



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Programa de Magíster en Ingeniería Agrícola con menciones en Agroindustrias,  
Mecanización y Energía y Recursos Hídricos

## **Efecto del manejo de riego en la producción y calidad de manzano variedades Royal Gala y Brookfield Gala**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Agrícola con  
Mención en Recursos Hídricos

SERGIO ORLANDO QUIROZ ÁLVAREZ  
CHILLÁN-CHILE  
2022

Profesor Guía: Dr. Jorge Carlos Jara Ramírez  
Departamento de Recursos Hídricos  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Esta tesis ha sido realizada en el Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.

Profesor Guía

---

Dr. Jorge Jara Ramírez  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Profesor co-Guía

---

Dr. Eduardo Holzapfel Hoces  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Evaluador Externo

---

Dr. Richard Bastías Ibarra  
Facultad de Agronomía  
Universidad de Concepción

Director del Programa

---

Dr. Javier Ferrer Valenzuela  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

**TABLA DE CONTENIDOS**

<i>TABLA DE CONTENIDOS</i> .....	<i>i</i>
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i> .....	<i>iv</i>
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i> .....	<i>vii</i>
<i>RESUMEN</i> .....	<i>xiii</i>
<i>SUMMARY</i> .....	<i>xiv</i>
<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	<i>1</i>
<i>OBJETIVOS</i> .....	<i>5</i>
<i>MATERIALES Y MÉTODOS</i> .....	<i>6</i>
<i>RESULTADOS</i> .....	<i>18</i>
<i>CONCLUSIONES</i> .....	<i>42</i>
<i>BIBLIOGRAFÍA</i> .....	<i>43</i>
<i>APÉNDICE A</i> .....	<i>49</i>
<i>APÉNDICE B</i> .....	<i>55</i>
<i>APÉNDICE C</i> .....	<i>58</i>
<i>APÉNDICE D</i> .....	<i>61</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

### En el texto

<b>Tabla 1.</b> Antecedentes generales y características climáticas de ambos predios en estudio. ....	8
<b>Tabla 2.</b> Comparación de las características de los dos tratamientos de riego evaluados según variedad de manzano. ....	9
<b>Tabla 3.</b> Parámetros del factor de corrección para las temporadas 2008–2009 y 2009–2010 de plantas de manzanos de variedades Royal Gala y Brookfield Gala. ....	11
<b>Tabla 4.</b> Comparación de las estrategias de riego para un huerto comercial de manzano, variedad Royal Gala, en las temporadas 2008–2009 y 2009–2010. ....	12
<b>Tabla 5.</b> Comparación de las características del riego para un huerto comercial de manzano, variedad Brookfield Gala en las temporadas 2008–2009 y 2009–2010. ....	13
<b>Tabla 6.</b> Rango de evapotranspiración estándar de referencia ( $ET_0$ ) de la semana anterior y frecuencia de riego establecida para el T1, variedad Brookfield Gala en las temporadas 2008–2009 y 2009–2010. ....	13
<b>Tabla 7.</b> Contenido de humedad del suelo a capacidad de campo ( $\theta_{CC}$ ), punto de marchitez permanente ( $\theta_{PMP}$ ), correspondientes a energías de retención de 33 J kg <sup>-1</sup> y 1500 J kg <sup>-1</sup> , respectivamente; densidad aparente de suelo ( $\rho_a$ ) y textura para tres estratas de suelo con manzano de variedad Royal Gala. ....	15
<b>Tabla 8.</b> Contenido de humedad del suelo a capacidad de campo ( $\theta_{CC}$ ), punto de marchitez permanente ( $\theta_{PMP}$ ), correspondientes a energías de retención de 10 J kg <sup>-1</sup> y 1500 J kg <sup>-1</sup> , respectivamente; densidad aparente de suelo ( $\rho_a$ ) y textura para cuatro estratas de suelo con manzano de variedad Brookfield Gala. ....	15

<b>Tabla 9.</b> Producción de manzanos de variedad Royal Gala y Brookfield Gala, para dos aplicaciones de agua durante las temporadas 2008-2009 y 2009-2010.....	33
<b>Tabla 10.</b> Número de frutos a la cosecha por árbol de manzano de variedad Brookfield Gala para dos aplicaciones de agua durante las temporadas 2008-2009 y 2009-2010.....	34
<b>Tabla 11.</b> Productividad del agua en manzanos de variedad Brookfield Gala y Royal Gala en dos temporadas y dos tratamientos de manejo del riego. ....	36
<b>Tabla 12.</b> Diámetro ecuatorial del fruto en la cosecha al final de las temporadas 2008-2009 y 2009-2010, para dos tratamientos de aplicación de agua a manzanos de variedad Royal Gala y Brookfield Gala.....	37
<b>Tabla 13.</b> Peso del fruto a la cosecha en las temporadas 2008-2009 y 2009-2010, para dos tratamientos de aplicación de agua a manzanos de variedad Royal Gala y Brookfield Gala.....	40
<b>Tabla 14.</b> Costo de la energía eléctrica consumida por bombeo en cultivos de manzanos de variedad Brookfield Gala (riego por goteo) y Royal Gala (riego por microaspersión).....	41

### En el Anexo

<b>Tabla B-1.</b> ANOVA de una vía para el diámetro ecuatorial en la temporada 2008-2009 en manzanos de variedad Brookfield Gala. ....	56
<b>Tabla B-2.</b> ANOVA de una vía para el diámetro ecuatorial en la temporada 2009-2010 en manzanos de variedad Brookfield Gala. ....	56
<b>Tabla B-3.</b> ANOVA de una vía para el número de frutos por árbol en la temporada 2008-2009 en manzanos de variedad Brookfield Gala. ....	56
<b>Tabla B-4.</b> ANOVA de una vía para el número de frutos por árbol en la temporada 2009-2010 en manzanos de variedad Brookfield Gala. ....	56
<b>Tabla B-5.</b> ANOVA de una vía para el peso del fruto en la temporada 2008-2009 en manzanos de variedad Brookfield Gala. ....	57
<b>Tabla B-6.</b> ANOVA de una vía para el peso del fruto en la temporada 2009-2010 en manzanos de variedad Brookfield Gala. ....	57

<b>Tabla B-7.</b> ANOVA de una vía para la producción en la temporada 2008-2009 en manzanos de variedad Brookfield Gala. ....	57
<b>Tabla B-8.</b> ANOVA de una vía para la producción en la temporada 2009-2010 en manzanos de variedad Brookfield Gala. ....	57
<b>Tabla C-1.</b> Fechas y horario de determinaciones del potencial hídrico de la planta. ....	59
<b>Tabla C-2.</b> Características del sistema de riego por micro-aspersión en manzanos de variedad Royal Gala y por goteo en manzanos de variedad Royal Gala. ....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

### En el texto

- Figura 1.** Ubicación de los predios Fundo “Santa Eugenia” y Huerto “La Capilla”, propiedad de la empresa Copefrut S.A..... 7
- Figura 2.** Ubicación de tubos de acceso de neutrómetro en manzanos de variedad (a) Royal Gala y (b) Brookfield Gala. .... 16
- Figura 3.** Agua aplicada acumulada, durante las temporadas de riego 2008-2009 y 2009- 2010, para dos tratamientos de aplicación de agua a través de riego por microjet a manzanos de variedad Royal Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. .... 19
- Figura 4.** Volumen de agua aplicado mensualmente a manzanos de variedad Royal Gala en las temporadas (a) 2008-2009 y (b) 2009-2010. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. .... 19
- Figura 5.** Agua aplicada acumulada durante las temporadas de riego 2008-2009 y 2009- 2010, para dos tratamientos de aplicación de agua a través de riego por goteo a manzanos de variedad Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. .... 20
- Figura 6.** Volumen de agua aplicado mensualmente a manzanos de variedad Brookfield Gala en las temporadas (a) 2008-2009 y (b) 2009-2010. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. .... 21
- Figura 7.** Evolución del contenido promedio de humedad del suelo antes y un día después del riego en las estratas 0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm en la temporada 2008-2009 para dos tratamientos de riego por microjet en manzanos de variedad Royal Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Cada punto es

- promedio de 12 lecturas. CC es capacidad de campo y PMP es punto de marchitez permanente. .... 23
- Figura 8.** Evolución del contenido promedio de humedad del suelo antes y un día después del riego en las estratas 0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm en la temporada 2009-2010 para dos tratamientos de riego por microjet en manzanos de variedad Royal Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Cada punto es promedio de 12 lecturas. CC es capacidad de campo y PMP es punto de marchitez permanente. .... 24
- Figura 9.** Evolución del contenido promedio de humedad del suelo antes del riego en las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm en la temporada 2008-2009 para dos tratamientos de riego por goteo en manzanos de variedad Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Cada punto es promedio de 12 lecturas. CC es capacidad de campo y PMP es punto de marchitez permanente. Los puntos de medición del contenido de humedad son P1: a 60 cm del tronco entre hileras, P2: a 30 cm del tronco dentro de la hilera y P3: a 60 cm del tronco dentro de la hilera. .... 26
- Figura 10.** Evolución del contenido promedio de humedad del suelo antes de riego en las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm en la temporada 2009-2010 para dos tratamientos de riego por goteo en manzanos de variedad Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Cada punto es promedio de 12 lecturas. CC es capacidad de campo y PMP es punto de marchitez permanente. Los puntos de medición del contenido de humedad son P1: a 60 cm del tronco entre hileras, P2: a 30 cm del tronco dentro de la hilera y P3: a 60 cm del tronco dentro de la hilera. .... 27
- Figura 11.** Evolución horaria del potencial hídrico de la hoja ( $\psi_H$ ) en manzanos de variedad Royal Gala para dos tratamientos de aplicación de agua

durante la temporada 2008-2009 en los días: (a) 15-01-2009, (b) 01-02-2009 y (c) 15-02-2009; y durante la temporada 2009-2010 en los días: (d) 15-01-2010, (e) 15-02-2010 y (f) 15-03-2010. Cada punto es el promedio de ocho repeticiones. Medias con igual letra para la misma hora indican que no hay diferencias significativas de acuerdo con la prueba ANOVA ( $p < 0.05$ ). T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial..... 31

**Figura 12.** Evolución horaria del potencial hídrico de la hoja ( $\psi_H$ ) en manzanos de variedad Brookfield Gala para dos tratamientos de aplicación de agua durante la temporada 2008-2009 en los días: (a) 17-02-2009, (b) 20-02-2009 y (c) 24-02-2009; y durante la temporada 2009-2010 en los días: (d) 04-03-2010, (e) 06-03-2010 y (f) 10-03-2010. Cada punto es el promedio de ocho repeticiones. Medias con igual letra para la misma hora indican que no hay diferencias significativas de acuerdo con la prueba ANOVA ( $p < 0.05$ ). T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial..... 32

**Figura 13.** Evolución del diámetro ecuatorial del fruto, durante las temporadas 2008-2009 y 2009-2010, para dos tratamientos de aplicación de agua a través de riego por goteo en manzanos de variedad Royal Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. .... 38

**Figura 14.** Evolución del diámetro ecuatorial del fruto, durante las temporadas 2008-2009 y 2009-2010, para dos tratamientos de aplicación de agua a través de riego por goteo a manzanos de variedad Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. .... 39

## En el Anexo

**Figura A-1.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 17/10/2008 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. .... 50

**Figura A-2.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 14/11/2008 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. .... 50

**Figura A-3.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 19/12/2008 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala antes del riego. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición..... 51

**Figura A-4.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 20/01/2009 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala antes del riego. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición..... 51

**Figura A-5.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-

120 cm el día 20/02/2009 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala después del riego. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. .... 52

**Figura A-6.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 19/12/2009 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala antes del riego. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición..... 52

**Figura A-7.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 14/01/2010 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala antes del riego. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición..... 53

**Figura A-8.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 29/01/2010 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. .... 53

**Figura A-9.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 13/02/2010 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala antes del riego. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y

$\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. .... 54

- Figura A-10.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 26/02/2010 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. .... 54
- Figura D-1.** Precipitación en la temporada 2008-2009 (Liguay en Longaví, Red Hidrométrica Nacional DGA, 2022). <https://explorador.cr2.cl/>..... 62
- Figura D-2.** Precipitación en la temporada 2009-2010 (Liguay en Longaví, Red Hidrométrica Nacional DGA, 2022). <https://explorador.cr2.cl/>..... 62
- Figura D-3.** Precipitación en la temporada 2008-2009 (Mulchén, Red Hidrométrica Nacional DGA, 2022). <https://explorador.cr2.cl/>..... 63
- Figura D-4.** Precipitación en la temporada 2009-2010 (Mulchén, Red Hidrométrica Nacional DGA, 2022). <https://explorador.cr2.cl/>..... 63

## RESUMEN

El contexto de escasez hídrica en Chile ha llevado a buscar nuevas alternativas para el riego en cultivos de manzanos. El manejo adecuado de los volúmenes de agua a aplicar pueden ser una alternativa para racionalizar el uso de agua en árboles frutales. Por esta razón, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto sobre la producción y calidad de la fruta de dos estrategias de riego en cultivos de manzana de variedades Royal Gala y Brookfield Gala en el centro-sur de Chile.

El estudio se llevó a cabo en dos predios, uno ubicado en la Región del Maule (Fundo "Santa Eugenia") y el otro en la Región del Biobío (Huerto "La Capilla"), propiedad de la empresa Copefrut S.A., durante las temporadas 2008-2009 y 2009-2010. El diseño experimental fue de bloques al azar y consideró dos tratamientos de aplicación de agua: riego programado de acuerdo con el volumen teórico requerido por la planta (T1) y manejo del riego a cargo del productor de acuerdo con un protocolo predial (T2). En ambos huertos se evaluó el contenido de humedad en el suelo, el potencial hídrico de la planta, el diámetro ecuatorial, el peso del fruto y la producción al final de la temporada.

Los resultados mostraron que la estrategia de riego T1 logró reducciones en el consumo de agua superiores al 20 % respecto a T2 y permitió un ahorro de 1.600 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en cada predio al final de cada temporada. Además, los costos de riego se redujeron hasta en 0,92 UF ha<sup>-1</sup> temporada<sup>-1</sup> en "Royal Gala" y 0,36 UF ha<sup>-1</sup> temporada<sup>-1</sup> en "Brookfield Gala". En manzanos "Royal Gala", la reducción en el consumo de agua en T1 no condujo a diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en el diámetro, producción y peso de la fruta en ambas temporadas, respecto a los resultados obtenidos con T2. Por otro lado, manzanos de variedad Brookfield Gala, la producción y el número de frutos en la temporada 2008-2009 fue estadísticamente mayor en T1 ( $p < 0,05$ ). Sin embargo, se observó un mayor número de frutos en T2 ( $p < 0,05$ ) en la temporada 2009-2010, asociado a un menor diámetro y peso del fruto.

Los resultados respaldaron la efectividad de la estrategia de manejo del riego basada en la aplicación del volumen teórico de agua requerido por la planta.

## SUMMARY

The context of water scarcity in Chile has led to search for new alternatives for the irrigation in apple crops. The proper management of the volumes of water to be applied can be an alternative to rationalize the use of water in fruit trees. For this reason, the aim of this work was to evaluate the effect on fruit production and quality of two irrigation strategies in apple crops of the Royal Gala and Brookfield Gala varieties.

The study was carried out in two farms located in the Maule Region (Fundo "Santa Eugenia") and Biobio Region (Huerto "La Capilla"), owned by the company Copefrut S.A during the 2008-2009 and 2009-2010 seasons. The experimental design was a randomized block with two irrigation water application treatments: an irrigation schedule based on the theoretical volume required by the plant (T1) and an irrigation schedule following a farm protocol (T2). In both orchards, the moisture content in the soil, the plant water potential, the equatorial diameter, the production at the end of the season, and the weight of the fruit were evaluated.

The results showed that the irrigation strategy T1 allowed reductions in water consumption of more than 20% compared to T2 and represented a saving of more than 1600 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> in each farm at the end of each season. Besides, irrigation costs were reduced up to 0.92 UF ha<sup>-1</sup> season<sup>-1</sup> in "Royal Gala" apple trees and 0.36 UF ha<sup>-1</sup> season<sup>-1</sup> in "Brookfield Gala". In the orchards of Royal Gala apple trees, the reduction in water consumption did not lead to significant differences ( $p < 0.05$ ) in the diameter, production, and weight of the fruit in both seasons, in comparison to the results obtained with T2. On the other hand, in the orchards of Brookfield Gala apple trees, the production and number of fruits in the 2008-2009 season were statistically higher in T1 ( $p < 0.05$ ). However, although in the 2009-2010 season the highest number of fruits was observed in T2 ( $p < 0.05$ ), this led to a smaller diameter and weight of the fruit.

In conclusion, the results supported the effectiveness of the irrigation management based on the theoretical volume required by the plant.

## INTRODUCCIÓN

Durante la última década, la extensión de los períodos de sequía y la disminución de los volúmenes de precipitaciones, han sido factores determinantes para la declaración de nuestro país como altamente vulnerable ante el cambio climático (Alvarez-Garretón et al., 2020). Algunos investigadores ya han proyectado una intensificación de este fenómeno para los próximos años, lo que supondría un impacto negativo sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la zona centro-sur, ya sea para acumulación o uso directo (Boisier et al., 2016).

Datos oficiales posicionan al sector agrícola como el mayor usuario de agua dulce en Chile y, por tanto, al más expuesto frente a una carencia de este recurso. De hecho, alrededor del 70 % del consumo de agua proviene de actividades ligadas a este rubro (DGA, 2017). Por otro lado, estimaciones recientes prevén un aumento en la evapotranspiración de los cultivos para la zona central en los próximos años, lo que podría significar aún más presión sobre las reservas futuras de agua (Ministerios de Agricultura y Medio Ambiente, 2013). Estas proyecciones ponen en jaque al sector productivo agrícola y lo ubica en el centro de todas las miradas, en donde el sostenido crecimiento poblacional implicaría un aumento en la demanda de agua para consumo humano, con el subsecuente requerimiento para incrementar la producción de alimentos a fin de satisfacer las necesidades de esa población creciente (Adu et al., 2018)

Si se mantienen los patrones de consumo actuales de agua en el sector agrícola, ello podría derivar en una limitación mucho más severa del acceso a este recurso y conducir, finalmente, a un deterioro de la producción en cultivos que son especialmente dependientes de las reservas de agua, como los frutales. Algunos investigadores han encontrado que uno de los frutales que podrían verse severamente amenazados son los manzanos (Montes, 2010). Este frutal representa una importante fuente de ingresos para el país y constituye un gran porcentaje del total de productos agrícolas exportados. En la región del Maule es el segundo frutal con mayor superficie de plantación -detrás de las cerezas- y el principal frutal en

términos de producción (ODEPA-CIREN, 2019). Dentro de este grupo, las variedades destacadas de manzana roja son “Brookfield Gala” y “Royal Gala”; superando, incluso, a la producción neta de otros frutales (ODEPA-CIREN, 2016). Su relevancia en el mercado regional debe conducir, necesariamente, a convertirla en líder de nuevos proyectos que garanticen el uso eficiente de los recursos hídricos.

Dado el contexto de escasez, los últimos informes emanados desde el Ministerio de Agricultura, Ministerio del Medio Ambiente y otras entidades no gubernamentales señalan la importancia de mejorar la infraestructura de riego y optimizar las técnicas de riego actuales (Olmos, 2017). Sin embargo, una parte importante de los agricultores aún utiliza métodos de riego convencionales. De acuerdo con el catastro frutícola de la Región del Maule de 2019, un 24,5 % de los productores de manzana roja utilizaban surcos de riego y un 5 % lo hacía a través del riego por tendido (ODEPA-CIREN, 2019). Callejas y Reyes (2019) estiman que el consumo de agua por hectárea puede disminuir hasta en un 50 % si se implementan otras técnicas como riego por goteo o microaspersión. Más aún, este consumo puede caer un 40 % más si se implementan técnicas de riego que consideren factores climáticos y de cultivo en la aplicación del agua, sin afectar la calidad de la fruta.

Por esta razón, uno de los métodos apropiados para optimizar el uso de agua es implementar, a nivel predial, una tecnificación de riego, mejorando las prácticas de reposición y racionalización del agua (Holzapfel, 1998). El riego localizado de alta frecuencia permite la optimización del recurso, manteniendo un nivel de humedad adecuado en la zona radical de la planta. Este método controlado bajo adecuadas condiciones de diseño, operación y manejo, generará en la zona radical del cultivo un ambiente con características físicas, químicas y biológicas que permitirá obtener productos de alta calidad e incrementar la rentabilidad de la empresa agrícola (Holzapfel y Arumí, 2010).

Hay limitada información sobre investigaciones que hayan evaluado a largo plazo las opciones de gestión de los suministros de agua en diferentes niveles de escasez para cultivos de manzanos (Girona et al., 2010). En literatura se encuentran varios

casos exitosos de estudios que han logrado reducir el consumo de agua y aumentar la productividad luego de considerar variables técnicas en la estimación de la demanda de agua. Por ejemplo, luego de analizar cuatro opciones de riego en manzana roja de variedad Gala, Lecaros (2018) encontró que, cuando controló la aplicación de agua manteniendo niveles adecuados de humedad, logró reducir el consumo de agua y, a su vez, disminuir la demanda de energía, asociado al menor tiempo de funcionamiento de los sistemas de bombeo. Además, consiguió mantener un buen rendimiento de los frutales a un menor costo de producción. Según Osorio (2013), ante mercados más exigentes, reducir la huella hídrica podría significar una ventaja comparativa respecto a otros productores de fruta, lo que añadiría un valor adicional a los resultados encontrados por Lecaros (2018).

Por otro lado, Küçükyumuk et al. (2020) estudiaron durante tres años los efectos del riego deficitario controlado en árboles de manzano Braeburn de 10 años injertados en patrón enanizante M9. Se investigaron 6 tratamientos de riego, de los cuales, uno no consideraba déficit de riego, otro implicaba un déficit continuo a lo largo de toda la temporada y, en los cuatro restantes, el déficit de riego se aplicó en ciertas etapas fenológicas. Los autores concluyeron que el mayor rendimiento de frutos se obtuvo en el tratamiento cuyo déficit de riego fue entre 40 a 70 días después de plena floración. Este resultado se mantuvo en las tres temporadas y permitió ahorros de agua entre el 13 % y el 15 %. En contraste, Küçükyumuk et al. (2012) evaluaron cuatro estrategias de riego con aplicaciones de agua basadas en variaciones del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) en manzanos de variedad Starkrimson Delicious de 20 años. En su investigación encontraron que el comportamiento del tamaño y peso de la fruta respecto de la cantidad de agua aplicada varió entre las dos temporadas. En la primera temporada, el mayor peso y tamaño de la fruta se obtuvo al aplicar el segundo tratamiento que más volumen de agua aplicada consideraba ( $K_c$  igual a 1,00); en cambio, en la segunda temporada, los mejores resultados se alcanzaron con el mayor volumen de agua aplicada ( $K_c$  igual a 1,25).

Por esta razón, diferentes estudios señalan la importancia de llevar a cabo pruebas a largo plazo que permitan entender los efectos acumulativos que tienen los regímenes de riego (Silveira et al., 2020).

El objetivo de este trabajo es analizar una metodología de manejo del riego basada en la estimación de un volumen teórico de agua requerido por dos huertos comerciales de manzanos y compararla con un método o protocolo predial tradicional no tecnificado basado en la aplicación de una lámina neta fija de riego o en la estimación visual y táctil de la humedad de suelo en dos variedades, Royal Gala y Brookfield Gala, a lo largo de dos temporadas continuas, en términos de volumen de agua aplicada, estatus hídrico de la planta, producción y calidad de fruto.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Analizar el impacto de dos estrategias de manejo y aplicación de agua en la calidad y producción de manzanos “Brookfield Gala” y “Royal Gala” en dos huertos comerciales del centro-sur de Chile, regados con goteo y microjet, respectivamente, durante dos temporadas consecutivas.

### **Objetivos específicos**

- Evaluar el efecto de dos estrategias de manejo de agua y frecuencia de riego en el rendimiento y crecimiento de frutos, y estatus hídrico de planta.
- Determinar el comportamiento de la humedad en el perfil de suelo para ambos manejos de aplicación de agua.
- Determinar el gasto energético de ambas metodologías de manejo de riego.
- Comparar los índices de producción resultantes de cada tratamiento aplicado.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

En este trabajo se evaluó dos alternativas para el manejo de aplicación del agua de riego (volumen de demanda teórico de la planta vs. el protocolo predial) en manzanos de las variedades Royal Gala y Brookfield Gala, en dos localidades del centro-sur de Chile, a lo largo de dos temporadas (2008/09 y 2009/10). El análisis de ambas alternativas de riego se materializó evaluando el rendimiento de los frutales y la calidad de fruta obtenida. Los datos experimentales fueron extraídos de los Proyectos de Título presentados por Salinas (2009), Manríquez (2010), Quiroz (2011) y Ascui (2012). La ubicación del área de estudio, los materiales empleados, las mediciones experimentales y las técnicas de análisis estadístico que se aplicarán, se abordan en las siguientes secciones de este capítulo.

### **Área de estudio**

En la Figura 1 se muestra la ubicación de los predios en los que tuvo lugar este estudio, ambas propiedades de la empresa Copefrut S.A. La Tabla 1 muestra los antecedentes generales de cada predio para ambas variedades de manzanas e indicadores climáticos de cada sector.

El fundo “Santa Eugenia” se encuentra en el sector “La Viña”, ubicado a 4,5 km al suroeste de Longaví, camino Los Cristales (Latitud 36°0’7,49” S y Longitud 71°40’10,83” O). En este predio se utilizó como unidad experimental un huerto comercial de manzano “Royal Gala” de 6,0 ha, establecido el año 2000 (10 años de edad) injertados sobre patrón M.26 con un marco de plantación de 4,0 m x 1,5 m. El clima predominante del sector es mediterráneo templado con veranos calurosos y secos e inviernos frescos y húmedos. La plantación se encuentra en un suelo de origen aluvial mezclado con cenizas volcánicas (Inceptisol). De textura franco y color negro a gris oscuro en la superficie y de textura franco a color pardo oscuro en profundidad. Presenta pedregosidad superficial ligera, de topografía casi plana.



**Figura 1.** Ubicación de los predios Fundo “Santa Eugenia” y Huerto “La Capilla”, propiedad de la empresa Copefrut S.A. Fuente: Elaboración propia.

Las precipitaciones promedias anuales para esta zona son superiores a los 700 mm año<sup>-1</sup>, con una evapotranspiración de referencia anual cercana a los 1.300 mm año<sup>-1</sup>. Las Figuras D-1 y D-2 del apéndice D muestran las precipitaciones registradas en la estación meteorológica Liguay en Longaví (Red Hidrométrica Nacional de la DGA), ubicada a 6 km del predio, en los períodos correspondientes a las temporadas 2008-2009 y 2009-2010, respectivamente.

El Huerto “La Capilla” está situado en Coihue, comuna de Negrete. La variedad de manzana es Brookfield Gala, injertados en un patrón enanizante M-9, plantado el año 2006 (4 años de edad), con un marco de plantación de 3,5 m x 1,2 m y una superficie de 22,1 ha. El clima de la zona presenta característica de transición entre mediterráneo y templado húmedo.

**Tabla 1.** Antecedentes generales y características climáticas de ambos predios en estudio.

	<b>Predio</b>	
	<b>Fundo “Santa Eugenia”</b>	<b>Huerto “La Capilla”</b>
<b>Variedad de manzana</b>	Royal Gala	Brookfield Gala
<b>Región</b>	Maule	Biobío
<b>Provincia</b>	Linares	Biobío
<b>Comuna</b>	Longaví	Negrete
<b>Superficie huerto (ha)</b>	6,0	22,1
<b>Marco de plantación</b>	4,0 m x 1,5 m	3,5 m x 1,2 m
<b>Año de plantación</b>	2000	2006
<b><math>ET_0</math> anual (mm año<sup>-1</sup>)</b>	1.297	1.175
<b>Precipitación promedio anual 2008-2010 (mm año<sup>-1</sup>)</b>	779	1.341

$ET_0$ : Evapotranspiración estándar de referencia. Fuente: Elaboración propia.

El suelo del Huerto La Capilla es aluvial de posición baja, con una topografía plana uniforme a ligeramente ondulada, en planos depositacionales, terrazas recientes y valles entre montañas; compuesto de arenas profundas de composición volcánica mixta (complejo Palixeralfs e Inceptisol). Presenta un tipo de textura media; una fase de buen drenaje con una fase de erosión moderada. Se encuentra formando complejos con los suelos de las series Human y Mirador.

Las Figuras D-3 y D-4 del apéndice D muestran las precipitaciones registradas en la estación meteorológica de Mulchén (Red Hidrométrica Nacional de la DGA), ubicada a 35 km del predio, en los períodos correspondientes a las temporadas 2008-2009 y 2009-2010, respectivamente.

## Diseño experimental

Los estudios se llevaron a cabo en árboles de manzano de las variedades Brookfield Gala y Royal Gala en dos temporadas continuas: 2008–2009 y 2009–2010. Para cada variedad y temporada se evaluó dos tratamientos de riego: riego programado de acuerdo con el volumen teórico requerido por la planta (T1) y manejo actual a cargo del productor de acuerdo con un protocolo predial (T2). La Tabla 2 muestra las características de ambas alternativas de tratamiento (T1 y T2).

El diseño experimental en cada temporada y variedad de manzano fue de bloques al azar con 4 réplicas. Las variables de respuesta (parámetros de rendimiento y calidad del fruto, y potencial hídrico de la planta) fueron sometidas a un análisis de varianza ANOVA con un nivel de significancia del 5 % para detectar diferencias entre las medias de cada tratamiento.

**Tabla 2.** Comparación de las características de los dos tratamientos de riego evaluados según variedad de manzano.

Variedad	Método de riego	T1 (Riego programado)	T2 (Protocolo predial)
Royal Gala	Microaspersión	Corresponde a la aplicación de agua a partir del cálculo de un volumen teórico de agua requerido, que considera la evaporación de bandeja acumulada de tres días anteriores al riego y la capacidad de retención de agua del suelo. Frecuencia de riego cada 3 días a través de la temporada.	Corresponde a la aplicación de una lámina neta fija de reposición de 28 mm riego <sup>-1</sup> , con frecuencia de riego variable a través de la temporada (noviembre y marzo cada 6 días, diciembre y febrero cada 5 días y enero cada 3 días).
Brookfield Gala	Goteo	Corresponde a la aplicación de agua a partir del cálculo de un volumen teórico de agua requerido, que considera la evapotranspiración estándar de referencia de la semana anterior y la capacidad de retención de agua del suelo. Frecuencia de riego variable de 1 a 3 días a través de la temporada.	El encargado de riego estima el contenido de humedad en el suelo al tacto, y repone el agua evapotranspirada desde el último riego a niveles no parametrizados de frecuencia de riego y altura de agua a aplicar.

Fuente: Elaboración propia.

Para manzanos “Royal Gala” se emplearon 6 árboles por réplica como unidad experimental; esto es 48 árboles en total (24 para cada tratamiento). El método de riego empleado fue microaspersión, con emisores distribuidos cada 3 metros por hilera, lo que da un total de 0,5 emisores por árbol. Cada emisor entregó un caudal promedio de 33 L h<sup>-1</sup>.

En manzanos “Brookfield Gala” se utilizaron 6 árboles por réplica como unidad experimental para la temporada 2008–2009 y 7 árboles por réplica para la temporada 2009–2010. En total, se estudiaron 48 árboles en la temporada 2008–2009 y 56 árboles en la temporada 2009–2010. El método de riego empleado fue por goteo. Se dispusieron dos laterales por hilera de plantación, separados a 0,6 m uno del otro, con emisores distanciados a 0,5 m en el lateral, lo que da 4,8 goteros por árbol y un caudal promedio de 2 L h<sup>-1</sup> por gotero.

## **Volumen aplicado de agua**

### ***Volumen teórico de agua requerido por la planta***

La expresión para determinar el volumen teórico de agua requerido por el frutal en T1 se muestra en la Ecuación 1 (Holzapfel et al., 2004) y permite estimar el requerimiento de agua de riego a partir de la evapotranspiración estándar de referencia ( $ET_0$ ). La relación puede adaptarse para otros frutales o variedades modificando el factor  $F_c$ :

$$V_{tr} = (D_h D_e) \left[ \frac{ET_0 \cdot F_c}{\left(\frac{EDT}{100}\right)} \right] \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde  $V_{tr}$  es el volumen de agua teórico requerido por la planta (L árbol<sup>-1</sup>),  $D_h$  es la distancia entre hileras (m),  $D_e$  la distancia entre árboles dentro de la hilera (m),  $ET_0$  la evapotranspiración estándar de referencia acumulada a partir del último riego,  $F_c$  es el factor de corrección, y  $EDT$  la eficiencia de distribución total (95 %).

$ET_0$  fue determinada a partir del modelo de Penman-Monteith (FAO 56 P-M) (Allen et al., 1998) para “Brookfield Gala” con información meteorológica de la semana anterior, y a partir de la evaporación de bandeja clase A de los tres días anteriores al riego para “Royal Gala”:

$$ET_0 = K_b E_b \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde  $E_b$  es la evaporación de bandeja acumulada de tres días (mm) y  $K_b$  el coeficiente de bandeja (0,80 para la temporada).

El factor  $F_c$  es dependiente de los sistemas de irrigación utilizados, el tipo y tamaño de la plantación, la densidad del cultivo y el clima del área. Como se muestra en la Ecuación 3, este factor se obtiene a través de una relación lineal con  $P$  (fracción de sombreado al medio día) y con las constantes  $K_1$  y  $K_2$  obtenidas mediante un análisis de regresión (Holzapfel et al., 2004). En la Tabla 3 se muestran los parámetros  $K_1$ ,  $K_2$  y  $P$  que fueron utilizados para cada temporada y variedad de manzana.

$$F_c = K_1 P + K_2 \quad (\text{Ecuación 3})$$

El tiempo de riego ( $TR$ ) se obtiene a partir de la Ecuación 4, en la que  $Q$  es el caudal del emisor ( $L h^{-1} \text{ emisor}^{-1}$ );  $n$  es el número de emisores por planta (emisores árbol<sup>-1</sup>); y  $V_{tr}$  corresponde al volumen teórico de agua requerido por la planta ( $L \text{ árbol}^{-1}$ ).

$$TR = \frac{V_{tr}}{n Q} \quad (\text{Ecuación 4})$$

**Tabla 3.** Parámetros del factor de corrección,  $F_c$ , para las temporadas 2008–2009 y 2009–2010 de plantas de manzanos de variedades Royal Gala y Brookfield Gala.

Parámetros	Royal Gala		Brookfield Gala	
	Temporada	Temporada	Temporada	Temporada
	2008–2009	2009–2010	2008–2009	2009–2010
$K_1$	1,28	1,28	1,54	1,54
$K_2$	0,11	0,11	0,11	0,11
$P$	0,70	0,70	0,45	0,46

$K_1$ ,  $K_2$ : constantes de la correlación lineal;  $P$ : fracción de sombra. Fuente: Elaboración propia.

### ***Volumen de agua aplicado a manzanos de variedad Royal Gala***

En la Tabla 4 se entrega un resumen de las estrategias de riego para cada tratamiento y temporada en manzanos de variedad Royal Gala. En cuanto al tratamiento T1 (riego programado), el volumen de agua a aplicar en ambas temporadas se determinó basándose en la expresión que se muestra en la Ecuación 1. La frecuencia de riego en las dos temporadas fue de 3 días y el tiempo de riego se estimó teóricamente con la Ecuación 4.

El tiempo de riego en el tratamiento T2 (protocolo predial) fue de 10 h y la frecuencia de riego variable entre 3 a 6 días en ambas temporadas (noviembre y marzo cada 6 días, diciembre y febrero cada 5 días y enero cada 3 días), considerando una lámina neta fija de reposición de 28 mm riego<sup>-1</sup>.

### ***Volumen de agua aplicado a manzanos de variedad Brookfield Gala***

En la Tabla 5 se exhibe un resumen de las estrategias para cada tratamiento y temporada. Para el tratamiento T1 (riego programado), el volumen de agua aplicada en ambas temporadas se determinó basándose en la expresión que se muestra en la Ecuación 1. Asimismo, en ambas temporadas el tiempo de riego se fijó teóricamente de acuerdo con la Ecuación 4 y la frecuencia de riego se definió a partir del rango de evapotranspiración estándar de referencia de la semana anterior, de acuerdo con la Tabla 6.

**Tabla 4.** Comparación de las estrategias de riego para un huerto comercial de manzano, variedad Royal Gala, en las temporadas 2008–2009 y 2009–2010.

	2008–2009		2009–2010	
	T1	T2	T1	T2
<b>Frecuencia de riego (d)</b>	3	3 a 6	3	3 a 6
<b>Tiempo de riego (h)</b>	Variable (Ec. 4)	10	Variable (Ec. 4)	10

T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. Tratamiento 2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 5.** Comparación de las características del riego para un huerto comercial de manzano, variedad Brookfield Gala en las temporadas 2008–2009 y 2009–2010.

	2008–2009		2009–2010	
	T1	T2	T1	T2
<b>Frecuencia de riego (d)</b>	1 – 3	1 – 3	1 – 3	1 – 3
<b>Tiempo de riego (h)</b>	Variable (Ec. 4)	4 – 8	Variable (Ec. 4)	3 – 6

T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6.** Rango de evapotranspiración estándar de referencia ( $ET_0$ ) de la semana anterior y frecuencia de riego establecida para el T1, variedad Brookfield Gala en las temporadas 2008–2009 y 2009–2010.

$ET_0$ (mm día <sup>-1</sup> )	Frecuencia de riego (d)
1 – 3	3
3 – 5	2
5 – 7	1

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en el tratamiento T2 (protocolo predial), el volumen de agua aplicada estuvo determinada por la frecuencia de riego asignada acorde al criterio del agricultor y del asesor técnico del predio. Esta frecuencia se determinaba en base a inspecciones semanales de calicatas en el huerto, realizadas por el asesor del predio, quien evaluaba al tacto el nivel de agotamiento de agua en el perfil del suelo, lo que daba como resultado una recomendación de frecuencia de riego de entre 1 a 3 días y un tiempo de riego variable de 4 a 8 horas (2008-2009) y 3 a 6 horas (2009-2010).

### Costo de la energía eléctrica

El costo de energía eléctrica se determinó en base a la potencia consumida por la electrobomba, el tiempo de riego en toda la temporada y la tarifa contratada por el huerto.

En manzanos de variedad Royal Gala se empleó una bomba marca Vogt, modelo 630 con motor trifásico de 30,0 kW en ambas temporadas, y en manzanos de

variedad Brookfield Gala se utilizó una bomba con motor trifásico de potencia de 37,3 kW para la temporada 2008-2009 y 35,8 kW para la temporada 2009-2010. La superficie comercial fue de 6 ha en manzanos de variedad Royal Gala y 22,1 ha en manzanos de variedad Brookfield Gala (Tabla C-2).

La tarifa contratada es AT 4.3 y comprende un cargo por energía consumida, cargo fijo mensual, cargo por demanda máxima de potencia leída en horas de punta y cargo por demanda máxima de potencia suministrada. Sin embargo, para efectos de comparación, en este trabajo solo se tomó en cuenta el cargo por energía consumida (0,027 UF por kWh), considerando los valores publicados por la empresa Frontel para el año 2015.

El consumo eléctrico (kWh temporada<sup>-1</sup>) se obtuvo al multiplicar el tiempo total de riego en la temporada por la potencia del motor de la bomba, y el costo total de la energía eléctrica (UF temporada<sup>-1</sup>) se determinó multiplicando el consumo eléctrico por la tarifa.

### **Propiedades físico-hídricas del suelo**

El análisis de los parámetros del suelo se realizó en el Laboratorio de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola. Se determinó la capacidad de campo ( $\theta_{cc}$ ) y punto de marchitez permanente ( $\theta_{PMP}$ ) mediante el método de la olla a presión a energías de retención de 10 J kg<sup>-1</sup> (Huerto La Capilla), 33 J kg<sup>-1</sup> (Fundo Santa Eugenia) y 1500 J kg<sup>-1</sup> para ambos predios (Klute, 1986).

El análisis textural del suelo se realizó con el método del hidrómetro de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962) de acuerdo con el sistema internacional (SI), y la densidad aparente ( $\rho_a$ ) mediante el método del terrón (Blake y Hartge, 1986), para tres estratas de suelo (0-30, 30-60 y 60-90 cm) con la variedad Royal Gala y cuatro estratas de suelo (0-30, 30-60, 60-90 y 90-120 cm) con la variedad Brookfield Gala. En la Tabla 7 se muestran los resultados de estos parámetros en el Fundo Santa Eugenia (variedad Royal Gala), y en la Tabla 8 los parámetros del predio Huerto La Capilla (variedad Brookfield Gala).

**Tabla 7.** Contenido de humedad del suelo a capacidad de campo ( $\theta_{CC}$ ), punto de marchitez permanente ( $\theta_{PMP}$ ), correspondientes a energías de retención de 33 J kg<sup>-1</sup> y 1500 J kg<sup>-1</sup>, respectivamente; densidad aparente de suelo ( $\rho_a$ ) y textura para tres estratas de suelo con manzano de variedad Royal Gala.

Profundidad (cm)	$\theta_{CC}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$\theta_{PMP}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$\rho_a$ (Mg m <sup>-3</sup> )	Textura (SI)
0-30	0,36	0,20	1,53	Franco
30-60	0,37	0,22	1,50	Franco
60-90	0,37	0,22	1,53	Franco-arenoso

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 8.** Contenido de humedad del suelo a capacidad de campo ( $\theta_{CC}$ ), punto de marchitez permanente ( $\theta_{PMP}$ ), correspondientes a energías de retención de 10 J kg<sup>-1</sup> y 1500 J kg<sup>-1</sup>, respectivamente; densidad aparente de suelo ( $\rho_a$ ) y textura para cuatro estratas de suelo con manzano de variedad Brookfield Gala.

Profundidad (cm)	$\theta_{CC}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$\theta_{PMP}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$\rho_a$ (Mg m <sup>-3</sup> )	Textura (SI)
0-30	0,44	0,20	1,19	Franco-arcilloso-arenoso
30-60	0,41	0,21	1,10	Franco-arcilloso-arenoso
60-90	0,40	0,23	1,08	Franco-arcilloso-arenoso
90-120	0,39	0,22	1,10	Franco-arenoso

Fuente: Elaboración propia.

## Humedad de suelo y potencial hídrico de la planta

### *Contenido de humedad del suelo*

En manzanos de variedad Royal Gala, se utilizó un neutrómetro Troxler (Troxler Electronic Laboratories, 4302, USA) para la determinación del contenido de humedad del suelo. La disposición de los tubos de acceso de aluminio del neutrómetro se exhibe en la Figura 2a. Las lecturas se realizaron a profundidades que comprenden las estratas de 0-30, 30-60 y 60-90 cm. En manzanos de variedad Brookfield Gala, se utilizó un neutrómetro Campbell (Campbell Pacific Nuclear, 503-DR Hydroprobe, USA) para la medición del contenido de humedad de suelo. La disposición de los tubos de acceso de aluminio se muestra en la Figura 2b. Las mediciones se realizaron en las estratas 0-30, 30-60, 60-90 y 90-120 cm de profundidad. Para ambas variedades se midió la humedad del suelo antes y después del riego, siguiendo el mismo procedimiento en ambas temporadas.



### ***Rendimiento y calidad de frutos***

En manzanos de variedad Royal Gala, la cosecha de frutos en la temporada 2008-2009 comenzó en la primera semana de febrero de 2009 y, en la temporada 2009-2010, la cosecha se inició la última semana de febrero de 2010. En manzanos de variedad Brookfield Gala, la cosecha en la temporada 2008-2009 comenzó en la segunda semana de febrero de 2009 y, durante la temporada 2009-2010, la cosecha se llevó a cabo la tercera semana de febrero de 2010. En ambas variedades, después de la cosecha, se pesaron todos los frutos de los árboles de cada tratamiento para determinar el rendimiento por planta y luego el rendimiento por hectárea cultivada. Los parámetros de calidad determinados a la cosecha corresponden a diámetro ecuatorial de la fruta y peso. El diámetro ecuatorial del fruto se midió con un pie de metro manual y el peso con una balanza digital. A fin de contrastar el crecimiento de los frutos para cada tratamiento, se hizo un seguimiento semanal del diámetro ecuatorial de los frutos.

Adicionalmente, a la cosecha, se efectuó un conteo de todos los frutos de los árboles en estudio en manzanos de variedad Brookfield Gala y se determinó el número promedio de frutos por árbol para cada tratamiento. Respecto a la variedad Royal Gala, no se presentan resultados del número de frutos por árbol puesto que sus valores no fueron reportados por Salinas (2008) y Ascui (2012).

### **Análisis estadístico de los resultados**

Los datos experimentales para los parámetros de calidad y producción de la fruta (diámetro ecuatorial, peso del fruto, rendimiento de producción y número de frutos por árbol), así como el potencial hídrico de la planta, fueron extraídos desde las mediciones obtenidas por los autores de los Proyectos de Título sobre los cuales se basa este estudio: Salinas (2008), Manríquez (2010), Quiroz (2011) y Ascui (2012). Los datos de cada una de las variables de respuesta se sometieron a un análisis de varianza ANOVA de un factor con un nivel de significancia del 5 %, para determinar si existe alguna diferencia estadística entre las medias de los Tratamientos 1 y 2. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo en el software RStudio (Software libre).

## RESULTADOS

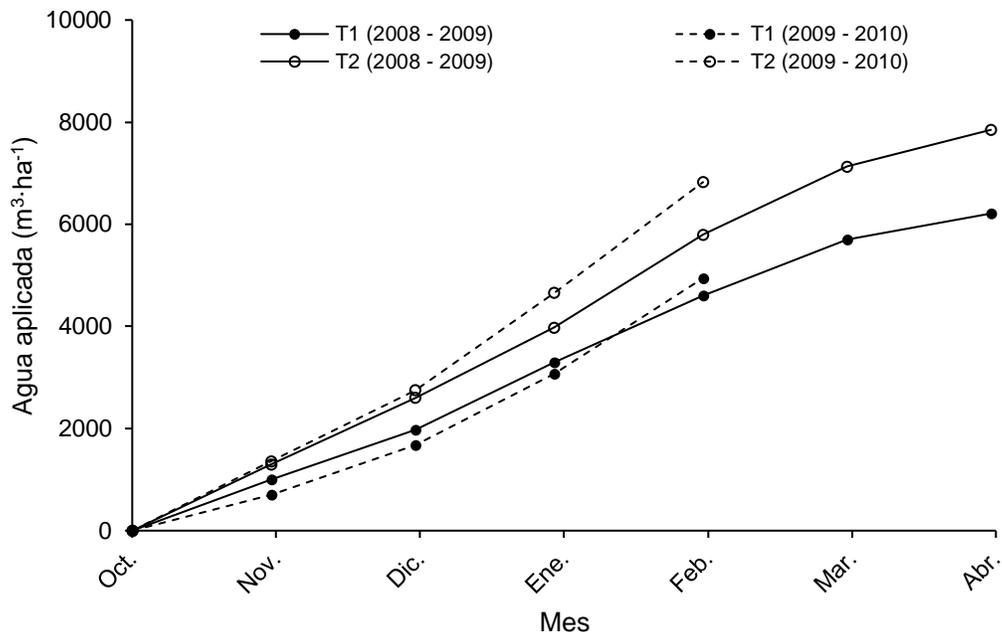
En este capítulo se exhiben los resultados de la comparación de dos estrategias de riego para manzanos de variedades Brookfield Gala y Royal Gala en dos temporadas (2008-2009 y 2009-2010). El volumen total de agua aplicada, así como los efectos del tratamiento y la temporada estudiada sobre la humedad del suelo, el estado hídrico de la planta y la producción y calidad de la fruta se presentan en las siguientes secciones.

### Agua aplicada

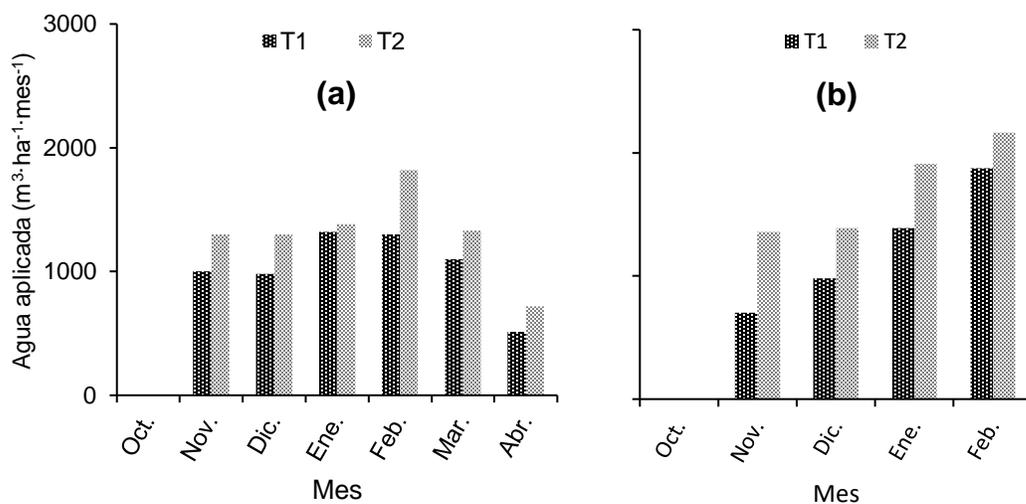
#### *Variedad Royal Gala*

Al final de las dos temporadas, el volumen de agua aplicado para los tratamientos T1 y T2 fue de  $6.211 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y  $7.850 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (temporada 2008-2009), y  $4.945 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y  $6.825 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (temporada 2009-2010), respectivamente (Figura 3).

Los niveles acumulados de aplicación de agua fueron similares en el tratamiento T1 para ambas temporadas. Sin embargo, en T2 se observaron diferencias entre temporadas a partir de enero. La mayor diferencia mensual entre los tratamientos T1 y T2 se observó en febrero para la temporada 2008-2009 (Figura 4a), alcanzando una diferencia de  $575 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$ , y en noviembre para la temporada 2009-2010 (Figura 4b), con una diferencia de  $660 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$ . La aplicación de agua en la temporada 2009-2010 se detuvo después del terremoto del 27 de febrero de 2010. Sin embargo, las diferencias de aplicación de agua entre ambos tratamientos al final de las dos temporadas se mantuvieron estables. Con ello, se consiguió un ahorro de agua de riego con T1 del 20,9 % en la temporada 2008-2009 y del 27,5 % en la temporada 2009-2010.



**Figura 3.** Agua aplicada acumulada, durante las temporadas de riego 2008-2009 y 2009-2010, para dos tratamientos de aplicación de agua a través de riego por microjet a manzanos de variedad Royal Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.

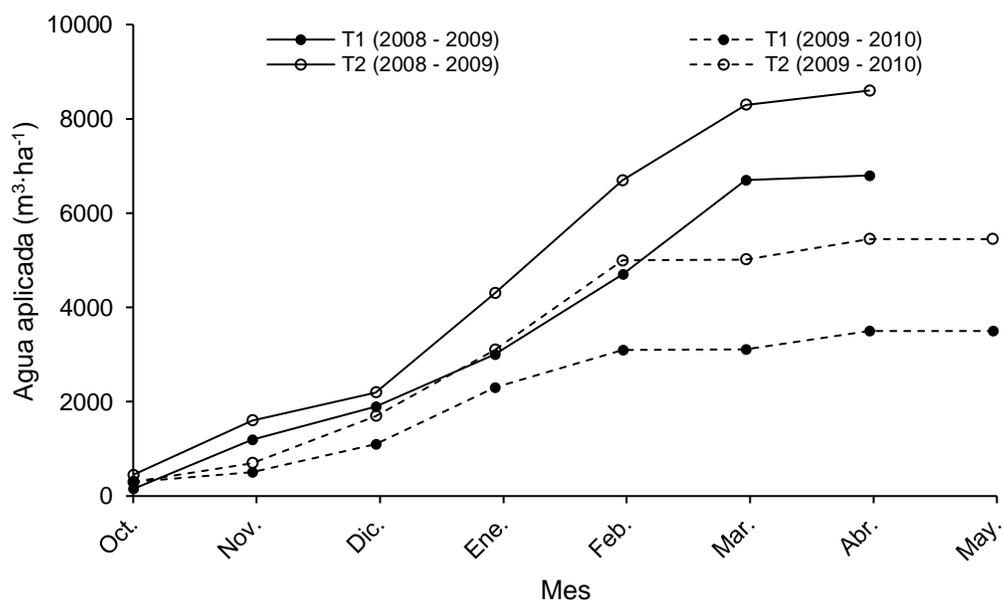


**Figura 4.** Volumen de agua aplicado mensualmente a manzanos de variedad Royal Gala en las temporadas (a) 2008-2009 y (b) 2009-2010. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.

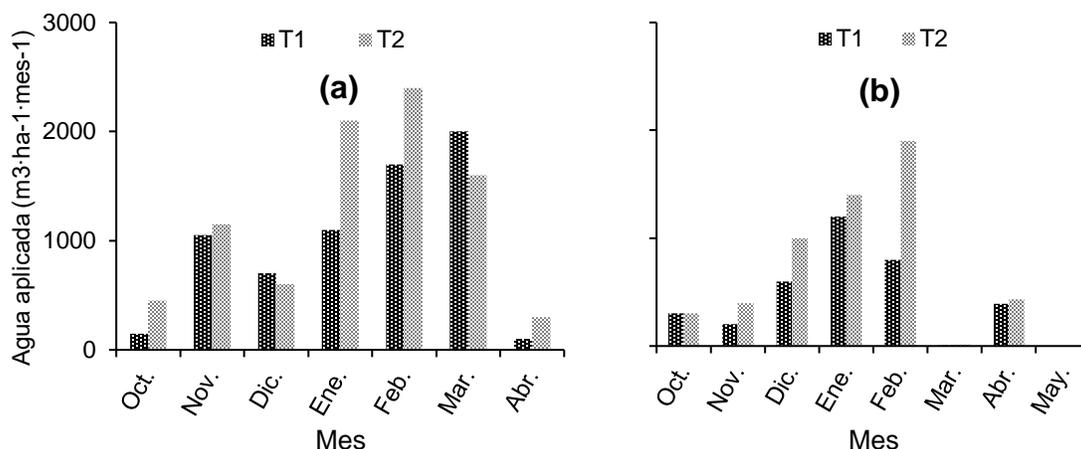
### Variedad Brookfield Gala

Al final de la temporada, el volumen de agua aplicado para los tratamientos T1 y T2 en la temporada 2008-2009 fue de  $6.800 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y  $8.600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (temporada 2008-2009), y  $3.500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y  $5.450 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (temporada 2009-2010), respectivamente (Figura 5).

Las diferencias observadas en el volumen total de agua aplicada entre tratamientos, implicó para el tratamiento T1 un 20,9 % de ahorro de agua respecto a T2 en la temporada 2008-2009, y un 35,8 % en la temporada 2009-2010. Como se observa en la Figura 6a y 6b, las mayores diferencias de agua aplicada mensualmente entre T1 y T2 se alcanzan en enero (2008-2009) y febrero (2009-2010). Al comparar ambas temporadas, la diferencia en el volumen de agua aplicado se acentúa en noviembre, debido a una menor aplicación de agua en la primera temporada 2009-2010 (Figura 6b), y luego en marzo, cuando no hubo aplicación de agua para ninguno de los dos tratamientos de la temporada 2009-2010 (Figura 6a y 6b). Esto último fue debido al terremoto que azotó la zona el 27 de febrero de 2010.



**Figura 5.** Agua aplicada acumulada durante las temporadas de riego 2008-2009 y 2009-2010, para dos tratamientos de aplicación de agua a través de riego por goteo a manzanos de variedad Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.** Volumen de agua aplicado mensualmente a manzanos de variedad Brookfield Gala en las temporadas (a) 2008-2009 y (b) 2009-2010. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.

En general, hubo similitudes en la aplicación del agua de riego en ambos predios, manteniéndose reducciones para el tratamiento T1 en el consumo de agua superiores al 20 %. En términos netos, ello supone un ahorro de 1.600 a 1.950 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> temporada en cada predio al final de cada temporada.

Zhong et al. (2019) investigaron ocho tratamientos con déficit de riego (leve, moderado y severo en distintas etapas del crecimiento del fruto), aplicados a manzanos (*Malus pumila Mill*) en el noroeste de China. En el esquema de riego tradicional emplearon 7.800 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de agua en toda la temporada. Los mejores rendimientos, dentro de los 7 tratamientos restantes, se obtuvieron al aplicar un déficit moderado de agua de riego (7.000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), lo que representó un ahorro final del 10%. El ahorro porcentual reportado por Zhong et al. (2019) es inferior a lo encontrado en el presente trabajo.

En relación con la magnitud de agua aplicada en T1, Lecaros (2018) estudió la aplicación de agua en manzanos de variedad Brookfield Gala basándose en la recomendación de una plataforma computacional en línea (AQUASAT), resultando un volumen total de agua aplicada en el trimestre enero-marzo entre 2.967 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> y 4.409 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Estos valores son similares a la cantidad agua aplicada en ambas temporadas en T1 si se considerara el volumen aplicado en el mismo trimestre. Por

otra parte, Solís (2010) evaluó cuatro niveles de reposición hídrica correspondientes al 50 %, al 67 %, al 100% y al 133 % de la  $ET_c$  en manzanos del cultivar Fuji en Chillán, Chile (ubicado a 60 km al sur del cultivo de manzanos “Royal Gala” y 130 km al norte del cultivo de manzanos “Brookfield Gala”, y con características climáticas similares). Las mejores respuestas se obtuvieron al aplicar una reposición de agua del 100 % de la  $ET_c$ , cuyo valor al final de la temporada correspondió a  $8.691 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Esta cantidad es superior al volumen de agua aplicado en ambas temporadas y variedades del presente estudio (Figura 3 y 5).

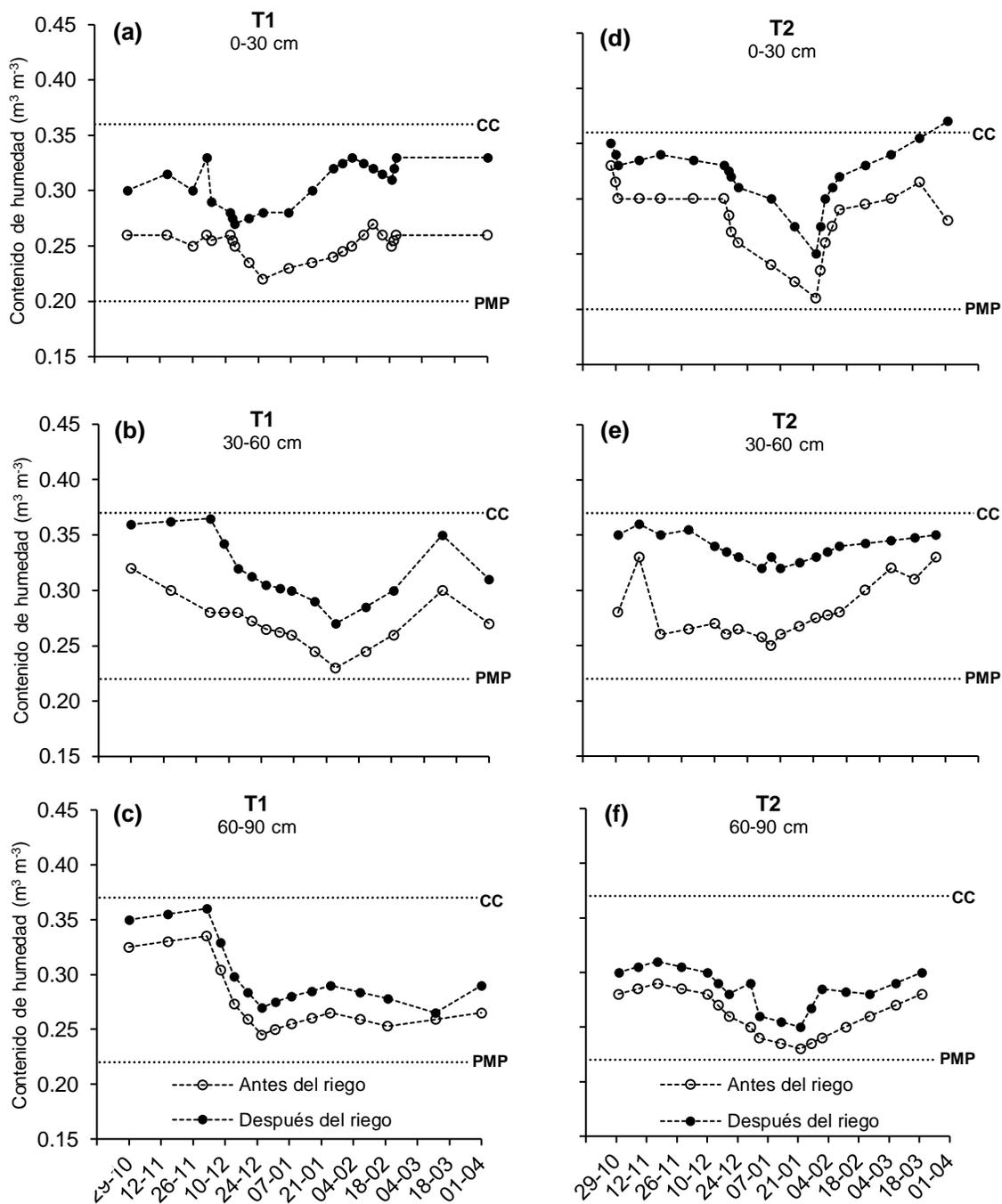
## **Contenido de humedad del suelo**

### ***Variedad Royal Gala***

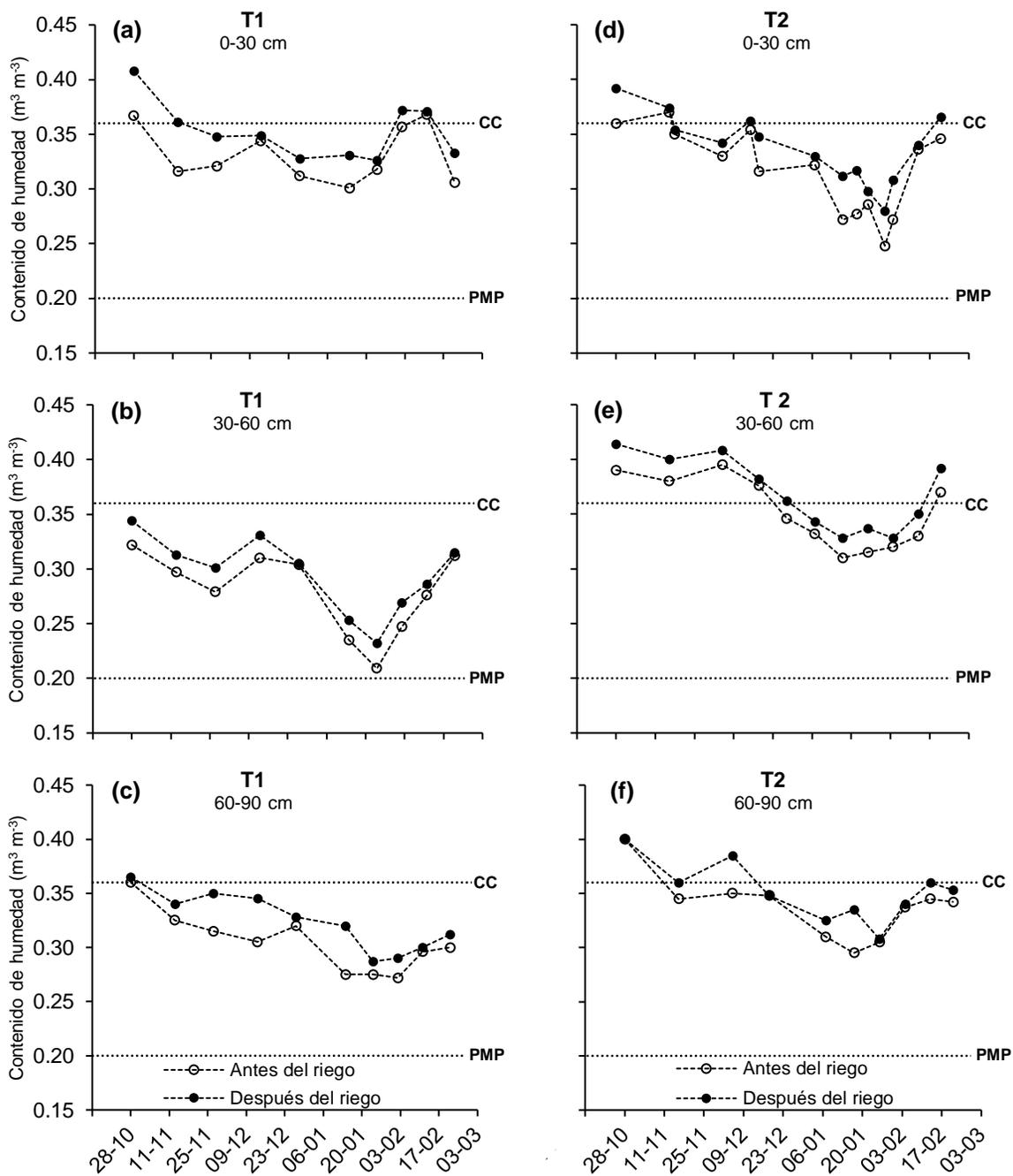
En general, la humedad del suelo se mantuvo en el rango de capacidad de campo y punto de marchitez permanente en ambas temporadas y tratamientos antes y después del riego, con tendencia a valores de humedad superiores para el tratamiento T2 (Figura 7 y 8).

Al inicio de la temporada 2008-2009, el suelo registra contenidos de humedad cercanos a capacidad de campo después del riego, producto de la baja demanda de agua de la atmósfera y menor desarrollo vegetativo de los árboles. Posteriormente, con el aumento de la actividad de las raíces y mayor demanda de agua de la vegetación, la extracción de agua desde el suelo se observa hasta las estratas más profundas.

Si bien se observaron humedades cercanas al punto de marchitez permanente en todas las estratas en ambos tratamientos antes del riego en la temporada 2008-2009, dicha situación fue puntual y se asocia a la alta evapotranspiración en el período de ocurrencia. Algunos estudios señalan que el sistema radical tiende a aprovechar la humedad disponible en las primeras estratas (0–60 cm). Gispert (2003), en estudios con olivos, encontró que un perfil húmedo de 60 cm de profundidad se considera suficiente para la extracción de agua en la zona de raíces que se encuentran activas.



**Figura 7.** Evolución del contenido promedio de humedad del suelo antes y un día después del riego en las estratas 0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm en la temporada 2008-2009 para dos tratamientos de riego por microjet en manzanos de variedad Royal Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Cada punto es promedio de 12 lecturas. CC es capacidad de campo y PMP es punto de marchitez permanente. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 8.** Evolución del contenido promedio de humedad del suelo antes y un día después del riego en las estratas 0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm en la temporada 2009-2010 para dos tratamientos de riego por microjet en manzanos de variedad Royal Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Cada punto es promedio de 12 lecturas. CC es capacidad de campo y PMP es punto de marchitez permanente. Fuente: Elaboración propia.

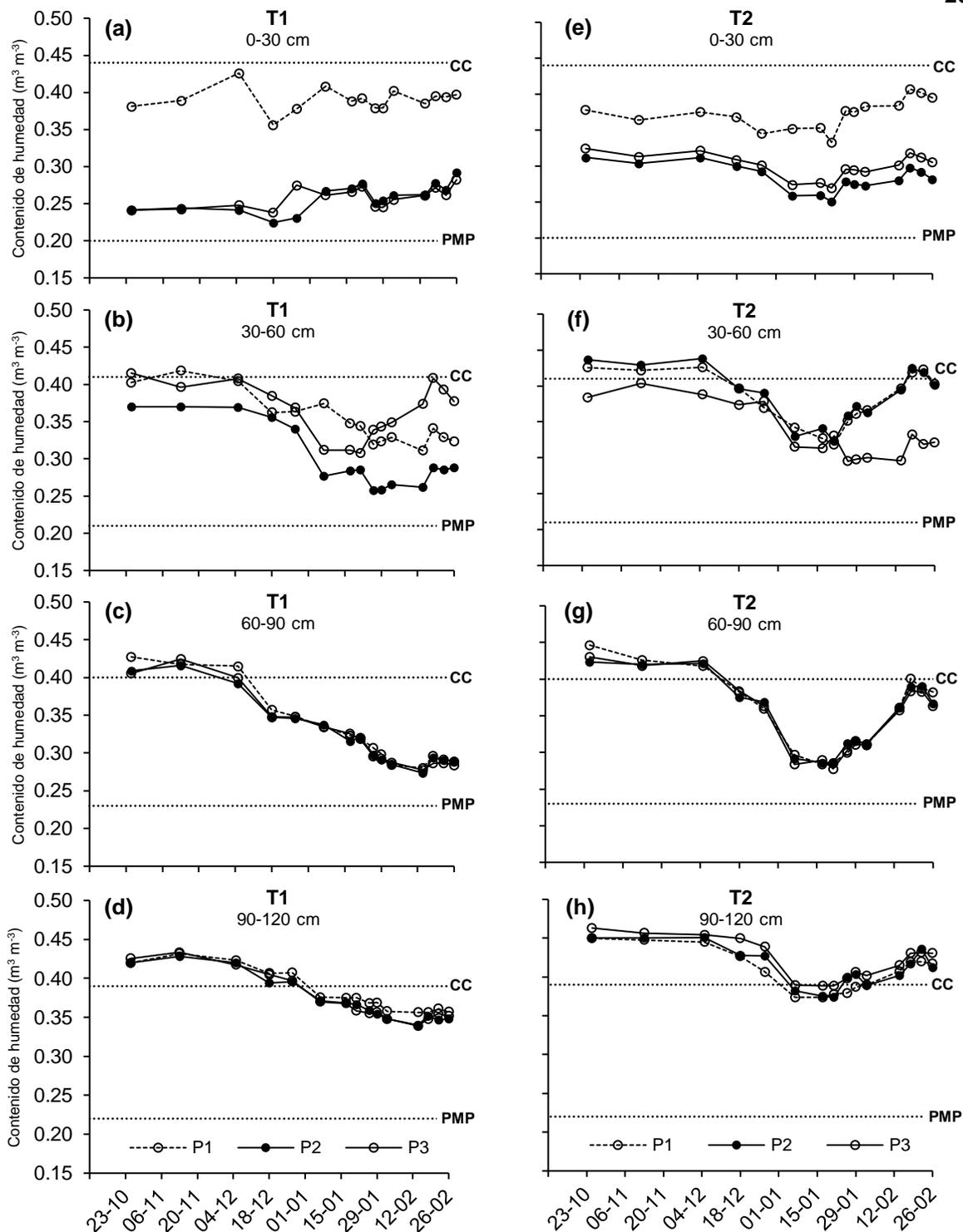
Por otro lado, Green y Clothier (1999) examinaron los patrones espaciales y temporales del consumo de agua en manzanos maduros (*Malus domestica* Borkh., 'Splendour') cerca de Palmerston North, Nueva Zelanda. En su estudio, encontraron que alrededor del 70 % del agua es aprovechada en los primeros 40 cm de profundidad, donde se concentra una mayor densidad de raíces finas.

Al igual que en la temporada 2008-2009, en la temporada 2009-2010 se observó en ambos tratamientos un contenido de humedad de suelo mayor tanto a inicios como a fines de la temporada de riego (Figura 8). Sin embargo, los contenidos de humedad alcanzados en esta temporada fueron superiores a los de la temporada 2008-2009 y estuvieron cercanos o superiores a capacidad de campo, preferentemente en T2. Esta situación puede explicarse, además de lo expresado para la temporada anterior, por la ocurrencia de lluvias a inicios de la temporada 2009-2010 (9,5 mm en octubre y 27,5 mm en noviembre) (Figura D-2 del Apéndice D)

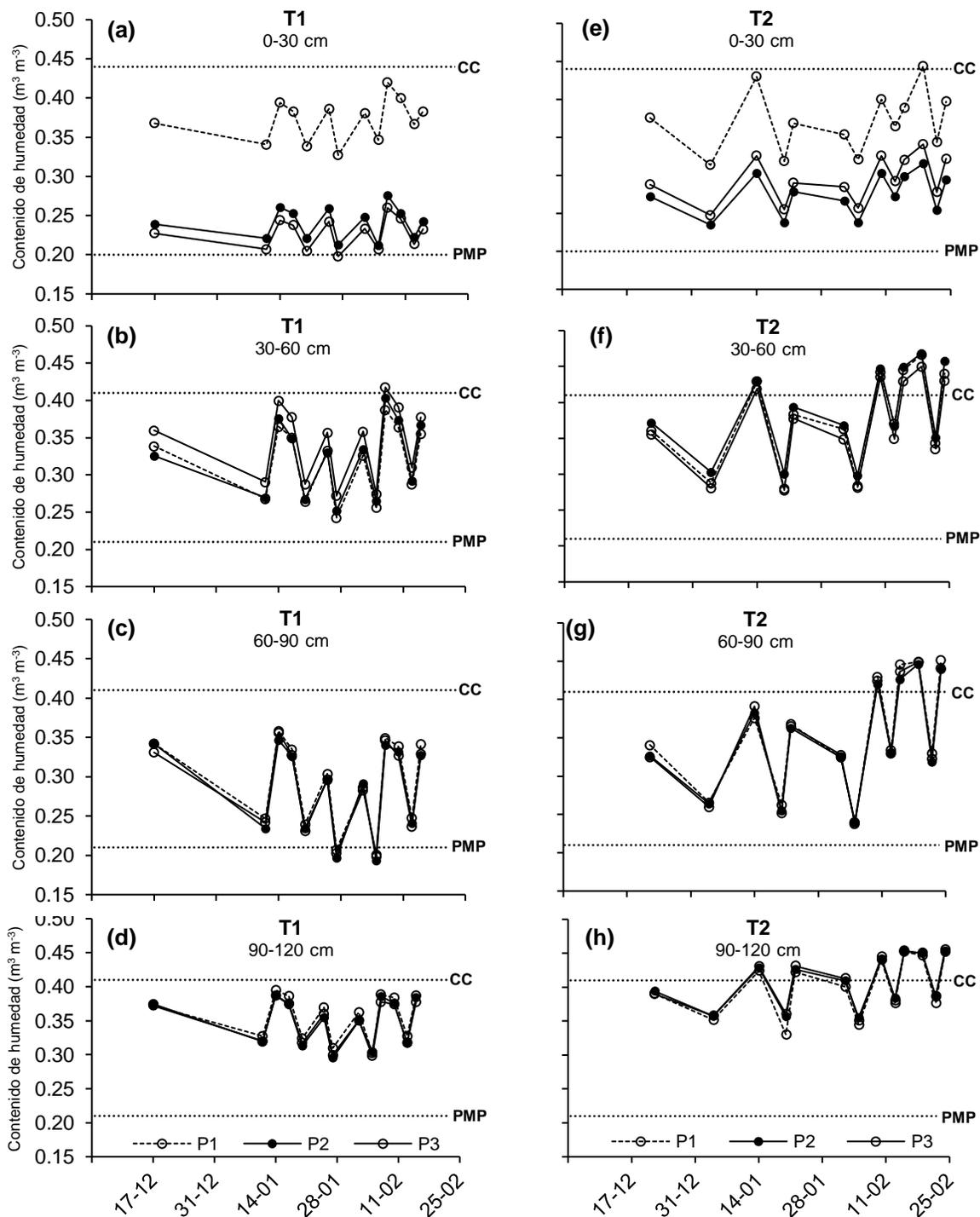
### ***Variedad Brookfield Gala***

Durante la temporada 2008-2009, la evolución del contenido de humedad en las estratas 0-30 y 30-60 cm se mantuvo entre CC y PMP en todas las fechas expuestas (Figura 9). Sin embargo, se observó un aumento en el contenido de humedad hacia las estratas más profundas, en donde a 90-120 cm la humedad del suelo se mantuvo cercana a CC por un periodo de tiempo más extenso, lo que indicaría que a los 90-120 cm la actividad extractiva de agua por parte de las raíces sería reducida.

Hasta enero, el tratamiento T2 exhibió un perfil de humedad similar al observado en el tratamiento T1, con un aumento progresivo de la humedad en las estratas más profundas. Sin embargo, durante febrero, el contenido de humedad en estas estratas en el tratamiento T1 disminuyó hasta ubicarse entre CC y PMP, y el T2 registró una tendencia a contenidos de humedad superiores a CC en todo el perfil del suelo.



**Figura 9.** Evolución del contenido promedio de humedad del suelo antes del riego en las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm en la temporada 2008-2009 para dos tratamientos de riego por goteo en manzanos de variedad Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Cada punto es promedio de 12 lecturas. CC es capacidad de campo y PMP es punto de marchitez permanente. Los puntos de medición del contenido de humedad son P1: a 60 cm del tronco entre hileras, P2: a 30 cm del tronco dentro de la hilera y P3: a 60 cm del tronco dentro de la hilera. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 10.** Evolución del contenido promedio de humedad del suelo antes de riego en las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm en la temporada 2009-2010 para dos tratamientos de riego por goteo en manzanos de variedad Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Cada punto es promedio de 12 lecturas. CC es capacidad de campo y PMP es punto de marchitez permanente. Los puntos de medición del contenido de humedad son P1: a 60 cm del tronco entre hileras, P2: a 30 cm del tronco dentro de la hilera y P3: a 60 cm del tronco dentro de la hilera. Fuente: Elaboración propia.

En la temporada 2009-2010 el contenido de humedad en T1 se mantuvo dentro de CC y PMP y sus valores fueron inferiores a los del tratamiento T2 en todo el período. Además, similar a lo registrado en la temporada anterior, el contenido de humedad en T2 a finales de la temporada (febrero) se incrementó hasta niveles superiores a CC.

Girona (2007) estudió la distribución del contenido de humedad en el suelo en una parcela de manzano adulto en plena producción (de 5 años al inicio del ensayo), donde la variedad principal era Golden Smoothie injertado en patrón enanizante M-9 y polinizador Royal Gala. Encontró que, a profundidades entre 30 y 60 cm, el contenido de humedad es bajo y luego aumenta a partir de los 70 cm. Además, Green y Clothier (1999) examinaron los patrones espaciales y temporales del consumo de agua en manzanos maduros de 14 años (*Malus domestica* Borkh. cv. Splendour sobre portainjerto MM.106) cerca de Palmerston North, Nueva Zelanda. En su estudio, encontraron que alrededor del 70 % del agua es aprovechada en los primeros 40 cm de profundidad, donde se concentra una mayor densidad de raíces finas. Lo expresado permitiría demostrar el reducido desarrollo que tiene el sistema radical, el que extrae preferentemente la humedad superficial y explicaría los resultados observados de mayor humedad del suelo para ambos tratamientos las estratas de suelo más profundas. Del mismo modo, la evolución de humedad de suelo monitoreada a 60 cm desde el tronco entre hileras se explicaría por la escasa presencia de raíces absorbentes en los primeros 30 cm de profundidad de suelo a dicha distancia.

En general, las raíces tienden a desarrollarse superficialmente cuando el cultivo no se somete a limitaciones de agua de riego, por lo que habrá un mayor contenido de humedad a mayor profundidad. En contraparte, los cultivos sometidos a déficit presentan un crecimiento vertical y pueden aprovechar el agua de las estratas inferiores, lo que se expresa en disminuciones significativas del contenido de humedad del suelo a mayor profundidad (Sampathkumar et al., 2012; Sokalska et al., 2009).

Algunos autores han encontrado que el exceso de humedad en el suelo, como en el caso del T2, no conduce, necesariamente, a mejores características de calidad del fruto. Leib et al. (2006) compararon el efecto del riego deficitario y riego parcial de la raíz versus una estrategia de control sobre la calidad del fruto en manzanos Fuji (*Malus domestica* Borkh. c.v. Fuji) de 6 años de edad, en tres temporadas continuas. En el método de control se aplicó agua mediante microaspersión para mantener la humedad del suelo cercana al nivel de capacidad de campo ( $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) en la estrata 90-120 cm. En las otras dos estrategias de riego se aplicaron láminas de riego entre el 35 % y el 50 % inferiores respecto del método de control y la humedad del suelo llegó por debajo de  $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  y sobre el punto de marchitez permanente ( $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). No se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en el peso y tamaño del fruto al final de las tres temporadas en ninguno de los tres tratamientos.

## **Potencial hídrico en la hoja**

### ***Variedad Royal Gala***

En la Figura 11 se muestra el potencial hídrico de la hoja ( $\Psi_H$ ) a lo largo del día en tres fechas seleccionadas para las temporadas 2008-2009 y 2009-2010. En todos los casos, el potencial hídrico varió entre  $-0,5 \text{ MPa}$  y  $-1,8 \text{ MPa}$  a lo largo del día. No se observaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) de potencial hídrico entre ambos tratamientos de riego para ninguno de los casos analizados. En efecto, los resultados indican un comportamiento similar a lo largo del día para los dos tratamientos.

Si bien los resultados en el contenido de humedad del suelo evidenciaron un acercamiento hacia valores de PMP en ambos tratamientos y temporadas en el mes de enero (Figura 7 y 8), ello no se manifiesta en los resultados del potencial hídrico foliar (Figura 11). Por tanto, una mayor aplicación de agua con T2 no tuvo efecto en la condición hídrica de la planta y el manejo del riego con T1 no tuvo impacto significativo sobre el potencial hídrico foliar.

### ***Variedad Brookfield Gala***

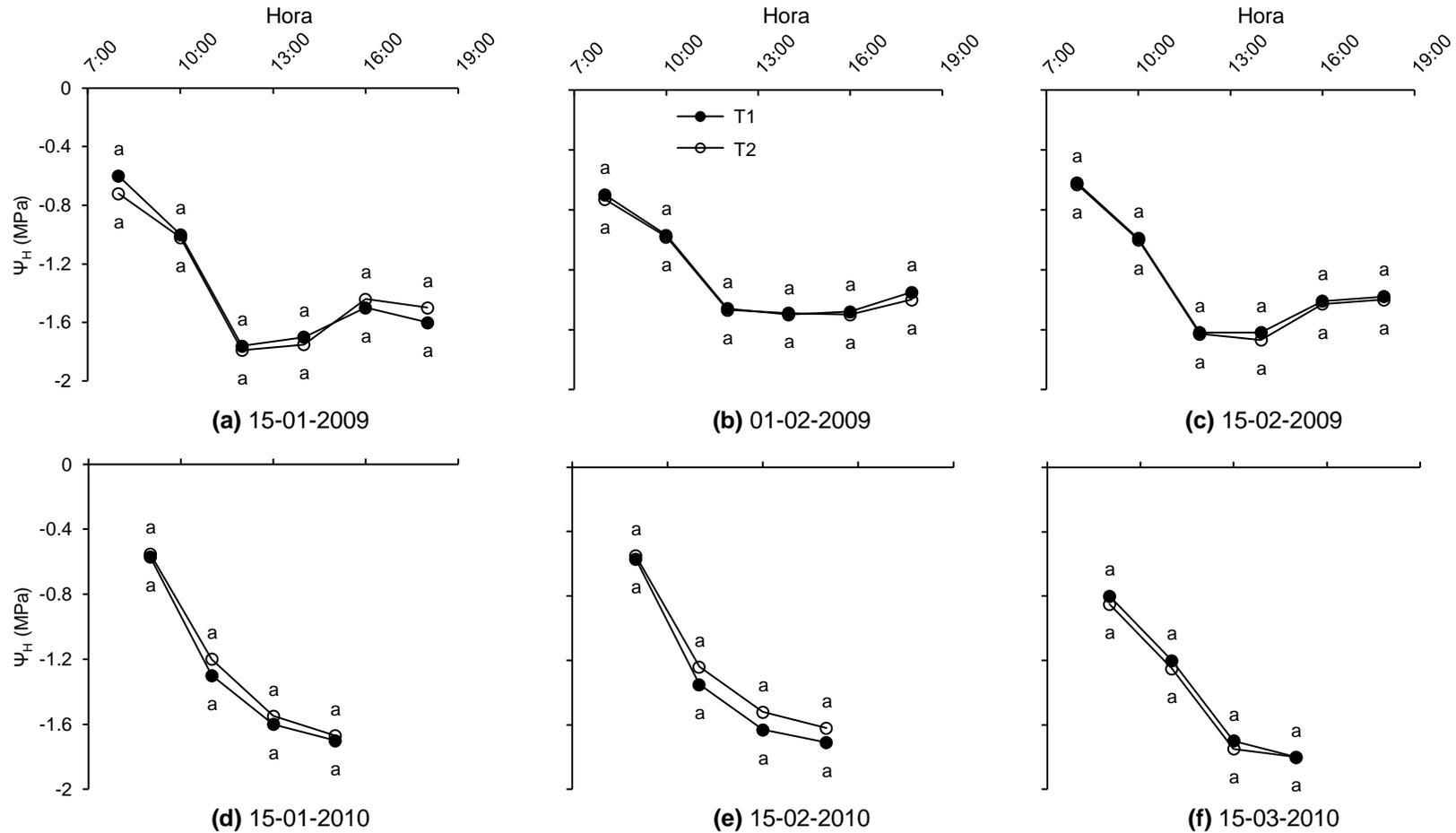
En la Figura 12 se muestra el potencial hídrico de la hoja a lo largo del día en tres fechas seleccionadas para las temporadas 2008-2009 y 2009-2010.

En las fechas estudiadas, el comportamiento del potencial hídrico es similar a lo largo del día en ambos tratamientos, no presentando diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre las mediciones. En la temporada 2008-2009, el potencial varió entre -0,2 MPa hasta -2,0 MPa (Figura 12a, 12b y 12c) y, en la temporada 2009-2010, entre -0,1 MPa y -1,0 MPa (Figura 12d, 12e y 12f).

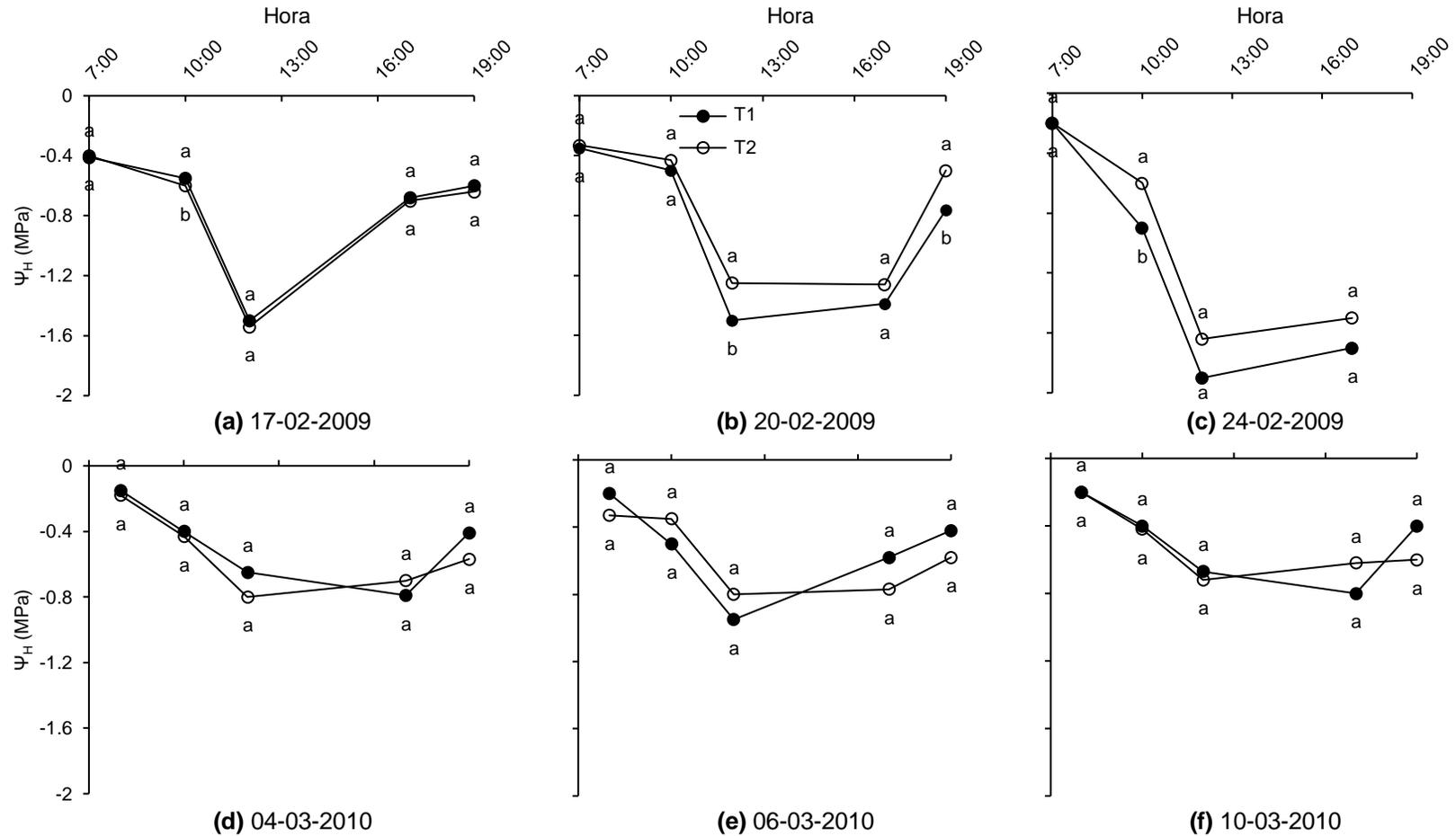
La diferencia entre los rangos en los que se ubicó el potencial hídrico en ambas temporadas estuvo determinada por las fechas de medición. En el caso de la temporada 2009-2010, estas fueron efectuadas en marzo, cuando las temperaturas comienzan a moderarse a medida que se aproxima al cambio de estación. Si bien hubo suspensión en la aplicación de agua producto del terremoto de fines de febrero de 2010, este hecho no se tradujo en un menor valor del potencial hídrico con respecto a lo observado en la temporada pasada.

Las únicas diferencias se advierten a las 10:00 y 12:00 horas el 20 (Figura 12b) y 24 de febrero de 2009 (Figura 12c), respectivamente, donde el potencial hídrico de la hoja en T1 fue significativamente menor ( $p < 0,05$ ). Esta observación puede correlacionarse con las observaciones para el perfil de humedad del suelo el mismo día (Figura 10), en el que el contenido de humedad del tratamiento T1 es menor que con T2 en todas las estratas de suelo.

Algunos autores han precisado que el potencial hídrico de las plantas puede predecir fielmente el estado de la humedad del suelo. Vicente y Yuste (2014) encontraron que las mejores correlaciones entre potencial hídrico y humedad del suelo se obtienen al efectuar mediciones entre las 9:00 y las 12:00 del día en una plantación de vides. De igual modo, López et al. (2010) encontraron una relación significativa entre el potencial hídrico y la humedad del suelo en cultivos de sorgo para mediciones a las 9:00 de la mañana.



**Figura 11.** Evolución horaria del potencial hídrico de la hoja ( $\Psi_H$ ) en manzanos de variedad Royal Gala para dos tratamientos de aplicación de agua durante la temporada 2008-2009 en los días: (a) 15-01-2009, (b) 01-02-2009 y (c) 15-02-2009; y durante la temporada 2009-2010 en los días: (d) 15-01-2010, (e) 15-02-2010 y (f) 15-03-2010. Cada punto es el promedio de ocho lecturas. Medias con igual letra para la misma hora indican que no hay diferencias significativas de acuerdo con la prueba ANOVA ( $p < 0.05$ ). T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 12.** Evolución horaria del potencial hídrico de la hoja ( $\Psi_H$ ) en manzanos de variedad Brookfield Gala para dos tratamientos de aplicación de agua durante la temporada 2008-2009 en los días: (a) 17-02-2009, (b) 20-02-2009 y (c) 24-02-2009; y durante la temporada 2009-2010 en los días: (d) 04-03-2010, (e) 06-03-2010 y (f) 10-03-2010. Cada punto es el promedio de ocho lecturas. Medias con igual letra para la misma hora indican que no hay diferencias significativas de acuerdo con la prueba ANOVA ( $p < 0.05$ ). T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.

Özmen (2016) también encontró una estrecha relación entre el contenido de humedad del suelo y el potencial hídrico de la hoja de manzanos “Granny Smith” medido a mediodía, respecto al contenido de humedad del suelo, presentando un coeficiente  $R^2$  de 0,97 entre ambas variables. De esta forma, es posible inducir que, durante ese período, la menor disponibilidad de humedad del suelo pudo tener un efecto negativo sobre el estado hídrico de la hoja.

### Producción

No se observaron diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento de producción de “Royal Gala” entre los tratamientos de cada temporada y los valores promedio se ubicaron entre 43,3 ton ha<sup>-1</sup> y 46,2 ton ha<sup>-1</sup> (Tabla 9).

Por otra parte, en la variedad Brookfield Gala, se observó una diferencia estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ) de 6,5 ton ha<sup>-1</sup> entre la producción de ambos tratamientos en la temporada 2008 – 2009. En este último caso, la mayor producción se dio en manzanos del tratamiento T1, asociado a una mayor cantidad de frutos por árbol en ese tratamiento (Tabla 10). A diferencia de la temporada 2008 – 2009, en la temporada 2009 – 2010 no se registraron diferencias estadísticas en la producción de ambos tratamientos, a pesar del aumento del número de frutos por árbol a la cosecha con T2 (Tabla 10).

**Tabla 9.** Producción de manzanos de variedad Royal Gala y Brookfield Gala, para dos aplicaciones de agua durante las temporadas 2008-2009 y 2009-2010.

Temporada	Tratamiento	Producción de manzana (t ha <sup>-1</sup> )	
		Royal Gala	Brookfield Gala
2008 – 2009	T1	46,2a	34,3a
	T2	44,3a	27,9b
2009 – 2010	T1	45,3a	33,4a
	T2	43,3a	37,2a

Medias con igual letra dentro de la misma temporada y variedad indican que no hay diferencias significativas de acuerdo con la prueba ANOVA ( $p < 0,05$ ). T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 10.** Número de frutos a la cosecha por árbol de manzano de variedad Brookfield Gala para dos aplicaciones de agua durante las temporadas 2008-2009 y 2009-2010.

Temporada	Tratamiento	Número de frutos por árbol
2008 – 2009	T1	68a
	T2	53b
2009 – 2010	T1	62a
	T2	93b

Medias con igual letra dentro de la misma temporada indican que no hay diferencias significativas de acuerdo con la prueba ANOVA ( $p < 0.05$ ). T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.

En ambas variedades se evidencia la utilidad del uso de un manejo controlado del agua sin perjudicar la producción. Esta situación fue observada también por Parra et al. (2009), quienes evaluaron el riego controlado a un huerto de manzanos Top Red Delicious de 20 años y lo compararon con el manejo del agricultor. La investigación, que se llevó a cabo en Cuauhtémoc, Chihuahua, México a una altitud de 2.100 msnm, mostró que fue posible alcanzar un ahorro de hasta  $7.370 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  temporada<sup>-1</sup> con riego controlado y aumentar la producción desde  $30 \text{ ton ha}^{-1}$  (agricultor) hasta  $38 \text{ ton ha}^{-1}$ .

Si bien los niveles de producción no difieren, en general, entre tratamientos, el rendimiento de manzanas de variedad Brookfield Gala reportadas en este trabajo se encuentra por debajo de los niveles alcanzados por otros autores. Por ejemplo, Lecaros et al. (2021) registraron rendimientos por temporada entre  $42,1 \text{ ton ha}^{-1}$  y  $59,5 \text{ ton ha}^{-1}$  para manzanos de variedad Brookfield Gala de 4 años. De igual modo, Zhong et al. (2019) informan producciones mayores a las  $40 \text{ ton ha}^{-1}$  en 8 de 9 tratamientos de riego controlado aplicados a manzanos de 5 años de edad.

En relación con el número de frutos, durante la temporada 2008–2009, el número de frutos en manzanos “Brookfield Gala” en T2 fue estadísticamente inferior al de T1 (Tabla 10). En cambio, en la temporada 2009–2010, el número de frutos en el tratamiento T2 aumentó significativamente y fue superior al de T1. Estos valores pueden parecer contradictorios, puesto a que el exceso de agua produciría efectos opuestos sobre el número de frutos en las temporadas 2008–2009 y 2009–2010 en los árboles a los cuales se les aplicó T2.

En literatura se encuentran casos que respaldan ambas posturas. Por ejemplo, Ortega (2014), en el Valle Central de Chile, obtuvo el 20 % y 40 % menos de frutos cuando aplicó una estrategia de riego en manzanos de variedad Royal Gala basadas en niveles de reposición del 125 % y 150 % de la evapotranspiración actual, respectivamente. Esta situación es similar a la observada en la temporada 2008–2009 y podría explicar la mayor caída prematura de los frutos cuando se aplica un exceso de agua (T2), tal como lo reportó Manríquez (2010), basada en las observaciones de Assaf et al. (1975). En contraparte, Martins et al. (2017), en Petrolina, Brazil, estudiaron dos cultivares de manzanos de dos años y observaron un mayor número de flores y un mayor porcentaje de frutos cuajados cuando aumentaron los niveles de reposición de agua hasta un 120 % de la evapotranspiración del cultivo, lo que condujo a obtener un mayor número de frutos por árbol cuando se aplicó más cantidad de agua. Esta situación es la que se reporta en la temporada 2009–2010.

A diferencia del tratamiento T2, el número de frutos a la cosecha en manzanos de variedad Brookfield Gala, tratamiento T1, no parece ser afectado drásticamente a través de las temporadas. Por tanto, esto sugiere que una estrategia con un criterio de riego basado en una estimación teórica del agua requerida por la planta ofrece una estabilidad en el número de frutos a cosechar, similar a lo observado con la producción. Así mismo, cabe mencionar que este huerto de la variedad Brookfield Gala fue plantado el 2006, por lo que estaría todavía completando su etapa para alcanzar el nivel de huerto comercial maduro.

Finalmente, en la Tabla 11 se entrega un resumen de la eficiencia del uso del agua (kg fruta cosechada por m<sup>3</sup> de agua aplicada) en los tratamientos y temporadas para cada variedad estudiada. Este parámetro es ampliamente empleado en literatura para evaluar el consumo de agua en cultivos (Osorio, 2013; Parra et al., 2009; Tong et al., 2022; Zhong et al., 2019). Los resultados indican que la productividad fue mayor en la temporada 2009-2010 en ambas variedades y tratamientos, lo que se relaciona con la menor aplicación de agua producto del terremoto del 2010 y una conservación en los niveles de producción en relación con la temporada anterior.

Asimismo, la productividad por volumen de agua de T1 fue mayor en el rango de 32 % a 56 % en relación con los valores obtenidos con T2.

En atención a ello, Osorio (2013) elaboró una referencia para la productividad del agua en cultivos de manzana roja, haciendo énfasis en la urgente necesidad de mejorar la eficiencia en el consumo del recurso hídrico. Este autor determinó productividades teóricas entre 7,9 kg y 11,9 kg por metro cúbico de agua aplicada para las zonas geográficas en las que se encuentran las variedades de manzanos aquí estudiadas (Región del Biobío y Región del Maule). La productividad del tratamiento T2 no alcanzó el límite inferior del rango en ninguna de las dos temporadas y variedades de manzana. En cambio, la productividad del tratamiento T1 se encuentra próximo o dentro de este rango en las dos temporadas y variedades de manzana, a excepción de la cosecha 2008-2009 en “Brookfield Gala”. Esta menor productividad se atribuye al mayor volumen de agua aplicada en marzo de 2009 ( $1.600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ), agua de riego que no se aplicó en marzo de 2010 debido al terremoto del 27 de febrero de 2010. Estos resultados demuestran que la tecnificación del riego permite aprovechar de mejor manera el recurso hídrico. En comparación, otros autores, como Parra et al. (2009), alcanzaron productividades de hasta 7,6 kg fruta por  $\text{m}^3$  de agua aplicada en huertos de manzano Top Red Delicious. Por su parte, Ortega (2014) consiguió eficiencias de hasta 18,2 kg fruta por  $\text{m}^3$  de agua aplicada en cultivos de manzana de variedad Royal Gala en la Región del Maule, Valle Central de Chile, lo que supone un objetivo hacia futuras investigaciones.

**Tabla 11.** Productividad del agua en manzanos de variedad Brookfield Gala y Royal Gala en dos temporadas y dos tratamientos de manejo del riego.

Temporada	Tratamientos	Productividad del agua (kg fruta $\text{m}^{-3}$ agua aplicada)	
		Royal Gala	Brookfield Gala
2008–2009	T1	7,44	5,04
	T2	5,64	3,24
2009–2010	T1	9,16	9,54
	T2	6,34	6,83

T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  
Fuente: Elaboración propia.

## Diámetro ecuatorial

En la Tabla 12 se muestra el diámetro ecuatorial en la cosecha en manzanos de variedad Royal Gala y Brookfield Gala, y en las Figuras 13 y 14 se muestra la evolución del diámetro ecuatorial del fruto a lo largo de las temporadas.

En manzanos de variedad Royal Gala, el desarrollo del fruto a lo largo de cada temporada tiene el mismo comportamiento para ambos tratamientos de riego (Figura 13). De hecho, en ninguna de las dos temporadas se registraron diferencias estadísticamente significativas en el diámetro ecuatorial del fruto en la cosecha entre tratamientos (Tabla 12). A fines de la temporada 2008-2009 los diámetros alcanzados fueron de 7,4 cm y 7,5 cm para los tratamientos T1 y T2, respectivamente, y para la temporada 2009-2010 fueron de 6,8 cm y 6,5 cm para los tratamientos T1 y T2, respectivamente.

De este modo, en manzanos “Royal Gala” el manejo del agua de riego no afectó el desarrollo y crecimiento del fruto. Sin embargo, en relación con sus características comerciales, Steduto et al. (2012) indican que, idealmente, las manzanas sobrepasen los 6,5 a 7 cm de diámetro, puesto que en muchos mercados los frutos de menor tamaño se venden a un precio inferior. Dicha característica fue superada casi al límite por los frutos de la temporada 2009-2010.

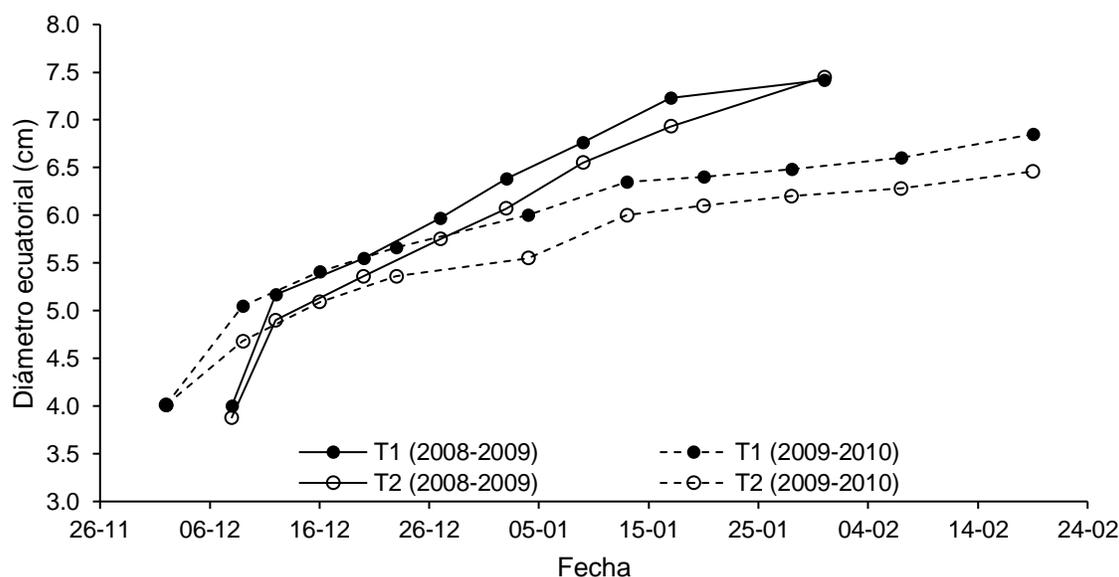
**Tabla 12.** Diámetro ecuatorial del fruto en la cosecha al final de las temporadas 2008-2009 y 2009-2010, para dos tratamientos de aplicación de agua a manzanos de variedad Royal Gala y Brookfield Gala.

Temporada	Tratamiento	Diámetro ecuatorial (cm)	
		Royal Gala	Brookfield Gala
2008 – 2009	T1	7,4a	8,0a
	T2	7,5a	8,0a
2009 – 2010	T1	6,8a	7,6a
	T2	6,5a	7,2b

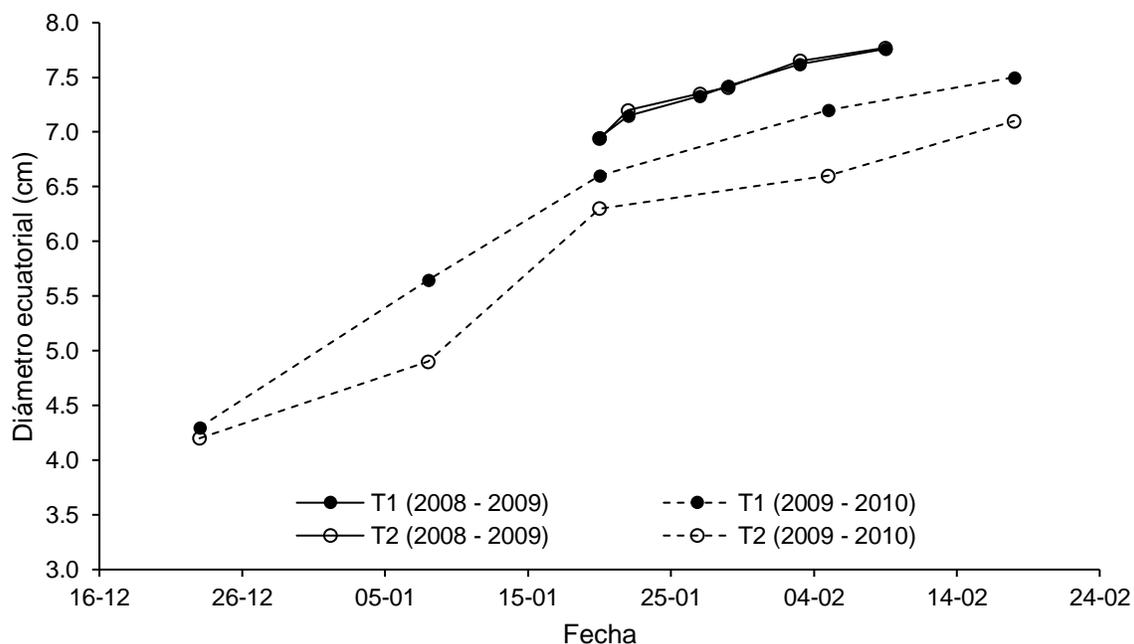
Medias con igual letra dentro de la misma temporada y variedad indican que no hay diferencias significativas de acuerdo con la prueba ANOVA ( $p < 0.05$ ). T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.

En manzanos de variedad Brookfield Gala, el fruto crece a un ritmo idéntico en ambos tratamientos en la temporada 2008–2009 (Figura 14), similar a lo reportado en “Royal Gala”. Esto da como resultado que los manzanos de cada tratamiento compartan el mismo diámetro al momento de la cosecha (Tabla 12). En contraste, en la temporada 2009-2010, a pesar de que en ambos tratamientos de riego los frutos siguen una dinámica de crecimiento similar, las diferencias de tamaño se mantienen hasta el punto de la cosecha y se observan diferencias estadísticamente significativas en el diámetro de los frutos al final de la temporada.

Parra et al. (2008) evaluaron tres niveles de carga frutal y dos niveles de aplicación de agua de riego en manzanos variedad Empire injertado en M.9, de 4 años. En su investigación, notaron que el diámetro del fruto no estuvo influenciado directamente por el déficit de riego, sino que más bien por la carga de frutos en el árbol, dando como resultado manzanas más pequeñas. Esta situación concuerda con lo obtenido en el presente trabajo, en donde un mayor número de frutos en el tratamiento T2 (Tabla 10) condujo a la obtención de manzanas de menor diámetro en la temporada 2009–2010, en la variedad Brookfield Gala.



**Figura 13.** Evolución del diámetro ecuatorial del fruto, durante las temporadas 2008-2009 y 2009-2010, para dos tratamientos de aplicación de agua a través de riego por goteo en manzanos de variedad Royal Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 14.** Evolución del diámetro ecuatorial del fruto, durante las temporadas 2008-2009 y 2009-2010, para dos tratamientos de aplicación de agua a través de riego por goteo a manzanos de variedad Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.

### Peso del fruto

En la Tabla 13 se muestra el peso promedio del fruto en la cosecha de las temporadas 2008-2009 y 2009-2010 para dos tratamientos de manejo del agua de riego en manzanos de variedad Royal Gala y Brookfield Gala. En “Royal Gala” se observaron resultados similares entre los tratamientos para cada temporada, continuando con el patrón de los otros parámetros de calidad del fruto. En este caso, es destacable que en la temporada 2009-2010 el peso promedio de los frutos sea mayor que los de la temporada 2008-2009, a pesar de que tengan un diámetro más pequeño.

Por otra parte, al igual que en las otras características de calidad de manzanas “Brookfield Gala”, no se registraron diferencias estadísticas en el peso del fruto entre los tratamientos aplicados en la temporada 2008-2009. Sin embargo, sí se observaron diferencias en la temporada 2009-2010 (Tabla 13). La principal causa de esta desigualdad es el menor tamaño de los frutos alcanzados con T2 en esta segunda temporada (Tabla 12).

**Tabla 13.** Peso del fruto a la cosecha en las temporadas 2008-2009 y 2009-2010, para dos tratamientos de aplicación de agua a manzanos de variedad Royal Gala y Brookfield Gala.

Temporada	Tratamiento	Peso del fruto (g)	
		Royal Gala	Brookfield Gala
2008 – 2009	T1	171,6a	210,0a
	T2	172,1a	215,0a
2009 – 2010	T1	195,7a	197,3a
	T2	192,8a	171,9b

Medias con igual letra dentro de la misma temporada y variedad indican que no hay diferencias significativas de acuerdo con la prueba ANOVA ( $p < 0.05$ ). T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.

En general, los valores para el peso de los frutos de manzanas de variedad Royal Gala y Brookfield Gala se encuentran dentro del rango reportado por otros autores y superan el límite de peso mínimo de 90 g requerido para exportación (FAO, 2010).

### Costo de la energía eléctrica

El costo de la energía eléctrica está directamente relacionado con el tiempo de funcionamiento del equipo de bombeo y las características del sistema de riego. En las Tabla C-4 y Tabla C-5 del Apéndice C se muestra información del tiempo de riego por temporada, determinado a partir del volumen de agua aplicado y el sistema de riego empleado, junto con las horas de funcionamiento del equipo de bombeo, el consumo eléctrico y el costo total por temporada. En la Tabla 14 se presenta el costo de la energía eléctrica por hectárea.

En cultivos de manzanos de variedad Royal Gala, el costo de la energía eléctrica por hectárea en la temporada 2008-2009 fue de 3,05 UF ha<sup>-1</sup> para el tratamiento T1 y de 3,85 UF ha<sup>-1</sup> para el tratamiento T2. Esto representa una reducción de 20,9 % en el costo del T1. En la temporada 2009-2010, se incrementó la brecha siendo el costo de la energía eléctrica para T1 27,5 % menor respecto a T2.

En cultivos de manzanos de variedad Brookfield Gala, la reducción del costo de la energía eléctrica en el tratamiento T1 respecto a T2, fue de 21,1 % en la temporada 2008-2009, lo que implicó un ahorro por hectárea de 0,37 UF ha<sup>-1</sup>. En la temporada 2009-2010, esta reducción fue del 28,0 %.

**Tabla 14.** Costo de la energía eléctrica consumida por bombeo en cultivos de manzanos de variedad Brookfield Gala (riego por goteo) y Royal Gala (riego por microaspersión).

Temporada	Royal Gala		Brookfield Gala	
	Costo T1 (UF ha <sup>-1</sup> )	Costo T2 (UF ha <sup>-1</sup> )	Costo T1 (UF ha <sup>-1</sup> )	Costo T2 (UF ha <sup>-1</sup> )
2008–2009	3,05	3,85	1,36	1,73
2009–2010	2,43	3,35	0,73	1,02

UF: \$ 33.282,32 (17/07/2022). T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial. Fuente: Elaboración propia.

En ambos cultivos, el costo de la energía eléctrica por hectárea (UF ha<sup>-1</sup>) disminuyó en la temporada 2009-2010 respecto a la temporada anterior (Tabla 14), como consecuencia de la interrupción del funcionamiento de los sistemas de riego producto del terremoto del 27 febrero de 2010. Al comparar los costos de ambas variedades, se observa que, en todos los casos, el costo de la energía eléctrica por hectárea en manzanos de variedad Royal Gala fue superior a los de Brookfield Gala, atribuible a un mayor caudal y presión de trabajo del emisor (riego por microaspersión) y a un menor desarrollo de plantación en manzanos “Royal Gala” por ser un huerto todavía en formación.

Finalmente, en ambos cultivos, la mayoría de las diferencias de producción y calidad de la fruta entre ambos tratamientos no son significativas, por lo que sería conveniente la implementación del tratamiento T1. La puesta en práctica de esta estrategia no requeriría inversión inicial, puesto a que se utilizaría el mismo sistema de riego actual. Considerando las 6,0 hectáreas de cultivo para manzanos de variedad Royal Gala y los costos de la Tabla 14, esto implicaría un ahorro de hasta 5,5 UF temporada<sup>-1</sup> para esa variedad de manzana y 8,0 UF temporada<sup>-1</sup> si se toman en cuenta las 22,1 hectáreas de cultivo de “Brookfield Gala”.

## CONCLUSIONES

La estrategia de riego de acuerdo con el volumen teórico requerido por la planta (T1) permitió reducciones en el consumo de agua superiores al 20% respecto al protocolo de manejo predial (T2), con una disminución de más de  $1.600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  en cada predio al final de cada temporada. Además, el empleo del tratamiento T1 significó un ahorro en el costo por uso de la energía eléctrica entre 0,80 y 0,92 UF  $\text{ha}^{-1}$  respecto a T2 en manzanos de variedad Royal Gala y entre 0,29 y 0,37 UF  $\text{ha}^{-1}$  para manzanos de variedad Brookfield Gala.

En ambas temporadas y para las dos variedades de manzanos, los suelos a los que se les aplicó el tratamiento T2, presentaron un contenido de humedad mayor, cercano a CC, mientras que a los que se les aplicó el tratamiento T1, se mantuvieron entre PMP y CC. El contenido de humedad al principio y al final de la temporada estuvo determinado por las características climáticas y por una menor demanda de agua por parte de la planta, respectivamente. El comportamiento del potencial hídrico del manzano fue similar a lo largo del día en los dos tratamientos y en las dos temporadas y no se observó un efecto del agua aplicada sobre el potencial hídrico, por lo que una mayor cantidad de agua aplicada con el protocolo predial no mejoró la condición hídrica de la planta.

En manzanos "Royal Gala" no existieron diferencias en producción, diámetro y peso del fruto entre ambos tratamientos evaluados en las dos temporadas. Sin embargo, en manzanos "Brookfield Gala" hubo una mayor producción y número de frutos por árbol al aplicar el volumen teórico de agua requerido por la planta (T1) en la temporada 2008-2009. En la temporada 2009-2010, hubo un aumento en el número de frutos por árbol en el T2 lo que causó disminución en el diámetro y peso del fruto, aunque sin diferencias significativas en producción con T1. Esta similitud en los niveles de producción entre ambos tratamientos y la disminución del uso de agua en el tratamiento T1, permitió aumentar entre el 36 % y el 52 % la productividad del agua, por lo que una tecnificación del riego permite aprovechar de mejor manera el recurso hídrico.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Adu, M., Yawson, D., Armah, F., Asare, P., Frimpong, K. (2018). Meta-analysis of crop yields of full, deficit, and partial root-zone drying irrigation. *Agricultural Water Management*, 197, 79-90. Doi: 10.1016/j.agwat.2017.11.019
- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements* - FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., Vis, M. (2020) *Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 429–446. Doi: 10.5194/egusphere-egu21-10065
- Assaf, R., Levin, I., & Bravdo, B. (1975). Effect of Irrigation Regimes on Trunk and Fruit Growth Rates, Quality and Yield of Apple Trees. *Journal of Horticultural Science*, 50(4), 481–493. Doi: 10.1080/00221589.1975.11514657
- Ascui, E. (2012). Manejo del agua en manzano (*Malus Domestica* Borkh) “Royal Gala”: Estudio de caso 2° año. Proyecto de Título de Ingeniería Agrónomo, Universidad de Concepción. Facultad de Agronomía, Chillán, Chile.
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Particle density. En A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part I. Physical and mineralogical methods* (2.a ed., pp. 337–381). *American Society of Agronomy, Inc Soil Science Society of America, Inc.* Wisconsin, USA. Doi: 10.2136/sssabookser5.1.2ed
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413–421. Doi: 10.1002/2015gl067265

- Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465. Doi: 10.2134/agronj1962.00021962005400050028x
- Callejas, R., & Reyes, R. (2019). Estrategias para enfrentar condiciones de sequía en frutales. *Revista Frutícola*, 41(3), 8–16.
- DGA. (2017). *Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad los recursos hídricos en Chile*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA). Resumen ejecutivo. S.I.T. N°419.
- FAO. (2010). *Codex standard for Apples*. Codex Stan 299–2010. [https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/ar/?Ink=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B299-2010%252FCXS\\_299e.pdf](https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/ar/?Ink=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B299-2010%252FCXS_299e.pdf) [Consultado el 16 de junio de 2022].
- Green, S., & Clothier, B. (1999). The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant and Soil*, 206(1), 61-77. Doi: 10.1023/A:1004368906698
- Girona, J. (2007). Estrategias de riego en frutales bajo condiciones de sequía. <http://www.recercat.cat/handle/2072/4676>
- Girona, J., Behboudian, M. H., Mata, M., Campo, J. Del, Marsal, J. (2010). Exploring six reduced irrigation options under water shortage for “Golden Smoothie” apple: Responses of yield components over three years. *Agricultural Water Management*, 98(2), 370–375. Doi: 10.1016/j.agwat.2010.09.011
- Gispert, J. R. (2003). Evaluación del volumen de suelo húmedo en micro-irrigación. Influencia del porcentaje de este volumen sobre el comportamiento del olivo (*Olea Europea L*; cul. 'Arbequina'). *Estudios de La Zona No Saturada Del Suelo*, 1, 51–58.
- Green, S., & Clothier, B. (1999). The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant and Soil*, 206(1), 61-77. Doi: 10.1023/A:1004368906698

- Holzapfel, E. (1998). *Riego presurizado*. Boletín de Extensión N°58. Universidad de Concepción. Chillán, Chile
- Holzapfel, E., & Arumí, J. L. (2010). *Tecnologías de manejo de agua para una agricultura intensiva sustentable*. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- Holzapfel, E., Hepp, R., & Mariño, M. (2004). Effect of irrigation on fruit production in blueberry. *Agricultural Water Management*, 67(3): 173–184. Doi: 10.1016/j.agwat.2004.02.008
- Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. En *Methods of soil analysis: Part I. Physical and mineralogical methods* (2.a ed., pp. 635–660). American Society of Agronomy, Inc Soil Science Society of America, Inc. Wisconsin, USA. Doi: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26
- Küçükyumuk, C., Kaçal, E., Ertek, A., Öztürk, G., Kurttaş, Y. S. K. (2012). Pomological and vegetative changes during transition from flood irrigation to drip irrigation: Starkrimson Delicious apple variety. *Scientia Horticulturae*, 136, 17–23. Doi: 10.1016/j.scienta.2011.12.012
- Küçükyumuk, C., Yildiz, H., & Meriç, M. K. (2020). The response of “Braeburn” apple to regulated deficit irrigation. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 26(2), 154–163. Doi: 10.15832/ankutbd.491542
- Lecaros, F. (2018). *Efecto del área de humedecimiento con diferente número de laterales por hilera bajo riego por goteo en la producción de manzanos*. Proyecto de Título, Magister en Ingeniería Agrícola. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
- Lecaros-Arellano, F., Holzapfel, E., Fereres, E., Rivera, D., Muñoz N., Jara, J. (2021). Effects of the number of drip laterals on yield and quality of apples grown in two soil types. *Agricultural Water Management*, 248. 106781. Doi: 10.1016/j.agwat.2021.106781

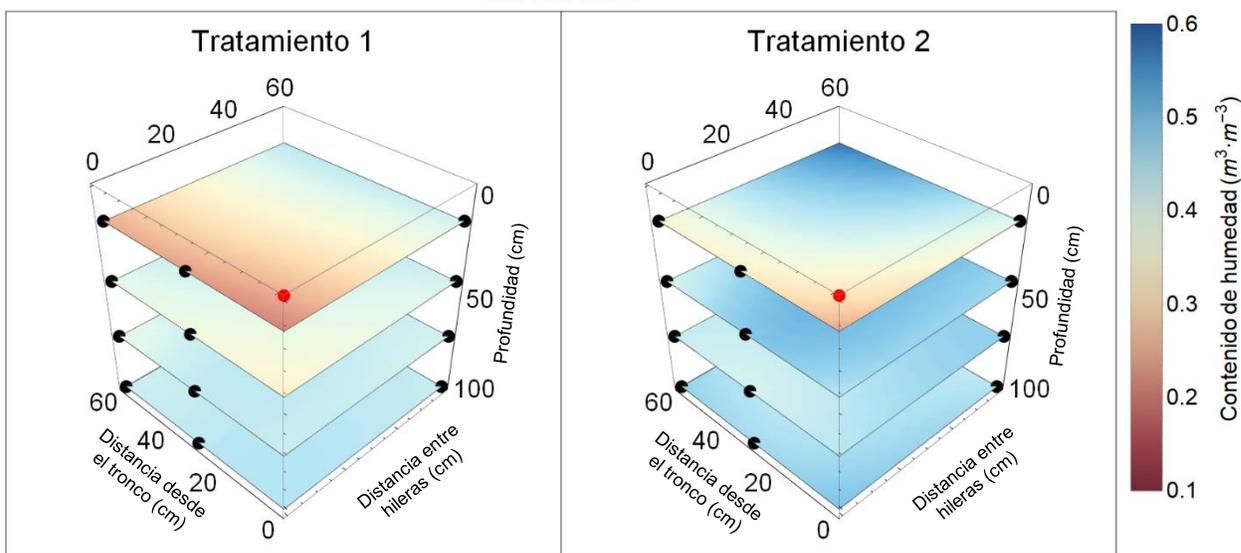
- Leib, B., Caspari, H., Andrews, P., Redulla, C., Jabro, J., Strausz, D. (2006). Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semi-arid climate. *Irrigation Science*, 24(2), 85-99.
- López, A. G., Cun, R., Montero, L., & José, S. (2010). Efecto de la hora del día en el potencial hídrico foliar del sorgo y su relación con la humedad en el suelo Effect of day time on leaf water potential in sorghum and their relationship with soil humidity. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(3), 7–11.
- Manríquez, C. (2010). *Efecto del manejo de la aplicación de agua en producción y calidad de manzanos: estudio de caso*. Proyecto de Título de Ingeniería Civil Agrícola, Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Agrícola, Chillán, Chile.
- Martins, C., Lima, W., Bezerra, J., Coelho, P., Jurema, E., da Silva, B. (2017). Flowering, fruiting and physiology of apple tree under different irrigation levels in the Brazilian semiarid region. *Comunicata Scientiae*, 8(1), 99–108. Doi: 10.14295/CS.v8i1.1761
- Ministerios de Agricultura y Medio Ambiente. (2013). Plan de adaptación al cambio climático del sector silvoagropecuario. Santiago de Chile: Maval.
- Montes, C. (2010). Posibles impactos del cambio climático en la agricultura chilena. *INIA Tierra Adentro*, 44–47.
- ODEPA-CIREN. (2016). *Catastro Frutícola: principales resultados*. Región del Maule. Recuperado de [http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26205/Cfpr\\_VIIR\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26205/Cfpr_VIIR_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Consulta: 20 septiembre 2021].
- ODEPA-CIREN. (2019). *Catastro frutícola: principales resultados*. Región del Maule. Recuperado de <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/28954>. [Consulta: 20 septiembre 2021].

- Olmos, X. (2017). *Sostenibilidad ambiental de las exportaciones agroalimentarias. Los casos de Chile, Colombia, el Ecuador y el Uruguay*. Naciones Unidas, Santiago
- Ortega, S. (2014). Optimización del uso del agua y rendimiento en un huerto comercial de manzanos (cv. Royal Gala). *Revista Frutícola*, 35(1), 10–16.
- Osorio, A. (2013). Determinación de la huella del agua y estrategias de manejo de recursos hídricos. Serie Actas. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Intihuasi*, (N° 50, pp. 211), La Serena, Chile.
- Parra, R., Ortiz, P., Amado, J., Chávez, N. (2009). Productivity and Growth of Apple Under Controlled Deficit Irrigation. *Terra Latinoamericana*, 27(4), 337–343.
- Parra, R., Robinson, T. L., Osborne, J., Parra, L. B. (2008). Efecto de carga de fruto y déficit hídrico en la calidad y producción de manzana. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14(1), 49–54. Doi: 10.5154/r.rchsh.2006.02.014
- Quiroz, S. (2011). *Efecto del manejo de la aplicación de agua en producción y calidad de manzanos: estudio de caso año II*. Proyecto de Título de Ingeniero Civil Agrícola, Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Agrícola, Chillán, Chile.
- Salinas, L. (2009). *Manejo del agua en manzano (Malus domestica Borkh) "Royal Gala": Estudio de caso*. Proyecto de Título de Ingeniero Agrónomo, Universidad de Concepción. Facultad de Agronomía, Chillán, Chile.
- Silveira, L. K., Pavão, G. C., dos Santos Dias, C. T., Quaggio, J. A., & Pires, R. C. de M. (2020). Deficit irrigation effect on fruit yield, quality and water use efficiency: A long-term study on Pêra-IAC sweet orange. *Agricultural Water Management*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106019>
- Sampathkumar, T., Pandian, B. J., Mahimairaja, S. (2012). Soil moisture distribution and root characters as influenced by deficit irrigation through drip system in cotton-maize cropping sequence. *Agricultural Water Management*, 103, 43–53. Doi: 10.1016/j.agwat.2011.10.016

- Sokalska, D., Haman, D., Szewczuk, A., Sobota, J. Derén, D. (2009). Spatial root distribution of mature apple trees under drip irrigation system. *Agricultural Water Management*, 96(6), 917–924. Doi: 10.1016/j.agwat.2008.12.003
- Solís, E. (2010). *Eficiencia de uso del agua en manzano (Malus domestica, Borkh. “Fuji”) a cuatro niveles de reposición hídrica bajo riego por goteo*. Proyecto de Título de Ingeniero Agrónomo, Universidad de Concepción. Facultad de Agronomía, Chillán, Chile.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. *Estudio FAO, Riego y Drenaje*. Rome (Italy).
- Tong, X., Wu, P., Liu, X., Zhang, L., Zhou, W., Wang, Z. (2022). A global meta-analysis of fruit tree yield and water use efficiency under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 260, 107321. Doi: 10.1016/j.agwat.2021.107321
- Vicente, A., & Yuste, J. (2014). Potenciales hídricos de hoja y de xilema: respuesta como indicadores del estado hídrico del viñedo, en cv. Verdejo, sometido a diferentes regímenes hídricos en la D.O . Rueda. *I Jornada Del Grupo de Viticultura y Enología*, 1, 317–324.
- Zhong, Y., Fei, L., Li, Y., Zeng, J., Dai, Z. (2019). Response of fruit yield, fruit quality, and water use efficiency to water deficits for apple trees under surge-root irrigation in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 222, 221-230. Doi: 10.1016/j.agwat.2019.05.035

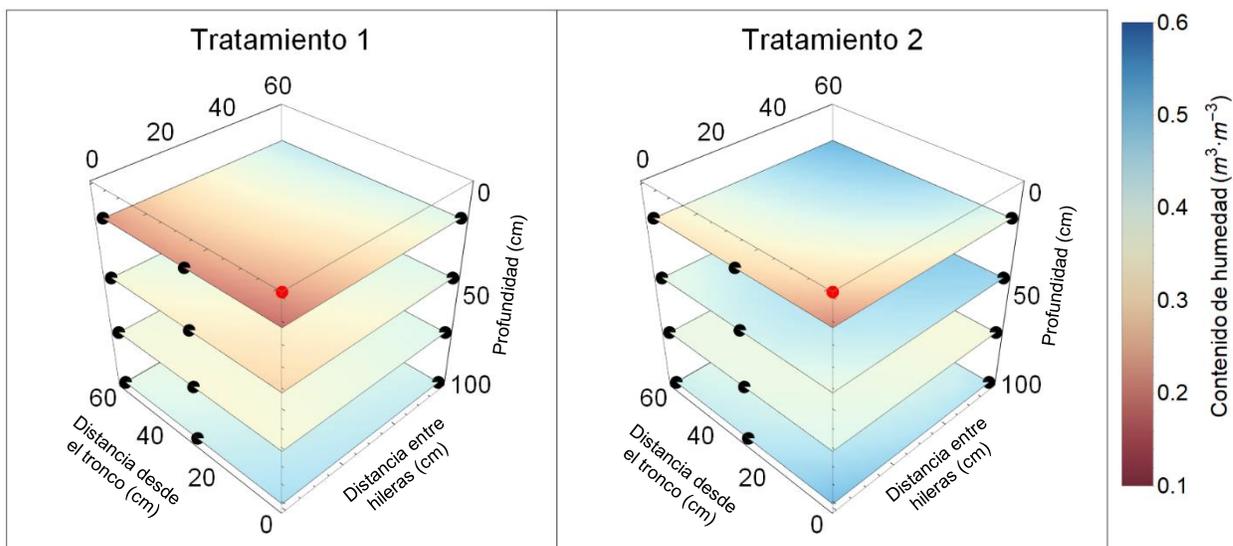
## APÉNDICE A

17/10/2008



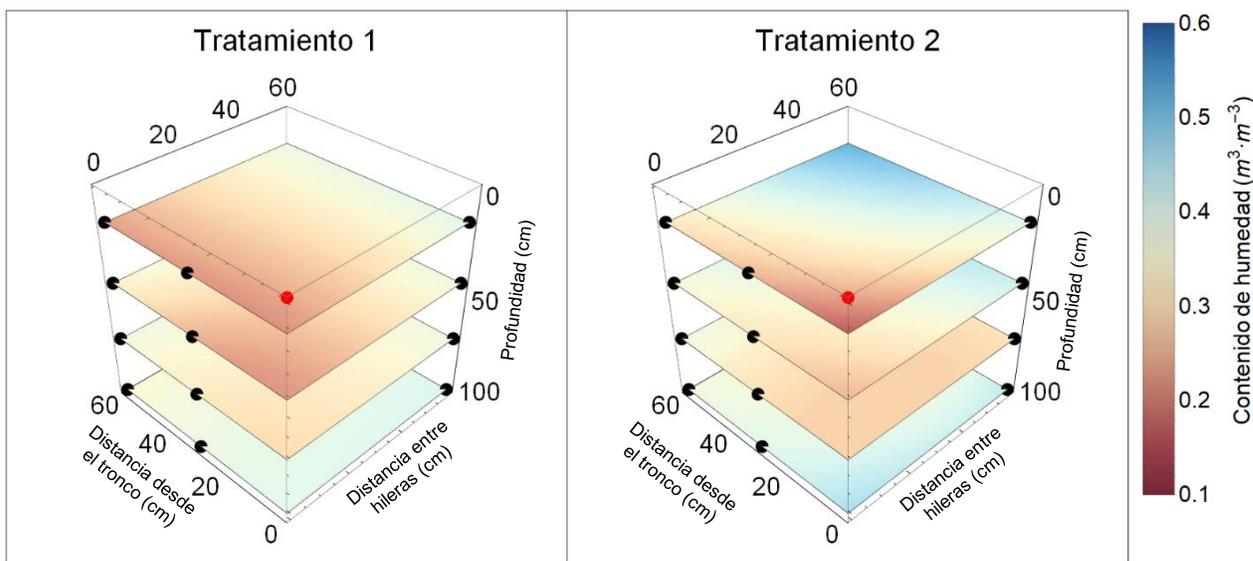
**Figura A-1.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 17/10/2008 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{cc}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. Fuente: Elaboración propia.

14/11/2008



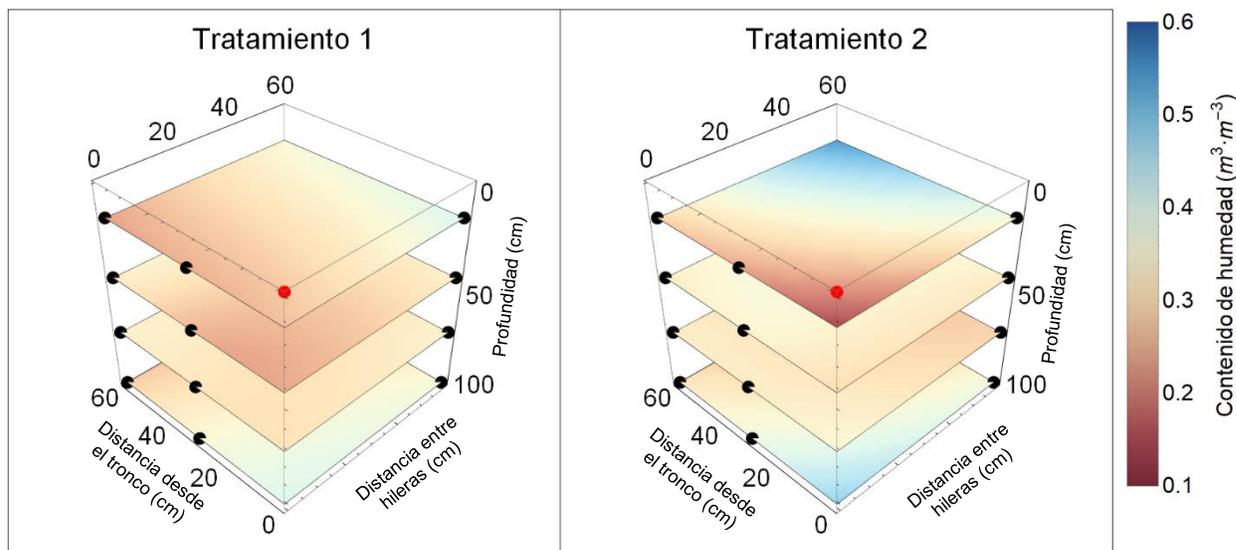
**Figura A-2.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 14/11/2008 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{cc}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. Fuente: Elaboración propia.

19/12/2008



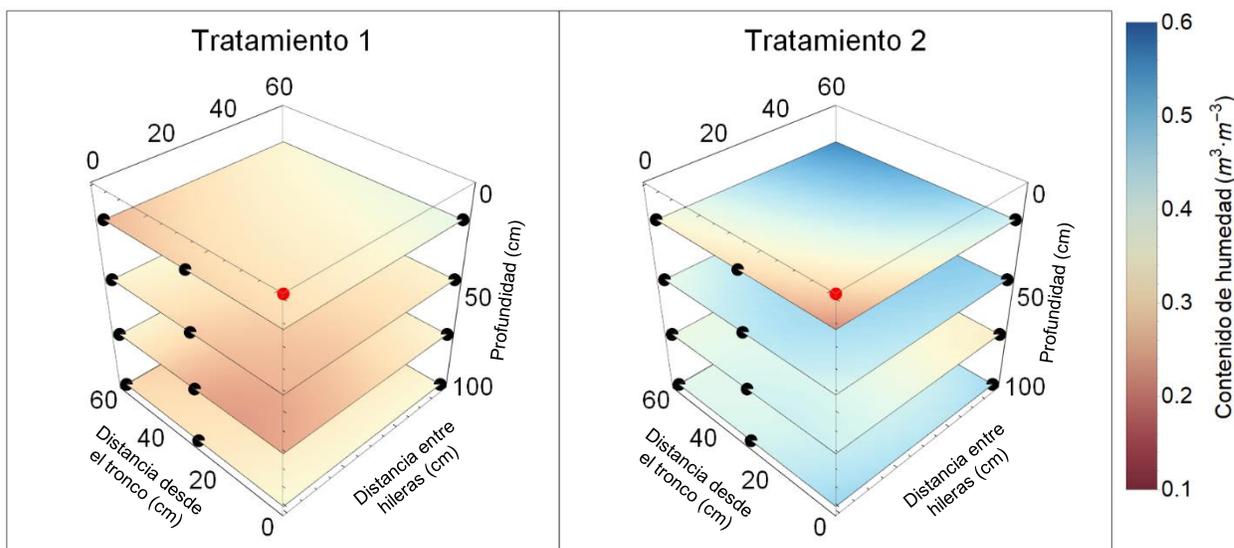
**Figura A-3.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 19/12/2008 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala antes del riego. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. Fuente: Elaboración propia.

20/01/2009



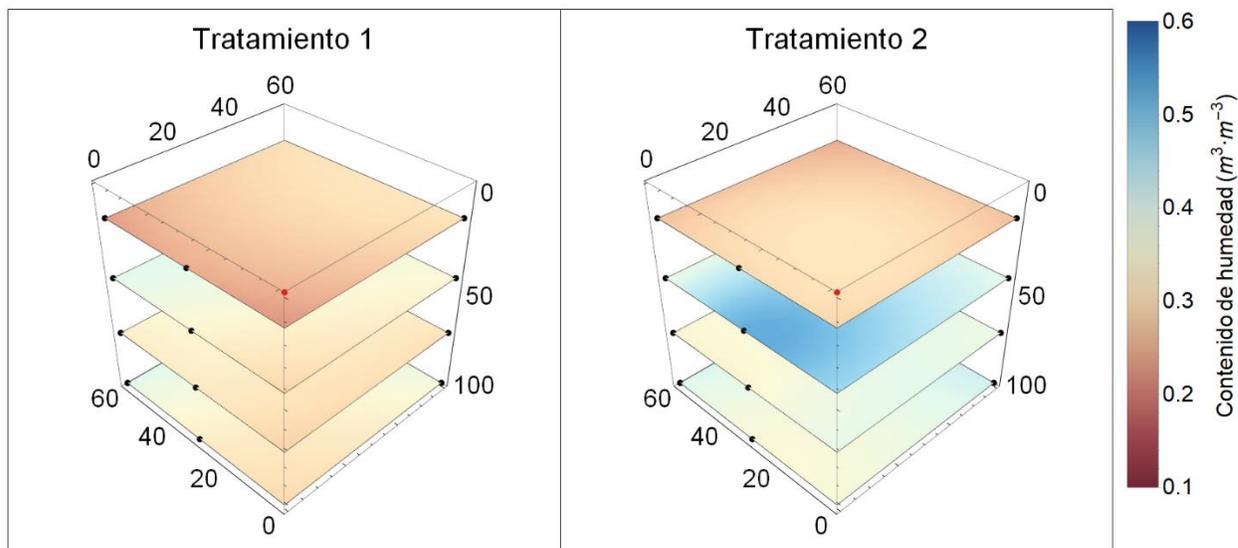
**Figura A-4.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 20/01/2009 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala antes del riego. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. Fuente: Elaboración propia.

20/02/2009



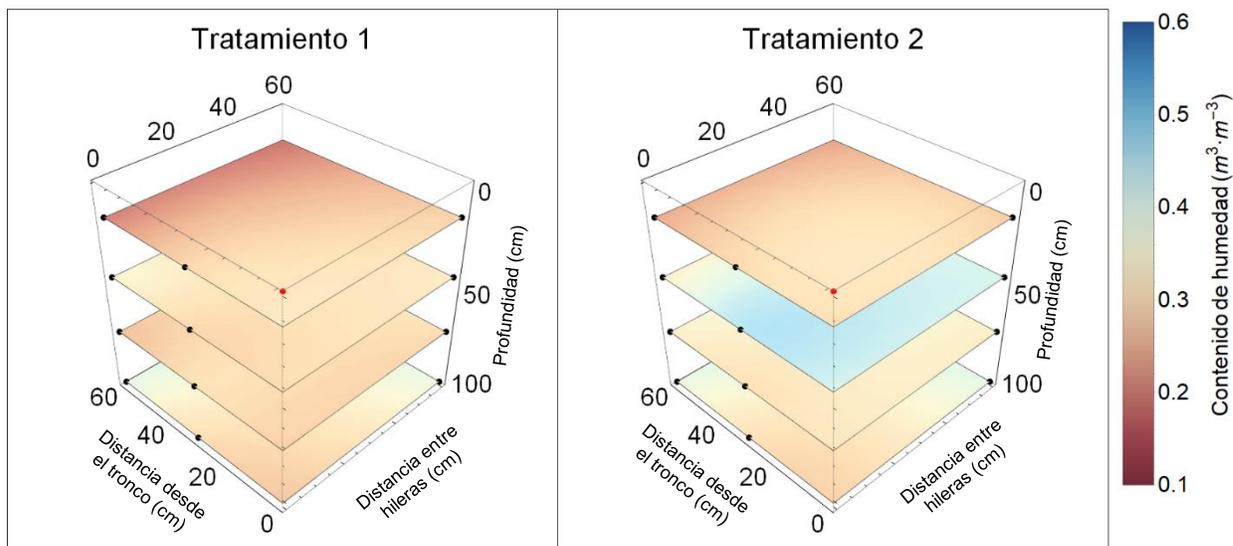
**Figura A-5.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 20/02/2009 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala después del riego. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. Fuente: Elaboración propia.

19/12/2009



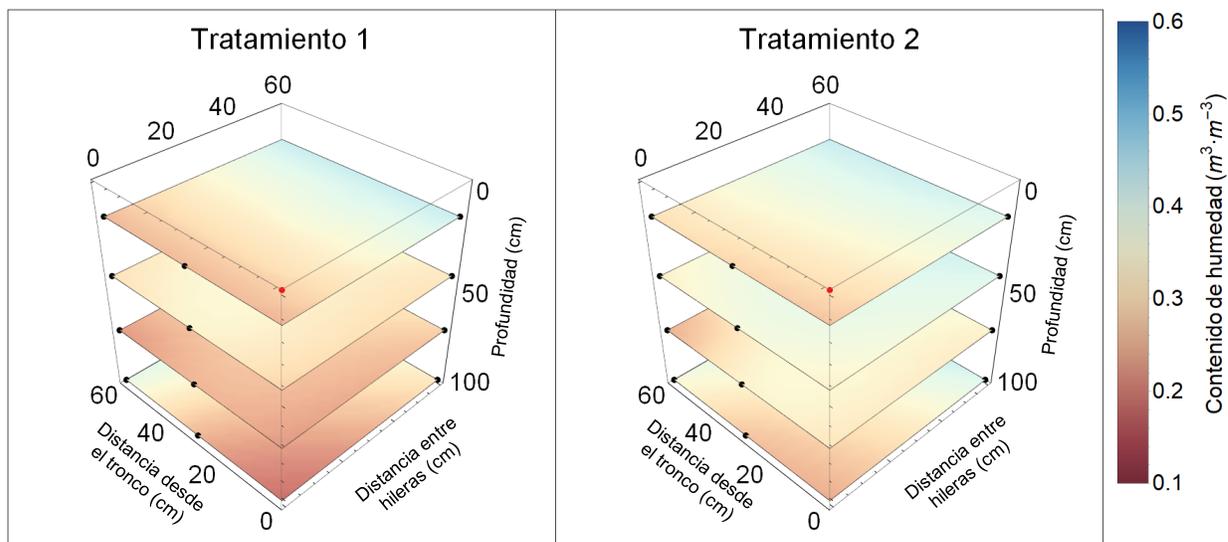
**Figura A-6.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 19/12/2009 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala antes del riego. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. Fuente: Elaboración propia.

14/01/2010



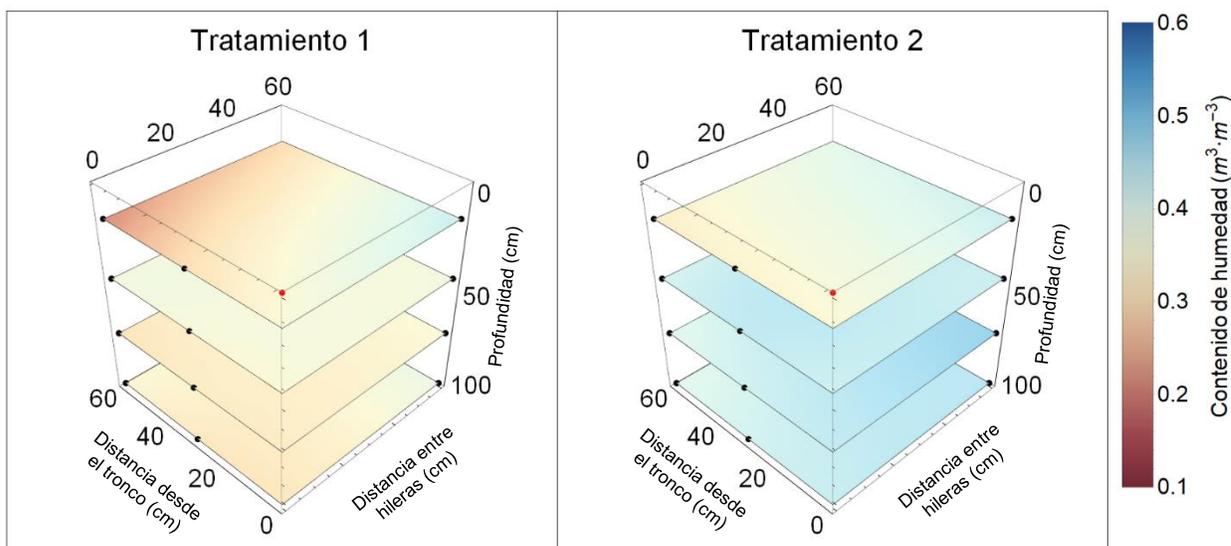
**Figura A-7.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 14/01/2010 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala antes del riego. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. Fuente: Elaboración propia.

29/01/2010



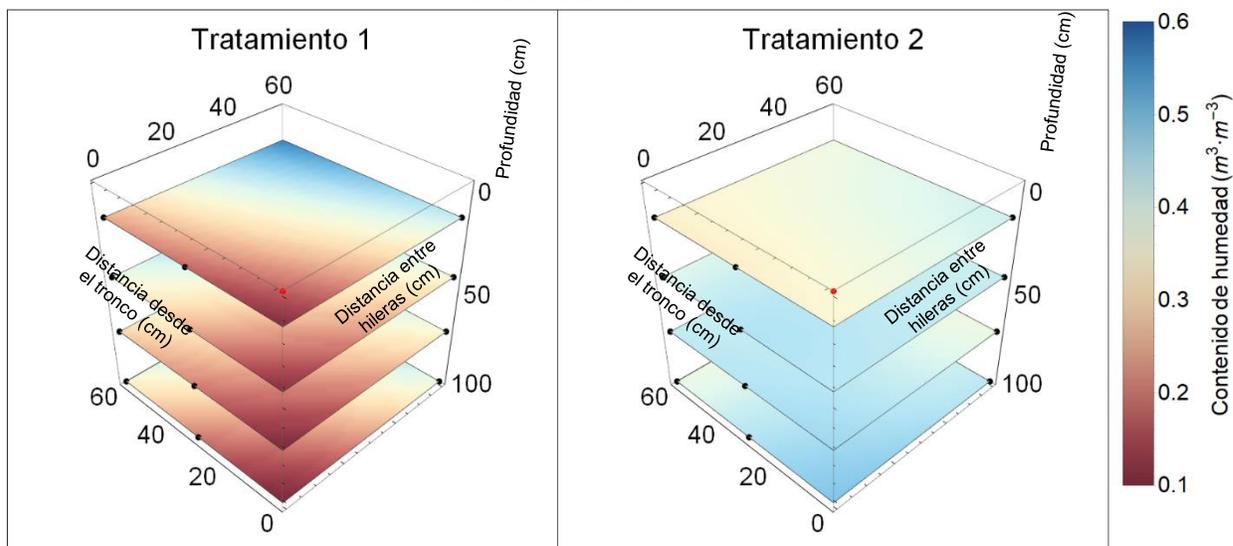
**Figura A-8.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 29/01/2010 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. Fuente: Elaboración propia.

13/02/2010



**Figura A-9.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 13/02/2010 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala antes del riego. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. Fuente: Elaboración propia.

26/02/2010



**Figura A-10.** Distribución del contenido de humedad en el suelo sobre superficies de corte determinadas por las estratas 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm el día 26/02/2010 para dos tratamientos de riego en manzanos Brookfield Gala T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.  $\theta_{CC}$ : 0,39 – 0,44  $m^3 m^{-3}$  y  $\theta_{PMP}$ : 0,20 – 0,22  $m^3 m^{-3}$ . Punto rojo indica la posición del árbol y los puntos negros la ubicación de los puntos de medición. Fuente: Elaboración propia.

**APÉNDICE B**

## Diámetro ecuatorial

**Tabla B-1.** ANOVA de una vía para el diámetro ecuatorial en la temporada 2008-2009 en manzanos de variedad Brookfield Gala.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
<b>Tratamiento</b>	1	1,3	1,3	0,12	0,73
<b>Residuales</b>	155	1.683,9	10,9		

*Signif. Codes: 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.* Fuente: Elaboración propia.

**Tabla B-2.** ANOVA de una vía para el diámetro ecuatorial en la temporada 2009-2010 en manzanos de variedad Brookfield Gala.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
<b>Tratamiento</b>	1	2,047	2,047	48,83	9,5E-0,9 ***
<b>Residuales</b>	46	1,928	0,042		

*Signif. Codes: 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.* Fuente: Elaboración propia.

## Número de frutos por árbol

**Tabla B-3.** ANOVA de una vía para el número de frutos por árbol en la temporada 2008-2009 en manzanos de variedad Brookfield Gala.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
<b>Tratamiento</b>	1	2.081	1.081,4	6,32	0,0155 *
<b>Residuales</b>	46	15.150	329,3		

*Signif. Codes: 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.* Fuente: Elaboración propia.

**Tabla B-4.** ANOVA de una vía para el número de frutos por árbol en la temporada 2009-2010 en manzanos de variedad Brookfield Gala.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
<b>Tratamiento</b>	1	10.300	10.300,0	17,90	0,000132 ***
<b>Residuales</b>	40	23.020	576,0		

*Signif. Codes: 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.* Fuente: Elaboración propia.

## Peso del fruto

**Tabla B-5.** ANOVA de una vía para el peso del fruto en la temporada 2008-2009 en manzanos de variedad Brookfield Gala.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
<b>Tratamiento</b>	1	100	100,4	0,32	0,575
<b>Residuales</b>	78	24.688	316,5		

*Signif. Codes: 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.* Fuente: Elaboración propia.

**Tabla B-6.** ANOVA de una vía para el peso del fruto en la temporada 2009-2010 en manzanos de variedad Brookfield Gala.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
<b>Tratamiento</b>	1	7.739	7.739,0	39,46	1,09E-07 ***
<b>Residuales</b>	46	9.022	196,0		

*Signif. Codes: 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.* Fuente: Elaboración propia.

## Producción

**Tabla B-7.** ANOVA de una vía para la producción en la temporada 2008-2009 en manzanos de variedad Brookfield Gala.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
<b>Tratamiento</b>	1	504	504,0	5,81	0,020 *
<b>Residuales</b>	46	3.993	86,8		

*Signif. Codes: 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.* Fuente: Elaboración propia.

**Tabla B-8.** ANOVA de una vía para la producción en la temporada 2009-2010 en manzanos de variedad Brookfield Gala.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
<b>Tratamiento</b>	1	28,9	28,9	0,31	0,599
<b>Residuales</b>	6	563	93,8		

*Signif. Codes: 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.* Fuente: Elaboración propia.

## APÉNDICE C

**Tabla C-1.** Fechas y horario de determinaciones del potencial hídrico de la planta.

	<b>Royal Gala</b>		<b>Brookfield Gala</b>	
	Temporada 2008/09	Temporada 2009/10	Temporada 2008/09	Temporada 2009/10
Fechas	15/01	15/01	17/02	04/03
	01/02	15/02	20/02	06/03
	15/02	15/03	24/02	10/03
Hora	8:00		7:00	8:00
	10:00	9:00	10:00	10:00
	12:00	11:00	12:00	12:00
	14:00	13:00	17:00	17:00
	16:00	15:00	19:00	19:00
	18:00			

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla C-2.** Características del sistema de riego por micro-aspersión en manzanos de variedad Royal Gala y por goteo en manzanos de variedad Brookfield Gala.

	<b>Royal Gala</b>	<b>Brookfield Gala</b>
<b>N° de plantas</b> (planta ha <sup>-1</sup> )	2.381	1.666
<b>Caudal emisor</b> (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> emisor <sup>-1</sup> )	0,002	0,033
<b>N° de emisores</b> (emisor planta <sup>-1</sup> )	4,8	0,5
<b>Superficie comercial</b> (ha)	6	22,1

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla C-3.** Costo de energía eléctrica del sistema de bombeo en manzanos de variedad Royal Gala regada por micro-aspersión. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.

	Temporada 2008-2009		Temporada 2009-2010	
	T1	T2	T1	T2
<b>Volumen de agua</b> (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> temporada <sup>-1</sup> )	6.211	7.850	4.945	6.825
<b>Tiempo de riego</b> (h)	225,9	285,6	179,9	248,3
<b>Potencia bomba</b> (kW)	30	30	30	30
<b>Consumo</b> (kWh temporada <sup>-1</sup> )	6.778	8.567	5.397	7.448
<b>Tarifa</b> (UF kWh <sup>-1</sup> )	0,027	0,027	0,027	0,027
<b>Total temporada</b> (UF temporada <sup>-1</sup> )	18,3	23,1	14,6	20,1
<b>Costo por superficie</b> (UF ha <sup>-1</sup> temporada <sup>-1</sup> )	3,05	3,85	2,43	3,35

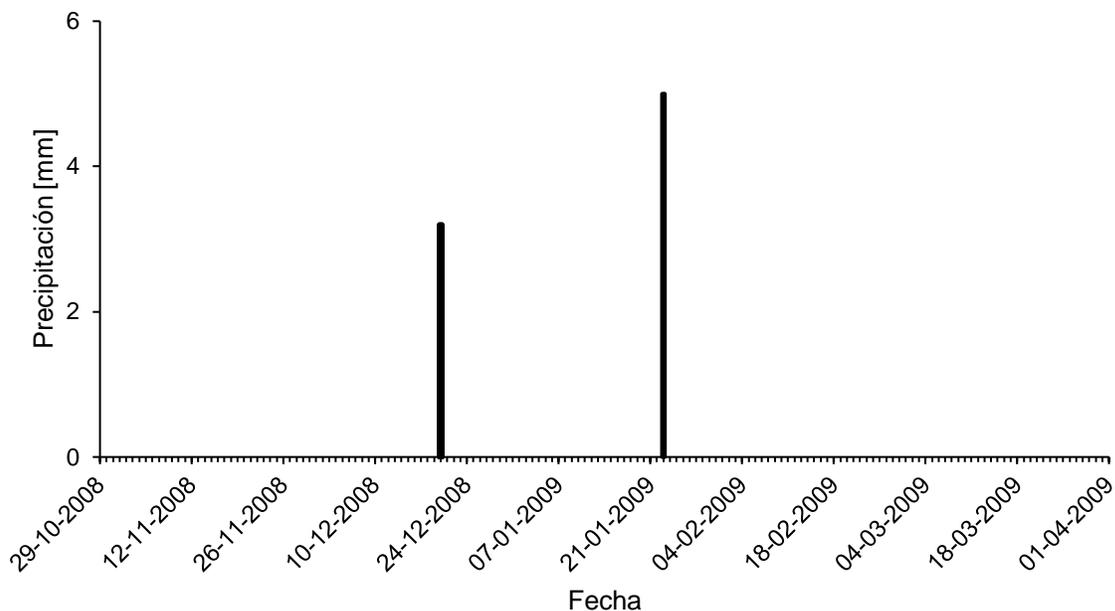
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla C-4.** Costo de energía eléctrica del sistema de bombeo en manzanos de variedad Brookfield Gala regada por goteo. T1: Riego con volumen teórico requerido por la planta. T2: Riego con protocolo predial.

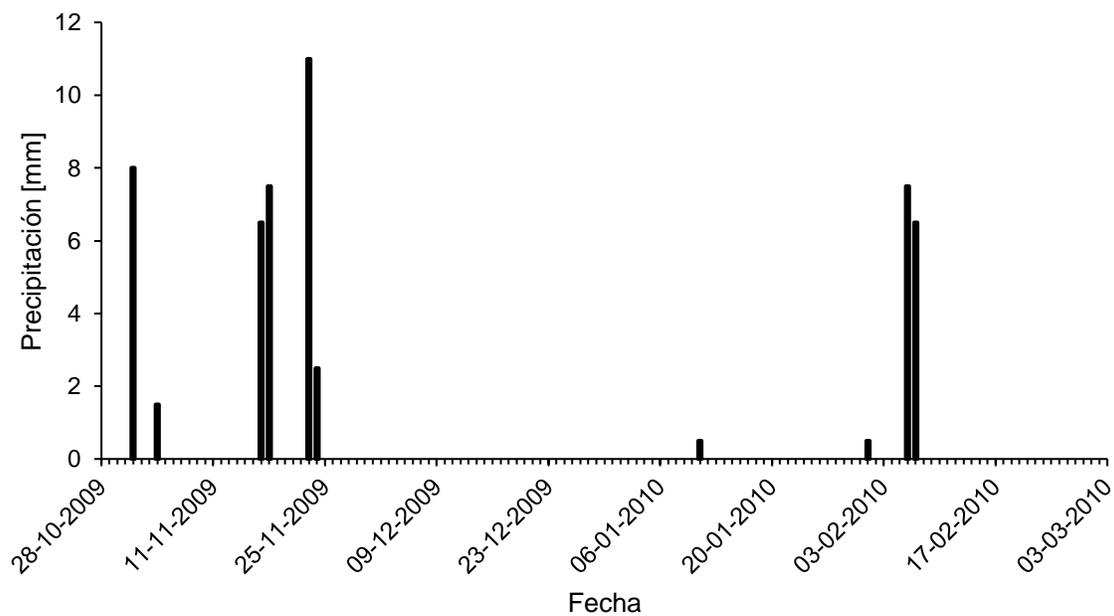
	Temporada 2008-2009		Temporada 2009-2010	
	T1	T2	T1	T2
<b>Volumen de agua</b> (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> temporada <sup>-1</sup> )	6.832	8.659	3.833	5.325
<b>Tiempo de riego</b> (h)	299	379	168	233
<b>Potencia bomba</b> (kW)	37,28	37,28	35,80	35,80
<b>Consumo</b> (kWh temporada <sup>-1</sup> )	11.143	14.123	6.003	8.340
<b>Tarifa</b> (UF kWh <sup>-1</sup> )	0,027	0,027	0,027	0,027
<b>Total temporada</b> (UF temporada <sup>-1</sup> )	30,1	38,1	16,2	22,5
<b>Costo por superficie</b> (UF ha <sup>-1</sup> )	1,36	1,73	0,73	1,02

Fuente: Elaboración propia.

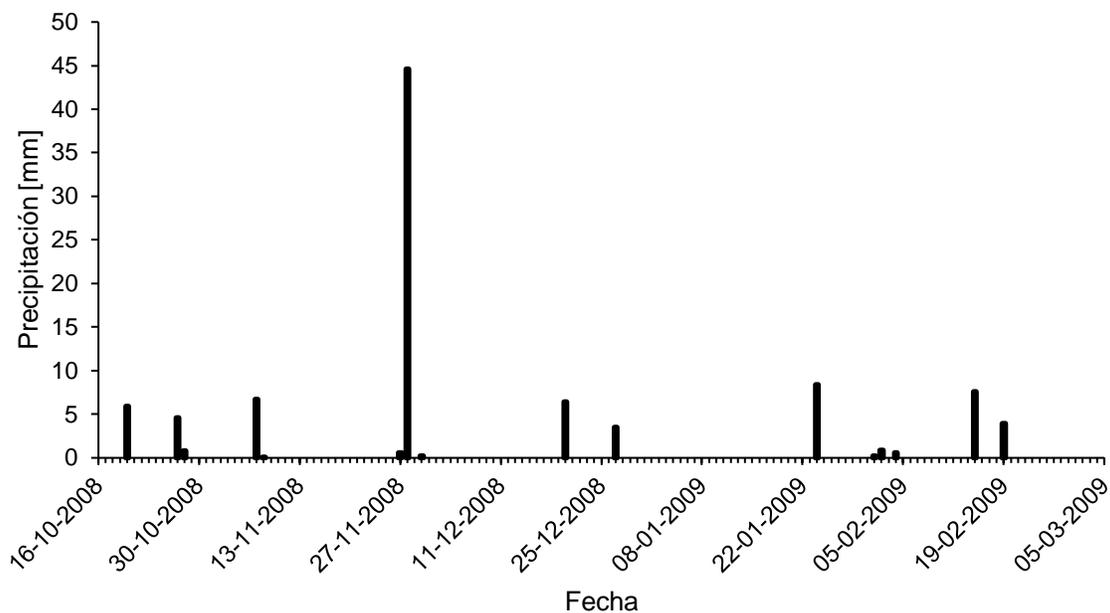
## APÉNDICE D



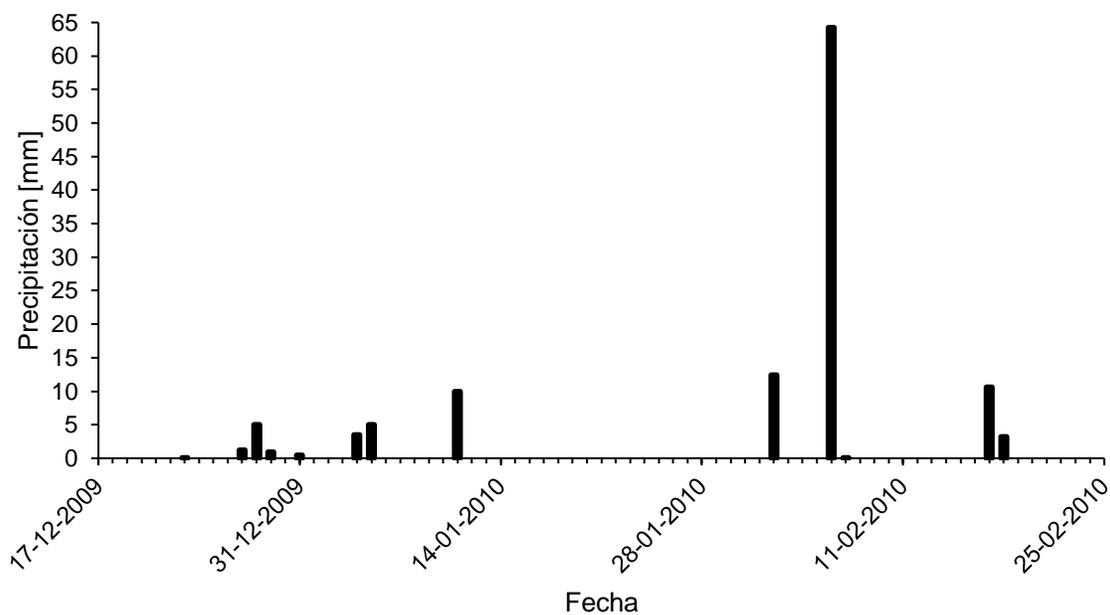
**Figura D-1.** Precipitación en la temporada 2008-2009 (Liguay en Longaví, Red Hidrométrica Nacional DGA, 2022). Fuente: Elaboración propia con datos de <https://explorador.cr2.cl/>



**Figura D-2.** Precipitación en la temporada 2009-2010 (Liguay en Longaví, Red Hidrométrica Nacional DGA, 2022). Fuente: Elaboración propia con datos de <https://explorador.cr2.cl/>



**Figura D-3.** Precipitación en la temporada 2008-2009 (Mulchén, Red Hidrométrica Nacional DGA, 2022). Fuente: Elaboración propia con datos de <https://explorador.cr2.cl/>



**Figura D-4.** Precipitación en la temporada 2009-2010 (Mulchén, Red Hidrométrica Nacional DGA, 2022). Fuente: Elaboración propia con datos de <https://explorador.cr2.cl/>