

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FALCUTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**ANÁLISIS DE RIEGO SUPERFICIAL:**  
**“CRITERIOS DE DISEÑO Y MANEJO EN FRUTALES”**  
**ESTUDIO DE CASO**

**DIEGO MANUEL PALMA PALAVECINOS**

PROYECTO DE TÍTULO  
PRESENTADO A LA FACULTAD  
DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL AGRICOLA

**CHILLÁN-CHILE**

**2022**

**ANÁLISIS DE RIEGO SUPERFICIAL: “CRITERIOS DE DISEÑO Y  
MANEJO EN FRUTALES” ESTUDIO DE CASO**

Aprobado por:

Eduardo Holzapfel Hoces

Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

Profesor Emérito

---

Profesor Guía

Camilo Souto Escalona

Ingeniero Civil Agrícola, Dr.

Profesor Asistente

---

Profesor Co-Guía

Nicole Uslar Valle

Ingeniera Civil Agrícola, Ph.D.

Profesora Asistente

---

Profesora Asesora

Nicole Uslar Valle

Ingeniera Civil Agrícola, Ph.D.

Profesora asistente

---

Directora de Departamento

María Eugenia Gonzales Rodríguez

Ingeniera agrónoma, Ph.D.

Profesora asociada

---

Decana

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi hermano Andrés, mi mamá Rosa y papá Ramón por su apoyo y cariño incondicional. A mi familia, amigos y personas que han hecho de mí la persona que soy.

Al Dr. Eduardo Holzapfel Hoces por darme la posibilidad de hacer mi tesis con él, por darse el tiempo de responder mis dudas en cualquier momento, por sus consejos, su sentido del humor, vocación y en especial, por darme la motivación para seguir estudiando y superarme cada día más.

Al Dr. Camilo Souto Escalona por darme sus sinceros consejos y por tener la mejor de las disposiciones para responder mis dudas.

A los profesores, secretarias y funcionarios de la facultad por contribuir en mi formación. A mis amigos incondicionales que hicieron más ameno esta etapa de mi vida, Pichón, el Chico, Hugo, Oscar, Erick, Meza, Javi y Pablito.

## ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
SUMMARY .....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. Objetivo general .....	7
2.2. Objetivos específicos.....	7
3. ANTECEDENTES GENERALES.....	8
3.1. Sistemas de riego superficiales .....	8
3.1.1. Riego por bordes.....	10
3.1.2. Riego por surcos .....	11
3.2. Suelos .....	12
3.3. Métodos para determinación de la velocidad de infiltración ( <i>VI</i> ) .....	14
3.3.1. Método del surco infiltrómetro .....	16
3.3.2. Método de los dos puntos .....	17
3.3.3. Método del avance .....	19
3.4. Nivelación.....	21
3.4.1. Métodos de nivelación.....	23
3.5. Requerimientos del frutal.....	26
3.6. Eficiencias .....	29
3.6.1. Eficiencia de aplicación .....	29
3.6.2. Eficiencia de requerimiento .....	30
3.6.3. Eficiencia de distribución de requerimiento .....	31
3.6.4. Eficiencia de distribución total .....	31
3.7. Diseño de sistemas de riego .....	32
3.7.1. Determinación de factores de forma del surco .....	36
3.7.2. Correlación entre las eficiencias y las variables de diseño .....	42
3.8. Criterios de diseño.....	44
3.8.1. Caudal.....	44

3.8.2. Espaciamiento entre surcos .....	44
3.8.3. Determinación del largo del surco .....	48
3.8.4. Tiempo de corte .....	60
3.9. Automatización en riego por surco .....	61
3.10. Embalse de regulación .....	66
3.10.1. Análisis de diagrama de masa .....	67
3.10.2. Análisis de máximos secuenciales .....	68
3.10.3. Análisis de optimización .....	68
3.11. Sistemas de aducción .....	72
3.11.1. Análisis hidráulico en sistemas de aducción a baja presión .....	76
3.11.2. Altura de hidrantes .....	79
3.12. Costos .....	83
3.12.1. Costos iniciales .....	83
3.12.2. Costos de operación .....	84
4. METODOLOGÍA .....	86
4.1. Estudio de caso .....	86
4.1.1. Suelo .....	87
4.1.2. Evapotranspiración .....	88
4.1.3. Volumen de agua por día .....	88
4.1.4. Frecuencia de riego .....	89
4.1.5. Volumen total a aplicar .....	90
4.2. Análisis de selección de los parámetros de diseño en riego por surco .....	90
4.2.1. Determinación del caudal máximo no erosivo .....	90
4.2.2. Determinación del tiempo de riego ( $TR$ ) .....	91
4.2.3. Largo del surco .....	92
4.3. Área a regar .....	93
4.3.1. Altura de los hidrantes .....	93
4.4. Tasa de riego .....	95
4.5. Embalse de regulación .....	96
4.6. Manejo de riego .....	98

4.7. Riego por goteo.....	98
4.8. Costos .....	99
4.9. Nivelación.....	99
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	100
5.1. Suelo .....	100
5.2. Evapotranspiración.....	101
5.3. Análisis de selección de los parámetros de diseño en riego por surco .....	102
5.3.1. Caudal máximo no erosivo.....	102
5.3.2. Geometría del surco.....	103
5.3.3. Tiempo de riego .....	103
5.3.4. Largo del surco .....	105
5.4. Caso sistema manual.....	107
5.4.1. Altura de los hidrantes.....	109
5.4.2. Tasa de riego .....	113
5.5. Caso automatizado.....	114
5.5.1. Altura de los hidrantes.....	115
5.5.2. Cálculo del embalse de regulación .....	117
5.5.3. Tasa de riego .....	123
5.6. Manejo de riego.....	123
5.7. Estudio de caso para riego por goteo.....	125
5.8. Costos .....	127
5.9. Nivelación.....	129
6. CONCLUSIÓN.....	131
7. LITERATURA .....	134
8. ANEXO .....	143

En el texto	<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	Página
Tabla 1. Coeficientes para obtener el caudal máximo en litros por segundo.....		36
Tabla 2. Recomendación de largo de surco, dependiendo la textura de suelos. ....		50
Tabla 3. Parámetros físico-hídricos; profundidad de raíces extractantes (Z), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), y densidad aparente (Dap). ....		87
Tabla 4. Coeficientes de infiltración del suelo en cuestión. ....		88
Tabla 5. Geometría del surco .....		90
Tabla 6. Distintos criterios de riego ( <i>CR</i> ) con sus correspondientes alturas de agua aprovechable disponible ( <i>HA</i> ) y volúmenes de suelo humedecido ( <i>Vh</i> ).....		100
Tabla 7. Evapotranspiración de referencia ( <i>ETr</i> ), para distintos días consecutivos y con una probabilidad del 85%. ....		101
Tabla 8. Factores de cobertura asociados al manzano. ....		102
Tabla 9. Caudal máximo no erosivo ( <i>Qmax</i> ) usando las tres ecuaciones descritas, para un suelo franco arcilloso.....		103
Tabla 10. Área transversal del surco ( <i>AT</i> ), caudal total que puede conducir el surco ( <i>QT</i> ), caudal máximo no erosivo ( <i>Qmáx</i> ) y caudal reducido ( <i>Qred</i> ).....		103
Tabla 11. Valores de los parámetros de calidad de acuerdo a distintos tiempos de corte ( <i>Tco</i> ), aplicando un caudal máximo no erosivo ( <i>Qmax</i> ) de 1,12 L s <sup>-1</sup> y un caudal reducido de 0,33 L s <sup>-1</sup> con una longitud surco de 160 m.....		107
Tabla 12. Valores de los parámetros de calidad de acuerdo a distintos tiempos de corte ( <i>Tco</i> ), aplicando un caudal máximo no		

erosivo ( $Q_{max}$ ) de 1,12 L s <sup>-1</sup> y un caudal reducido de 0,45 L s <sup>-1</sup> con una longitud surco de 266 m.....	107
Tabla 13. Costos por hectárea dependiendo del largo de surco a ocupar.....	108
Tabla 14. Tiempo de corte ( $T_{co}$ ), tiempo de avance ( $T_f$ ), caudal máximo no erosivo ( $Q_{max}$ ) y caudal reducido ( $Q_{red}$ ) por cada postura.....	109
Tabla 15. Presión base de cada hidrante (PB) y altura de hidrantes (Ht). .....	112
Tabla 16. Valores de algunos parámetros de calidad, volumen percolado ( $V_{perc}$ ) y volumen de escorrentía ( $V_{es}$ ), de acuerdo a distintos tiempo de corte ( $T_{co}$ ), con un caudal máximo no erosivo de 1,12 L s <sup>-1</sup> y un caudal reducido de 0,45 L s <sup>-1</sup> , y con una longitud de surco de 266 metros. ....	114
Tabla 17. Presión base de cada hidrante (PB) y altura de hidrantes (Ht). .....	117
Tabla 18. Tiempos y caudales implicados en la obtención del embalse de regulación.....	118
Tabla 19. Capacidad máxima requerida ( $K_a$ ) y tiempo que se destina a la entrada de agua al embalse ( $T_{ent}$ ).....	118
Tabla 20. Capacidad máxima requerida ( $K_a$ ) y tiempo que se destina a la entrada de agua al embalse ( $T_{ent}$ ) optimizado. ....	119
Tabla 21. Programación de riego y subunidades de riego simultáneo. ....	125
Tabla 22. Costos asociados a la implementación de un riego por surco manual para una superficie de aproximadamente 46,92 ha. ....	127
Tabla 23. Costos asociados a la implementación de un riego por surco automatizado para una superficie de aproximadamente 46,92 hectáreas.....	128
Tabla 24. Costos por hectárea y diferencia de costos.....	129

Tabla 25. Rangos de nivelación.....	129
-------------------------------------	-----

En el Anexo

Página

Tabla A1. Capacidad máxima requerida ( $Ka$ ) y tiempo que se destina a la entrada de agua al embalse ( $Tent$ ) optimizado para el caso de 160 metros de surco.....	143
--	-----

## ÍNDICE DE FIGURAS

En el texto	Página
Figura 1. Diagrama esquemático de las fases de riego superficial. $t_a$ = tiempo de avance, $t_{co}$ = tiempo de corte, $t_r$ = tiempo de inicio de la fase de recesión, y $t_i$ = tiempo de complementación del riego .....	9
Figura 2. Disposición y componentes de un sistema de nivelación de tierras por GPS .....	25
Figura 3. Estaciones base y móvil de un sistema de nivelación de tierras por GPS. ....	25
Figura 4. Sección conductora de agua en riego por surco. ....	37
Figura 5. Bulbo húmedo para distintos tipos de textura de suelo; suelo arcilloso, suelo franco y suelo de textura arenosa.....	46
Figura 6. Forma del bulbo húmedo a diferentes minutos para un suelo uniforme. ....	46
Figura 7. Forma del bulbo húmedo a diferentes minutos en un suelo no uniforme. ....	46
Figura 8. Análisis mediante el Software “Aquasurco®” para la determinación del largo óptimo. ....	55
Figura 9. Esquema con ejemplo tipo de sistema de aducción con automatización.....	63
Figura 10. Los tres tipos de sistemas de control: (A) bucle abierto, (B) alimentación y (C) retro alimentación (bucle cerrado).....	65
Figura 11. Análisis por diagrama de masas para estimar la capacidad requerida activa de almacenamiento. ....	68
Figura 12. Elevador y campana de distribución.....	78
Figura 13. Subunidad de aducción en riego por surcos para el caso un sistema automatizado .....	82

Figura 14. Área de estudio ..... 86

Figura 15. Distribución de hidrantes en una subunidad con sus respectivas válvulas de huerto .....111

Figura 16. Distribución de hidrantes en una subunidad con sus respectivas válvulas de huerto .....113

Figura 17. Distribución de hidrantes en una subunidad con sus respectivas válvulas de huerto .....117

Figura 18. Configuración de la ubicación de las cajas de distribución, embalse de regulación, válvulas inteligentes y subunidades para el caso de 266 m .....122

Figura 19. Numeración de las subunidades. ....124

Figura 20. Variación de costos con respecto a la cantidad de movimiento de tierra.....130

En el Anexo	Página
Figura A1. Gráfico del coeficiente de Durant.....	143
Figura A 2. Configuración de la ubicación de las cajas de distribución, entrada de agua y subunidades para un largo de 160 metros.....	143
Figura A 3. Ubicación de las cajas de distribución y subunidades a regar para un largo de 160 metros.....	144

**ÍNDICE DE ECUACIONES**

Ecuación 1 .....	14
Ecuación 2.....	14
Ecuación 3.....	16
Ecuación 4.....	17
Ecuación 5.....	17
Ecuación 6.....	18
Ecuación 7 .....	18
Ecuación 8.....	18
Ecuación 9.....	18
Ecuación 10.....	18
Ecuación 11 .....	20
Ecuación 12.....	20
Ecuación 13.....	20
Ecuación 14.....	20
Ecuación 15.....	21
Ecuación 16.....	27
Ecuación 17 .....	28

Ecuación 18.....	28
Ecuación 19.....	30
Ecuación 20.....	30
Ecuación 21.....	31
Ecuación 22.....	32
Ecuación 23.....	33
Ecuación 24.....	33
Ecuación 25.....	34
Ecuación 26.....	34
Ecuación 27.....	34
Ecuación 28.....	35
Ecuación 29.....	37
Ecuación 30.....	38
Ecuación 31.....	39
Ecuación 32.....	39
Ecuación 33.....	39
Ecuación 34.....	39
Ecuación 35.....	39
Ecuación 36.....	40

Ecuación 37.....	40
Ecuación 38.....	41
Ecuación 39.....	41
Ecuación 40.....	41
Ecuación 41.....	42
Ecuación 42.....	42
Ecuación 43.....	47
Ecuación 44.....	48
Ecuación 45.....	49
Ecuación 46.....	49
Ecuación 47.....	52
Ecuación 48.....	52
Ecuación 49.....	53
Ecuación 50.....	53
Ecuación 51.....	54
Ecuación 52.....	54
Ecuación 53.....	56
Ecuación 54.....	57
Ecuación 55.....	57

Ecuación 56.....	58
Ecuación 57.....	58
Ecuación 58.....	59
Ecuación 59.....	59
Ecuación 60.....	60
Ecuación 61.....	60
Ecuación 62.....	67
Ecuación 63.....	67
Ecuación 64.....	68
Ecuación 65.....	68
Ecuación 66.....	69
Ecuación 67.....	69
Ecuación 68.....	69
Ecuación 69.....	70
Ecuación 70.....	79
Ecuación 71.....	80
Ecuación 72.....	80
Ecuación 73.....	81
Ecuación 74.....	81

Ecuación 75.....	87
Ecuación 76.....	88
Ecuación 77.....	88
Ecuación 78.....	89
Ecuación 79.....	90
Ecuación 80.....	91
Ecuación 81.....	91
Ecuación 82.....	91
Ecuación 83.....	94
Ecuación 84.....	95
Ecuación 85.....	98
Ecuación 86.....	99

## **ANÁLISIS DE RIEGO SUPERFICIAL “CRITERIOS DE DISEÑO Y MANEJO EN FRUTALES”: ESTUDIO DE CASO**

### **SURFACE IRRIGATION ANALYSIS: “DESIGN AND MANAGEMENT CRITERIA IN ORCHARDS”: A CASE STUDY**

**Palabras claves:** Automatización, embalse de regulación, tasa de riego.

#### **RESUMEN**

El objetivo del presente estudio fue desarrollar criterios de diseño y manejo para riego por surco en frutales con diferentes grados de automatización. Se analizaron los parámetros del suelo y planta, demanda de agua, y el uso de modelos físicos para incrementar el uso eficiente del agua. Se desarrollaron criterios de diseño de riego por surco asociados a los parámetros de eficiencia con las variables de diseño. Además, se analizó el costo de implementación y operación en riego superficial bajo diferentes niveles de automatización. Se comparó el sistema asociado al riego por surco con embalse de regulación utilizando válvulas inteligentes y riego manual. Para las evaluaciones, se llevó a cabo un estudio de caso en la Comuna de Chillán, utilizando el Manzano variedad Gala Brookfield con portainjertos M.9. Los resultados mostraron que se puede llegar a eficiencias de aplicación, requerimiento y distribución total por sobre el 85% ocupando un sistema automatizado y seleccionando criterios de diseño de riego por surco apropiados. La tasa de riego ( $T_R$ ) para el mes de

máxima demanda fue de  $54,73 \text{ L s}^{-1}$  para el caso automatizado con embalse de regulación. Sin embargo, el sistema manual sin dicha estructura tiene una tasa de riego de  $75,78 \text{ L s}^{-1}$  para regar la misma área. Los costos por hectárea asociados a un sistema de riego por surco con automatización y manual fueron de 49,08 UF y 41,48 UF, respectivamente. En ambos casos, si el costo de nivelación de terreno es mayor a 61,19 UF, el riego por surco no es competitivo con el microriego.

## SURFACE IRRIGATION ANALYSIS “DESIGN AND MANAGEMENT CRITERIA IN FRUIT TREE ORCHARDS”: A CASE STUDY

**Key words:** Regulating reservoir, automation level, irrigation rate.

### **SUMMARY**

The objective of this study was to develop design and management criteria for furrow irrigation in fruit tree orchards with different levels of automation. Soil and plant parameters, water demand as well as the use of physical models to increase water use efficiency were analyzed. Irrigation design criteria for furrow irrigation related to efficiency parameters with design variables were developed. In addition, implementation and operation costs of surface irrigation under different levels of automation were analyzed. The system associated with furrow irrigation with regulation reservoir using smart valves was compared with manual irrigation. For the evaluations, a case study was carried out in the Commune of Chillán, using apple trees variety Gala Brookfield with M.9 rootstock. The results showed that application, requirement, and total distribution efficiencies of over 85% can be achieved by using an automated system and selecting appropriate furrow irrigation design criteria. The irrigation rate ( $TR$ ) for the month of maximum demand was  $54,73 \text{ L s}^{-1}$  for the automated case with regulation reservoir. However, the manual system without such structure has an irrigation rate of  $75,78 \text{ L s}^{-1}$  to irrigate the same area. The costs associated with a furrow irrigation system with automation and manual

irrigation were 49,08 UF and 41,48 UF per hectare, respectively. In both cases for land leveling costs greater than 61,19 UF, furrow irrigation is not competitive with micro-irrigation.

## 1. INTRODUCCIÓN

El riego tiene como objetivo básico reponer al suelo el déficit de humedad que resulta de la insuficiencia de la precipitación para compensar la evapotranspiración de los cultivos y frutales. Complementariamente asegura la lixiviación de sales para mantener un balance de sales en el suelo y mejora las condiciones ambientales para la producción agrícola (Holzapfel, 2020). De todos los métodos de riego que existen, este trabajo se enfocará en el riego superficial.

El desafío que existe hoy en ingeniería con lo que respecta al riego superficial es conseguir una mayor automatización, diseño y manejo, de tal forma de conseguir una alta eficiencia y uniformidad de riego y minimizar las pérdidas por escorrentía superficial y percolación profunda. Actualmente, los métodos de riego superficiales se han visto opacados por los métodos de riego presurizado, debido al desconocimiento de cómo obtener condiciones de eficiencia similares a estos últimos. Esto es debido, a la dificultad de manejar los sistemas de riego superficiales y al nulo diseño ingenieril de los sistemas. El riego superficial requiere para su buen manejo, un apropiado conocimiento de las características del suelo, de la topografía, del cultivo, de la disponibilidad de agua y las condiciones climáticas. Además de saber los parámetros de diseño, como por ejemplo para riego por surcos: caudal máximo no erosivo, tiempo de corte, largo óptimo del surco y número de surcos por hilera.

Por otro parte, los métodos de riego superficiales han tomado una gran relevancia para algunos agricultores, debido a que los métodos de riego presurizados tienen elevados costos de energía y que los métodos de riego superficiales se están automatizando cada vez más.

El riego superficial puede realizarse de varias maneras, como por ejemplo en contorno, surco o platabanda (Walker y Skogerboe, 1987); en cada caso, el agua fluye en canales abiertos sobre la superficie del suelo. El agua puede ser encauzada por pequeños canales denominados surcos o en delgadas láminas sobre suelos muy bien nivelados como es el caso de las platabandas. Para este caso en específico, se analizará el riego por surco, se tratarán temas de diseño y manejo para obtener mejores eficiencias de aplicación, requerimiento y distribución total. Además se hará una comparación del diseño de riego por surco con o sin embalse de regulación, evaluación de condiciones de automatización y hasta qué punto es rentable nivelar un suelo para la instalación de este riego. Todo esto anterior, se hará en base de un estudio de caso.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Desarrollar criterios de diseño y manejo de riego superficial en frutales con diferentes grados de automatización relacionado con un estudio de caso.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Analizar los parámetros de eficiencia asociados al riego por surco.
- Estudiar diferentes criterios de diseño en riego por surco.
- Evaluar los costos de implementación dentro de un diseño de riego superficial bajo diferentes niveles de automatización.
- Comparar un sistema de riego superficial con o sin embalse de regulación.

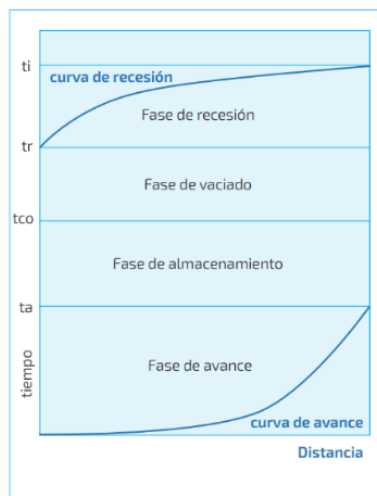
### **3. ANTECEDENTES GENERALES**

#### **3.1. Sistemas de riego superficiales**

Los métodos de riego superficiales tienen ciertos principios en común. El agua es entregada al surco o platabanda en la parte más alta, fluyendo hacia las regiones más bajas en la medida que al mismo tiempo esta se va infiltrando en el suelo. Con respecto a la uniformidad de distribución de agua sobre el surco o platabanda podría parecer poco creíble, debido a que, ineludiblemente entrará más agua en la cabecera (inicio del surco o platabanda) que al pie (final del surco o platabanda). Aunque sea una tendencia, es posible minimizar la desuniformidad y obtener eficiencias con riego superficial comparables a los de riego presurizado. Esto se puede lograr dividiendo el sector a regar en unidades de tamaño apropiado, aplicando tiempos de riego acordes con el tipo de suelo y la profundidad radical, y regulando el caudal a aplicar de acuerdo con la pendiente del suelo y el tipo de cultivo entre las hileras del frutal (Holzapfel, 1993). En este riego, el rendimiento se ve afectado por la velocidad de infiltración del agua en el suelo, el caudal de entrada, la pendiente del campo, el tiempo de riego, el tiempo de recesión del agua en la superficie del suelo, la humedad del suelo antes del riego, la variabilidad espacial del suelo, las condiciones climáticas, y la forma del surco (Holzapfel *et al.*, 1985).

El riego superficial se caracteriza por estar compuesto por cuatro fases: avance, almacenamiento, vaciado y recesión (Holzapfel *et al.*, 1984; Walker y

Skogerboe, 1987). La diferencia entre la fase de avance y recesión se le conoce como tiempo de oportunidad.



**Figura 1.** Diagrama esquemático de las fases de riego superficial.  $t_a$  = tiempo de avance,  $t_{co}$  = tiempo de corte,  $t_r$  = tiempo de inicio de la fase de recesión, y  $t_i$  = tiempo de complementación del riego. Fuente: Holzapfel, 2020.

### Fase de avance

Ocurre desde el inicio del riego hasta que el agua alcanza el extremo final del surco. El tiempo de duración de esta fase se denomina tiempo de avance ( $T_{av}$ ) (Rodríguez, 2007).

### Fase de almacenamiento

Esta fase empieza cuando la fase de avance es completada y termina cuando se llega al tiempo de corte (Walker y Skogerboe, 1987).

### **Fase de vaciado**

La fase de vaciado comienza en el tiempo de corte, la altura de agua en el surco disminuye periódicamente. Esta fase termina cuando al inicio del surco desaparece el agua de la superficie del suelo (Walker y Skogerboe, 1987; Basset *et al.*, 1980).

### **Fase de recesión**

La fase de recesión termina cuando el agua superficial desaparece en cada punto del surco (Walker y Skogerboe, 1987; Basset *et al.*, 1980).

El riego superficial se puede realizar de varias maneras. Los métodos de riego superficiales más utilizados en el mundo son el riego por borde y el riego por surco (Walker y Skogerboe, 1987).

La fase de vaciado y recesión en riego por surco, no son tan importantes en comparación con las fases de avance y almacenamiento, porque el volumen de agua que queda después del tiempo de corte en el surco es un pequeño porcentaje del volumen total de agua aplicado (Holzapfel *et al.*, 1984).

#### **3.1.1. Riego por bordes**

El riego por platabandas (bordes) se caracteriza por la aplicación controlada de una lámina de agua que avanza en el sentido de los bordes. Requiere grandes caudales (2 a 6 L s<sup>-1</sup> por metro de ancho), una buena nivelación entre los bordes para permitir una aplicación homogénea del agua a través del área, una casi horizontalidad entre los diques o como máximo una diferencia de un

25% de la altura de perfil de agua en la platabanda. La pendiente en el sentido del flujo debe ser mayor a 0,2% para evitar periodos de inundación prolongados y menor a 2% para evitar problemas de erosión (Holzapfel, 1993). En general, el riego por platabandas se ha utilizado para cultivos de alta densidad de siembra. Sin embargo, también se ocupa para el riego de frutales, prioritariamente en el suelo con baja velocidad de infiltración y bajo condiciones microambientales favorables al frutal.

### **3.1.2. Riego por surcos**

El riego por surcos consiste en la entrega de agua a través de surcos, trazados en la misma dirección de la plantación, en los cuales se les suministra el agua a través de un sistema de aducción específico (sifones, tubos rectos, mangas plásticas o sistemas de baja presión). Recientemente, el riego por surcos ha cobrado importancia debido al elevado coste energético de los métodos de presurizados y la incorporación de la automatización en su funcionamiento.

A diferencia del riego tendido, en el riego por surcos se moja solamente una parte de la superficie del suelo (normalmente entre un quinto y un medio). Por este motivo, el riego por surcos es el más adecuado para aquellos suelos que tienen tendencia a formar costra al secarse, situación que daña a las plantas que recién germinan. Hay que tener especial precaución en condiciones de suelos salinos o agua con alta cantidad de sales por la movilidad de estas a la zona de raíces de los frutales o cultivos (Holzapfel *et al.*, 2021).

### 3.2. Suelos

El suelo tiene un gran efecto sobre el manejo y diseño de sistemas de riego superficiales, ya que, dependiendo de la textura que tenga el suelo, condicionará la velocidad de infiltración de agua y la cantidad que se almacenará en este. Además, la forma y desarrollo que adquiere el bulbo de humedecimiento, está estrechamente ligada a las características del suelo (Holzapfel, 1993). La velocidad de infiltración del suelo establecerá, en base de los requerimientos del cultivo, el tiempo de riego.

Los suelos se clasifican en: suelos de textura gruesa (livianos), suelos de textura fina (pesados) y suelos de textura media. Donde, los suelos de textura gruesa infiltran el agua rápidamente (poros y partículas minerales más grandes) y tienen una mayor infiltración básica pero son de baja retención de humedad. Suelen ser poco fértiles y propensos al lavado de nutrientes. Los suelos de textura fina poseen una alta capacidad de retención de humedad y suelen presentar baja infiltración. Finalmente, los suelos de textura media son de drenaje moderado, infiltración media y corresponden a la situación más favorable para el desarrollo de los cultivos.

El agua se infiltra a través del perímetro húmedo de la sección transversal del surco. La interfaz entre el suelo húmedo y el seco desciende del perímetro mojado como un frente húmedo con sección transversal circular o elíptica. En el suelo no saturado, los movimientos de agua son causados por la capilaridad y la gravedad. Los movimientos horizontales y ascendentes son causados por

los gradientes de potencial mátrico. Los movimientos verticales y descendentes dependen tanto del gradiente de potencial mátrico como del gravitacional. Toda la humedad de las capas superiores de la masa del suelo en la cima de los surcos es causada por el movimiento capilar lateral y ascendente (Grassi, 1972).

En lo que respecta, de elegir cual es la textura de suelo más adecuada para el riego por surco, diversos autores han realizado sus investigaciones bajo ciertos tipos de textura de suelo, como por ejemplo: Holzapfel *et al.* (1984) franco arcilloso, Eldeiry *et al.* (1995) suelos arcillosos, Holzapfel *et al.* (2010) suelos derivados de cenizas volcánicas, y Gillies y Smith (2015) franco arcilloso. Una buena elección es elegir un suelo franco a arcillosos, debido a que en estos suelos al tener un tiempo de riego superior a las dos horas, la variación de infiltración en los extremos del surco es mínima (Holzapfel *et al.*, 1988). Aunque exista una coincidencia bastante clara en lo que respecta la textura de suelo, para el caso de riego por surcos con aplicación pulsada, los suelos de textura fina responden en forma menos eficiente a esta aplicación que suelos con textura más gruesa que presentan tasas de infiltración inicial más alta (Gonzales, 1999). Sin embargo, Brouwer *et al.* (1988) no recomienda las arenas muy gruesas, ya que las pérdidas por percolación pueden ser elevadas.

### 3.3. Métodos para determinación de la velocidad de infiltración (*VI*)

La infiltración es el parámetro de suelo más importante en el diseño y evaluación de los métodos de riego. El papel de la infiltración difiere con cada método de riego. En el riego superficial, la infiltración afecta al avance del frente de agua y la desaparición del agua de la superficie del suelo después del tiempo de corte (Holzapfel *et al.*, 1984).

La predicción de la tasa de infiltración del suelo implica la adopción de una forma funcional para ser usada en la determinación del valor de las constantes en la ecuación adoptada. Clemmens (1983) citado por Holzapfel *et al.* (1988) recomendó el uso de las ecuaciones de Kostiakov o de la Kostiakov modificadas para fines de riego, porque describen el proceso de infiltración razonablemente bien.

$$D = AT^B \text{ (Kostiakov)} \quad [1]$$

[2]

$$D = AT^B + CT \text{ (Kostiakov – Lewis)}$$

Donde,

$D$  = Volumen de agua infiltrada ( $m^3 m^{-1}$ )

$T$  = Tiempo que ha estado el agua en contacto con el suelo (min)

$A, B$  y  $C$  = Constantes.

Por otro lado, el segundo término de la Ecuación 2 puede despreciarse para suelos arcillosos y derivados de ceniza volcánica (Holzapfel *et al.*, 1988).

Para la determinación de las constantes de la ecuación de Kostiakov, con el fin de determinar la infiltración en riego por surco, se describirán cuatro metodologías evaluadas por Holzapfel *et al.* (2004): método del surco infiltrómetro, método de los dos puntos, método de un punto y método del avance. Sin embargo, Holzapfel *et al.* (2004) obtuvieron los resultados más pobres utilizando las constantes de Kostiakov determinadas a partir del método de un punto, para determinar la infiltración en el riego por surco. Por lo tanto, no es recomendable tomar en cuenta el método anterior como propósito de análisis. Por otro lado, las constantes de infiltración pueden diferir dependiendo de su forma y metodología para obtenerse. En general, las curvas de infiltración acumulada para los surcos estrechos son bastante similares, independientemente de la técnica de infiltración utilizada. En cambio, para los surcos anchos las curvas de infiltración acumulada dependen del método de infiltración utilizado. El valor de la constante B de la ecuación de Kostiakov no difiere significativamente para cada método y tamaño de surco. Sin embargo, el valor de A muestra ciertas diferencias entre los métodos utilizados, así como entre los tamaños de los surcos (Holzapfel *et al.*, 2004).

### 3.3.1. Método del surco infiltrómetro

El surco infiltrómetro ha sido descrito por Criddle *et al.* (1956) citado por Holzapfel *et al.* (2004). Este método requiere mediciones del caudal en la entrada y salida del surco, así como también la longitud del surco y el perímetro mojado. La tasa de infiltración es calculada de la siguiente forma:

$$VI(t) = \frac{Q_i - Q_o}{L WP} \quad [3]$$

Donde,

$VI(t)$  = Tasa de infiltración en el tiempo  $t$  ( $m^3 \text{ min}^{-1} m^{-2}$ ).

$Q_i$  = Caudal en la entrada del surco ( $m^3 m^{-1}$ ).

$L$  = Largo del surco (m).

$WP$  = Perímetro mojado (m).

La ventaja del surco infiltrómetro es que toma en cuenta una longitud representativa del surco. Sin embargo, sólo se obtiene un valor promedio de la infiltración. Integrando esta tasa de infiltración, se pueden obtener los valores de las constantes  $A$  y  $B$  de la ecuación de infiltración acumulada. Holzapfel *et al.* (1988), recomiendan que para diseñar y/o evaluar el riego por surcos, la infiltración se mide mejor ocupando el método del surco infiltrómetro.

### 3.3.2. Método de los dos puntos

Elliot y Walker (1982) citado por Holzapfel *et al.* (2004), desarrollaron una técnica simplificada para determinar las constantes de la ecuación de infiltración de Kostiakov, sobre la base de la relación entre el avance del frente del agua en el surco y el tiempo de avance del frente del agua. Las ecuaciones generales utilizadas para determinar las constantes son:

$$D_i = \frac{FAT^B}{B+1} + \frac{CT}{r+1} \quad [4]$$

Donde,

$D_i$  = Volumen promedio por unidad de longitud en el tiempo  $T$ .

$F$  = Factor Kiefer.

$r$  = Constante de potencia de la ecuación de avance.

$A$ ,  $B$  y  $C$  = Constantes de las ecuaciones de Kostiakov y Kostiakov-Lewis, respectivamente (en nuestro caso  $C=0$ ).

El factor  $F$  está determinado de la siguiente forma:

$$F = \frac{B+r-rB+1}{(1+B)(r+1)} \quad [5]$$

Y la función de avance de la potencia está representada por:

$$X = pT^r \quad [6]$$

Donde,

$X$  = Distancia que el agua ha avanzado a lo largo del surco (m).

$T$  =Tiempo de avance (min)

$p$  y  $r$  = Constantes.

En concreto, se utilizan las siguientes ecuaciones para determinar los valores de A y B:

$$A = \frac{\alpha(B + 1)(r + 1)}{(B + r - rB + 1)T_L^B} \quad [7]$$

$$B = \frac{\ln(\alpha/\beta)}{\ln(T_L/T_{L/2})} \quad [8]$$

En el que,

$$\alpha = \frac{V_L}{L} - S_{s,L} \quad [9]$$

$$\beta = \frac{V_{L/2}}{L/2} - S_{s,L/2} \quad [10]$$

Donde,

$T_L$  = Tiempo de avance a la distancia L (m).

$T_{L/2}$  = Tiempo de avance a la distancia  $L/2$  (min).

$S_{s,L}$  = Área de la sección transversal a la distancia  $L$  ( $m^2$ ).

$S_{s,L/2}$  = Área de la sección transversal a la distancia  $L/2$  ( $m^2$ ).

$V_L$  = Volumen de entrada en el surco a una distancia  $L$  ( $Q_i T_L$ ) ( $m^3$ ).

$V_{L/2}$  = Volumen del flujo a la distancia  $L/2$  ( $Q_i T_{L/2}$ ) ( $m^3$ ).

$Q_i$  = Caudal de entrada ( $m^3 \text{ min}^{-1}$ ).

Para el método de los dos puntos, el volumen de agua en el surco se estima como el producto de la sección transversal a la entrada del surco y la longitud del frente del agua por un factor de forma que oscila entre 0,5 a 1,0, pero que suele tomarse como 0,8 (Strelkoff, 1985; citado por Holzapfel *et al.* (2004)). La metodología es muy simple de usar y operar dentro de un campo, debido a que sólo requiere el tiempo de avance en dos puntos a lo largo del surco, el caudal de entrada y el área de la sección transversal del flujo de entrada del surco. Sin embargo, la desventaja de este método es que requiere una pendiente uniforme, rugosidad y el área de la sección transversal. Para un surco ancho, el método de los dos puntos muestra un mejor ajuste (Holzapfel *et al.*, 2004).

### 3.3.3. Método del avance

Esta metodología ha sido descrita por Benami y Ofen (1984) citada por Holzapfel *et al.* (2004) para determinar las constantes de infiltración de Kostiaikov ( $VI = KT^n$ ), en base del avance del frente de agua en el surco. Para

obtención de las constantes de la tasa de infiltración, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$T = WX^Z \quad [11]$$

Donde,

$T$  = Tiempo de avance del frente de agua (min) a una distancia  $X$  (m).

$W$  y  $Z$  = Constantes.

$$Q_i T - SX = \frac{KW^{(n+1)}X^{(Z(n+1)+1)}}{(n+1)[Z(n+1)+1]} \quad [12]$$

Donde,

$Q_i$  = Flujo de entrada ( $m^3 \text{ min}^{-1}$ ).

$T$  = Tiempo de avance del frente de agua (min) para una distancia  $X$  (m),

$S$  = Área promedio de la sección transversal del flujo ( $m^2$ ).

$n$  y  $K$  = Constantes de la ecuación de la tasa de infiltración de Kostiakov.

Reordenando los términos constantes de la Ecuación 12, se obtiene:

$$U = Z(n+1) + 1 \quad [13]$$

$$M = \frac{KW^{(n+1)}}{(n+1)[Z(n+1)+1]} \quad [14]$$

De ello se desprende que:

$$Q_i T - SX = MX^U \quad [15]$$

Los datos de avance y volumen de agua infiltrada se ajustaron con una regresión exponencial  $Q_i T - SX$  versus  $X$ , donde  $M$  es el valor de volumen infiltrado ( $Q_i T - SX$ ) a la distancia  $X = 1$ , y  $U$  es la pendiente del surco.

Este método estima el valor del agua en la superficie teniendo en cuenta los valores promedios de la zona a lo largo del recorrido. Esta metodología supone que las características de infiltración a lo largo del surco son homogéneas, así como el área de la sección transversal del surco. Esta técnica requiere de varias mediciones a diferentes tiempos de avance del frente de agua. La ventaja de este método es que puede describir con precisión el proceso de infiltración. Sin embargo, requiere de una gran cantidad de mediciones sobre el terreno.

### **3.4. Nivelación**

La nivelación de terreno se utiliza en la agricultura para modificar la topografía del terreno con el fin de crear una superficie de terreno deseada, con pendientes de campo seleccionadas, lo que afecta el movimiento del agua en la superficie del suelo, mejorando el riego y el drenaje, y las eficiencias de las operaciones del cultivo (Miao *et al.*, 2021). El relieve del terreno es un factor que tiene una vital importancia en el desempeño de los métodos superficiales. Áreas de micro-relieve heterogéneo, con elevadas pendientes provocan

marcadas variaciones en los niveles de agua aplicada a través de ella, y pérdidas excesivas de agua (Holzapfel, 1993).

Holzapfel (2020) explica que nivelar un terreno es una acción básica para un buen manejo y diseño de un método de riego superficial, cuya realización es un tema netamente económico, ya que, generalmente es de elevado costo y debe compararse con los costos de implementar riego presurizado, método que no requiere nivelar. Holzapfel (1993) recomienda que pendientes óptimas del suelo están entre 0,2 y 0,5% se deben nivelar adecuadamente para evitar zonas de inundación siendo la pendiente máxima permisible del surco del orden del 1,5% para evitar problemas de erosión. Walker y Skogerboe (1987) recomiendan asegurarse de que el suelo sea lo suficientemente profundo como para que, tras la nivelación, quede una zona para el desarrollo radical utilizable que permita la producción de cultivos.

Zúñiga (2019) explica que la nivelación de suelos mediante el uso de tecnologías láser tradicional y GPS permite un mayor avance en la preparación de los terrenos para los próximos ciclos del cultivo y mayor eficiencia en las actividades agrícolas. Con el uso de tecnología tradicional y/o tecnología láser se puede lograr nivelar el terreno agrícola con alta precisión y esto permite un avance del agua de manera más uniforme, vertical y horizontalmente, con lo cual se logran eficiencias de riego hasta un 85% (Navarro, 2018). Es importante resaltar que la nivelación es una acción que se requiere una sola vez, para establecer su análisis económico.

### 3.4.1. Métodos de nivelación

#### 3.4.1.1. Nivelación láser

La nivelación con el sistema de láser tradicional tiene como fundamento la copia en el suelo de un plano de luz formada por un emisor. Un transmisor colocado sobre un trípode o una torre en el terreno a nivelar emite un rayo láser que gira 600 rpm y forma un plano de luz con un alcance de precisión hasta 600 m de radio dependiendo del tipo de aparato. Este plano se ajusta a una pendiente (Cruz, 2009; citado por Zúñiga, 2019).

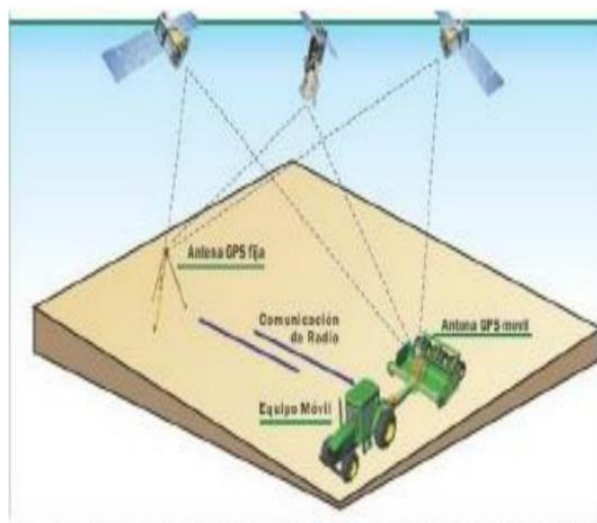
El sistema receptor, colocado en el palón o pala de arrastre, tiene la función de mantener el nivel de la cuchilla paralelo al plano de referencia; cuando el equipo pasa por una parte alta, el receptor ordena a la cuchilla bajar y cortar, cuando se encuentra en un bajo, se ordena a la cuchilla subir para descargar tierra. El operador recibe las indicaciones en un tablero ubicado en la cabina con tres luces de colores, que le indican la ubicación del plano láser, superior, intermedio e inferior rojo, verde y amarillo, respectivamente; se deberá operar con la luz verde que indica que el receptor está bien ubicado en el plano de la luz. El tractor tiene que tener la potencia adecuada y el sistema hidráulico debe ser lo suficientemente fuerte para trabajar con la frecuencia de ajuste que el láser impone.

Xu *et al.*, (2007) citado por Chen *et al.*, (2021) explican que las máquinas de nivelación del terreno por láser pueden garantizar una nivelación precisa de las tierras de cultivo, mejorando eficazmente las condiciones micro-

topográficas de estas. Chen *et al.*, (2021) compararon el rendimiento de un cultivo bajo condiciones de agricultura convencional y siembra de precisión con nivelación laser, siendo esta última, la que dio como resultado mayor rendimiento.

#### **3.4.1.2. Nivelación por GPS**

Un sistema típico de nivelación de tierra con control GPS está compuesto de: un receptor, sistema de comunicación y caja de control (Figura 2). Los componentes de recepción, procesamiento y transmisión de la información del sistema están integrados en una estación base, utilizada como referencia, y una estación móvil, montada en la escarpa y en el tractor (Figura 3). En la estación base se instala una antena que recibe la señal de los satélites para posteriormente ser registradas y procesados por un receptor para calcular las coordenadas (X, Y, Z) y las correcciones a realizarse a las coordenadas obtenidas por la estación móvil. Luego las correcciones a realizarse son enviadas a una o más estaciones móviles a través de radio para determinar la posición del o los equipos móviles en todo momento.



**Figura 2.** Disposición y componentes de un sistema de nivelación de tierras por GPS. Fuente: Prado y Hernández, 2014.



**Figura 3.** Estaciones base y móvil de un sistema de nivelación de tierras por GPS. Fuente: Prado y Hernández, 2014.

Los diversos componentes se unen entre sí mediante cables. Los que hacen posible la comunicación entre la antena GPS, la caja del receptor, la caja de control y las válvulas hidráulicas. El receptor GPS envía información de posición y elevación a la caja de control la que compara la posición real frente

a las posiciones deseadas; en caso de ser necesaria una corrección, la caja de control envía una señal a la válvula hidráulica, la cual eleva o baja el equipo hasta que alcance el nivel requerido (Prado y Hernández, 2014).

Zúñiga (2019) concluyó que uno de los parámetros específicos entre la nivelación láser (convencional) y la nivelación GPS es el costo de adquisición y operación, ya que la inversión de un sistema GPS es más elevada. Prado y Hernández (2014) muestran que las ventajas y desventajas comparativas de las tecnologías láser y GPS, no favorecen la emigración masiva de los usuarios de rayo láser hacia los sistemas de control GPS.

### **3.5. Requerimientos del frutal**

La planta absorbe el agua desde el suelo por sus raíces y la conduce hacia las hojas, desde donde sale en forma de vapor de agua a la atmósfera. Ambos, suelo y planta, están sometidos a los efectos de la lluvia, el sol y el viento, los que generan un mayor o menor grado de transpiración de las plantas y de evaporación desde el suelo. Este proceso se le conoce como evapotranspiración (Jara, 2021). Diversas metodologías se han propuesto para su determinación, debiendo considerarse que la evapotranspiración depende, entre otros aspectos, de las condiciones climáticas, tipo y estado de desarrollo del cultivo, y de la disponibilidad de agua en el suelo (Jara, 2020).

Allen *et al.* (2005) recomiendan que hay que adoptar dos tipos de evapotranspiración de referencia. Una para cultivo corto (trébol blanco-ballica) y otro para cultivo largo (alfalfa).

La evapotranspiración de referencia ( $ET_r$  o  $ET_{sz}$ ):

$$ET_{sz} = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad [16]$$

Donde,

$ET_{sz}$  = Evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>).

$R_n$  = Radiación neta calculada en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>).

$G$  = Densidad de flujo de calor en el suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>).

$T$  = Temperatura media diaria u horaria del aire a 1,5 o 2,5 m de altura (°C).

$u_2$  = Velocidad media diaria u horaria del viento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>).

$e_s$  = Presión de vapor a saturación a una altura de 1,5 a 2,5 m (kPa).

$e_a$  = Presión de vapor actual de 1,5 a 2,5 m de altura (kPa).

$\Delta$  = Pendiente de la curva de la presión de vapor de saturación-temperatura (kPa °C<sup>-1</sup>).

$\gamma$  = Constante psicométrica (kPa °C<sup>-1</sup>).

$C_d$  = Constante del denominador, que cambia con el tiempo de medición.

$C_n$  = Constante del numerador, que cambia con el intervalo de tiempo de medición.

Para el caso específico de la estimación de la evapotranspiración de cultivo ( $ET_c$ ) en frutales, resulta conveniente introducir un factor que considere la cobertura vegetal o área foliar, debido a que las diferentes técnicas de cultivo como cambios en la distancia de plantación, uso de variedades más pequeñas, sistema de poda y conducción pueden hacerla variar fuertemente durante los 3 a 5 años. Así la ecuación recomendada es:

$$ET_c = ET_r(F_1P + F_2) \quad [17]$$

Donde,

$ET_c$  = Evapotranspiración de cultivo o también llamada actual ( $\text{mm día}^{-1}$ ).

$ET_r$  = Evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ ).

$F_1$  y  $F_2$  = Factores asociados al cultivo.

$P$  = Fracción de sombreado al medio día solar ( $0,1 < P < 0,7$ ).

La fracción de sombreado al medio día ( $P$ ), se puede obtener para la mayoría de los cultivos en función de la sombra proyectada por las hojas y el marco de plantación:

$$P = \frac{\pi D_s^2}{4E_{eh}E_{es}} \quad [18]$$

Donde,

$D_s$  = Diámetro promedio de la sombra proyectada en el suelo por las hojas del árbol al medio día solar (m).

$E_{eh}$  = Espaciamiento de los árboles entre hileras (m).

$E_{sh}$  = Espaciamiento de los árboles sobre hilera (m).

$P$  = Proyección de la sombra del árbol en el suelo.

Esta proyección puede requerir varias mediciones a medio día solar para obtener un valor promedio representativo de la plantación. Jara (2020) recomienda que la hora de medición en Chile va desde las 11:00 a las 15:00 hrs, desde noviembre a marzo.

### **3.6. Eficiencias**

El rendimiento de un método de riego se puede evaluar determinando si satisface las necesidades hídricas del cultivo/frutal y el grado de uniformidad del agua aplicada distribuida a lo largo del campo (Holzapfel *et al.*, 1985). El agua aplicada para riego debe: (1) satisfacer las necesidades de agua para el cultivo/frutal durante el tiempo de riego; (2) no exceder en la capacidad de almacenamiento de agua disponible en el perfil de suelo; (3) evitar la lixiviación de sales por encima de lo necesario para prevenir la salinización del suelo y la escorrentía excesiva; (4) mínima erosión y el deterioro de la estructura del suelo. A continuación, se muestran las diferentes eficiencias para poder evaluar el rendimiento de cada riego:

#### **3.6.1. Eficiencia de aplicación**

Zerihun *et al.* (2001) citado por Holzapfel *et al.* (2010) definió la eficiencia de aplicación ( $EA$ ) como la relación entre el volumen de agua retenido en la zona

radical del perfil del suelo después del riego y el volumen total de agua aplicada durante el proceso de riego.

$$EA = \frac{\int_0^L Z dx - \int_0^{L_u} Z dx + Z_r L_u}{Cu \int_0^{T_{co}} Q_0 dt} * 100 \quad [19]$$

Donde,

$L$  = Largo del surco (m).

$Z_r$  = Volumen de agua que requiere el cultivo/frutal en cada riego y es obtenido por el programa de riego ( $m^3 m^{-1}$ ).

$L_u$  = Largo del surco donde la cantidad agua infiltrada es igual o superior a  $Z_r$  ( $m^3 m^{-1}$ ).

$Cu$  = Factor de conversión de unidades ( $10^{-3} m^3 L^{-1}$ ).

$Q_0$  = Tasa de flujo de entrada ( $L min^{-1}$ ).

$T_{co}$  = Tiempo de corte para un riego (min)

$Z$  = Cantidad de agua infiltrada ( $m^3 m^{-1}$ ).

### 3.6.2. Eficiencia de requerimiento

La eficiencia de requerimiento ( $ER$ ) mide la eficiencia de la cantidad de agua almacenada en la zona de raíces después del riego (Zerihun *et al.*, 2001):

$$ER = \frac{\int_0^L Z dx - \int_0^{L_u} Z dx + Z_r L_u}{Z_r L} * 100 \quad [20]$$

### 3.6.3. Eficiencia de distribución de requerimiento

La eficiencia de distribución de requerimiento (*EDR*) mide los efectos de la distribución del agua aplicada en relación con las necesidades de agua del cultivos/frutales (Holzapfel *et al.*, 1985) y supone que el rendimiento de los cultivos/frutales no se ve afectado por el exceso de agua aplicada. Se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$EDR = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^w |Z_i - Z_r|}{n * Z_r} \right], \text{ para } Z_i \leq Z_r \quad [21]$$

Donde,

$Z_i$  = Profundidad de agua infiltrada en el punto  $i$  ( $m^3 m^{-1}$ ).

$Z_r$  = Profundidad de agua requerida por el cultivo/frutal en cada riego y se obtiene del programa de riego ( $m^3 m^{-1}$ ).

$w$  = Número de observaciones en las cuales  $Z_i$  es menor o igual que  $Z_r$ .

$n$  = Número total de observaciones.

### 3.6.4 Eficiencia de distribución total

La eficiencia de distribución total (*EDT*) describe la distribución de agua aplicada en relación con los requerimientos del cultivo/frutal, tomando en cuenta el déficit y excesos (Holzapfel *et al.*, 1985):

$$EDT = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Z_i - Z_r|}{n * Z_r} \right] * 100 \quad [22]$$

Holzapfel *et al.* (2010) explica que a medida que la profundidad de agua aplicada sea aproximadamente igual a la profundidad de agua requerida, mejor será el rendimiento del riego. Además, la *EDT* puede mostrar algún efecto de exceso de agua aplicada en el rendimiento o posible lixiviación. Este parámetro de rendimiento ha sido probado en un huerto y cultivos por Holzapfel *et al.* (1985).

### 3.7. Diseño de sistemas de riego

El diseño del riego por surco incluye la determinación de los caudales, largo de los surcos, sección del surco, espaciamiento entre surcos, número de surcos por hilera y tiempos de riego (Holzapfel *et al.*, 1989). Las principales son el caudal de entrada, largo del surco y el tiempo de corte (Zerihun *et al.*, 2001). Estas variables, influyen directamente a las eficiencias, Eldeiry *et al.* (2004) concluyeron que la longitud del surco y caudal de entrada son los principales parámetros de gestión y diseño que afectan a la eficiencia de la aplicación.

La determinación del tiempo que se debe cortar el agua en la cabecera, implica el conocimiento del tiempo de riego ( $T_R$ ) y el manejo del concepto de caudal máximo no erosivo y caudal reducido (Holzapfel, 2020). El tiempo de riego es el tiempo que permite infiltrar el total de la lámina calculada como déficit. Por lo tanto, y como primera aproximación, al regar se debe procurar que el tiempo

de aplicación ( $T_a$ ) del agua corresponda al tiempo de riego ( $T_R$ ) más el tiempo que demora el agua en llegar al final del surco ( $T_f$ ). Esto anterior, expresado matemáticamente es:

$$T_a = T_f + T_R \quad [23]$$

Para los regantes es un poco difícil seguir regando después de que el agua llega al final del surco. Esto es, porque dicha acción implicaría una excesiva pérdida de agua por escurrimiento a los pies del surco. Para evitar dichas pérdidas, Holzapfel (2020) y Walker y Skogerboe (1987) recomiendan reducir el caudal de aplicación a un caudal reducido ( $Q_{red}$ ) cuando el agua llegue al final del surco. El caudal reducido debe satisfacer, a lo menos, los requerimientos de infiltración a lo largo del surco. Para efectos prácticos, Holzapfel (1993) recomienda que el caudal reducido ( $Q_{red}$ ) corresponda a un valor que oscile entre  $1/4$  y  $1/2$  del caudal máximo no erosivo ( $Q_{max}$ ).

Cartes (1976) citado por Holzapfel (1989) desarrolló ecuaciones que permiten obtener valores más exactos de caudales reducidos introduciendo el parámetro de infiltración del suelo en el momento de riego. Dichas ecuaciones son las siguientes:

$$Q_{red} = VI_p L \quad [24]$$

$$VI_p = \frac{VI_{TR} + VI_{Tf}}{2} \quad [25]$$

Donde,

$VI_p$  = Velocidad de infiltración promedio ( $m^3 \text{ min}^{-1} m^{-1}$ ),

$VI_{TR}$  = Velocidad de infiltración al tiempo  $TR$  ( $m^3 \text{ min}^{-1} m^{-1}$ ),

$VI_{Tf}$  = Velocidad de infiltración al tiempo  $Tf$  ( $m^3 \text{ min}^{-1} m^{-1}$ ).

$L$  = Largo del surco (m).

A continuación, se muestran diferentes ecuaciones, con las cuales se puede obtener el caudal máximo no erosivo ( $Q_{m\acute{a}x}$ ).

El caudal máximo no erosivo en riego por surcos se puede calcular con la siguiente expresión (Holzapfel, 2020):

$$Q_{max} = 0,025 * S_o^{-0,75} \quad [26]$$

Donde,

$Q_{max}$  = Caudal máximo erosivo ( $L \text{ s}^{-1}$ ).

$S_o$  = Pendiente del surco ( $m \text{ m}^{-1}$ ).

Criddle *et al.* (1956) recomendó que el caudal máximo no erosivo se puede estimarse de la siguiente forma:

$$Q_{max} = 0,63 * S_o^{-1} \quad [27]$$

Donde,

$Q_{max}$  = Caudal máximo no erosivo ( $L s^{-1}$ ).

$S$  = Pendiente del surco (%).

Hamad y Stringham (1978) citado por Genomo (2021) desarrollaron una ecuación para obtener el caudal máximo no erosivo a partir de la textura de suelo:

$$Q_{max} = \alpha * S^{-\beta} \quad [28]$$

Donde,

$Q_{max}$  = Caudal máximo no erosivo ( $L s^{-1}$ ).

$\alpha$  = Coeficiente de los parámetros basados en el grupo de suelo ( $L s^{-1}$ ).

$\beta$  = Coeficiente de los parámetros basados en el grupo de suelo (adimensional).

$S$  = Pendiente del surco como factor (%).

**Tabla 1.** Coeficientes para obtener el caudal máximo en litros por segundo.

Grupo de suelo	Alfa ( $L s^{-1}$ )	Beta
Textura pesada	0,892	0,937
Textura media pesada	0,988	0,550
Textura media	0,613	0,733
Textura liviana	1,111	0,615
Textura muy liviana	0,665	0,548

Fuente: Hamad y Stringham (1978) citado por Genomo (2021).

Al momento de determinar el caudal máximo no erosivo ( $Q_{max}$ ), se puede tomar como límite, tanto inferior como superior, la ecuaciones descritas anteriormente. Esto es debido, a que en el diseño óptimo de riego por surco, se tiene que encontrar la mejor configuración entre las variables principales de diseño, para obtener altas eficiencias. Sin embargo, de igual forma se puede seleccionar el valor de una ecuación en específico, dependiendo el criterio a considerar.

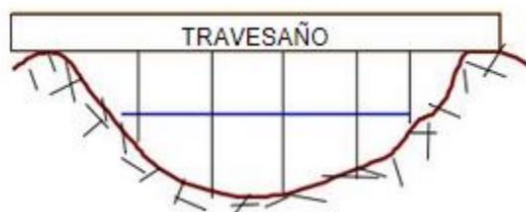
### 3.7.1. Determinación de factores de forma del surco

Holzapfel (1989) explica que la sección del surco cumple un rol fundamental en el humedecimiento uniforme del perfil de suelo a lo largo del surco. La sección puede ser triangular, trapezoidal o semicircular, claro si que después de los primeros riegos, tienden a tomar una forma semicircular o parabólica (Holzapfel *et al.*, 1984). Las ecuaciones de geometría del surco que relacionan la profundidad con el área transversal, el perímetro mojado, el ancho superior y radio hidráulico, se puede expresar como funciones de tipo potencial (Karmeli *et al.*, 1978; Brown-Manrique *et al.*, 2019).

Para determinar los factores de forma de un surco se pueden utilizar los siguientes métodos:

- Perfilómetro: La metodología se basa en una varilla, o en una serie de varillas móviles, que pueden desplazarse verticalmente, que se adaptan a una estructura, y que se elevan de acuerdo a las diferentes alturas del suelo, al apoyarlas en superficie a medir. Moviendo la estructura a intervalos regulares para recolectarse una superficie en distancias de ambos ejes conocidos.
- Travesaño: Se utiliza cada 10 cm y con ello se mide la altura desde el fondo del surco al travesaño antes de regar y más tarde la altura del tirante de agua al travesaño durante el riego.

Eligiendo uno de estos métodos se pueden obtener los factores de forma del surco y el área de la sección transversal del surco.



**Figura 4.** Sección conductora de agua en riego por surco. Fuente: Ibarra, 2004.

Estos parámetros se encuentran matemáticamente y el procedimiento fue desarrollado por Holzapfel (2021b), el cual se muestra a continuación:

$$y = ax^b \quad [29]$$

Pero para integrar el área bajo la curva y obtener el área de flujo la variable dependiente debe ser  $x$ , de esta manera se tiene:

$$x = \left[\frac{1}{a}\right]^{\frac{1}{b}} y^{\frac{1}{b}}$$

Si,

$$c = \left[\frac{1}{a}\right]^{\frac{1}{b}}$$

$$d = \frac{1}{b}$$

Entonces, la ecuación resultante queda de la siguiente forma:

$$x = cy^d \quad [30]$$

Donde,

$y$  = Altura del surco (m).

$x$  = Distancia desde el punto de referencia (m),

$a, b, c, d$  = Constantes empíricas.

Por otro lado, al considerar ambos lados del surco, se obtiene que:

$$B = 2cy^d$$

Por lo tanto, el área bajo la curva será la siguiente:

$$A = 2 \int_0^y x dy = 2 \int_0^y cy^d dy \quad [31]$$

Resolviendo la integral, la ecuación resultante que representa el área de la sección transversal del surco es:

$$A = \frac{2c}{d+1} y^{d+1} \quad [32]$$

Considerando que:

$$E_1 = \frac{2c}{d+1} \quad [33]$$

$$E_2 = d + 1 \quad [34]$$

Entonces la ecuación 32, que expresa el área de la sección transversal del surco, puede ser descrita como:

$$A = E_1 * y^{E_2} \quad [35]$$

Donde,

$E_1$  y  $E_2$  = Factores de forma del surco (adimensionales).

Por otro lado, el perímetro mojado tiene la misma tendencia de tipo potencial y se puede expresar como:

$$WP = G_1 y^{G_2} \quad [36]$$

Además, se ha establecido que el perímetro mojado se puede determinar como:

$$WP = \sqrt{(2cy^d)^2 + y^2}$$

Donde,

$WP$  = Perímetro mojado del surco (m).

$G_1$  y  $G_2$  = Constantes empíricas.

Usando la relación hidráulica de canales de la ecuación de Manning, separando sus términos geométricos y elevando al cuadrado, se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{Q^2 * n^2}{S} = A^2 * R^{\frac{4}{3}} \quad [37]$$

Donde,

$Q$  = Caudal de entrada ( $m^3 s^{-1}$ ).

$n$  = Coeficiente de rugosidad de Manning.

$S$  = Pendiente del surco ( $m m^{-1}$ ).

$A$  = Área de flujo ( $m^2$ ).

$R$  = Radio hidráulico (m).

De esta manera, el factor de forma del surco queda representado como:

$$A^2 R^{\frac{4}{3}} = F_1 * A^{F_2} \quad [38]$$

$$\frac{Q^2 * n^2}{S} = F_1 * A^{F_2} \quad [39]$$

Donde,

$A$  = Área de la sección transversal ( $m^2$ ).

$y$  = Altura del tirante de agua (m).

$Q$  = Flujo de agua que pasa por el surco por unidad de tiempo ( $m^3s^{-1}$ ).

$n$  = Coeficiente de rugosidad de Manning.

$S$  = Pendiente del surco ( $m m^{-1}$ ).

$R$  = Radio hidráulico (m).

$E_1, E_2, F_1$  y  $F_2$  = Factores de forma.

Los valores de  $F_1$  y  $F_2$  se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$F_1 = \frac{E_1^{\frac{10}{3}-F_2}}{G_1^{\frac{4}{3}}} \quad [40]$$

$$F_2 = \frac{2E_2 + \frac{4}{3}E_2 - \frac{4}{3}G_2}{E_2} \quad [41]$$

### 3.7.2. Correlación entre las eficiencias y las variables de diseño

El comportamiento del riego por surcos está determinado directamente por el valor que tomen las variables de diseño, viéndose reflejado en los índices que miden la calidad de riego. Leiva (1998), estableció las relaciones entre las variables de diseño y los parámetros de calidad de riego, ubicándose dicho estudio en la zona de Peumo, sexta Región, Chile. Ocupó la regresión lineal múltiple (Chapra y Canale, 1996; citado por Leiva, 1998). La ecuación de regresión obtenida corresponde a una función exponencial y se expresa de la siguiente forma:

$$(ICR)_i = (K)_i * (Q)^{a_i} * (L)^{b_i} * (T_{co})^{c_i}, i = 1, \dots, 4 \quad [42]$$

Donde,

$ICR_i$  = Índice de calidad  $i$ .

$K_i$  = Constante de la ecuación exponencial del índice de calidad  $i$ .

$a_i, b_i$  y  $c_i$  = Coeficientes exponenciales para el caudal de entrada, largo del surco y tiempo de corte, respectivamente, en la ecuación exponencial del índice de calidad de riego  $i$ .

$Q$  = Caudal de entrada ( $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$ ).

$L$  = Largo del surco (m)

$T_{co}$  = Tiempo de corte (min).

En lo que respecta con el largo del surco, un incremento en su longitud aumenta la eficiencia de aplicación ( $EA$ ), y por el contrario, se disminuye cuando el valor del caudal y/o del tiempo de corte aumentan. De acuerdo a lo anterior, se pudo deducir que un diseño de riego por surco con un gran caudal de entrada, un largo de surco pequeño y tiempo de corte prolongado pierde más agua que un diseño con un óptimo largo de surco, un caudal de entrada más pequeño y un tiempo de corte reducido. Para el caso de la eficiencia de requerimiento ( $ER$ ), este valor aumenta a medida que el caudal de entrada y el tiempo de corte se incrementan, y que el largo del surco disminuye. La eficiencia de distribución de requerimiento ( $EDR$ ) pasa exactamente lo mismo que en el caso de la eficiencia de requerimiento. Finalmente, para el caso de la eficiencia de distribución total ( $EDT$ ) fue similar a las observadas para la eficiencia de requerimiento ( $ER$ ) y distribución del requerimiento ( $EDR$ ). En todos los casos se muestra que la variación del tiempo de corte tiene un efecto

más importante en el valor del índice de calidad de riego que la variación del caudal de entrada y el largo del surco.

### **3.8. Criterios de diseño**

#### **3.8.1. Caudal**

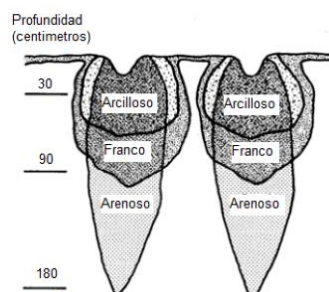
El caudal es afectado por la pendiente, la longitud del surco y la tasa de infiltración del suelo, puede ser ajustada por el diseñador para alcanzar una buena uniformidad y profundidad de riego esperada en un tiempo razonable (Kara *et al.*, 2008).

Teniendo en cuenta todas las variables, se podría despejar por ejemplo el caudal de la Ecuación 28 y compararla con el caudal máximo no erosivo presentado por la Ecuación 39, y así elegir de manera más concreta el caudal que se usará. Holzapfel (2020) menciona que se debe considerar para determinar el caudal máximo ( $Q_{max}$ ), la capacidad de flujo del surco para evitar desbordes. El menor de los dos valores determinados en función de la erosión o capacidad de flujo es el que se debe considerar.

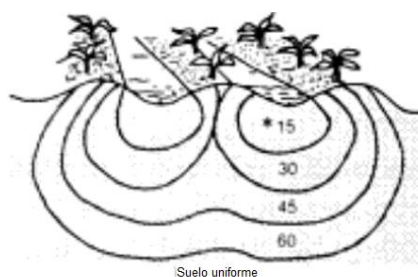
#### **3.8.2. Espaciamiento entre surcos**

El espaciamiento de los surcos es función principalmente del suelo y el tipo de cultivo (Holzapfel *et al.*, 1989). USDA (1987) establece que el conocimiento del patrón de humedecimiento y la forma del bulbo húmedo en la profundidad del suelo son necesarios para el diseño de los sistemas de riego por surco.

Los bulbos húmedos de los surcos se superponen cuando se obtiene la aplicación de agua deseada. Esta suposición es válida si los surcos están adecuadamente espaciados en función de la entrada de agua del suelo y la profundidad de aplicación. La entrada de agua en el suelo homogéneo inicialmente ocurre de forma radial. La fuerza responsable de este tipo de movimiento de agua es principalmente la tensión del suelo. A medida que el suelo se satura, la fuerza de tensión disminuye y la fuerza de gravedad predomina. En suelos homogéneos, la forma del bulbo húmedo tiene la forma de una parábola, con la relación de entrada horizontal y vertical que cambia con el aumento del tiempo de aplicación. El movimiento lateral depende principalmente de la textura de suelo. Cualquier variación en las características del suelo cambia el patrón del bulbo húmedo. Por ejemplo, una capa horizontal del suelo de material grueso o una capa de material fino hacen que el bulbo húmedo parabólico se aplane y, de hecho en ciertas circunstancias, ayuda a obtener una aplicación de agua más uniforme que la posible en un suelo homogéneo. Un gran porcentaje de los suelos de regadío está estratificado de una de estas formas.



**Figura 5.** Bulbo húmedo para distintos tipos de textura de suelo; suelo arcilloso, suelo franco y suelo de textura arenosa. Fuente: USDA, 1987.



**Figura 6.** Forma del bulbo húmedo a diferentes minutos para un suelo uniforme. Fuente: USDA, 1987.



**Figura 7.** Forma del bulbo húmedo a diferentes minutos en un suelo no uniforme. Fuente: USDA, 1987.

Holzapfel *et al.* (1989), explica que los suelos arcillosos permiten una mayor separación de surcos que los arenosos, obteniéndose un adecuado traslape de humedad entre los surcos a la profundidad radical que se desee mojar.

La separación entre el tronco y el surco para frutales se puede determinar de acuerdo a la siguiente relación:

$$E = P_r \times C_s \quad [43]$$

Donde,

$E$  = Espaciamiento entre el tronco y el surco (m).

$P_r$  = Profundidad radical del frutal (m).

$C_s$  = Factor de corrección, que cambia de acuerdo al tipo de suelo;  $C_s = 2,5$  para suelos arcillosos;  $C_s = 1,5$  para suelos francos;  $C_s = 0,5$  para suelos arenosos.

Como regla general, para suelos arenosos el espaciamiento entre surcos tiene que ser entre 30 a 60 cm. En los suelos arcillosos, el espaciamiento tiene que ser entre 75 a 150 cm (Brouwer *et al.*, 1988). Dado que el espaciamiento entre surcos varía entre los diferentes cultivos de regadío, Desta *et al.*, (2018) hizo su investigación incluyendo un promedio de tres espaciamientos que representan la mayoría de cultivos: 40 cm, 70 cm y 100 cm. La anterior investigación, concluyó que el espaciamiento de 100 cm, tarda más tiempo en infiltrar el agua aplicada en comparación a los otros espaciamientos.

En el caso de riego por surco en frutales, durante los tres o cuatro años después de la plantación, se puede utilizar un sistema con dos surcos: uno a cada lado de la hilera. Posteriormente, se requiere un arreglo de cuatro surcos

que puede ser suficiente para plantaciones de 5 X 5 m. Un sexto u octavo surco puede ser necesario en suelos arenosos o en cultivos de gran desarrollo radical. Estas recomendaciones están dadas para surcos rectos, que son habitualmente – y a veces único tipos – usados en plantaciones (Holzapfel, 1993).

### 3.8.3. Determinación del largo del surco

#### 3.8.3.1. Largo óptimo aproximado

Zerihun et al., (2001) propusieron una ecuación que muestra el valor de la longitud óptima del surco que corresponde a la máxima eficiencia de aplicación ( $EA$ ):

$$L_{opt'} = \left[ \frac{\tau_{req}}{b(c-1)} \right]^{\frac{1}{c}} \quad [44]$$

Donde,

$L_{opt'}$  = Largo óptimo aproximado (m).

$\tau_{req}$  = Tiempo de oportunidad que puede ser calculado usando la ecuación de infiltración en función del requerimiento del frutal (min).

$b$  y  $c$  = Constantes que se puede encontrar en base del tiempo de avance.

Un modelo de simulación de riego superficial como el SRFR (Strelkoff *et al.*, 1998; citado por Zerihun *et al.*, 2001) puede utilizarse para generar los datos necesarios sobre el tiempo y la distancia del avance. Sin embargo, envuelve dos partes independientes para estimar los dos parámetros ( $b$  y  $c$ ). El tiempo

de avance se puede calcular para dos longitudes de surco diferentes, a partir de las cuales se puede formular dos funciones. Las dos funciones se pueden combinar para obtener las siguientes expresiones para obtener los parámetros  $b$  y  $c$ :

$$c = \frac{\ln \left[ \frac{t_a(L_1)}{t_a(L_2)} \right]}{\ln \left[ \frac{L_1}{L_2} \right]} \quad [45]$$

$$b = \frac{t_a(L_1)}{L_1^c} \quad [46]$$

Donde,

$L_1$  = Largo total del campo (m).

$L_2$  = Mitad de  $L_1$  (m).

$t_a$  = Tiempo de avance correspondiente a la longitud  $L_i$  (min).

### 3.8.3.2. Textura de suelo

El largo óptimo del surco y el tiempo de corte pueden ser determinados, en relación con las características de infiltración del suelo mediante la relación entre el tiempo necesario para infiltrar la cantidad total de agua requerida en la zona radical de extracción y el tiempo en que el frente de agua alcanza el final del surco, para poder lograr la máxima eficiencia de aplicación (Holzapfel *et al.*, 2004). Eldeiry *et al.* (2005) mostraron que en los suelos arcillosos se pueden obtener relativamente altas eficiencias en una amplia gama de longitudes de surco (100-300). Según Ciancaglini *et al.* (2015), para mantener

valores aceptables de eficiencias en suelo de textura gruesa no son convenientes longitudes mayores a 80 metros. Brouwer *et al.* (1988) no recomienda las arenas muy gruesas, ya que las pérdidas por percolación pueden ser elevadas.

**Tabla 2.** Recomendación de largo de surco, dependiendo la textura de suelos.

Textura de suelo	Longitud de surco (m)
Gruesa	60-80
Media	80-120
Fina	120-200

Fuente: Ciancaglini *et al.*, 2015.

### 3.8.3.3. Relación tiempo

Para determinar el caudal óptimo y la longitud del surco, como regla general, el caudal debe tener un valor que permita llegar al final del surco en aproximadamente la cuarta parte del tiempo de corte. Esto se denomina como la regla de la cuarta parte (Desta *et al.*, 2018). Si el tiempo que se demora el frente agua en llegar al final del surco supera la cuarta parte del tiempo de corte, esto impone serios problemas en el campo, lo que permite una alta pérdida de agua por percolación profunda, y que se traduce a una baja eficiencia de aplicación (Kara *et al.*, 2008).

Desta *et al.*, (2018) describe el siguiente procedimiento para determinar el largo óptimo del surco: medir la tasa de avance en el surco y graficar los datos de tiempo de avance para cada caudal y espaciamiento entre surcos, ya que, la curva de avance es fundamental para determinar el caudal de diseño y la

longitud del surco (Tornés *et al.*, 2016). Seleccionar la longitud del surco óptima para que el agua llegue al final del surco en  $\frac{1}{4}$  del tiempo de riego necesario (tiempo de corte) para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo/frutal. Evaluar el desempeño el largo escogido enfocándose en la eficiencia de aplicación, pérdidas por percolación profunda y escorrentía al final del surco.

Cuando los surcos son cortos, la escorrentía superficial incrementa. Por otro lado, cuando los surcos son largos, las pérdidas por percolación profunda incrementan (Kara *et al.*, 2008). Las pérdidas por escorrentía y percolación profunda dependen del tiempo de corte, largo del surco y caudal de entrada (Desta *et al.*, 2018).

Por otra parte, la pendiente y la cantidad de agua que se quiera aplicar a la zona de raíces, también influye en la determinación del largo del surco. La longitud del surco depende del caudal de entrada y de la pendiente del campo (Kara *et al.*, 2008). Por otro lado, Narayanan y Abate (2014) concluyeron gracias a su investigación que el largo del surco óptimo cambia con la profundidad de riego aplicada.

Luego de fijarse en los criterios descritos anteriormente y obtener un largo óptimo tentativo, se puede ratificar este valor bajo el Software Aquasurco®, y así obtener altas eficiencias en el uso del agua.

### 3.8.3.4. Percolación profunda

El porcentaje de percolación permisible, se establece en base a las condiciones salinas del agua y del suelo, en general, varía entre rangos de 0,02 a 1 y van en aumento de sur norte de nuestro país (Holzapfel *et al.*, 1989).

Con este valor se puede calcular el factor  $R$  de la siguiente forma:

$$R = \frac{1}{2} \left[ \frac{n + 1}{P} - 1 \right] \quad [47]$$

Donde,

$R$  = Factor de relación de tiempo.

$n + 1$  = Parámetro de infiltración  $B$ .

$P$  = Percolación profunda permisible.

El factor de relación de tiempo ( $R$ ) se obtiene de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{T_R}{T_f} \quad [48]$$

Donde,

$T_R$  = Tiempo de riego (min).

$T_f$  = Tiempo necesario para que el frente de agua llegue al final del surco (min).

### 3.8.3.5. Aquasurco®

El Software Aquasurco® está configurado de acuerdo a la siguiente descripción:

El flujo de agua superficial en un campo de regadío puede ser descrito por los principios de la conservación de la masa (continuidad) y conservación del momento. Para un canal prismático, continuidad y momento, que a menudo se denominan las ecuaciones de Saint-Venant, pueden ser expresadas de forma unidimensional (Walker y Skogerboe, 1987):

Conservación de masa (continuidad):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + I = 0 \quad [49]$$

Conservación de momento:

$$\frac{1}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A^2g} \frac{\partial Q}{\partial x} + \left(1 - \frac{Q^2T}{A^3g}\right) \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad [50]$$

Donde,

$Q$  = Caudal ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ).

$A$  = Área transversal de flujo ( $\text{m}^2$ ).

$x$  = Distancia (m).

$t$  = Tiempo (s).

$I$  = Tasa de infiltración del suelo ( $\text{m}^3 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

$y$  = Profundidad del flujo (m).

$g$  = Aceleración de gravedad ( $\text{m s}^{-2}$ ).

$S_0$  = Pendiente del surco ( $m\ m^{-1}$ ).

$S_f$  = Pendiente del flujo de agua ( $m\ m^{-1}$ ).

Un enfoque simplificado es el modelo de Cero Inercia de Strelkoff y Katapodes (1977) citado por Holzapfel *et al.*, (1984) para riego por bordes. El modelo de Cero Inercia desprecia el término inercial de la Ecuación 49.

$$\frac{dy}{dx} = S_0 - S_f \quad [51]$$

La precisión de la Ecuación 51 es buena, porque el número de Froude en riego superficial es bastante bajo (Basset *et al.*, 1981; citado por Holzapfel *et al.*, 1984).

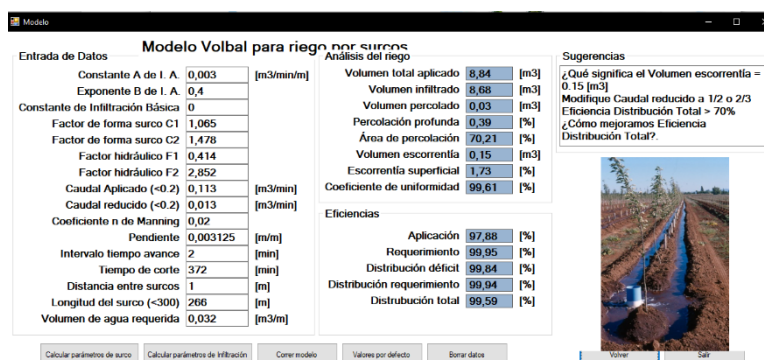
Chen (1970) citado por Holzapfel *et al.*, (1984) presentó el llamado modelo de Onda Cinemática que es, en esencia, un enfoque de equilibrio de volumen. El modelo asume un flujo uniforme sobre la superficie del suelo despreciando el gradiente de la Ecuación 49. La Ecuación 51 puede ser expresada como:

$$S_0 = S_f \quad [52]$$

Holzapfel *et al.* (1984) compararon datos observados en el campo con datos obtenidos en base a modelos de simulación matemática que predicen la fase de avance y receso en riego por surco y seleccionaron el modelo que mejor reproduce estas fases. Los parámetros más importantes para la realización del estudio fueron la infiltración del suelo, la rugosidad de la superficie del suelo, la capacidad de agua que retiene el suelo, la pendiente, y la geometría del

surco. Los resultados mostraron que el modelo de Cero Inercia y el de Onda Cinemática predicen la fase de avance y receso de una forma excelente. El modelo de Onda Cinemática predice bien el avance para cortas longitudes, mientras que el modelo de Cero Inercia provee una buena estimación para grandes longitudes.

Esta metodología ocupa el Software llamado “Aguasurco®”, utiliza el modelo de onda cinemática para simular un evento de riego por surco, el cual es muy fácil de usar, debido a que solamente se tiene que ingresar los parámetros relacionados con el riego por surco y entrega inmediatamente las eficiencias relacionadas a este riego. Por el método del tanteo, el usuario puede ir cambiando el largo del surco hasta alcanzar eficiencias igual o mayores al 85% en lo que respecta la eficiencia de distribución total (*EDT*). Para mejorar las demás eficiencias, se tiene que centrar en las variables que inciden más en cada una de estas (ver sección: “Correlación entre las eficiencias y las variables de diseño”).



**Figura 8.** Análisis mediante el Software “Aguasurco®” para la determinación del largo óptimo. Fuente: Elaboración propia.

Berrios (2021) recomienda que se deben hacer mediciones precisas en cuanto a la geometría del surco, evitando imperfecciones. Esto es, porque al contar con parámetros hidráulicos del surco aceptables, se aprecian mejoras en la fase de avance y receso utilizando el modelo cinemático Aquasurco®.

Los resultados que entrega este Software son en base al siguiente modelo:

#### Modelo de avance

El Aquasurco® usa el modelo de Cero Inercia para obtener el avance de agua, sin embargo, la ecuación de Strelkoff también permite determinar el avance que utiliza el modelo de Volumen Balance:

$$X = \frac{Q_0 * T}{A_0 * r_y + r_z * A * T^B} \quad [53]$$

Donde,

$X$  = Avance del frente de agua para un tiempo  $T$ (m).

$Q_0$  = Caudal de avance ( $m^3 \text{ min}^{-1}$ ).

$A_0$  = Área de la sección transversal ( $m^2$ ).

$T$  = Intervalo de tiempo para las distintas posiciones del surco (min).

$r_y$  = Valor constante de 0,8 (adimensional).

El factor de forma  $r_z$  definido teóricamente por Katopodes y Strelkoff (1977) citado por Berrios (2021), para distancias pequeñas desde la punta del perfil de avance queda representado como:

$$r_z = \frac{1}{1 + B} \quad [54]$$

#### Modelo simple del receso

Holzapfel *et al.* (1984) indica que Strelkoff en 1977 presentó una solución a la fase de recesión en riego por borde, que se puede homologar al riego por surco usando factores geométricos apropiados. Esta solución propone que, durante la fase de vaciado la altura del flujo de agua es constante y normal a la escorrentía hasta el inicio de la fase de receso.

$$t_{re} = t_R + \frac{S_f}{\bar{I}C^{3/2}} [R_{rec}(C^{3/2}L) - R_{rec}(C^{3/2}l)] \quad [55]$$

Donde,

$t_{re}$  = Tiempo de receso (min).

$T_R$  = Tiempo de riego (min).

$S_f$  = Pendiente del flujo de agua ( $m \ m^{-1}$ ).

$\bar{I}$  = Velocidad de infiltración promedio ( $m \ min^{-1}$ ).

$R_{rec}$  = Relación de receso.

$l$  = Distancia desde el final del surco hasta el punto a medir (m).

$L$  = Largo total del surco.

$$t_R = t_{co} + \frac{A_0 * 0,8 * L}{2 * Q_0} \quad [56]$$

Donde,

$t_{co}$  = Tiempo de corte (min).

$A_0$  = Área transversal del surco (m<sup>2</sup>).

$Q_0$  = Caudal de entrada (m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>).

$$S_f = \frac{y_1}{L}$$

Pero,

$$y_1 = f(q_1)$$

$$q_1 = q_0 - \bar{I} * L$$

$$\bar{I} = \frac{I(t_R) + I(t_R - t_f)}{2} \quad [57]$$

Donde,

$I(t_R)$  = Velocidad de infiltración al tiempo de riego (m min<sup>-1</sup>).

$q_0$  = Caudal al principio del surco (m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>).

$q_1$  = Caudal al final del surco (m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>).

$I(t_R - t_f)$  = Velocidad de infiltración al tiempo de riego menos el tiempo de avance ( $\text{m m}^{-1}$ ).

$y_1$  = Altura de agua al final del surco (m).

$$C = \frac{C_u S_0^{1/2} S_f^{5/3}}{n \bar{I}} \quad [58]$$

Donde,

$C_u$  = Coeficiente que toma el valor de 1 para el sistema métrico y distinto de 1 para el sistema inglés.

$n$  = Coeficiente de rugosidad de Manning, y  $\bar{I}$  es la velocidad de infiltración promedio ( $\text{m s}^{-1}$ ).

Así el argumento de la Ecuación 55 es de la siguiente forma:

$$R_{rec}(u) = \int_0^u \frac{d\rho}{1 + \rho^{2/3}} \quad [59]$$

Este argumento se le ha dado una solución numérica y gráfica. Sin embargo Holzapfel (2021a) da una solución racional, que se presenta a continuación:

Sabiendo que:

$$\rho = C^2 l^3$$

$$R_{rec}(u) = \int_0^u \frac{d\rho}{1 + \rho^{2/3}} = 3\rho^{1/3} - 3\tan^{-1}(\rho^{1/3})$$

Reemplazando  $\rho$  en  $(R_{rec}(u))$ , se tiene que:

$$R_{rec}(u) = 3(C^2l)^{1/3} - 3\tan^{-1}\left((C^2l)^{1/3}\right) \quad [60]$$

Con el argumento de la  $\tan^{-1}$  en radianes.

#### 3.8.4. Tiempo de corte

El tiempo de corte es el tiempo en el que deja de entrar agua al surco. El tiempo de corte se puede expresar como la suma del tiempo de avance más el tiempo de oportunidad (Zerihun *et al.*, 2001; Desta *et al.*, 2018). Para encontrar el valor de este tiempo existen relaciones, como por ejemplo, el tiempo de recesión ( $Tr$ ) que es de relativa importancia. Holzapfel (1993) recomienda adelantar el tiempo de corte (disminuir el tiempo de aplicación) en el mismo valor del “ $Tr$ ” medido en los tramos finales del borde (se homologa para surco). Esto se puede expresarse como:

$$\textit{Tiempo de aplicación (Ta)} = T_R + T_f - Tr \quad [61]$$

Donde,

$T_a$  = Tiempo de aplicación o corte (min).

$T_R$  = Tiempo de riego (min).

$T_f$  = Tiempo de avance (min).

$T_r$  = Tiempo de receso (min).

De esta manera, el perfil de humedecimiento del suelo es más parejo, disminuyendo así las pérdidas por percolación profunda y escurrimiento.

En lo que respecta al largo del surco, tiempo de corte, caudal máximo no erosivo y caudal reducido, se pueden encontrar las mejores eficiencias ocupando el Software Aquasurco®. Dentro de este Software, se pueden obtener gracias a iteración por parte del usuario las mejores combinaciones para encontrar altas eficiencias de aplicación y distribución de agua a lo largo de todo el surco.

### **3.9. Automatización en riego por surco**

Aun cuando los sistemas de automatización han sido más desarrollados para métodos presurizados, se han realizado estudios tendientes a incorporar una mayor automatización en el riego superficial, lo que sin embargo, presenta mayores dificultades debido a la falta de una estandarización adecuada (Walker, 1989; citado por Burgos, 1997). La automatización es una respuesta a la reducción de la disponibilidad instantánea de agua para la agricultura debido al cambio climático y los crecientes costos de energía (Holzapfel *et al.*, 2021).

Holzapfel (2022) presentó una serie de puntos para la implementación del sistema de automatización en riego por surco:

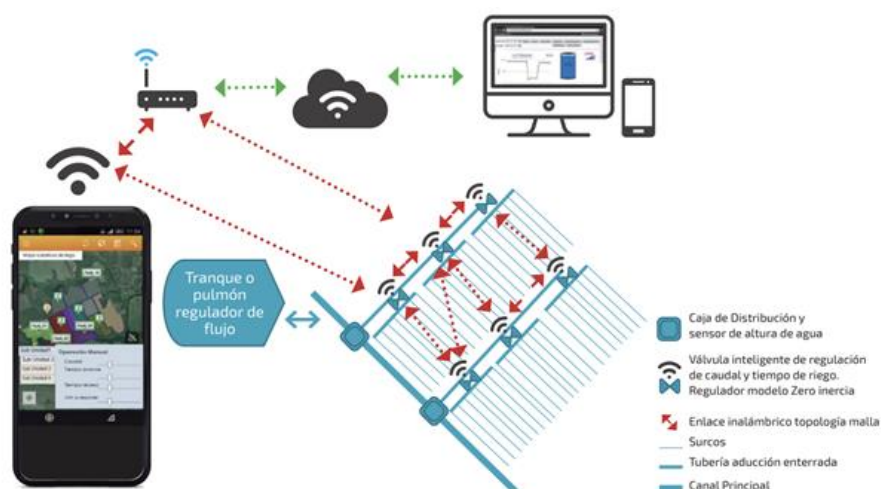
- Nivelación del sector de aducción
- Nivelación del sector de toma de aducción

- Determinación de la pendiente
- Determinación del área mínima a regar
- Determinación del caudal en el período de avance
- Determinación del caudal reducido en la fase de almacenamiento
- Determinación de caudales totales por subunidad
- Determinación de la capacidad de embalse de regulación

#### Propuesta metodológica

- ✓ Crear prototipo
  - Seleccionar componente hidráulico
  - Adaptarlo/construirlo
  - Automatizarlo
  - Controlarlo remotamente
  - Implementar modelo “*zero inercia*” en la válvula
- ✓ Plataforma de gestión
  - Seleccionar protocolos de telemetría
  - Seleccionar hardware
  - Implementar algoritmos de control
  - Implementar sistema de trazabilidad en servidor
  - Apache, MySQL, Python
- ✓ Plataforma de diseño
  - Software diseño óptimo con parámetros del predio

- Listado de materiales con códigos de producto de Vinilit



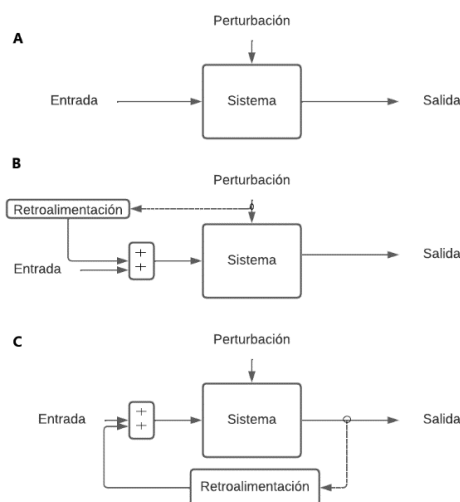
**Figura 9.** Esquema con ejemplo tipo de sistema de aducción con automatización. Fuente: Holzapfel, 2022.

La automatización de riego por surco consiste en un sistema de control automático de baja presión, que permita mejorar la eficiencia de uso de agua y energía. La idea clave del control automático es el uso de la retroalimentación. Esta es un mecanismo, proceso o señalización que se repite para controlar un sistema a sí mismo. En el campo del riego automático, las mediciones de las variables del suelo, la planta y la atmósfera relacionadas con el estado hídrico de la planta pueden proporcionar la información de las consecuencias de las acciones anteriores para calcular la siguiente dosis de riego (Romero *et al.*, 2012).

La teoría de control es un sub-campo interdisciplinario de la ciencia que trata de influir en el comportamiento de los sistemas dinámicos. En general, cuando una o varias variables de salida de un sistema deben seguir una referencia

determinada a lo largo del tiempo, un controlador actúa sobre las entradas del sistema para obtener el efecto deseado en las salidas.

Una forma primitiva de implementar estos tipos de control es el llamado control de lazo abierto (Figura 10 A), en el que no se utilizan mediciones de salidas del sistema para modificar las entradas, es decir, no existe retroalimentación. En esta clase de controladores, las decisiones se toman con antelación, basando en la heurística y el conocimiento experto o un modelo de sistema. Un caso particular de bucle abierto es la estrategia de alimentación (Figura 10 B), en la cual los controladores ocupan valores conocidos o estimados de las perturbaciones futuras para compensar sus efectos por adelantado. La principal debilidad de los controladores de bucle abierto es que no son capaces de reaccionar a los cambios en las perturbaciones actuales o en el sistema. En los controladores de bucle cerrado (Figura 10 C), la retroalimentación se ocupa para evitar los problemas de los controladores de bucle abierto; es decir, los controladores tienen información de lo que pasó en acciones previas para calcular la siguiente acción. En este caso, se necesitan sensores adecuados para cerrar el bucle.



**Figura 10.** Los tres tipos de sistemas de control: (A) bucle abierto, (B) alimentación y (C) retroalimentación (bucle cerrado). Fuente: Romero et al., 2021.

En un surco que sea representativo del total de los surcos a regar simultáneamente, existirá un sensor de humedad a la mitad y al final de este, como propósito de saber el tiempo que se demora el frente de agua en llegar al final del surco y también poder encontrar la velocidad de infiltración del suelo en condiciones actuales. Esto se hace para obtener una retroalimentación en tiempo actual de operación de las condiciones del suelo y ajustar las variables para tener mejores eficiencias. Esto anterior, se hace en base a la retroalimentación de bucle cerrado, ya que, los controladores tienen información de lo que pasó en acciones previas para calcular la siguiente acción.

La estaciones bases están conectadas a una plataforma en la red, en la cual se puede observar las variables mediante telemetría a través de dispositivos móviles.

La válvula inteligente está hecha de cobre con un diámetro de 75 mm, esta válvula está acompañada por un motor paso a paso, el cual es muy preciso para poner el caudal que se requiera. La posición de cierre de la válvula no es lineal, por ejemplo, si la válvula está cerrada al 50%, no estará entregando la mitad del caudal estimado. Cada estación base controlará un máximo de 3 válvulas, en la que se puede ir variando el caudal y tiempo de riego.

### **3.10. Embalse de regulación**

Holzapfel (2021c) explica que los modelos determinísticos tienen un valor explícito en una situación particular y se pueden entender mejor sus efectos al prescindir de la incertidumbre. Por lo anterior, se trasladó las metodologías ocupadas para modelos determinísticos de ríos en el manejo de agua para un caudal de acceso continuo hacia el riego por surco, para poder encontrar el volumen que tiene que tener un embalse de regulación.

El propósito principal de un embalse en riego por surcos, es proveer de un flujo regulado constante a una superficie anteriormente ya estudiada. Si es que no existe un tipo de embalse para este tipo de riego, es muy difícil efectuarlo de una manera que tenga altas eficiencias en el uso de agua, debido a que, en el riego por surco se necesita un caudal de avance (caudal máximo no erosivo) y luego, un caudal reducido (caudal durante la fase de almacenamiento). El caudal de avance es mucho mayor que el caudal reducido, lo que hace difícil mantenerlo sin que no existiese un embalse de regulación. La capacidad del

embalse, además de las reglas de operación, determina el volumen que debe ser almacenado para su posterior entrega regulada.

### 3.10.1. Análisis de diagrama de masa

Consiste en encontrar el máximo volumen a almacenar en una secuencia de caudales de entrega con un flujo de aporte históricamente conocido.

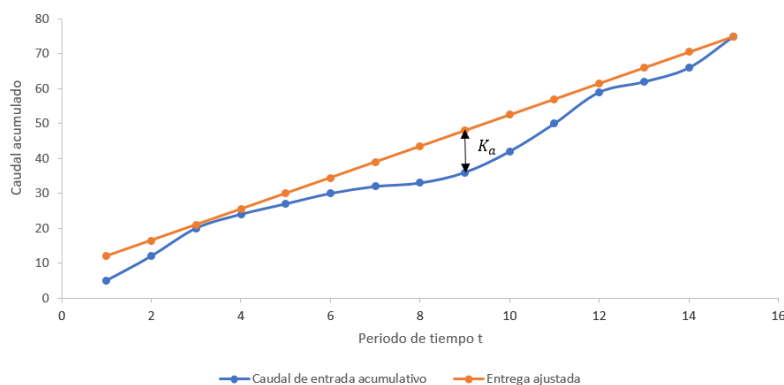
Se establece que  $d_t$  representa la diferencia entre  $R_t$  y  $Q_t$ , es decir, entre las necesidades y el caudal de entrada al embalse en un periodo  $t$ . La máxima diferencia ( $d_t^*$ ) entre la entrada y salida para un tiempo  $t$  a un tiempo  $T$  es:

$$d_t^* = \max_{\text{imun}} \left( \sum_{\tau=1}^j d_\tau \right), \text{ para } t \leq j \leq T \quad [62]$$

Así, la capacidad máxima del embalse  $K_a$  será:

$$K_a = \max_{\text{imun}} \left( \sum_{t=i}^j R_t - Q_t \right), \text{ para } 1 \leq i \leq j \leq T \quad [63]$$

El procedimiento anterior sirve solo sí, la suma de las entradas del embalse no excedan la suma de las salidas ( $R_t$ ) del embalse. A continuación, se muestra la Ecuación 63, gráficamente:



**Figura 11.** Análisis por diagrama de masas para estimar la capacidad requerida activa de almacenamiento. Fuente: Elaboración propia.

### 3.10.2. Análisis de máximos secuenciales

Para este método se establece que  $K_t$  es la capacidad requerida al comienzo del periodo  $t$  y  $Q_t$  es el flujo de entrada en el período  $t$ . Tenemos que:

$$K_t = \left\{ \begin{array}{l} \dots \rightarrow R_t - Q_t + K_{t-1} \dots, \text{ si es positivo} \\ \rightarrow 0 \dots, \text{ en otro caso} \end{array} \right\} \quad [64]$$

Donde, el valor máximo de  $K_t$  es la capacidad de almacenamiento requerida.

### 3.10.3. Análisis de optimización

Los análisis previamente descritos son de gran utilidad para un embalse con el estudio de una variable como es el caso del agua para riego. Sin embargo, para el caso de considerar pérdidas e incorporar otras variables y más embalses en paralelo o en serie, no es posible utilizar el método. Para ello, es necesario utilizar programación matemática en general o programación lineal en forma específica, utilizando la ecuación del balance de masas. Así, se tiene que:

$$S_t + Q_t - R_t - L_t = S_{t+1} \quad [65]$$

Donde,

$S_t$  = Volumen almacenado en el embalse al comienzo del período  $t$ .

$Q_t$  = Caudal del ingreso en el tiempo  $t$ .

$R_t$  = Caudal que se debe entregar en el período  $t$ .

$L_t$  = Pérdidas por evaporación y percolación en el período  $t$ .

Ahora, si se ignora la percolación; la evaporación en el período  $t$  en función del volumen almacenado y de la evaporación  $e_t$  en cada período. Las pérdidas por evaporación están dadas por la siguiente ecuación:

$$L_t = A_a e_t \left( \frac{S_t + S_{t+1}}{2} \right) + A_0 e_t \quad [66]$$

Ó

$$a_t = 0,5 A_a e_t \quad [67]$$

Combinando las ecuaciones, se tiene que:

$$(1 + a_t)S_{t+1} - (1 - a_t)S_t = Q_t - R_t - A_0 e_t \quad [68]$$

El volumen almacenado no puede exceder la capacidad del almacenamiento activo del embalse, esto anterior se muestra a continuación:

$$S_t \leq K_a \quad [69]$$

Con el caso particular de estudio, para diseñar un embalse para riego por surcos con sistema de baja presión, se tiene que cambiar algunas condiciones descritas anteriormente. Como por ejemplo, el caudal de entrada ( $Q_e$ ) puede ser variable en distintos meses de la temporada de riego y el caudal de entrega que es un valor que también cambia, por la sencilla razón de que en el riego superficial se tiene que respetar el tiempo de avance, el cual, tiene un caudal definido, que es el caudal máximo no erosivo ( $Q_{m\acute{a}x}$ ). Terminado este tiempo de avance, se cambiará el valor del flujo a un caudal reducido ( $Q_{red}$ ), que se estará ejecutando hasta el tiempo de corte ( $t_{co}$ ).

Para poder obtener el volumen idóneo del embalse de regulación, se tiene que proceder de la siguiente forma:

1. Disponer del valor de las variables empleadas en la metodología en base al área mínima a regar:
  - Tiempo de corte ( $T_{co}$ )
  - Tiempo de avance ( $T_f$ )
  - Tiempo de almacenamiento ( $T_{alm}$ )
  - Caudal máximo no erosivo ( $Q_{max}$ )
  - Caudal reducido ( $Q_{red}$ )

- Caudal de entrada ( $Q_{ent}$ )

Para poder obtener un caudal de entrada ( $Q_{ent}$ ), en base al diseño propio del sistema de riego, se tiene que hacer un “*loops*” desde el paso 3, en el cual se obtendrá el tiempo para llenar el embalse y si es que con el caudal de entrada existente se puede suplir el volumen faltante del embalse, antes de que se termine el día. Obtener la capacidad requerida ( $K_t$ ) mediante la Ecuación 64, para cada periodo de estudio hasta terminar con todas las posturas de riego. Escoger la máxima diferencia entre las necesidades y la entrada de agua al embalse para obtener la capacidad requerida máxima ( $K_a$ ) y encontrar el tiempo que se destina a la entrada de agua al embalse ( $T_{ent}$ ).

2. Optimizar el tiempo empleado en la entrada de agua en el embalse ( $T_{ent}$ ), logrando empezar el periodo de avance de la segunda postura inmediatamente después de que el caudal de entrada haya suplido la demanda del periodo de almacenamiento de la primera postura, es decir, la fase de avance de la segunda postura empezará a ejecutarse antes de que termine la fase de almacenamiento de la primera postura, logrando así, una disminución en el tiempo en que entra agua ( $T_{ent}$ ) al embalse en comparación al punto anterior.
3. Analizar si es que es factible poner otra postura al día, viendo el tiempo disponible que exista después de terminar la última postura. Esto es debido a que se debe considerar de que el embalse tiene que estar a su máxima capacidad el día de riego posterior. La posibilidad de poner

otra postura al día será únicamente factible si es que se quiere aumentar el área total a regar. Entre más grande sea el caudal de entrada, existirán más posibilidades de tener otra postura en el mismo día.

Por último, es recomendable al momento de obtener el volumen requerido, agregar un 15% más de este volumen por seguridad, para suplir posibles pérdidas por evaporación.

Es muy importante resaltar que el embalse de regulación no podría realizar su función si es que no existieran las válvulas inteligentes, debido a que estas regulan los tiempos y caudales de salida.

### **3.11. Sistemas de aducción**

El riego superficial es el método más ampliamente utilizado para reponer los requerimientos de agua en cultivos y frutales, situación derivada del proceso de evapotranspiración. Sin embargo, para una buena operación se requieren de adecuados sistemas de aducción, que entreguen en la cantidad correcta y eficiente de agua desde la fuente de abastecimiento hasta los surcos (Burgos, 1997).

En este riego se requiere la utilización de estructuras y sistemas de aducción que permitan derivar el agua a los surcos, desde una fuente de alimentación. Estas estructuras y sistemas deben permitir un adecuado control del caudal y una mejor utilización de los recursos humanos (Holzapfel, 1989).

El sistema a baja presión está conformado por un set de tuberías enterradas (generalmente de PVC). Por dichas tuberías se conduce agua, la que entrega a los surcos a través de tubos elevadores (hidrantes). Cada sistema posee, si es necesario, cámaras reguladoras de presión que permiten controlar la carga hidráulica en su recorrido.

Para permitir un caudal homogéneo en cada posición de riego, existen fundamentalmente dos alternativas:

1. Considerando la pérdida de carga en tuberías y la topografía del terreno, cada elevador debe tener una altura tal que permita una entrega homogénea de caudal.
2. La utilización de válvulas de regulación, generalmente las llamadas válvulas de huerto, no necesitan colocar a una altura determinada los elevadores por la homogeneidad en el caudal, éste se logra regulando la abertura de la válvula.

Teóricamente, se lograría una mejor automatización con la primera alternativa, en donde no se requiere manipular válvulas. Sin embargo, su implementación es poco práctica, sobre todo, en terrenos de pendientes pronunciadas o topografía irregular.

La segunda alternativa con válvulas de regulación, es la forma más utilizada debido a su mayor versatilidad, sin embargo, tiene una menor automatización por el efecto de regulación que se debe realizar. No obstante lo anterior, sería

posible mejorar la automatización con un adecuado diseño hidráulico, que permita conocer el nivel de abertura que debe poseer cada válvula, para entregar un caudal homogéneo en toda la línea de riego. El nivel de abertura definirá la altura de agua en cada campana, tanto para el caso de la fase de avance y de almacenamiento. Para la fase de avance, la altura de agua dentro de la campana será mayor que la altura de agua que tendrá que existir para la fase de almacenamiento.

Las principales ventajas de este sistema de aducción, radican en que elimina las acequias, aumentando la superficie cultivada, facilita el tránsito de maquinaria agrícola, permite un adecuado manejo, logrando aumentar considerablemente la eficiencia y calidad en el riego, que significa un ahorro y mejor utilización del recurso hídrico. Representa, además, una solución definitiva por su larga durabilidad.

En lo que respecta al diseño, el estudio previo debe incluir:

- El perfil longitudinal de la línea por donde se va ubicar la tubería.
- Ubicación, diseño de las estructuras de entrada, salida y de las cámaras reguladoras de presión y/o distribución del riego.
- Diseño hidráulico, que implica el estudio de las pérdidas de carga, la elección del diámetro adecuado para las tuberías del sistema, asegurar un rango adecuado de carga hidráulica en el sistema (no inferior a 30 cm ni superior a 4 mca).

- Determinar la pendiente de la tubería. Se debe asegurar que la velocidad mínima en limpieza sea mayor que la velocidad crítica, para las condiciones imperantes. Además la tubería debe quedar a una profundidad mínima de 60 cm.
- Cuantificar el efecto de golpe de ariete en el sistema de modo de ubicar, tubos de alivio al final de cada línea, para proteger la tubería de la sobrecarga producida.

En lo que respecta a la instalación, se deben observar las siguientes etapas:

- Excavación de la zanja para la tubería matriz: requiere niveletas, de guía, para conservar la pendiente calculada en el proyecto. El ancho de la zanja debe ser equivalente al diámetro exterior de la tubería más 30 cm.
- Encamado en el fondo de la zanja: el fondo de la zanja debe ser continuo, plano, libre de materiales duros o cortantes. Para lo cual, se recomienda una cámara de arena, dependiendo de las condiciones presentes, de 5 a 20 cm. Esta cama se compacta por capas y se utilizan las niveletas para llevar la referencia, a través de una lianza que se ubica entre éstas.
- Unión de tuberías y fitting.
- Encamado lateral: una vez unidas las tuberías, se incorpora arena compactada por capas, de manera análoga a la anterior, en los sectores laterales de ella.

- Perforación de la tubería matriz y ubicación de los elevadores.
- Encamado superior, que consiste en incorporar, una capa de arena o árido fino de 30 cm a lo menos, sobre la tubería.
- Relleno superior sobre el encamado, donde se incorpora el material original hasta llenar la zanja.
- Construcción de las estructuras de entrada, salida y cámaras de regulación. Su construcción es de albañilería u hormigón.
- Ubicación de válvulas y campanas de riego.
- Prueba del sistema, si es posible debe realizarse antes del relleno final de modo de observar cualquier filtración no deseada.

### **3.11.1. Análisis hidráulico en sistemas de aducción a baja presión**

El análisis para este sistema requiere establecer el marco conceptual para enfrentar un diseño y, de esta manera, lograr el máximo provecho de los recursos hídricos existentes. Esto se manifiesta en la necesidad de conocer el perfil hidráulico, de manera de establecer la carga a que está sometida cada campana, y por ende, el nivel de regulación que debiera poseer de modo de entregar una cantidad apropiada de agua. Por otra parte, el sistema debe asegurar con cumplir un calendario de riego previamente conocido, ello significa que el sistema no puede ser una limitante para transportar el agua en el período crítico del riego. Considerando lo anterior, los aspectos básicos para un análisis hidráulico de este sistema son: pérdidas de carga por fricción y singulares, determinación de los diámetros de las tuberías del sistema,

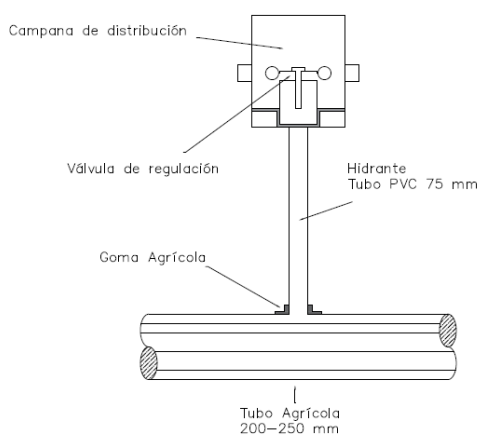
capacidad de conducción del sistema, velocidad mínima de limpieza y efecto de golpe de ariete.

Para realizar una entrega eficiente y uniforme del agua en el sistema de aducción a baja presión, debe diseñarse considerando el comportamiento hidráulico del mismo, a modo de conocer la carga dinámica a que se somete cada campana de entrega en el transcurso de una operación de riego. Este diseño permitirá optimizar el recurso hídrico y humano, a través de una mínima regulación en la válvula de huerto. Los elementos de decisión más importantes en el diseño son la disposición general del sistema, ubicación y número de estructuras complementarias, diámetro de tuberías y carga máxima de aducción (Burgos, 1997).

La válvula del huerto necesita un nivel de regulación que asegure la uniformidad y eficiencia de la entrega de agua a los surcos. Dicha regulación requiere conocer la pérdida de carga singular a distintos niveles de abertura. Este proceso de regulación es el principal obstáculo a que se enfrenta la posibilidad de automatizar el sistema, debido a que la válvula deberá abrirse en distintos niveles en cada posición de riego. Burgos (1997) concluyó que el sistema de aducción a baja presión permite una mayor eficiencia y eficacia en el manejo del recurso humano. Requiere alrededor de un tercio de la mano de obra tradicional y la labor de ésta es más enfocada a los aspectos importantes del riego, como es el control del caudal en los surcos y tiempos de riego.

Este sistema debe ubicarse en el sector más alto del área a regar. Así se utiliza los desniveles naturales y obtiene la presión mínima necesaria que permite la aducción de agua, a través de tubos elevadores o compuertas de riego, favoreciendo la entrega de agua a presiones reguladas y caudales controlados. Las tuberías utilizadas son de baja presión, por lo que se requiere solo una altura entre 20 y 50 cm para iniciar la carga.

Las partes de un sistema de baja presión son: cámara de entrada, tubería de conducción, elevadores, campanas de distribución, válvula de huerto, cámara reguladora de presión, válvula alfalfa, válvula beta y cámara de limpieza (Velazco, 2009).



**Figura 12.** Elevador y campana de distribución. Fuente: elaboración propia.

Para el caso manual, se debe encontrar la presión base de cada hidrante, ya que, en cada subunidad existirán presiones diferentes. Sin embargo, las subunidades de mayor importancia para este estudio son las que están ubicadas más lejos del canal aductor. A dichas subunidades llegará la menor

presión, la cual es la indicada para que la campana emita el caudal correspondiente al diseño, es por esto, que las demás subunidades tendrán que tener las alturas de sus hidrantes acordes a las presiones que tengan a las entradas de sus propias subunidades. Para la fase de almacenamiento se tendrá que disminuir la altura de agua en cada campana mediante la regulación de la válvula de huerto para poder obtener un caudal reducido. Este caudal no tendrá una alta homogeneidad a lo largo del área de riego.

Por otro lado, para el caso de un nivel de automatización alto en el sistema de baja presión, existirá un embalse de regulación con válvulas inteligentes que regulen el caudal y el tiempo de riego, además de que, existan cajas de distribución con sensores de altura de agua. El embalse de regulación tendrá una carga hidráulica y estar a cierta altura con respecto al área de riego. Las válvulas inteligentes producirán la pérdida de carga necesaria para que la presión base de cada válvula sea la misma que la válvula más alejada al embalse de regulación y así obtener una buena uniformidad a lo largo del área de riego.

### 3.11.2. Altura de hidrantes

Para determinar la altura de los hidrantes para la subunidad, se realiza el cálculo ocupando la ecuación de Bernoulli, la que se muestra a continuación:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + H_L + H_s \quad [70]$$

Donde,

$V$  = Velocidad con que pasa el agua dentro de la tubería ( $\text{m s}^{-1}$ ).

$P$  = Presión manométrica (Pa).

$Z$  = Altura de cota (m).

$g$  = Constante de gravedad ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

$H_L$  = Pérdidas lineales de carga por fricción (m).

$H_s$  = Pérdidas por singularidades de carga (m).

Tanto las pérdidas lineales ( $H_L$ ) como singulares ( $H_s$ ), se calculan con las ecuaciones de Darcy-Weisbach, esto fue debido a que Burgos (1997) concluyó que en el análisis de pérdidas de carga por fricción no presenta diferencias al utilizar Hazen-William o Darcy-Weisbach, sin embargo, si se conoce la viscosidad del agua de riego, es preferible el uso de la ecuación de Darcy por representar una mayor exactitud. Dicha ecuación se muestra a continuación:

$$H_L = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad [71]$$

$$H_s = K_s * \frac{V^2}{2g} \quad [72]$$

Donde,

$f$  = Factor de fricción.

$L$  = Largo de la tubería (m)

$D$  = Diámetro interno de la tubería (m).

El cálculo del factor de fricción ( $f$ ) se obtuvo teniendo en cuenta el régimen de flujo de agua en la tubería:

$$f = 0,32 * Re^{-0,25} \quad [73]$$

Siendo,  $Re$  el número de Reynolds, el cual se calculó mediante la siguiente ecuación:

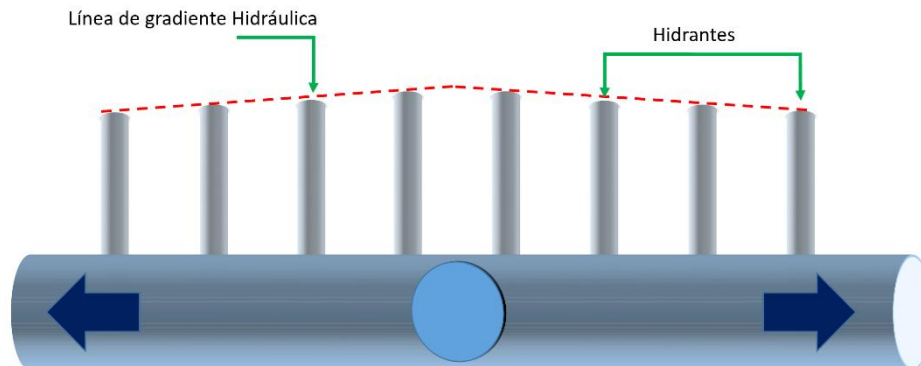
$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad [74]$$

Donde,

$V$  = Velocidad dentro de la tubería ( $m s^{-1}$ ).

$D$  = Diámetro interno de la tubería (m).

$\nu$  = Viscosidad cinemática del agua a 20°C ( $m^2 s^{-1}$ ).



**Figura 13.** Subunidad de aducción en riego por surcos para el caso un sistema automatizado. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 13 muestra que la válvula inteligente tiene que estar ubicada en la mitad de la subunidad, esto es para que exista una uniformidad entre la parte izquierda y la parte derecha con respecto a la entrega de agua. Al momento de calcular las alturas de los hidrantes se tomará en cuenta cualquiera de los dos lados, esto es debido a que la superficie tiene que tener una pendiente tan pequeña que no exista una gran variación la cual produzca pérdidas o ganancias de presión a lo largo de la tubería de distribución. Las alturas de los hidrantes irán disminuyendo entre más distancia exista entre la mitad de la subunidad (donde se sitúa la válvula inteligente) y la base de cada hidrante, esto anterior quiere decir que los hidrantes que estén en las esquinas de las subunidades, serán de una menor altura, ya que, sus presiones bases serán menores en comparación a las presiones que tengas los hidrantes más cercanos a la mitad de la subunidad, los cuales tendrán una mayor altura. En la figura anterior muestra la línea de gradiente hidráulica que se produce en la

subunidad. Tanto para un sistema automatizado como uno que no, es muy necesario hacer un análisis exhaustivo de la longitud que puedan tener las tuberías de distribución, ya que esto dispondrá la cantidad de salidas o hidrantes en la subunidad.

### **3.12. Costos**

Holzapfel (2020) explica que nivelar un terreno es una acción básica para un buen manejo y diseño de un método de riego superficial, cuya realización es un tema netamente económico, ya que, generalmente es de elevado costo y debe compararse con los costos de implementar riego presurizado, método que no requiere nivelar.

El desarrollo de un proyecto de riego requiere un análisis económico que considere la vida útil del sistema, cuyo período de amortización es de 20 años para el sistema de baja presión.

#### **3.12.1. Costos iniciales**

Los costos a considerar en un sistema de aducción se pueden dividir en costos de implementación y operación. El primero se refiere a la inversión inicial, que puede desglosarse en costos de diseño, instalación y materiales. El segundo considera los gastos de mano de obra y mantención, durante su vida útil (Burgos, 1997). Los costos para el establecimiento de un sistema de baja presión se pueden dividir en: Costo de materiales, estructuras anexas, diseño e instalación del sistema.

Gracias a la investigación de Burgos (1997) que comparó diferentes sistemas de aducción, observó que el costo más significativo se refiere a los materiales. Lo anterior implica que en la elección de estos materiales debe considerarse la calidad, duración y costo. Además, si se extrapola los datos de costos al tipo de suelo, se puede observar que en un suelo arenoso los costos son más altos que en un suelo franco o arcilloso. Este costo se debe considerarse al momento de planificar el riego de un huerto y, en lo posible, privilegiar surcos largos, pero que este criterio mantenga una calidad de riego aceptable, decisión que se obtiene al realizar el análisis de diseño del riego por surcos. En ciertos casos, no es posible decidir un largo del surco, porque se encuentra preestablecido. Esta condición se observa en huertos que no se planifican considerando el riego, situación que puede generar un aumento considerable de los costos lo que es bastante común en el país. Finalmente Burgos (1997) concluye que, el sistema de baja presión, resulta no solo conveniente desde un punto de vista del manejo y operación del riego, al mantener mayor control sobre los parámetros que influyen en él, mejorando la eficiencia de utilización del recurso, sino también en términos financieros y económicos en comparación a los demás sistemas de aducción.

### **3.12.2. Costos de operación**

En estos costos se incurre durante la temporada de riego. Se refiere fundamentalmente a los costos de mano de obra y mantención del sistema de

baja presión, dependiendo del nivel de automatización en el cual se esté trabajando.

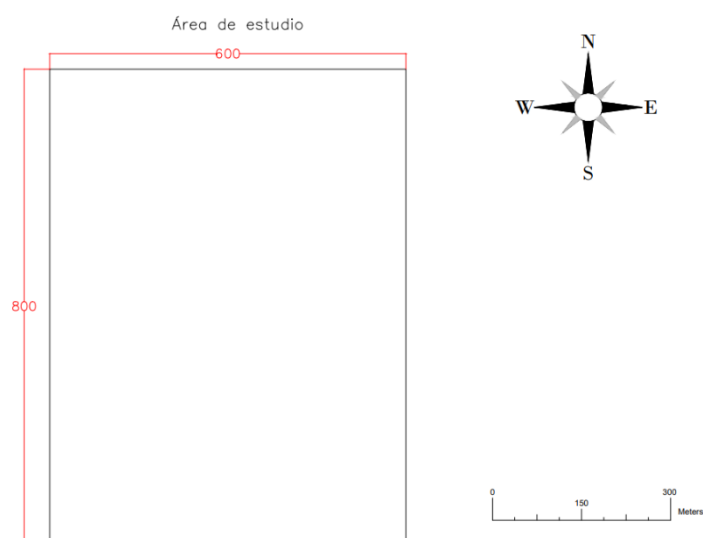
Costos de la mano de obra: operar un sistema de baja presión requiere menos mano de obra en comparación a los demás sistemas de aducción (Burgos, 1997), y con un menor esfuerzo (se limita a abrir y cerrar válvulas), lo que involucra un aspecto ergonómico no valorado, pero no menos importante; considerando que ello implica una mayor eficiencia y preocupación en las labores importantes en el riego (caudales y tiempos de riego). Esto anterior, se refiere a un sistema manual, el cual tiene un costo de \$6.670 por cada hectárea/día (cálculo en base sueldo mínimo, 2022). Para el caso automatizado, el único costo de mano de obra se basa en tener en buenas condiciones el surco, ya que, las válvulas inteligentes harán el trabajo de cambiar el caudal cuando se pase de una fase a otra.

Costos de mantención: relación con los gastos en la reposición de material dañado y mantención del sistema. En el caso particular del sistema de baja presión, si se diseña, instala y maneja adecuadamente, debería gastar no más del 2% de la inversión en materiales de riego al año (Comisión Nacional de Riego, 1996; citado por Burgos, 1997). También hay que tener en cuenta la mantención de los surcos, válvulas inteligentes, estación base de programación, etc.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Estudio de caso

El estudio se sitúo en la Comuna de Chillán. El frutal que se ocupó fue el Manzano Gala Brookfield con portainjertos M.9, el cual tiene un marco de plantación de 3,5 metros entre hileras y 1 metro sobre hilera. La superficie total del predio fue de 48 hectáreas. La figura 14 muestra las dimensiones del predio.



**Figura 14.** Área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Girona (2007) citado por Lecaros-Arellano *et al.* (2021), encontró que para árboles de manzanos maduros injertados en portainjerto M.9, creciendo en un suelo de textura franca, existía poca extracción de agua por debajo de los 40 cm de profundidad. La densidad de actividad de raíces en el suelo de textura franco arcillosa esta aproximadamente en 60 cm de profundidad y con un diámetro de 54 cm (Lecaros-Arellano *et al.*, 2021).

#### 4.1.1. Suelo

**Tabla 3.** Parámetros físico-hídricos; profundidad de raíces extractantes ( $Z$ ), capacidad de campo ( $CC$ ), punto de marchitez permanente ( $PMP$ ), y densidad aparente ( $Dap$ ).

<b>Textura</b>	<b><math>Z</math> (cm)</b>	<b><math>CC</math> (<math>g\ g^{-1}</math>)</b>	<b><math>PMP</math> (<math>g\ g^{-1}</math>)</b>	<b><math>\rho_{ap}</math> (<math>g\ cm^{-3}</math>)</b>
Franco arcilloso	60	0,24	0,13	1,45

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la cantidad de agua que puede ser aprovechada ( $HA$ ) se ocupó la siguiente expresión:

$$HA = \frac{(CC - PMP)}{100} * \frac{\rho_{ap}}{\rho_{agua}} * Pr * \frac{CR}{100} \quad [75]$$

Donde,

$HA$  = Altura de agua aprovechable del suelo por el frutal (mm).

$CC$  = Capacidad de campo ( $g\ g^{-1}$ ).

$PMP$  = Punto de marchitez permanente ( $g\ g^{-1}$ ).

$\rho_{ap}$  = Densidad aparente del suelo ( $g\ cm^{-3}$ ).

$\rho_{agua}$  = Densidad del agua ( $g\ cm^{-3}$ ).

$CR$  = Criterio de riego afín del frutal (%).

$Pr$  = Profundidad radical (mm).

Además, el marco de plantación de la variedad de manzano en estudio, es de 3,5 m x 1 m de distancia entre hilera y sobre hilera, respectivamente, y se pudo obtener el volumen de suelo humedecido ( $V_h$ ) de la siguiente forma:

$$V_h = HA * E_{eh} * E_{sh} \quad [76]$$

Por otro lado, se obtuvieron los coeficientes de infiltración para el suelo, los cuales se muestran en la Tabla 4:

**Tabla 4.** Coeficientes de infiltración del suelo en cuestión.

Coeficientes de infiltración	A ( $m^3 min^{-1} m^{-1}$ )	B
	0,00619	0,391

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2. Evapotranspiración

La evapotranspiración de referencia ( $ET_r$ ) para diferentes días consecutivos, a distintas probabilidades de ocurrencia, se obtuvo mediante un análisis de una serie de datos de evapotranspiración de referencia (2012-2021) provenientes de la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción. Todo lo anterior, se hizo para el mes de máxima demanda (enero), con una probabilidad del 85% de ocurrencia, debido a que el suelo en el que se sitúa el estudio es de textura franca arcillosa.

#### 4.1.3. Volumen de agua por día

Se obtuvo el volumen de agua por día para el frutal, ocupando la siguiente ecuación:

$$V_{arb} = \frac{ET_c * E_{eh} * E_{sh}}{EDT} \quad [77]$$

Donde,

$V_{arb}$  = Volumen de agua que necesita el árbol por cada día ( $L \text{ planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ).

$ET_c$  = Evapotranspiración actual ( $\text{mm día}^{-1}$  o  $L \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ).

$E_{eh}$  = Espaciamiento entre hileras (m).

$E_{sh}$  = Espaciamiento sobre hileras (m).

$EDT$  = Eficiencia de distribución total (0,9).

#### 4.1.4. Frecuencia de riego

Un punto importante a la hora de diseñar un riego fue obtener la frecuencia con la cual se regará el predio en cuestión. Esto anterior, se encontró de la siguiente forma:

$$FR = \frac{V_h}{V_{arb}} \quad [78]$$

Donde,

$FR$  = Frecuencia de riego (*días*).

$V_h$  = Volumen de suelo humedecido ( $L$ ).

$V_{arb}$  = Volumen de agua que necesita el árbol por cada día ( $L \text{ planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ).

#### 4.1.5. Volumen total a aplicar

Finalmente, el volumen que se tiene que suministrar al suelo, se obtuvo de la siguiente forma:

$$V_t = V_{arb} * FR \quad [79]$$

Donde,

$V_t$  = Volumen total a aplicar por árbol mediante el sistema de riego ocupado ( $L \text{ árbol}^{-1}$ ).

## 4.2. Análisis de selección de los parámetros de diseño en riego por surco

### 4.2.1. Determinación del caudal máximo no erosivo

Para poder encontrar el caudal máximo no erosivo ( $Q_{max}$ ), correspondiente a la fase de avance, se ocupó las ecuaciones 26, 27 y 28.

Se corroboró si es que el caudal máximo no erosivo puede fluir por medio del surco, por lo cual se obtuvo el caudal total que puede conducir el surco.

A continuación se muestran los parámetros hidráulicos de la forma del surco:

**Tabla 5.** Geometría del surco

Área		Perímetro		Forma hidráulica		Altura
$E_1$	$E_2$	$G_1$	$G_2$	$F_1$	$F_2$	$y_o (m)$
1,397	1,645	2,741	0,685	0,314	2,778	0,150

Fuente: Elaboración propia.

La profundidad del surco fue de 15 cm, se respetó el 80% de esa altura por cuestión de cálculo, así que se obtuvo una profundidad de 12 cm de altura de surco.

#### 4.2.2. Determinación del tiempo de riego ( $T_R$ )

Para obtener el tiempo que necesita infiltrar agua en el suelo con el propósito de satisfacer las necesidades hídricas del frutal, se ocupó la siguiente ecuación:

$$T_R = \left[ \frac{H_A}{A} \right]^{\frac{1}{B}} \quad [80]$$

Donde,

$T_R$  = Tiempo de riego (min)

$H_A$  = Volumen de agua que requiere el suelo bajo el criterio de riego en función de los metros lineales de surco ( $\text{m}^3 \text{m}^{-1}$ )

$A$  = Parámetro de infiltración ( $\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-1}$ )

$B$  = Parámetro de infiltración (adimensional)

Con los datos de Tabla 4, se encontró la ecuación de la tasa de infiltración (Ecuación 1), con lo cual se tiene que:

$$D = 0,00619T^{0,391} \quad [81]$$

Se determinaron los metros cúbicos por metro de surco ( $H_A$ ), ocupando el valor del volumen total a aplicar por cada riego ( $V_t$ ) y la cantidad de surcos por hilera ( $N_{sh}$ ).

La ecuación que se mostrará a continuación sirvió para determinar el volumen por metro lineal requerido por el frutal:

$$H_A = \frac{V_t}{N_{sh} * E_{sh}} \quad [82]$$

Donde,

$H_A$  = Metros cúbicos por metro de surco ( $m^3 m^{-1}$ ).

$V_h$  = Volumen de suelo humedecido ( $m^3$ ).

$N_{sh}$  = Cantidad de surcos por cada hilera.

$E_{sh}$  = Espaciamiento sobre hileras (m).

Luego de encontrar el tiempo de riego ( $T_R$ ), se obtuvo el número de posturas que tienen que existir por día, no excediéndose de 20 horas. Esto anterior es debido a que se hizo una comparación con el riego por goteo, en el cual se consideró el mismo tiempo total de riego por día.

#### 4.2.3. Largo del surco

Para obtener un largo de surco, se ocuparon las dimensiones del lugar en estudio, las cuales son de 600 m de ancho y 800 m de largo (Figura 14), con la pendiente del 0,8% en el sentido de la última dimensión descrita. Como se dijo anteriormente, se privilegió los surcos largos pero siempre manteniendo una calidad de riego aceptable, además de que estos tengan una longitud que sea múltiplo de los 800 m de largo.

Se dispusieron tres largos de surco, los cuales se analizaron para ver si ocupando estas longitudes dentro del predio, existiría la posibilidad de obtener un número de 15 posturas en total.

Luego, se hizo un análisis de parámetros de calidad para los diferentes largos de surco con distintos tiempos de corte, mediante el Software Aquasurco®, en el cual se ingresó los parámetros de la forma del surco, los caudales a ocupar, la pendiente y rugosidad del surco, el espaciamiento entre surcos, caudales dependiendo de la fase de riego, tiempo de corte, largo de surco y volumen de agua requerida.

Se eligió el largo del surco en base a la obtención de los costos asociados a la longitud y al caudal que tendría que tener para satisfacer la necesidad del sistema.

### **4.3. Área a regar**

Se obtuvo la disposición de las posturas dentro del área a regar, estas posturas se dividieron en dos partes iguales (subunidades) para disminuir las pérdidas de carga. Con lo anterior, se obtuvo las subunidades más críticas que se ocuparon como referencia para el análisis de la obtención de las alturas de los hidrantes.

#### **4.3.1. Altura de los hidrantes**

Para obtener las alturas de los hidrantes tanto para el caso manual o con automatización, se procedió a elegir en primera instancia el diámetro de la tubería principal, el cual fue obtenido a través la fórmula clásica para obtener la velocidad crítica ( $V_c$ ) que fue propuesta por Durant (1979) citado por Burgos (1997), para materiales de granulometría uniforme y está dado por la siguiente expresión:

$$V_c = F_1 * \sqrt{2} * g * D * \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \quad [83]$$

Donde,

$V_c$  = Velocidad crítica (m s<sup>-1</sup>)

$F_1$  = Coeficiente de Durant (adimensional).

$D$  = Diámetro de la tubería (m).

$\rho_s$  = Densidad del sólido (kg m<sup>-3</sup>).

$\rho_l$  = Densidad del líquido (kg m<sup>-3</sup>).

Al utilizar la ecuación de Durant, se calculó la velocidad crítica conociendo la concentración “*in situ*” de los sedimentos y el diámetro estimado de éstos, para obtener el factor F1 de la Figura A1 del ANEXO.

Gracias a la expresión anterior, se encontró el diámetro que no produjese una velocidad dentro de la tubería mayor a la  $V_c$ .

En segunda instancia, se encontró las subunidades de referencia, con las cuales se basó el cálculo para obtener las alturas de los hidrantes. Estas subunidades se eligieron, ya que, se puso atención a que punto del área a regar existía el tramo más largo que tenía llevar el caudal total de una postura (2 subunidades). Con el manejo de riego se justificó la ocupación de estas subunidades.

Por otro lado, se obtuvo la diferencia de cota que tiene que existir entre el canal aductor o embalse de regulación (ya sea el nivel de automatización a diseñar) y la primera caja de distribución, la altura de agua que tiene que existir en el embalse o canal y la presión que tiene que haber en la segunda caja de distribución para que el agua llegue con una presión necesaria a las campanas de distribución. Estas presiones se obtuvieron ocupando las ecuaciones de Bernoulli y Darcy-Weisbach.

Se decidió de poner la entrada de agua en la mitad de la subunidad, haciendo más fácil el cálculo de las alturas de los hidrantes, debido a que con esta forma el gradiente hidráulico es igual para ambos lados, como se muestra en la Figura 13.

#### 4.4. Tasa de riego

La forma que se obtuvo la calidad en el uso del agua fue usando la tasa de riego ( $TR$ ), que se enfoca en ver cuál es el caudal que se necesita para suministrar una lámina de agua bruta a una superficie deseada, enfocándose en el tiempo que se emplea dicho caudal.

$$TR = \frac{\frac{L_{bruta}}{1000} * A_r}{ef * \frac{Hrs}{día} * FR * 3,6} \quad [84]$$

Donde,

$TR$  = Tasa de riego ( $L s^{-1}$ ).

$L_{bruta}$  = Lámina bruta a reponer por día (mm).

$A_r$  = Área total a regar ( $m^2$ ).

$ef$  = Eficiencia de aplicación ( $m^2$ ).

$\frac{Hrs}{día}$  = Tiempo que se destina a ocupar agua (hrs).

$FR$  = Frecuencia de riego (días).

Este parámetro se ocupó para ver la diferencia que existe entre ocupar sistemas de riego por surco con diferentes niveles de automatización y también compararlo con un sistema de riego por goteo (microriego).

#### 4.5. Embalse de regulación

Después de que se logró encontrar el tiempo de corte ( $T_{co}$ ), tiempo de avance ( $T_f$ ), tiempo de almacenamiento ( $T_{alm}$ ), caudal máximo no erosivo ( $Q_{max}$ ), y caudal reducido ( $Q_{red}$ ), se obtuvo el caudal de entrada ( $Q_{ent}$ ) mediante un “loops”, desde el paso 3 de la presente metodología, en la cual se encontró el tiempo que se demora para llenar el embalse, y si es que con este caudal de entrada existente, se puede suplir el volumen faltante del embalse que este al momento de terminar la última postura, antes de que se termine el día. Además se obtuvo la capacidad requerida ( $K_t$ ) mediante la Ecuación 64, para cada período de estudio hasta terminar con todas las posturas de riego. Se escogió la máxima diferencia entre las necesidades y la entrada de agua al embalse para obtener la capacidad requerida máxima ( $K_a$ ) y se encontró el tiempo que se destina a la entrada de agua al embalse ( $T_{ent}$ ).

Como segundo paso, se optimizó el tiempo empleado en la entrada de agua en el embalse ( $T_{ent}$ ), logrando empezar el periodo de avance de la segunda postura inmediatamente después de que el caudal de entrada haya suplido la demanda del periodo de almacenamiento de la primera postura, es decir, la fase de avance de la segunda postura empezará a ejecutarse antes de que termine la fase de almacenamiento de la primera postura, logrando así, una disminución en el tiempo en que entra agua ( $T_{ent}$ ) al embalse en comparación al punto anterior. Además también se obtuvo la capacidad máxima requerida.

Como paso 3, se analizó si es que es factible poner otra postura al día, viendo el tiempo disponible que exista después de terminar la última postura. Esto es debido a que se debe considerar que el embalse tiene que estar a su máxima capacidad el día de riego posterior.

El tiempo total que se ocupa para suplir la demanda de todas las posturas más lo que se demoró en rellenar el embalse por completo, como se describió en el paso 2, se comparó con este mismo tiempo, pero no empezando la segunda postura antes de que se acabará el tiempo de almacenamiento de la primera postura.

Por último, a él volumen máximo requerido del paso 2, se le agregó un 15% de este más de volumen por seguridad, para suplir posibles pérdidas por evaporación.

Finalmente, se hizo un análisis obteniendo el volumen total de agua requerida para una sola postura con los casos de 160 y 266 m, comparando así, que caso es el que ocupa un menor volumen de agua.

#### 4.6. Manejo de riego

Ya que se dividieron las posturas en dos subunidades, se eligió la manera que implicara una menor pérdida de carga, por lo tanto, se le asignó una numeración a cada subunidad, y se analizó el orden en el cual se tienen que regar estas subunidades.

#### 4.7. Riego por goteo

Para hacer una comparación simple entre el riego por surco automatizado y el riego por goteo, se siguió la metodología de este punto. Se consideró el volumen de agua aplicar para el Manzano Gala Brookfield con portainjertos M.9., una frecuencia de riego, ocupando el área total del predio. De lo anterior, se obtuvo el volumen de agua que se necesita por sector ( $V_S$ ), de la siguiente expresión:

$$V_S = V_t * \frac{10000}{E_{eh}E_{sh}} * \text{área a regar por día} \quad [85]$$

Donde,

$V_S$  = Volumen de agua que se necesita por sector (L).

$V_t$  = Volumen de agua a aplicar por día (L árbol<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>).

Por otro lado, se consideró tener 4 posturas por día, con lo cual se obtuvo el caudal necesario ( $Q$ ) para suplir la demanda del cultivo mediante goteo, mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{\text{Volumen por sector} * FR}{T_R * 3600} \quad [86]$$

Donde,

$Q$  = Caudal necesario para suplir la demanda del cultivo ( $L s^{-1}$ ).

$T_R$  = Tiempo de riego (h).

$FR$  = Frecuencia de riego (días).

Por otro lado, a modo de análisis, para el riego por surco automatizado y el riego por goteo, se comparó el caudal que necesita el embalse de regulación y el caudal que se ocupa para el riego presurizado en base al área total a regar.

#### **4.8. Costos**

Se obtuvieron los costos de obtención e implementación de los sistemas de riego por surco con diferentes grados de automatización y los costos asociados de operación.

#### **4.9. Nivelación**

La nivelación de terreno es un punto fundamental cuando se habla de costos. Holzapfel (2020) explica que nivelar un terreno es una acción básica para un buen manejo y diseño de un método de riego superficial, cuya realización es

un tema netamente económico, ya que, generalmente es de elevado costo y debe compararse con los costos de implementar riego presurizado, método que no requiere nivelar.

Esta comparación se obtuvo entre el riego por surcos automatizado y microriego aludiendo a sus costos por hectárea. Se obtuvo la diferencia entre los costos totales de implementación entre estos sistemas de riego. Luego, se usó el costo de nivelar por cada  $m^3$  de suelo, con la finalidad de encontrar el volumen que se tendría que mover para que el riego por surco alcanzará un costo igual al de microriego. Tras esto, se clasificó en seis rangos: muy bajo, bajo, medio bajo, medio alto, alto y muy alto.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se muestran los resultados y discusión asociados al estudio de caso.

### 5.1. Suelo

Basado en la Ecuación 76, se obtuvo el volumen de suelo humedecido para diferentes criterios de riego. A continuación se muestran los resultados:

**Tabla 6.** Distintos criterios de riego ( $CR$ ) con sus correspondientes alturas de agua aprovechable disponible ( $HA$ ) y volúmenes de suelo humedecido ( $V_h$ ).

$CR$ (%)	$HA$ ( $L m^{-2}$ )	$V_h$ (L)
35	33,5	117,2
50	47,9	167,5
65	62,2	217,7

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso particular del árbol de manzana Brookfield con portainjertos M.9, se ocupó un 35% de criterio de riego, debido a que el manzano se puede estresar hídricamente en el período de maduración, reduciendo su rendimiento. Por lo anterior, se tiene que el volumen de suelo humedecido es de 117,2 L.

Debido al marco de plantación de esta variedad de manzanos, se puede decir que aproximadamente existirá una densidad de árboles del orden de 2857 plantas ha<sup>-1</sup>.

## 5.2. Evapotranspiración

A continuación se muestra los datos obtenidos tras el procedimiento, en cual se trabajó con datos de evapotranspiración de referencia (2012-2021).

**Tabla 7.** Evapotranspiración de referencia ( $ET_r$ ), para distintos días consecutivos y con una probabilidad del 85%.

Días consecutivos	3	5	7
$ET_r$ (mm día <sup>-1</sup> )	9,31	9,16	8,96

Fuente: Elaboración propia.

Por tema de diseño, se consideró la evapotranspiración de referencia para 5 días, debido a que el frutal en cuestión es medianamente sensible al estrés hídrico. Jara (2020) señala que el tamaño del fruto es sensible al déficit de agua y ahorros de agua sólo serían recomendables en el período de post-cosecha. Por lo anterior, la evapotranspiración de referencia ( $ET_r$ ) es de 9,16 mm día<sup>-1</sup>.

Ocupando la Ecuación 17, para encontrar el valor de la evapotranspiración actual ( $ET_c$ ), con una fracción de sombreado al medio día solar de 0,7 (máxima demanda) y con siguientes factores de manejo del frutal:

**Tabla 8.** Factores de cobertura asociados al manzano.

Frutal	$F_1$	$F_2$
Manzano	1,24	0,11

Fuente: Elaboración propia.

Desarrollando, la ecuación propuesta anteriormente, se tiene que el valor de la evapotranspiración actual ( $ET_c$ ) del frutal en estudio tiene un valor de 8,96 mm día<sup>-1</sup>.

Tras lo anterior, se tiene que el volumen de agua que necesita el árbol cada día ( $V_{arb}$ ) es de 34,8 L árbol<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>. Por otro lado, al tener el volumen de suelo humedecido y el volumen de agua que necesita el árbol, se obtuvo la frecuencia de riego, con un valor de 3 días. Esto significa que se tiene regar la totalidad de las 48 ha en un máximo de tres días. Lo anterior, se traduce a que se tendrá que regar 16 ha por cada día, para cumplir la condición antes descrita. Finalmente, por cada postura de riego se tendrá que aplicar un volumen ( $V_t$ ) de aproximadamente 104,5 L.

### 5.3. Análisis de selección de los parámetros de diseño en riego por surco

#### 5.3.1. Caudal máximo no erosivo

El valor del caudal máximo que se puede aplicar a un surco sin que el suelo se erosione, se muestra a continuación:

**Tabla 9.** Caudal máximo no erosivo ( $Q_{max}$ ) usando las tres ecuaciones descritas, para un suelo franco arcilloso.

$Q_{max}$ ( $L s^{-1}$ )	Holzapfel (2020)	Criddle (1956)	Hamad y Stringham (1978)
	0,93	0,79	1,12

Fuente: Elaboración propia.

Al estar diseñando este estudio en un suelo franco arcilloso, lo más recomendable es ocupar el caudal obtenido por la Ecuación 28, que propuso Hamad y Stringham (1978), para suelos francos arcillosos.

### 5.3.2. Geometría del surco

**Tabla 10.** Área transversal del surco ( $A_T$ ), caudal total que puede conducir el surco ( $Q_T$ ), caudal máximo no erosivo ( $Q_{máx}$ ) y caudal reducido ( $Q_{red}$ ).

$A_T$ ( $m^2$ )	$Q_T$ ( $L s^{-1}$ )	$Q_{máx}$ ( $L s^{-1}$ )	$Q_{red}$ ( $L s^{-1}$ )
0,04	20,92	1,12	0,45

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar el  $Q_T$  con el  $Q_{máx}$ , se llegó a que no existiría algún desborde ocupando el caudal máximo no erosivo.

Además, debido a los criterios hablados en las secciones anteriores, se dejó para la fase de almacenamiento, un caudal reducido que será aproximadamente un tercio del caudal nominal.

### 5.3.3. Tiempo de riego

La actividad de raíces de manzanos Gala Brookfield en suelos francos arcillosos, se sitúa hasta 60 cm de profundidad y con un diámetro de 54 cm (Lecaros-Arellano *et al.*, 2020). Por lo anterior, se ocuparon 2 surcos por cada

hilera para que se produzca un traslape entre los bulbos húmedos de cada surco.

Gracias a la Ecuación 82, se tiene que  $H_A$  tiene un valor de  $0,0523 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ . Finalmente, ocupando la Ecuación 80 se obtuvo un tiempo de riego de 234 min o 3,9 hrs aproximadamente.

La superficie total del predio es de 48 ha, la frecuencia de riego fue de 3 días, por lo tanto:

$$\frac{48 \text{ ha}}{3 \text{ días}} = 16 \text{ ha/día}$$

El tiempo de riego para suplir la demanda del frutal fue de 3,9 hrs, por lo que el número de posturas es de:

$$\frac{20 \text{ h/día}}{3,9 \text{ h/postura}} \approx 5 \text{ posturas/día}$$

Como se tiene 16 hectáreas por día a regar y con un total de 5 posturas por día, se tiene que:

$$\frac{16 \text{ ha/día}}{5 \text{ posturas/día}} \approx 3,2 \text{ ha/postura}$$

De lo anterior, se obtuvo que cada postura tiene que tener un área de 3,2 ha.

### 5.3.4. Largo del surco

Ya que se obtuvo la superficie por postura, se encontró el largo de surco, con el cual existan 5 posturas por día y un total de 15 posturas regadas al final del tercer día.

#### Caso 160 m

$$\frac{160 \text{ m} * X}{10.000 \frac{\text{m}^2}{\text{ha}}} = 3,2 \text{ ha}$$

$$X \approx 200 \text{ m (ancho de postura)}$$

Nuestras dimensiones del predio son de 600x800 m, por lo cual, se tiene que el largo de 160 m de surco cae 5 veces dentro de los 800 m y el ancho de 200 m cae 3 veces dentro de los 600 m. Al tener lo anterior, existirán 3 posturas hacia el lado y 5 hacia abajo, lo que significa un total de 15 posturas. El largo de 160 metros de surco sirve para el diseño. Con un total de 47,88 ha regadas al final de los 3 días.

#### Caso 200 m

$$\frac{200 \text{ m} * X}{10.000 \frac{\text{m}^2}{\text{ha}}} = 3,2 \text{ ha}$$

$$X = 160 \text{ m (ancho de postura)}$$

Nuestras dimensiones del predio son de 600x800 m, por lo cual, se tiene que el largo de 200 m de surco cae 4 veces dentro de los 800 metros y el ancho

de 160 m cae 3 veces dentro de los 600 m. Al tener lo anterior, existirán 3 posturas hacia el lado y 4 hacia abajo, lo que significa un total de 12 posturas. El largo de 200 m de surco no sirve para el diseño, porque nos faltarían 3 posturas para poder tener las 15 posturas propuestas al principio. Con un total de 37,8 ha regadas al final de los 3 días.

### Caso 266 m

$$\frac{266 \text{ m} * X}{10.000 \frac{\text{m}^2}{\text{ha}}} = 3,2 \text{ ha}$$

$$X \approx 120 \text{ m (ancho de postura)}$$

Nuestras dimensiones del predio son de 600x800 m, por lo cual, se tiene que el largo de 266 m de surco cae 3 veces dentro de los 800 metros y el ancho de 120 m cae 5 veces dentro de los 600 metros. Al tener lo anterior, existirán 5 posturas hacia el lado y 3 hacia abajo, lo que significa un total de 15 posturas. El largo de 266 metros de surco sirve para el diseño. Con un total de 47,48 ha regadas al final de los 3 días.

Por lo anterior, se tomara en cuenta para el análisis los largos del surco: 160 y 266 m.

Por otra parte, el estudio de caso se separó en dos grados de automatización: manual y con automatización.

#### 5.4. Caso sistema manual

En las tablas 11 y 12 se muestran los parámetros de calidad del riego a distintos tiempos de corte, aplicando el caudal máximo no erosivo y reducido, para largos de 160 y 266 m.

**Tabla 11.** Valores de los parámetros de calidad de acuerdo a distintos tiempos de corte ( $T_{co}$ ), aplicando un caudal máximo no erosivo ( $Q_{max}$ ) de  $1,12 \text{ L s}^{-1}$  y un caudal reducido de  $0,33 \text{ L s}^{-1}$  con una longitud surco de 160 m.

Área regada (ha)	$T_{co}$ (min)	EA (%)	ER (%)	EDT (%)
47,76	234	98,94	96,63	95,61
	244	97,80	97,86	96,75
	254	96,41	98,77	97,34

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 12.** Valores de los parámetros de calidad de acuerdo a distintos tiempos de corte ( $T_{co}$ ), aplicando un caudal máximo no erosivo ( $Q_{max}$ ) de  $1,12 \text{ L s}^{-1}$  y un caudal reducido de  $0,45 \text{ L s}^{-1}$  con una longitud surco de 266 m.

Área regada (ha)	$T_{co}$ (min)	EA (%)	ER (%)	EDT (%)
46,92	234	99,54	91,16	88,45
	244	99,15	92,73	90,10
	254	98,56	94,09	91,45

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las tablas 11 y 12, se observa que las eficiencias que se obtuvieron mediante el software Aquasurco® muestran muy buenos valores, esto es debido a que se ocuparon criterios para las diferentes variables del riego por surco, como por ejemplo, cambiar el caudal reducido basándose en el largo del surco.

Cabe recalcar que las eficiencias que se presentan en las tablas anteriores corresponden a la suposición de que al terminar la fase de avance, las válvulas

de huerto se regularán de tal forma que cada campana emita un caudal de igual magnitud, lo que en la práctica es muy difícil de lograr debido a la mala operación de estos sistemas en algunos predios, para este caso manual.

Si bien, los dos largos de surco en análisis representan diferentes áreas a regar, en el ámbito económico se prioriza los largos de mayor tamaño, debido a que se ocupan menos cajas de distribución, válvulas de huerto, conectores, etc. La siguiente tabla muestra la comparación del costo por hectárea (\$/ha) para los diferentes largos.

**Tabla 13.** Costos por hectárea dependiendo del largo de surco a ocupar.

Largo (m)	Costo (UF/ha)
160	74,08
266	49,08

Fuente: Elaboración propia.

En base a lo que entrega la Tabla 13, se eligió un largo de surco de 266 m, esto es debido a que con esta longitud también se obtuvieron altos valores en los índices de calidad de riego que estuvieron por arriba del 85% y además es más económico que el largo de 160 m. Más adelante, se mostrará que ocupando un largo de 266 m, existe una menor demanda de caudal que se tiene que ocupar para suplir los requerimientos hídricos del frutal en ambas fases de riego. La disposición de las subunidades para el caso de 160 m, se muestran en la figura A3 del ANEXO.

Tras lo anterior, se regará 20 horas al día, cada postura durará 234 minutos, pudiéndose regar 5 posturas al día. Cada postura tiene que tener un área

mínima aproximada de 3,2 hectáreas aproximadamente. Una postura está constituida por 2 subunidades de 266 metros de largo y 59,5 metros de ancho. Tras lo anterior, se regaran 34 hileras (68 surcos) simultáneamente.

**Tabla 14.** Tiempo de corte ( $T_{co}$ ), tiempo de avance ( $T_f$ ), caudal máximo no erosivo ( $Q_{max}$ ) y caudal reducido ( $Q_{red}$ ) por cada postura.

$T_{co}$ (min)	$T_f$ (min)	$Q_{max}$ (L s <sup>-1</sup> )	$Q_{red}$ (L s <sup>-1</sup> )
234	160	76,16	30,6

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.1. Altura de los hidrantes

La tubería principal para un largo de 266 m de surco tiene que ser obligatoriamente de un diámetro de 315 mm, ya que, la velocidad que corresponde a este diámetro de tubería tiene un valor de 1,06 m s<sup>-1</sup>. Este valor está por debajo de la velocidad crítica que es de 1,70 m s<sup>-1</sup>. Esta velocidad crítica se obtuvo suponiendo que existía una concentración del 10% y sedimentos tipo limo fino (0,02 mm de diámetro), con lo cual se obtuvo un  $F1=0,43$ . Solamente se analizó la tubería principal, esto es debido a que la mayor cantidad de caudal y presión pasara por esta tubería, en comparación a las otras tuberías existentes. Además, una forma de entender por qué se ocupó la velocidad crítica, es porque no se usó un equipo de bombeo, por lo tanto, se tuvo que buscar una forma para que no se produjese cavitación dentro de la tubería principal.

La Figura 16, muestra las subunidades de referencia, las cuales también se les puede llamar críticas, debido a que para suplir la demanda de estas

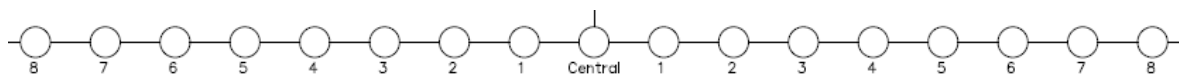
subunidades, se tuvo llevar el caudal correspondiente a una postura completa, hasta las subunidades que están en la mitad del área a regar. Más adelante se explicará el manejo de riego, con lo cual se entenderá de mejor forma este punto. Dichas subunidades sirvieron como base para obtener las alturas de los hidrantes.

Para el caso de no automatizar el sistema, la diferencia de cota entre el canal aductor y la superficie a regar tuvo que ser de 1 m de diferencia, con una carga hidráulica de 1,5 m de columna de agua, además que en cada caja de distribución tiene que existir una altura de agua para que exista la presión necesaria en cada subunidad; las subunidades que estén más cerca del canal aductor les llegará el agua a mayor presión, por consiguiente, las alturas de los hidrantes serán mayores en comparación a las subunidades que están más alejadas del canal aductor, en las cuales, los hidrantes serán de menor altura. Gracias a que se decidió poner la entrada de agua en la mitad de la subunidad, se pudo obtener las alturas de los hidrantes, que se muestran en la figura 16. En cada subunidad caen 17 hileras, cada una de estas le pertenece un hidrante. Para poder obtener la altura de cada uno de los hidrantes, se tuvo que sacar la altura del hidrante que está en la misma ubicación donde está la entrada de agua hacia la subunidad, esto significa que la presión base de ese hidrante será igual a la presión con la cual el agua entra a la subunidad. Luego de esto, existirán 16 hidrantes (hileras) por encontrar sus alturas, las cuales se obtendrán mediante un análisis que se hará para un solo lado, debido a que

no existe una gran pendiente en el predio, lo que significa que no habrán diferencias de presión entre los hidrantes que estén a una misma distancia de la entrada de agua (que se ubica al medio de la subunidad).

Los valores mostrados en la Tabla 15, fueron diseñados para las subunidades de referencia. Estas subunidades se muestran en la Figura 16. Para tener las alturas de los hidrantes de todas las subunidades, se tendría que hacer un análisis por cada una, debido a que las presiones bases de los hidrantes difieren dependiendo de la ubicación de la campana de distribución.

El diámetro de cada hidrante tiene un valor de 75 mm, las tuberías de distribución desde la caja hasta la base del hidrante de 200 mm y la tubería principal que conecta el canal aductor hasta la última caja de distribución será de 315 mm.



**Figura 15.** Distribución de hidrantes en una subunidad con sus respectivas válvulas de huerto. Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el cálculo se ocupó el caudal máximo no erosivo ( $Q_{max}$ ), el cual fue de  $0,0012 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  por cada surco. En cada hilera se consideraron dos surcos.

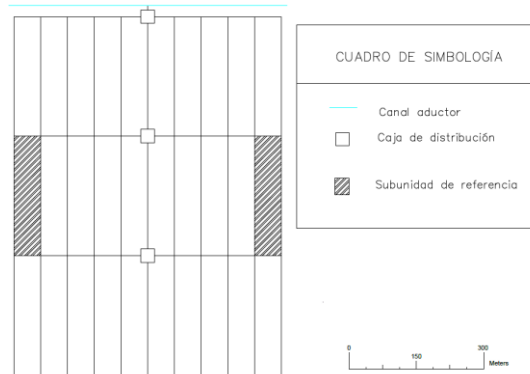
**Tabla 15.** Presión base de cada hidrante (PB) y altura de hidrantes (Ht).

N°	Presión base (m)	Ht (cm)
central	0,900	89,9
1	0,895	89,5
2	0,886	88,6
3	0,876	87,6
4	0,866	86,6
5	0,857	85,7
6	0,850	85,0
7	0,847	84,7
8	0,846	84,6

Fuente: Elaboración propia.

Para la fase de almacenamiento, el caudal que entregará las campanas de distribución será menor, por consiguiente, la altura de agua que tiene que existir en cada una de estas campanas disminuirá, por lo que el operario tendrá que ajustar la válvula de huerto hasta encontrar la altura de agua deseada para que la campana emane el caudal correspondiente a la fase de almacenamiento. Por otro lado, se observa que existe un gradiente de presión que va disminuyendo a una mayor distancia de la entrada de agua a la subunidad. Los hidrantes que estén más cercanos al centro de la subunidad tendrán una mayor altura en comparación a los que estén más lejos.

Cada subunidad le corresponde 17 válvulas de huerto (una por cada hidrante). Las subunidades que están destacadas son las cuales se ocuparon para hacer el análisis de la obtención alturas de los hidrantes.



**Figura 16.** Distribución de hidrantes en una subunidad con sus respectivas válvulas de huerto. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.2. Tasa de riego

La tasa de riego se enfoca en ver cuál es el caudal que se necesita para suministrar una lámina de agua bruta a una superficie deseada, enfocándose en el tiempo que se emplea dicho caudal.

El área total a regar es de 47,5 hectáreas aproximadamente, una lámina bruta de agua a reponer de 26,88 mm, una eficiencia de aplicación del 80%, regando 19,5 horas por día y con un total de 3 días, se tiene que:

$$\frac{\frac{26,88}{1000} * 475000}{0,8 * 19,5 * 3 * 3,6} = 75,78 \text{ L s}^{-1}$$

### 5.5. Caso automatizado

Para hacer una comparación, se hará el análisis con un largo de 266 metros, cambiando el tiempo de corte, para así conseguir las mejores eficiencias, mostrando volúmenes de escorrentía y de percolación profunda:

**Tabla 16.** Valores de algunos parámetros de calidad, volumen percolado ( $V_{perc}$ ) y volumen de escorrentía ( $V_{es}$ ), de acuerdo a distintos tiempo de corte ( $T_{co}$ ), con un caudal máximo no erosivo de  $1,12 \text{ L s}^{-1}$  y un caudal reducido de  $0,45 \text{ L s}^{-1}$ , y con una longitud de surco de 266 metros.

$T_{co}$ (min)	EA (%)	ER (%)	EDT (%)	$V_{perc}$ ( $m^3$ )	$V_{es}$ ( $m^3$ )
234	99,54	91,16	88,45	0,02	0,04
244	99,15	92,73	90,10	0,07	0,04
350	98,56	94,09	91,45	0,15	0,05

Fuente: Elaboración propia.

Se ocupará un tiempo de corte de 234 minutos debido a que el término de la última postura, se estará rondando las 20 horas propuestas al principio del análisis.

Al analizar la Tabla 16, se observa que al aumentar el tiempo de corte ( $T_{co}$ ), aumenta considerablemente el volumen percolado ( $V_{perc}$ ) y por escorrentía ( $V_{es}$ ), sin embargo, la eficiencia de distribución total (EDT) incrementa su valor debido a que el agua está por más tiempo sobre el surco. Los valores presentados en la tabla anterior se obtuvieron gracias a ocupar el software Aquasurco®. Para este caso automatizado, las eficiencias que se muestran en la tabla anterior son de alta confianza, debido a que, como se va a tener válvulas inteligentes, estas harán el trabajo de cambiar los caudales correspondientes a la fase de avance y almacenamiento.

Tras lo anterior, se regará las 20 horas del día y cada postura durará 234 minutos, pudiéndose regar 5 posturas al día. Cada postura tiene que tener un área mínima aproximada de 3,2 ha. Una postura está constituida por 2 subunidades de 266 m de largo y 59,5 m de ancho. Tras lo anterior, se regaran 34 hileras (68 surcos) simultáneamente.

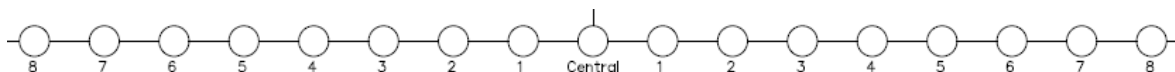
#### **5.5.1. Altura de los hidrantes**

Para el caso de automatizar el sistema, la diferencia de cota entre el embalse de regulación y la superficie a regar tiene que ser de 1 m de diferencia, con una carga hidráulica de 1,5 m de columna de agua. Además se obtuvo la altura de agua en las cajas de distribución, la presión que tiene que existir en la válvula inteligente, que esté en la subunidad donde se presenta más pérdidas de carga para llevar el agua desde el embalse hasta la misma (subunidades de referencia). Esta presión se establecerá como la necesaria para que cada hidrante emita un caudal homogéneo a lo largo del predio. Las válvulas que están más cerca del embalse de regulación les llegará el agua a mayor presión, sin embargo, la válvula inteligente de cada subunidad producirá la pérdida de carga necesaria para que la presión base de cada válvula sea la misma que la válvula que tenga más pérdida de carga para transportar el agua del embalse de regulación hasta la subunidad (subunidad de referencia). Esto anterior, significa que las alturas de los hidrantes serán iguales en todas las subunidades, ya que, la válvula de cada subunidad tendrá la misma presión base, muy por el contrario del caso de no automatizar el sistema. Cuando se

produzca el cambio de caudal de avance al caudal reducido, la válvula inteligente generará las pérdidas de carga correspondientes para que cada campana emita el caudal y presión que corresponda a la fase de almacenamiento. Por otro lado, existirán 2 sensores de humedad por cada subunidad, los cuales servirán para tener una retroalimentación *in situ* del avance del frente de agua, y así corregir diferentes variables, obteniendo mejores eficiencias.

El diámetro de cada hidrante tendrá un valor de 75 mm, las tuberías de distribución desde la caja hasta la base del hidrante de 200 mm y la tubería principal que conecta el canal aductor hasta la última caja de distribución será de 315 mm.

Gracias a que se decidió de poner la válvula inteligente en la mitad de la subunidad, se pudo obtener las alturas de los hidrantes, que se muestran en la Figura 16. En cada subunidad caen 17 hileras, cada una de estas le pertenece un hidrante. Para poder obtener la altura de cada uno de los hidrantes, se tuvo que sacar la altura del hidrante que se ubica en la misma parte donde está la válvula inteligente, esto significa que la presión base de este hidrante será igual a la presión con la cual el agua entra a la subunidad (válvula inteligente). Luego de esto, existirán 16 hidrantes (hileras) por encontrar sus alturas, las cuales se obtendrán mediante el mismo análisis que se hizo para el caso manual.



**Figura 17.** Distribución de hidrantes en una subunidad con sus respectivas válvulas de huerto. Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el cálculo se ocupó el caudal máximo no erosivo ( $Q_{max}$ ), el cual fue de  $0,0012 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  por cada surco. En cada hilera se consideraron dos surcos.

**Tabla 17.** Presión base de cada hidrante (PB) y altura de hidrantes (Ht).

N°	Presión base (m)	H tubo (cm)
central	0,900	89,9
1	0,895	89,5
2	0,886	88,6
3	0,876	87,6
4	0,866	86,6
5	0,857	85,7
6	0,850	85,0
7	0,847	84,7
8	0,846	84,6

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 17 muestra las presiones bases y alturas de los hidrantes de la válvula más alejada del embalse de regulación.

### 5.5.2. Cálculo del embalse de regulación

Sabiendo que la cantidad de surcos que se tienen que regar simultáneamente son 68 surcos, se muestra la siguiente tabla que muestra los valores de las variables que se emplean en la metodología anteriormente descrita en el texto (ver sección “Embalse de regulación”):

**Tabla 18.** Tiempos y caudales implicados en la obtención del embalse de regulación.

$T_{co}$ (min)	$T_f$ (min)	$T_{alm}$ (min)	$Q_{max}$ (L min <sup>-1</sup> )	$Q_{red}$ (L min <sup>-1</sup> )	$Q_{ent}$ (L min <sup>-1</sup> )
234	160	74	4569,6	1836	3060

Fuente: Elaboración propia.

El caudal máximo no erosivo ( $Q_{max}$ ) y el caudal reducido ( $Q_{red}$ ) mostrados anteriormente, están en base a el área mínima a regar, lo que significa que, los valores corresponden a la totalidad de los 68 surcos que se regarán simultáneamente. El caudal de entrada ( $Q_{ent}$ ) fue obtenido gracias al primer paso propuesto en la metodología, el cual fue hacer un “lapps” desde el paso 3, el cual hace énfasis de que el embalse tiene que rellenarse al final del día. El caudal de entrada podría ser muy pequeño, pero como consecuencia existiría un embalse de un volumen que quizás no se pueda rellenar al final del día. El caudal de entrada ( $Q_{ent}$ ) obtenido fue de 50,2 L s<sup>-1</sup>.

Seguido a esto, se procede a escoger la máxima diferencia entre las necesidades y entradas de agua al embalse para obtener la capacidad máxima requerida ( $K_a$ ) y encontrar el tiempo necesario para que se emplee dicha metodología, que se muestran a continuación:

**Tabla 19.** Capacidad máxima requerida ( $K_a$ ) y tiempo que se destina a la entrada de agua al embalse ( $T_{ent}$ ).

$K_a$ (m <sup>3</sup> )	$T_{ent}$ (h)
898	19,5

Fuente: Elaboración propia.

Optimizando el tiempo que se destina a la entrada de agua al embalse ( $T_{ent}$ ), mediante el tercer punto de la metodología propuesta anteriormente, se llega a que:

**Tabla 20.** Capacidad máxima requerida ( $K_a$ ) y tiempo que se destina a la entrada de agua al embalse ( $T_{ent}$ ) optimizado.

$K_a(m^3)$	$T_{ent}(h)$
1235,3	17,2

Fuente: Elaboración propia.

La diferencia entre la tablas 19 y 20, es que se aumenta la capacidad requerida ( $K_a$ ) del embalse. Por otro lado, existe una disminución del tiempo de entrada de agua al embalse ( $T_{ent}$ ). Esta disminución fue gracias a que se empezó el periodo del avance de la segunda postura inmediatamente después de que el caudal de entrada supiera la demanda del período de almacenamiento de la primera postura. Esta lógica se siguió haciendo hasta terminar la última postura. Para el caso de 160 m, en la tabla A1 del ANEXO se muestra sus valores correspondientes, tanto del volumen que se necesita como el tiempo empleado en completar las 5 posturas.

Finalmente, el volumen del embalse tiene que ser un 15% más de lo obtenido por la capacidad máxima requerida ( $K_a$ ), con lo que se tiene que, el embalse tiene que tener un volumen de 1420,6 m<sup>3</sup> aproximadamente. De lo anterior, se destaca que el tiempo que se demora el caudal de entrada ( $Q_{ent}$ ) en rellenar lo que le falta de agua a el embalse, en el momento que se termina de suplir el agua necesaria para satisfacer la fase de almacenamiento de la última

postura, tiene un valor de 408 minutos, por lo tanto, el tiempo que se destina a la entrada de agua más el tiempo anterior, es equivalente al total del tiempo que el agua entra al embalse en cada día, lo cual tiene un valor de 24 horas, por consiguiente, no se puede efectuar el punto 4 de la metodología propuesta o mejor dicho, no existe posibilidad de realizar otra postura en el mismo día.

Se comparó el tiempo que se demora el caudal de entrada en suplir todas las posturas del día más el tiempo que hay que tener para rellenar el embalse por completo, pero con la diferencia que en este caso no se procedió a empezar la segunda postura después de que se supliera la fase de almacenamiento de la segunda postura. Debido a lo anterior, el tiempo que se demora en suplir la demanda de todas las posturas fue de 19,5 horas, pero el tiempo que se destinó a rellenar el embalse fue menor, debido a que para la fase de almacenamiento de cada postura entro más agua en comparación de empezar la segunda postura antes de terminar la primera. Lo otro, es que se encontró el volumen de embalse que se necesita para este caso, el cual fue menor que el presentado al principio, demorándose la misma cantidad de tiempo (24 horas) y con un mismo caudal de entrada. Por lo anterior, fue recomendable elegir dependiendo de lo que se quiera hacer.

Volviendo a la comparación que se hizo entre el largo de 160 y 266 m de surco, el caudal de entrada que se hubiera tenido que ocupar para el primer caso sería de  $53,8 \text{ L s}^{-1}$ , un poco mayor que para el caso que se tomó en consideración, que fue de  $50,2 \text{ L s}^{-1}$ , respectivamente.

Tras lo anterior, se hizo un análisis para obtener el volumen total de agua requerida por una postura para el caso de 160 y 266 m:

Las dimensiones para el caso de 160 metros, fueron de 199,5 x 160 metros, donde el primer valor se refirió al ancho de cada postura. En este ancho caen 57 hileras, en las cuales existen dos surcos por cada una. El tiempo de avance y de almacenamiento fue de 74 y 160 minutos, respectivamente. El caudal máximo no erosivo y caudal reducido fue de  $1,12 \text{ L s}^{-1}$  y  $0,33 \text{ L s}^{-1}$ , respectivamente. Los datos anteriores fueron ocupados de la siguiente forma:

$$Fase\ ava = 57\ hileras * 2 \frac{surcos}{hilera} * 1,12 \frac{L}{s} * 60 \frac{s}{min} * 74\ min = 566899,2\ litros$$

$$Fase\ alm = 57\ hileras * 2 \frac{surcos}{hilera} * 0,33 \frac{L}{s} * 60 \frac{s}{min} * 160\ min = 361152\ litros$$

$$Total = 928051,2\ litros \approx 928\ m^3$$

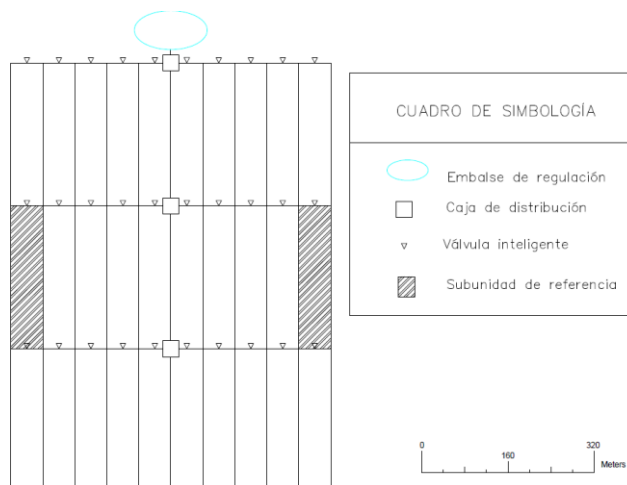
Las dimensiones para el caso de 266 m, fueron de 119 x 160 m, donde el primer valor se refirió al ancho de cada postura. En este ancho caen 34 hileras, en las cuales existen dos surcos por cada una. El tiempo de avance y de almacenamiento fue de 160 y 74 min, respectivamente. El caudal máximo no erosivo y caudal reducido fue de  $1,12 \text{ L s}^{-1}$  y  $0,45 \text{ L s}^{-1}$ , respectivamente. Los datos anteriores fueron ocupados de la siguiente forma:

$$Fase\ ava = 34\ hileras * 2 \frac{surcos}{hilera} * 1,12 \frac{L}{s} * 60 \frac{s}{min} * 160\ min = 731136\ litros$$

$$Fase\ alm = 34\ hileras * 2 \frac{surcos}{hilera} * 0,45 \frac{L}{s} * 60 \frac{s}{min} * 74\ min = 135864\ litros$$

$$Total = 867000 \text{ litros} = 867 \text{ m}^3$$

Por lo anterior, se obtuvo que para un largo de 160 m, se ocupa una mayor cantidad de volumen en comparación a ocupar un largo de 266 m.



**Figura 18.** Configuración de la ubicación de las cajas de distribución, embalse de regulación, válvulas inteligentes y subunidades para el caso de 266 m. Fuente: Elaboración propia.

Cada subunidad le corresponde una válvula. Las subunidades que están destacadas son las cuales se ocuparon para hacer el análisis de la obtención alturas de los hidrantes.

Gracias a las válvulas inteligentes se puede regular los tiempos de riego, caudales y presión necesaria para que cada campana emita un caudal adecuado para el frutal. Sin ayuda de estas válvulas no se podría tener un embalse que regule los caudales y presiones necesarias.

La distribución de las cajas de distribución y subunidades para el caso de 160 m de largo se muestran en figura A3 del ANEXO.

### 5.5.3. Tasa de riego

Para este caso, la tasa de riego mostró que automatizando el sistema, el caudal que se necesita es menor que para el caso de no automatizar, debido a que el tiempo que se ocupará el agua es casi todo el día.

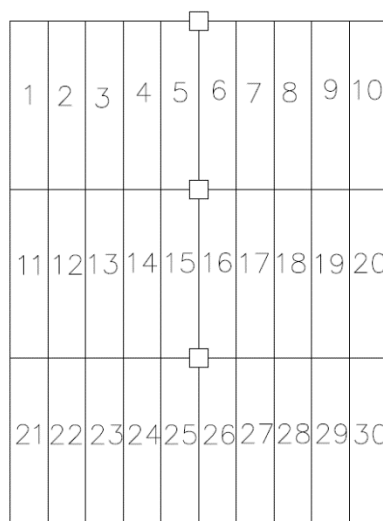
Tras lo anterior, el área total a regar es de 47,5 hectáreas aproximadamente, una lámina bruta de agua a reponer de 26,88 mm, una eficiencia del 90%, regando 24 horas por día y con un total de 3 días, se tiene que:

$$\frac{\frac{26,88}{1000} * 475000}{0,9 * 24 * 3 * 3,6} = 54,73 \text{ L s}^{-1}$$

Finalmente, la relación entre el caudal, el cual fue de 51 L s<sup>-1</sup> (obtenido del embalse de regulación) y el área total a regar fue de 1,07 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> para este caso automatizado.

### 5.6. Manejo de riego

Con respecto al manejo de riego, la forma de cómo se tiene que regar se dará de la misma forma para el caso automatizado y manual. La figura 19 muestra la mejor forma de regar, debido a que se obtienen menos pérdidas de carga en las tuberías de distribución.



**Figura 19.** Numeración de las subunidades. Fuente: Elaboración propia.

El análisis fue hecho en base a la obtención de las menores pérdidas de carga, y como respuesta a esto fue tomar las subunidades del 1 al 10 con las del 21-30, debido a que si ponemos las subunidades juntas, como por ejemplo, la 1 con la 2, esto implicaría tomar la 21 con la 22 y se tendría que llevar el caudal total hacia la última caja, lo que significaría mayores pérdidas de carga. Por otro lado, tomando en cuenta la recomendación del principio, se tendría que llevar solamente la mitad del caudal total por la tubería principal, lo que significaría menor pérdida de carga.

**Tabla 21.** Programación de riego y subunidades de riego simultáneo.

Día	Postura	Subunidad
1	1	1-21
	2	2-22
	3	3-23
	4	4-24
	5	5-25
2	1	6-26
	2	7-27
	3	8-28
	4	9-29
	5	10-30
3	1	11-20
	2	12-19
	3	13-18
	4	14-17
	5	15-16

Fuente: Elaboración propia.

La postura 1 del día tres presenta las subunidades más críticas (subunidades de referencia) debido a que el caudal total de la postura tiene que pasar por las tuberías hasta la segunda caja e ir a la parte más alejada de la mitad del predio. Debido a lo anterior, el análisis de pérdidas de carga y obtención de las alturas de los hidrantes se hizo en base a estas subunidades.

### 5.7. Estudio de caso para riego por goteo

Se tuvo que el volumen a aplicar al frutal ( $V_t$ ) fue de 34,8 L árbol<sup>-1</sup>, con una frecuencia de riego de 2 días, por lo tanto, ocupando el área total (48 ha) se tuvo que regar 6 hectáreas por día. El volumen total por postura fue:

$$34,8 \frac{L}{\text{árbol}} * \left( \frac{10000 \text{ árboles}}{3,5 * 1 \text{ ha}} \right) * 6 \frac{\text{ha}}{\text{día}} \approx 596572 \frac{L}{\text{sector}}$$

Por otro lado, se regó con un tiempo de riego de 5 horas y un total de 4 posturas por día, lo que significa que se ocupó un caudal de:

$$\frac{596572 \frac{L}{sector} * 2 \text{ días}}{5 \text{ hrs} * 3600 \frac{s}{hrs}} = 66,29 \frac{L}{s}$$

De lo anterior se obtiene que se necesita  $66,29 \text{ L s}^{-1}$  de agua para poder regar las 48 hectáreas en dos días.

El área total a regar es de 48 ha aproximadamente, una lámina bruta de agua a reponer de 17,92 mm, una eficiencia de aplicación del 90%, regando 20 horas por día y con un total de 2 días, se tiene que:

$$\frac{\frac{17,92}{1000} * 480000}{0,95 * 20 * 2 * 3,6} = 62,87 \text{ L s}^{-1}$$

Finalmente, la relación entre el caudal, el cual fue de  $66,29 \text{ L s}^{-1}$  y el área total a regar de 48 hectáreas fue de  $1,38 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  para este caso automatizado.

## 5.8. Costos

**Tabla 22.** Costos asociados a la implementación de un riego por surco manual para una superficie de aproximadamente 46,92 ha.

Ítem	Manual		
	Cantidad	Costo	Total
Tubería de 315 mm	89	\$180.665	\$16.079.185
Tubería de 200mm	566	\$61.160	\$34.616.560
Tubería de 75mm	68	\$18.380	\$ 1.249.840
Codo de 200 mm	6	\$36.433	\$ 218.598
Campanas	510	\$5.550	\$ 2.830.500
Tee 200 mm	24	\$36.537	\$ 876.888
Tapón terminal	60	\$28.874	\$ 1.732.440
Válvula alfalfa	3	\$137.488	\$ 412.464
Conector válvula alfalfa	3	\$31.294	\$ 93.882
Válvula de huerto	510	\$3.260	\$ 1.662.600
Zanjas	846	\$420	\$ 355.320
cajas	3	\$220.000	\$ 660.000
Subtotal			\$60.788.277
Instalación del sistema (10%)		\$60.788.277	\$ 6.078.828
Total			\$66.867.105
\$/ha			\$ 1.425.130
UF/ha			41,48 UF

Fuente: Elaboración propia.

Además en esta parte se tiene que sumar los costos de mantención de los surcos y operación en la apertura o cierre de las válvulas de huerto, el cual tiene un costo de un costo de \$6.670 por cada hectárea/día (cálculo en base sueldo mínimo, 2022).

**Tabla 23.** Costos asociados a la implementación de un riego por surco automatizado para una superficie de aproximadamente 46,92 hectáreas.

Automatizado			
Ítem	Cantidad	Costo	Total
Tubería de 315mm	89	\$180.665	\$16.079.185
Tubería de 200mm	566	\$61.160	\$34.616.560
Tubería de 75mm	68	\$18.380	\$1.249.840
Codo de 200 mm	6	\$36.433	\$218.598
Campanas	510	\$5.550	\$2.830.500
Tee 200 mm	24	\$36.537	\$876.888
Tapón terminal	60	\$28.874	\$1.732.440
Válvula alfalfa	3	\$137.488	\$412.464
Conector válvula alfalfa	3	\$31.294	\$93.882
Válvula inteligente	30	\$250.000	\$7.500.000
Estación base de programación	10	\$47.540	\$475.400
Red Smart	30	\$20.000	\$600.000
Sensores de humedad	60	\$22.000	\$1.320.000
Zanjas	846	\$420	\$355.320
cajas	3	\$220.000	\$660.000
Embalse	1381	\$420	\$596.820
Geomebrana	461	\$4.869	\$2.244.609
Subtotal			\$71.925.803
Instalación del sistema (10%)		\$71.925.803	\$7.192.580
Total			\$79.118.383
\$/ha			\$1.686.240
UF/ha			49,08 UF

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las dos tablas anteriores no existe mucha diferencia en el costo de un sistema manual con uno automatizado por cada hectárea. Esto es debido a que en el sistema manual se tiene que poner una válvula de huerto por cada hidrante que exista. Por otro lado, para caso automatizado existe solo una válvula inteligente que controla una subunidad por completo (17 hidrantes).

## 5.9. Nivelación

**Tabla 24.** Costos por hectárea y diferencia de costos.

Riego por surco con automatización (\$)	Microriego (\$)	Diferencia (\$)	Diferencia (UF)
\$1.686.240	\$3.807.235	\$2.120.995	61,19 UF

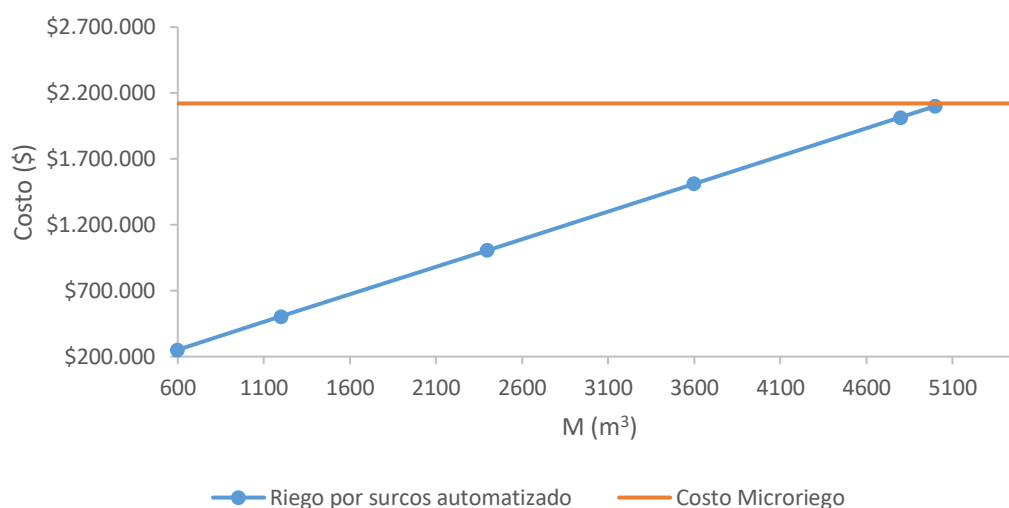
Fuente: Elaboración propia.

Como se obtuvo la diferencia de costos entre los sistemas de riego y además Gallardo (1987) menciona que los precios de movimiento de tierra en el mercado son de \$420 el metro cúbico con combustible incluido. Se encontró que el volumen que se necesita mover para que el riego por surco tenga un costo igual a Microriego es de 5050 m<sup>3</sup>. Tras esto, se clasificó en diferentes rangos, donde  $M$  es el volumen de tierra a mover. Los diferentes valores de los rangos presentados en la tabla 25, son fracciones del valor de 5050 m<sup>3</sup>.

**Tabla 25.** Rangos de nivelación.

Rango	Volumen (m <sup>3</sup> )	Costo (\$)
Muy bajo	600	\$252.000
bajo	1200	\$504.000
medio bajo	2400	\$1.008.000
medio alto	3600	\$1.512.000
alto	4800	\$2.016.000
muy alto	5000	\$2.100.000

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 20.** Variación de costos con respecto a la cantidad de movimiento de tierra. Fuente: elaboración propia.

Al observar la tabla 25 y la figura 22, se tiene que al tener que nivelar por arriba de los 5000 m<sup>3</sup> (rango muy alto), el riego por surco no es competitivo, por lo cual, se tendría que elegir el microriego. Sin embargo, para el riego por surcos no existen costos de energía ni gastos de operación en comparación a microriego. Por otro lado, el rango muy bajo se refiere a suelos muy planos, en los que el costo de nivelación es súper bajo.

## 6. CONCLUSIÓN

Los diferentes criterios de diseño en riego por surco deben tener una amplia base de conocimiento en lo que respecta a los parámetros del suelo, planta, demanda y uso de modelos físicos, ya que, con lo anterior, se puede llegar a eficiencias tan altas como las que presentan los riegos presurizados. Además, se requiere asociar las variables más importantes en este sistema de riego, como: largo del surco, número de surcos, caudal y tiempo de corte.

En relación con el tiempo de corte se estableció que debe considerarse el tiempo que se demora el frente de agua en llegar al final del surco, más el tiempo que se necesite para infiltrar el agua necesaria para satisfacer las necesidades hídricas del frutal. Se encontró que al aumentar el  $T_{co}$  la eficiencia de aplicación disminuye debido a que existirá mayor pérdida por percolación profunda, sin embargo, la  $ER$  y  $EDT$  aumentan.

En lo que respecta con el largo del surco, un incremento en su longitud aumenta la eficiencia de aplicación, además de que los costos totales disminuyen debido a que se ocupa menos tuberías de aducción con menor número de subunidades.

El caudal de los surcos se tiene que diferenciar para las fases de avance y almacenamiento. En la fase de avance se debe establecer un caudal máximo  $Q_{max}$  asociado a los riesgos de erosión del suelo y la capacidad de flujo del surco, seleccionándose el más restrictivo de ambos valores. El caudal para la fase de almacenamiento se puede establecer determinando la velocidad de

infiltración para el largo total del surco o en forma práctica es recomendable ocupar un  $1/2$  del  $Q_{max}$  aproximadamente.

Los costos asociados al riego superficial bajo diferentes niveles de automatización mostraron que, al comparar un sistema automatizado con otro manual, no existen diferencias sustantivas en los costos totales. Esto debido principalmente a que en ambos sistemas se ocupa la misma cantidad de tuberías, las que representan la mayor parte de los gastos en comparación a los demás ítems. Además, para el caso automatizado, solamente existe una válvula por cada subunidad a regar, muy por el contrario para el caso del sistema manual, en el cual, cada campana tiene tener una válvula manual de huerto. Los costos por hectárea aproximados para el caso de riego por surco automatizado y manual son de 49,08 UF y 41,48 UF, respectivamente. Otro factor importante es el costo de nivelación de terreno para ambos casos tiene que ser menor que 61,19 UF para que el sistema de riego por surco sea competitivo con un sistema de microriego.

Finalmente, se comparó el sistema de riego por surco con o sin embalse de regulación, dando como resultado un 38% más de eficiencia para el caso de un sistema automatizado con embalse. La tasa de riego ( $TR$ ) fue de  $54,73 \text{ L s}^{-1}$  para el caso automatizado con embalse de regulación, sin embargo sin dicha estructura la tasa de riego es de  $75,78 \text{ L s}^{-1}$  para regar la misma área.

Es importante hacer énfasis en las válvulas inteligentes para el caso de la existencia de un embalse de regulación, debido que estas controlan la salida

de agua desde el embalse hacia las subunidades, la presión y el tiempo para poder suplir la demanda en las diferentes posturas.

Estudios futuros podrían considerar la temporada total de riego para el diseño del embalse que permita almacenar agua en el periodo de menor demanda y mayor disponibilidad, lo que aparece como un criterio interesante de evaluar técnica y económicamente para atenuar la restricción hídrica.

## 7. LITERATURA

1. Allen, R.G., I. Walter, R. Elliott, T. Howell, D. Itenfisu and M. Jensen. 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. American Society of Civil Engineers. Reston, USA.
2. Bassett, D.L., D.D. Fangmeier and T. Strelkoff. 1980. Hydraulics of surface irrigation. pp: 447-498. In: M.E. Jensen (Ed.). Design and operation of farm irrigation system. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, USA.
3. Berrios, J.E. 2021. Análisis de los parámetros hidráulicos de la forma del surco en la fase de avance y receso. Proyecto de título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
4. Brouwer, C., K. Prins, M. Kay and M. Heibloem. 1988. Irrigation methods. Irrigation water management. Training Manual N°5. FAO. Rome, Italy.
5. Brown-Manrique, O., D. Luis-Pelier e Y. Gallardo-Ballat. 2019. Metodología para la estimación del caudal aplicado en el surco a partir de las ecuaciones de Chezy y Bazin. Rev. Cienc. Téc. Agropec. 28(3): 1-7.
6. Burgos, J. 1997. Análisis hidráulico y económico de algunos sistemas de aducción, para riego superficial. Proyecto de título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.

7. Chen, J., C. Zhao, G. Jones, H. Yang, Z. Li, G. Yang, L. Chen and Y. Wu. 2021. Effect and economic benefit of precision seeding and laser land leveling for winter wheat in the middle of China. *Artificial Intelligence in Agriculture* 6: 1-9.
8. Ciancaglini, N., M. Liotta, A. Estevez, R. Carrion, M. Paz y M. Graffigna. 2015. Riego superficial. Manual de capacitación N°1. INTA. Buenos Aires, Argentina.
9. Criddle, W.D., S. Davis, C.H. Pair and D.G. Shockley. 1956. Methods for evaluating irrigation system. *Agriculture Handbook N°82*. United State Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Washington D.C., USA.
10. Desta, G., M. Getaneh and A. Tsigie. 2018. Determination of furrow irrigation design parameters of Koga irrigation project site [en línea]. ResearchGate, Germany. <[https://www.researchgate.net/publication/328018299\\_Determination\\_of\\_Furrow\\_Irrigation\\_Design\\_Parameters\\_of\\_Koga\\_Irrigation\\_Project\\_Site](https://www.researchgate.net/publication/328018299_Determination_of_Furrow_Irrigation_Design_Parameters_of_Koga_Irrigation_Project_Site)>. [Consulta: 20 mayo 2022].
11. Eldeiry, A.A., L.A. Garcia, A.S.A. EL-Zaher and M. EL-Sherbini Kiwan. 2005. Furrow irrigation system design for clay soils in arid regions. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)* 21(3): 411-420.

12. Gallardo, I. 1987. Nivelación de suelos agrícola. pp: 32-34. IPA Quilamapu N°32. IPA Quilamapu. Chillán, Chile.
13. Genomo, G. 2021. Effect of decision variables on irrigation performance parameters under different irrigation system. *Int. J. Sustain. Develop. Res.* 7(3): 50-55.
14. Gillies, M.H., R.J. Smith. 2015. SISCO: surface irrigation simulation, calibration and optimisation. *Irrig. Sci.* 33(5): 339-355.
15. González, H.P. 1999. Evaluación método de riego por surcos con aplicación pulsada y factibilidad técnica de aplicación de fertirrigación. Memoria de título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
16. Grassi, C.J. 1972. Infiltration characteristic of furrow irrigation in a heavy-textured soil. Thesis, Doctor in Agricultural Sciences. Agricultural University, Department of Civil Engineering and Irrigation. Wageningen, The Netherlands.
17. Holzapfel, E.A., M.A. Mariño and J. Chavéz-Morales. 1984. Comparison and selection of furrow irrigation simulation models. *Agric. Water Manag.* 9(2): 105-125.
18. Holzapfel, E.A., M.A. Mariño and J. Chavez-Morales. 1985. Performance irrigation parameters and their relationship to surface-irrigation design variables and yield. *Agric. Water Manag.* 10(2): 159-174.

19. Holzapfel, E.A., M.A. Mariño, A. Valenzuela and F. Díaz. 1988. Comparison of infiltration measuring methods for surface irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 114(1): 130-142.
20. Holzapfel, E. 1989. Riego gravitacional. INIA Quilamapu. Chillán, Chile.
21. Holzapfel, E., J. Sandoval y E. Varas. 1989. Riego por surcos [en línea]. INIA, Chile.  
<<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/41899/NR08947.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. [Consulta: 31 mayo 2022].
22. Holzapfel, E. 1993. Riego gravitacional. INIA Carillanca. Temuco, Chile.
23. Holzapfel, E.A., J. Jara, C. Zúñiga, M.A. Mariño, J. Paredes and M. Billib. 2004. Infiltration parameters for furrow irrigation. *Agric. Water Manag.* 68(1): 19-32.
24. Holzapfel, E.A., C. Leiva, M.A. Mariño, J. Paredes, J.L. Arumí and M. Billib. 2010. Furrow irrigation management and design criteria using efficiency parameters and simulation models. *Chilean J. Agric. Res.* 70(2): 287-296.
25. Holzapfel, E. 2020. Manejo de agua y contaminación. pp: 30-49. En: E. Holzapfel, D. Rivera y L. Arumí (Eds.). *Tecnología del manejo de agua para una agricultura intensiva sustentable*. (2a. ed.). Universidad de Concepción. Concepción, Chile.

26. Holzapfel, E.A. 2021a. Fundamentos de hidráulica de riego superficial. Fase de receso. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería. Chillán, Chile (Documento de clases, eholzapf@udec.cl).
27. Holzapfel, E.A. 2021b. Fundamentos de hidráulica de riego superficial. Hidráulica de forma en surcos. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería. Chillán, Chile (Documento de clases, eholzapf@udec.cl).
28. Holzapfel, E.A. 2021c. Modelos determinísticos de ríos. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile (Documento de clases, eholzapf@udec.cl).
29. Holzapfel, E., C. Souto y X. Orrego. 2021. Métodos de riego en frutales. pp: 25-45. En: E. Holzapfel, X. Orrego, J. Jara, L. Salgado y C. Souto (Eds.). Riego y drenaje en frutales. Manuales FIA CRHIAM. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
30. Holzapfel, E.A. 2022. Diseño-operación-manejo de sistemas de riego superficial. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile (Documento de clases, eholzapf@udec.cl).
31. Ibarra, M.A. 2004. Evaluación de la aplicación de agua en riego por surco, para frutales con sistema de aducción de baja presión. Memoria de

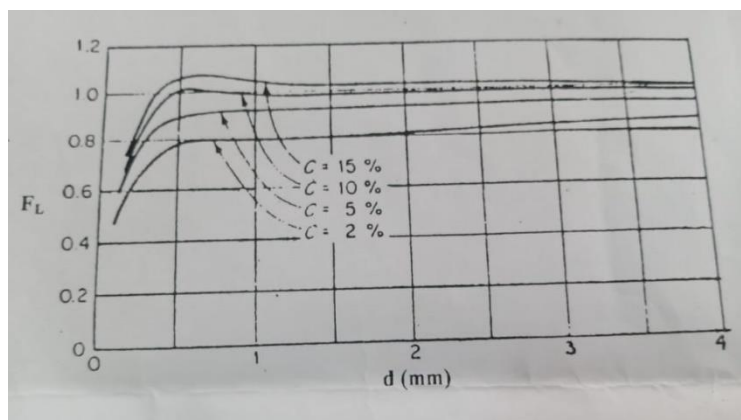
- título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
32. Jara, J. 2020. Requerimientos hídricos de cultivos y frutales. pp: 9-28. En: E. Holzapfel, D. Rivera y L. Arumí (Eds.). Tecnología del manejo de agua para una agricultura intensiva sustentable. (2a. ed.). Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
33. Jara, J. 2021. Relaciones hídricas en frutales. pp: 6-23. En: E. Holzapfel, X. Orrego, J. Jara, L. Salgado y C. Souto (Eds.). Riego y drenaje en frutales. Manuales FIA CHRIAM. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
34. Kara, T., K. Ersin and M. Apan. 2008. Using empirical equations to determine appropriate furrow length under field condition. Pak. J. Biol. Sci. 11(2): 220-225.
35. Karmeli, D., L.J. Salazar and W.R. Walker. 1978. Assessing the spatial variability of irrigation water applications. U.S. Environmental Protection. Office of Research and Development. Agency Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory. Ada, USA.
36. Lecaros-Arellano, F., E. Holzapfel, E. Fereres, D. Rivera, N. Muñoz and J. Jara. 2021. Effects of the number of drip laterals on yield and quality of apples grown in two soil types [en línea]. Agric. Water. Manag. 248.

- <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106781>>. [Consulta: 02 agosto 2022].
37. Leiva, C.A. 1998. Análisis del diseño para riego por surcos. Memoria de título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
38. Miao, Q., J.M. Gonçalves, R. Li, D. Gonçalves, T. Levita and H. Shi. 2021. Assessment of precise land levelling on surface irrigation development. Impacts on maize water productivity and economics [en línea]. Sustainability 13(3): 1191(Art. N°). <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/3/1191>>. [Consulta: 02 agosto 2022].
39. Narayanan, K., B. Abate. 2014. Studies on hydraulic performance of furrow Irrigation to optimise design parameters suitable to onion field in Hawassa, Ethiopia. J. Sci. Dev. 2(2): 23-40.
40. Navarro-Álvaro, M. 2018. Nivelación de tierras: Una opción viable para el uso eficiente y gestión sustentable de agua en la agricultura. Ingeniería y Región 20(1): 103-110.
41. Prado, J.V., F.R. Hernández-Saucedo. 2014. Nivelación de tierras con tecnología GPS [en línea]. ResearchGate, Germany. <[https://www.researchgate.net/publication/316714486\\_NIVELACION\\_DE\\_TIERRAS\\_CON\\_TECNOLOGIA\\_GPS](https://www.researchgate.net/publication/316714486_NIVELACION_DE_TIERRAS_CON_TECNOLOGIA_GPS)>. [Consulta: 21 mayo 2022].

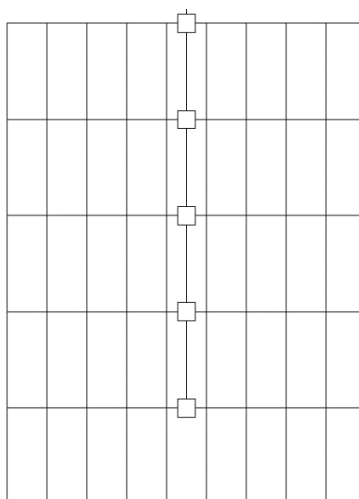
42. Rodríguez, J.A. 2007. Modelización de la fase de avance del riego por superficie. Integración de una solución de balance de volumen con redes neuronales artificiales. Memoria del período de investigación. Universidad de Sevilla, Departamento de Ciencias Agroforestales. Sevilla, España.
43. Romero, R., J.L. Muriel, I. García and D. Muñoz de la Peña. 2012. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. *Agric. Water Manag.* 114: 59-66.
44. Tornés, N., O. Brown, Y. Gómez y A. Guerrero. 2016. Eficiencia de aplicación máxima del agua y longitud del surco en función de los caudales. *Rev. Cienc. Téc. Agropec.* 25(1): 23-27.
45. USDA (USA). 1987. Furrow irrigation. pp: 1-90. In: National engineering handbook. (2nd. ed.). U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service. Washington D.C., USA.
46. Velazco, J. 2009. Buenas prácticas para mejorar la eficiencia de riego. Riego por surcos y con aducción californiana. pp: 21-25. Artículo Técnico N°37. Comisión Nacional de Riego. Santiago, Chile.
47. Walker, W.R., G.V. Skogerboe. 1987. Surface irrigation: Theory and practice. Prentice Hall. Englewood Cliffs, USA.
48. Zerihun, D., C.A. Sanchez and K.L Farell-Poe. 2001. Analysis and design of furrow irrigation systems. *J. Irrig. Drain. Eng.* 127(3): 161-169.

49. Zúñiga, A.T. 2019. Manejo de equipos GPS para la nivelación de suelo y siembra mecanizada por pilotos automáticos en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) Empresa Agrícola Miramontes, San Lorenzo, Boaco, 2018. Trabajo de pasantía, Ingeniero Agrícola para el Desarrollo Sostenible. Universidad Nacional Agraria, Facultad de Agronomía. Managua, Nicaragua.

## 8. ANEXO



**Figura A1.** Gráfico del coeficiente de Durant. Fuente: Durant (1979) citado por Burgos (1997).



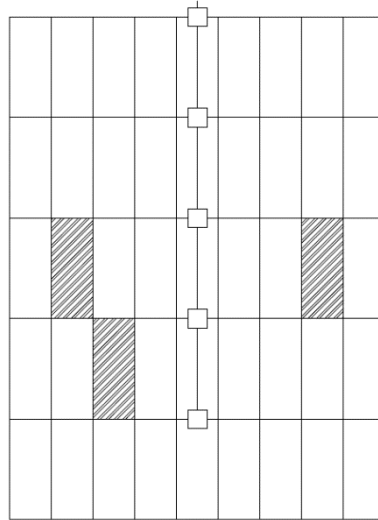
**Figura A2.** Configuración de la ubicación de las cajas de distribución, entrada de agua y subunidades para un largo de 160 metros. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla A1.** Capacidad máxima requerida ( $K_a$ ) y tiempo que se destina a la entrada de agua al embalse ( $T_{ent}$ ) optimizado para el caso de 160 metros de surco.

$K_a(m^3)$	$T_{ent}(h)$
1235,3	17,2

Fuente: Elaboración propia.

El  $T_{ent}$  se refiere al tiempo que se demora el caudal de entrada en satisfacer la demanda para las 5 posturas de riego.



**Figura A3.** Ubicación de las cajas de distribución y subunidades a regar para un largo de 160 metros. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior, se muestra subunidades resaltadas, las cuales son las que se ocupan para obtener las alturas de los hidrantes.