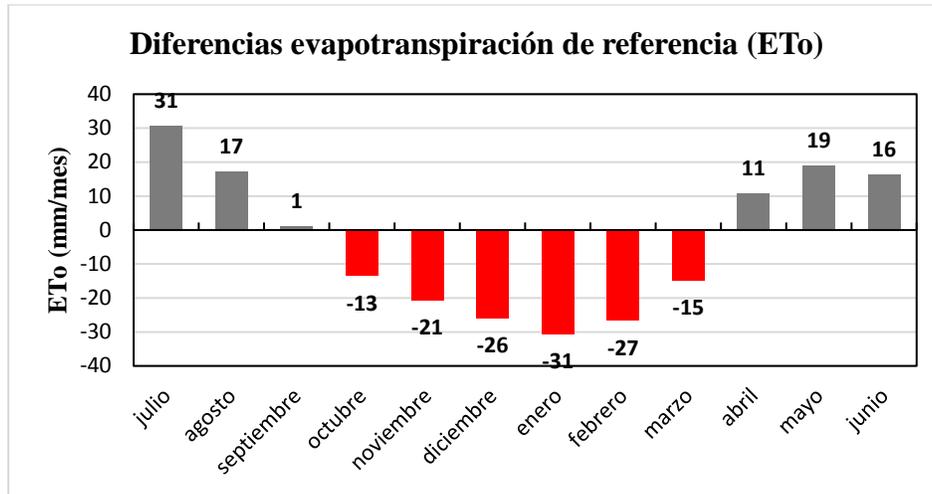


Figura 8. Comparación valores ETo Estación Agromarchigue y Estación INIA Liceo Jean Buchanan (Temporada 2019/20).

Al comparar los sensores que permiten el cálculo de ETO, se puede indicar que las principales diferencias se observan en la radiación solar incidente, que también corresponde al componente con mayor peso en el cálculo de ETO.

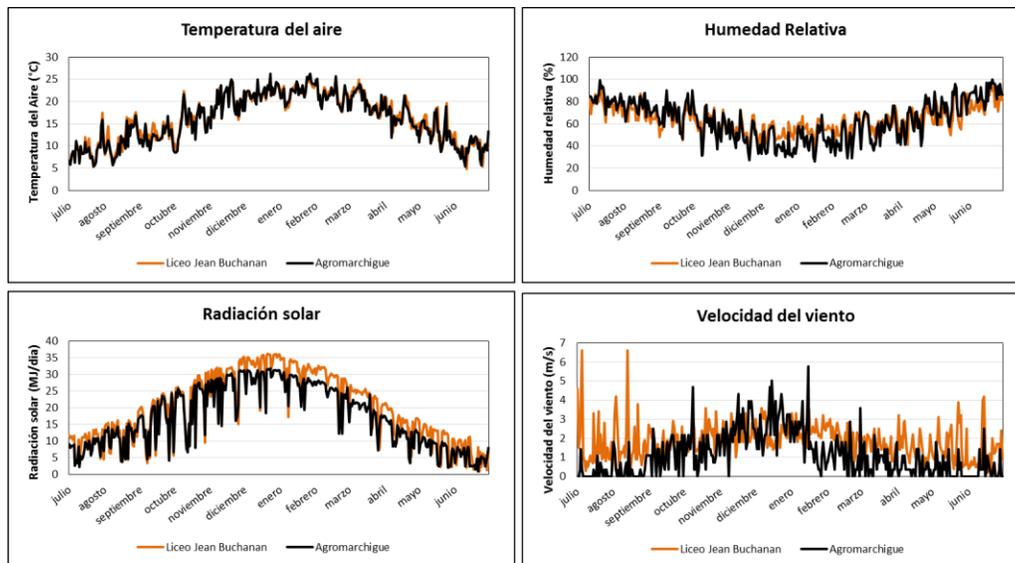
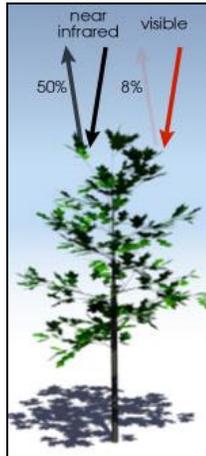


Figura 9. Comparación valores ETo Estación Agromarchigue y Estación INIA Liceo Jean Buchanan (Temporada 2019/20).

Caracterización del desarrollo del cultivo

Para la caracterización del desarrollo anual del cultivo se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) obtenido a partir de series temporales de imágenes satelitales. Este índice de vegetación permite estimar la absorción de la radiación solar por parte del cultivo en ciertos espectros de la radiación solar, eliminando la respuesta de otros elementos en el terreno. La fórmula de cálculo se señala en la Figura 10.



$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada

NIR: Reflectividad en el infrarrojo cercano

R: Reflectividad en el rojo

Figura 10. Ecuación de cálculo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI y representación esquemática de las longitudes de onda involucradas en su cálculo.

Los satélites utilizados en el análisis del cultivo fueron el Sentinel 2A, Sentinel 2B y Landsat 8. En el Cuadro 2 se señalan las principales características de los satélites utilizados en el estudio.

Cuadro 2. Características de las imágenes satelitales utilizados en el estudio.

Programa	Satélite	Cobertura imagen (km)	Resolución temporal (días entre visita)	Resolución espacial (metros)
Landsat (NASA)	Landsat 8	185 x 185	16 días	30
Copernicus (ESA)	Sentinel 2A	100 x 100	10 días	10
	Sentinel 2B			

Así mismo, el análisis de la variabilidad espacial del cultivo dentro del sector de análisis permite identificar y cuantificar diferencias en su desarrollo entre distintas zonas. Estas diferencias serán analizadas conjuntamente con el productor de manera de identificar factores que podrían estar induciendo la des uniformidad observada, como pueden ser características edáficas del sitio, inadecuada operación del equipo de riego u otros factores adversos que puedan limitar el desarrollo del cultivo.

En la Figura 11 se señala en comportamiento del índice NDVI en los sectores A4-LP1, F6-LP2 y H3-LD, indicando los valores promedio, máximos y mínimos alcanzados durante la temporada 2019/20.

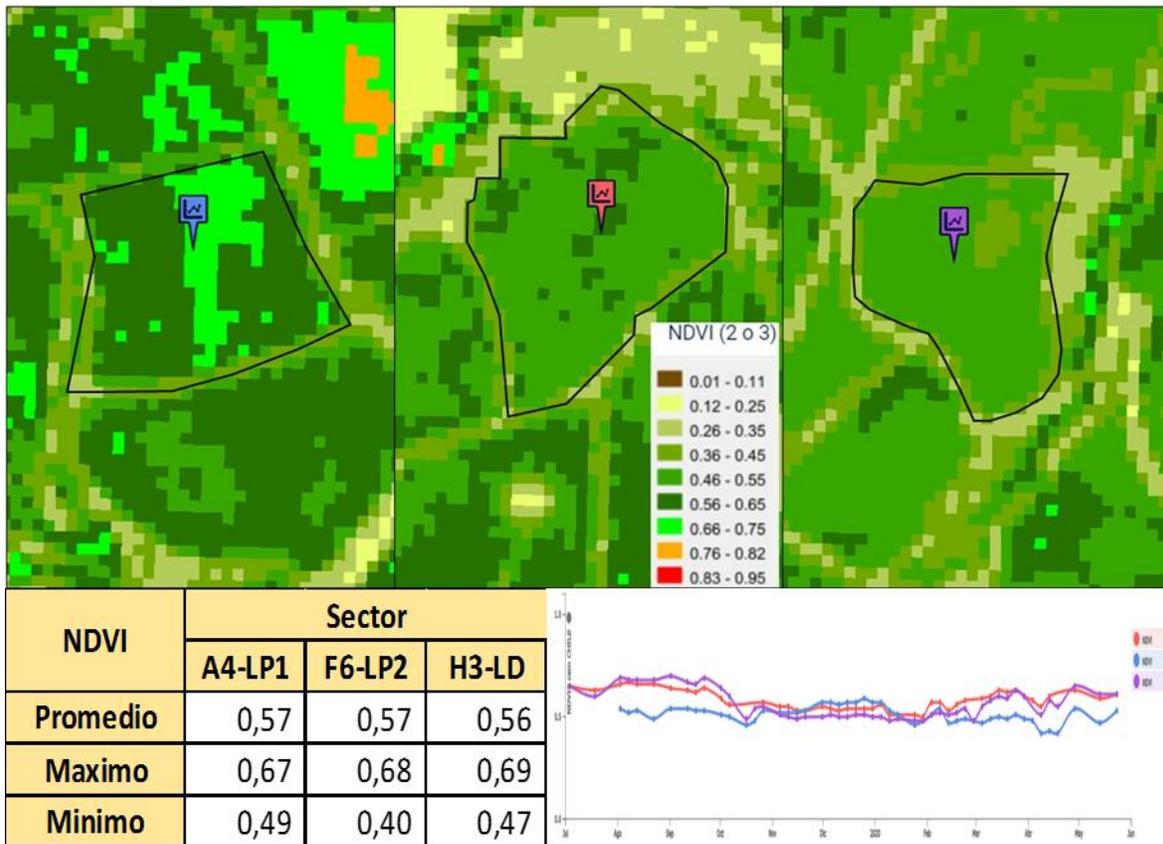


Figura 11. Vista general del índice NDVI en los sectores bajo análisis (Agromarchigue, San José de Marchigue).

Como se puede apreciar los valores promedio del índice NDVI en los 3 sectores de análisis, son similares y se diferencia principalmente por los valores mínimos alcanzados. Más detalles de la variabilidad espacial de las plantas dentro de los sectores de riego serán analizados en el capítulo Distribución espacial de la Transpiración.

Manejo del riego

La determinación de las necesidades de riego de los cultivos se realizó utilizando el marco conceptual “evapotranspiración de referencia-coeficiente de cultivo”, propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998): La fórmula que resume su cálculo se indica a continuación:

$$ETc = Kc \times ETo$$

Donde;

ETc: Evapotranspiración de cultivo (mm/día)

Kc: Coeficiente de cultivo (adimensional)

ETo: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Para alimentar esta fórmula, se utilizaron por una parte los valores de la *ETo* estimados por las estaciones de la Red Agrometeorológica Nacional (RAN MINAGRI), disponible en el sitio web <https://agrometeorologia.cl/>. De este modo se descargó la variable *Evapotranspiración de Referencia* (*ETo*), estimada a partir de los registros meteorológicos diarios de la temperatura del aire, humedad

relativa, radiación solar incidente y velocidad del viento y utilizando la ecuación conocida como Penman-Monteith (PM).

Por otro lado, para obtener valores del K_c se utilizó la información disponible en la Plataforma Agrícola Satelital PLAS (<http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=plas>), estimado a partir del índice de vegetación NDVI.

Coeficientes de cultivo

En este trabajo, para estimar el nivel de desarrollo de las plantas en el terreno se utilizó el índice de vegetación satelital NDVI y para estimar el potencial transpirativo del cultivo se definió un coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) de acuerdo a lo propuesto por la literatura científica (Campos et al., 2010; Bausch, 1993; Bausch, 1995; Bausch and Neale, 1987; Heilman et al., 1982; Neale, et al., 1989). La relación utilizada para obtener el K_{cb} se indica en la siguiente fórmula:

$$K_c = 1,51 \times NDVI - 0,23$$

En la Figura 12 se señala el comportamiento anual del coeficiente de cultivo promedio para las plantas de la variedad Arbequina los sectores de análisis. A partir del comportamiento anual del K_c se puede observar que en el período invernal para los sectores F6-LP2 y H3-LD, los valores del K_c son más altos indicando posiblemente mayor desarrollo del cultivo durante ese período (menor demanda ambiental) o la presencia de malezas. Así mismo, los menores valores del K_c se observan en los meses de verano (diciembre - febrero), probablemente debido a la mayor demanda del ambiente y el efecto del déficit hídrico sobre el cultivo. El sector A4-LP1 presenta un comportamiento diferente a los antes señalado, con valores bajos en invierno y altos en verano, valores que al final de la temporada terminan equiparándose en los 3 sectores.

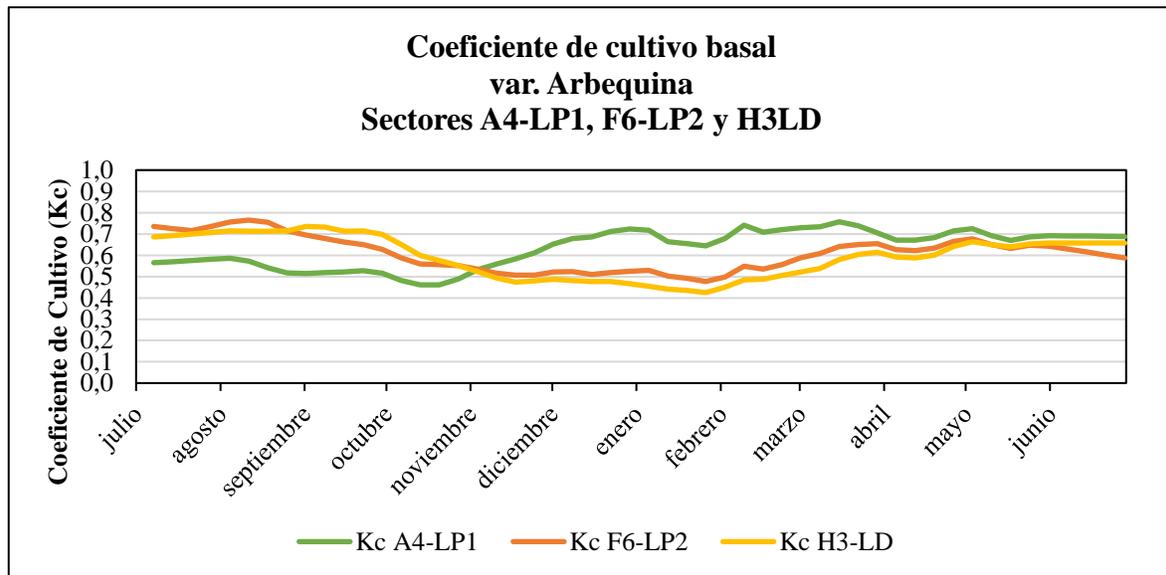


Figura 12. Comportamiento anual del K_c durante la temporada 2019/20 sectores A4-LP1, F6-LP2 y H3-LD, var. Arbequina. Agromarchigue, San José de Marchigue.

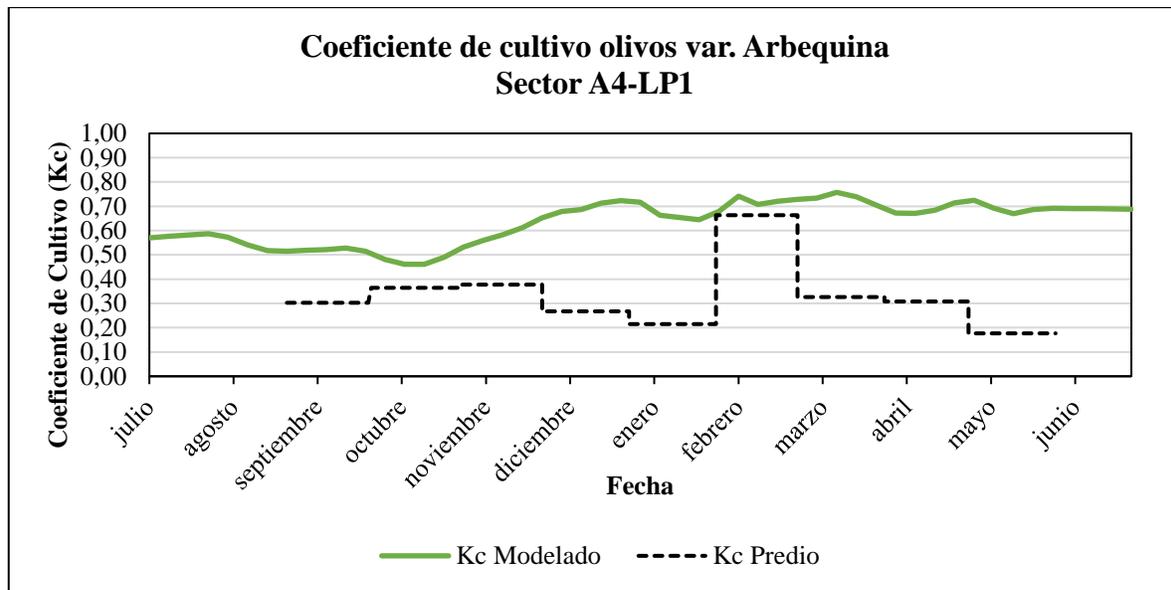
En el Cuadro 3 se presenta un resumen de valores de K_c registrados en cada sector de análisis.

Cuadro 3. Resumen de valores de Kc máximo, mínimo y promedio en los sectores analizados.

Variedad	Sector	Kc modelado		
		Máximo	Mínimo	Promedio
Arbequina	A4-LP1	0,76	0,46	0,63
	F6-LP2	0,77	0,48	0,61
	H3-LD	0,74	0,43	0,59

Como se puede observar en los sectores de análisis, los valores de Kc máximo están en el rango 0,74 a 0,76. Por su parte el Kc mínimo está en el rango 0,43 a 0,48 El Kc promedio anual estimado fue en un rango entre 0,59 a 0,63.

De acuerdo a la información disponible de los volúmenes de riego aportados durante la temporada 2019/20, se puede realizar una comparación entre el coeficiente de cultivo satelital o modelado y el utilizado en el manejo del riego del predio. En la Figura 13 se señala dicha comparación para cada sector analizado.



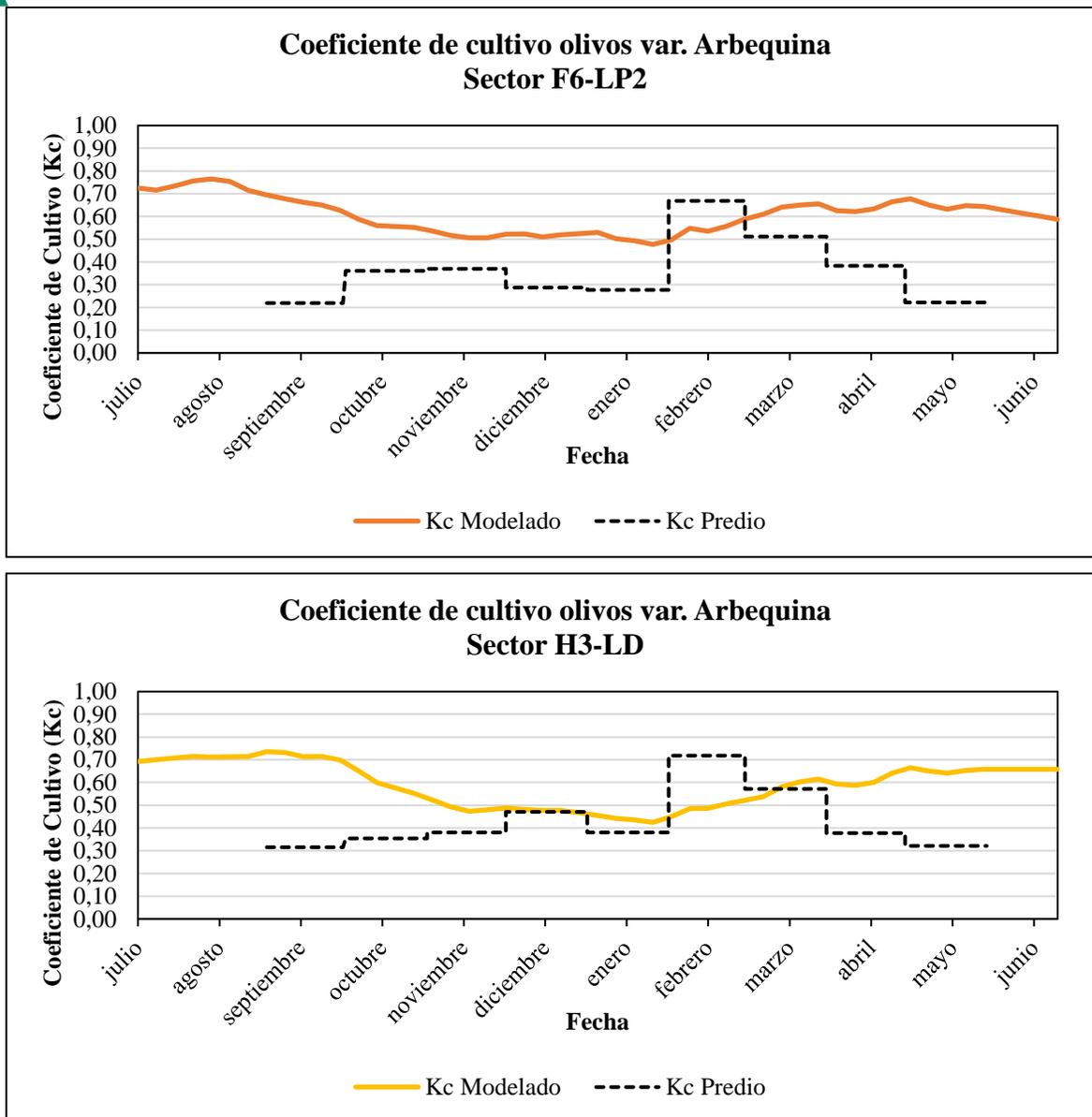


Figura 13. . Comparación de Kc modelado vs Kc estimado en el predio.

De este modo al comparar los valores de Kc por sector comparados frente a la modelación con la información satelital se puede indicar que los valores utilizados operativamente en el manejo del riego presentan variaciones anuales y diferencias que finalmente se traducen en casi todos los casos en diversas intensidades de déficit en el aporte del riego

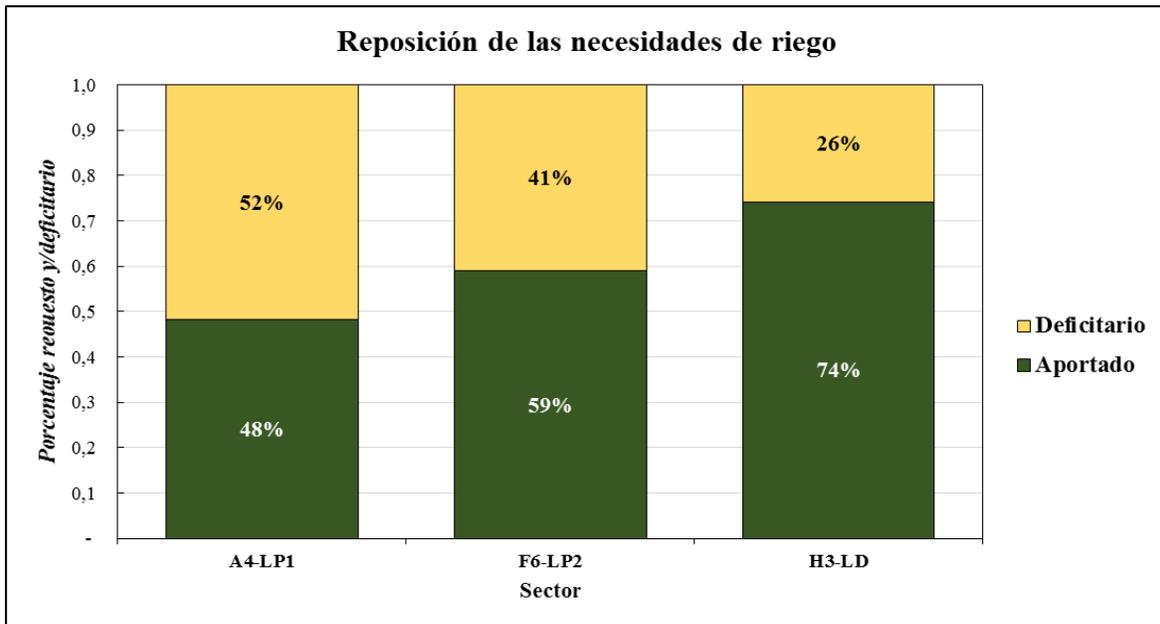
Demanda de riego modelada

Con base en la metodología “coeficiente de cultivo- evapotranspiración de referencia” descrita anteriormente se modeló la transpiración potencial del cultivo, correspondiente a la estimación de necesidades de riego del cultivo de manera de mantener el cultivo en un óptimo de disponibilidad hídrica (sin déficit). Como se señaló anteriormente el parámetro Kc fue obtenido del índice de vegetación NDVI desde la Plataforma Agrícola Satelital PLAS y los datos de ETo de la estación presente en el predio.

Por otro lado, se recopiló información del manejo real del riego en el cultivo durante la temporada 2019/20, de manera de contrastarla con el análisis modelado. El volumen real de riego aportado al cultivo se consideró con base en los datos aportados por el productor. El Cuadro 4 presenta un resumen de los volúmenes de riego aportados en campo y las estimaciones realizadas de acuerdo al monitoreo satelital del cultivo y la demanda ambiental del sitio.

Cuadro 4. Transpiración potencial del cultivo, volumen de riego aportado al cultivo y eficiencia del uso del agua en cada sector analizado.

Variedad	Sector	Modelo satelital	Registros de riego	Porcentaje de demanda hídrica cubierta (%)
		Transpiración (m ³ /ha/temporada)	Riego Aportado (m ³ /ha/temporada)	
Arbequina	A4-LP1	6.418	3.098	48%
	F6-LP2	5.771	3.403	59%
	H3-LD	5.481	4.065	74%



*: Temporada agrícola considerada fue Julio a Junio.

Como se puede observar en todos los sectores analizados el volumen de riego aportado fue menor al estimado mediante el uso del coeficiente de cultivo modelado. Esta situación fue más evidente en el sector A4-LP1 donde lo aportado corresponde al 48% del consumo hídrico, lo cual representa un déficit de un 52%. En el caso de los sectores F6-LP2 y H3-LD, esta diferencia fue menor y varió entre un 59% y un 74% del volumen requerido, es decir un déficit entre un 41% y 26%.

Para analizar la magnitud del déficit de riego por época del año, se realizó el análisis de los aportes mensuales de riego frente a la modelación satelital para los sectores bajo análisis. En las Figura 14, Figura 15 y Figura 16 se gráfica del volumen de agua aportada mensualmente en el predio junto a las necesidades estimadas para la temporada 2019/20.

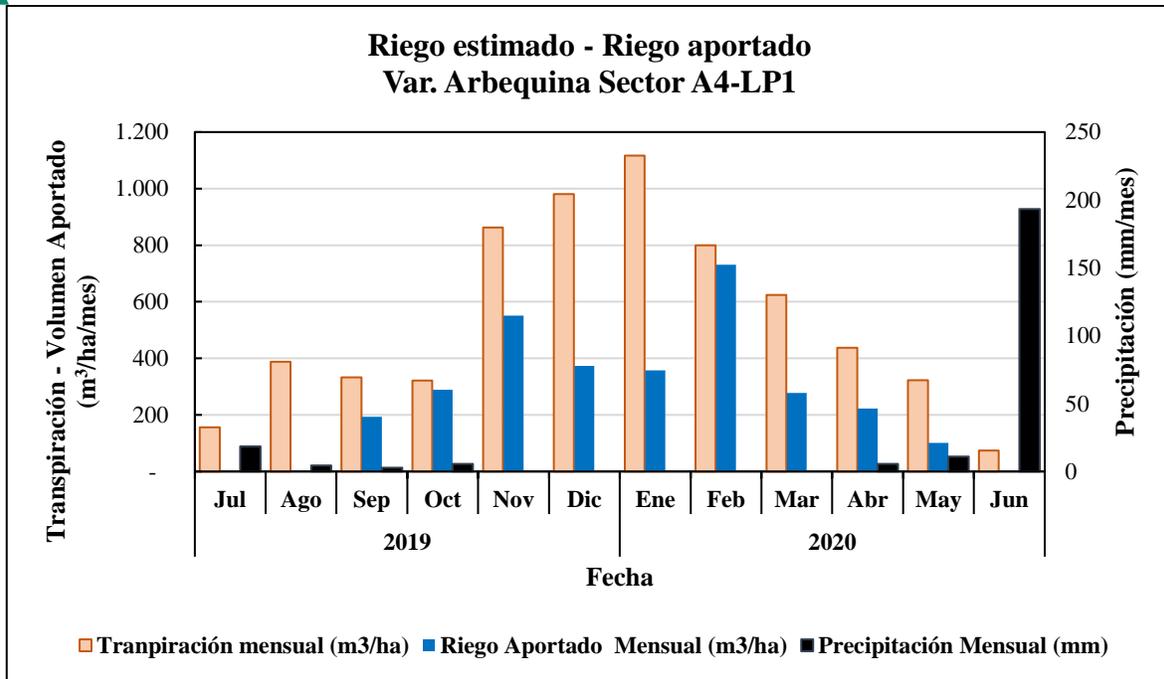


Figura 14. Comparación mensual del riego aportado en campo y el consumo modelado en el sector A4-LP1 durante la temporada 2019/20. Predio Agromarchigue.

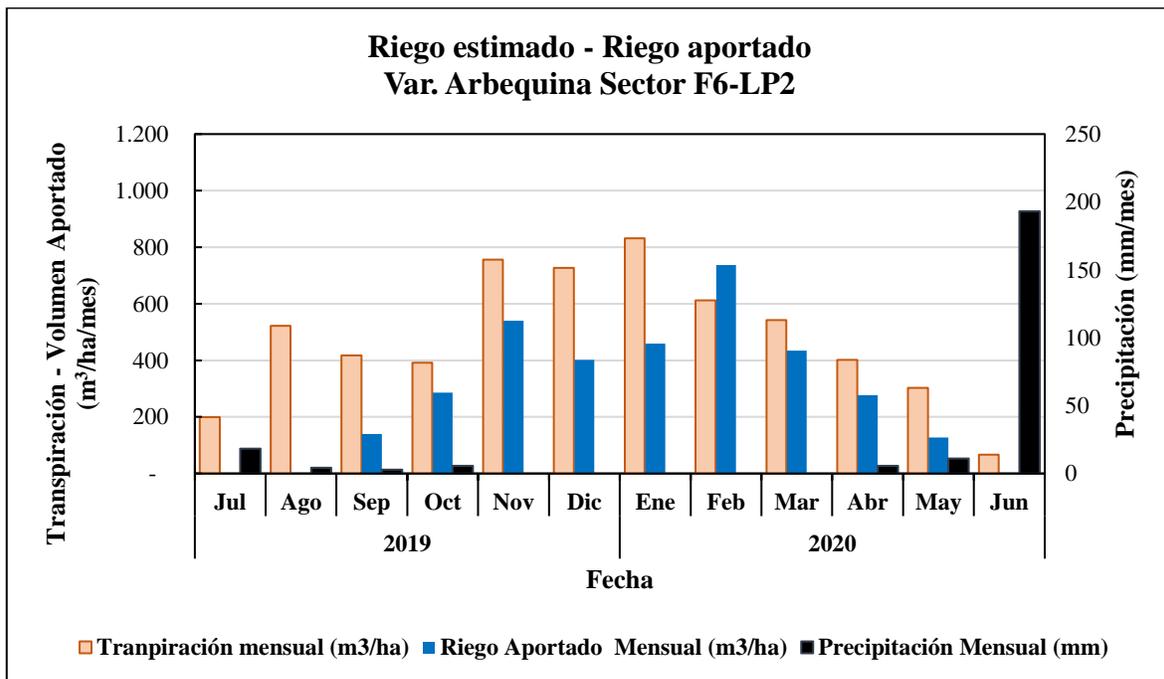


Figura 15. Comparación mensual de riego aportado en campo y el consumo modelado en el sector F6-LP2 durante la temporada 2019/20. Predio Agromarchigue.

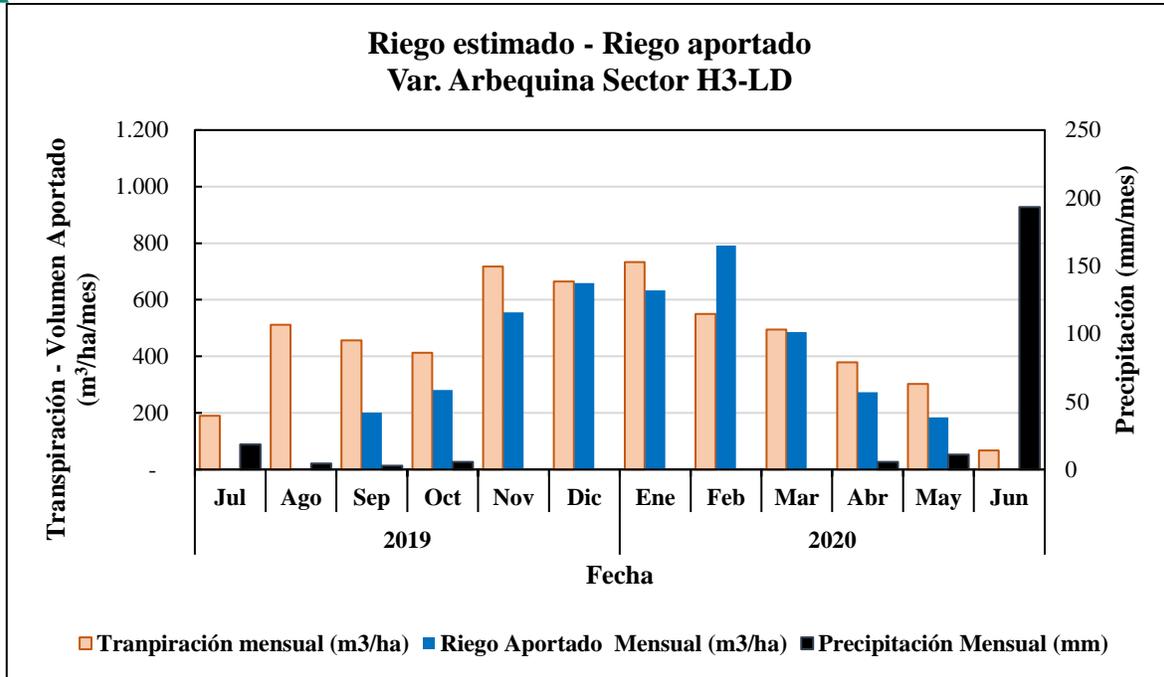


Figura 16. Comparación mensual de riego aportado en campo y el consumo modelado en el sector H3-LD durante la temporada 2019/20. Predio Agromarchigue.

Considerando la acumulación mensual de necesidades hídricas a reponer y el volumen de riego realmente aportado, se observa que existen diferencias deficitarias entre la tasa de transpiración estimada y el riego aportado en todos los meses de la temporada, exceptuando febrero para los sectores F6-LP2 y H3-LD, donde se observa sobre riego. El déficit mencionado se hace más evidente en los meses de octubre a enero. Esta situación puede tener importancia ya que en octubre y noviembre (registros fenológicos aportados), esta especie se encuentra en floración y cuaja.

Con objeto de cuantificar las diferencias entre el riego aportado y las necesidades de riego estimadas y los aportes de las lluvias, se calculó un factor de déficit (K_s) de acuerdo a la siguiente relación:

$$K_s = 1 - \frac{\text{riego aplicado} + \text{lluvia}}{\text{riego estimado por satelite}}$$

de este modo los valores de K_s cercanos a 100 indican que se suplieron las necesidades de transpiración, ya sea por riego y/o lluvia y el déficit hídrico es mínimo. Por el contrario, cuando el valor de K_s es cercano a 0 indica que las necesidades de transpiración no fueron repuestas con el aporte de riego y/o precipitaciones y el déficit hídrico fue máximo.

Como se puede apreciar en la Figura 17 que en los sectores analizados, el A4-LP1 fue quien estuvo sometido a mayor déficit, mientras que en el sector H3-LD el déficit fue menor. Cabe señalar que en el periodo de floración (octubre) el sector que recibió menos déficit fue el sector A4-LP1.

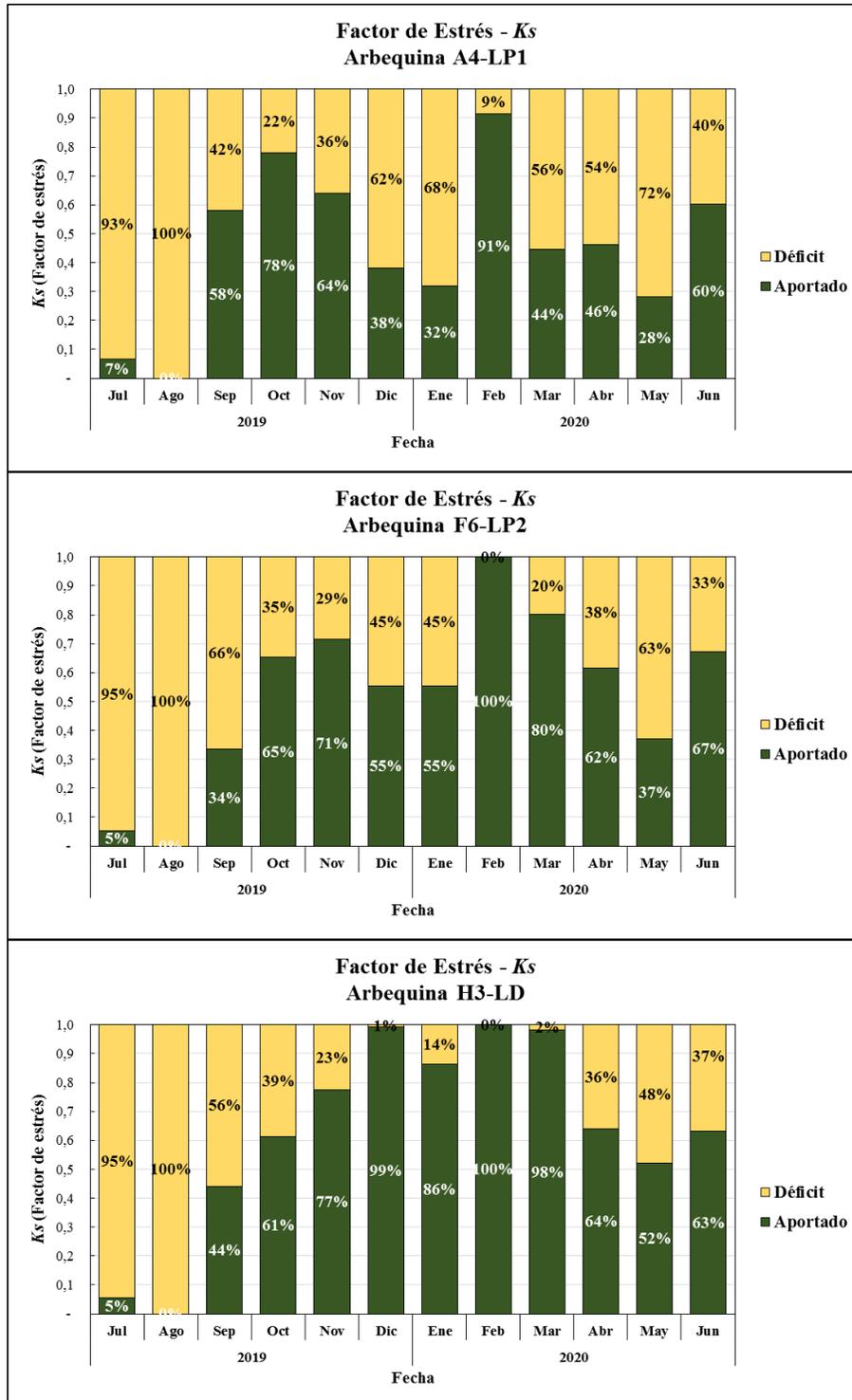


Figura 17. Factor de déficit (K_s) estimado en los sectores analizados durante la temporada 2019/20. Agromarchigue, San José de Marchigue.

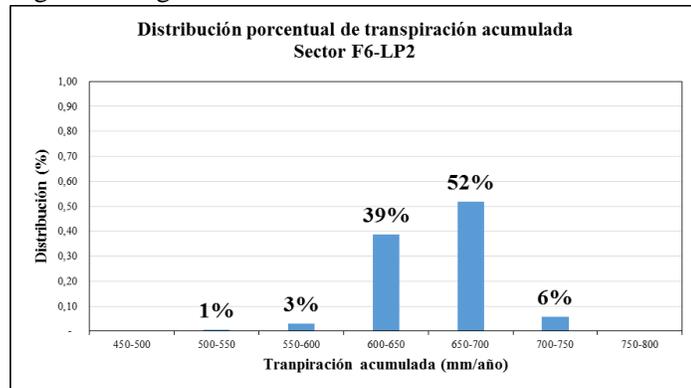
Distribución espacial de la transpiración

A partir del comportamiento de la transpiración acumulada durante la temporada completa en los sectores de análisis, se estimaron valores promedio, máximos y mínimos. Dichos valores se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Transpiración acumulada promedio, máxima y mínima por sector de análisis.

Variedad	Sector	Transpiración acumulada (mm/año)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
Arbequina	A4-LP1	701	757	631
	F6-LP2	659	729	594
	H3-LD	639	683	511

A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector A4-LP1, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (92%, 3,59 ha) se concentra en el rango de 650 mm a 750 mm al año. En el caso del sector F6-LP2, el mayor porcentaje de la superficie (52%, 2,18 ha) se concentra en el rango 650 mm a 700 mm al año, seguido del rango de 600mm a 650 mm de transpiración anual en un 39% de la superficie (1,64 ha). Siguiendo con el análisis, en el sector H3-LD, al igual que en los sectores anteriormente analizados, el mayor porcentaje de superficie se concentra en el rango 650 mm a 700 mm al año (46%, 1,33 ha), le sigue en rango de 600 mm a 650 mm al año con un 36% de



la superficie (1,04 ha) En las Figura 18,

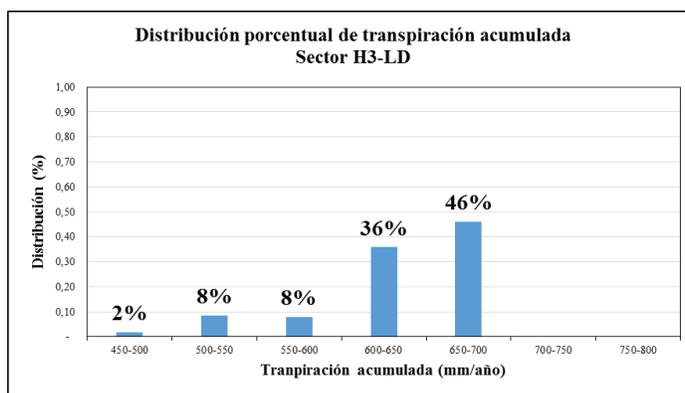


Figura 19 y

Figura 20 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

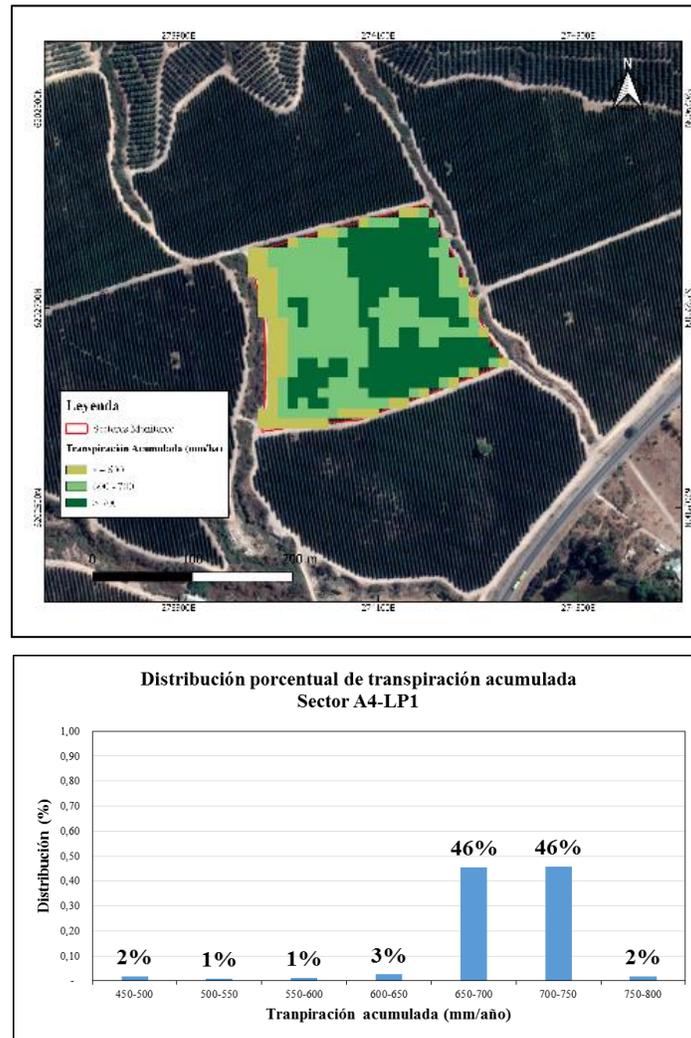


Figura 18. Distribución de los rangos de transpiración acumulada en el sector A4-LP1. Agromarchigue, San José de Marchigue.

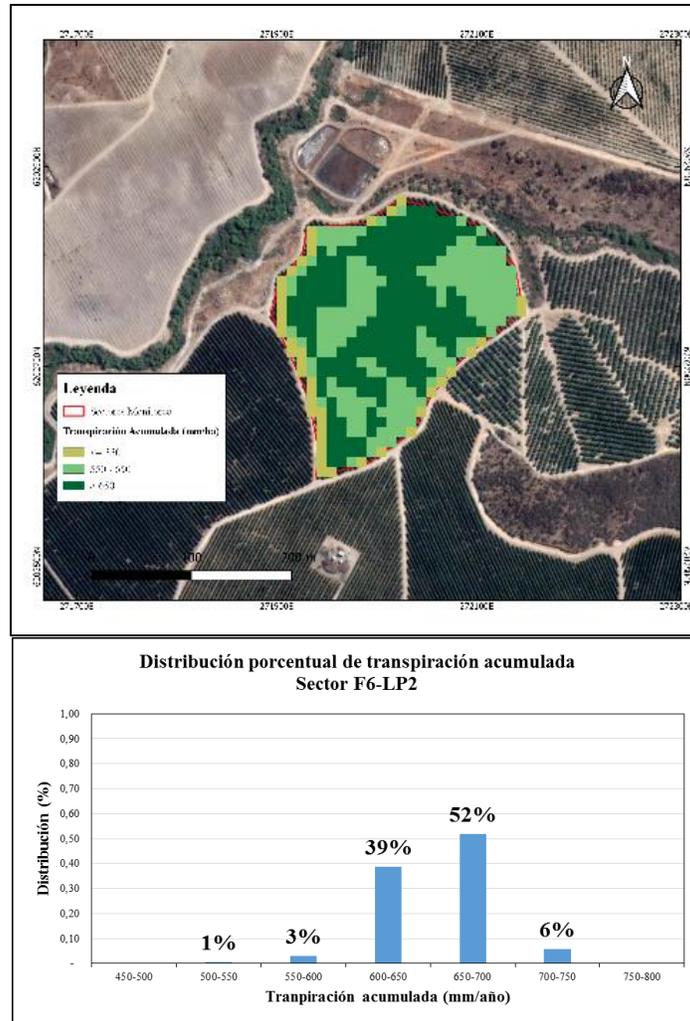


Figura 19. Distribución de los rangos de transpiración acumulada en el sector F6-LP1. Agromarchigue, San José de Marchigue.

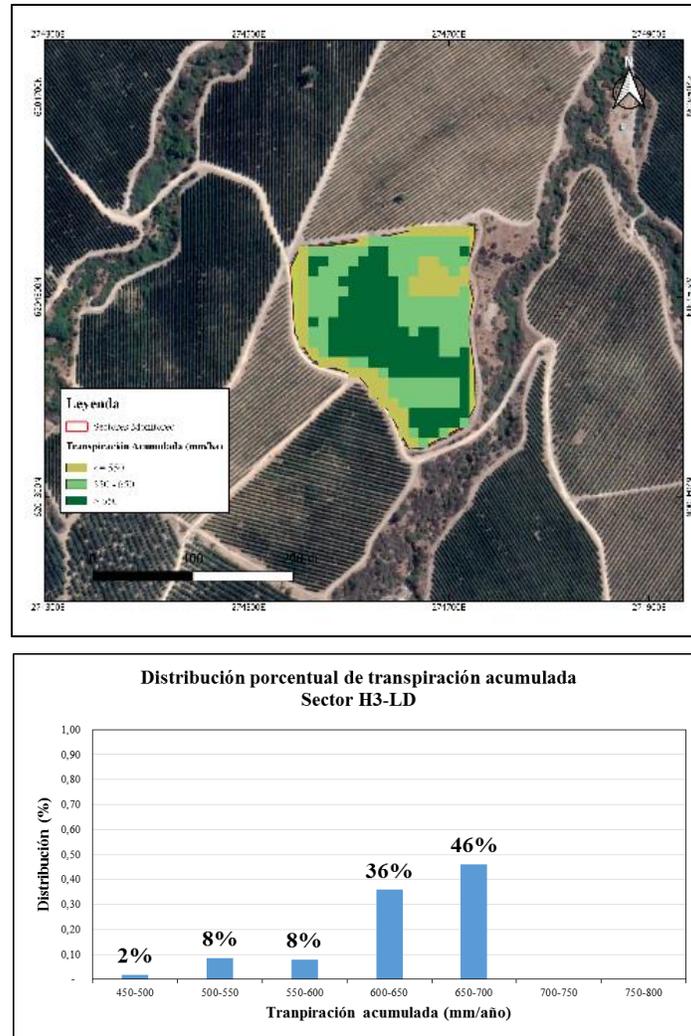
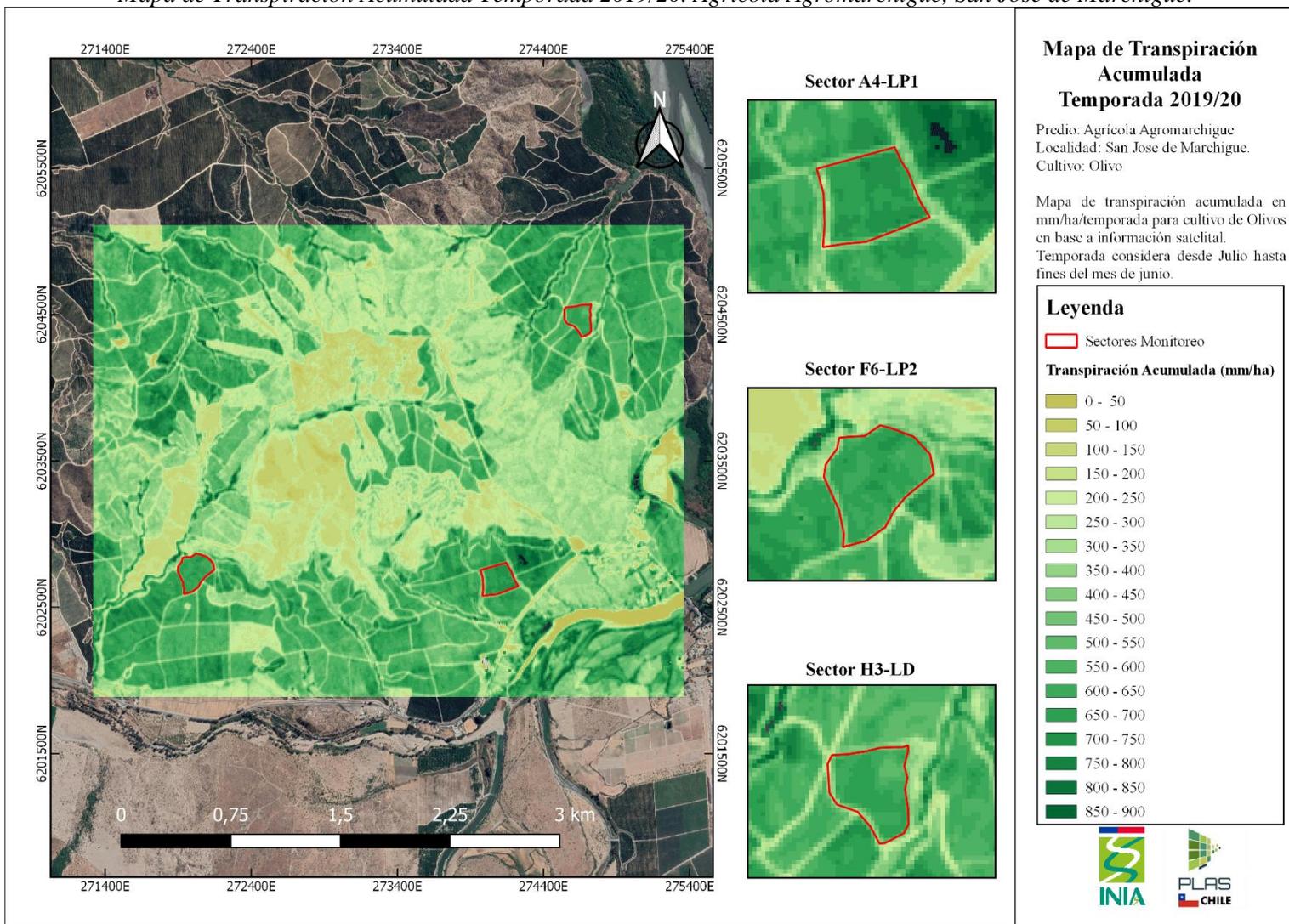


Figura 20. Distribución de los rangos de transpiración acumulada en el sector H3-LD. Agromarchigue, San José de Marchigue.

Anexo

Mapa de Transpiración Acumulada Temporada 2019/20. Agrícola Agromarchigue, San José de Marchigue.





Literatura citada

Agrimed, 2017. Atlas Agroclimático de Chile, estado actual y tendencias del clima. Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED). Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Chile.

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 - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manage.* 98, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011>.

Bausch, W.C., 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46, 213–222. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90096-G](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90096-G).

Bausch, W.C., 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manage.* 27, 55–68. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01125-3](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01125-3).

Bausch, W.C., Neale, C.M.U., 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Trans. ASAE* 30, 703–709. <https://doi.org/10.13031/2013.30463>.

Heilman et al., 1982 Heilman, J.L., Heilman, W.E., Moore, D.G., 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agron. J.* 74, 967–971. <https://doi.org/10.2134/agronj1982>.

Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heermann, D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. ASAE* 32, 1891–1899.



Informe Consultoría Manejo del Riego Agrícola La Reserva de Llacay Ltda.

Introducción

Con objeto de implementar un trabajo colaborativo entre el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA y la Asociación de Productores de Aceite Oliva ChileOliva, se implementó un trabajo de consultoría en la cual se analizaron las metodologías para la definición de las necesidades de riego del cultivo y aspectos asociados al manejo agronómico del cultivo de olivos.

El principal objetivo de la consultoría es transferir un marco conceptual estandarizado para la definición de las necesidades de riego, junto a la capacitación en el uso de nuevas tecnologías para el monitoreo del cultivo y de los factores ambientales que influyen en el consumo hídrico y por tanto en la programación del riego.

En este trabajó se elaboró un análisis comparativo entre los criterios utilizados actualmente por el productor para definir los volúmenes de riego aportados al cultivo (manejo tradicional del riego) y las necesidades de riego estimadas a partir del marco conceptual propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998), con la innovación tecnológica del uso del índice de vegetación satelital NDVI para estimar un Coeficiente de Cultivo y el uso de información de la demanda ambiental del sitio para estimar la tasa de transpiración máxima del cultivo.

De este modo, en el siguiente informe se analiza el desarrollo del cultivo utilizando información del índice de vegetación satelital NDVI, factores ambientales que influyen en el consumo hídrico del cultivo, las metodologías para la definición de las necesidades de riego en el campo y asistido con información satelital y la variabilidad espacial de la tasa de transpiración del cultivo dentro de los sectores analizados.



Predio

Los trabajos de análisis fueron realizados en un predio ubicado en la localidad de El Sauce, comuna de San Pedro, Región Metropolitana. Los sectores analizados corresponden a cuarteles con la variedad Arbequina (Sector 8 A, 8 B, 9 D y 17 D) y la variedad Picual (Sector 19 E y 22 C). En la Figura 1 se indica la ubicación del campo, así como los sectores analizados.

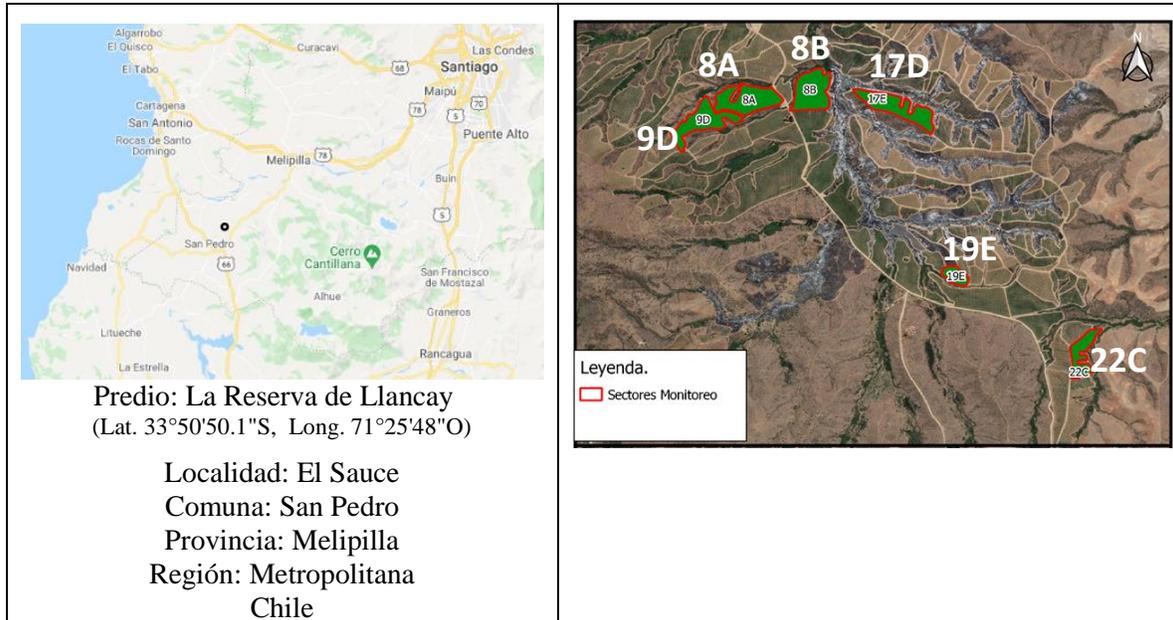


Figura 1. Ubicación del predio y sitios analizados (La Reserva, Comuna San Pedro).

En el Cuadro 1 se indica un resumen de las características del cultivo dentro de los sitios analizados en el predio La Reserva de Llancay.

Cuadro 1. Equipo, superficie, variedades, año de plantación y marcos de plantación de los sitios bajo análisis.

Sector	Superficie (ha-SIG)	Variedad	Año de Plantación	Marco de plantación(m)	Plantas/ha
8 A	7,9	Arbequina	2010	4,0 x 1,5	1.667
8 B	6,4		2010	4,0 x 1,5	1.667
9 D	6,3		2010	6,0 x 2,0	834
17 E	6,6		2010	6,0 x 2,0	834
19 E	1,8	Picual	2012	6,0 x 2,0	834
22 C	3,6		2012	6,0 x 4,0	417

Características climáticas zona de estudio

La zona de El Sauce se encuentra dentro del distrito agroclimático Melipilla (Agrimed, 2017). En este distrito el clima corresponde a templado cálido supratermal, con régimen de humedad semi-árido. La temperatura del aire varía entre máximos en el mes de enero de 29,5°C y mínimos en el mes de julio de 4,6°C. Dentro del distrito se registran valores máximos que oscilan entre 31,5°C y 27,8°C y valores de la temperatura mínima entre 6,1°C y 3,7°C. En promedio el distrito presenta 261 días consecutivos libres de heladas y al año se registran en promedio 9 heladas. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa de los cultivos tiene una longitud aproximada de 11 meses. La sumatoria anual de días grados es de 1.831 y 563 horas de frío (acumuladas hasta el 31 de Julio). En el distrito la media anual de las precipitaciones es de 407 mm/año, con un período seco de 8 meses de duración y un déficit hídrico de 541 mm/año. El período húmedo dura 2 meses, durante los cuales se produce un excedente hídrico de 62 mm (Agrimed, 2017).



Figura 2. Distrito agroclimático Melipilla (Agrimed, 2017).

Para el análisis del comportamiento de las condiciones meteorológicas en el sitio, se utilizó la información registrada por la estación San Pedro de Melipilla perteneciente a la Red de Estaciones Agrometeorológicas de INIA (www.agrometeorología.cl). De este modo se observó que el comportamiento de la temperatura del aire se caracteriza por valores máximos en torno a los 31°C (con peak de 38,5°C en enero de 2017) y temperaturas mínimas en torno a 0,53 °C en los meses de invierno, con eventos extremos de -4,6°C en junio de 2015 y -4,3°C en julio de 2018.

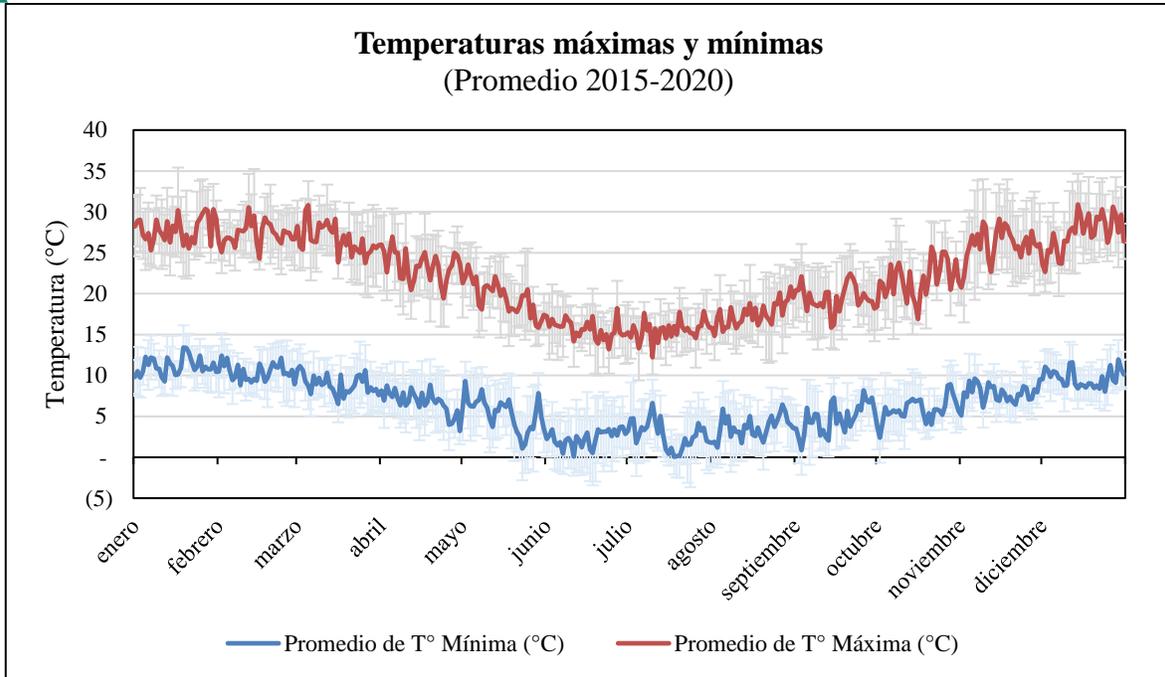


Figura 3. Comportamiento anual de las temperaturas máximas y mínimas. Estación San Pedro de Melipilla – INIA (www.agrometeorología.cl).

En el período 2015-2020 el monto anual de las precipitaciones alcanzó en promedio 366 mm/año, con montos anuales de 566 mm para la temporada 2015/16, 490 mm en 2016/17, 361 mm en 2017/18, 219 mm en 2018/19 y 194,2 mm en lo que va de la temporada 2019/20 (Figura 4).

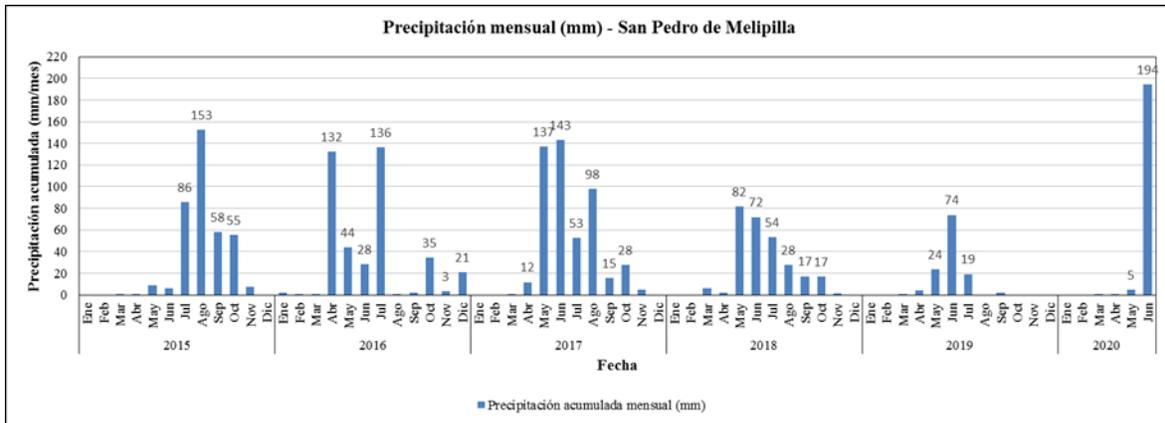


Figura 4. Precipitaciones mensuales acumuladas para la zona El Sauce. A partir de datos de estación INIA San Pedro de Melipilla. Años 2015 a 2020 (www.agrometeorología.cl).

La tendencia de las lluvias durante los cinco últimos años evidencia una disminución de los montos anuales por lo cual se esperaría una tendencia a la disminución de las reservas de agua en el suelo (Figura 5).

Lluvias Anuales

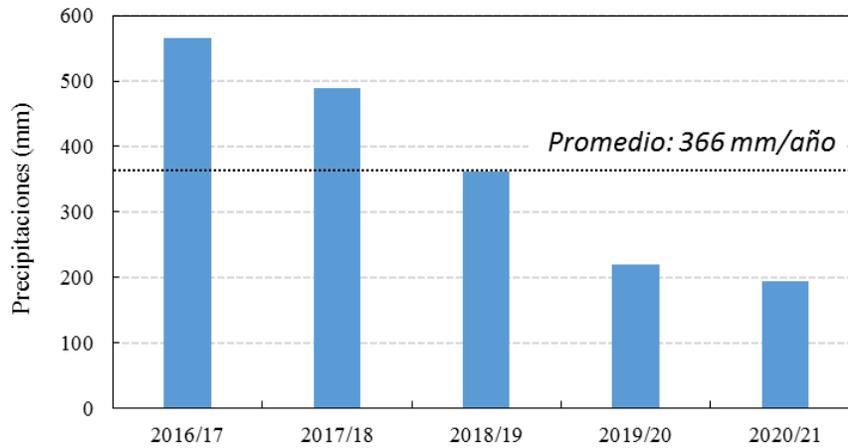


Figura 5. Precipitaciones anuales estación agrometeorológica San Pedro de Melipilla INIA. (www.agrometeorología.cl).

Por su parte, la distribución de la demanda ambiental, representada por la variable evapotranspiración de referencia (ET_o), alcanza valores anuales de 948 mm/año y máximos promedio de 5,5 mm/día en el verano, durante el mes de diciembre (con un máximo absoluto de 6,6 mm/día) y mínimos de 0,7 mm/día durante los meses invernales de junio y julio. En la Figura 6 se señala el promedio de 5 años del comportamiento anual de la ET_o, registrada en la estación San Pedro de Melipilla INIA.

Evapotranspiración de referencia diaria (Promedio 2015-2020)

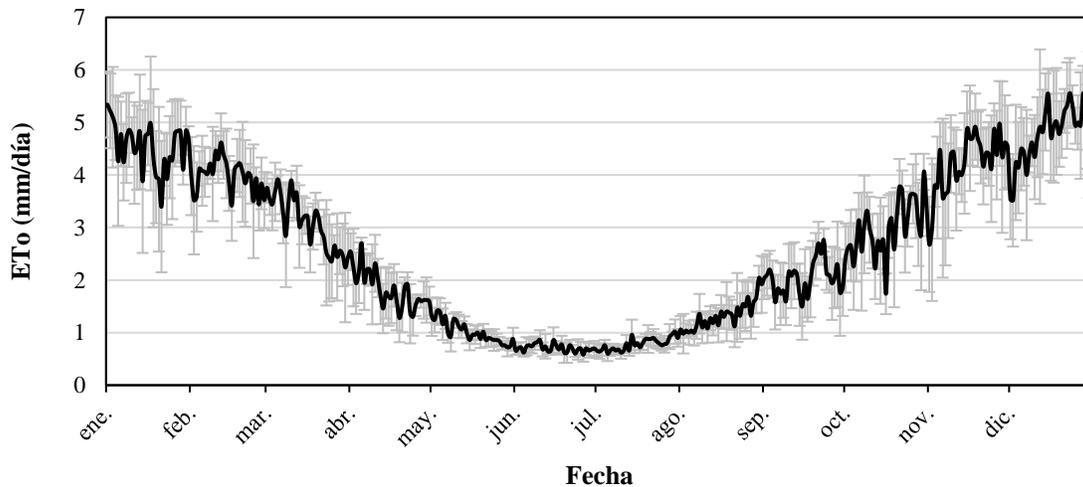


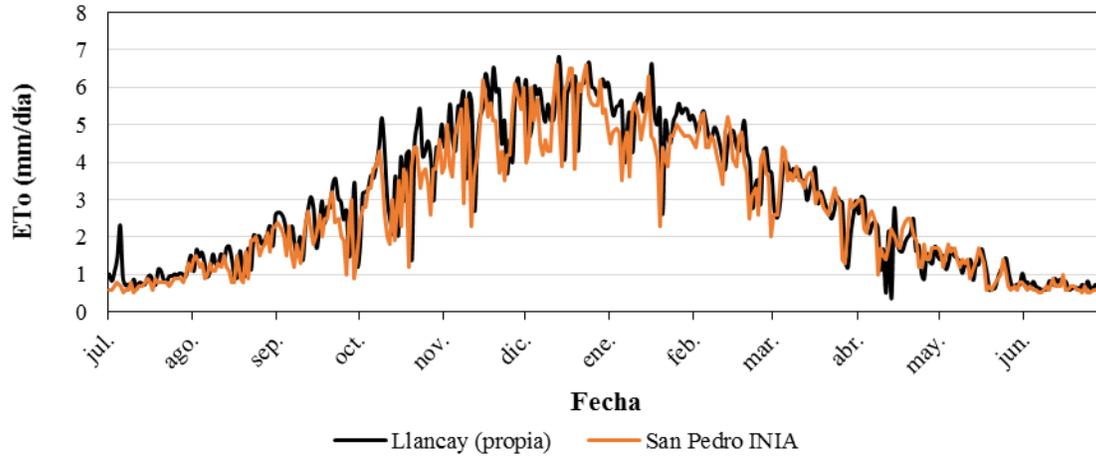
Figura 6. Comportamiento anual de la evapotranspiración de referencia. (Promedio diario estimado en base a 5 años de registro período 2015 al 2020, estación San Pedro de Melipilla INIA. (www.agrometeorología.cl).

Para analizar el performance de la estación meteorológica propia del campo, se realizó una comparación entre los valores de ET_o estimados con la estación propia y la estación San Pedro de Melipilla INIA durante el período 1 de julio de 2019 al 30 de junio de 2020 (Figura 7).



De este modo se pudo observar que los datos de la estación del predio Llacay son ligeramente mayores a los datos de la estación San Pedro de INIA y que dichas diferencias se sitúan en torno a 6 mm al mes y anuales de 88 mm. En términos generales el desempeño de la estación propia es adecuado y recoge de buena manera el comportamiento de la demanda ambiental y puede ser utilizada para la programación del riego.

Evapotranspiración de referencia diaria (ET_o)



Evapotranspiración de referencia mensual (ET_o)

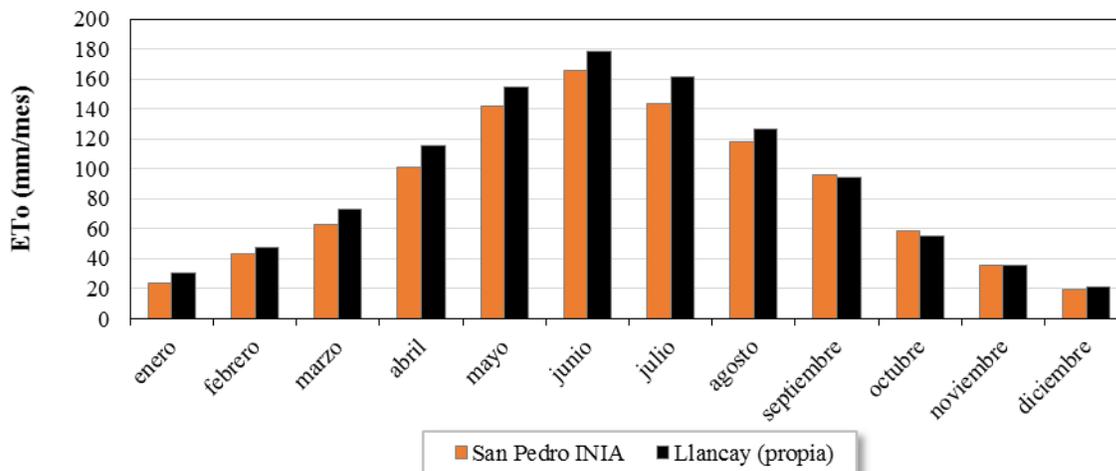


Figura 7. Comparación de valores estimados de ET_o diaria y mensual en las estaciones Llacay (propia) y estación de San Pedro de Melipilla – INIA, durante la temporada 2019-2020.

Caracterización del desarrollo del cultivo

La caracterización del desarrollo anual del cultivo, así como la variabilidad espacial dentro de los sectores analizados, fue realizado utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), el cual fue obtenido a partir de series temporales de imágenes satelitales, disponible en la Plataforma Agrícola Satelital PLAS (<http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=plas>).

Los satélites utilizados en el análisis fueron el Sentinel 2A, Sentinel 2B y Landsat 8. En el Cuadro 2 se detallan las características de resolución espacial y temporal de estos satélites.

Cuadro 2. Características de las imágenes satelitales utilizadas.

Programa	Satélite	Cobertura imagen (km)	Resolución temporal (días entre visita)	Resolución espacial (metros)
Landsat (NASA)	Landsat 8	185 x 185	16 días	30
Copernicus (ESA)	Sentinel 2A Sentinel 2B	100 x 100	10 días	10

El índice de vegetación NDVI ha sido validado en múltiples trabajos acerca de su capacidad para caracterizar el desarrollo del cultivo, estimar el nivel de absorción de la radiación fotosintéticamente activa (fPAR), del índice de área foliar (IAF) o estimar el consumo hídrico de los cultivos. La fórmula de cálculo del índice se señala en la Figura 8:

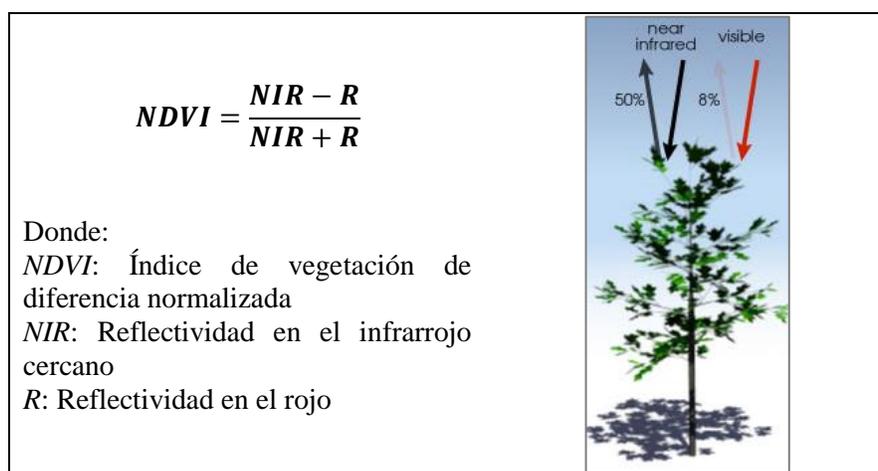


Figura 8. Ecuación de cálculo el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas NDVI y representación esquemática de las longitudes de onda involucradas en su cálculo.

De este modo y a partir de la secuencia temporal de imágenes de satélite, se pudo caracterizar el comportamiento anual del índice de vegetación NDVI, así como el nivel de desarrollo del cultivo en cada sector analizado. Así mismo, se pudo establecer la variabilidad espacial del cultivo dentro de los sectores analizados a partir de las diferencias en los valores del NDVI a lo largo del año. Estas

diferencias serán analizadas conjuntamente con el productor de manera de identificar factores que podrían estar induciendo la desuniformidad observada, como pueden ser diferencias en las características edáficas del sitio, inadecuada operación del equipo de riego u otros factores adversos que puedan limitar el normal desarrollo del cultivo.

En la Figura 9 se muestra el comportamiento del índice NDVI en los sectores 8A, 8B, 9D y 17E, indicando los valores promedio, máximos y mínimos alcanzados durante la temporada 2019/20.

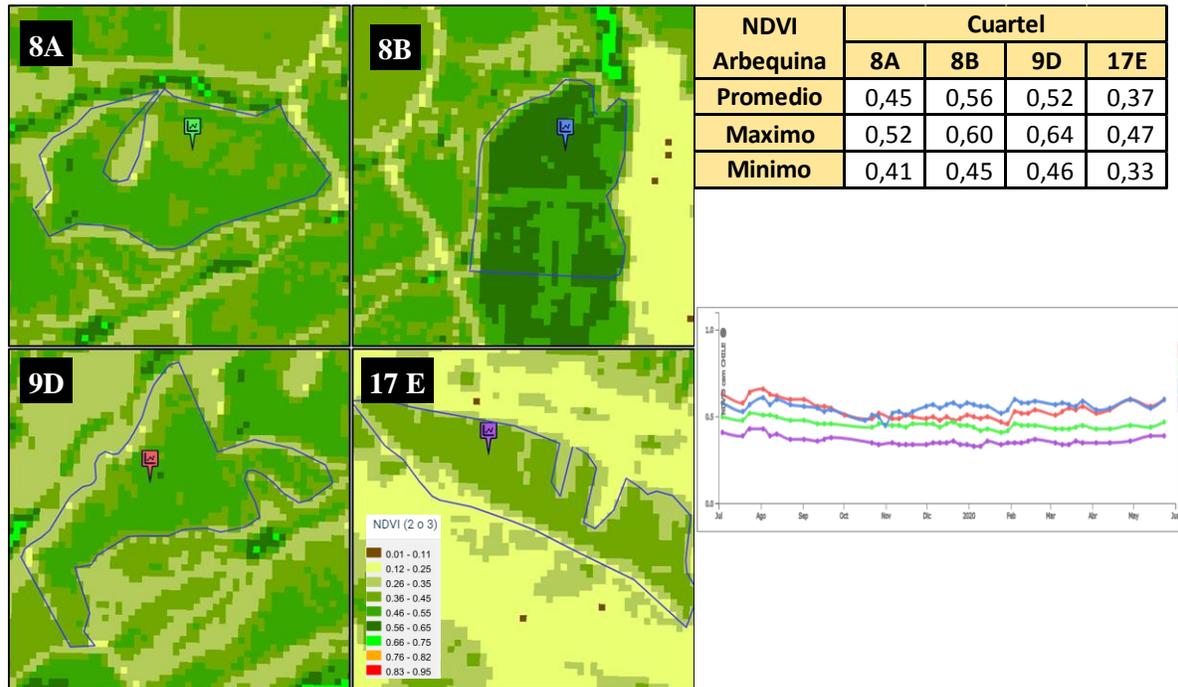


Figura 9. Vista general del índice NDVI en cuarteles de var. Arbequina. Las Reservas de Llacay, El Sauce.

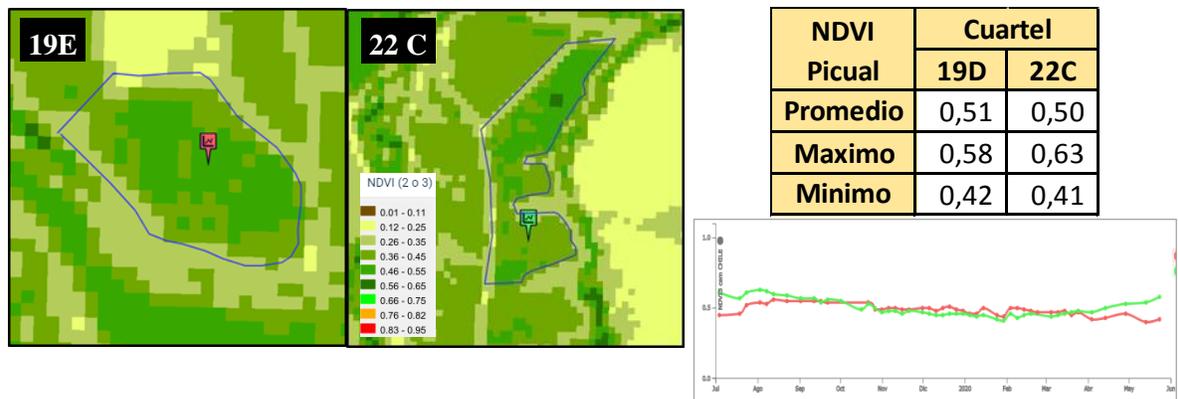


Figura 10. Vista general del índice NDVI en cuarteles de var. Picual. Las Reservas de Llacay, El Sauce.

Como se puede apreciar los valores promedio del índice NDVI en ambas variedades es similar, indicando que el desarrollo foliar en ambas variedades es similar. Sin embargo, con base en los valores máximos y mínimos del índice presentes en cada sector, se puede indicar que la amplitud es mayor en los cuarteles con la var. Arbequina, indicando una mayor heterogeneidad en el sector. Más



detalles de la variabilidad espacial del cultivo dentro de los sectores serán analizados en el capítulo Distribución espacial de la Transpiración.

Manejo del riego

La determinación de las necesidades de riego los cultivos se realizó utilizando el marco conceptual “evapotranspiración de referencia-coeficiente de cultivo”, propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998). La fórmula que resume dicho cálculo se indica a continuación:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Donde;

ET_c: Evapotranspiración de cultivo (mm/día)

K_c: Coeficiente de cultivo (adimensional)

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Para alimentar esta fórmula, se utilizaron por una parte los valores de la *ET_o* estimados a partir de los registros meteorológicos diarios de la temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar incidente y velocidad del viento realizados por la estación meteorológica presente en el predio y utilizando la ecuación conocida como Penman-Monteith (PM).

Por otro lado, para obtener valores del *K_c* se utilizó la información disponible en la Plataforma Agrícola Satelital PLAS (<http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=plas>), el cual es estimado a partir del índice de vegetación satelital NDVI.

Coeficientes de cultivo

El *Coeficiente de Cultivo* (*K_c*) define la capacidad de transpirar de un cultivo frente a la demanda del ambiente y por tanto tiene directa relación con el nivel de desarrollo del cultivo sobre el terreno, específicamente con el índice de área foliar (IAF). En este trabajo, para estimar el nivel de desarrollo de las plantas, el potencial transpirativo y el coeficiente de cultivo asociado, se utilizó información del índice de vegetación satelital NDVI transformado en el coeficiente de cultivo de acuerdo a lo propuesto por la literatura científica (Campos et al., 2010; Bausch, 1993; Bausch, 1995; Bausch and Neale, 1987; Heilman et al., 1982; Neale, et al., 1989). La relación utilizada para la obtención del *K_c* corresponde a la siguiente fórmula:

$$K_c = 1,51 \times NDVI - 0,23$$

DE este modo, en las Figura 11 y Figura 12 se señala el comportamiento anual del coeficiente de cultivo promedio para las plantas de las variedades Arsequina y Picual, respectivamente. A partir del comportamiento anual se pudo observar que en el período invernal aumentan los valores del *K_c*, indicando posiblemente mayor desarrollo del cultivo durante ese período (menor demanda ambiental) o la presencia de malezas. Así mismo, en los meses de verano (noviembre) se observan menores valores del *K_c*, lo cual se pueda deber a los efectos de la mayor demanda del ambiente durante el verano y el efecto del déficit hídrico sobre el comportamiento del cultivo. Posterior a ello, desde diciembre en adelante y a lo largo de la temporada, los valores se mantienen constantes. En general, se aprecia un mayor desarrollo en el sector 8B y un menor desarrollo en el sector 17 E.

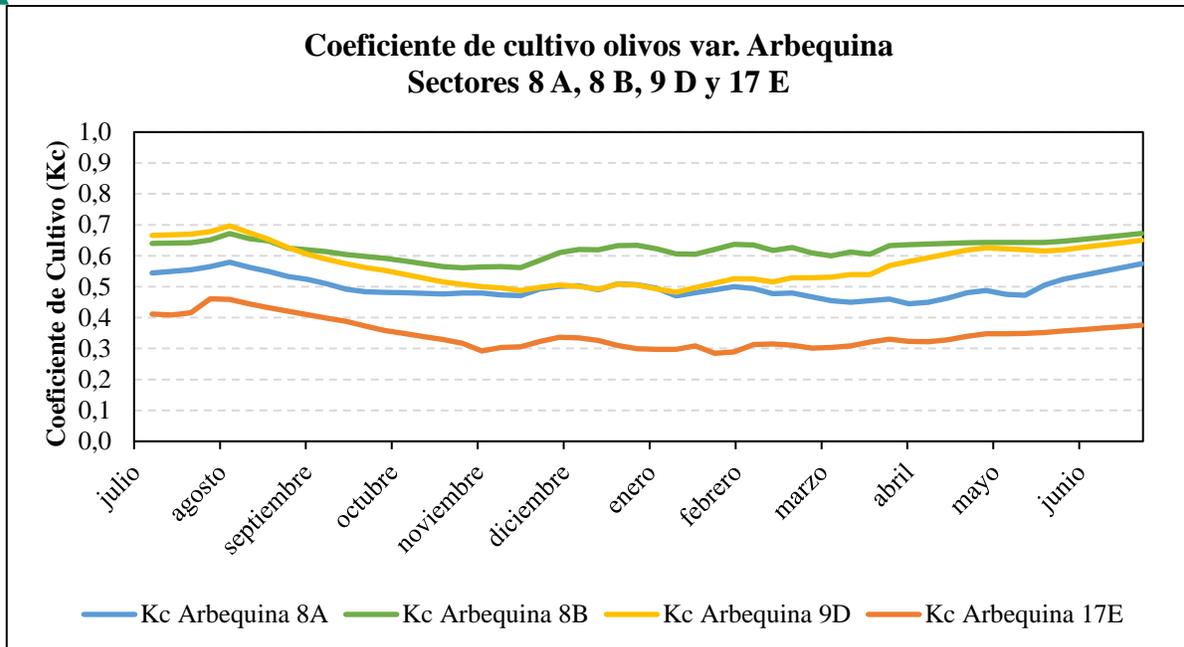


Figura 11. Comparación de curvas de Kc para temporada 2019/20 en los sectores 8 A, 8 B, 9 D y 17 E correspondientes a la variedad Arbequina. Predio Las Reservas de Llacay, San Pedro de Melipilla.

En el caso de los sectores con variedad Picual, el mayor desarrollo también se aprecia en invierno, específicamente en el mes de agosto, posterior a ello comienza un descenso constante, siendo el mes de enero cuando se observan los menores valores del Kc. De los sectores analizados el 22 C presenta mayores valores de Kc, por lo tanto un mayor desarrollo de las plantas.

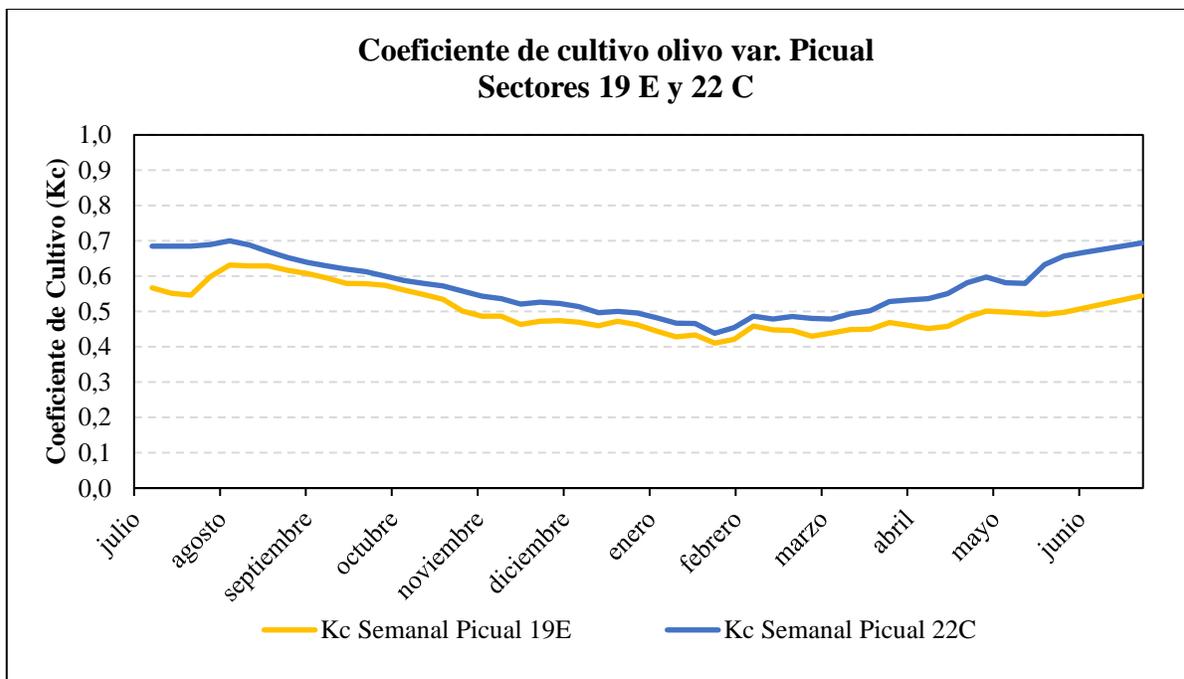


Figura 12. Comparación de curvas de Kc en la variedad Picual en los sectores 19E y 22C correspondientes durante la temporada 2019/20. Predio Las Reservas de Llacay, San Pedro de Melipilla.



En el Cuadro 3 se presenta un resumen de valores de Kc registrados en cada sector de análisis.

Cuadro 3. Resumen de valores de Kc máximo, mínimo y promedio por sector.

Variedad	Cuartel	Kc Satelital		
		Kc Max	Kc Min	Kc Promedio
Arbequina	8 A	0,58	0,44	0,50
	8 B	0,67	0,56	0,62
	9 D	0,70	0,48	0,57
	17 E	0,46	0,28	0,35
Picual	19 E	0,63	0,41	0,51
	22 C	0,70	0,44	0,57

Como se puede observar, los valores de Kc máximo para las dos variedades se sitúan en torno a 0,7 (sectores 9 D y 22 C, respectivamente). Por su parte, los valores mínimos de Kc en la var. Arbequina son 0,28 (en sector 17 E) y 0,41 en el sector 19 E con la var. Picual. El Kc promedio en Arbequina se sitúa en el rango de 0,35 a 0,62 (amplia variabilidad debido al bajo desarrollo observado en el sector 17 E) y en Picual entre 0,51 - 0,57 (menor variabilidad, sector más homogéneo).

Por otro lado y de acuerdo con la información aportada por el campo, en la programación rutinaria del riego se utiliza un valor único de coeficiente de cultivo para cada sector del cultivo. En el Cuadro 4 se señalan los valores utilizados para cada sector analizado

Cuadro 4. Valores de coeficiente de cultivo utilizados en la programación del riego en el predio Las Reservas de Llançay.

Sector	8 A	8 B	9 D	17 E	19 E	22 C
Kc	0,4	0,4	0,3	0,3	0,6	0,3

Al comparar los valores de Kc para las diferentes variedades obtenidos desde el índice de vegetación satelital con los valores utilizados operativamente en el manejo del riego en el predio, se pueden apreciar diferencias, que finalmente se traducen en diversas intensidades de déficit en el aporte de riego durante la temporada. En las Figura 13 y Figura 14 se comparan los valores de Kc de los diferentes sectores de análisis y los informados por el predio para la definición de las necesidades de riego. Cabe señalar que según la información de los volúmenes de riego aportados al cultivo, los valores de Kc tampoco se ajustan a lo informado.

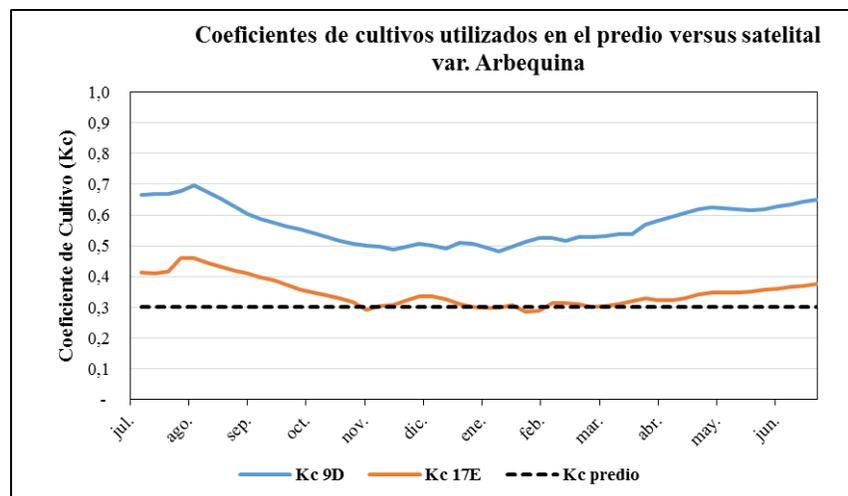
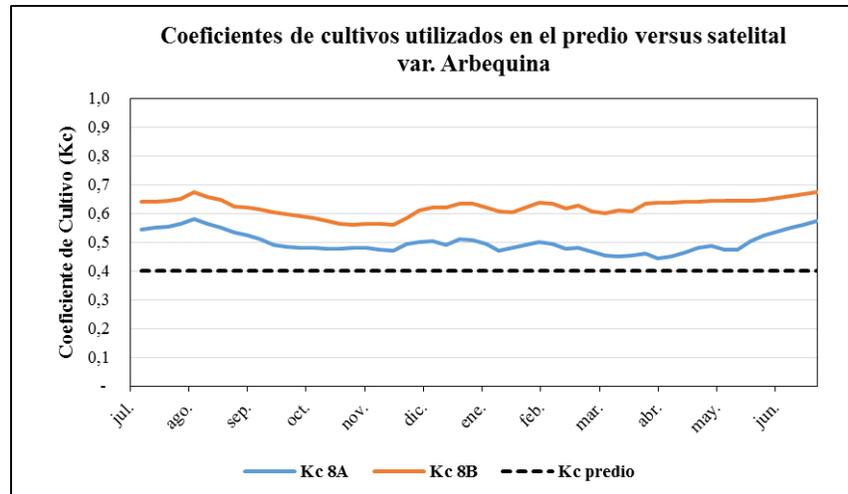
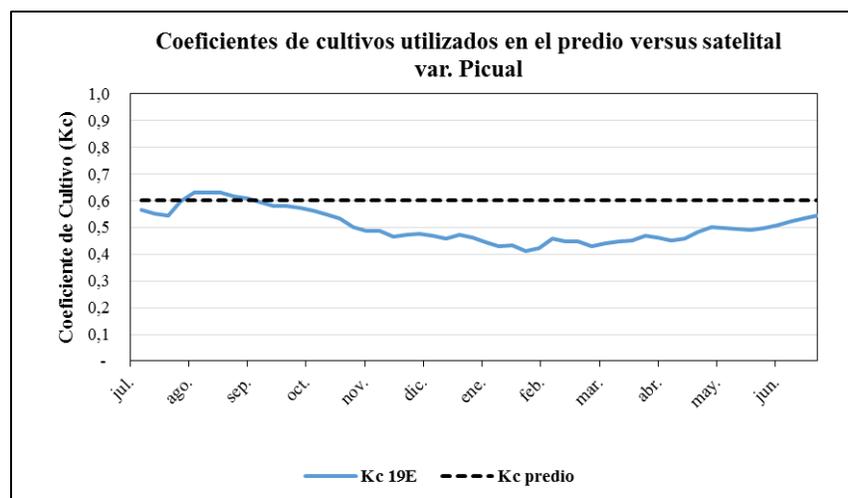


Figura 13. Comparación entre los valores de Kc utilizados en el manejo rutinario del riego y los valores estimados a partir del índice de vegetación satelital en la var. Arbequina.



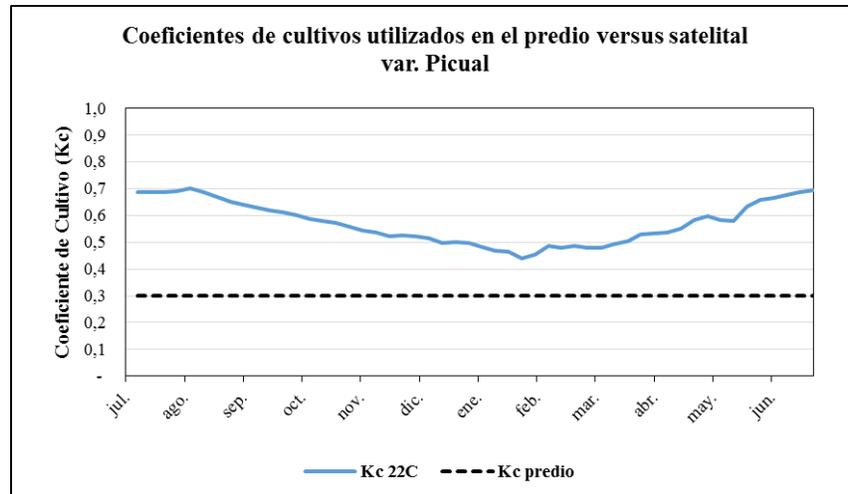


Figura 14. Comparación entre los valores de Kc utilizados en el manejo rutinario del riego y los valores estimados a partir del índice de vegetación satelital en la var. Picual.

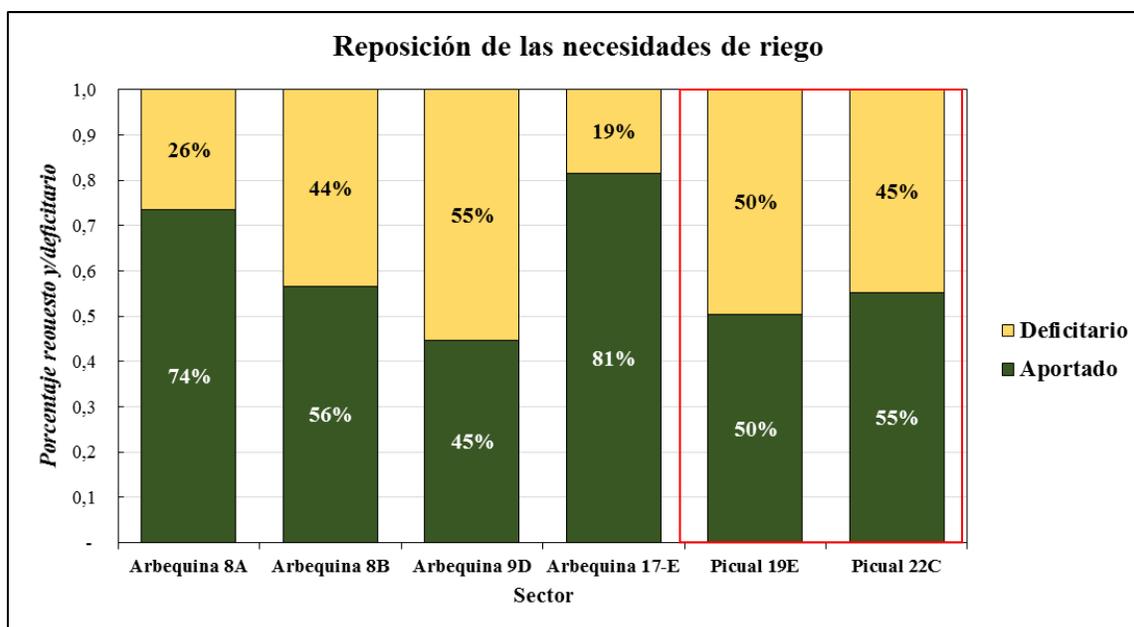
Demanda de riego modelada

Con base en la metodología “coeficiente de cultivo- evapotranspiración de referencia” descrita anteriormente, se modeló la tasa de transpiración potencial del cultivo la cual corresponde a las necesidades de riego que mantienen al cultivo en un óptimo de disponibilidad hídrica (sin estrés). Como se señaló anteriormente el parámetro Kc fue obtenido del índice de vegetación NDVI desde la Plataforma Agrícola Satelital PLAS y los datos de ETo de la estación presente en el predio.

Por otro lado, se recopiló información del manejo real del riego y de los aportes de agua al cultivo durante la temporada 2019/20 de manera de contrastarla con el análisis modelado. Por lo tanto, el volumen real de riego aportado al cultivo se consideró con base en los datos aportados por el productor. El Cuadro 5 presenta un resumen de los volúmenes de riego en campo y las estimaciones de acuerdo al monitoreo satelital del cultivo y de la demanda ambiental de la zona. Se presenta además valores de la eficiencia del uso del agua (WUE) a partir del volumen de agua real aplicada en campo y la producción reportada.

Cuadro 5. Transpiración potencial del cultivo y volumen de riego aportado al cultivo en cada sector analizado.

Variedad	Cuartel	Plataforma Satelital	Registros de riego	Demanda hídrica cubierta (%)	Producción (Ton/ha)	WUE (Kg/m3)
		Transpiración* (m3/ha/temp.)	Agua Aplicada* (m3/ha/temp.)			
Arbequina	8 A	5.211	3.834	74%	9,8	2,5
	8 B	6.524	3.686	56%	6,3	1,7
	9 D	5.694	2.545	45%	8,3	3,3
	17 E	3.489	2.843	81%	8,8	3,1
Picual	19 E	5.153	2.599	50%	10,1	4,4
	22 C	5.648	3.117	55%	7,1	3,7



*: Temporada agrícola considerada fue Julio a Junio.

Como se puede observar, en todos los sectores analizados el aporte de riego fue menor al estimado mediante el uso del coeficiente de cultivo satelital. Esta situación se hace más evidente en los sectores con la var. Picual, donde se llega a aporta entre un 50% y un 55% de las necesidades estimadas. En el caso de los sectores con Arbequina, esta diferencia es menor reponiendo entre un 45% a 69% de lo estimado.

Para analizar las reposiciones de riego mensuales para los sectores y estimar la magnitud del déficit por época del año, se realizó un análisis del volumen de agua aportado mensualmente en el predio versus las necesidades de riego modeladas de acuerdo a la metodología descrita.

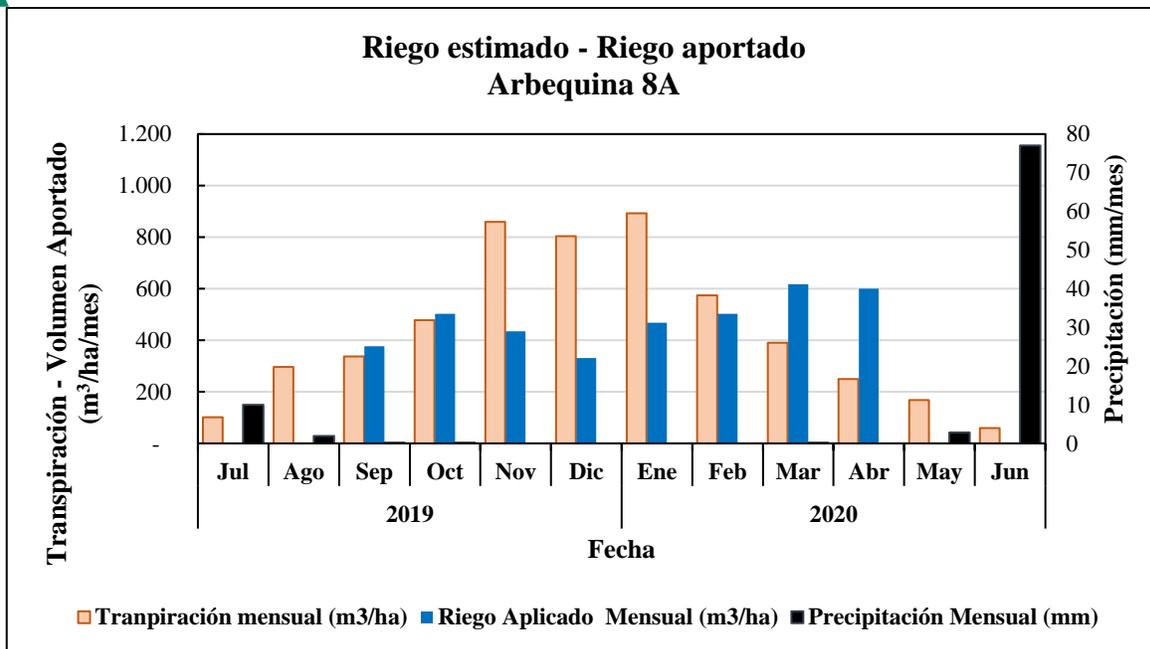


Figura 15. Comparación mensual de volumen de agua aportado en campo y el consumo modelado en el Sector 8 A. Temporada 2019/20. Predio Las Reservas de Llançay.

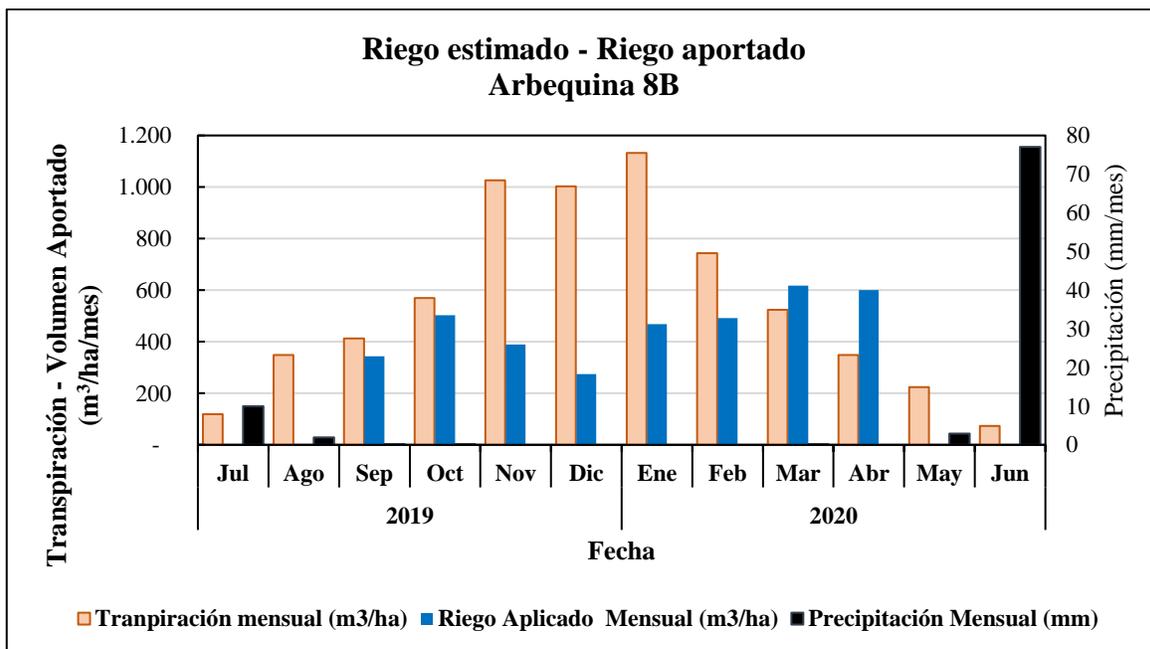


Figura 16. Comparación mensual de volumen de agua aportado en campo y el consumo modelado en el Sector 8B. Temporada 2019/20. Predio Las Reservas de Llançay.

Considerando la acumulación mensual tanto de necesidades hídricas a reponer como de volumen de riego aportado, se observa que durante la temporada de análisis para los sectores 8A, 8B, (2019/20) el riego aplicado es inferior a lo estimado mediante el índice de vegetación satelital, haciéndose más notorio el déficit entre noviembre y enero. Esto puede cobrar importancia en el mes de noviembre, que según la fenología entregada la especie se encuentra en periodo de cuaja de frutos.

Con objeto de cuantificar las diferencias durante la temporada entre el riego estimado y el riego aportado, se estimó un factor de déficit (K_s) como una relación entre ambos.

$$K_s = 1 - \frac{\text{riego aplicado} + \text{lluvia}}{\text{riego estimado por satélite}}$$

de la relación antes mencionada se obtiene que si K_s es igual a 1, nos indicaría que el déficit de riego fue un 100%, es decir no hubo aportes de riego ni tampoco de precipitaciones. Por otra parte, si el valor de K_s es 0, indica que el aporte de riego más las precipitaciones cubrieron la demanda del cultivo. De este modo y como se puede apreciar en la Figura 17, en los cuarteles 8A y 8B, presenta periodos mayores de déficit a comienzos y a finales de la temporada. Cobrará importancia el déficit aplicado en noviembre por encontrarse en un estado fenológico más sensible (cuaja). También es importante señalar el mayor déficit ocurre en meses de alta demanda ambiental (verano).

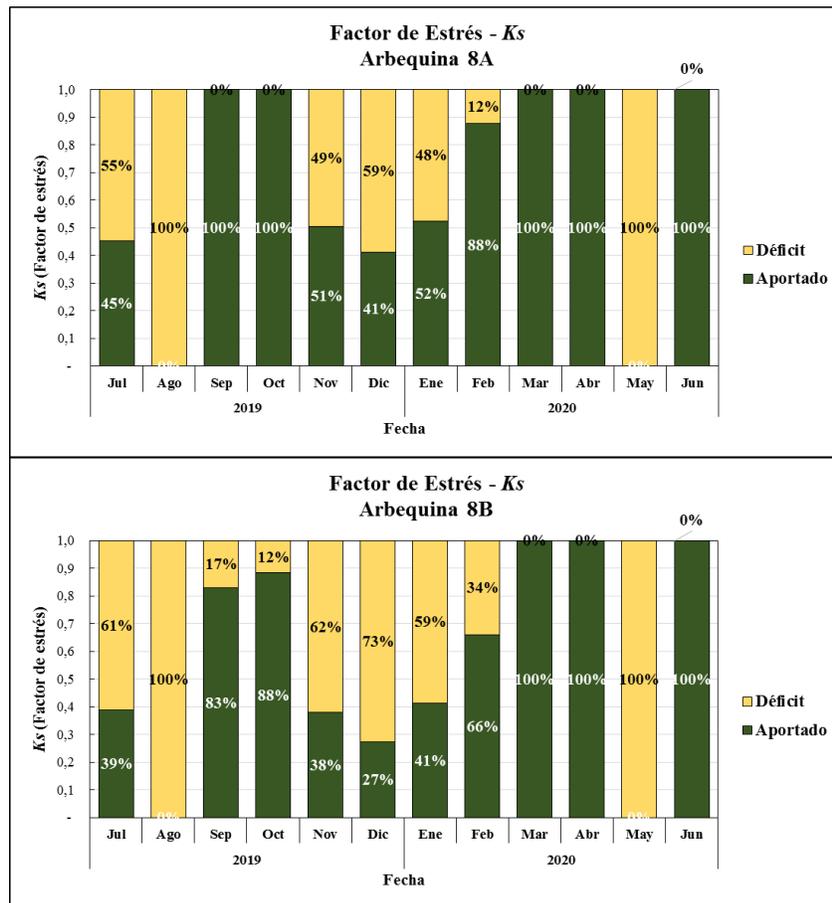


Figura 17. Factor déficit K_s estimado en los sectores 8 A y 8 B durante la temporada 2019/20. Predio La Reserva de Llanccay, El Sauce.

De la misma manera en los sectores 9 D y en menor intensidad el 17 E, el riego aportado no cubrió las estimaciones realizadas con los valores del coeficiente de cultivo satelital. Al igual que en el sector anterior, el manejo del riego fue deficitario durante toda la temporada, haciéndose más intenso entre noviembre y febrero (9 D) y entre noviembre y diciembre (17 E). Esto puede tener importancia en noviembre, momento de la cuaja. Cabe señalar que en estos sectores se presentan sobre-riego en abril en el sector 9D y en marzo – abril en el sector 17E.

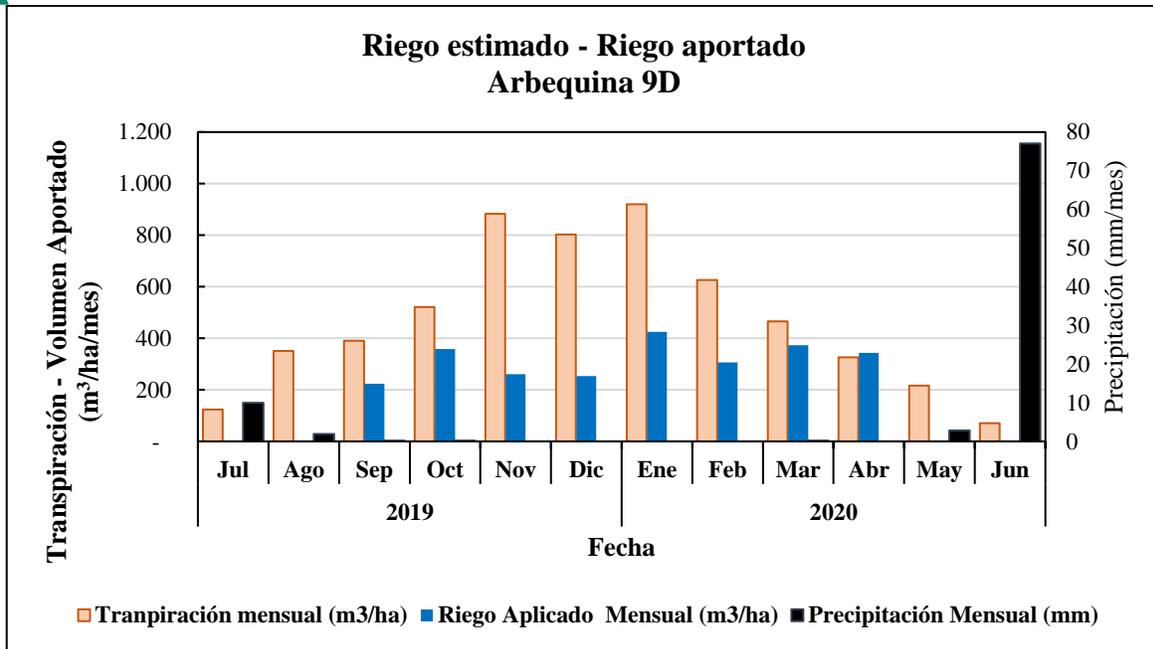


Figura 18. Comparación mensual de volumen de agua aportado en campo y el consumo modelado en el Sector 9 D. Temporada 2019/20. Predio Las Reservas de Llancay.

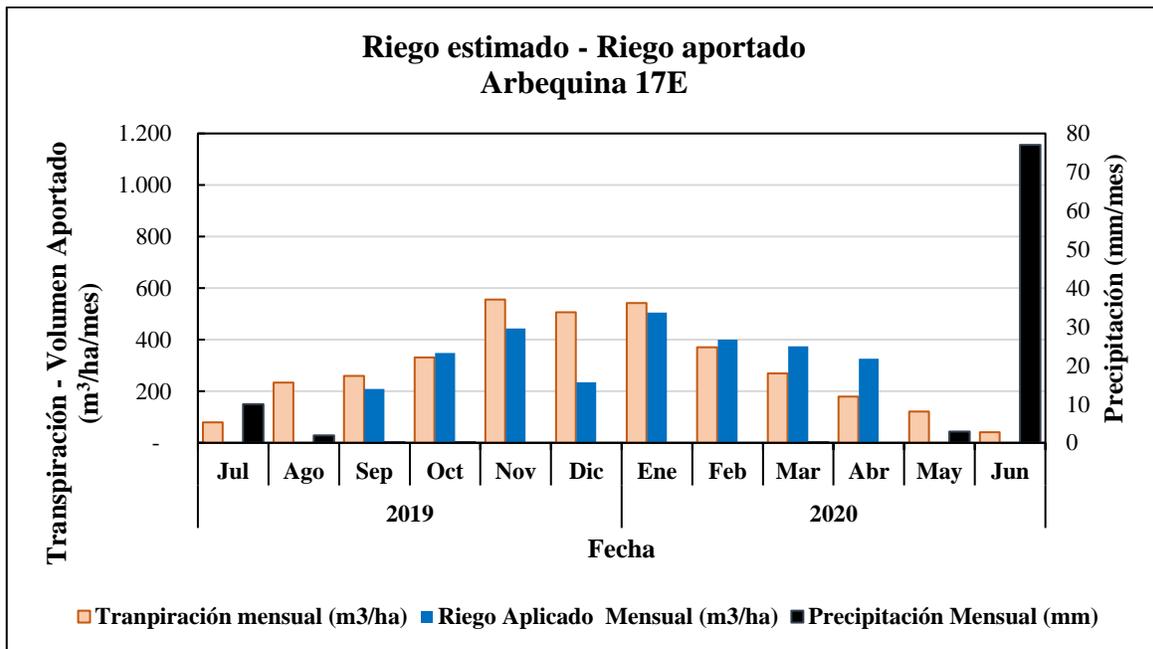


Figura 19. Comparación mensual de volumen de agua aportado en campo y el consumo modelado en el Sector 17 E. Temporada 2019/20. Predio Las Reservas de Llancay.

En el caso de los sectores 9 D y 17 E, que difieren en cuanto al marco de la plantación de los sectores antes analizados, se observa que en el caso del primero, en los meses de máxima demanda estuvo el déficit fue superior al 50% y en el caso del sector 17 E durante el mes de diciembre el déficit alcanzó un 54% (Figura 20).

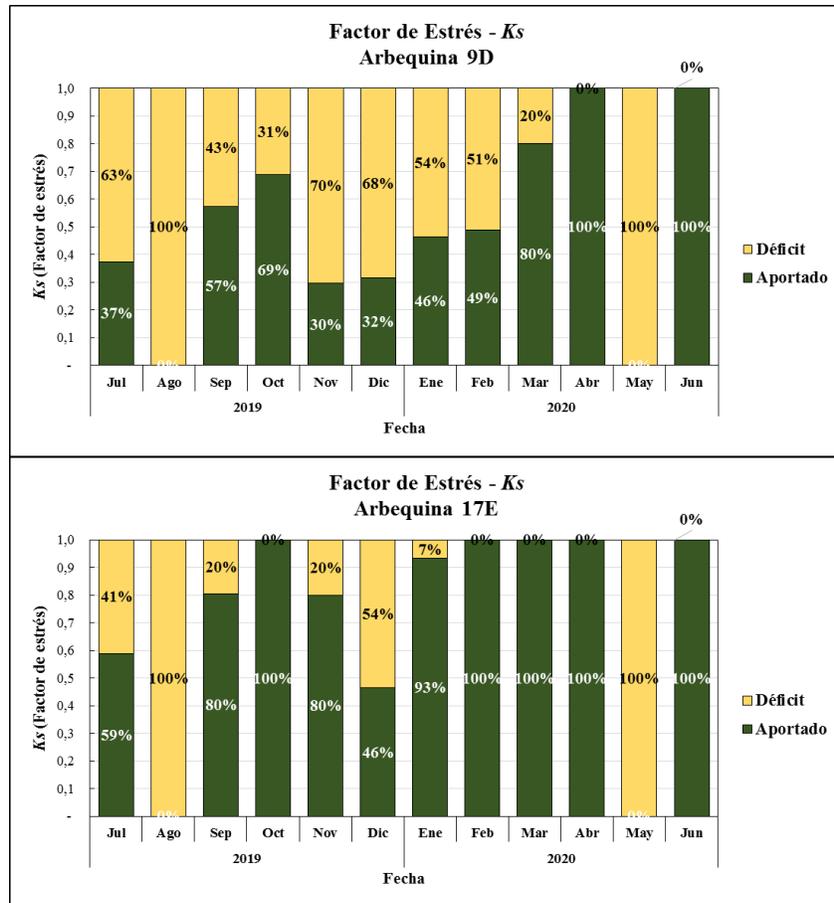


Figura 20. Factor déficit (K_s) estimado en los sectores 9 D y 17 E durante la temporada 2019/20. Predio La Reserva de Llancay.

Considerando la acumulación mensual tanto de necesidades hídricas a reponer como el volumen de riego realmente aportado, se observa que al igual que los sectores de Arbequina, en los sectores 19 E y 22 C (Picual), el riego aportado fue inferior a las determinaciones modeladas (Figura 18 y Figura 19) y que este déficit se hizo más notorio entre los meses de octubre a enero, lo cual puede tener efectos en la productividad ya que son períodos donde ocurre la floración (octubre) y cuaja (noviembre), respectivamente.

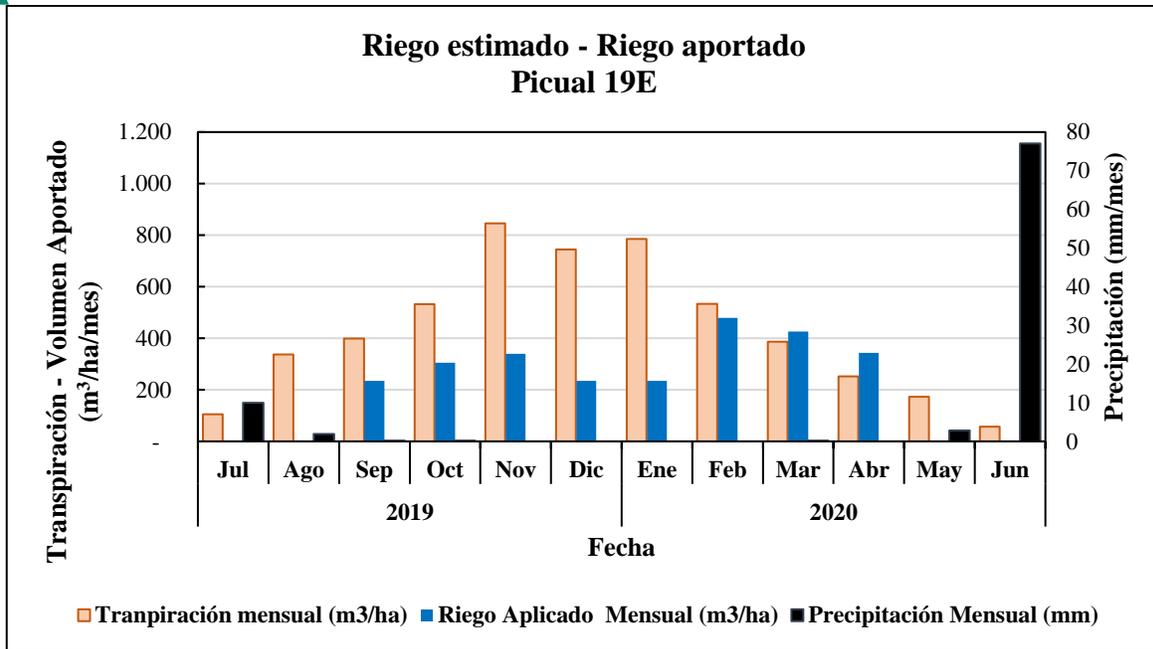


Figura 21. Comparación mensual de volumen de riego aportado y el consumo modelado. Sector 19 E. Temporada 2019/20. Predio Las Reservas de Llançay.

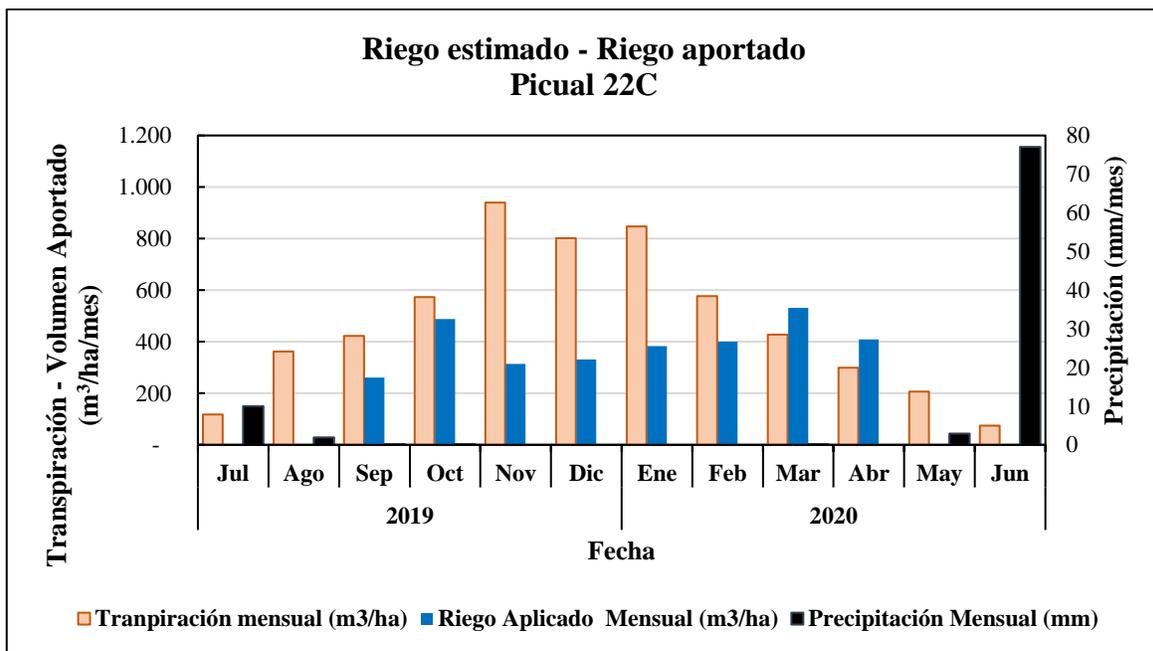


Figura 22. Comparación mensual de volumen de riego aportado y el consumo modelado. Sector 22 C. Temporada 2019/20. Predio Las Reservas de Llançay.

En la Figura 23 se presenta el factor de déficit (K_s) estimado en la variedad Picual. Como se puede observar, en los meses de máxima demanda ambiental el déficit superó el 60%. En los meses más complejos, noviembre el déficit alcanzó un 67% para el sector 22 C y un 60% en el sector 19 E, mientras que en diciembre los valores de K_s fueron un 68% para el sector 19E y de 59% para el sector 22C.

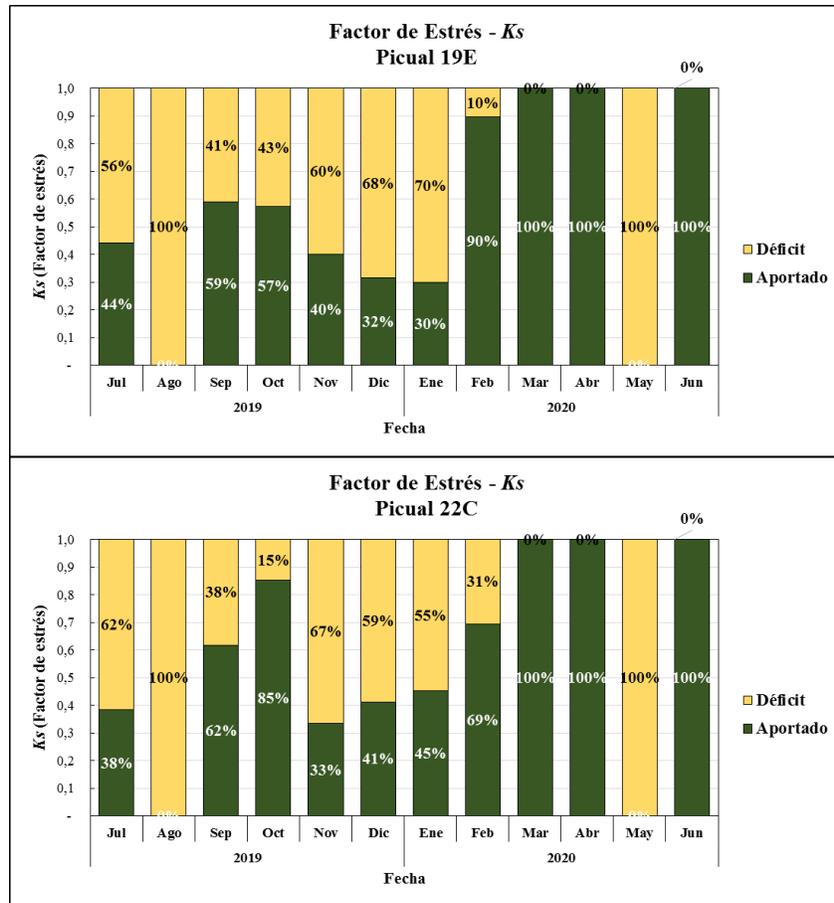


Figura 23. Factor de déficit K_s estimado en los sectores 19 E y 22 C. Temporada 2019/20. Predio La Reserva de Llancay.

Distribución espacial de la Transpiración

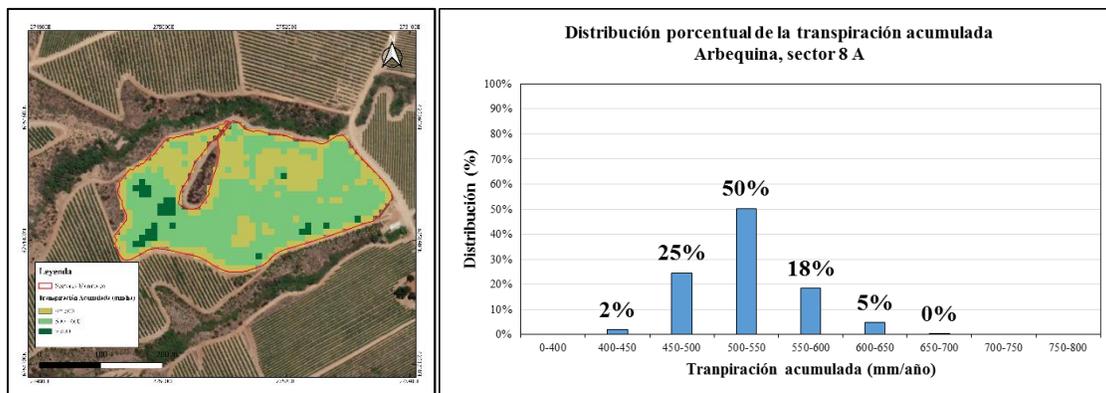
Con objeto de analizar la variabilidad espacial del cultivo dentro de cada sector analizado, se estimó la transpiración acumulada anual del cultivo, a partir de los valores de la demanda ambiental diaria y del coeficiente de cultivo estimado a lo largo de la temporada. En el Cuadro 6 se presentan los valores promedio, máximos y mínimos de la transpiración anual en cada sector.

Cuadro 6. Transpiración acumulada promedio, máxima y mínima por sector de análisis.

Variedad	Sector	Transpiración acumulada (mm/año)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
Arbequina	8 A	526	662	426
	8 B	663	778	511
	9 D	553	677	461
	17 E	365	481	248
Picual	19 E	554	616	499
	22 C	594	765	493

A partir de este análisis, en las Figura 24 y Figura 25 se presentan mapas de la distribución espacial de la transpiración en los sectores de la variedad Arbequina y en la Figura 26 para la var. Picual. Así mismo, se presenta un histograma para representar la distribución porcentual de la superficie del sector en rangos de transpiración anual.

Como se puede observar los sectores 8B, 9D y 8ª la transpiración anual se distribuye entre 400 mm a 800 mm al año, siendo el rango de 500 mm a 550 mm el que presenta el mayor porcentaje en el sector 8A (50% de la superficie), el rango 650 mm a 700 mm en el sector 8 B (55% de la superficie) y el rango entre 500 mm a 600 mm (79% de la superficie) en el sector 9 D. En el caso del sector 17 E es posible señalar que más del 83% de la superficie presenta una transpiración inferior a los 400 mm al año.



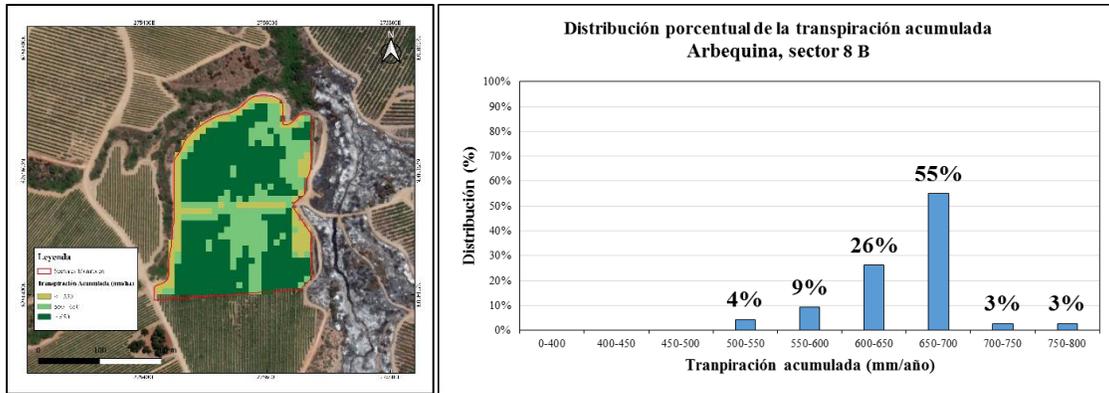


Figura 24. Distribución de los rangos de transpiración acumulada en los sectores 8A y 8B. Predio Las Reservas de Llancai, El Sauce.

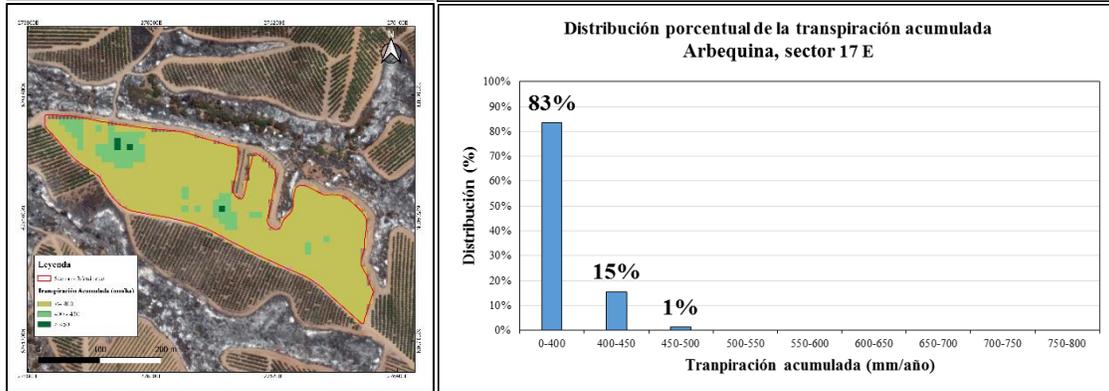
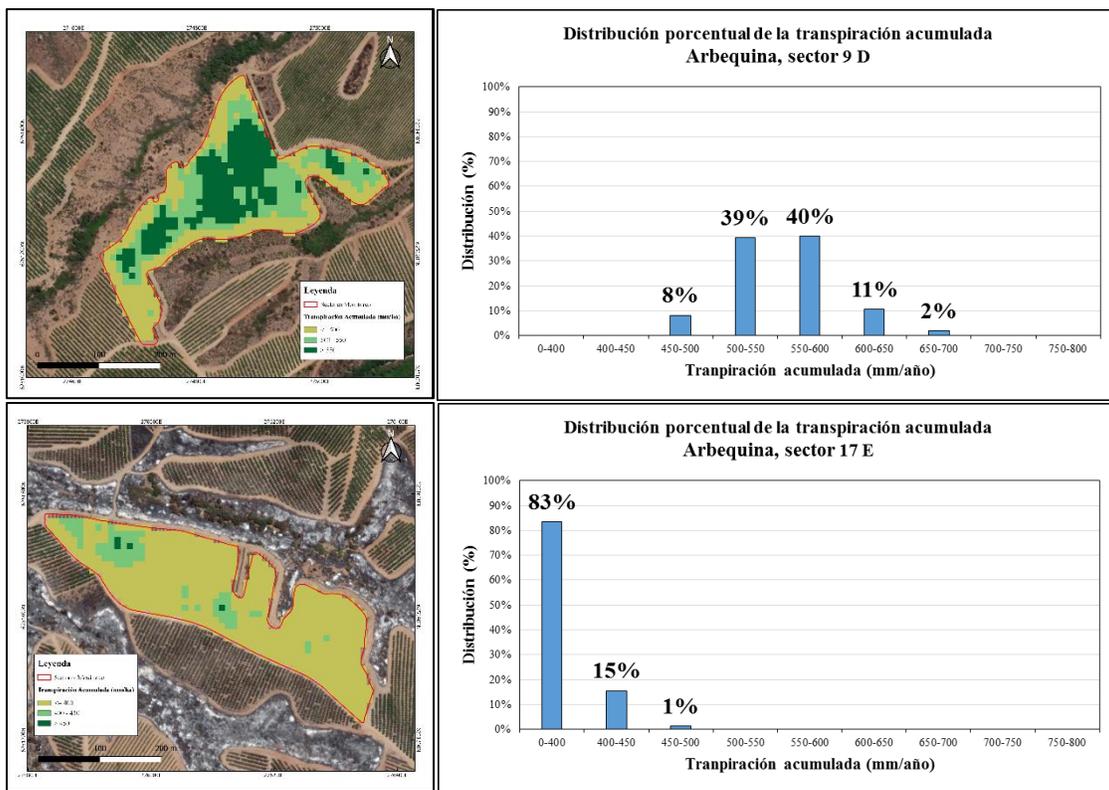


Figura 25. Distribución de los rangos de transpiración acumulada en los sectores 9 D y 17 E. Predio Las Reservas de Llancai, El Sauce.

En el caso de los sectores con la var. Picual (Figura 26), es posible observar que el sector 22 C es quien presenta una mayor dispersión de los datos, ubicándose entre los 450 mm/año y los 700 mm/año. Por otra parte, en el sector 19 D si bien se puede observar un cierto grado de dispersión, el 95% de la superficie se concentra entre los 500 mm y 600 mm al año.

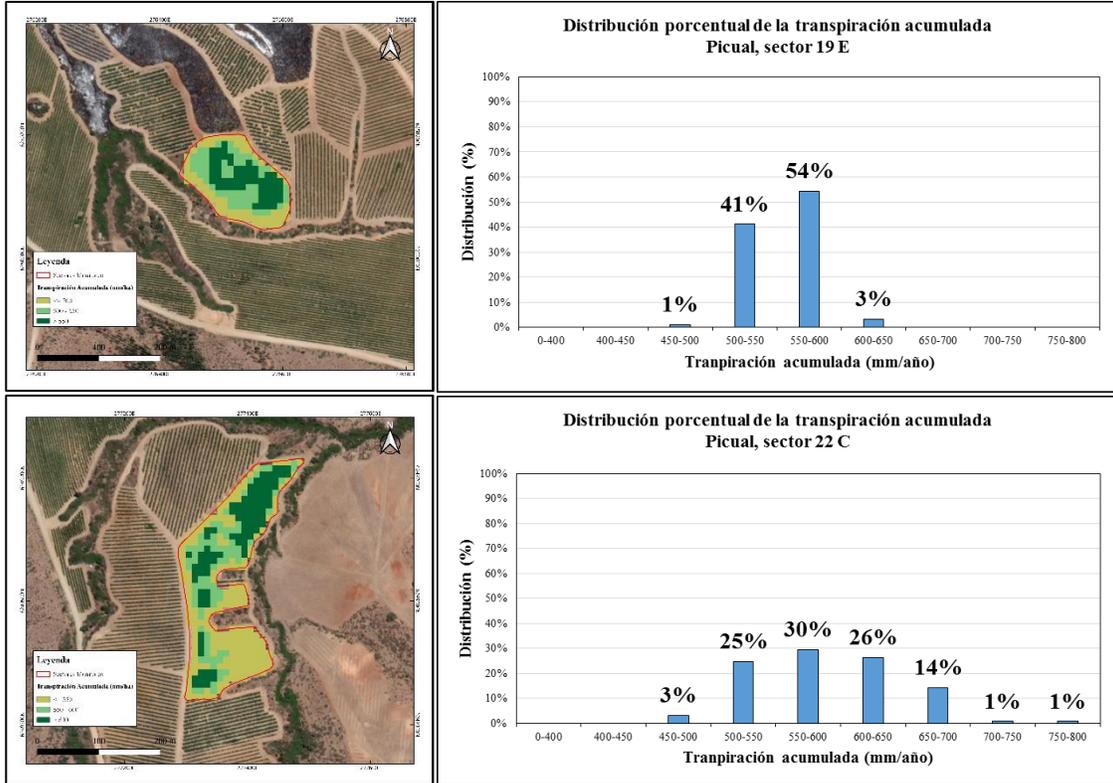
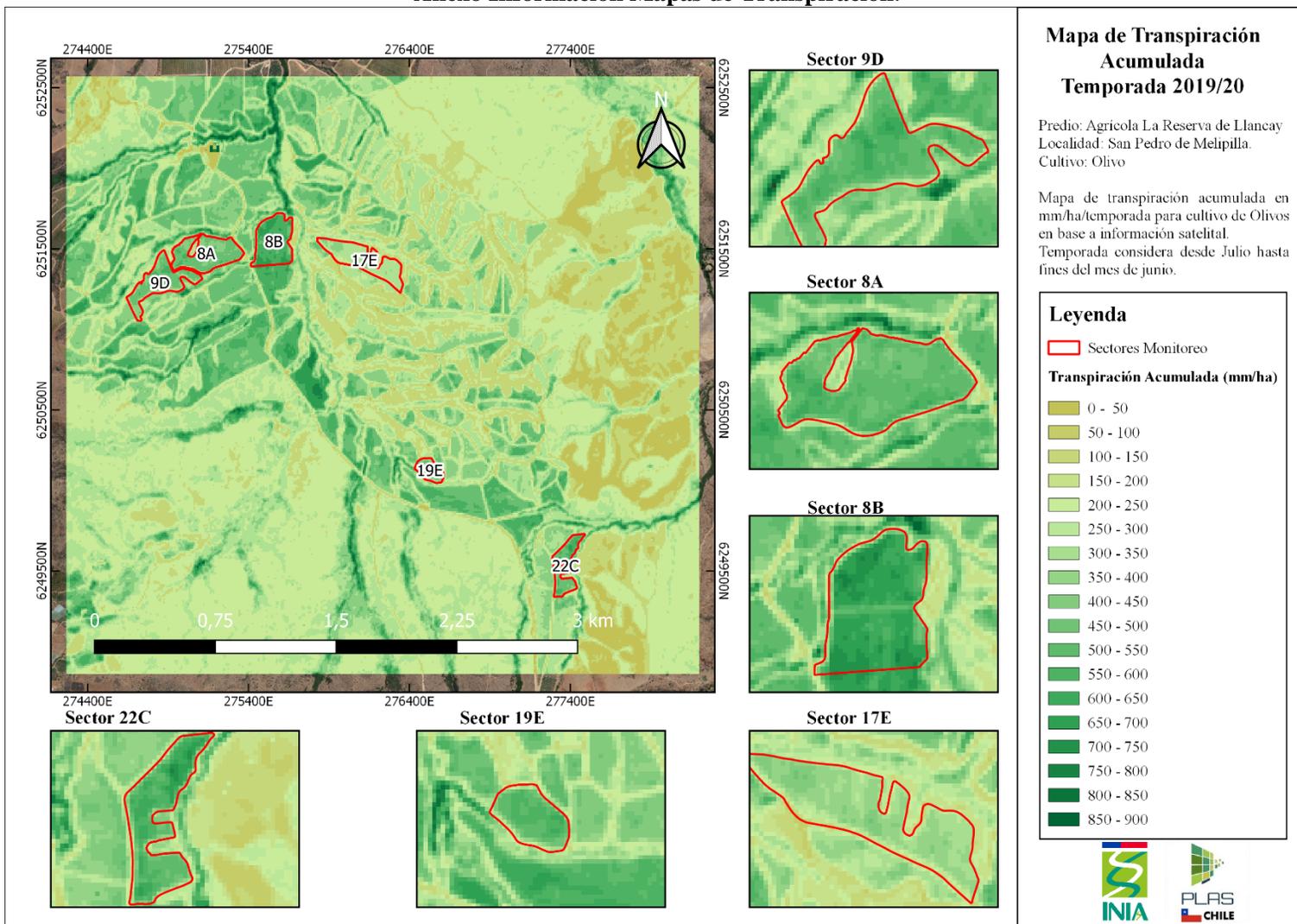


Figura 26. Distribución de los rangos de transpiración acumulada en los sectores 19 E y 22 C. Predio Las Reservas de Llanccay.

Anexo Información Mapas de Transpiración.



Mapa de Transpiración Acumulada durante Temporada 2019/20. Sectores Monitoreo La Reserva de Llançay, El Sauce.



Literatura citada

Agrimed, 2017. Atlas Agroclimático de Chile, estado actual y tendencias del clima. Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED). Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Chile.

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 - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manage.* 98, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011>.

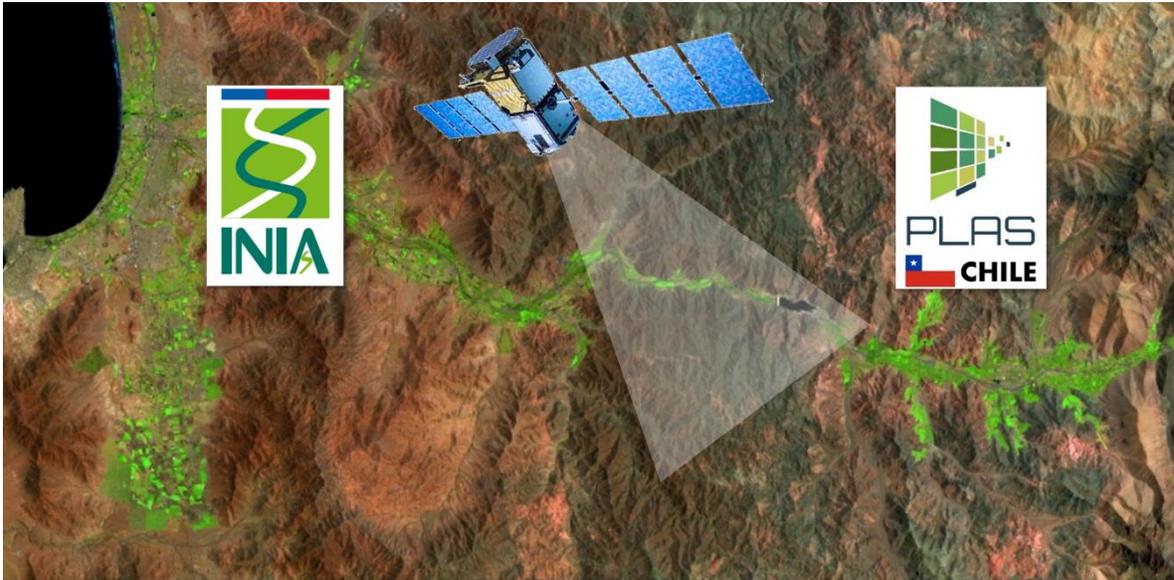
Bausch, W.C., 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46, 213–222. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90096-G](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90096-G).

Bausch, W.C., 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manage.* 27, 55–68. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01125-3](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01125-3).

Bausch, W.C., Neale, C.M.U., 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Trans. ASAE* 30, 703–709. <https://doi.org/10.13031/2013.30463>.

Heilman et al., 1982 Heilman, J.L., Heilman, W.E., Moore, D.G., 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agron. J.* 74, 967–971. <https://doi.org/10.2134/agronj1982>.

Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heermann, D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. ASAE* 32, 1891–1899.



Informe Consultoría en Riego INIA

Productor: FUNDO LAS DOSCIENTAS

Autores

Equipo Proyecto PLAS - INIA Intihuasi

Jefe de proyecto - Claudio Balbontín Nesvara

Profesional de Apoyo - Jael Montecinos Castro

Informe Consultoría Manejo del Riego

FUNDO LAS DOSCIENTAS

Introducción

Con objeto de implementar un trabajo colaborativo entre el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA y la Asociación de Productores de Aceite Oliva ChileOliva, se implementó un trabajo de consultoría en la cual se analizaron las metodologías para la definición de las necesidades de riego del cultivo y aspectos asociados al manejo agronómico del cultivo de olivos.

El principal objetivo de la consultoría es transferir un marco conceptual estandarizado para la definición de las necesidades de riego, junto a la capacitación en el uso de nuevas tecnologías para el monitoreo del cultivo y de los factores ambientales que influyen en el consumo hídrico y por tanto en la programación del riego.

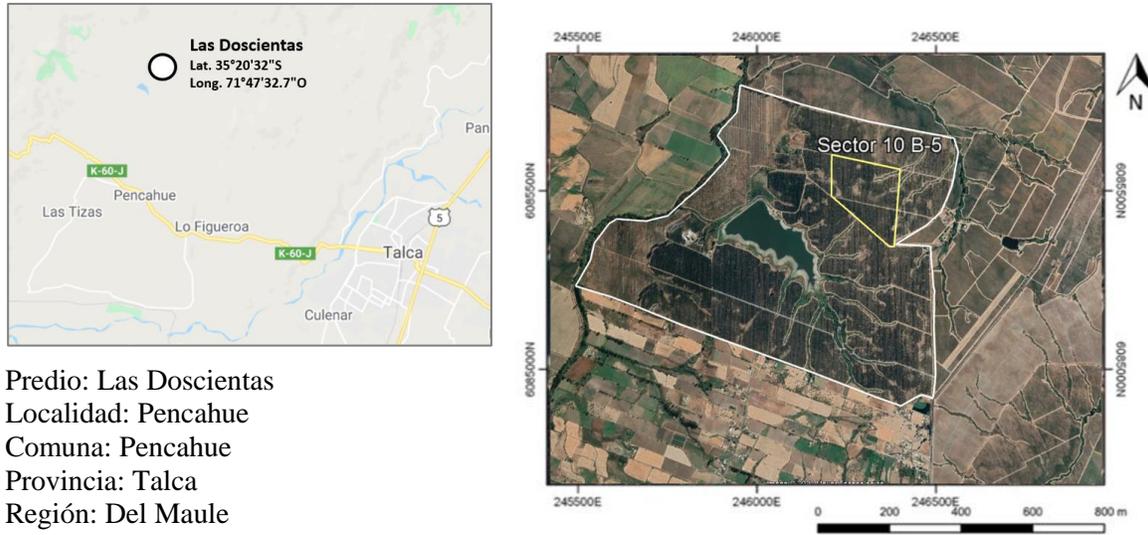
En este trabajo se elaboró un análisis comparativo entre los criterios utilizados actualmente por el productor para definir los volúmenes de riego aportados al cultivo (manejo tradicional del riego) y las necesidades de riego estimadas a partir del marco conceptual propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998), con la innovación tecnológica del uso del índice de vegetación satelital NDVI para estimar un Coeficiente de Cultivo y el uso de información de la demanda ambiental del sitio para estimar la tasa de transpiración máxima del cultivo.

De este modo, en el siguiente informe se analiza el desarrollo del cultivo utilizando información del índice de vegetación satelital NDVI, factores ambientales que influyen en el consumo hídrico del cultivo, las metodologías para la definición de las necesidades de riego en el campo y asistido con información satelital y la variabilidad espacial de la tasa de transpiración del cultivo dentro de los sectores analizados.



Sitio de análisis

Los trabajos fueron realizados en un predio ubicado en la localidad de Pencahue, comuna de Pencahue, Región del Maule. En la Figura 1 se indica la ubicación geográfica del campo, así como el sector analizado.



Predio: Las Doscientas
Localidad: Pencahue
Comuna: Pencahue
Provincia: Talca
Región: Del Maule
Chile

Figura 1. Ubicación del predio y sitios analizados (Las Doscientas, Pencahue).

El sector analizado corresponde a un cuartel plantado en el año 2003 de la variedad Arbequina y denominado sector 10, B-5. En el Cuadro 1 se indica un resumen de las características del sitio analizado en el trabajo.

Cuadro 1. Equipo, superficie, variedades, año de plantación y marcos de plantación de los sitios bajo análisis.

Equipo	Sector	Superficie (ha-SIG)	Variedad	Año de Plantación	Marco de plantación (m)	Plantas/ha
B-5	10	21,6	Arbequina	2003	2 x 5	1000

Características climáticas zona de estudio

La zona de Pencahue se encuentra dentro del distrito agroclimático de Talca (Agrimed, 2017). El clima corresponde a templado cálido supratermal, con régimen de humedad semi-árido. La temperatura del aire varía entre máximos en el mes de enero de 29,7 °C y mínimos en el mes de julio de 3,9 °C. Dentro del distrito se registran valores máximos que oscilan entre 31,5 °C y 28,2 °C y valores de la temperatura mínima entre 6,2 °C y 3,4 °C. En promedio el distrito presenta 228 días consecutivos libres de heladas y al año se registran en promedio 15 heladas. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa de los cultivos tiene una longitud aproximada de 9 meses. La sumatoria anual de días grados es de 1.707 y 784 horas de frío (acumuladas hasta el 31 de Julio).

Para el análisis de los datos meteorológicos locales se consideró las estaciones San Clemente perteneciente a la Red Agrometeorológica Nacional de INIA (<https://agrometeorologia.cl>) y la estación Pencahue de la red meteorológica Agroclima (agroclima.cl). Si bien no se encuentran

estaciones dentro de los campos, sirven como aproximación del comportamiento de las condiciones ambientales anuales en la zona.

De acuerdo a estos registros, se observa que el comportamiento de la temperatura del aire se caracteriza por alcanzar valores máximos en torno a los 31°C en los meses de verano (con máximos en febrero y un peak de 38°C en enero de 2017) y temperaturas mínimas invernales en torno a 0,97°C en los meses de invierno, con eventos extremos de -4,9°C en agosto de 2018 y -4,7°C en julio de 2018 (Figura 2).

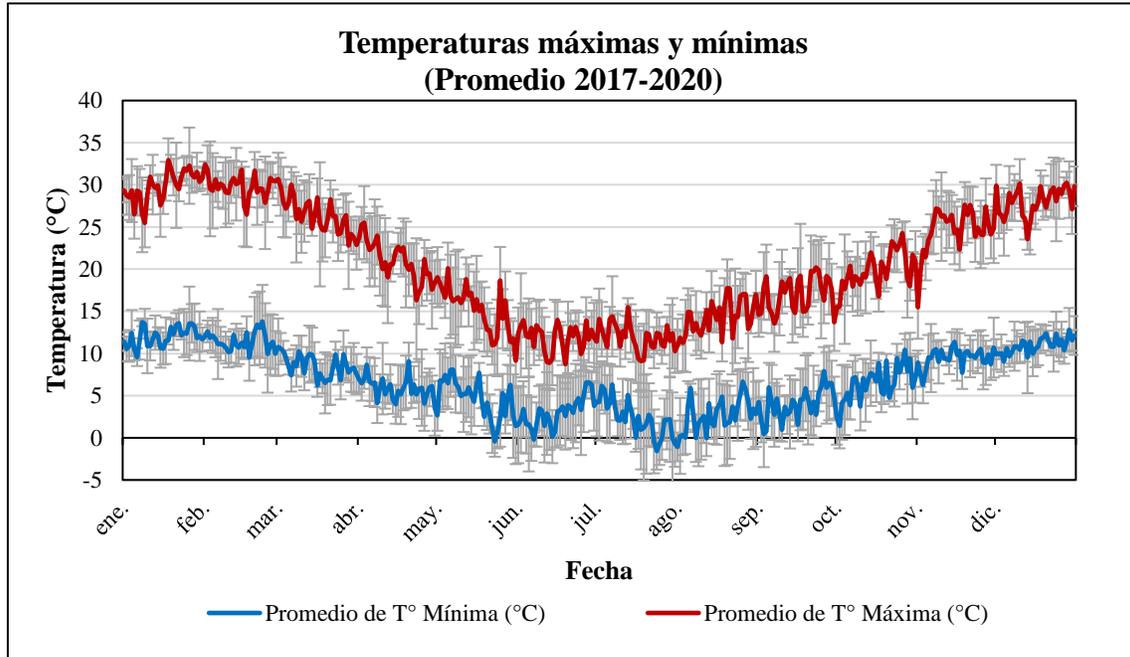


Figura 2. Comportamiento de temperaturas máximas y mínimas en la zona de Pencahue. Estación INIA San Clemente. (<https://agrometeorologia.cl>).

En cuanto a las precipitaciones, la media anual se sitúa en 720 mm/año, con un período seco de 7 meses de duración y un déficit hídrico de 558 mm/año. El período húmedo dura 4 meses, durante los cuales se produce un excedente hídrico de 229 mm (Agrimed, 2017). En los últimos dos años, el monto anual de las precipitaciones alcanzó en promedio 335 mm/año, con montos anuales de 309 mm para la temporada 2019/20 y 360,8 mm en lo que va de la temporada 2020/21 (Figura 3).

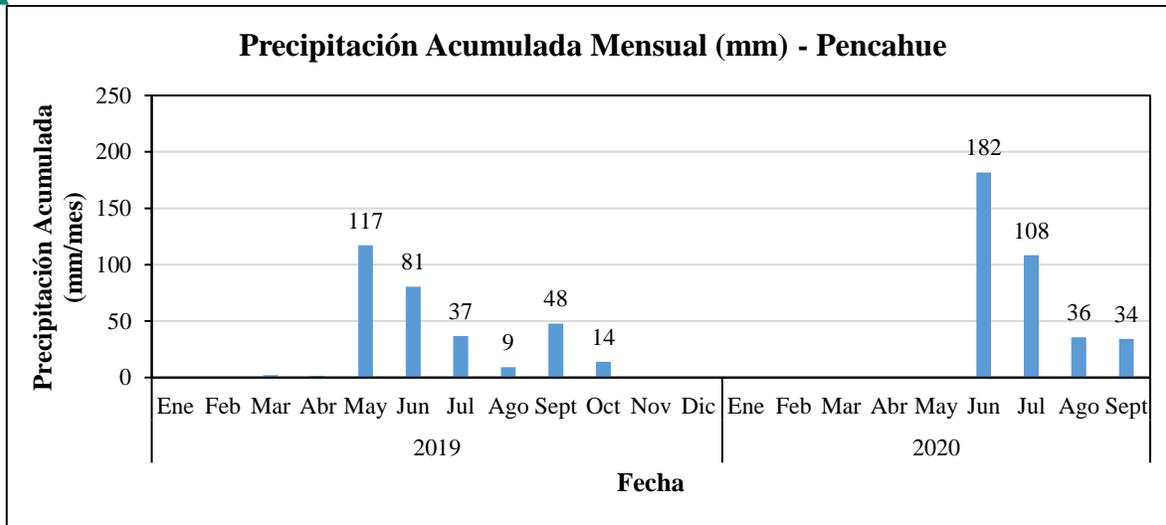


Figura 3. Precipitaciones mensuales años 2019 a 2020 en la zona de Penciahue (Datos de estación Agrometeorológica Penciahue, www.agroclima.cl).

En este sentido y de acuerdo a los registros de los últimos cinco años de la Estación San Clemente INIA, se evidencia una tendencia a la disminución de los montos anuales de las lluvias y por tanto es esperable una disminución de las reservas de agua en el suelo (Figura 4).

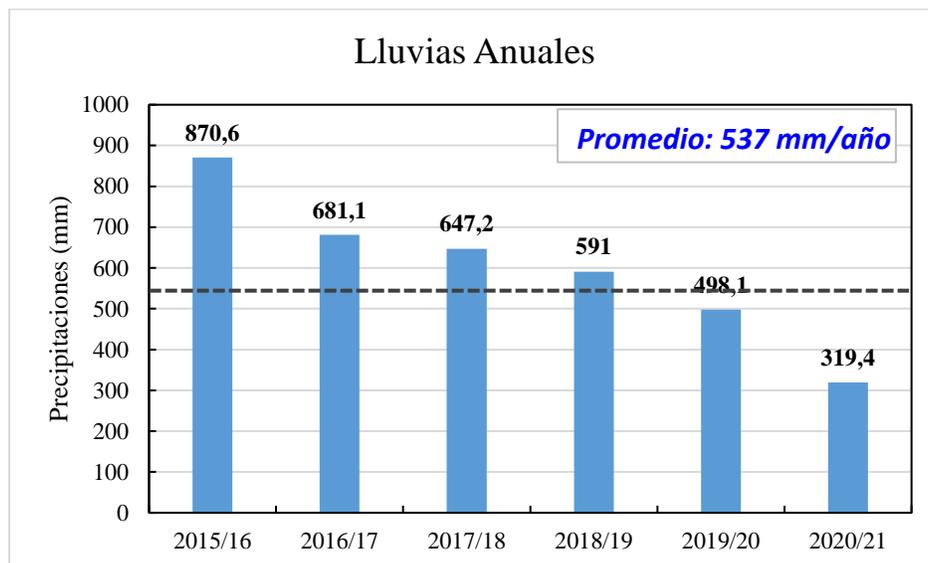


Figura 4. Precipitaciones anuales durante el período 2015 al 2020 registradas en la Estación Agrometeorológica San Clemente. (www.agrometeorología.cl).

En cuanto a la distribución anual de la demanda ambiental, representada por la variable evapotranspiración de referencia (ET_o), esta alcanza valores anuales de 1013 mm/año y máximos en torno a 6,3 mm/día en el verano (máximo absoluto de 7,7 mm/día) y mínimos en torno a 0,7 mm/día, durante los meses invernales de junio y julio. En la Figura 5 se señala el promedio de 5 años del comportamiento anual de la ET_o, registrada en la estación INIA San Clemente.

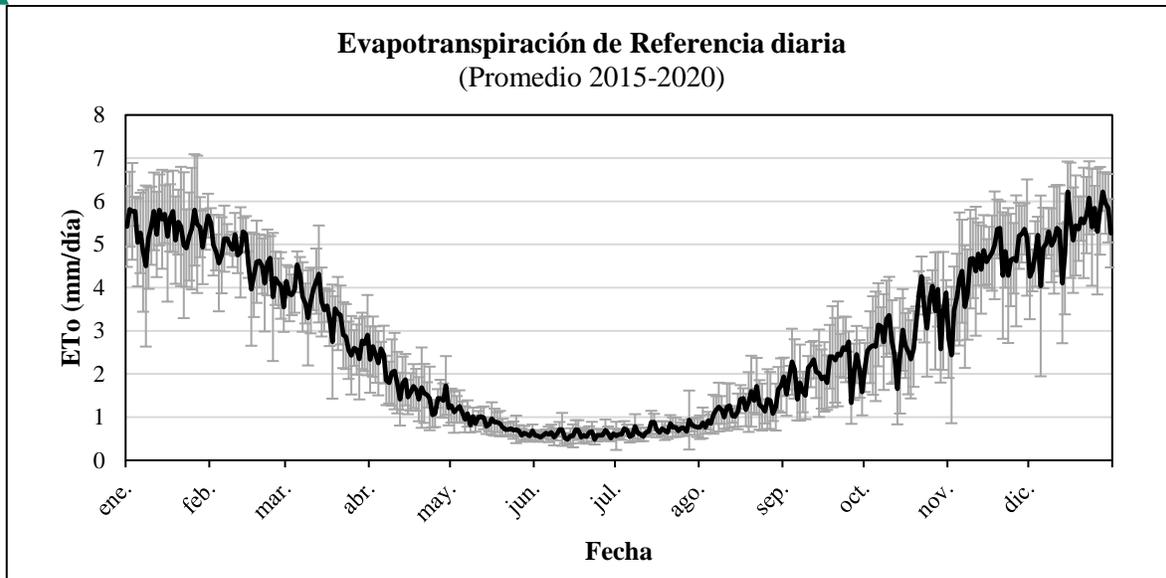
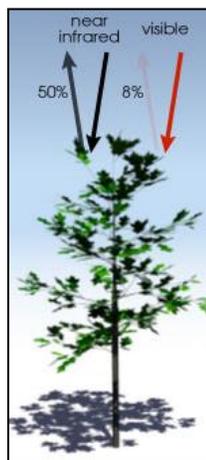


Figura 5. Evapotranspiración de referencia diaria (promedio período 2015 - 2020, estación agrometeorológica San Clemente INIA, www.agrometeorología.cl).

Caracterización del desarrollo del cultivo

Para la caracterización del desarrollo anual del cultivo se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) obtenido a partir de series temporales de imágenes satelitales. Este índice de vegetación permite estimar la absorción de la radiación solar por parte del cultivo en ciertos espectros de la radiación solar, eliminando la respuesta de otros elementos en el terreno. La fórmula de cálculo se señala en la Figura 6.



$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada

NIR: Reflectividad en el infrarrojo cercano

R: Reflectividad en el rojo

Figura 6. Ecuación de cálculo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI y representación esquemática de las longitudes de onda involucradas en su cálculo.

Los satélites utilizados en el análisis del cultivo fueron el Sentinel 2A, Sentinel 2B y Landsat 8. En el Cuadro 2 se señalan las principales características de los satélites utilizados en el estudio.

Cuadro 2. Características de las imágenes satelitales utilizados en el estudio.

Programa	Satélite	Cobertura imagen (km)	Resolución temporal (días entre visita)	Resolución espacial (metros)
Landsat (NASA)	Landsat 8	185 x 185	16 días	30
Copernicus (ESA)	Sentinel 2A Sentinel 2B	100 x 100	10 días	10

Así mismo, el análisis de la variabilidad espacial del cultivo dentro del sector de análisis permite identificar y cuantificar diferencias en su desarrollo entre distintas zonas. Estas diferencias serán analizadas conjuntamente con el productor de manera de identificar factores que podrían estar induciendo la des uniformidad observada, como pueden ser características edáficas del sitio, inadecuada operación del equipo de riego u otros factores adversos que puedan limitar el desarrollo del cultivo.

En la Figura 7 se señala en comportamiento anual del índice de vegetación NDVI en el sector 10 (B-5), indicando zonas con alto, medio y bajo desarrollo del cultivo durante la temporada 2019-20.

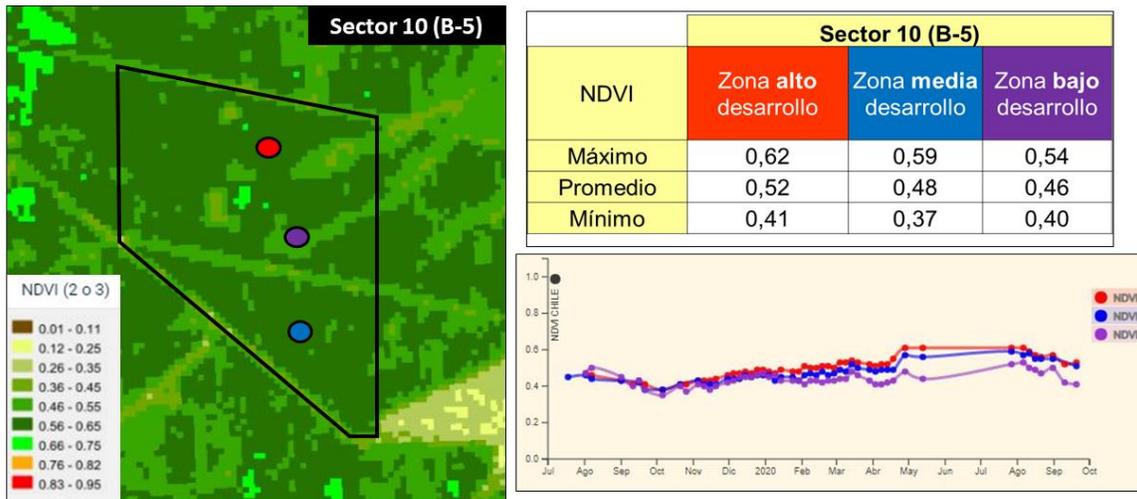


Figura 7. Vista general índice NDVI en el Sector 10 (B-5). Fundo Las Doscientas, Pencahue.

Como se puede apreciar los valores promedio más altos del índice NDVI se alcanzan en la zona norte del sector, indicando el mayor desarrollo foliar de las plantas ahí presentes. Más detalles de la variabilidad espacial de las plantas dentro del sector de riego serán analizados en el capítulo necesidades de riego del cultivo.



Manejo del riego

La determinación de las necesidades de riego de los cultivos se realizó utilizando el marco conceptual “evapotranspiración de referencia-coeficiente de cultivo”, propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998): La fórmula que resume su cálculo se indica a continuación:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Donde;

ET_c: Evapotranspiración de cultivo (mm/día)

K_c: Coeficiente de cultivo (adimensional)

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Para alimentar esta fórmula, se utilizaron por una parte los valores de la *ET_o* estimados por las estaciones de la Red Agrometeorológica Nacional (RAN MINAGRI), disponible en el sitio web <https://agrometeorologia.cl/>. De este modo se descargó la variable *Evapotranspiración de Referencia* (*ET_o*), estimada a partir de los registros meteorológicos diarios de la temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar incidente y velocidad del viento y utilizando la ecuación conocida como Penman-Monteith (PM).

Por otro lado, para obtener valores del *K_c* se utilizó la información disponible en la Plataforma Agrícola Satelital PLAS (<http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=plas>), estimado a partir del índice de vegetación NDVI.

Coeficientes de cultivo

En este trabajo, para estimar el nivel de desarrollo de las plantas en el terreno se utilizó el índice de vegetación satelital NDVI y para estimar el potencial transpirativo del cultivo se definió un coeficiente de cultivo basal (*K_{cb}*) de acuerdo a lo propuesto por la literatura científica (Campos et al., 2010; Bausch, 1993; Bausch, 1995; Bausch and Neale, 1987; Heilman et al., 1982; Neale, et al., 1989). La relación utilizada para obtener el *K_{cb}* se indica en la siguiente fórmula:

$$K_c = 1,51 \times NDVI - 0,23$$

En la Figura 8 se señala el comportamiento anual del coeficiente de cultivo promedio para las plantas de la variedad Arbequina del sector 10 (B-5). A partir del comportamiento anual del *K_c* se puede observar que en el período invernal los valores del *K_c* son más altos indicando posiblemente mayor desarrollo del cultivo durante ese período (menor demanda ambiental) o la presencia de malezas. Así mismo, los menores valores del *K_c* se observan en los meses de fines de primavera y verano (octubre a diciembre), probablemente debido a la mayor demanda del ambiente y el efecto de déficit del aporte hídrico sobre el cultivo.

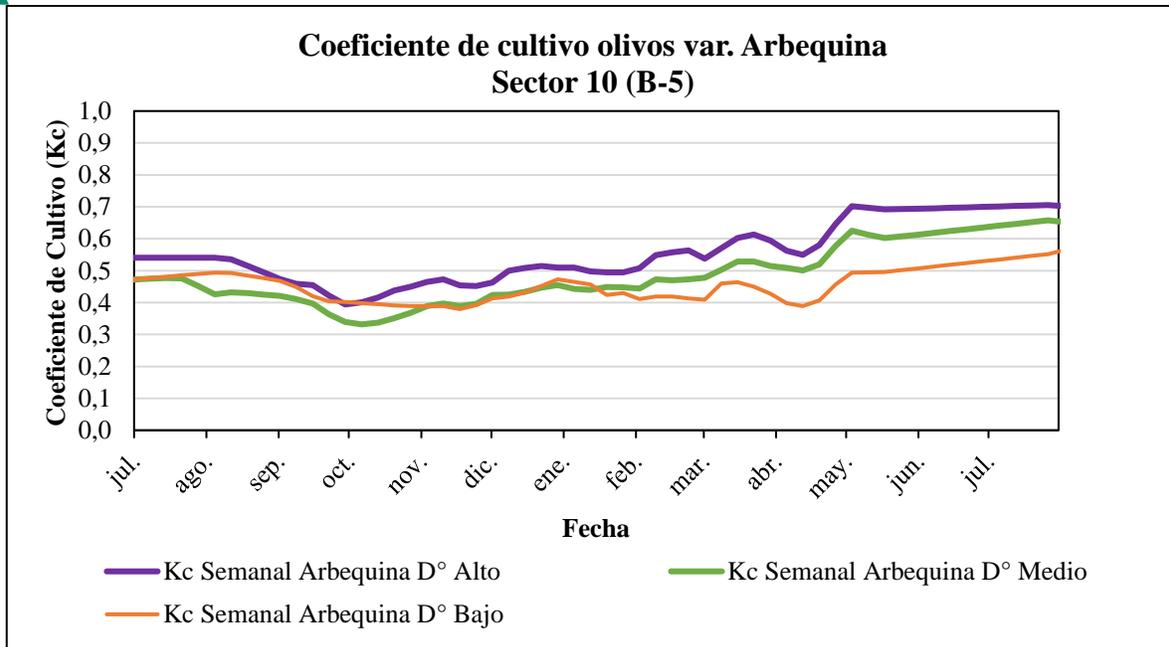


Figura 8. Comportamiento anual del Kc durante la temporada 2019/20 en el sector 10 (B-5), var. Arbequina. Fundo Las Doscientas, Pencahue.

En el Cuadro 3 se presenta un resumen de valores de Kc para cada sector de vigor alto, medio y bajo identificado.

Cuadro 3. Resumen de valores de Kc máximo, mínimo y promedio en el sector analizado para zonas con distinto nivel de desarrollo.

Variedad	Equipo	Sector	Nivel Desarrollo	Kc Satelital		
				Máximo	Promedio	Mínimo
Arbequina	B	5	Alto	0,71	0,56	0,39
			Medio	0,66	0,49	0,33
			Bajo	0,59	0,46	0,38

Como se puede observar, en la variedad Arbequina los valores de Kc máximo están en el rango 0,71 a 0,59, mientras que los valores mínimos se sitúan en el rango 0,39 a 0,33. El Kc promedio anual estimado en Arbequina fue 0,5. La proporción de cada zona se analiza en el capítulo de variabilidad de la transpiración.

Demanda de riego modelada

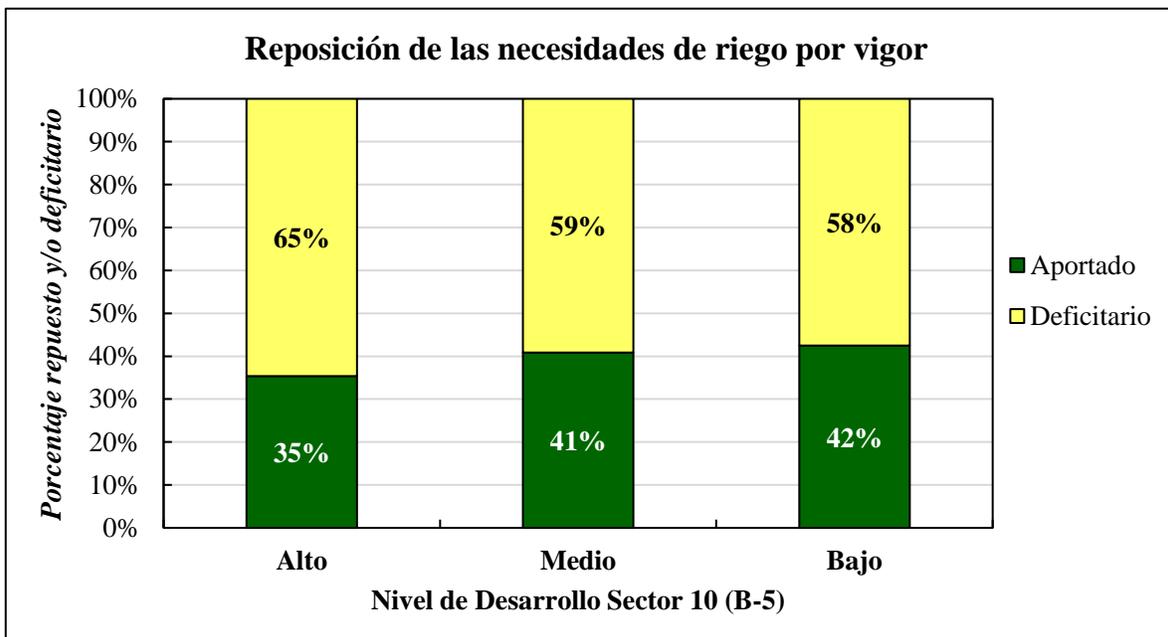
Con base en la metodología “coeficiente de cultivo- evapotranspiración de referencia” descrita anteriormente se modeló la transpiración potencial del cultivo, correspondiente a la estimación de necesidades de riego del cultivo de manera de mantener el cultivo en un óptimo de disponibilidad hídrica (sin estrés). Como se señaló anteriormente el parámetro Kc fue obtenido del índice de vegetación NDVI desde la Plataforma Agrícola Satelital PLAS y los datos de ETo de la estación San Clemente de INIA.

Por otro lado, se recopiló información del manejo real del riego en el cultivo durante la temporada 2019/20 y el volumen real de riego aportado al cultivo por el productor, de manera de contrastarlo

con el análisis modelado. El Cuadro 4 presenta un resumen de los volúmenes de riego aportados en campo y las estimaciones de acuerdo al monitoreo satelital del cultivo y de la demanda ambiental de la zona.

Cuadro 4. Transpiración potencial del cultivo y volumen de riego aportado al cultivo en sector analizado para distintos niveles de desarrollo.

Variedad	Equipo	Sector	Nivel Desarrollo	Plataforma Satelital	Registros de riego	Porcentaje de demanda hídrica cubierta (%)
				Transpiración (m ³ /ha/temp.)	Agua Aplicada (m ³ /ha/temp.)	
Arbequina	B	5	Alto	5.559	1.968	35%
			Medio	4.814	1.968	41%
			Bajo	4.632	1.968	42%



*: Temporada agrícola considerada fue Julio a Junio.

Como se puede observar, el volumen de riego aportado fue menor al estimado mediante el uso del coeficiente de cultivo modelado para los todos los niveles de desarrollo presentes en el sector. Debido a que todo el sector recibe el mismo volumen de riego, se presentan déficit de aporte hídrico variable y más acrecentado a aquellas zonas donde los olivos presentan mayor vigor. De este modo y de acuerdo a los registros de campo, en las zonas de alto vigor se aportó un 35% de las necesidades de riego modeladas, lo cual representó un déficit de 65%, mientras que en las zonas con bajo vigor se aportó un 42% de las necesidades, lo cual representó un 58% de déficit.

Para analizar mensualmente las condiciones del aporte de riego en el sector analizado y estimar la magnitud del déficit de riego por época del año, a continuación se gráfica del volumen de riego aportado mensualmente durante la temporada 2019/20 junto a las necesidades estimadas de acuerdo a la metodología descrita (Figuras 9, 10 y 11).

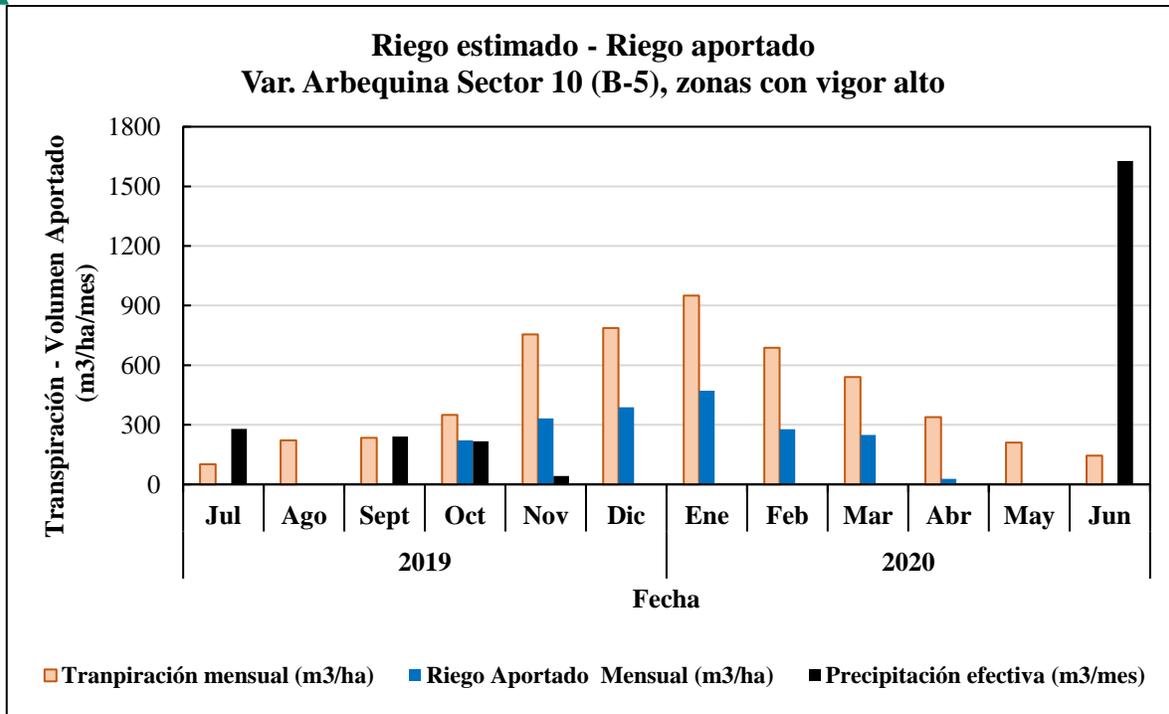


Figura 9. Comparación entre el volumen mensual de riego aportado y el volumen estimado para el Sector 10 (B-5) desarrollo alto, temporada 2019/20. Fundo Las Doscientas, Pencahue.

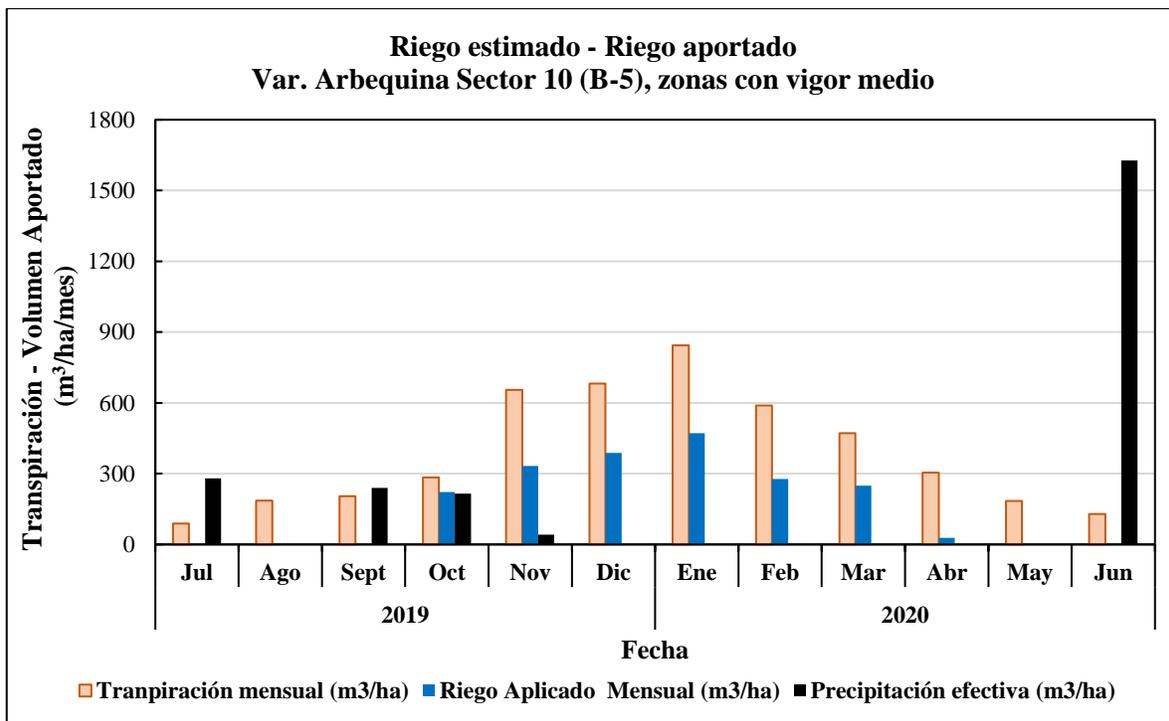


Figura 10. Comparación entre el volumen mensual de riego aportado y el volumen estimado para el Sector 10 (B-5) desarrollo medio, temporada 2019/20. Fundo Las Doscientas, Pencahue.

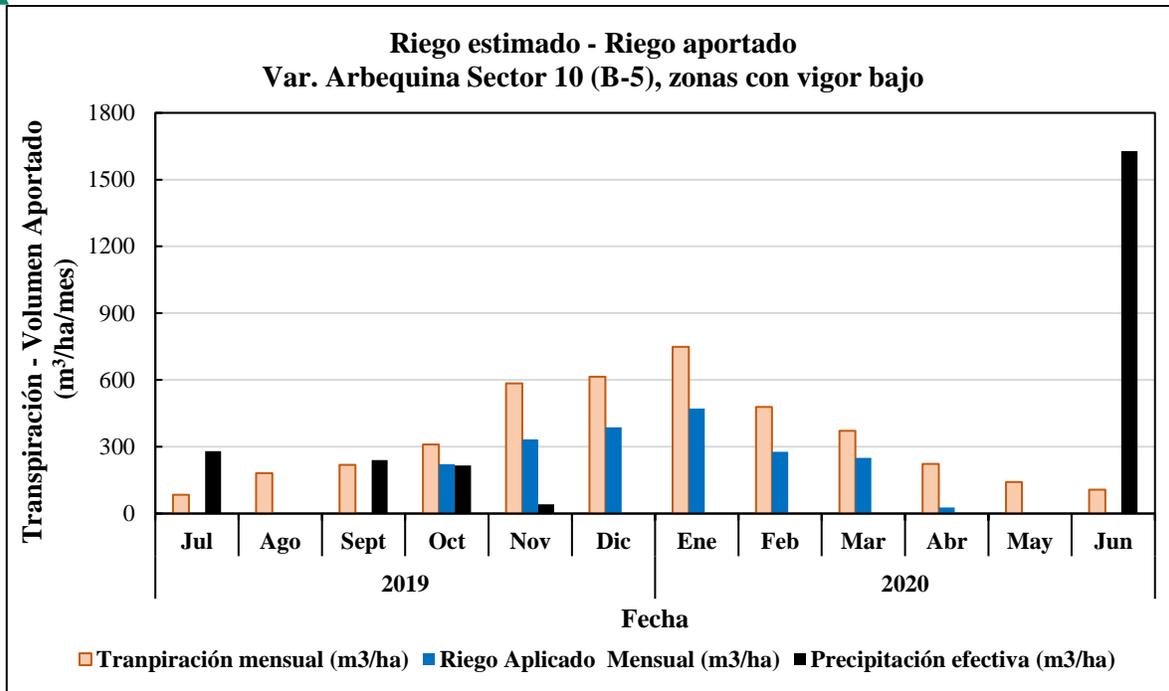


Figura 11. Comparación entre el volumen mensual de riego aportado y el volumen estimado para el Sector 10 (B-5) Desarrollo bajo, temporada 2019/20. Fundo Las Doscientas, Pencahue.

Considerando la acumulación mensual de necesidades hídricas a reponer y el volumen de riego realmente aportado, se observó que existen diferencias deficitarias entre la tasa de transpiración estimada y el riego aportado durante todos los meses de la temporada analizada.

Con objeto de cuantificar las diferencias entre el riego aportado y las necesidades de riego estimadas y los aportes de las lluvias, se calculó un factor de déficit (K_s) de acuerdo a la siguiente relación:

$$K_s = 1 - \frac{\text{riego aplicado} + \text{lluvia}}{\text{riego estimado por satelite}}$$

de este modo los valores de K_s cercanos a 100 indican que se suplieron las necesidades de transpiración, ya sea por riego y/o lluvia y el déficit hídrico es mínimo. Por el contrario, cuando el valor de K_s es cercano a 0 indica que las necesidades de transpiración no fueron repuestas con el aporte de riego y/o precipitaciones y el déficit hídrico fue máximo.

Como se puede apreciar en la Figura 12, para el sector 10 de alto desarrollo, durante la mayor parte de la temporada el cultivo estuvo sometido a un déficit hídrico superior al 50%, exceptuando los meses de octubre, junio y julio, instantes que se presentaron eventos de precipitación importantes. Durante el mes de julio es el único momento de la temporada en donde el cultivo dispuso de la totalidad de las necesidades hídricas y no tuvo valores deficitarios. Por el contrario, los meses de abril y mayo presentan los menores balances hídricos, con déficit de 94 y 100%, respectivamente. En el mes de agosto también se aprecia un bajo muy alto del déficit, presumiblemente por un manejo especial en los instantes de cosecha en el sector.

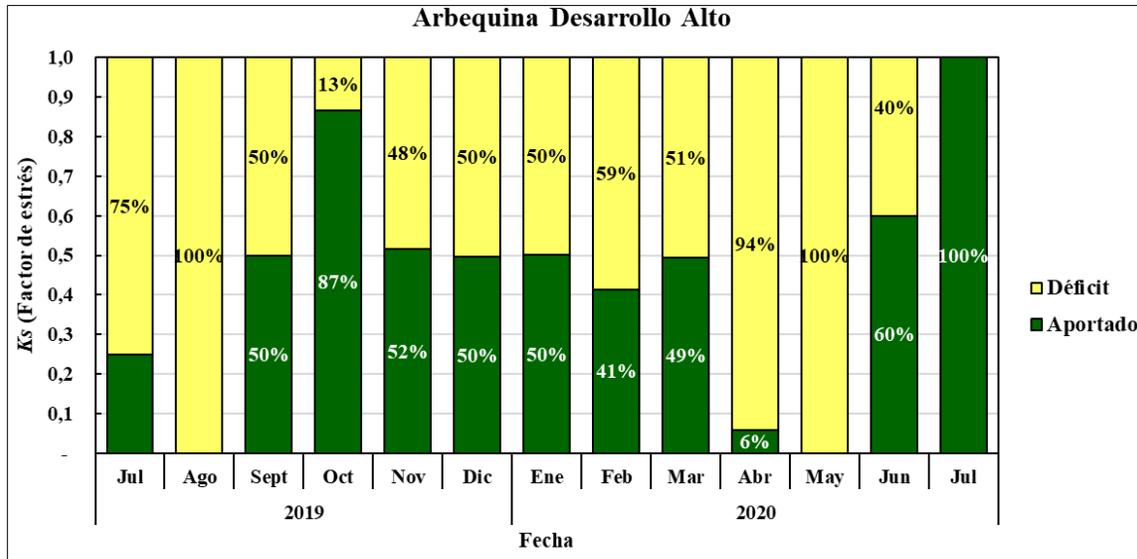


Figura 12. Factor de déficit (K_s) estimado en sector 10 (5-B) de alto desarrollo durante la temporada 2019/20. Fundo Las Doscientas. Fundo Las Doscientas, Pencahue.

Distribución espacial de la transpiración

Al analizar el comportamiento de la transpiración acumulada durante la temporada completa en el sector 10 (B-5), se pudo estimar que el valor promedio de transpiración fue de 424 mm/año, con un valor máximo de 532 mm/año y mínimo de 242 mm/año.

A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 56%, 12,5 ha) se concentra en el rango de 450 mm a 500 mm al año, seguido del rango de 500 - 550 mm de transpiración anual en un 22% de la superficie (4,8 ha). En la Figura 13 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

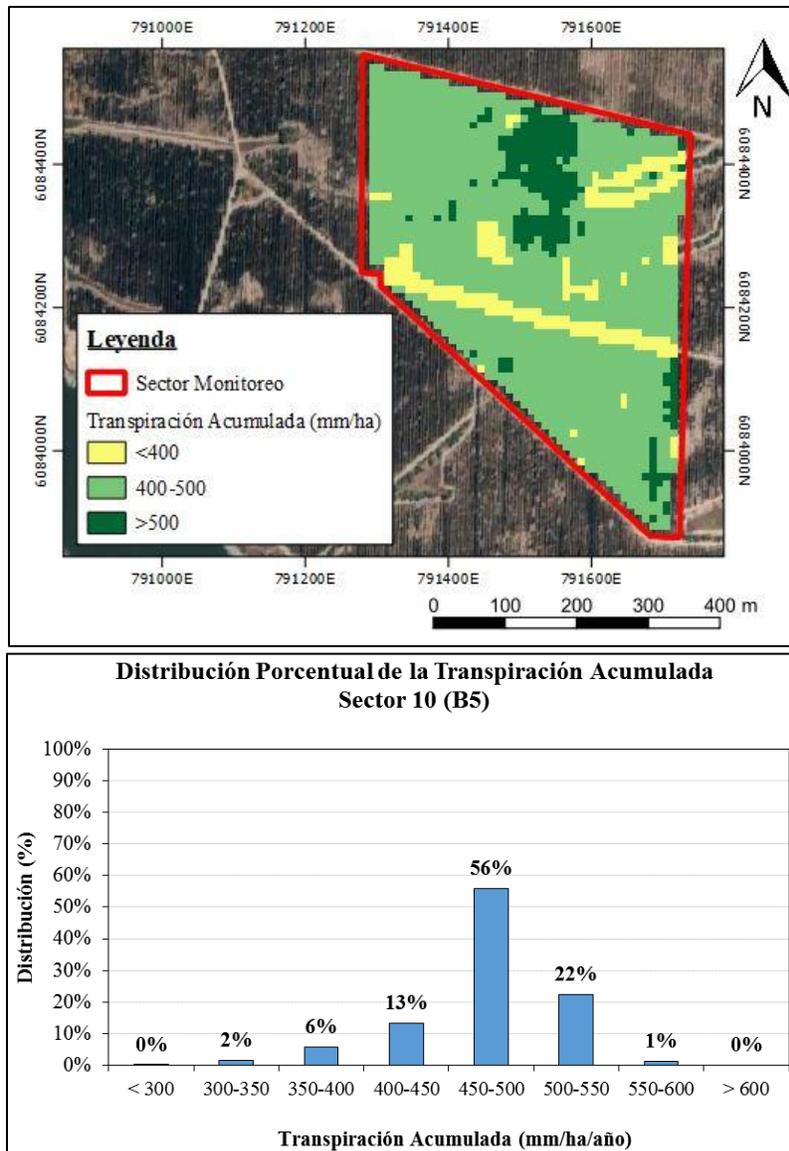


Figura 13. Distribución de los rangos de transpiración acumulada para el sector 10 (B-5). Fundo Las Doscientas, Pencahue.



Literatura citada

Agrimed, 2017. Atlas Agroclimático de Chile, estado actual y tendencias del clima. Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED). Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Chile.

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 - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manage.* 98, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011>.

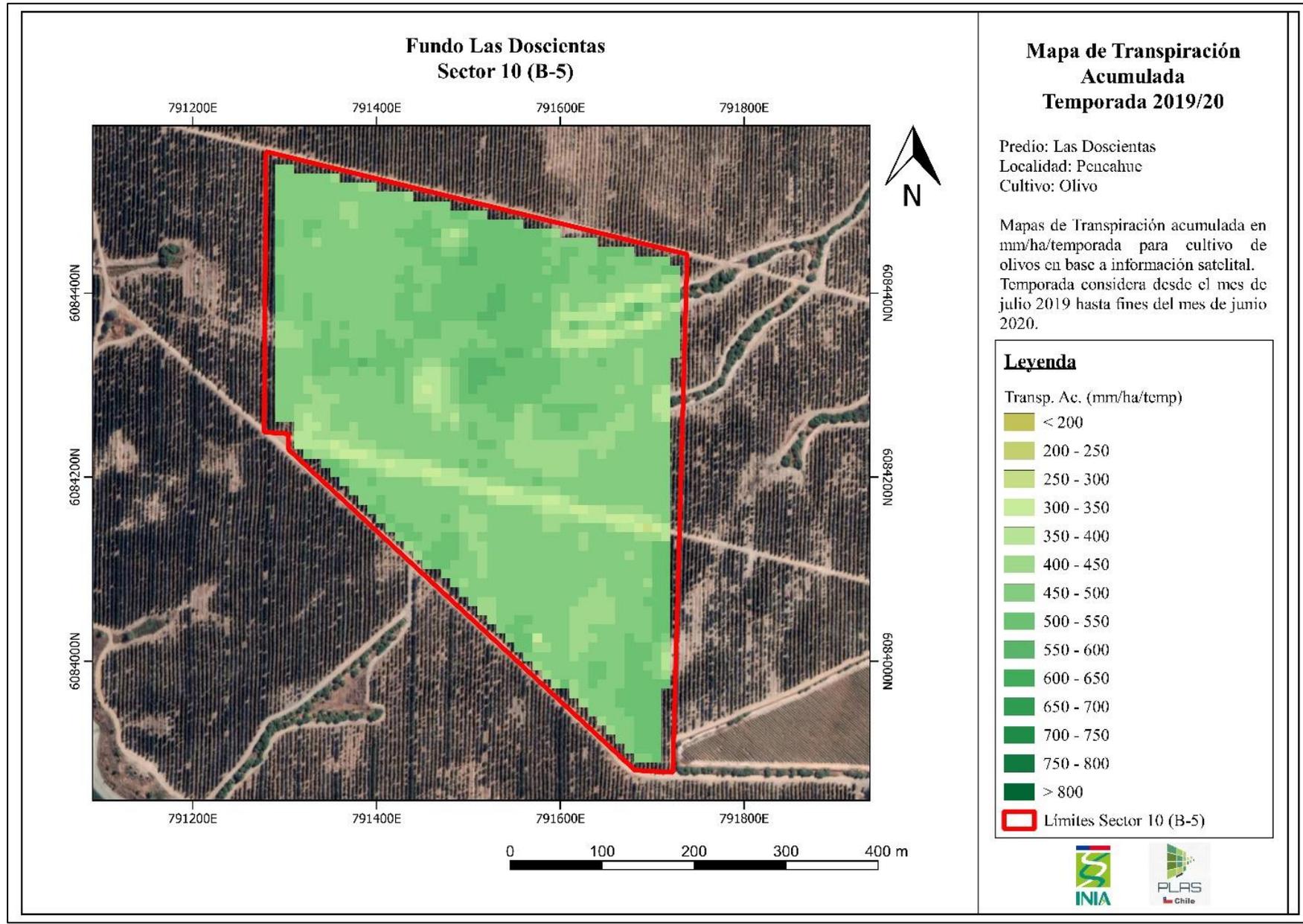
Bausch, W.C., 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46, 213–222. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90096-G](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90096-G).

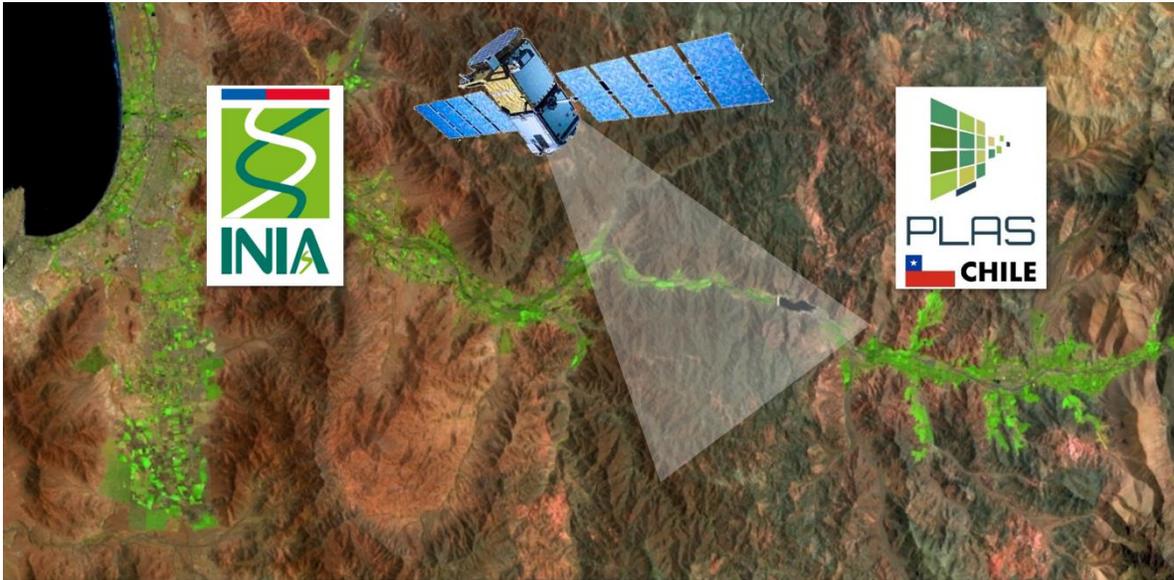
Bausch, W.C., 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manage.* 27, 55–68. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01125-3](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01125-3).

Bausch, W.C., Neale, C.M.U., 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Trans. ASAE* 30, 703–709. <https://doi.org/10.13031/2013.30463>.

Heilman et al., 1982 Heilman, J.L., Heilman, W.E., Moore, D.G., 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agron. J.* 74, 967–971. <https://doi.org/10.2134/agronj1982>.

Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heermann, D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. ASAE* 32, 1891–1899.





Informe Consultoría en Riego INIA

Productor: Agrícola OLFROT SPA.

Autores

Equipo Proyecto PLAS - INIA Intihuasi

Jefe de proyecto - Claudio Balbontín Nesvara

Profesional de Apoyo - Rodolfo Poblete Toro

Informe Consultoría Manejo del Riego Agrícola OLFROUT SPA.

Introducción

Con objeto de implementar un trabajo colaborativo entre el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA y la Asociación de Productores de Aceite Oliva ChileOliva, se implementó un trabajo de consultoría con las empresas asociadas, de manera de analizar las metodologías para la definición de las necesidades de riego del cultivo y aspectos asociados al manejo agronómico del cultivo de olivos.

El principal objetivo del trabajo de consultoría es transferir un marco conceptual para la definición de las necesidades de riego, junto a la capacitación en el uso de nuevas tecnologías para el monitoreo del cultivo y de los factores ambientales que influyen en el consumo hídrico y por tanto en la programación del riego.

Para esto, se elaboró un análisis comparativo entre los criterios utilizados actualmente por el productor para definir los volúmenes de riego aportados al cultivo (manejo tradicional del riego) y las necesidades de riego estimadas a partir del marco conceptual propuesto por FAO en su Manual N°56, con la innovación tecnológica del uso del índice de vegetación satelital NDVI para estimar un Coeficiente de Cultivo y el uso de información de la demanda ambiental del sitio para estimar la tasa de transpiración potencial del cultivo.

En el siguiente informe se resume una caracterización de los factores ambientales que influyen en el consumo hídrico del cultivo, análisis del desarrollo del cultivo, del manejo del riego y de la variabilidad espacial de la transpiración dentro de los sectores.



Sitio de análisis

Los trabajos de análisis fueron realizados en un predio ubicado en la localidad de San Rafael, comuna de San Rafael, Región del Maule. En la Figura 1 se indica la ubicación geográfica del campo, así como el sector analizado.



Figura 1. Ubicación del predio y sitio de análisis (Predio San Rafael, Olfrut).

El sector analizado, corresponde a un cuartel de la Arbequina (denominado E2). En el Cuadro 1 se señala un resumen de las características del sector en análisis.

Cuadro 1. Cuartel, superficie, variedad, año de plantación y marcos de plantación del sitio bajo análisis.

Cuartel	Superficie (ha-SIG)	Variedad	Año de Plantación	Marco de plantación (m)	Plantas/ha
E2	10,8	Arbequina	2007	3,75 x 1,35	1975

Características climáticas zona de estudio

La zona de San-Rafael se encuentra dentro del distrito agroclimático San Fernando (Agrimed, 2017, Figura 2), caracterizado por un régimen templado cálido supratermal y régimen de humedad semi-árido. Las temperatura máximas se sitúan en 29,6°C (con variaciones entre 30,2°C y 29°C dentro del mismo distrito) y mínimas de 3,8°C en julio (con rangos en torno a 4,3°C y 3,4°C dentro del distrito). En un promedio el período libres de heladas es de 227 días consecutivos, con 16 heladas anuales. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa se prolonga por 9 meses. Anualmente registra 1.621 días grado y 858 horas de frío (acumuladas hasta el 31 de julio).



Figura 2. Distrito agroclimático San Fernando (Agrimed, 2017).

La media anual de las precipitaciones es 756 mm/año, con un período seco de 7 meses de duración y déficit hídrico de 259 mm/año. Por su parte, el período húmedo dura 4 meses, durante los cuales se produce un excedente hídrico de 305 mm (Agrimed, 2017).

Para el análisis del comportamiento de variables meteorológicas actuales, se utilizaron los registros de la estación San Clemente de la Red Agroclimática Nacional de MINAGRI-INIA (www.agrometeorologia.cl). De este modo y para los últimos cinco años, el monto anual de las precipitaciones alcanzó en promedio 648 mm/año, con montos anuales de 870 mm para la temporada 2015/16, 681 mm en 2016/17, 647 mm en 2017/18, 591 mm en 2018/19 y 498 mm en lo que va de la temporada 2019/20 (Figura 3).

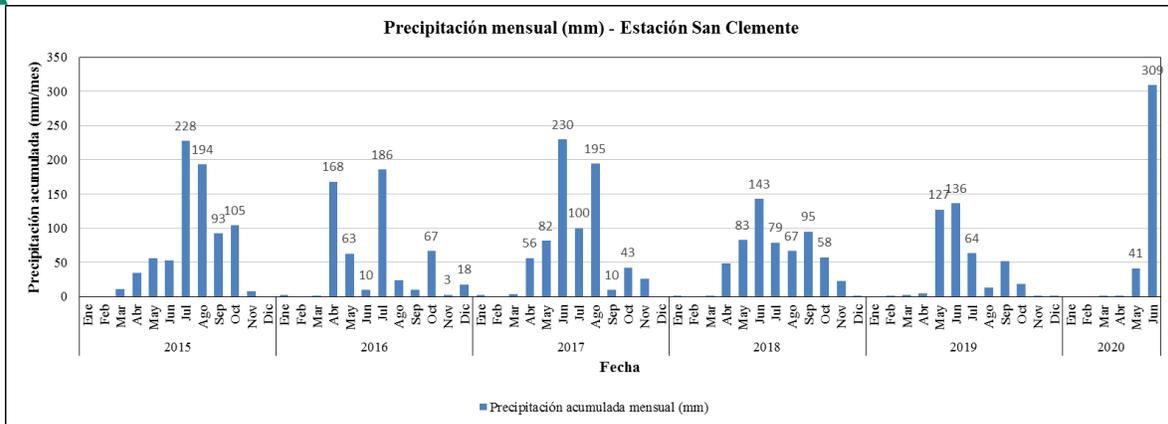


Figura 3. Precipitaciones mensuales acumuladas para la zona (Estación San Clemente-INIA. www.agrometeorología.cl).

Como se puede observar la tendencia de las lluvias durante los cinco últimos años evidencia una disminución de los montos anuales y probablemente una disminución de las reservas de agua en el suelo Figura 4.

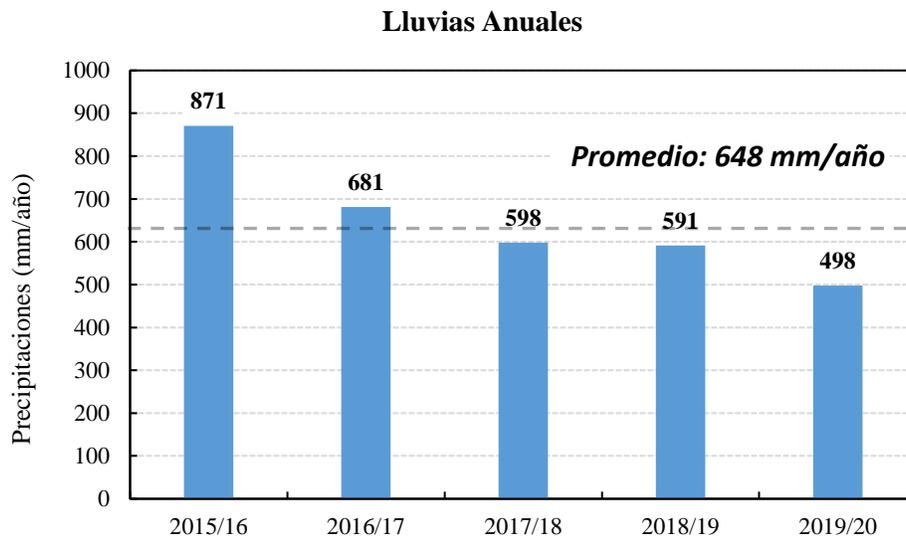


Figura 4. Precipitaciones anuales durante el período 2015 al 2020 registradas en la estación agrometeorológica San Clemente INIA (www.agrometeorología.cl).

En cuanto a la temperatura del aire, los registros de la estación indican valores máximos promedio en torno a los 32°C (con peak de 38°C en enero de 2017) y temperaturas mínimas promedio en torno a 0,8°C en los meses de invierno, con eventos extremos de -4,9°C en agosto de 2018 y -4,3°C en julio de 2018 (Figura 5).

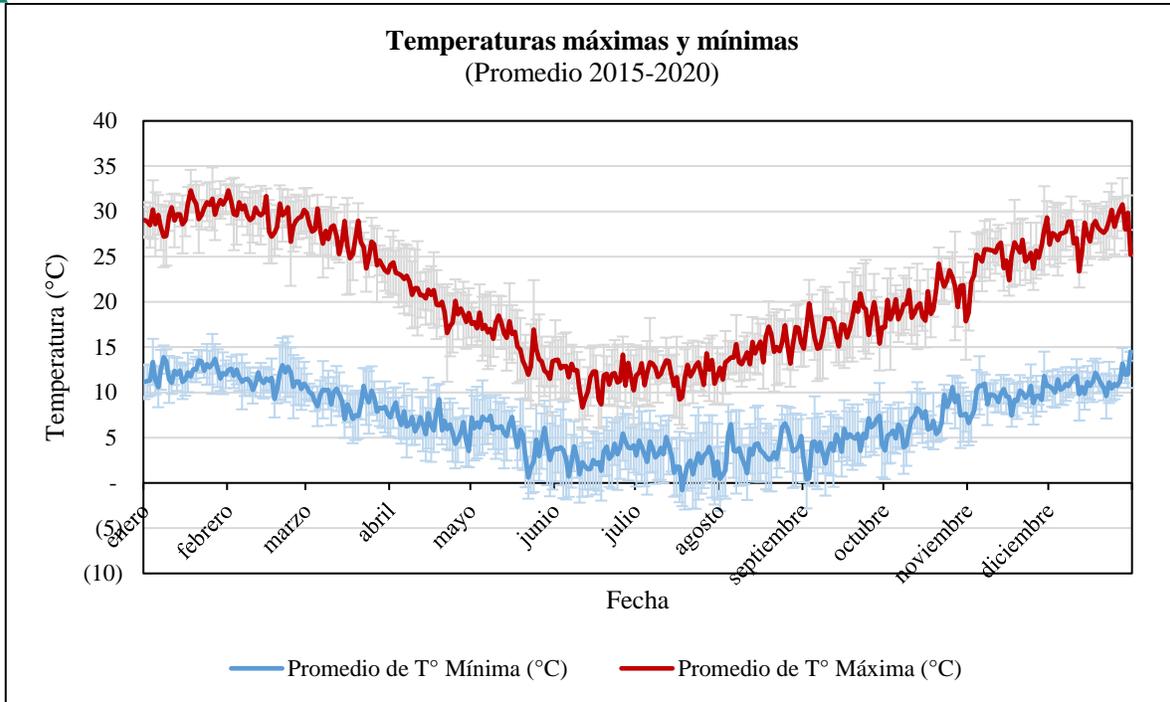


Figura 5. Comportamiento promedio de temperaturas máximas y mínimas (°C) promedio 2015-2020 (Estación San Clemente, INIA www.agrometeorología.cl).

La distribución anual de la demanda ambiental, representada por la variable evapotranspiración de referencia (ET_o), alcanza valores anuales de 1015 mm/año y máximos promedio de 5,7 mm/día en el verano durante el mes de enero, con un máximo absoluto de 7,1 mm/día en diciembre y mínimo de 0,3 mm/día, durante los meses invernales de junio y julio. En la Figura 6 se señala el promedio de 5 años del comportamiento anual de la ET_o, registrada en la estación INIA San Clemente.

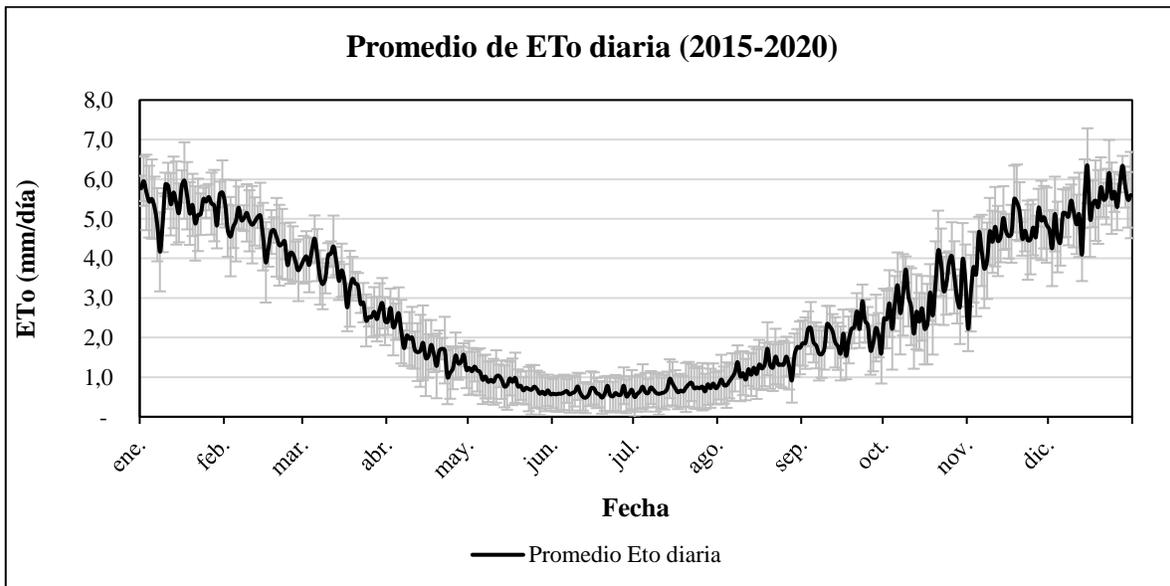
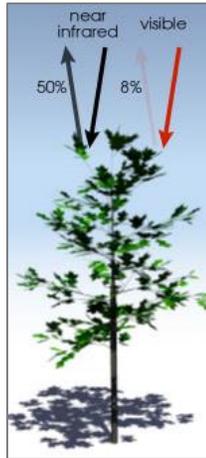


Figura 6. Evapotranspiración de referencia promedio diario estimado en base a 5 años de registro durante el período 2015 al 2020 en la estación agrometeorológica San Clemente (www.agrometeorología.cl).

Caracterización del desarrollo del cultivo

Para la caracterización del desarrollo anual del cultivo se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) obtenido a partir de series temporales de imágenes satelitales. Este índice de vegetación permite estimar la absorción de la radiación solar por parte del cultivo en ciertos espectros de la radiación solar, eliminando la respuesta de otros elementos en el terreno. La fórmula de cálculo se señala en la Figura 7:



$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada

NIR: Reflectividad en el infrarrojo cercano

R: Reflectividad en el rojo

Figura 7. Ecuación de cálculo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI y representación esquemática de las longitudes de onda involucradas en su cálculo.

Los satélites utilizados en el análisis del cultivo fueron el Sentinel 2A, Sentinel 2B y Landsat 8. En Cuadro 2 se señalan las principales características de los satélites utilizados en el estudio.

Cuadro 2. Características de las imágenes satelitales utilizados.

Programa	Satélite	Cobertura imagen (km)	Resolución temporal (días entre visita)	Resolución espacial (metros)
Landsat (NASA)	Landsat 8	185 x 185	16 días	30
Copernicus (ESA)	Sentinel 2A Sentinel 2B	100 x 100	10 días	10

Así mismo, el análisis de la variabilidad espacial del cultivo dentro del sector de análisis permite identificar y cuantificar diferencias en su desarrollo entre distintas zonas. Estas diferencias serán analizadas conjuntamente con el productor de manera de identificar factores que podrían estar induciendo la des uniformidad observada, como pueden ser características edáficas del sitio, inadecuada operación del equipo de riego u otros factores adversos que puedan limitar el desarrollo del cultivo.

En la Figura 8 se señala el comportamiento del índice NDVI en el sector de análisis, indicando el valor promedio, máximo y mínimos alcanzados durante el año.

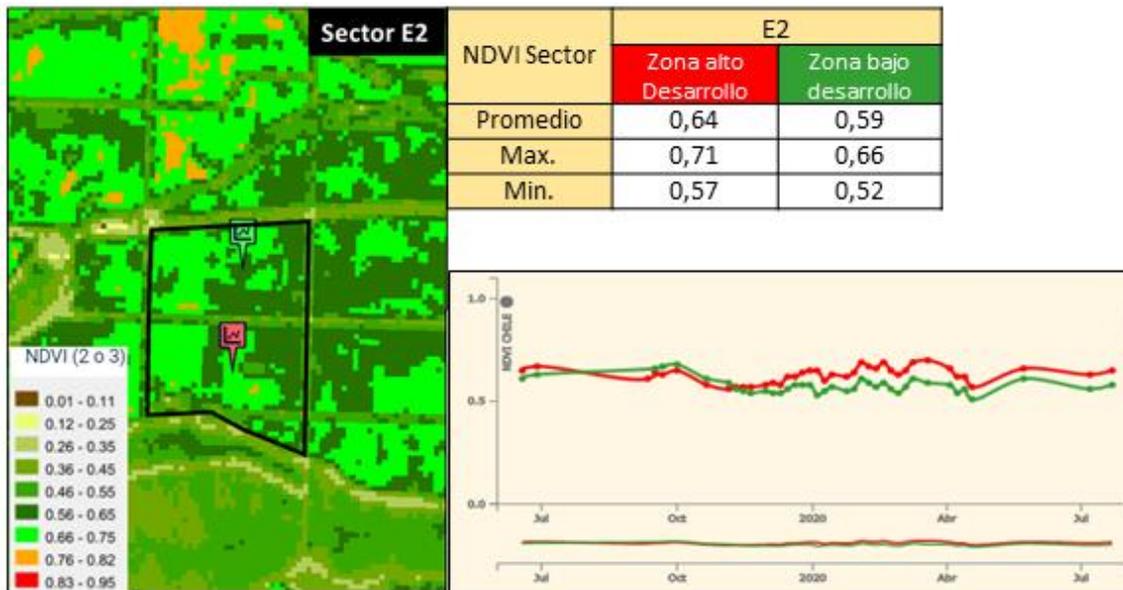


Figura 8. Vista general del índice NDVI en el Sector E2, predio San Rafael, Olfrut.

Como se puede apreciar los valores promedio del índice NDVI es del orden de 0,59 a 0,64, con un mínimo que no baja de 0,52. Más detalles de la variabilidad espacial de las plantas dentro de los sectores de riego serán analizados en el capítulo necesidades de riego del cultivo.

Manejo del riego

La determinación de las necesidades de riego los cultivos se realizó utilizando el marco conceptual “evapotranspiración de referencia-coeficiente de cultivo”, propuesto por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998): La fórmula que resume su cálculo se indica a continuación:

$$ETc = Kc \times ETo$$

Donde;

ETc: Evapotranspiración de cultivo (mm/día)

Kc: Coeficiente de cultivo (adimensional)

ETo: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Para alimentar esta fórmula, se utilizaron por una parte los valores de la *ETo* estimados por las estaciones de la Red Agrometeorológica Nacional (RAN MINAGRI), disponible en el sitio web <https://agrometeorologia.cl/>. De este modo se descargó la variable *Evapotranspiración de Referencia* (*ETo*), estimada a partir de los registros meteorológicos diarios de la temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar incidente y velocidad del viento y utilizando la ecuación conocida como Penman-Monteith (PM).

Por otro lado, para obtener valores del *Kc* se utilizó la información disponible en la Plataforma Agrícola Satelital PLAS (<http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=plas>), estimado a partir del índice de vegetación NDVI.

Coeficientes de cultivo

En este trabajo, para estimar el nivel de desarrollo de las plantas en el terreno se utilizó el índice de vegetación satelital NDVI y para estimar el potencial transpirativo del cultivo se definió un coeficiente de cultivo basal (*Kcb*) de acuerdo a lo propuesto por la literatura científica (Campos et al.,

2010; Bausch, 1993; Bausch, 1995; Bausch and Neale, 1987; Heilman et al., 1982; Neale, et al., 1989). La relación utilizada para obtener el K_{cb} se indica en la siguiente fórmula:

$$K_c = 1,51 \times NDVI - 0,23$$

En la Figura 9 se señala el comportamiento anual del coeficiente de cultivo promedio para las plantas de la variedad Arbequina del sector E2, se seleccionó una zona de alto desarrollo y una de bajo desarrollo, que es posible diferenciarla en las imágenes.. A partir del comportamiento anual del K_c se puede observar que en el período invernal los valores del K_c son más altos indicando posiblemente mayor desarrollo del cultivo durante ese período (menor demanda ambiental) o la presencia de malezas. Así mismo, los menores valores del K_c se observan en los meses de verano (noviembre, diciembre), probablemente debido a la mayor demanda del ambiente y el efecto del déficit hídrico sobre el cultivo.

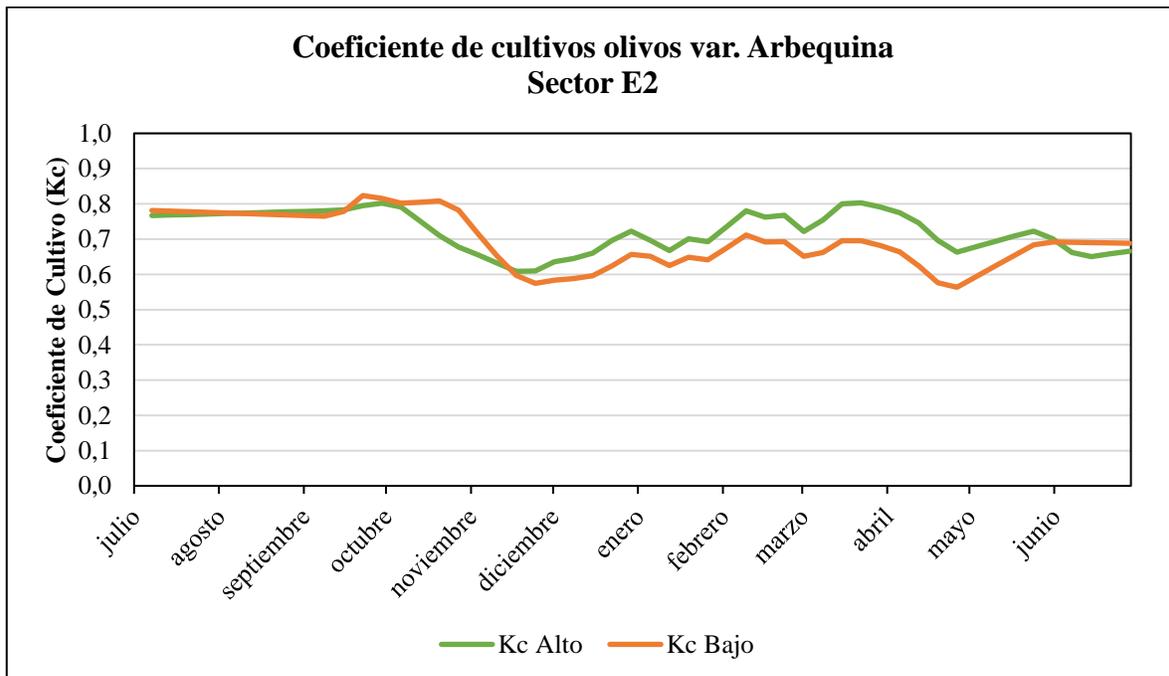


Figura 9. Curvas de K_c temporada 2019/20 sector E2, var. Arbequina. Predio San Rafael, Olfrut.

En el Cuadro 3 se presenta un resumen de valores de K_c registrados en cada sector de análisis.

Cuadro 3. Resumen de valores de K_c máximo, mínimo y promedio en el sector analizado.

Variedad	Sector	Vigor	Kc Modelado		
			Máximo	Mínimo	Promedio
Arbequina	E2	Alto	0,80	0,61	0,72
	E2	Bajo	0,82	0,56	0,69

Como se puede observar en el sector de análisis, el valor de K_c máximo varía entre 0,80 a 0,82. Por su parte el K_c mínimo se encuentra entre 0,56 a 0,61. El K_c promedio anual estimado se encuentra entre 0,69 a 0,72.

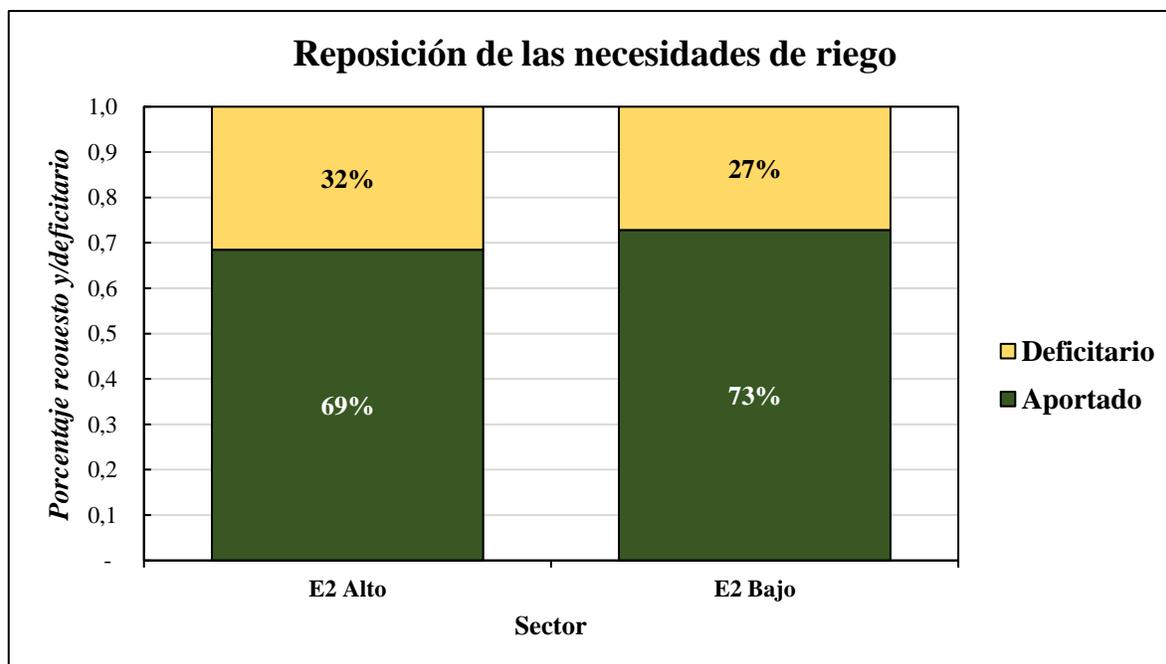
Demanda de riego modelada

Con base en la metodología “coeficiente de cultivo- evapotranspiración de referencia” descrita anteriormente se modeló la transpiración potencial del cultivo, correspondiente a la estimación de necesidades de riego del cultivo de manera de mantener el cultivo en un óptimo de disponibilidad hídrica (sin déficit). Como se señaló anteriormente el parámetro Kc fue obtenido del índice de vegetación NDVI desde la Plataforma Agrícola Satelital PLAS y los datos de ETO de la estación San Clemente de la RAN INIA MINAGRI.

Por otro lado, se recopiló información del manejo real del riego en el cultivo durante la temporada 2019/20, de manera de contrastarla con el análisis modelado. El volumen real de riego aportado al cultivo se consideró con base en los datos aportados por el productor. El Cuadro 4 presenta un resumen de los volúmenes de riego aportados en campo y las estimaciones de acuerdo al monitoreo satelital del cultivo y de la demanda ambiental de la zona.

Cuadro 4. Transpiración potencial del cultivo y volumen de riego aportado al cultivo en cada sector analizado.

Variedad	Sector	Plataforma Satelital	Registros de riego	Porcentaje de demanda hídrica cubierta (%)
		Transpiración (m ³ /ha/temporada)	Agua Aplicada (m ³ /ha/temporada)	
Arbequina	E2 Alto	6.820	4.707	69%
	E2 Bajo	6.413	4.707	73%



*: Temporada agrícola considerada fue Julio a Junio.

Como se puede observar en el sector de análisis, el volumen de riego aportado fue menor al estimado mediante el uso del coeficiente de cultivo modelado, reponiéndose entre un 68% a 73% de las necesidades de riego, lo que representa un déficit de entre un 27% a un 32%.

Para analizar los aportes mensuales de riego para el sector analizado y estimar la magnitud del déficit de riego por época del año se construyó una gráfica del volumen de agua aportada mensualmente en el predio para temporada 2019/20 junto a las necesidades estimadas de acuerdo a la metodología descrita, diferenciándolo para la zona con NDVI alto y bajo (Figura 10).

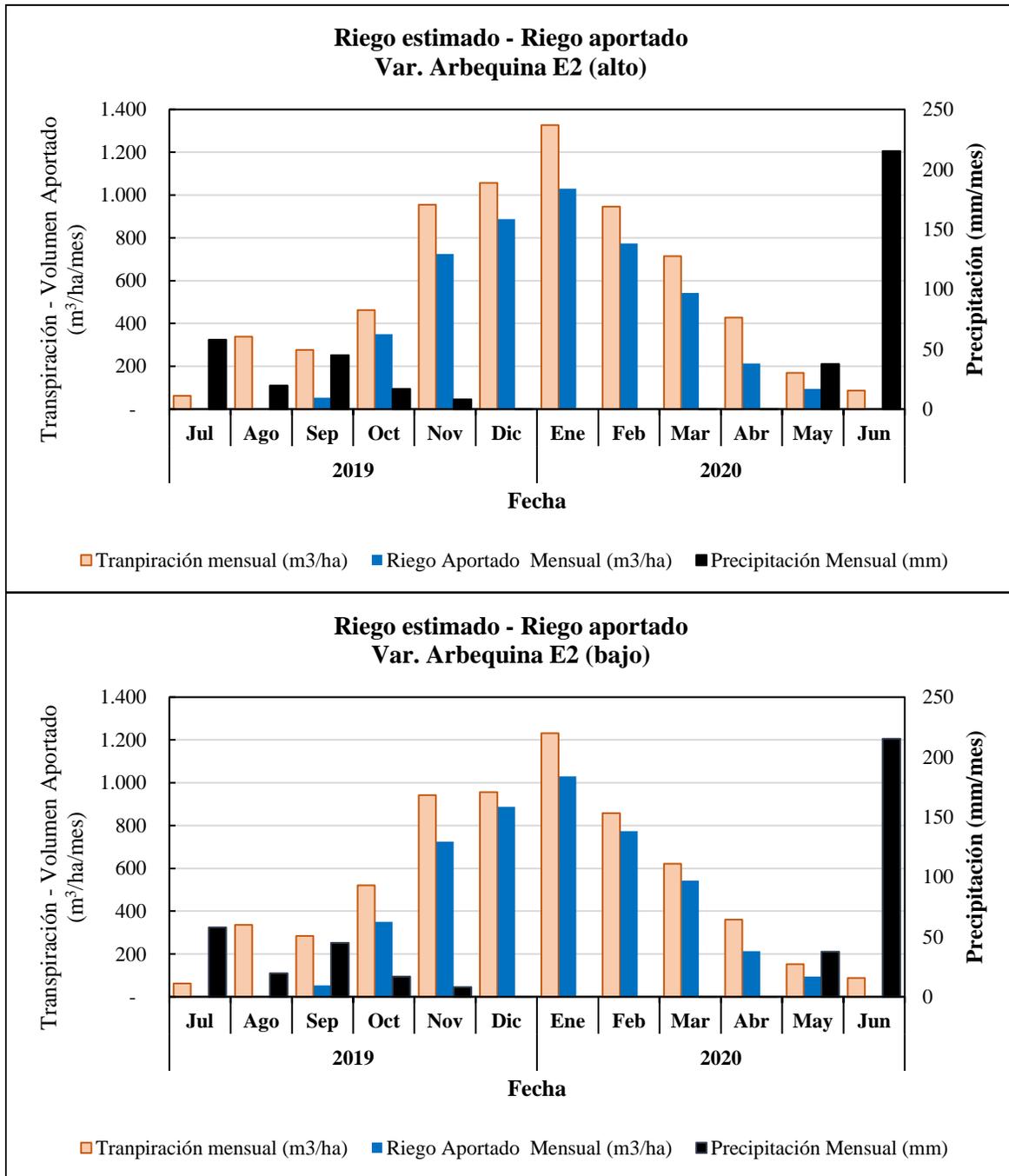


Figura 10. Comparación mensual de volumen de agua aportado en el campo y el consumo modelado en el Sector E2. Temporada 2019/20. Predio San Rafael, Olfrut.

Considerando la acumulación mensual de necesidades hídricas a reponer y el volumen de riego realmente aportado, se observa que existen diferencias deficitarias entre la tasa de transpiración estimada y el riego aportado en todos los meses de la temporada. Este déficit se hace más evidente a principios de temporada, entre julio a septiembre y a finales de esta, entre abril a junio.

Con objeto de cuantificar las diferencias entre el riego aportado y las necesidades de riego estimadas, se calculó un factor de déficit (K_s) de acuerdo a la siguiente relación:

$$K_s = 1 - \frac{\text{riego aportado} + \text{lluvia}}{\text{riego estimado por satélite}}$$

de este modo cuando K_s es cercano a 1 no se repuso las necesidades de riego y/o tampoco hubo precipitaciones que suplieran la demanda hídrica. Por el contrario cuando el valor de K_s es cercano a 0 indica que el aporte de riego y/o las precipitaciones cubrieron la demanda hídrica del cultivo.

Como se puede apreciar en la Figura 11 en general se repuso cercano al 80% de la demanda y los meses más deficitarios fueron agosto y abril, épocas de baja demanda ambiental. Entre octubre y marzo, el déficit no superó el 24%. En los meses de mayo, junio y julio las necesidades fueron completamente satisfechas.

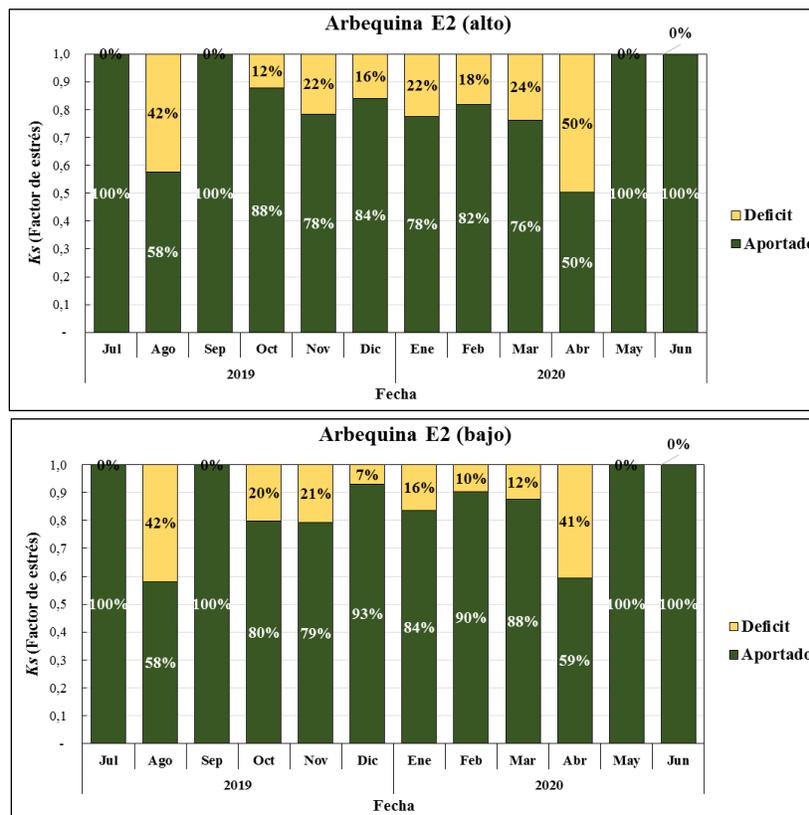


Figura 11. Factor de déficit (K_s) estimado en el sector de análisis durante la temporada 2019/20. Predio San Rafael, Olfrut.

Sensores de humedad en terreno

De acuerdo con información del comportamiento de la humedad en el suelo, registrado con sensores de humedad en terreno enterrados a 30 cm y 60 cm de profundidad, la disponibilidad hídrica se mantiene alta y constante durante toda la temporada, permitiendo su agotamiento durante los meses

invernales (Figura 12). A partir de enero se identifica agotamiento de la humedad hasta la cosecha cuando se aprecian valores bajo el límite inferior señalado en el sistema.

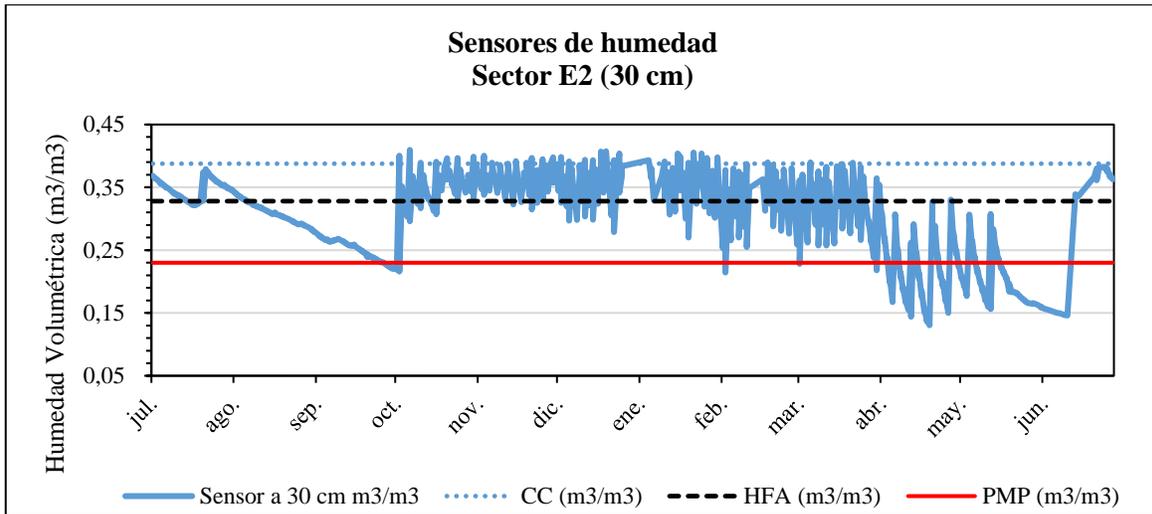


Figura 12. Contenido de humedad en el suelo a 30 cm de profundidad. Sector E2, temporada 2019/20. Predio San Rafael, Olfrut.

En el caso del comportamiento de la humedad a 60 cm (Figura 13), se puede observar que los valores también permanecen constantes, con un leve agotamiento a partir de los meses indicados en el sensor anterior.

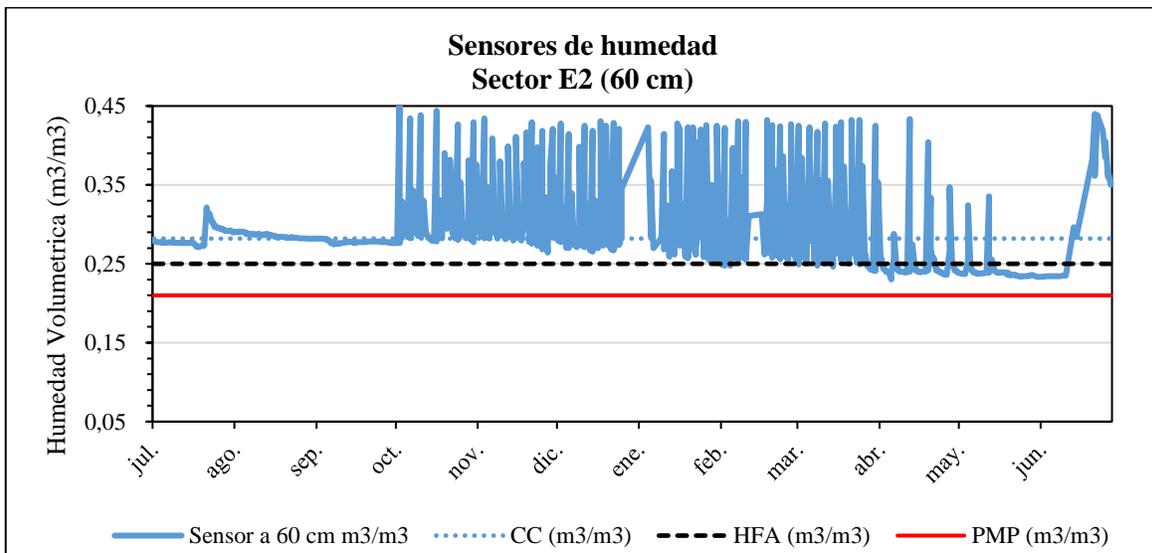


Figura 13. Contenido de humedad en el suelo a 30 cm de profundidad. Sector E2, temporada 2019/20. Predio San Rafael, Olfrut.

Distribución espacial de la transpiración

Al analizar el comportamiento de la transpiración acumulada durante la temporada completa en el sector E2, se pudo estimar que el valor promedio de transpiración fue de 698 mm/año, con un valor máximo de 832 mm/año y mínimo de 503 mm/año.

A partir del análisis de la variación de la transpiración dentro del sector, se determinó que el mayor porcentaje de la superficie (un 54%, 6,4 ha) se concentra en el rango de 700 mm a 750 mm al año, seguido del rango de 750 - 800 mm de transpiración anual en un 20% de la superficie (2,4 ha). En la Figura 14 se muestra la distribución de los rangos en el terreno y su distribución porcentual de cobertura.

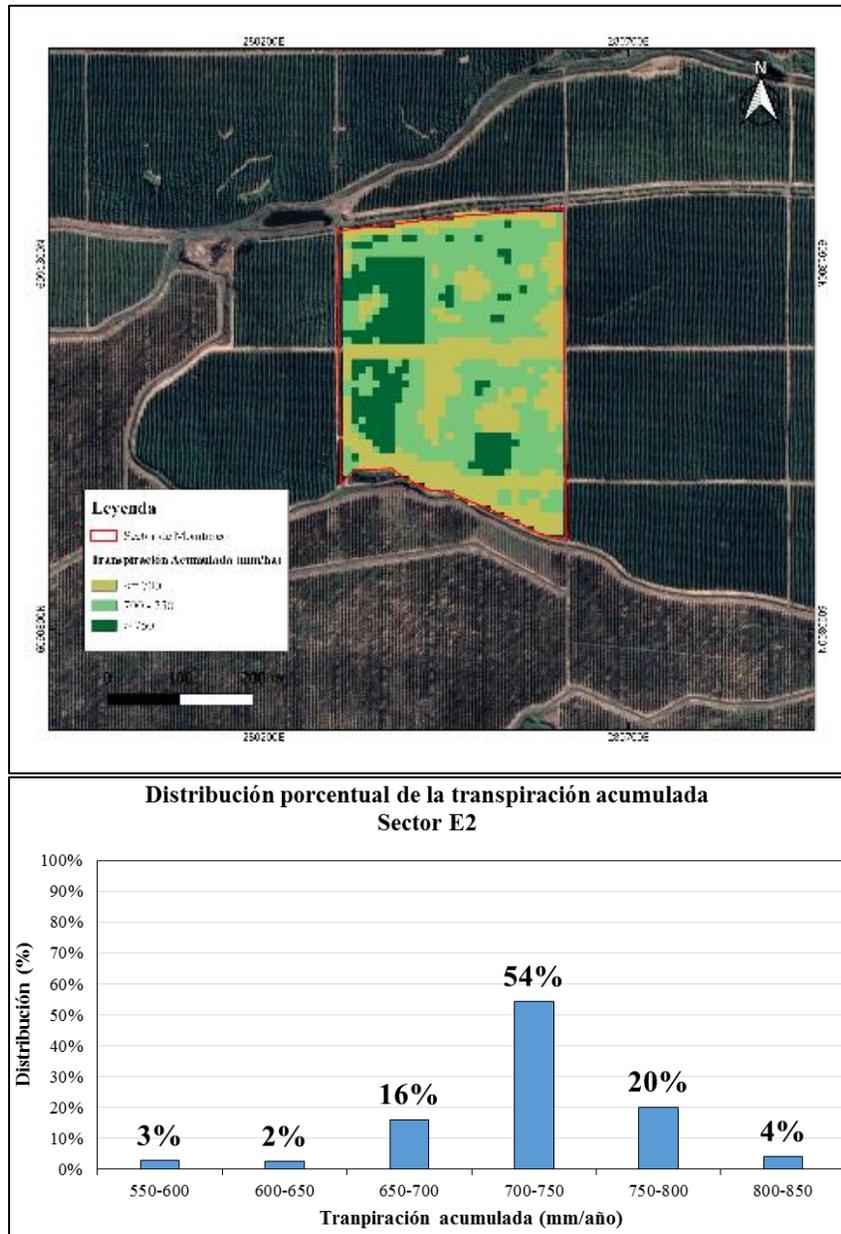


Figura 14. Distribución de los rangos de transpiración acumulada en el sector de análisis. Predio San Rafael, Olfrut.



Literatura citada

Agrimed, 2017. Atlas Agroclimático de Chile, estado actual y tendencias del clima. Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED). Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Chile.

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 - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manage.* 98, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011>.

Bausch, W.C., 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46, 213–222. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90096-G](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90096-G).

Bausch, W.C., 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manage.* 27, 55–68. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01125-3](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01125-3).

Bausch, W.C., Neale, C.M.U., 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Trans. ASAE* 30, 703–709. <https://doi.org/10.13031/2013.30463>.

Heilman et al., 1982 Heilman, J.L., Heilman, W.E., Moore, D.G., 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agron. J.* 74, 967–971. <https://doi.org/10.2134/agronj1982>.

Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heermann, D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. ASAE* 32, 1891–1899.

Mapa de Transpiración Acumulada durante Temporada 2019/20. Predio San Rafael, Olfrut.

