

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO, MANEJO Y OPERACIÓN DE
LOS SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO (GOTEO Y
MICROASPERSIÓN) Y GRAVITACIONAL (SURCO) EN AVELLANOS
EUROPEOS (*CORYLUS AVELLANA L.*)**

HUGO FERNANDO JIMÉNEZ PAVEZ

HABILITACIÓN PROFESIONAL
PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA

CHILLÁN – CHILE

2023

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO, MANEJO Y OPERACIÓN DE
LOS SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO (GOTEO Y
MICROASPERSIÓN) Y GRAVITACIONAL (SURCO) EN AVELLANOS
EUROPEOS (*CORYLUS AVELLANA L.*)**

Aprobado por:

Eduardo Holzapfel Hoces
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesor Emérito

Profesor Guía

Camilo Souto Escalona
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
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 González Rodríguez
Ingeniera Agrónoma, Ph. D.
Profesora Asociada

Decana

AGRADECIMIENTOS

Agradezco incondicionalmente a mi amada madre y padre que me dieron las herramientas necesarias para formarme tanto como persona como un profesional. A mis queridos hermanos por el inquebrantable apoyo que me han entregado tanto de carácter como personalidad.

A mi querida Nicole y su familia por el eterno amor que me han entregado en estos arduos años de estudio.

Al cabezón del Nico por enseñarme que para crecer como persona debes estar preparado para todo lo que viene.

Al Washo loco por centrarme y así responder por lo que me están preguntando.

A la orientación de los profesores para guiarme en el desarrollo mis estudios.

A todas aquellas personas que me brindaron las herramientas necesarias para poder realizar un trabajo de calidad.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. OBJETIVOS.....	6
2.1. Objetivo general.....	6
2.2. Objetivos específicos.....	6
3. ANTECEDENTES GENERALES.....	7
3.1. Características del frutal con fines de diseño de plantación.....	10
3.1.1. Marco de plantación.....	11
3.1.2. Evapotranspiración del cultivo.....	14
3.2. Características físicas-hídricas del suelo para el cultivo de avellano europeo.....	18
3.2.1. Capacidad de campo.....	20
3.2.2. Punto de marchitez permanente.....	20
3.2.3. Densidad aparente.....	21
3.2.4. Velocidad de infiltración.....	21
3.2.5. Criterio de riego.....	23
3.2.6. Altura de agua aprovechable.....	23
3.3. Volumen de agua teórico que requiere el frutal.....	27
3.4. Volumen total de agua a aplicar.....	28
3.5. Volumen de agua que retiene el suelo.....	28
3.6. Programación de riego.....	30
3.7. Diseño óptimo del sistema de microriego en avellanos europeos.....	31
3.7.1. Microriego.....	32
3.7.2. Diseño de microriego.....	32
3.7.2.1. Cabezal de control.....	33

3.7.3.	Tuberías de conducción.....	33
3.7.4.	Subunidad.....	36
3.7.4.1.	Laterales.....	37
3.7.4.2.	Secundarios.....	38
3.7.4.3.	Válvulas.....	40
3.7.5.	Análisis técnico - económico para la selección del emisor.	40
3.7.5.1.	Gotero.....	41
3.7.5.2.	Microaspersor.....	45
3.7.6.	Características de selección del emisor.....	46
3.7.7.	Parámetros críticos.....	48
3.7.7.1.	Área de mojamiento.....	49
3.7.7.2.	Volumen de suelo humedecido.....	51
3.7.7.3.	Tiempo de riego.....	53
3.7.7.4.	Número de emisores por planta.....	54
3.7.7.5.	Localización y número de laterales por hilera.....	57
3.7.8.	Emisor óptimo económico.....	58
3.7.8.1.	Costos fijos anualizados para los emisores.....	59
3.7.8.2.	Costos variables para los emisores.....	60
3.8.	Diseño óptimo del sistema de riego por surco en avellanos europeos.....	64
3.8.1.	Fases de riego.....	66
3.8.2.	Parámetros críticos.....	68
3.8.2.1.	Longitud del surco.....	69
3.8.2.2.	Tiempo de riego.....	71
3.8.2.3.	Caudal de diseño.....	73
3.8.2.4.	Número de surcos por hilera.....	75
3.9.	Eficiencia de riego.....	77
3.9.1.	Eficiencia de aplicación.....	78
3.9.2.	Eficiencia de requerimiento.....	80
3.9.3.	Eficiencia de distribución total.....	81

3.9.4.	Coeficiente de uniformidad de Christiansen.....	82
4.	ESTUDIO DE CASO: AVELLANO EUROPEO.....	82
4.1.	Demanda hídrica del avellano europeo.....	82
4.2.	Diseño del sistema de riego por goteo y microaspersión en base a parámetros críticos.....	85
4.3.	Diseño del sistema de riego por surcos en base a parámetros críticos.....	89
5.	SELECCIÓN MÉTODO DE RIEGO.....	92
5.1.	Índice de adaptabilidad asociado a los sistemas de riego..	97
6.	CONCLUSIONES.....	101
7.	REFERENCIAS.....	103
8.	ANEXOS.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1.	Variación superficial (S) ocupada por frutales en la Región del Maule (VII) según catastro frutícola del 2013 - 2019 (Odepa – Ciren).....	9
Tabla 2.	Valores referenciales de velocidad de infiltración (VI) según la textura del suelo (Medina, 2019).....	22
Tabla 3.	Humedad aprovechable por estrata (Ellena <i>et al.</i> , 2018).....	24
Tabla 4.	Parámetros físicos – hídricos: capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y humedad aprovechable total (HA _t) bajo el criterio de riego del 35% (<i>Software Soil Water Characteristics</i>).....	25
Tabla 5.	Características generales de los emisores E1 y E2: caudal (Q), presión de trabajo (P) y precio unitario (Pu).....	63
Tabla 6.	Antecedentes económicos para la selección óptima del emisor.....	63
Tabla 7.	Rango promedio de surcos según el tipo de suelo (Demin, 2014).....	68
Tabla 8.	Parámetros hidráulicos forma de surco en frutales.....	75
Tabla 9.	Rangos de eficiencia de aplicación de diferentes métodos de riego (Holzapfel <i>et al.</i> , 2020).....	80
Tabla 10.	Volumen total diario de agua a aplicar (V _t) al frutal avellano europeo (4 x 5 m) para cada sistema de riego a diseñar, siendo F1 y F2: Factores asociados al cultivo, ET _c : Evapotranspiración del cultivo aplicando la restitución del 75%, V _r = Volumen de agua teórico que requiere el cultivo, EA: Eficiencia de aplicación considerando diferentes niveles de aplicación del agua.	83
Tabla 11.	Estimación de la frecuencia de riego máxima que soporta el suelo (FR) para cada sistema de riego considerando un volumen de agua que retiene el suelo por planta igual a 525 L / m ² y con un criterio de riego del 35%, asumiendo que la aplicación del agua es efectiva.....	84

Tabla 12.	Caudal del emisor (Q), diámetro de humedecimiento (DH) para suelos medianos, número de emisores (Ne) y área de humedecimiento (AH), en cada emisor.....	85
Tabla 13.	Estimación del tiempo de riego máximo diario (Tr) en sistema de riego presurizado a diseñar para diferentes emisores, goteo y microaspersión.....	86
Tabla 14.	Resultados técnicos para obtener el emisor óptimo económico siendo: caudal del emisor (Q), diámetro mojado (DH), número de emisores (Ne), área humedecida por los emisores (At) y área humedecida (AH).....	86
Tabla 15.	Antecedentes económicos obtenidos para el diseño del sistema de riego presurizado.....	87
Tabla 16.	Costo total anualizado (CTA) para cada emisor en función de los costos fijos y variables anualizado (CFA, CVA), respectivamente.....	88
Tabla 17.	Variación del tiempo de riego (TR) en sistemas de riego por surco según el volumen de agua que retiene el suelo (Vs) por metro lineal de surco en función del número de surcos por hilera (n).....	89
Tabla 18.	Entrada de datos modelo cinemático con n = 2.....	90
Tabla 19.	Análisis del riego modelo cinemático.....	90
Tabla 20.	Eficiencia del riego modelo cinemático.....	91
Tabla 21.	Costos de implementación para cada sistema de riego..	96
Tabla 22.	Parámetros asociados a los índices de adaptabilidad, donde: (1) Densidad relativa del cultivo, (2) Sensibilidad relativa a enfermedades de la canopia, (3) Sensibilidad relativa a enfermedades del tallo, (4) Condiciones relativa de crecimiento, (5) Pendiente relativa, (6) Tasa relativa de infiltración, (7) Concentración relativa de químicos en el agua, (8) Concentración relativa de sedimentos en el agua y (9) Habilidad relativa de la mano de obra.....	98

Tabla 23.	Índice de adaptabilidad (%) y ranking para la selección del método de riego (RMR), donde: (1) Índice de densidad, (2) índice de enfermedad de la canopia, (3) índice de enfermedad del tallo, (4) índice de crecimiento, (5) índice de pendiente, (6) índice de infiltración, (7) índice de químicos en el agua, (8) índice de sedimentos en el agua y (9) índice de habilidad de mano de obra.....	98
Tabla 24.	Rendimiento productivo de avellanos europeos.....	99
Tabla 25.	Caudal de diseño en cada sistema de riego dentro de las 48 há.....	110
Tabla 26.	Estimación del largo máximo del lateral (L) ajustado en relación a las pérdidas de carga total con salida múltiples (h_f) en microaspersor.....	111
Tabla 27.	Estimación del largo máximo del secundario o manifold (L) ajustado en relación a las pérdidas de carga totales con salidas múltiples (h_f) en microaspersor.....	111
Tabla 28.	Dimensionamiento máximo subunidades de riego donde largo del lateral (L_l), largo del secundario (L_s), área mínima a regar por postura (A_{sub}), pérdida de carga lateral ($H_f l$) y pérdida de carga secundario ($H_f s$)..	112
Tabla 29.	Ajuste subunidades de riego a la dimensión del predio donde largo del lateral (L_l), largo del secundario (L_s), área mínima a regar por subunidad (A_{sub}), caudal del secundario por subunidad (Q_s) y caudal de diseño por hectárea (Q_d).....	112
Tabla 30.	Diámetro óptimo económico diseño sistema de riego por microaspersión.....	112
Tabla 31.	Caudal de entrega a cada grupo de subunidad.....	113
Tabla 32.	Costos de implementación sistema de riego por microaspersión.....	115
Tabla 33.	Costos de implementación sistema de riego por surco automatizado.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Volumen y valor exportados de avellanas (sin cáscaras) a nivel nacional en los últimos años (Odepa, 2022).....	8
Figura 2.	Terreno modelo huerto a diseñar sistemas de riego, 800 x 600 m.....	11
Figura 3.	Detalle de marco de plantación rectangular (5 x 4 m), cv. Barcelona. Comuna de Gorbea, Región de La Araucanía. Menor distancia sobre hilera y mayor distancia entre hilera (Ellena <i>et al.</i> , 2018).....	12
Figura 4.	Ciclo fenológico avellano europeo.....	17
Figura 5.	Caudal de gotero no autocompensado en función de la presión (Medina, 2019).....	48
Figura 6.	Caudal de descarga de goteros autocompensados en función de la presión (Medina, 2019).....	48
Figura 7.	Diámetro de humedecimiento (DH) en función de la descarga del emisor (q / e) (Zazueta, 1992).....	50
Figura 8.	Secuencia para la determinación del número de emisores (Holzapfel <i>et al.</i> , 2007).....	56
Figura 9.	Diagrama de flujo para la selección óptima económica de emisores (Holzapfel <i>et al.</i> , 2007).....	62
Figura 10.	Tiempo de oportunidad definido a través de las curvas de avance y recesión (Matas, 1995).....	67
Figura 11.	Altura de agua infiltrada a través del modelo cinemático para riego por surcos.....	91
Figura 12.	Curva de avance y receso a través del modelo cinemático para riego por surcos.....	92
Figura 13.	Selección óptima método de riego (Holzapfel <i>et al.</i> , 2008).....	94
Figura 14.	Posicionamiento de las subunidades y tuberías principales en el huerto modelo de avellanos europeos.....	114
Figura 15.	Índice de densidad del cultivo.....	117
Figura 16.	Índice de sensibilidad a enfermedades de la canopia...	117
Figura 17.	Índice de sensibilidad a enfermedades del tallo.....	118

Figura 18.	Índice asociado al tipo de crecimiento del cultivo.....	118
Figura 19.	Índice asociado al tipo de suelo.....	119
Figura 20.	Índice infiltración del suelo.....	119
Figura 21.	Índice calidad del agua (Químico en el agua).....	120
Figura 22.	Índice calidad del agua (Sedimentos en el agua).....	120
Figura 23.	Índice de recursos humanos.....	121

ÍNDICE DE ECUACIONES

		Página
Ecuación 1.	Evapotranspiración de referencia (ET _r) o potencial (ET _p).....	15
Ecuación 2.	Evapotranspiración de cultivo o actual, ET _c	15
Ecuación 3.	Factor de cultivo, FC.....	16
Ecuación 4.	Altura de agua aprovechable para el cultivo, HA _a	25
Ecuación 5.	Volumen de agua teórico que requiere el frutal, Vr...	27
Ecuación 6.	Volumen total diario de agua a aplicar por árbol, Vt...	28
Ecuación 7.	Volumen de agua que retiene el suelo, Vs.....	29
Ecuación 8.	Frecuencia de riego, FR.....	30
Ecuación 9.	Costo fijo anualizado para cada diámetro, CF (d).....	34
Ecuación 10.	Factor de recuperación del capital, FRC (i, n).....	34
Ecuación 11.	Costo variable anualizado CV (d) o costo anual de la operación (CAO).....	35
Ecuación 12.	Costo anual equivalente de la energía, CAEE.....	35
Ecuación 13.	Factor de costo anualizado equivalente de energía, FEE.....	35
Ecuación 14.	Costos totales, CT.....	36
Ecuación 15.	Pérdida de carga Hazen – Williams, H _f	38
Ecuación 16.	Factor de Christiansen, F _{sm}	39
Ecuación 17.	Pérdida de carga Darcy – Weisbach, h _f	39
Ecuación 18.	Criterio pérdidas de carga.....	40
Ecuación 19.	Descarga o caudal del emisor, q _e	47
Ecuación 20.	Patrón de humedecimiento goteo, AH.....	50
Ecuación 21.	Patrón de humedecimiento caso D microaspersión, AH.....	51
Ecuación 22.	Tiempo de riego en riego presurizado, Tr.....	53
Ecuación 23.	Número de emisores por planta, N.....	55
Ecuación 24.	Criterio de velocidad de infiltración.....	55
Ecuación 25.	Costo total anualizado para cada emisor, CT.....	58

Ecuación 26.	Costo fijo anualizado para cada emisor, CF (E).....	59
Ecuación 27.	Factor de recuperación del capital, FRC (i, n).....	59
Ecuación 28.	Costo variable o costo de operación anual, CV (E)...	60
Ecuación 29.	Costo anual equivalente de la energía, CAEE.....	60
Ecuación 30.	Factor de costo equivalente, FCE (e, i, n).....	61
Ecuación 31.	Avance del flujo, X.....	70
Ecuación 32.	Relación tiempo de avance y tiempo final.....	70
Ecuación 33.	Tiempo final, T _F	70
Ecuación 34.	Volumen total aplicado o balance de volúmenes, VTA.....	71
Ecuación 35.	Tiempo de riego en surcos, TR.....	72
Ecuación 36.	Criterio de diseño según los tiempos de riego.....	72
Ecuación 37.	Caudal máximo no erosivo, Q _{máx}	73
Ecuación 38.	Caudal reducido, Q _{red}	74
Ecuación 39.	Caudal máximo que soporta el surco.....	74
Ecuación 40.	Área máximo de flujo, A.....	75
Ecuación 41.	Eficiencia de aplicación, EA.....	79
Ecuación 42.	Eficiencia de requerimiento, ER.....	80
Ecuación 43.	Eficiencia de distribución total, EDT.....	81
Ecuación 44.	Coeficiente de uniformidad de Christiansen, CUC.....	82
Ecuación 45.	Valor relativo final (VRF) o Valor relativo del método de riego (VRMR).....	97
Ecuación 46.	Número de sectores que se riegan diariamente (N1)	109
Ecuación 47.	Número de sectores que se riegan durante la frecuencia de riego (N2).....	109
Ecuación 48.	Área mínima a regar por subunidad (A _{sub}).....	109
Ecuación 49.	Caudal de diseño (Q _d).....	110

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO, MANEJO Y OPERACIÓN DE
SISTEMAS DE MICRORIEGO (GOTEO Y MICROASPERSIÓN) Y
GRAVITACIONAL (SURCO) EN AVELLANOS EUROPEOS (*CORYLUS
AVELLANA L.*)**

**COMPARATIVE ANALYSIS ON THE DESIGN, MANAGEMENT AND
OPERATION OF MICROIRRIGATION (DRIP AND MICRO-SPRINKLER)
AND GRAVITATIONAL (FURROW) IRRIGATION IYSTEMS IN EUROPEAN
HAZELNUTS (*CORYLUS AVELLANA L.*)**

Palabras claves: Diseño, riego, goteo, microaspersión, surco, avellano europeo.

Keywords: Design, irrigation, drip, micro-sprinkler, furrow, european hazel.

RESUMEN

Se realizó un análisis comparativo entre el diseño, manejo y operación de sistemas de riego gravitacional (surco) y microriego (goteo y microaspersión) en un huerto modelo de avellanos europeos (*Corylus avellana L.*).

Los parámetros críticos que se analizaron para el estudio del sistema de microriego fueron área de mojamiento, volumen de suelo humedecido, tiempo de riego, número de emisores por planta, localización y número de laterales por hilera, y selección del emisor óptimo económico. Para el caso del sistema

de riego gravitacional fueron longitud del surco, tiempo de riego, caudal máximo no erosivo, caudal reducido y número de surcos por hilera. Se evaluaron los parámetros críticos de los sistemas de microirrigación a partir de diferentes modelos como la selección de emisores, selección óptima de tubería, longitud lateral y tamaño de subunidad. Para el sistema de riego por surcos se utilizó el software AQUASURCO.

En base a los antecedentes económicos y las características técnicas se seleccionó el sistema de riego más adecuado para el cultivo de avellano europeo.

ABSTRACT

A comparative study was carried out between the design, management, and operation of furrow and drip and micro-sprinkler irrigation systems in a model orchard of European hazelnuts (*Corylus avellana* L.).

The critical parameters that were analyzed for the study of the microirrigation system were wetting area, wetted soil volume, irrigation time, number of emitters per plant, location and number of emitters per plant, and economical selection of emitters. In the case of the furrow irrigation systems, they were furrow length, irrigation time, flow rate, and the number of furrows per row

The critical parameters of the microirrigations systems were evaluated from different models such as the selection of emitters, optimal pipe selection, lateral

length, and subunit size. For the furrow irrigation system, the software AQUASURCO was used.

Based on the economic background and technical characteristics, the most suitable irrigation system for a European hazelnut orchard was selected.

1. INTRODUCCIÓN

El riego es el componente principal en la producción agrícola el cual influye directamente en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Existen diferentes métodos de irrigación que permiten incrementar la producción de los cultivos, como lo son, el riego superficial y el riego presurizado (Franco, 2018).

Para obtener el máximo beneficio de los cultivos, recursos hídricos y elementos tecnológicos que permitan llevar a cabo la actividad agrícola más competitiva y rentable, el manejo de los sistemas de riego debe ser óptimo (Franco, 2018).

La modernización de la agricultura implica mejorar el uso del agua a nivel predial, aumentando el riego tecnificado y transferir tecnologías a los agricultores para ser más eficientes en la gestión del recurso hídrico y hacer sustentable la inversión en obras de riego. El método de riego es la forma de aplicar el agua al suelo para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo en forma eficiente, oportuna y uniforme. Responde a la pregunta ¿Cómo regar para obtener el máximo rendimiento por unidad de agua aplicada? Los métodos de riego se clasifican, en forma general, según la energía con que se mueve el agua, en riegos gravitacionales y riegos presurizados (Quezada, 2019).

Los métodos de riego gravitacional se caracterizan porque el agua se aplica sobre la superficie del suelo y se distribuye en el campo por diferencia de cota

o altura entre dos puntos. Mientras que, los métodos de riego presurizado se caracterizan por que el agua circula por conductos cerrados o tuberías debido a una presión externa por un equipo de bombeo.

Para seleccionar un método de riego, ya sea como una práctica nueva o que se introduzca en condiciones ya existentes, se deben considerar una serie de aspectos técnicos y económicos. La selección comúnmente está influenciada por la disponibilidad de agua, tipo de suelo, la topografía, el clima, el tipo cultivo o frutal, la disponibilidad y el tipo de mano de obra, la energía y el costo relativo de cada recurso. Los parámetros críticos en la selección del método de riego son el costo inicial, los costos de operación y mantenimiento y la eficiencia del riego (Mariño *et al.*, 2008)

Con el fin de conocer que método de riego debe ser implementado en un huerto modelo de avellanos europeos, se desarrollará un análisis comparativo entre sistemas de riego gravitacional y presurizado cuya finalidad es destacar y conocer las variables que influyen directamente en la selección del método de riego.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar los sistemas de riego presurizado y gravitacional para la implementación en un huerto modelo de avellanos europeos.

2.2. Objetivos específicos

1. Analizar de manera técnica y económica los sistemas de riego en avellanos europeos
2. Evaluar la adaptabilidad de los sistemas de riego frente a los factores asociados al diseño, manejo y operación
3. Seleccionar el sistema de riego bajo los criterios de diseño, manejo y operación en un huerto modelo de avellanos europeos

3. ANTECEDENTES GENERALES

El avellano europeo (*Corylus avellana* L.) es una nueva alternativa productiva en la actualidad para productores e inversionistas en la zona centro sur y sur de Chile, con fuertes incrementos de superficie plantada desde las regiones del Maule a Los lagos. La mayor superficie establecida y crecimiento del rubro se encuentra en la zona centro sur, debido a sus mejores condiciones climáticas que han permitido expresar un mayor potencial productivo tal como lo señala Ferrero Hazelnut Company (2017) "...la contra estacionalidad en Chile con los países más importantes en el desarrollo de este cultivo, tales como Turquía e Italia, es uno de los factores que más favorecen a nuestro país, como también de sus desatacadas condiciones climáticas y fitosanitarias". Gracias a esta ventaja competitiva con respecto a otros países del hemisferio sur, la producción de avellanas europeas es bien codiciada en grandes países de Europa, como Italia, cuyo interés por este fruto seco es netamente dirigida a la industria alimentaria (Ellena *et al.*, 2018).

En base a los resultados preliminares expuestos por el VIII Censo Nacional Agropecuario y Forestal en los años 2007 y 2021, hubo una disminución de la superficie total declarada bajo riego de un 18,6% que, posiblemente, pequeños agricultores fueron los más afectados pero, el interés por el cultivo de avellano europeo en las zonas centro sur y sur del país, queda demostrado con el incremento significativo de las superficies establecidas a nivel nacional en los últimos años, llegando a ocupar aproximadamente un total de 25.000 há según

indica Odepa (2022). Así mismo, los volúmenes y exportaciones de las avellanas (sin cáscara) han ido en tendencia a aumentar tal como se muestra en la Figura 1.

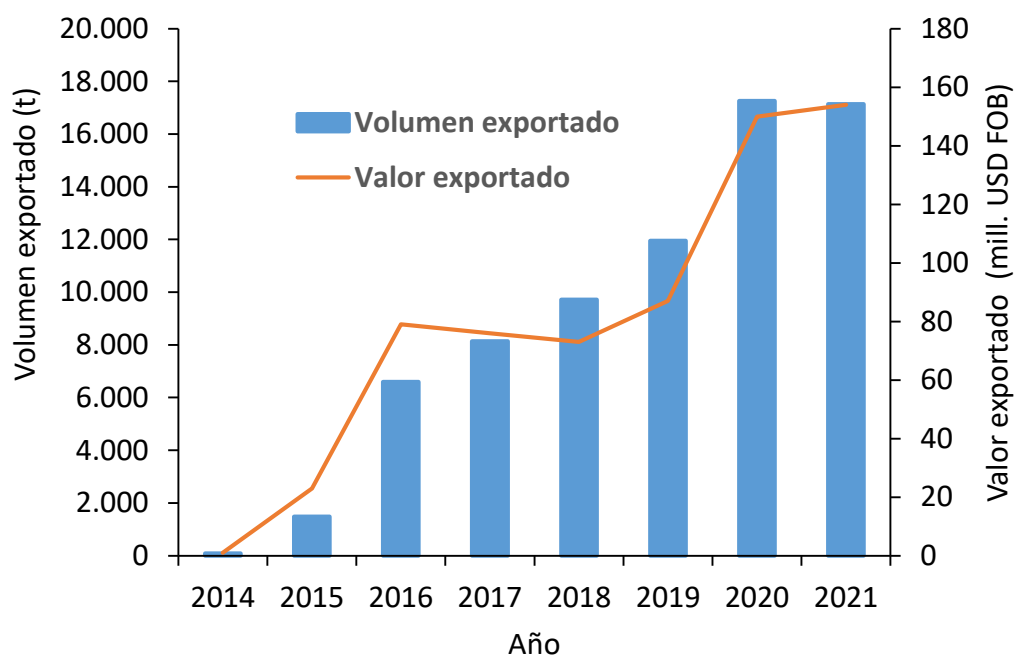


Figura 1. Volumen y valor exportados de avellanas (sin cáscaras) a nivel nacional en los últimos años (Odepa, 2022).

La inversión en una plantación de avellano europeo en Chile se haría en el contexto de una coyuntura favorable del mercado para este fruto de nuez. En Chile, las zonas de mayor potencial para el avellano europeo se encuentran entre la Región del Maule (VII) y la Región de Los Ríos (XIV). Cada una de ellas requiere de un manejo ajustado a sus condiciones edafoclimáticas (FIA, 2008).

En la Región del Maule (VII), queda demostrado que, a través de un catastro frutícola que se realizó entre los años 2013 y 2019 por Odepa – Ciren, hubo un incremento del 98% de las superficies cultivadas por dicho frutal, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Variación superficial (S) ocupada por frutales en la Región del Maule (VII) según catastro frutícola del 2013 - 2019 (Odepa – Ciren).

Frutales	S (ha), 2013	S (ha), 2019	Variación (%)
Manazo rojo	18.863,4	16.870,3	-11
Cerezo	8.087,1	17.655,6	118
Olivo	5.790,7	5025,5	-13
Avellano	5.680,5	11.225,1	98

La oferta chilena de avellanas es aún baja comparada con aquellas proveniente de otros países productores como Turquía, Italia, Estados Unidos, Georgia, Azerbaijón y España, que actualmente son los principales productores de esta especie frutal a nivel mundial. No obstante, una vez que los huertos se encuentren en pleno régimen productivo, Chile podría transformarse en uno de los principales productores y oferentes del rubro a nivel mundial. En la actualidad se exporta principalmente avellanas con cáscara, tanto para el consumo directo como transformación industrial. A futuro, con el incremento en los volúmenes producidos, el país deberá destinar parte importante de su producción de fruta a la transformación industrial para la elaboración de materia primas de alta calidad, orientada a la industria alimentaria, como la fabricación de productos terminados que permitan agregar valor y mayor competitividad a la industria del avellano europeo en

Chile (Ellena *et al.*, 2018). De toda el agua que existe en el mundo, tan solo el 3% es agua dulce y de esta, la agricultura consume cerca del 70%, lo cual sumado a la influencia del cambio climático que, en ciertas áreas, modifica el régimen de lluvias, ya sea aumentándolo o disminuyéndolo, y a la gran presión que ejerce nuestra creciente población mundial, hace que sea imperativo buscar métodos para disminuir el consumo de agua de la agricultura, pero manteniendo o aumentando la producción por área de cultivo y además permitiendo obtener productos que logren satisfacer la demanda en cuanto a calidad que el consumidor le ha impuesto al mercado. Es por ello que es imprescindible conocer qué sistema de riego se acomoda a las demandas hídricas exigidas por este frutal.

3.1. Características del frutal con fines de diseño de plantación

Este estudio contempla una evaluación de diseño, de manera técnica y económica, el cual se desarrollará sobre un terreno modelo de 48 há aproximadamente en un suelo franco – arcilloso, cuyo cultivo a estudiar es el avellano europeo. Dada la topografía del terreno, Figura 2, se diseñarán tres sistemas de riego, gravitacional (surco) y presurizado (goteo y microaspersión), dándole relevancia a parámetros críticos de diseño. Y de esta manera, se entregará un análisis en base a criterios de operación, manejo y diseño.

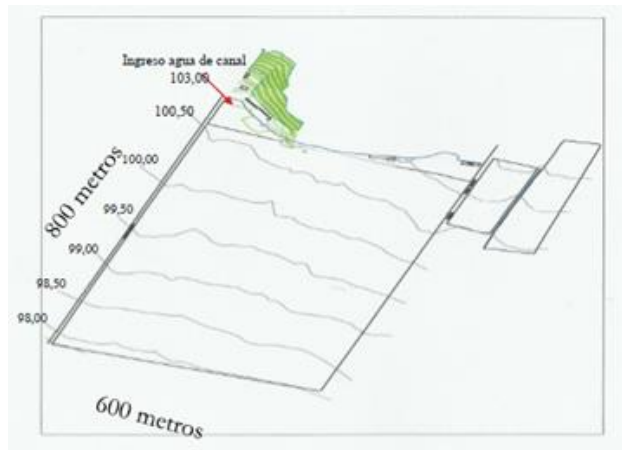


Figura 2. Terreno modelo huerto a diseñar sistemas riego, 800 x 600 m.

3.1.1. Marco de plantación

Se refiere a la distancia que quedará entre los árboles una vez plantados. Se debe preferir un marco de plantación rectangular ya que, presentan las siguientes ventajas: (i) máximo aprovechamiento del suelo, (ii) mayor factibilidad para realizar las labores del huerto y (iii) acceso en un solo sentido.



Figura 3. Detalle de marco de plantación rectangular (5 x 4 m), cv. Barcelona. Comuna de Gorbea, Región de La Araucanía. Menor distancia sobre hilera y mayor distancia entre hilera (Ellena *et al.*, 2018).

La tendencia actual en frutales es densificar los huertos para anticipar la entrada en producción, aumentar los rendimientos por unidad de superficie y amortizar rápidamente las plantaciones. Sin embargo, en el tiempo, las plantaciones intensivas de avellano europeo presentan problemas en producción y calidad de fruta por falta de iluminación en el interior de la copa y en la parte inferior de los árboles. Por ello, es preferible utilizar densidades mayores o menores según sea el marco de plantación para las primeras etapas de los árboles, interviniendo posteriormente una vez que las copas se entrecrucen entre sí y se produzca un desplazamiento de la zona productiva a la parte alta del árbol, eliminándose aquellos árboles en exceso o recurriendo a fuertes podas (Ellena *et al.*, 2018).

Según Cambra (1991), González (2022) e Iglesias (2021), afirman que en todas las formas planas o setos frutales representa un importante papel en la orientación de las líneas de acuerdo con la dirección Norte – Sur. Tal orientación tiene por objetivo lograr iluminación uniforme en ambas caras de los setos y, en consecuencia, equilibrio de vegetación en las mismas, pero según Cabrera (2019) y Perdomo (2010), esta orientación muchas veces no es acompañada de la pendiente óptima, por lo que hay que llegar a un equilibrio entre pendiente y orientación. Esta idea se respalda por las conclusiones expuestas por Toranzo (2007), pues no siempre se puede elegir la orientación ideal de una plantación, pero si se puede optar por la menos perjudicial de acuerdo con la especie y la variedad a plantar.

En relación al diseño de los sistemas de riego es bien sabido que, para riego por surcos, el movimiento del flujo de agua debe ir a favor de la pendiente o bien, a través de la fuerza de gravedad. Para el caso del riego por goteo o microaspersión, con tal de minimizar el gasto energético proporcionado por el equipo de bombeo, las líneas laterales deben situarse en paralelo a las curvas de nivel y así, proporcionará la misma cantidad de agua para ambos lados del secundario siempre y cuando el sistema de riego esté bien diseñado, no dependerá de la topografía del terreno.

3.1.2. Evapotranspiración del cultivo

Una de las variables que se necesita determinar es la evapotranspiración potencial (ET_o) o de referencia (ET_r). Este concepto considera una cubierta referencial de pradera de gramíneas en condiciones óptimas de crecimiento y abastecimiento de agua (Allen *et al.*, 2006). Esta condición permite que la determinación de la evapotranspiración solo dependa de la demanda atmosférica (Rojas *et al.*, 2001). Para la determinación de ET_o se han desarrollado una gran cantidad de modelos empíricos, siendo los más usados los siguientes: Blanney – Creedley, Turk, Priestley – Taylor y Penman – Monteith (Ellena *et al.*, 2018).

Una vez establecido el valor de ET_o, se debe determinar la cantidad de agua a aplicar a un cultivo, que se denomina evapotranspiración de cultivo (ET_c).

Para esto es necesario hacer algunos cálculos que apuntan específicamente a estimar la evapotranspiración del cultivo, a través de una estimación de la transpiración de las plantas y de la evaporación de agua que ocurre desde el suelo. También es posible obtener la ET_o desde un evaporímetro de bandeja Clase A, ya que es un buen integrador de los factores climáticos (radiación solar, velocidad del viento, temperatura y humedad del aire) (Orrego, 2007).

En el país, existen datos de evapotranspiración de referencia diaria que pueden consultarse en el sitio web www.agroclima.cl; <http://agromet.inia.cl>.

Así por un período determinado de máxima demanda, que presenta condiciones meteorológicas de mayor radiación y/o temperatura de lo habitual, debería considerarse por ejemplo aumento de 10 a 15% del valor promedio (Holzapfel *et al.*, 2020).

A su vez, la evapotranspiración de referencia (ET_r) se puede modelar a partir del producto entre el coeficiente de bandeja ($k_b = 0,8$) y del E_b , es decir:

$$ET_r = E_b * k_b * 1,15 \qquad \text{Ecuación 1.}$$

Para el caso específico de estimación de ET_c en frutales, Holzapfel *et al* (2020) aconsejan que resulta más conveniente introducir un factor que considere la cobertura vegetal o área foliar, debido a las diferencias técnicas de cultivo. Así, la expresión recomendada corresponde a:

$$ET_c = ET_r * FC * 0,75 \qquad \text{Ecuación 2.}$$

, donde FC = Factor de cobertura ($0 < FC < 1$) que considera el menor tamaño que tienen los árboles jóvenes y el espacio entre árboles que debe mantenerse despejado para las labores agrícolas. El FC se puede determinar a partir de:

$$FC = F1 * P + F2$$

Ecuación 3.

, donde F1 y F2 son factores asociados al cultivo; y P es la fracción de sombreado al medio día solar ($0,1 < P < 0,7$). Por lo general, el IAF del avellano europeo es superior a 3,0 cuando tiene más de 4 años, y los porcentajes de cobertura (Ps) sobrepasan el 70% medidos en riego por goteo y microaspersión (Souto (vía e-mail), 2021).

F1 y F2 dependen del frutal y del manejo del riego en el huerto. El F2 varía dependiendo del manejo que tengas estos y de la cantidad de volumen de suelo humedecido. El F2 normalmente está asociado al manejo del sistema y de la cantidad de agua que se evapora de la superficie del suelo, entonces se debería pensar que en microaspersión es mayor la cantidad de agua que se evapora en el suelo en comparación del goteo.

Trabajos realizados en avellanos europeos, han determinado que la restitución de 75% de la ETc, ha permitido obtener un buen equilibrio entre crecimiento vegetativo y cantidad, como calidad de la producción Bignami *et al.*, (2000), Bignami *et al.*, (2009) y Bignami *et al.*, (2014). Es decir, aplicando un riego deficitario controlado (RDC) en base a una evaluación a largo plazo del avellano europeo en riego por goteo.

Según los estudios expuesto por Marsal *et al* (1997) citado por Ellena *et al* (2018) sobre el comportamiento del avellano europeo en condiciones de

stress, encontraron que las aplicaciones de agua, particularmente en el “llenado del grano”, mantienen altos niveles de fotosíntesis, que inciden en el rendimiento de los frutos. Es por ello que esta técnica debe aplicarse durante un estado fenológico menos sensible al estrés hídrico tal como se muestra en la Figura 4.

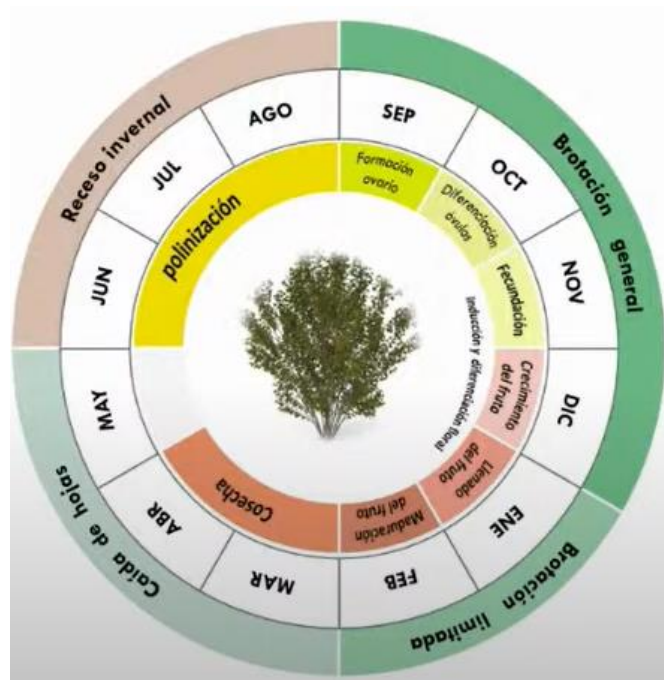


Figura 4. Ciclo fenológico avellano europeo.

En plantaciones nuevas, donde las raíces aún no están bien desarrolladas, la falta de agua puede generar un importante porcentaje de fallas por lo cual, la baja capacidad inicial de esta especie para explorar mayores superficies de suelo debe ser considerada a través de un adecuado manejo del agua de riego.

Se debe evitar el estrés hídrico de los árboles desde la floración hasta la madurez de la nuez. Es necesario regar con frecuencia en verano ya que, las capas superiores del suelo se secan más rápido que las capas más profundas del suelo.

3.2. Características físicas-hídricas del suelo para el cultivo de avellano europeo

Los parámetros físicos – hídricos del suelo, asociados a las prácticas de riego, se relacionan directamente con la textura y espesor de cada estrata del perfil del suelo donde se desarrollarán las raíces del avellano. Este se considera un respaldo y aporte de aire, agua y nutrientes.

Para realizar un adecuado diseño del sistema de riego y así, tener un riego eficiente y uniforme, se debe conocer bien el tipo de suelo. Según sea la textura del suelo así será su capacidad de retener el agua. La fuerza con que el agua es retenida en el suelo depende del tamaño de los poros del suelo. A menor tamaño del poro, mayor fuerza de retención del agua y, por lo tanto, mayor capacidad de almacenamiento.

En cuanto al suelo, según indica Uslar (2006), los avellanos europeos idealmente prefieren suelos fértiles, de origen volcánico o aluvial, con textura ligera y permeable. Si el suelo es excesivamente calcáreo y de naturaleza seca puede resentirse por la falta de humedad. Es muy frecuente que, a la más ligera sequía, se produzca la caída prematura del fruto, disminuyendo la

cosecha. Es por ello que, según Vera (2021), existen tres limitantes para el desarrollo y crecimiento de las raíces: el mal drenaje, alta compactación y pedregosidad, lo que conlleva a la asfixia radicular reduciendo la capacidad de retención de agua.

En la zona norte de la Región del Maule y Bío-Bío, los agricultores tienen sus avellanos sobre camellones lo que permite tener el suelo más oxigenado y más permeable.

Un suelo arcilloso está formado por partículas más pequeñas, por lo que tiene gran cantidad de poros pequeños. Este hecho le confiere una mayor capacidad de almacenamiento de agua. Además, esta mayor capacidad de retención hace que la velocidad de infiltración en el terreno sea menor, por lo tanto, el bulbo húmedo se extiende de manera horizontal y así, las raíces se desarrollan de manera horizontal más que vertical.

Por otro lado, un suelo franco o trumao, tiene un volumen de poros menores que el suelo arcilloso, pero su rango de disponibilidad de agua es mayor. Finalmente, un suelo arenoso tiene un gran volumen de macro poros, escasa retención de agua y disponibilidad reducida de ella para las plantas. Sin embargo, un estudio relacionado con la tasa de infiltración básica, Holzapfel (1988), ha demostrado que los suelos trumaos derivados de cenizas volcánicas presentan un alto valor en la tasa de infiltración básica aplicando diferentes métodos estimativos.

Por todo lo anterior, resulta imprescindible conocer el tipo de suelo para el diseño del sistema de riego y a su vez, determinar el tiempo y la frecuencia de riego.

Por ello, Holzapfel *et al.*, (2020) explica los parámetros que hay que considerar al momento de estudiar el suelo.

3.2.1. Capacidad de campo

Capacidad de campo (CC), corresponde al contenido de humedad del suelo, expresado en porcentaje base peso seco (%bps) a una energía de retención que oscila entre 1/10 a 1/3 bar (10 a 33 J / kg). Indica el límite superior o máximo de agua útil para la planta que queda retenida en el suelo contra la fuerza de gravedad.

3.2.2. Punto de marchitez permanente

Punto de marchitez permanente (PMP), corresponde al contenido de humedad del suelo, expresado en porcentaje base peso seco (%bps) a una energía de retención que oscila entre 10 a 15 bar (1000 a 1500 J / kg). Indica el límite inferior o mínimo de agua útil para la planta.

3.2.3. Densidad aparente

Densidad aparente (D_{ap}) o densidad real del suelo, corresponde a la densidad de las partículas, varía con la proporción de elementos constituyentes y en general está alrededor de $2,65 \text{ g / cm}^3$.

3.2.4. Velocidad de infiltración

En términos generales, la infiltración se refiere a la entrada vertical de agua en un suelo o cualquier otro material poroso. Al mismo tiempo, se entiende por velocidad de infiltración al volumen de agua que se mueve hacia el interior del suelo por unidad de área y por unidad de tiempo (Orrego, 2007).

Se puede indicar que la velocidad de infiltración depende de varios factores: textura, estructura, contenido de humedad, altura de la lámina de agua, temperatura del agua, entre otros (Orrego, 2007). Como también, el estado o condición en que se encuentra la masa de agua sobre la superficie. Tal como lo demuestra Holzapfel *et al* (1988), los métodos que determinaron la infiltración del suelo y que usan agua corriente dieron mayores valores de tasa de infiltración que aquellos que usan agua estancada. Con tal de obtener un mayor porcentaje de humedad inicial en el suelo, conlleva a que la tasa de infiltración disminuya.

En consecuencia, cada suelo tiene una velocidad de infiltración determinada, tal como se muestra en la Tabla 2, variando desde aquellos de infiltración

excesiva (suelos arenosos gruesos) hasta los de infiltración extraordinariamente lento (suelos arcillosos densos) (Orrego, 2007).

Tabla 2. Valores referenciales de velocidad de infiltración (VI) según la textura del suelo (Medina, 2019).

Textura de suelo	VI (mm / h)
Grava	> 25
Arenoso	18 – 25
Franco – arenoso	12 – 24
Arenosos – limoso	10 – 20
Franco	5 – 10
Franco – arcilloso	3 – 8
Arcillosos	1 – 5

Las propiedades de los suelos de permitir el paso de agua a través de su superficie determinan en gran parte que el riego sea eficiente y es uno de los factores determinantes en la selección del método de riego a emplear (Orrego, 2007).

La velocidad de infiltración del suelo establecerá, en base a los requerimientos del cultivo, el tiempo de riego, parámetros que en la actualidad no recibe una adecuada atención, produciendo serias deficiencias en los métodos de aplicación superficial (Holzapfel *et al.*, 2020).

3.2.5. Criterio de riego

Este valor de reposición denominado criterio de riego (Cr) o umbral de riego (Ur), hace referencia al criterio de agotamiento de agua para realizar la reposición al sustrato o suelo, cualquiera que sea la denominación, se debe tener claro que en diferentes etapas de desarrollo anual este valor tiene variación. Para efectos prácticos de operación se considera un valor fijo durante la temporada (Ellena *et al.*, 2013). La variación de humedad del suelo dependerá, básicamente, del criterio de riego a utilizar. (Valenzuela y Jara, 1979; Ellena *et al.*, 2013 y Holzapfel *et al.*, 2020), sugieren un valor de CR = 50%, asignándose valores de CR = 30% para cultivos sensibles, y de CR = 60% para plantas que puedan soportar de buena manera un estrés hídrico (Ellena *et al.*, 2018).

3.2.6. Altura de agua aprovechable

Altura de agua aprovechable total o actual (HA_T o HA_A) de cada suelo da origen a un concepto de criterios de reposición de agua, es decir un punto en el cual la planta extrae este recurso del suelo desde el estado de capacidad de campo, con tensión cero. En la medida que disminuye el agua, aumenta la tensión, existiendo un punto denominado “umbral” que, al seguir extrayéndose, la planta comienza a disminuir su crecimiento y consigo su desarrollo. Ello se debe a que la planta gasta energía para la extracción de agua en desmedro de otras funciones fisiológicas, en el crecimiento y desarrollo del avellano,

reflejando en la calidad de los frutos cosechados en cada temporada (Holzapfel *et al.*, 2020).

La obtención de la HA es prioritaria para fines de diseño, manejo y programación del riego.

Estudios relacionados en la Comuna de Nueva Imperial, predio Santa Elena, en suelos franco arcillosos, determinaron la humedad aprovechable por estrata cuyos resultados se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Humedad aprovechable por estrata (Ellena *et al.*, 2018).

Estrata	CC (%bps)	PMP (%bps)	Dap (g / cm ³)	Δz (mm)	HA (mm)
1 ^{er} estrata	38	23	1,15	170	29,3
2 ^{da} estrata	39	21	1,025	230	42,4
3 ^{ra} estrata	42	24	0,97	200	34,9

La altura de agua aprovechable o humedad aprovechable total (HA_t), para este caso, corresponde a 107,72 mm que, bajo el criterio de agotamiento de agua en el suelo del 35%, la HA_t equivaldría a 37,7 mm.

Tanto para CC y PMP, a veces en literatura se suele expresar la humedad del suelo como contenido de humedad volumétrico, es decir en metros cúbicos (o centímetros cúbicos) de agua contenidos en un metro cúbico de suelo (m³ / m³; cm³ / cm³), y se obtiene multiplicando el contenido de humedad gravimétrico por el cociente de la densidad aparente del suelo y la densidad del agua (Holzapfel *et al.*, 2020).

La expresión utilizada para estimar el valor de HA corresponde a:

$$HA_t = \frac{CC_{(vol)} - PMP_{(vol)}}{100} * \Delta Z * CR \quad \text{Ecuación 4.}$$

, donde HA = Humedad aprovechable total bajo el criterio de riego (CR). CC = Contenido de humedad volumétrico a capacidad de campo (m³ / m³). PMP = Contenido de humedad volumétrico a punto de marchitez permanente (m³ / m³). ΔZ = Profundidad representativa de la muestra de suelo analizada (mm).

A modo de ejemplo, los antecedentes entregados en la Tabla 4 muestra la humedad aprovechable total bajo el criterio de riego utilizando como base el software Soil Water Characteristics.

Tabla 4. Parámetros físicos – hídricos: capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y humedad aprovechable total (HA_t) bajo el criterio de riego del 35% (*Software Soil Water Characteristics*).

Cultivo	ΔZ	CC	PMP	HA _t
Avellano europeo	60 cm	38,8%	25,1%	28,8 mm

Entre los resultados expuestos por la Tabla 3 y 4, la cantidad de agua útil para el avellano europeo, bajo las condiciones de suelo previamente establecidas varían entre 30 y 38 mm, según el criterio de riego, es decir cuando el árbol haya extraído del suelo el 35% de la humedad aprovechable, se debe realizar

la reposición del agua. O sea, en término equivalentes, entre 30 a 38 litros de agua por unidad de superficie se debe realizar una reposición de agua al suelo.

Según los estudios de (Ellena *et al.*, 2018), las raíces del avellano europeo variedad Barcelona y Tonda de Giffoni, en un suelo franco – arcilloso y una estrata de suelo 0 – 60 cm de profundidad se observó que: (i) en condiciones de riego por goteo, las raíces de las plantas se encuentran distribuidas en un perfil de 60 cm de suelo, (ii) en detalle, se aprecia que la profundidad 0 – 20 cm, hubo escasa presencia de raíces, encontrándose en aquella de 20 – 50 cm con una mayor concentración de raíces de anclaje y de raíces finas, (iii) entre 50 – 60 cm, también hubo escasa presencia de raíces

Al observar el alcance de las raíces, se constató una alta concentración de ellas con orientación sobre las hileras de plantas, es decir la mayor concentración de raíces se orienta de forma preferente sobre la zona de humedad (Ellena *et al.*, 2018).

En condiciones sin riego, las raíces de las plantas se distribuyen en un perfil de 50 cm de suelo. En particular se aprecia que en la profundidad de 0 – 10 cm hay una escasa presencia de éstas, observándose en aquella correspondiente a 10 – 50 cm con una mayor concentración de raíces de anclaje y raíces finas; entre 50 – 60 cm de profundidad hay una escasa a nula presencia de ella. En relación al alcance de las raíces, se observó una alta concentración de ellas con orientación sobre y entre hileras de las plantas, es decir las raíces se orientan radialmente en torno al árbol (Ellena *et al.*, 2018).

La distribución de las raíces del avellano europeo suele ser superficiales y poco profundas, lo cual determina que éste árbol frutal sea sensible al estrés hídrico, afectándose con ello la producción de frutos (Ellena *et al.*, 2018).

3.3. Volumen de agua teórico que requiere el frutal

La cantidad de agua removida desde el suelo por la planta se denomina evapotranspiración. Esta agua debe reponerse periódicamente para no dañar el potencial productivo de la planta. Diversas metodologías se han propuesto para su determinación, debiendo considerarse que la evapotranspiración depende, entre otros aspectos, como lo es: las condiciones climáticas, tipo y estado de desarrollo del cultivo, y de la disponibilidad de agua del suelo (Holzapfel *et al.*, 2020).

Se puede estimar el volumen de agua diario requerido por el cultivo (V_r) con la siguiente expresión:

$$V_r = ET_c * D_{sh} * D_{eh} \quad \text{Ecuación 5.}$$

, donde V_r = Volumen de agua teórico que requiere el frutal ($L \text{ día}^{-1} \text{ árbol}^{-1}$).
 ET_c = Evapotranspiración actual del frutal (mm / día). D_{sh} = Distancia sobre hilera (4 m). D_{eh} = Distancia entre hilera (5 m).

3.4. Volumen total de agua a aplicar

Considerando que los métodos de riego no permiten aplicar el agua con una eficiencia de aplicación (EA) del 100%, ya que existirán pérdidas producidas por la evaporación del agua en el suelo, la transpiración del mismo frutal, la velocidad del viento, por escurrimiento y percolación El volumen total a diario a aplicar por árbol según la premisa de la eficiencia de aplicación corresponde a:

$$V_t = \frac{V_r}{EA} \quad \text{Ecuación 6.}$$

, donde V_t = Volumen total diario de agua a aplicar por árbol (L / día árbol). V_r = Volumen de agua teórico que requiere el frutal (L / día árbol). EA = Eficiencia de aplicación.

3.5. Volumen de agua que retiene el suelo

La capacidad de retención de agua del suelo, asociada a la zona de exploración radicular efectiva, es decir el volumen máximo a aplicar. Volúmenes de aplicación mayores que los recomendados provocarán lixiviación y pérdidas tanto de agua como de fertilizantes, energía y uso potencial o erosión del suelo. Si la capacidad de almacenamiento es menor

que la demanda diaria del cultivo, es necesario aplicar agua más de una vez al día con los volúmenes máximos de retención (Holzapfel *et al.*, 2020).

En ciertas situaciones la profundidad del suelo útil para el almacenamiento es restrictiva y para ello es necesario aumentar el área de aplicación de agua con la finalidad de aumentar la capacidad de almacenamiento de la zona radicular del suelo. Incorporando una cantidad de gotero o microaspersor que mojen una mayor área (Holzapfel *et al.*, 2020). En goteo esto se logra aumentando el número de laterales por hilera.

Es importante destacar que, en suelos arcillosos con una alta capacidad de retención, la aplicación de riegos muy frecuentes provocará serios problemas de aireación en la raíz. Por ellos se debe regar de manera que exista una buena relación agua – aire (Holzapfel *et al.*, 2020).

A través de este análisis, el volumen de agua que soporta el suelo corresponde a la relación entre la humedad aprovechable actual en función del criterio de riego y el marco de plantación, es decir:

$$V_s = HA_a (CR) * E_{eh} * E_{sh}$$

Ecuación 7.

, donde V_s = Volumen de agua que retiene el suelo (L). HA_a = Humedad aprovechable bajo el criterio de riego (L / m²). E_{eh} = Espaciamiento entre hilera (5 m). E_{sh} = Espaciamiento sobre hilera (4 m).

Tanto para riego por surco, goteo y microaspersión, se estima que el volumen de agua que puede retener el suelo por planta, es aproximadamente 575 L / m².

3.6. Programación de riego

La programación de riego permite establecer la frecuencia con la que se debe regar y por cuánto tiempo, procurando optimizar el uso del agua para maximizar la producción y calidad de los productos agrícolas. Además de las características de la planta y condiciones ambientales, la frecuencia de riego depende de las propiedades hídricas del suelo, método de riego y capacidad de retención de agua en el suelo, mientras que el tiempo de riego, en el caso de riego localizado (cinta, goteo, microjet) o aspersión, está condicionado por el caudal que se aplica a la planta o por la precipitación efectiva del equipo (Holzapfel *et al.*, 2020). Entonces, la frecuencia de riego corresponde a:

$$FR = \frac{V_s}{V_t}$$

Ecuación 8.

, donde FR = Frecuencia de riego días u horas. Vs = Volumen de agua que retiene el suelo (L). Vt = Volumen total de agua a aplicar (L / día árbol).

3.7. Diseño óptimo del sistema de microriego en avellanos europeos

Existen criterios generales que deben tomarse en cuenta para el diseño de un sistema de riego presurizado, entre ellos pueden considerarse los siguientes factores: agronómicos e hidráulicos del sistema de riego (Tapia *et al.*, 1999).

Los factores agronómicos corresponden a: demanda de agua del cultivo, características de plantación y desarrollo del cultivo, número y caudal del emisor seleccionado, sectores y tiempos de riego, y caudal requerido por el sistema, mientras que los factores hidráulicos deben considerar lo siguiente: trazado, longitud y diámetro de las tuberías, pérdidas de energía del agua al sistema de distribución, presión total requerida, dimensionamiento del equipo motobomba, del sistema de filtros y del equipo de fertilización, automatización del sistema y dimensionamiento de la fuente de agua necesaria, si no existiese.

Al respecto, se puede dar la situación que el predio o parcela se abastezca de agua a través de un canal, cuyo trazado está en altura, existiendo una diferencia de cota importante entre la toma de agua y el terreno a regar. Esta condición hay que aprovecharla y determinar efectivamente cual es la diferencia de altura que existe entre estos dos puntos para suplir la presión

requerida. La diferencia de altura recomendada para un buen funcionamiento de los emisores está entre un rango de 10 – 15 m.c.a. Ésta cifra puede variar según el tipo de emisor y el diseño.

3.7.1. Microriego

El riego por microriego se puede definir como la aplicación frecuente de agua al suelo en pequeñas cantidades a través de redes de tuberías y dispositivos especiales denominadas “emisores”, ubicadas a lo largo de la línea de distribución. De esta manera el agua es conducida desde la fuente a cada planta, eliminando totalmente las pérdidas por conducción y minimizando aquellas por evaporación y percolación. Con este método se pretende, además de controlar el patrón con que el agua se distribuye en el suelo, generar en la zona radicular del cultivo un ambiente con características físicas, químicas y biológicas que permiten lograr mayores rendimientos y una producción de alta calidad. El diseño de los sistemas de riego por microaspersión y goteo es de alta complejidad y debe considerar, desde un punto de vista ingenieril y agronómico, aspectos técnicos, energéticos, medioambientales y económicos (Holzapfel *et al.*, 2020).

3.7.2. Diseño de microriego

El diseño de microriego contempla, en líneas generales, la elección del emisor y diámetro del lateral adecuado para la caracterización de la subunidad, la elección de tuberías de conducción; según diámetro y clase correspondiente

y el dimensionamiento de los equipos adecuados para el cabezal de control (González, 2015).

3.7.2.1. Cabezal de control

Es el conjunto de equipos y accesorios que controlan toda la superficie bajo el sistema de riego. Estos tienen como función entregar energía, filtrar el agua, controlar la presión e incorporar fertilizante, entre los principales (González, 2015).

Otros componentes principales, además del sistema de filtro y el equipo de bombeo, son: unidad de fertilizante, depósito de almacenamiento y aparatos de control y medición

3.7.3. Tuberías de conducción

Como el método de riego presurizado tiene una duración de varios años y un alto costo inicial, el diseño de las tuberías de conducción se realiza sobre la base del óptimo económico (Zazueta, 1992). Cuanto mayor es el diámetro, mayor es la inversión inicial en tuberías, sin embargo, a mayor diámetro las pérdidas de carga por rozamiento son menores, lo que conlleva a un menor consumo energético y menor costo de operación y también reduce el costo del equipo de bombeo. En consecuencia, cuando la estación de bombeo forma parte del diseño, la elección de diámetro óptimo económico (DOE) de las

tuberías de conducción se basa en minimizar el costo total anual (González, 2015).

Para determinar el DOE se debe calcular para cada diámetro comercial disponible, el costo fijo anualizado y el costo variable anualizado, siendo la suma de ambos el costo total anual. El diámetro que presente el mínimo costo total anual corresponde a el DOE (González, 2015).

El costo fijo anualizado para cada diámetro, CF (d), está dado por:

$$CF (d) = CI (d) * FRC (i,n) \quad \text{Ecuación 9.}$$

, donde CI (d) = Costo de tuberías de diámetro de instalada en campo. FRC = Factor de recuperación del capital para las tuberías.

FRC está dado por:

$$FRC (i\%, n) = \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad \text{Ecuación 10.}$$

, donde i = Tasa de interés anual. N = Vida útil de la tubería (años)

El costo variable anualizado CV (d) o costo anual de la operación, CAO, está dado por:

$$CAO = \frac{CAEE * Q * J}{102} \quad \text{Ecuación 11.}$$

, donde CAO = Costo anual de operación (\$ / año). Q = Caudal bombeado (L / s). J = Pérdidas de carga en función de Hazen – Williams (m.c.a.). CEE = Costo anual equivalente de la energía (\$ / HP año).

CAEE está dado por:

$$CAEE = \frac{N^{\circ} * Cc * FEE}{Eb * PPUC} \quad \text{Ecuación 12.}$$

, donde N° = Número de horas de operación por año. Cc = Costo del combustible, \$ por unidad de combustible o (\$ / kWh). Eb = Eficiencia de la bomba como fracción decimal. PPUC = Factor de potencia generada por unidad de energía; 1,2 para bomba eléctrica (HP h / kWh). FEE = Factor de costo anualizado equivalente de energía.

FEE está dado por:

$$FEE = \left[\frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \right] \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad \text{Ecuación 13.}$$

, donde e = Incremento de la energía por sobre el interés. n = vida útil (años).
 i = Interés anual.

De esta manera, los costos totales (CT) quedan definidos como:

$$CT = CF(d) + CEO \quad \text{Ecuación 14.}$$

3.7.4. Subunidad

Las subunidades constan de tuberías laterales, secundarias, auxiliares y válvula de control. Para goteo y microaspersión, dividir el área a regar en subunidades es una componente de diseño ya que, no siempre se dispone de agua suficiente para regar todo el predio a la vez. Además, las subunidades permiten mayor flexibilidad en el riego, lo que conlleva a tener una mayor uniformidad de aplicación ya que, según Jiménez (2008) dado el caso de que se presenten diferentes cultivos en las subunidades, demandaría caudales variados para suplir las necesidades hídricas de los cultivos. Ello significa que, si se riegan todas las subunidades al mismo tiempo, las eficiencias de riego resultarían dispares, recibiendo agua por exceso y por defecto. González (2015) señala que, aparte de las ventajas anteriores, las subunidades presentan mayor facilidad de manejo y un ahorro en la inversión de tuberías, dado que los caudales a transportar para las subunidades son menores, lo cual va en directa relación con los diámetros a utilizar. Tanto para riego por surcos como microriego, el número de subunidades está descrito por las

cantidades de set o posturas que se riegan de forma diaria y que va de la mano con el tiempo riego necesario para suplir las necesidades hídricas del frutal y el tiempo de riego diario disponible que comúnmente es alrededor de 20 horas. Una vez estimado los números de set, en el caso del microriego, este valor representará las subunidades que se regarán de manera simultáneas en función de subunidad ajustada al predio según los largos de las tuberías laterales, secundario y disponibilidad de agua. Teóricamente, siguen los mismos pasos para estimar las subunidades en el sistema de riego por surco que, en este caso, es la longitud del surco la que se irá ajustando, pero teniendo en cuenta que el área mínima a regar por día corresponde al producto entre el área mínima a regar o subunidad y los sets que se deben regar diariamente.

3.7.4.1. Laterales

Las tuberías laterales son aquellas que alimentan directamente a los emisores. El diseño consiste, en la determinación del diámetro adecuado, dada una longitud de lateral que debe alimentar un determinado número de emisores, dentro de un rango prefijado de uniformidad de emisión (González, 2015).

El diseño debe incluir la determinación del diámetro y largo del lateral, así como también la distribución de presión y descarga a lo largo de este, incluida la presión de ingreso y la del sector más distante del cabezal de control (González, 2015).

El diseño de los laterales se realiza considerando un rango de variación de presión tal que permita una uniformidad de aplicación de agua aceptable (González, 2015).

3.7.4.2. Secundarios

El diseño de los secundarios se realiza considerando un rango de variación de presión tal que permita una uniformidad de aplicación de agua aceptable (González, 2015).

Las pérdidas de carga por fricción en las tuberías (laterales y secundarias) provocan una variación de presión a lo largo de estas, lo cual tiene un efecto directo en la uniformidad de aplicación de agua (Karmeli *et al.*, 1985; Zazueta, 1992), entre otros, han tratado de formular expresiones que modelen el comportamiento de las pérdidas a lo largo de las tuberías existentes en las subunidades, basándose mayoritariamente en la fórmula de Hazen – Williams y la de Darcy – Weisbach.

La ecuación de Hazen – Williams, utilizada para el cálculo de pérdidas de carga corresponde a:

$$H_f = \frac{Q^{1,85}}{(0,26 * C)^{1,85} * D^{4,86}} * L * F_{sm} \quad \text{Ecuación 15.}$$

, donde H_f = Pérdida de carga (m.c.a.). Q = Caudal de entrada de la línea del lateral (m^3 / s). C = Coeficiente de rugosidad de Hazen. D = Diámetro interno de la tubería (m). L = Longitud de la tubería (m). F_{sm} = Factor de Christiansen para salidas múltiples.

El Factor de Christiansen (F_{sm}) para salidas múltiples.

$$F_{sm} = \frac{1}{1+\beta} + \frac{1}{2n} + \frac{\sqrt{1+\beta}}{6n^2} \quad \text{Ecuación 16.}$$

, donde β = exponente ecuación de pérdidas de carga (Hazen – Williams Darcy – Weisbach, 1,852 y 2, respectivamente). n = Número de emisores o salidas.

Por otro lado, la ecuación de Darcy – Weisbach es:

$$h_f = f * \frac{L}{D^5} * \frac{8 * Q^2}{\pi^2 * g} * F_{sm} \quad \text{Ecuación 17.}$$

, donde h_f = Pérdidas de carga (m.c.a.). f = Coeficiente de fricción de Darcy (0,02). Q = Caudal de entrada de la línea del lateral (m^3 / s). L = Longitud de la tubería. D = Diámetro interno de la tubería (mm). F_{SM} = Factor de Christiansen para salidas múltiples.

Para el diseño de la subunidad se debe tener en consideración el límite de pérdidas de carga en el lateral y en el secundario las cuales corresponden a un 15 y un 5% de la presión nominal del emisor, respectivamente, bajo el siguiente criterio:

$$\frac{P_{\text{máx.}}}{\gamma} - \frac{P_{\text{mín.}}}{\gamma} \leq \Delta P * \frac{P_{\text{op}}}{\gamma} \quad \text{Ecuación 18.}$$

Dichos análisis se ven reflejados en el Anexo A.

3.7.4.3. Válvulas

Para el control de la aplicación de agua, cada subunidad de riego dispone de una o más válvulas manuales o automáticas. El cierre de las válvulas automatizadas se realiza cuando ha pasado un determinado volumen de agua teórico requerido por la planta, o tras un determinado tiempo de funcionamiento, siendo estos dos parámetros de control los más habituales (González, 2015).

3.7.5. Análisis técnico - económico para la selección del emisor

El elemento más importante de un sistema de microriego es el emisor ya que, afectará directamente los criterios de diseño. Los emisores son estructuras que reducen la presión prácticamente a cero, aplicando de esta manera el agua a la forma de una gota en la superficie del suelo o asperjada en finas

gotas con microjet y microaspersores. Los emisores varían en tipo y modelo, desde tubos perforados (tuberías exudantes), microtubos y bandas perforadas, a complicados diseños. Los microaspersores son de tipo rotativo o de jet. En general la clasificación de los sistemas de riego localizado se basa en el tipo de emisor utilizado (Holzapfel, 2000).

3.7.5.1. Gotero

El riego por goteo consiste en la conducción de agua desde una red de conducción y red de laterales con emisores de agua, denominado goteros, los que entregan agua en bajos volúmenes de forma localizada (Medina, 2019).

Los goteros son emisores instalados en líneas porta goteros o laterales, los que entregan el agua lentamente a la forma de gota a gota. Los goteros se ubican sobre la línea a distancias variadas, la cantidad de agua o descarga de goteros dependerá del orificio de salida, características propias de diseño del fabricante y puede oscilar desde 1 a 10 L /h por gotero.

La distancia entre los goteros en la tubería lateral, depende de las distancias de plantación, del tipo y textura de suelo y el tipo de desarrollo radicular del cultivo (Yévenes, 2019).

La presión de funcionamiento base mínima de la mayoría de los goteros es de 1,2 bar (unidad de presión) (Medina, 2019).

Existe una gran diversidad de goteros de diferente configuración y forma para diferenciar la presión y caudal operacional en campo, algunos de los más usuales son el gotero autocompensado y no autocompensado.

El gotero autocompensado entrega la misma cantidad de agua ante variaciones de presión. Este tipo de goteros se adecuan a terrenos con relieves variables y con desniveles superiores a 50 – 60 cm, también cuando existen líneas laterales demasiado largas en donde se pierde presión por fricción en el recorrido causando disminución de energía, debido a las características de su diseño, los goteros autocompensado pueden mantener uniformidad de descarga continuo por su amplio rango de presión. En cambio, los goteros no autocompensado son aquellos que no poseen mecanismos de regulación por efecto del aumento de la presión, lo que hace que su caudal sea variable. Puede que funcionen con menor presión que los goteros autocompensado, pero para mantener el caudal uniforme se debe emplear líneas de longitudes cortas, de esta manera se logra un CV < 10% (Medina, 2019).

Todos los goteros en sus fichas técnicas proporcionadas por fabricantes indican el Coeficiente de Variación (CV) en porcentaje (%). Este valor representa la desviación estadística del caudal real respecto del caudal de gotero en ensayos estándar, es decir, refleja la variación de descarga real de gotero en operación respecto del caudal nominal.

Con este sistema de aplicación de agua localizada, donde se humedece solamente la parte del terreno ocupada por la raíz de la planta, se tiene a forzar el desarrollo radicular en ese volumen de suelo.

Algunas ventajas del sistema de riego por goteo son las siguientes:

- Alta eficiencia de riego (90 a 95%) y muy uniforme distribución del agua.
- Con este sistema se puede regar frecuentemente con pequeñas cantidades de agua, de manera tal que el suelo esté siempre húmedo, con buena relación entre agua y aire.
- El régimen de aplicación (intervalos entre riego y cantidad de agua) puede ajustarse exactamente de acuerdo a las condiciones del suelo y del cultivo.
- Con este sistema de riego presurizado, no se producen pérdidas de agua en los deslindes del predio y no se mojan los caminos ni las parcelas vecinas.
- Se aplica el agua que sólo las raíces del cultivo son capaces de absorber, por lo tanto, se evita mojar otras áreas de terreno, lo que significa un ahorro de agua.
- Contribuye a facilitar el control de las malezas al humedecer el suelo en forma localizada. Además, el agua de riego se aplica finamente filtrada y libre de semillas de malezas.
- Se minimizan las pérdidas por conducción y evaporación, como también la formación de costra superficial.

- Disminuye el desarrollo de enfermedades fungosas. Siempre y cuando la distancia del emisor con respecto al tronco sea la adecuada.

Cabe destacar que la alta eficiencia de este método de riego incide en forma significativa sobre los rendimientos del cultivo, donde, en algunos rubros, el solo incremento de la producción puede amortizar el gasto que significa la implementación de un sistema de riego por goteo.

Algunas desventajas de los sistemas de riego por goteo son las siguientes:

- Su alto costo de inversión, debido a que exige abastecimiento de agua a presión y un complejo sistema de control.
- Este sistema de riego requiere de un especial cuidado en el filtraje del agua y mantención de los goteros, pues son muy sensibles al taponamiento por materia orgánica o impurezas.

En suelos muy ligeros, el riego por goteo no siempre satisface las necesidades de los cultivos, debido al bulbo húmedo, que es más profundo y poco extendido horizontalmente, no ofreciendo la mínima superficie de suelo mojado necesaria para el buen desarrollo radicular (León, 2005). A menos que la falta de volumen de suelo humedecido sea compensada con otra línea de goteros siempre y cuando respetando los criterios agronómicos e hidráulicos del sistema de riego.

3.7.5.2. Microaspersor

El sistema de riego por microaspersión consiste en la aplicación del agua de riego como una lluvia de gotas finas a baja altura. El agua se distribuye a través de tuberías y es aplicada a las plantas mediante emisores llamados microaspersores, que dan un mojamiento en forma localizada (León, 2005).

Los microaspersores básicamente son boquillas, compuestas de una sola pieza de polímero, sujeta a un soporte que la eleva a una altura de 10 a 20 cm sobre la superficie del suelo (León, 2005).

Los microaspersores suelen tener una boquilla que pulveriza el agua y un difusor, elemento que distribuye el agua pulverizada en forma de círculo completo o sectorialmente (León, 2005).

Las principales ventajas de los microaspersores son las siguientes:

- ✓ Se pueden aplicar caudales importantes (15 a 60 L / h) a baja presión (10 a 20 m.c.a.), lo que disminuye el costo total del sistema en comparación a riego por goteo (León, 2005).
- ✓ Se aplica el agua en forma localizada sobre la zona de las raíces del cultivo, por lo cual aumenta la eficiencia de aplicación del riego (León, 2005).

Algunas de las ventajas de este sistema al compararlo con un riego por goteo es que: (i) la boquilla del emisor posee un orificio de mayor tamaño por lo que se origina un menor número de obturaciones, (ii) permite regar los cultivos en

un tiempo menor, (iii) el riego cubre una mayor superficie y (iv) en ciertos frutales se ocupa para protegerlos contra heladas (León, 2005).

El microaspersor ocupa el aire como medio de difusión del agua, debido a esto hay pérdidas por evaporación y sensibilidad al viento (Zazueta, 1992), lo que conlleva al aumento de la germinación de las malezas, debido a la gran superficie de suelo que humedecen estos emisores (León, 2005).

Éste método de riego es recomendable utilizarlo en suelos arenosos o pedregosos.

3.7.6. Características para la selección del emisor

La selección del emisor debe considerar los siguientes factores:

- ✓ Descarga nominal
- ✓ Presión nominal de operación del emisor
- ✓ Relación descarga presión del emisor, de preferencia la curva de descarga versus presión
- ✓ Tamaño de la sección nominal de flujo del emisor
- ✓ Ángulo vertical del jet de agua en microjet o microaspersor
- ✓ El diámetro de mojado de un solo emisor
- ✓ El patrón de humedecimiento de un emisor y de un grupo de emisores
- ✓ Espaciamiento y posición de los emisores a lo largo y entre los laterales
- ✓ Costo del emisor

- ✓ Velocidad de aplicación del emisor y su relación con la velocidad de infiltración
- ✓ Facilidad de limpieza o susceptibilidad a taponamiento
- ✓ Facilidad de reemplazo en la línea lateral

Con respecto al análisis técnico, al momento de seleccionar el emisor, es importante conocer sus características de presión y caudal, tal como se muestran en las Figuras 5 y 6. En general, el caudal y la presión se enlazan de la siguiente manera:

$$q_e = K * P_e^x \quad \text{Ecuación 19.}$$

, donde q_e = Descarga o caudal del emisor (L / h). P_e = Presión de descarga (m.c.a.). K = Coeficiente de proporcionalidad. x = Exponente de descarga. Este último es muy importante pues es determinante en el diseño del equipo.

La diferencia entre emisores no autocompensantes y los autocompensantes está en el valor de la x . Mientras que los no autocompensantes su valor está en torno a 0,5, en los autocompensantes su valor es muy próximo a 0. Un valor 0 no existe ya que eso sería un gotero perfecto que es imposible de fabricar, es un valor teórico.

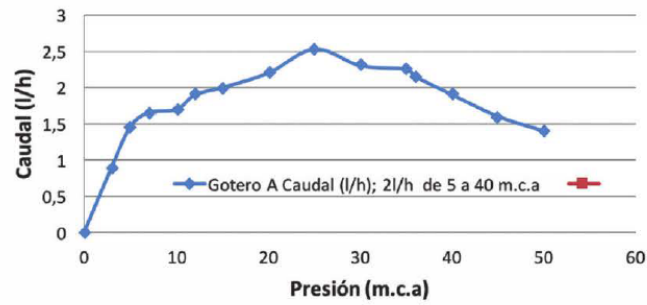


Figura 5. Caudal de gotero no autocompensado en función de la presión (Medina, 2019).

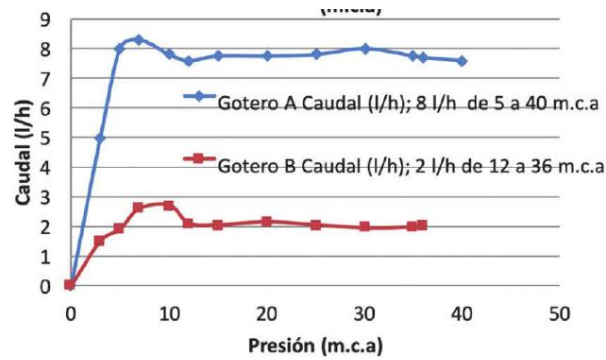


Figura 6. Caudal de descarga de goteros autocompensados en función de la presión (Medina, 2019).

3.7.7. Parámetros críticos

Los parámetros críticos a considerar al momento de diseñar un sistema de microriego y que afectan al rendimiento productivo y vegetativo del cultivo son los siguientes: área de mojamiento, volumen de suelo humedecido, números de emisores por árbol, número de laterales por hilera y tiempo de riego.

3.7.7.1. Área de mojamiento

Normalmente, sólo parte del área de influencia del cultivo o frutal es humedecida. Por ello está claro que el área humedecida o área de mojamiento (AH) debe ser una cierta parte del área total. Este factor se debe establecer definitivamente en función del tipo de suelo y sistema radicular del cultivo y frutal. Lo expuesto expresa que el volumen humedecido debe considerar el tipo de crecimiento radicular del cultivo y las restricciones que presenta el suelo para su desarrollo (Holzapfel, 2000).

Es importante poner de relieve que una mayor área humedecida produce un menor riesgo contra fallas del sistema a déficit de agua, sin embargo, puede encarecer su implementación por un mayor número de emisores y caudal total. Indudablemente esta situación es de menor importancia en áreas con un nivel medio de precipitaciones.

Para determinar el porcentaje de área humedecida es necesario saber la cantidad de emisores y el caudal de descarga, otro factor importante es determinar el diámetro de humedecimiento. Zazueta (1992) desarrolló una serie de ecuaciones, ver Figura 7, que permiten determinar el diámetro humedecido de los emisores en distintos tipos de suelo y en función de la descarga o caudal del emisor.

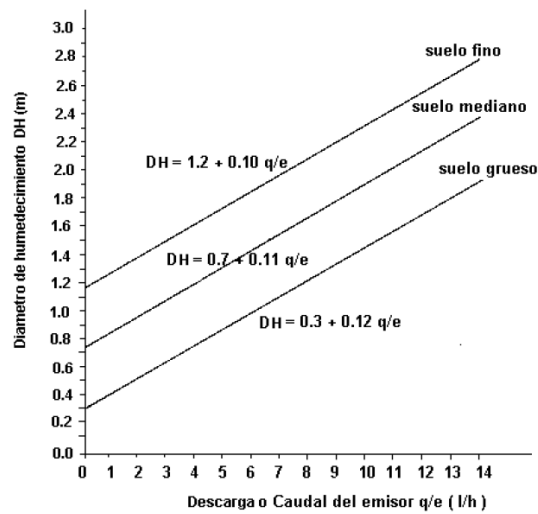


Figura 7. Diámetro de humedecimiento (DH) en función de la descarga del emisor (q / e) para goteo (Zazueta, 1992).

Según (Holzapfel *et al.*, 2020), el área de humedecimiento para un determinado número de emisores fue establecida con el criterio de humedecer al menos entre 40 y 65% del área correspondiente al marco de plantación, cuando se trata de frutales.

Para goteo, patrón de humedecimiento:

$$AH = \frac{Ne * \pi * DH^2}{4 * Dsh * Deh} * 100 \quad \text{Ecuación 20.}$$

Para microaspersión, patrón de humedecimiento caso D:

$$AH = \frac{\pi * (DH)^2}{4} * \left[2 - \frac{\text{Arcos}\left(\frac{R}{2DH}\right)}{180} \right] * \frac{100}{Dsh * Deh} \quad \text{Ecuación 21.}$$

, donde AH = Área humedecida (%). Ne = Número de emisores. DH = Diámetro de humedecimiento. α = Radio de mojado (360°). Dsh = Distancia sobre hilera (4 m). Deh = Distancia entre hilera (5 m). R = Radio de humedecimiento (2 m).

Para fines de diseño, se considerará un suelo mediano, $DH = 0,7 + 0,11 * q_e$.

3.7.7.2. Volumen de suelo humedecido

Según Gispert *et al.*, 2015, en relación al diseño de los sistemas de riego localizado el establecimiento del volumen de suelo húmedo (VSH) adecuado es crítico para conseguir un rendimiento del cultivo y una eficiencia de aplicación del agua óptimos. Se aconseja una superficie húmeda alrededor del 40 – 65% del área sombreada por el avellano (área de sombreado al medio día en promedio: 10,2 m²), a una profundidad de 30 – 40 cm. La necesidad de humedecer un amplio volumen de suelo, mediante microaspersión, conllevará a obtener una adecuada respuesta fisiológica y productiva del avellano.

La forma y dimensiones del VSH dependen estrictamente del caudal del emisor, del volumen de emisión, de las características del suelo y del contenido inicial del agua (Gispert, 2003).

Es bien sabido que la distribución de las raíces sigue, básicamente, el diseño de la distribución del agua en el terreno. En un ensayo de campo destinado a comparar la microaspersión con el riego por goteo en una plantación de manzanos de siete años, Spieler (1997) citado por Gispert (2008) dedujo que, la distribución de las raíces era bien distinta conforme el sistema de riego aplicado. Las raíces bajo microaspersión estaban distribuidas más uniformemente en el VSH (volumen de suelo humedecido) y el número de raíces por árbol era mayor que en los árboles regados por goteo. Las raíces de estos últimos se concentraron en un volumen de suelo pequeño y poco profundo, mientras que en los árboles regados por microaspersión se halló un gran número de raíces que penetraron a profundidades de 70 a 80 cm, también la relación follaje / raíces activas obtuvo mejores resultados con microaspersión, siendo respaldado por los resultados expuestos por Podestá *et al.*, (2011).

En este sentido, Yévenes (2013) presenta como factor negativo para la buena productividad del avellano europeo, el escaso número de goteros (1 a 2 por árbol) y la escasa superficie de suelo mojado

Según los resultados expuesto por Gispert (2008), la mayor producción de avellana en cáscara y el mayor crecimiento vegetativo de los brotes se alcanzaron con un porcentaje de suelo húmedo como mínimo del 33% (VSH - 33%) a través del sistema de riego por goteo, caso contrario ocurrió con la aplicación del agua de riego por difusión con un porcentaje de suelo húmedo

del 70% (VSH - 70%), pero con un menor contenido de agua en el suelo, probablemente por una mayor evaporación desde su superficie, ocasionando manifestaciones de estrés hídricos como defoliación prematura y producciones en cáscara. Nievas *et al.*, (2021) señala los beneficios del uso de mulching en la epata crítica de establecimiento del huerto de avellanos para disminuir la evaporación del agua en el suelo y así, asegurar el correcto desarrollo de las raíces disminuyendo la competitividad.

3.7.7.3. Tiempo de riego

Para determinar el tiempo de riego por cada emisor con el fin de reponer el agua evapotranspirada, se debe conocer en primer lugar el volumen total de agua a aplicar y en segundo lugar la descarga del emisor, es decir:

$$\text{Tr (horas).} = \frac{V_t}{N_e * Q} * FR \quad \text{Ecuación 22.1.}$$

o bien, si se desea regar diariamente, el tiempo de riego queda de la siguiente manera:

$$\text{Tr (horas / día).} = \frac{V_t}{N_e * Q} \quad \text{Ecuación 22.2.}$$

, donde T_r = Tiempo de riego (h). V_t = Volumen total de agua que se debe aplicar para el cultivo (L día / planta). FR = Frecuencia de riego (días). N_e = Número de emisores. Q = Caudal del emisor (L / h).

El conocer las características de los diferentes productos o goteros y los requerimientos de agua del cultivo, la textura de suelo y la respuesta al movimiento de agua en el suelo, permite asociar y elegir un emisor adecuado para lograr aplicar el agua de manera oportuna, generando condiciones adecuadas para la correcta absorción privilegiándose la eficiencia de uso por parte del cultivo, esto trae como consecuencia un menor costo de operación, menor consumo de agua y producción de calidad (Medina, 2019).

3.7.7.4. Número de emisores por planta

El número de emisores por árbol varía en un amplio rango, dependiendo del tipo de frutal, desde 2 o menos hasta 8 o más en árboles adultos. La forma y el tamaño del volumen humedecido es una función del arreglo y número de emisores, del programa de riego y características del movimiento del agua en el suelo (Holzapfel, 2000).

El número de emisores por planta (N) debe considerar el volumen de agua a aplicar que requiere el cultivo (V_t) asociado a las horas de operación y el caudal del emisor (Holzapfel *et al.*, 2007), es decir:

$$N = \frac{Vt}{q_e * TR} \quad \text{Ecuación 23.}$$

, donde TR = Número de horas de riego al día que opera la subunidad (horas).

q_e = Descarga o caudal del emisor (L / h).

Además, es importante conocer la velocidad de aplicación y la velocidad de infiltración con el fin de evitar escorrentía, dicho de otra forma:

$$Ia = \frac{q_e * N}{S_e * S_l} < VI \quad \text{Ecuación 24.}$$

, donde Ia = Velocidad de aplicación del agua en el suelo (mm / h). VI = Velocidad de infiltración (mm / h). N = Número de emisores. Se = Distancia entre emisores. Si = Distancia entre laterales (m).

La secuencia para determinar el número de emisores y consigo el criterio de aceptación de la velocidad de infiltración, está descrito en la Figura 8.

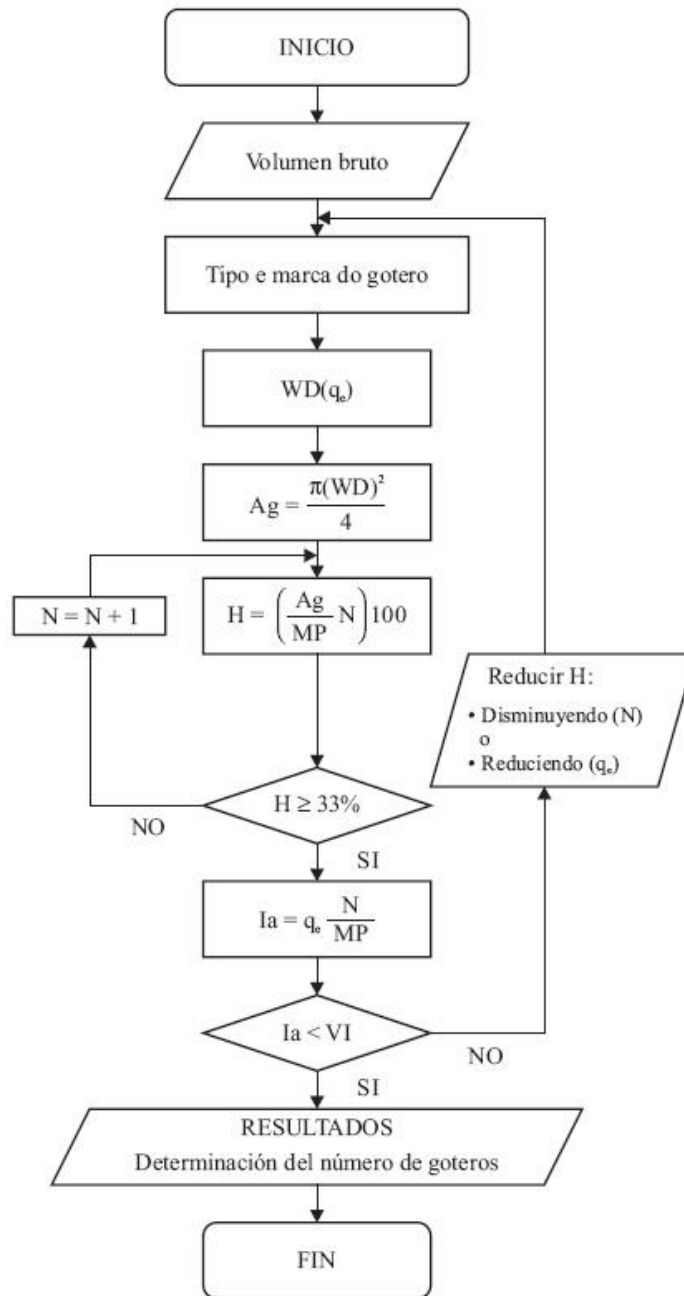


Figura 8. Secuencia para la determinación del número de emisores (Holzapfel *et al.*, 2007).

3.7.7.5. Localización y número de laterales por hilera

Existe mucha variedad de posicionamiento y cantidad de laterales para regar avellanos. Para abarcar mayor superficie de raíces, los agricultores colocan más líneas de gotero (3 ó 4) pero entorpecería el paso de los tractores y de las máquinas cosechadoras, para evitar eso, los agricultores dejan sus líneas de gotero en las ramas de los árboles, pero si el levante no es perfecto, la gota podría dirigirse a zonas más bajas donde está guateado lo que terminaría erosionando el suelo.

Estudios relacionados con la producción o rendimiento de manzanos Muñoz (2017) y Souto *et al.*, 2021, demostraron que, para suelos franco – arcillosos es conveniente emplear 1 lateral por hilera y, para suelos franco – pedregosos es conveniente emplear 4 laterales por hilera con goteros de 4 y 1 L / h, respectivamente. Dando como resultado mayor producción por árbol de manzano, un fruto de buen sabor, color y firmeza de la pulpa y con un óptimo tamaño y peso comercial.

Desde el punto de vista de la localización, según Muñoz (2017) la línea de goteros se debe situar a una posición cercana y media del tronco (40 ó 60 cm). Esto se debe a que para suelos franco - arcillosos la retención de humedad es más favorable que para el suelo franco - pedregosos y es por ello que el área humedecida, generada por el emisor, debe ser tal que satisfaga las necesidades hídricas del frutal.

Según (Cifuentes, 2008), el rendimiento y la calidad de la fruta (naranja cv. Valencia) muestran diferencias entre los diferentes tratamientos de localización (40; 60; 80 y 120 cm), desde el tronco, de aplicación de agua y fertilizante, solo entre temporadas (2003 / 04; 2004 / 05 y 2005 / 06). En general, se encontró que, para las tres temporadas de riego, a medida que se acercan las líneas de goteros al tronco, el rendimiento y la calidad del fruto aumentan.

En general, en la Región del Maule y del Bío-Bío, los agricultores ocupan dos líneas de gotero separados 20 cm (dependiendo de la edad de la planta) a 50 cm entre goteros con un caudal de 2 L / h.

3.7.8. Emisor óptimo económico

La selección técnico – económica se basa en las características técnicas asociadas al funcionamiento del emisor y antecedentes económicos relativos a costos. La alternativa más adecuada resulta del menor costo con el mejor indicador de desempeño técnico (Holzapfel *et al.*, 2007).

La selección óptima económica considera los costos fijos anuales (CF) y los costos variables (CV), cuya suma es el costo total anualizado (CTA).

$$CTA = CF + CV$$

Ecuación 25.

Los costos fijos corresponden a los costos relacionados a la inversión requerida en la adquisición e instalación de los emisores y los variables son aquellos relacionados a la operación y su manutención.

El emisor que resulta con el menor valor en el costo total anualizado (CTA) corresponderá al emisor gotero óptimo económico.

3.7.8.1. Costos fijos anualizados para los emisores

En este costo hay que considerar el valor que tiene el dinero en el tiempo, en base a un valor presente o costo fijo anualizado.

El costo fijo anualizado para cada emisor estará dado por:

$$CF (E) = [CI (E) + C (E)] * N (E) * FRC (i,n) \quad \text{Ecuación 26.}$$

, donde CF (E) = Costo fijo anualizado para un determinado número de emisores. CI (E) = Costo de instalación de un emisor, \$. C (E) = Costo de adquisición de un emisor, \$. N (E) = Número de emisores que cumplen con el requerimiento del cultivo. FRC = Factor de recuperación del capital a una tasa de interés (i) para una vida útil de n años.

El factor de recuperación del capital (FRC) estará dado por:

$$FRC (i,n) = \frac{i * (i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad \text{Ecuación 27.}$$

3.7.8.2. Costos variables para los emisores

El costo variable está asociado a la operación del emisor e incluye solamente el costo de energía ya que, el costo de mantención es difícil de predecir con certeza a futuro dado que, tiene una alta dependencia del manejo del equipo. El costo variable se calcula con la siguiente ecuación:

$$CV (E) = \frac{CAEE * Q * N(E) * P_e}{NS * 367200} \quad \text{Ecuación 28.}$$

, donde CV (E) = Costo de operación anual (\$). CAEE = Costo anual equivalente de la energía como factor. Q = Caudal del emisor (L / h). NS = Superficie que se riega en forma simultánea (ha).

El costo anual equivalente de la energía (CAEE) está dado por la siguiente ecuación:

$$CAEE = \frac{T_o * C_e * FCE (e, i, n)}{E_b * PPUC} \quad \text{Ecuación 29.}$$

, donde To = Número de horas de operación al año. Ce = Costo de combustible, \$ / unidad de combustible o energía (kWh). FCE (e, i, n) = Factor de costo equivalente para una tasa de incremento anual de energía (e), un interés (i) y una vida útil (n). Eb = Eficiencia de la bomba como fracción. PPUC = Potencia generada por unidad de combustible (HP – h / kWh).

El cálculo de FCE (e, i, n) está asociado a:

$$\text{FCE (e, i, n)} = \left[\frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(e-i)} \right] * \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad \text{Ecuación 30.}$$

, donde e = Tasa anual de aumento de costo de energía. n = vida útil (años).

La Figura 9 representa, en forma gráfica, la secuencia de pasos a utilizar en la selección económica de emisores, siguiendo las definiciones y consideraciones técnico – económicas.

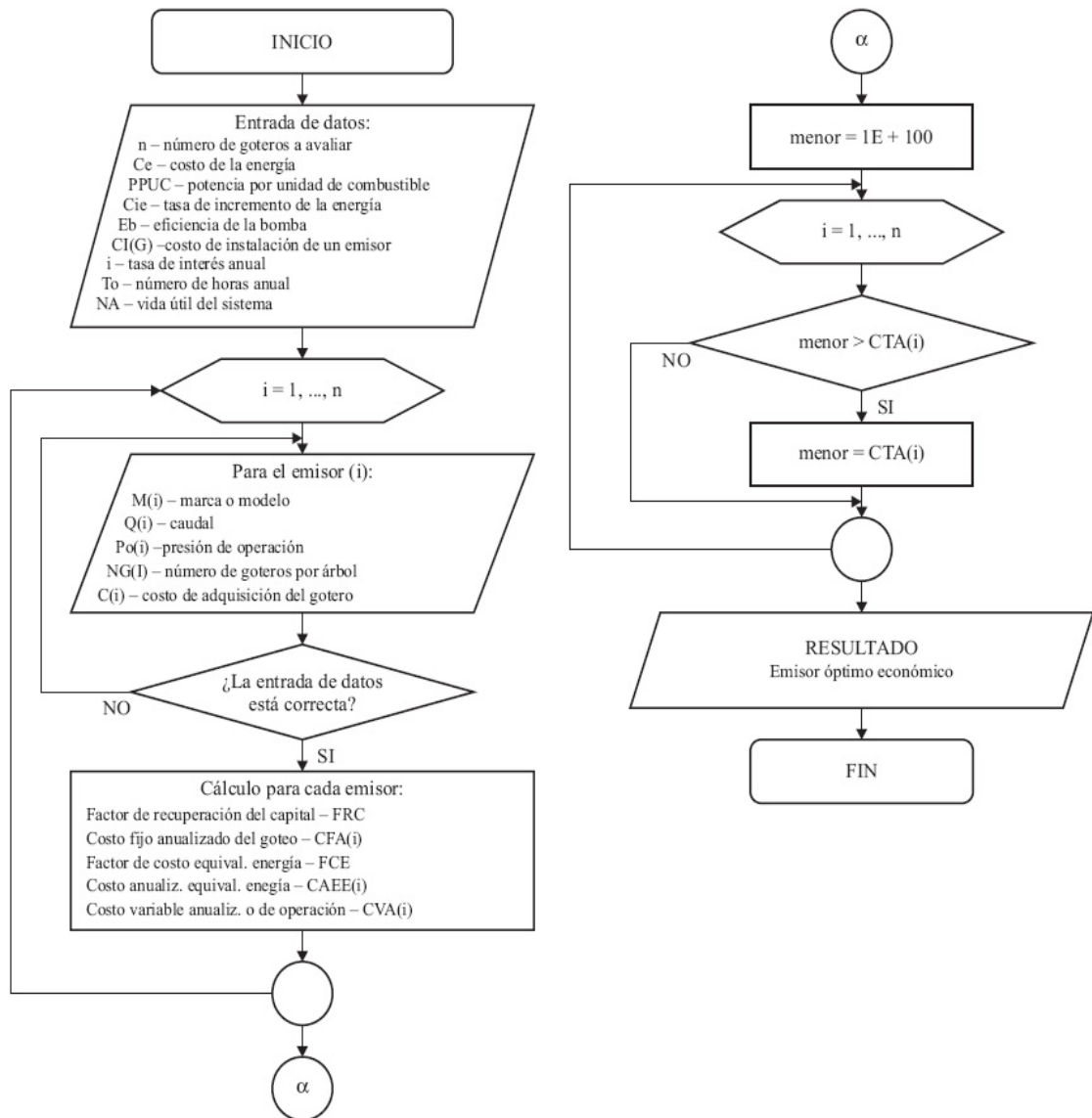


Figura 9. Diagrama de flujo para la selección óptima económica de emisores (Holzapfel *et al.*, 2007).

La descripción de los emisores E1 y E2, están dados en la Tabla 5. En la Tabla 6, se presentan los antecedentes económicos para la selección técnico – económica de emisores.

A los diferentes emisores se les asignará un nombre genérico: E1 para gotero y E2 para microaspersor. Esto para evitar usos inadecuados de carácter comercial, que no es la finalidad de este proyecto de estudio, sino entregar antecedentes que permitan apoyar el diseño de los sistemas de microriego. Para efectos de estudios posteriores se pueden considerar emisores de cualquier fabricante.

Tabla 5. Características generales de los emisores E1 y E2: caudal (Q), presión de trabajo (P) y precio unitario (Pu).

Nombre genérico	Q (L / h)	P (m.c.a.)	Pu (\$)
E1	4	6	120
E2	60	20	450

Tabla 6. Antecedentes económicos para la selección óptima del emisor.

Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidad
Tasa de interés anual	(i)	8	(%)
Hora de operación anual	(To)	4800	(Horas / año)
Costo de la energía	(Cc)	110	(\$ / kW h)
Eficiencia de la bomba	(Eb)	75	(%)
Tasa de incremento de la energía	(e)	20	(%)
Vida útil del sistema	(n)	15	(años)
Costo instalación de un emisor	(Ci)	10	(\$ / emisor)
Potencia por unidad de combustible	(PPUC)	1,2	(HP – h / kW h)

Para comprender de forma general el comportamiento técnico y económico de un sistema de riego referente a su costo total, se debe realiza un análisis que considera los parámetros de presión de trabajo, vida útil del sistema, número

de horas de uso en la temporada de riego, valor y variación del costo de la energía y tasa de interés del capital.

En general existe la tendencia de que a mayor cantidad de horas diarias que se utiliza el sistema en la temporada, aumentan los costos variables y los costos totales anuales, pero, existe la posibilidad de regar una mayor superficie. Por el contrario, si la superficie es el factor limitante, el aumento del número de horas produce una disminución de la potencia del sistema de bombeo ya que se debe entregar el mismo caudal en un mayor tiempo. Es importante destacar que la utilización de un mayor número de horas diarias del sistema se traduce en un aumento de superficie posible a regar o, en el caso que no exista más superficie regable, es posible satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo utilizando un menor caudal total para el sistema. Por lo tanto, conviene utilizar el equipo de riego el mayor número de horas al día.

3.8. Diseño óptimo del sistema de riego por surco en avellanos europeos

Un adecuado sistema de riego superficial debe enfocarse en disminuir las pérdidas de agua que se producen por percolación más allá de la profundidad a la que se ubican las raíces de las plantas. Además, debe lograr una adecuada distribución del agua en el suelo, favoreciendo el desarrollo homogéneo del cultivo (Velazco, 2009).

Unas de las ventajas que presenta el riego por surco es que no necesita de grandes inversiones en equipos ya que, puede alcanzar buena eficiencia de aplicación si el manejo es adecuado, pero también puede presentar deficiencias como grandes pérdidas de agua en el caso de suelos livianos o escurrimiento superficial en el caso de suelos pesados, dificultad para aplicar dosis pequeñas de agua, peligro de erosión en terrenos con mucha pendiente y dificultad para lograr un riego uniforme. Si el sistema no está bien diseñado puede ser muy ineficiente. Es por ello que, para aumentar el rendimiento, se debe nivelar adecuadamente el suelo y considerar las características del terreno (velocidad de infiltración, retención de agua, profundidad del perfil, densidad aparente entre las distintas estratas). De lo contrario, los surcos pueden destruirse o bien el agua podría apozar en los sectores bajos (Velazco, 2009).

La nivelación de suelos es una práctica necesaria para el establecimiento de una explotación rentable y se paga con creces al aumentar el rendimiento de los cultivos, optimizar el uso del suelo, y obtener una mejora permanente en el tiempo.

Algunos de los factores que influye en la eficiencia de aplicación son: humedad inicial del suelo, tiempo de riego, caudal de agua, dimensiones de la unidad de riego, receptibilidad del suelo, pendiente del terreno (0,2%) y capacidad del regador (Domínguez, 2018).

3.8.1. Fases de riego

El agua es ingresada por la cota superior desde una fuente de abastecimiento y fluye en el sentido descendente de la pendiente, cubriendo todo el perímetro del surco, en forma de una delgada lámina de agua detrás del frente de avance o de mojado (Matas, 1995).

Bajo condiciones normales, el flujo continúa circulando sobre la superficie hasta que el frente de avance llega al extremo inferior del surco, en ese momento, el agua comienza a evacuar el surco como escurrimiento a través de una acequia evacuadora o de desagüe (Matas, 1995).

Luego de transcurrido el tiempo necesario para completar la infiltración de la lámina de agua consumida por la evapotranspiración del cultivo desde el riego anterior, se interrumpe el ingreso de agua al surco. En ese momento se inicia la fase de recesión, que culmina en el momento en que la lámina de agua desaparece por el extremo inferior del surco. Se denomina frente de recesión o de secado al límite en el cual va desapareciendo el agua a lo largo del surco, el frente de recesión se desplaza gradualmente, hasta llegar al extremo inferior del surco. El tiempo en el que esta fase se desarrolla es, en general, muy pequeño y por ello el tiempo adicional de infiltración producido en cada punto de la unidad de riego es poco significativo. Es por esto que, en general, el riego se considera concluido desde el momento que se suspende el suministro de agua al surco (Matas, 1995).

El tiempo de contacto o de oportunidad corresponde al tiempo en que el agua permanece sobre la superficie del surco en un punto a lo largo de este, en la Figura 10 se presenta gráficamente este concepto (Matas, 1995).

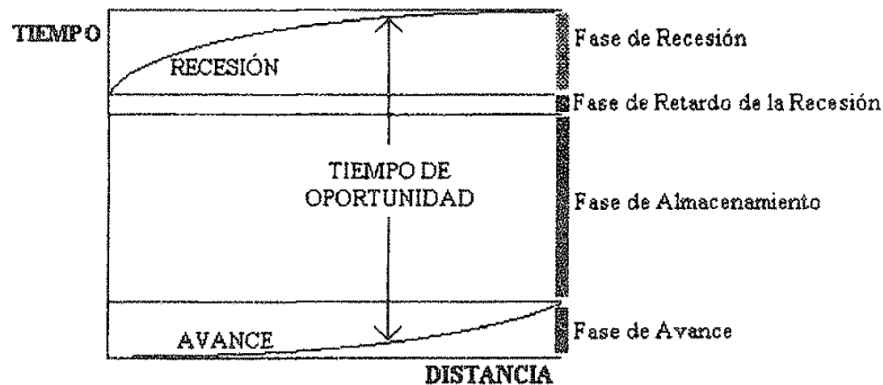


Figura 10. Tiempo de oportunidad definido a través de las curvas de avance y recesión (Matas, 1995).

El tiempo de riego, mostrado en la Figura 10, puede ser dividido en cuatro fases: la fase de avance, que comienza cuando el agua ingresa al surco y termina cuando el frente de avance llega al extremo final del surco. La fase de almacenamiento superficial empieza cuando el agua comienza a salir al final del surco por escurrimiento superficial, terminando cuando se interrumpe el caudal de entrada del agua al surco. En ese momento comienza la tercera fase, de vaciado, que finaliza cuando la lámina de agua sobre la superficie al comienzo del surco desaparece por efecto de la infiltración y del flujo superficial que ocurre simultáneamente en el suelo, esta es generalmente una

fase de muy corta duración. Una vez completado la tercera fase, comienza la fase de recesión, que termina cuando el surco no presenta agua libre en ningún punto (Matas, 1995).

En resumen, las fases de riego pueden verse afectado por los siguientes parámetros:

Avance: Caudal, infiltración del suelo, rugosidad del suelo, pendiente del terreno, compactación del surco y contenido de humedad del suelo.

Almacenamiento: Infiltración, contenido inicial de humedad del suelo (capacidad de retención del agua en el suelo) y altura de agua a aplicar.

Vaciado: Caudal al tiempo de corte, pendiente del terreno y velocidad de infiltración al tiempo de corte.

Receso: Pendiente del terreno, velocidad de infiltración y caudal final durante el almacenamiento.

3.8.2. Parámetros críticos

Al igual que el diseño de los sistemas de microriego, el riego por surco debe considerar parámetros que afectan de por sí al manejo y uso eficiente del agua.

Algunos de esos parámetros críticos son: longitud del surco, tiempo de riego, caudal máximo no erosivo y, no menos importante, número de surcos por hilera.

3.8.2.1. Longitud del surco

La longitud de los surcos depende de la textura del suelo y de la infiltración. En suelos arcillosos los surcos pueden ser más largos que en los suelos arenosos debido a la tasa de infiltración que presentan.

Lógicamente las dimensiones de los surcos serán mayores para cultivos frutales que para cultivos hortícolas ya que, en los frutales los surcos deberán ser más profundos y anchos. Cabe destacar que en suelos arenosos se puede utilizar surcos más bien angostos y profundos, a diferencia en suelos arcillosos de baja infiltración los surcos deberán ser más bien anchos y poco profundos.

A continuación, en la Tabla 7, se muestran valores de longitudes de surco según la textura del suelo, solo a modo general y orientativo, o sea sin considerar pendientes ni caudales.

Tabla 7. Rango promedio de surcos según el tipo de suelo (Demin, 2014).

Tipo de suelo		
Arenoso	Franco	Arcilloso
50 m	60 a 80 m	100 m o más

Una de las maneras para modelar el largo surco es empleando el modelo de Strelkoff en cual indica el avance del caudal en relación al tiempo de avance y tiempo final.

$$X = \frac{Q_{\text{máx.}} \cdot T_f}{A_o \cdot r_y + r_z \cdot A_o \cdot T_f^B}$$

Ecuación 31.

, donde X = Avance del flujo (m). $Q_{\text{máx.}}$ = Caudal máximo no erosivo (m^3 / min).

T_f = Tiempo de avance (min). A_o = Área máxima de flujo (m^2). A y B =

Constante de Kostiakov, 0,0088 y 0,35, cada uno. $r_y = 0,8$. $r_z = 1 / (1+B)$.

A su vez, para estimar el tiempo con que el agua llega a los pies del surco (T_f),

se modela a partir de la siguiente ecuación:

$$R = \left(\frac{B}{P} - 1 \right) \cdot 0,5$$

Ecuación 32.

, donde R = Relación tiempo de avance y tiempo final. B = Constante de

Kostiakov (0,35). P = Percolación permisible (5%).

Luego, se debe calcular T_F en función del tiempo de riego (TR) y R.

$$R = \frac{TR}{T_F} \rightarrow T_F = \frac{TR}{R}$$

Ecuación 33.

Una manera más alentadora para modelar la longitud del surco y obtener eficiencias de riego considerablemente buenas, es hacer uso del software

AQUASURCO (Aquasurco (R)) el cual, trabaja en función del balance de volúmenes, Ecuación 34, simulando y estableciendo variables de diseño.

$$VTA = VIN - VP - VE \quad \text{Ecuación 34.}$$

, donde VTA = Volumen total aplicado (m^3). VIN = Volumen infiltrado (m^3). VP = Volumen percolado (m^3). VE = Volumen escurrida (m^3).

El software hace hincapié a la iteración del caudal reducido, tiempo de corte y largo del surco y de esta manera, lograr que la eficiencia de distribución total sea la adecuada ($EDT > 70\%$) y a su vez estimar, en base a gráficos, la altura de agua infiltrada, curvas de avance y receso, volumen de agua aplicado, escurrido y percolado.

3.8.2.2. Tiempo de riego

El tiempo de riego (TR) es un criterio importante al momento de diseñar el sistema de riego por surco ya que, el caudal, la forma y la longitud del surco, va a depender netamente del tiempo que tomará en realizar el riego y la infiltración del agua al suelo.

Una manera para estimar el tiempo de riego en surcos es relacionar la altura de agua aprovechable para el cultivo (HA) y los coeficientes de infiltración de Kostiakov, es decir:

$$TR = \left(\frac{HAa}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad \text{Ecuación 35.}$$

, donde TR = Tiempo de riego (min). HAa = Volumen de agua que requiere el suelo bajo el criterio de riego, en función de los metros lineales de surco. A y B = Coeficiente de infiltración de Kostiakov, 0,0088 m³ / min^B m y 0,35, respectivamente.

Es relevante considerar el tiempo de riego al momento de diseñar ya que, en base a este parámetro, se decide hasta que momento dejar de regar, es decir, el tiempo de corte, con tal de no generar pérdidas por escorrentía ni por percolación.

El tiempo de corte (Tco) se define como el tiempo en que se corta el paso del agua desde la cabecera del surco. Es por ello que el éxito o fracaso depende particularmente de la ajustada elección del tiempo de corte. En virtud a lo anterior, se planteó el siguiente criterio:

$$TR \leq T_{CO} \leq TR + T_f \quad \text{Ecuación 36.}$$

, donde TR = Tiempo de riego (min. u hora). T_{CO} = Tiempo de corte (min. U hora). T_f = Tiempo de avance (min. u hora).

En el caso de riego superficial y microriego se debe determinar con precisión el tiempo de riego y la frecuencia de riego, para establecer un riego que reduzca o prevenga la contaminación del suelo y el agua, manteniendo niveles óptimos de producción y calidad (Holzapfel *et al.*, 2020).

3.8.2.3. Caudal de diseño

Se estableció una ecuación para calcular el caudal máximo no erosivo (Q_{máx}) en L / s, en función de la pendiente (So) en porcentaje (0 < So < 100) (Holzapfel, 1993).

$$Q_{\text{máx.}} = \frac{0,63}{S_o}$$

Ecuación 37.

Para suelos planos con pendientes menores al 0,3%, es recomendable utilizar la ecuación de Manning para calcular el caudal conociendo o asumiendo la forma del surco, debido a que la capacidad del surco puede ser restrictiva (Holzapfel, 1993).

El caudal reducido (Q_{red}), corresponde al caudal que, luego de que el agua haya llegado a los pies del surco, se desea aplicar en la fase de almacenamiento. A su vez, Holzapfel (1993) desarrolló una ecuación que

permiten obtener valores más exactos de caudales reducidos introduciendo el parámetro de infiltración del suelo en el momento del riego. Este caudal se ha determinado en forma práctica desde:

$$Q_{\text{red}} = \left(\frac{1}{2}\right), \left(\frac{1}{3}\right) \text{ ó } \left(\frac{2}{3}\right) Q_{\text{máx.}} \quad \text{Ecuación 38.}$$

Cabe destacar que el caudal máximo no erosivo debe ser tal que la geometría del surco soporte el avance del flujo de agua, evitando el desbordamiento o destrucción de este. Para lo cual, se tiene que llevar a cabo el cálculo del área máxima del flujo con el fin de estimar el caudal que soporta el surco y así determinar si se considera como un caudal de avance, es decir:

$$Q = \sqrt{\frac{F1 * A^{F2} * n^2}{So}} \quad \text{Ecuación 39.}$$

, donde Q = Caudal máximo que soporta el surco (m³ / s). So = Pendiente del surco (m / m). n = Rugosidad de Manning, 0,02. F1 y F2 = Parámetro hidráulicos. A = Área máxima de flujo (m²).

Tabla 8. Parámetros hidráulicos forma de surco en frutales.

Parámetros hidráulicos	Valor
E1	1,065
E2	1,478
F1	0,414
F2	2,852

Desde la Tabla 8, se puede calcular el área máxima de flujo a partir de la siguiente ecuación:

$$A = E1 * y^{E2} \quad \text{Ecuación 40.}$$

Siendo y la altura del surco el cual se debe aplicar un factor de seguridad del 80% con el fin de evitar desbordes.

Se puede decir que, en función de los antecedentes geométricos del surco, el caudal máximo que puede soportar el surco, integra al caudal máximo no erosivo. Por lo que, $Q_{\text{máx}}$ es el caudal de diseño.

3.8.2.4. Número de surcos por hilera

Uno de los parámetros no menos importante en el riego por surco es el número de surcos ya que, influye directamente con el área humedecida por cada metro lineal de surco. Debido a esto, el tiempo de riego, teniendo en cuenta el caudal máximo no erosivo y el caudal reducido preestablecido, tiende a cambiar

según sea la cantidad de surcos por hilera, es decir, a mayor número de surcos menor es el tiempo de riego y a menor número de surcos mayor es el tiempo de riego.

Desde el punto de vista de la demanda hídrica del frutal, teóricamente, el tiempo de riego por surcos en avellanos europeos debe ser tal que humedezca gran parte de la zona radical, favoreciendo así el buen desarrollo y crecimiento del cultivo. Teniendo esto en cuenta y lo mencionado anteriormente, a medida que aumenta el número de surco, menor será el tiempo con que el caudal reducido (Q_{red}) humedezca la zona de raíces extractantes provocando así que la eficiencia de aplicación sea menos oportuna. Es por ello que, en base a modelaciones hecho en el software AQUASURCO, se estimará el comportamiento del agua en el surco y así su debido aprovechamiento según el volumen de agua que el cultivo demande.

Según Ibarra (2004), el manejo inadecuado del riego por surco en frutales se debe a la utilización de caudales superiores al caudal máximo no erosivo, lo que se puede traducir en pérdidas de agua y suelo por dicho proceso. Otro punto importante es el tiempo de riego ya que, si el tiempo de riego es breve, el tiempo de oportunidad serán pequeños y a su vez, si la frecuencia de riego utilizada en el predio difiere considerablemente a la frecuencia de riego calculada, implica que el suelo se ha estado regando cuando tenía un alto porcentaje de agotamiento de la humedad aprovechable. Y, por último, respecto a los índices de calidad de riego, se debe señalar que la eficiencia de

aplicación, la eficiencia de requerimiento y la eficiencia de distribución total deben presentar valores aceptables a causa de que se haya cumplido los requerimientos hídricos del cultivo. Para ello se debe tener en cuenta la relación entre las necesidades y la lámina de agua aplicada que, si esta última es excesiva, se derivará a pérdidas de agua principalmente por percolación profunda.

Según los resultados expuestos por Holzapfel *et al* (2010), desde el punto de vista de calidad de riego y producción relativa, los parámetros recomendados para ser usados en diseño, manejo y operación de sistemas de riego por surco son la EA y EDT ya que, permiten establecer buenas prácticas de riego y prevenir contaminaciones. Si bien, la ER y EDT son los parámetros de rendimiento de riego que mejor se correlacionan con las variables de riego por surco (caudal de entrada, caudal y largo del surco, y tiempo de riego), no evalúan lo que sucede con las pérdidas de agua por percolación profunda y escorrentía superficial y con sigo, la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Es importante destacar que la EDT es el parámetro que adecúa la falta o exceso de agua en el riego por surco.

3.9. Eficiencia de riego

La calidad del riego o como mejor se conoce, eficiencia de riego, corresponde a una variable dinámica que depende de diferentes factores tales como: (i) suplir los requerimientos de agua de la planta, (ii) distribución uniforme sobre

el área de riego, (iii) aplicar el volumen de agua que es capaz de retener el suelo en la zona de extracción radicular con tal de impedir la percolación profunda, (iv) evitar la lixiviación para prevenir la salinización del suelo y (v) minimizar la erosión y el deterioro de la estructura del suelo, todo esto sin contar con el manejo inadecuado del regante, derivado de su escaso conocimiento previo o experiencia en el cultivo. De este modo, la eficiencia de utilización fluctúa no sólo a lo largo de la temporada en cada evento de riego, sino que también en cada sector y subsector de riego dentro de un sistema (Franco, 2018).

En general se puede establecer que la calidad del riego depende de: la velocidad de avance del frente de agua en el caso de riego superficial, la velocidad de infiltración, el caudal de entrada, el tiempo de riego, el tiempo de recesión del agua desde la superficie del suelo, la humedad del suelo antes del riego, la variabilidad textural y estructural del suelo.

3.9.1. Eficiencia de aplicación

El Comité de Riego Predial de la División de Riego y Drenaje de la Asociación de Ingeniería Civil de los Estados Unidos (ASCE) definió la eficiencia de aplicación del agua en riego (EA) como la razón entre el volumen de agua retenida en la zona radicular después del riego y el volumen total de agua aplicada en un riego. Su expresión matemática para riego superficial es:

$$EA = \frac{V_{ZR}}{V_A} * 100$$

Ecuación 41.

, donde V_{ZR} = Volumen de agua almacenada en la zona radicular. V_A = Volumen aplicado.

Se debe tener en consideración que, la eficiencia de aplicación del agua describe sólo la fracción de agua aplicada en el riego que ha quedado almacenada dentro de la zona radicular y que es potencialmente accesible para el proceso de evapotranspiración. Este parámetro permite establecer las pérdidas de agua asociadas al riego que deben estar relacionadas con escorrentía y percolación profunda, pero no es adecuado para describir la calidad global de un riego, debido a que no especifica la uniformidad de la aplicación del agua, como tampoco si éste cumplió con las necesidades de la planta o cultivo.

La eficiencia de aplicación de los diferentes métodos de riego superficial y presurizado varía de acuerdo a su diseño, manejo y operación. En numerosos estudios realizados a nivel predial y de sistemas realizados por el Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Concepción y antecedentes de investigación a nivel internacional (Holzapfel *et al.*, 2020). En la Tabla 9 se detallan rangos de eficiencia de aplicación de diferentes métodos de riego.

Tabla 9. Rangos de eficiencia de aplicación de diferentes métodos de riego (Holzapfel *et al.*, 2020).

Métodos de riego	Eficiencia de aplicación (%)
Superficial	10 – 30
Riego en curvas de nivel	30 – 60
Riego por bordes	40 – 80
Riego por surcos	40 – 85
Presurizado	
Riego por aspersión	50 – 90
Riego por microjet o microaspersión	60 – 95
Riego por goteo	65 – 95

3.9.2. Eficiencia de requerimiento

Hansen (1960) desarrolló el concepto de eficiencia de requerimiento (ER) para describir adecuadamente la calidad de un riego. La eficiencia de requerimiento puede ser definida para riego superficial como:

$$ER = \frac{V_{ZR}}{V_R} * 100 \quad \text{Ecuación 42.}$$

, donde V_{ZR} = Volumen de agua almacenada en la zona radicular. V_R = Volumen requerido.

La ER es importante cuando el agua que queda almacenada en la zona radicular es insuficiente para cubrir los requerimientos del cultivo. Valores bajos de ER se puede deber a situaciones de alto costo del agua, escasez de agua, conocimientos inadecuados de los requerimientos de agua del cultivo, mala distribución del agua infiltrada y factores de diseño u operación.

3.9.3. Eficiencia de distribución total

La eficiencia de distribución total (EDT) describe la distribución del agua en relación al requerimiento, incorporando tanto los sectores con déficit como con exceso (Holzapfel *et al.*, 2010). La eficiencia de distribución total se define como:

$$EDT = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - X_r|}{nX_r} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 43.}$$

, donde X_i = Altura de agua infiltrada en el punto i . X_r = Altura de agua requerida por el cultivo. n = Número total de observaciones.

La EDT muestra el desarrollo de la distribución del agua en el total de los puntos respecto al agua requerida. Analiza la variación de la altura de agua infiltrada respecto a la altura requerida. De esta manera, cuando el riego es adecuado y se registran pequeñas variaciones de altura de agua infiltrada, el valor de EDT es alto. Por lo contrario, cuando el riego es de mala calidad y se observan grandes variaciones de altura de agua infiltrada con la altura de agua requerida, el valor de EDT es bajo. Valores de EDT por sobre 75% se consideran adecuados.

3.9.4. Coeficiente de uniformidad de Christiansen

El coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) que ha sido ampliamente utilizado, es una representación estadística de la uniformidad del riego en relación a la media de agua aplicada y está definida de la siguiente forma:

$$\text{CUC} = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{x}|}{n\bar{x}} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 44.}$$

, donde X_i = Caudal de agua en el emisor i o altura de agua aplicada. \bar{x} = Caudal promedio de los n emisores evaluados o la altura promedio. n = Número total de emisores o puntos evaluados.

Es importante poner en primer plano que el CUC solo mide la dispersión del agua aplicada con respecto a la media aplicada y no tiene relación con la altura de agua requerida.

4. ESTUDIO DE CASO: AVELLANO EUROPEO

4.1. Demanda hídrica del avellano europeo

En la Tabla 10, se detallan los resultados de los volúmenes totales diarios a aplicar al frutal avellano europeo (4 x 5 m) para cada sistema de riego.

Para el caso del avellano europeo, se utilizará una ETr para condiciones de 3 días consecutivos, aplicado al mes de máxima demanda (enero), con una

probabilidad de excedencia del 90%, dando a lugar a una Eb de 10,6 mm / día y consigo una ETr equivalente a 9,78 mm / día.

Tabla 10. Volumen total diario de agua a aplicar (Vt) al frutal avellano europeo (4 x 5 m) para cada sistema de riego a diseñar, siendo F1 y F2: Factores asociados al cultivo, ETc: Evapotranspiración del cultivo aplicando la restitución del 75%, Vr = Volumen de agua teórico que requiere el cultivo, EA: Eficiencia de aplicación considerando diferentes niveles de aplicación del agua.

Sistemas de riego	Tipo	F1 y F2	ETc		Vr (L / día árbol)	EA (%)	Vt (L / día árbol)
			(mm / día)	(m ³ / ha día)			
Gravitacional	Surco	1,00 y 0,11	5,94	59,4	118,8	40 – 85	297,0 – 139,8
	Goteo	1,00 y 0,11	5,94	59,4	118,8	65 – 95	182,8 – 125,1
Presurizado	Microaspersión	1,00 y 0,25	6,97	69,7	139,4	60 – 90	232,3 – 154,9

De la Tabla 10 se deduce que, influye directamente la eficiencia de aplicación del agua al cultivo ya que, a medida que mejor sea la aplicación, menor será el gasto de agua. Esto trae consigo que tanto la producción o rendimiento sea significativamente diferente a un caso de mal manejo del agua. Lo ideal es producir más avellanas europeas con menos volúmenes de agua de tal manera que no se viera afectada la huella hídrica como tal.

La Tabla 11 estima la frecuencia máxima de riego para cada sistema de riego a diseñar en el huerto modelo de avellanos europeos.

Tabla 11. Estimación de la frecuencia de riego máxima que soporta el suelo (FR) para cada sistema de riego considerando un volumen de agua que retiene el suelo por planta igual a 575 L / m² y con un criterio de riego del 35%, asumiendo que la aplicación del agua es efectiva.

Sistema de riego	Tipo	EA (%)	Vt (L / día árbol)	FRmax. (días)
Gravitacional	Surco no automatizado	85*	139,8	4
	Surco automatizado	90*	132,0	4
Presurizado	Goteo	95	125,1	5
	Microaspersión	90	154,9	4

*Los valores de EA a sistemas de riego por surco automatizado y no automatizado óptimamente diseñado.

Se puede decir que, desde la Tabla 11, en relación al método de riego gravitacional, el suelo actúa como un estanque que almacena el agua aplicada a cada riego, la capacidad que tiene este estanque de almacenar agua, determina cuántos días pueden transcurrir entre un riego y otro. Mientras que, bibliográficamente definidos como riegos de alta frecuencia, goteo y microaspersión, el suelo no necesariamente actúa como un estanque almacenador de agua, debido a que es aplicado frecuentemente para mantener el contenido de humedad en el suelo cercano a capacidad de campo, pero, para este caso, la frecuencia de riego no representa diferencias significativas en los tres sistemas de riego.

4.2. Diseño del sistema de riego por goteo y microaspersión en base a parámetros críticos

En base al modelo iterativo, la selección del emisor, se logra estimando el número mínimo de emisores que debe contemplar el cultivo con tal de cumplir con el criterio del mínimo suelo humedecido (SH) ($40 < SH < 65\%$). En la Tabla 12, se observa el comportamiento del área de humedecimiento en relación con la cantidad de emisores por planta. Se hará referencia a goteros con descarga de 2, 4 y 8 L / h y microaspersores con descarga de 30 y 60 L / h.

Tabla 12. Caudal del emisor (Q), diámetro de humedecimiento (DH) para suelos medianos, número de emisores (Ne) y área de humedecimiento (AH), en cada emisor.

Emisores	Q (L / h)	DH (m)	Ne / árbol	AH (%)
Gotero 1	2	0,92	12 – 18	39,9 – 59,8
Gotero 2	4	1,14	8 – 12	40,8 – 61,2
Gotero 3	8	1,58	4 – 6	39,2 – 58,8
Microaspersor 1	30	4,00	1 – 2	62,8 – 125,7
Microaspersor 2	60	4,00	1 – 2	62,8 – 125,7

Se desprende de la Tabla 12 que, el área humedecida aumenta a medida que la descarga o caudal del emisor y los números de emisores aumentan. Al ocurrir esto, atraerá consigo problemas de encharcamiento debido a que supera muy por encima la velocidad de infiltración básica del suelo con respecto a la velocidad de aplicación, causando así, el desarrollo y crecimiento inadecuado de las raíces. Dicho esto, como el AH debe situarse entre un 40 y un 65% es decir que, para los goteros y microaspersores, es recomendable

que se empleen 12 y 1 emisor de 4 y 60 L / h, respectivamente con el hecho de que existe una similitud en el área de humedecimiento. En la Tabla 13, hace referencia al tiempo de riego (Tr) estimado en función de los números de emisores (Ne), del caudal del emisor (Q) y el volumen total de agua a aplicar (Vt) a través de la eficiencia de aplicación.

Tabla 13. Estimación del tiempo de riego máximo diario (Tr) en sistema de riego presurizado a diseñar para diferentes emisores, goteo y microaspersor.

Tipo	Vt (L / día árbol)	Ne	Q (L / h)	Tr (horas / día)	Tr (horas)
Goteo	125,1	12	4	3	13
Microaspersión	154,9	1	60	3	10

En la Tabla 14, se da a conocer los parámetros que se utilizarán para la estimación del emisor óptimo económico para el diseño de microriego y así ser implementado en el huerto modelo.

Tabla 14. Resultados técnicos para obtener el emisor óptimo económico siendo: caudal del emisor (Q), diámetro mojado (DH), número de emisores (Ne), área humedecida por los emisores (At) y área humedecida (AH).

Emisor	Q (L / h)	DH (m)	Ne	At (m ²)	AH (%)	Ne / há
E1	4	1,14	12	12,20	61,2	288.000
E2	60	4,00	1	12,56	62,8	24.000

La Tabla 15 presenta los datos económicos utilizados para la selección del emisor, con los cuales es posible calcular los valores de costo fijo, variable y total anualizado de cada emisor agrupado de acuerdo con los antecedentes técnicos.

Tabla 15. Antecedentes económicos obtenidos para el diseño del sistema de riego presurizado (microaspersión).

Descripción	Nomenclatura	Valor
Factor de recuperación del capital	FRC	0,12
Factor de costo equivalente de la energía	FCE	3,76
Costo anual equivalente de la energía	CAEE	\$ 2.202.953

En base a los antecedentes de la Tabla 14, se puede deducir que los emisores seleccionados están dentro del rango del criterio mínimo de humedecimiento ($40 < SH < 65\%$). Para este caso, el sistema de microriego se diseñará en base a: dos laterales por hilera y un lateral por hilera ya sea para goteo y microaspersión, respectivamente. En base a esta elección, se respalda el trabajo realizado por Ellena (2018) y lo recomendado por Iglesias (2021).

Es importante mencionar que los dos emisores seleccionados cubren los requerimientos técnicos del cultivo, pero difieren en el costo total anualizado, tal como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Costo total anualizado (CTA) para cada emisor en función de los costos fijos y variables anualizado (CFA, CVA), respectivamente.

Emisor	Q (L / h)	P (m.c.a)	Ne	CFA (\$ / año)	CVA (\$ / año)	CTA (\$ / año)
Gotero	4	6	288.000	4.374.098	863.903	5.238.395
Microaspersor	60	20	24.000	1.289.798	3.599.597	4.889.395

De la Tabla 16 se desprende que, el CTA del gotero supera al microaspersor debido fundamentalmente a la presión de operación, el caudal del emisor y el número de emisores por hectárea, en consecuencia, el emisor óptimo económico a implementar en el diseño de sistema de microriego para las 48 há de avellano europeo con un marco de plantación de 4 x 5 m, es el emisor tipo microaspersión.

Existen criterios de selección no menos importante al momento de tomar la decisión, algunos de ellos son: (i) obstaculización de las labores de cultivo y preparación del terreno una vez establecido el riego, (ii) un sistema fijo que está expuesto a averías y a ser destruidas las mangueras por los animales y aún por el mismo hombre y (iii) para el caso del microaspersor: cuando el sistema deja de trabajar, las boquillas y reguladores de presión se tapan debido a que se llenan de insectos principalmente hormigas.

4.3. Diseño del sistema de riego por surcos en base a parámetros críticos

Para el apoyo del diseño de riego por surcos, se modelará en función de AQUASURCO ya que, permitirá un cálculo integrado y efectivo de las fases del flujo de agua por los surcos, comparando así desde la Tabla 17, lo que ocurriría si se diseñara en función del número de surcos y cómo afectaría esto al volumen de agua que retiene el suelo por metro línea de surco y a su vez, la variación del tiempo de riego.

Tabla 17. Variación del tiempo de riego (TR) en sistemas de riego por surco según el volumen de agua que retiene el suelo (V_s) por metro lineal de surco en función del número de surcos por hilera (n).

n	metros lineales	V_s (m ³ / m)	TR (h)
2	8	0,072	6,76
3	12	0,048	2,12
4	16	0,036	0,93

De la Tabla 17 se puede deducir que, a mayor número de surcos, menor será el tiempo de riego y mayor para un menor número de surcos. Esto se debe a que el volumen de agua entregado por los 4 surcos no es suficiente para almacenar dentro de la zona radical a lo largo de este. En relación a los 3 surcos por hilera, el tiempo de riego aún sigue siendo insuficiente para el desarrollo radical del avellano europeo. Para ello, el agua debe llegar al final del surco con la mayor velocidad posible. De esta manera, la eficiencia de aplicación aumenta como consecuencia de una menor aplicación de volúmenes. Es por ello que se modelará en función del tiempo de riego ocasionado por 2 surcos por hilera.

A modo de ejemplo, se simulará un modelo de estudio empleando el software AQUASURCO con la finalidad de evaluar criterios de diseño tales como: tiempo de riego, largo del surco, caudal máximo no erosivo, caudal reducido, entre otros.

Tabla 18. Entrada de datos modelo cinemático con $n = 2$.

Entrada de datos	Valor	Nomenclatura
Constante A de I. A.	0,0088	(m ³ / min / m)
Exponente de B de I. A.	0,35	
Constante de infiltración básica	0,0001	
Factor de forma de surco C1	1,065	
Factor de forma de surco C2	1,478	
Factor hidráulico F1	0,414	
Factor hidráulico F2	2,852	
Caudal aplicado (<0,2)	0,12	(m ³ / min)
Caudal reducido (<0,2)	0,03	(m ³ / min)
Coeficiente n de Manning	0,025	
Pendiente	0,003125	(m / m)
Intervalo tiempo de avance	2	(min)
Tiempo de corte	400	(min)
Distancia entre surcos	1	(m)
Longitud del surco (<300)	270	(m)
Volumen de agua requerida	0,072	(m ³ / m)

Tabla 19. Análisis del riego modelo cinemático.

Análisis del riego	Valor	Nomenclatura
Volumen total aplicado	21,18	(m ³)
Volumen infiltrado	19,19	(m ³)
Volumen percolado	0,01	(m ³)
Percolación profunda	0,04	(%)
Área de percolación	17,36	(%)
Volumen de escorrentía	1,99	(m ³)
Escorrentía superficial	9,39	(%)
Coeficiente de uniformidad	98,3	(%)

Tabla 20. Eficiencia del riego modelo cinemático.

Eficiencia del riego	Valor	Nomenclatura
Aplicación	90,57	(%)
Requerimiento	97,67	(%)
Distribución déficit	96,90	(%)
Distribución requerimiento	97,20	(%)
Distribución total	97,16	(%)

De la misma manera que el software AQUASURCO entregó valores referenciales de la eficiencia de riego, también entrega, gráficamente, como varía la altura de agua infiltrada y la curva de avance y receso en función de avance del flujo (ver Figura 11 y 12).

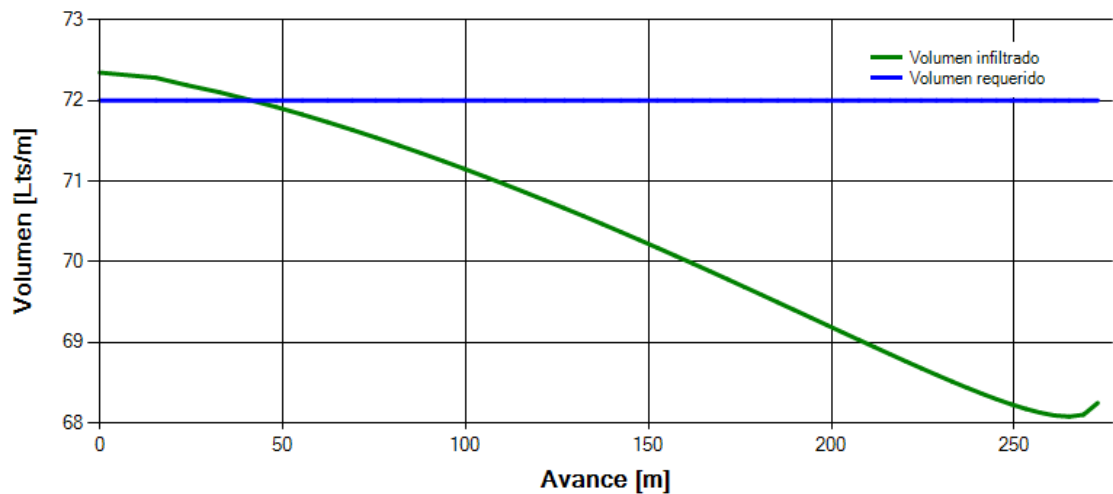


Figura 11. Altura de agua infiltrada a través del modelo cinemático para riego por surcos (AQUASURCO).

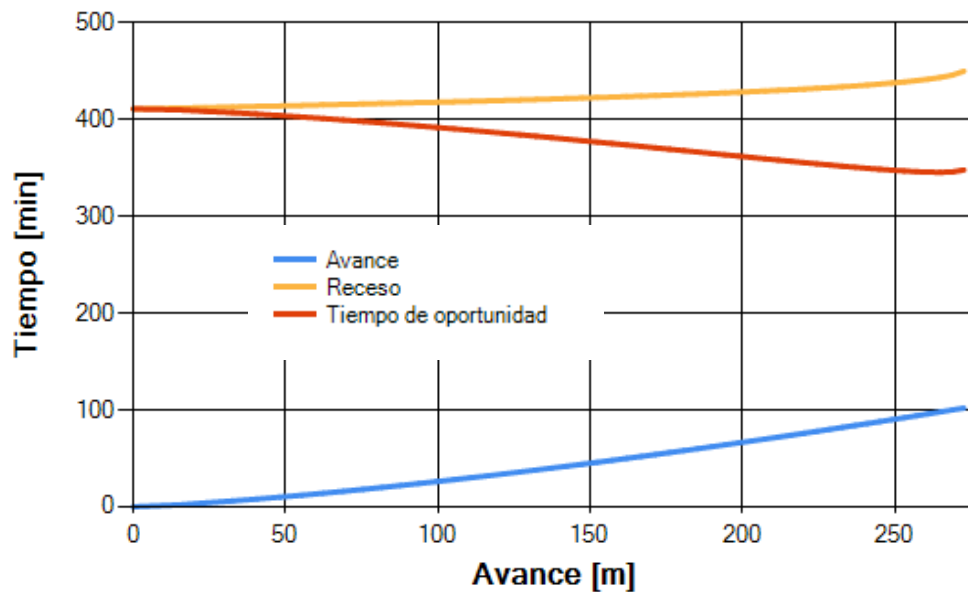


Figura 12. Curva de avance y receso a través del modelo cinemático para riego por surcos (AQUASURCO).

En base a lo modelado por el software AQUASURCO, la eficiencia de distribución total supera significativamente lo estipulado, esto se debe al correcto criterio (longitud del surco, tiempo de riego, caudal reducido, entre otros) que se utilizó dentro del modelo, atribuyendo a la mínima pérdida de agua ocasionado por la escorrentía superficial y percolación profunda, durante el tiempo de riego.

5. SELECCIÓN MÉTODO DE RIEGO

El éxito o fracaso del riego de un huerto de avellanos europeos depende, en gran medida, del método de aplicación de agua utilizada. Una selección

errónea impide la obtención de buenos resultados económicos y provoca un retardo en el normal desarrollo del huerto (Souto *et al.*, 2021).

Implementar en un huerto de avellanos europeos, una tecnificación de riego adecuada permite un uso más eficiente de los recursos hídricos disponibles, un mejor aprovechamiento de los fertilizantes y mano de obra, incrementos en la producción y uso eficiente de la energía.

La etapa técnica evalúa la adaptabilidad de cada método de riego en función del cultivo, el recurso hídrico, el suelo y el recurso humano, y a través de ello, se establecen índices para evaluar la adaptabilidad en cada situación, describiendo así, desde una perspectiva técnica, cada método con respecto a cada índice. Los índices utilizados pueden variar sustancialmente en el tiempo y su relación con los métodos de riego puede tener un carácter dinámico (Holzapfel *et al.*, 2008), tal como lo describe la Figura 13.

En la etapa técnico – económica se elige el mejor método de riego óptimamente diseñado de entre los seleccionados en la etapa técnica. La selección se basa en la adaptabilidad del método a una situación determinada, considerando la fuente de agua y los factores económicos y financieros. La fuente de agua puede ser superficial o subterránea y afecta el diseño del sistema y los costos de operación. El análisis económico examina los costos y beneficios de cada método, tal como lo señala (Sapag *et al.*, 2008), considerando la maximización del beneficio como objetivo principal de la empresa agrícola, teniendo en cuenta los costos de implementación y

operación. El estudio financiero considera el capital requerido para establecer el sistema, así como a la capacidad financiera de la empresa, considerando subsidio del estado y/o inversión propia. Finalmente, luego de evaluar todos los factores, se selecciona el mejor método de riego para las condiciones específicos (Holzapfel *et al.*, 2008).

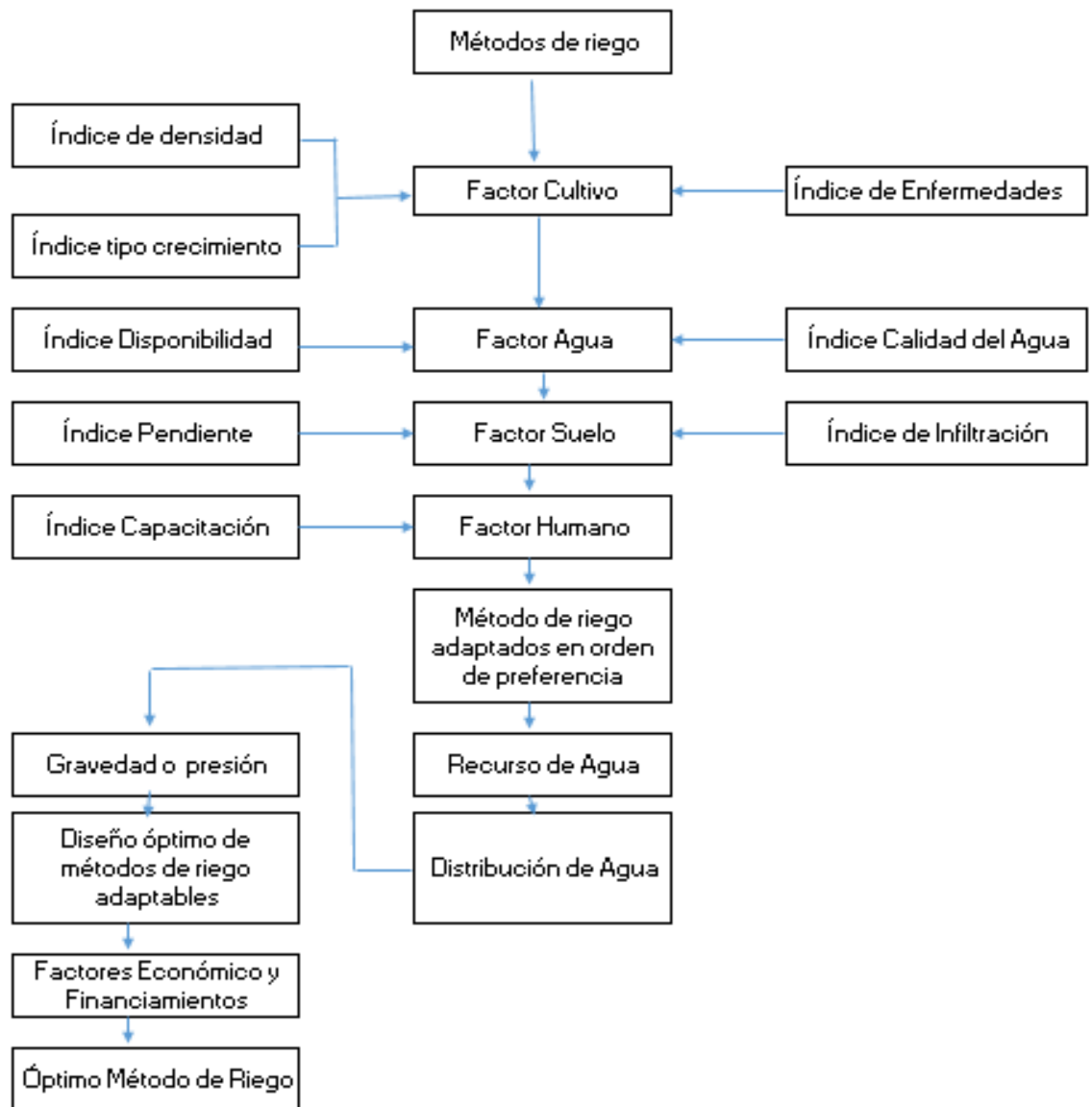


Figura 13. Selección óptima método de riego (Holzapfel *et al.*, 2008).

Se puede crear un plan de riego personalizado, específico para los requisitos de agua del productor, la fuente de agua y la calidad de los materiales, la automatización y el presupuesto con la ayuda de una empresa de riego tal como lo señala Carreño (2000) el cual abarca, de manera comparativa, la variación de factores técnicos y económicos propios del cultivo que puede afectar la rentabilidad de los sistemas de riego y consigo la productividad por temporada acudiendo a criterios asociados al diseño, manejo y operación tales como, costo de mano de obra, costo de adquisición e implementación, entre otros.

En el caso de los riegos presurizados es conveniente considerar la disponibilidad de energía por su alta incidencia en los costos de operación (Quezada, 2018). La energía es una limitante por su alto costo y escasez de las fuentes tradicionales, lo que se puede afectar la expansión y rentabilidad de los diversos rubros agrícolas.

El costo de la mano de obra en el manejo y operación de los sistemas de riego es referencial y se basa en estimaciones entregadas por los agricultores, lo que normalmente no llevan un control detallado de este tipo de información.

El manejo de la información y la transferencia de tecnología son importantes en el cambio de riego tradicional a riego tecnificado (gravitacional y presurizado), porque los agricultores deben ser informados de los costos de la inversión, período de amortización, apoyo con subsidios. Una vez que tomen la decisión, deben ser capacitados en el manejo y mantención del sistema de

riego ya que estos, según Ferrada (2010) corresponden al 45% del costo total, cifra no menor ya que se espera un elevado nivel de producción debido a la correcta selección del sistema de riego. Los costos asociados a la implementación por hectárea correspondientes a cada sistema de riego quedan descritos en la Tabla 21.

Tabla 21. Costos asociados a la implementación de cada sistema de riego.

Método de riego	Costos de implementación		
	(\$M / há)	(UF / há)*	(USD / há)**
Surco automatizado	2,0	56,0	2.470
Goteo	2,5 – 6,0	70,0 – 169,0	3.086 – 7.407
Microaspersión	2,2 – 5,0	62,0 – 140,0	2.700 – 6.200

*Moneda marzo de 2023, 1UF = \$35.579,62

**Moneda marzo de 2023, 1USD = \$809,5

A modo de referencia, se muestra, en el Anexo B, los costos de implementación del sistema de riego por microaspersión y surco automatizado.

La relación que hay entre la Tabla 21 y la Tabla 16 es que, se puede realizar un cálculo económico efectuando en un análisis del costo total anualizado en los sistemas de riego que, cuyo procedimiento es el mismo para calcular el emisor óptimo económico, se debe incluir todos los elementos que lo componen. Es indispensable establecer que los componentes del sistema de riego presurizado están directamente asociado al emisor.

5.1. Índice de adaptabilidad asociado a los sistemas de riego

En base a los factores de cultivo, se ordenan los métodos adaptables a las condiciones establecidas. Los índices de adaptabilidad se desarrollan de acuerdo a la adaptabilidad del método de riego expresando el nivel de su comportamiento a parámetros tales como densidad de siembra o plantación, susceptibilidad a enfermedades, tipo de crecimiento del cultivo, pendiente del terreno, infiltración del suelo, disponibilidad y calidad del agua, y nivel de preparación del personal (ver Anexo C). La ecuación para determinar el valor relativo final (VRF) o valor relativo del método de riego (VRMR), corresponde al producto de todos los factores, tal como se muestra en la Ecuación 45. La Tabla 22, da a conocer los parámetros que tendrán directa relación con los índices de adaptabilidad.

$$(\text{VRMR})_j = \prod_{i=1}^N \left(\frac{I_{ij}}{100} \right) \quad \text{Ecuación 45.}$$

, donde i y j corresponden al tipo de índice y el método de riego, respectivamente. Si tomamos como ejemplo el huerto de avellano europeo en un suelo franco – arcilloso, con una pendiente media (0,3%), se obtiene un VRMR para cada método de riego, como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 22. Parámetros asociados a los índices de adaptabilidad, donde: (1) Densidad relativa del cultivo, (2) Sensibilidad relativa a enfermedades de la canopia, (3) Sensibilidad relativa a enfermedades del tallo, (4) Condiciones relativa de crecimiento, (5) Pendiente relativa, (6) Tasa relativa de infiltración, (7) Concentración relativa de químicos en el agua, (8) Concentración relativa de sedimentos en el agua y (9) Habilidad relativa de la mano de obra.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
0,07	0,11	0,23	0,46	0,075	0,22	< 0,07	< 0,10	0,8

Tabla 23. Índice de adaptabilidad (%) y ranking para la selección del método de riego (RMR), donde: (1) Índice de densidad, (2) Índice de enfermedad de la canopia, (3) Índice de enfermedad del tallo, (4) índice de crecimiento, (5) Índice de pendiente, (6) Índice de infiltración, (7) Índice de químicos en el agua, (8) Índice de sedimentos en el agua y (9) Índice de habilidad de mano de obra.

Método de riego	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	VRMR	RMR
Surco	98	99	98	95	99	95	100	100	90	0,76	2
Goteo	98	99	98	95	99	95	100	95	95	0,77	1
Microaspersión	98	99	85	95	99	95	100	100	95	0,70	3

De Tabla 23 se deduce que, los sistemas de riego no presentan ninguna diferencia significativa con respecto a la adaptabilidad frente al cultivo. Hasta ahora no se ha demostrado que los avellanos europeos sean susceptibles a enfermedades del tronco. No obstante, dicha enfermedad estará presente siempre y cuando se den las condiciones adecuadas para su desarrollo. Es por ello que el aumento significativo de hectáreas ocupadas por avellanos europeos se vea afectadas ya que, ésta enfermedad se vaya haciendo cada vez más frecuente y, probablemente, las condiciones de sequía estival y de

lluvias inesperadas en primavera o verano, van a ir acentuando la aparición de enfermedades y patógenos (hablado con el Dr. Moya). Dicho esto, y a través de la adaptabilidad de los métodos de riego asociado al cultivo del avellano europeo, en la Tabla 24, se da a conocer los rendimientos productivos por diversos autores.

Tabla 24. Rendimiento productivo (RP) avellanos europeos de las últimas tres temporadas

Autor	Edad árboles	Sistema de riego	RP (kg / ha)
Ellena <i>et al</i> (2013)	4 años	goteo	12 – 119 – 741
Agrícola Los Avellanos	7 años	goteo	320 – 800 – 800
Ferrada (2010)	9 años	goteo	2000 – 2500 – 3000
Agrícola Pullami	10 años	microaspersión	4630 – 3986 – 3557
Bignami <i>et al</i> (2014)	11 años	goteo	2100 – 1600 – 1700
Vivero Grau	16 años	surco	4000 – 4500 - 5000
Vivero Grau	16 años	goteo	4000 – 4500 - 5000
Vivero Grau	16 años	microaspersión	4000 – 4500 - 5000
Gispert (2008)	21 años	goteo	3754 – 4332 – 3863

La clave para el éxito es el uso de alto nivel tecnológico que va de la mano con la buena condición climática presente en el lugar.

El avellano europeo presenta, dentro de su desarrollo vegetativo, dos fases de riego importantes. La primera corresponde a la temporada primavera-verano donde las raíces exploran una gran parte de la capacidad que le permite el suelo, donde absorben nutrientes fundamentales para el desarrollo del fruto, tronco, brotes y hojas. Luego, disminuye la tasa de crecimiento de las raíces.

La segunda fase corresponde a la temporada inicio de verano y mediado de otoño (fase de postcosecha), con el cual viene el segundo pick de desarrollo radicular, cuyo objetivo es acumular reservas de nutrientes, tanto arginina en las raíces y almidón para las yemas, para la próxima temporada.

A diferencia de otros frutales, la fase de cosecha y postcosecha del avellano europeo coinciden temporalmente, esto quiere decir que, el riego para la próxima temporada se efectúa al mismo tiempo que la cosecha. Esta coincidencia provoca el humedecimiento del fruto lo que dificulta la cosecha del mismo y a su vez, una disminución de la calidad del fruto. Es debido a este criterio, que los diseños que se han hecho a nivel nacional, han seleccionado al sistema de riego por goteo como el más adecuado para el avellano europeo.

6. CONCLUSIONES

Los antecedentes del estudio permiten concluir que:

1. En base al análisis técnico económico de los sistemas de riego presurizado en avellanos europeos se determinó que, técnicamente, el microaspersor cumple con el desarrollo efectivo de las raíces superficiales debido al área de humedecimiento y además, el costo total anualizado (CTA) para la selección del emisor óptimo económico es muy inferior en comparación al goteo.
2. Los tres sistemas presentan valores relativos medios (VRM) similares en su selección, asociado a óptimas condiciones de diseño, manejo y operaciones de los sistemas de riego frente al desarrollo y crecimiento del avellano europeo.
3. La selección del sistema de riego, en el estudio de caso, se basó fundamentalmente en la respuesta vegetativa y productiva del avellano europeo siendo los tres sistemas de riego adecuados para este frutal. El sistema de riego por microaspersión al igual que el sistema de riego por surco presentan problemas en la cosecha, por el humedecimiento del fruto. Aunque el sistema de riego por surco presenta un buen desempeño, existe la tendencia a establecer que es ineficiente lo que se debe fundamentalmente al manejo y a criterio de diseño y operación inadecuados. Es importante resaltar que el sistema de riego por goteo ha sido uno de los más seleccionados en la Región del Maule debido

fundamentalmente asociado con las fases de riego que presenta el avellano y la participación en la calidad del fruto.

4. Investigaciones futuras deberían también enfocarse a analizar el sistema de riego por goteo subterráneo primordialmente asociado a su disminución en la evaporación del agua desde el suelo.

7. REFERENCIAS

1. Allen, R.G., W.O. Pruitt, J.L. Wright, T.A. Howell, F. Ventura, R. Snyder, D. Itenfisu, P. Steduto, J. Barenghena, J. Baselga, M. Smith, L.S. Pereira, D. Raes, A. Perrier, I. Alves, I. Walter and R. Elliott. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agric. Water Manag.* 81(1-2): 1-22.
2. Badilla, A.I. 2020. Evaluación de riego superficial e inyección de ozono en solución acuosa al suelo para viveros de plantas de nogal. Tesis, Magíster en Fisiología y Producción Vegetal. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Dirección de Investigación y Postgrado. Santiago, Chile.
3. Bignami, C., C. Cammilli, G. Moretti and F. Romoli. 2000. Irrigation of *Corylus avellana* L.: Effects on canopy development and production of young plants. *Acta Hortic.* 2(537): 903-910.
4. Bignami, C., V. Cristofori, P. Ghini and E. Rugini. 2009. Effects of irrigation on growth and yield components of hazelnut (*Corylus avellana* L.) in central Italy. *Acta Hortic.* 1(845): 309-314.
5. Cabrera, D. 2019. Planificación, plantación y prácticas de manejo en frutales [en línea]. PortalFrutícola.com, Chile. <<https://www.portalfruticola.com/noticias/2019/02/14/planificacion-plantacion-y-practicas-de-manejo-en-frutales/>>. [Consulta: 20 junio 2022].
6. Cambra, M., R. Cambra. 1991. Diseño de plantación y formación de árboles frutales. (8a. ed.). Cuaderno N°1. CSIC. Estación Experimental de Aula Dei. Zaragoza, España.
7. Carreño, S.H. 2000. Evaluación económica y comparación de tres métodos de riego para 7,6 hectáreas de manzano (*Malus domestica*) en la Sexta Región. Proyecto de título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
8. Cifuentes, M.H. 2008. Análisis comparativo sobre el efecto de la aplicación de agua, fertilización y localización, en la producción y calidad de naranjos cv. Valencia, para tres temporadas de riego. Memoria de titulación, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.

9. Cristofori, V., R. Muleo, C. Bignami and E. Rugini. 2014. Long term evaluation of hazelnut response to drip irrigation. *Acta Hortic.* (1052): 179-185.
10. Demin, P.E. 2014. Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego. *Métodos de riego: Fundamentos, usos y adaptaciones.* Ediciones INTA. Catamarca, Argentina.
11. Domínguez, T.R. 2019. Mejora de la eficiencia de riego por gravedad en las comisiones de riego del Distrito de Chupaca-2018. Tesis, Ingeniero Civil. Universidad Continental, Facultad de Ingeniería, Escuela Académica Profesional de Ingeniería Civil. Huancayo, Perú.
12. Ellena, M., P. Sandoval, A. González, A. Montenegro, G. Azócar y L. Medina. 2013. Avellano europeo: Establecimiento y formación de la estructura productiva. *Boletín N°274.* INIA Carillanca. Temuco, Chile.
13. Ellena, M. 2018. El avellano europeo en Chile: Una década de recopilación e investigación. *Boletín N°36.* INIA Carillanca. Temuco, Chile.
14. Ferrada, S. 2010. Avellano europeo en la Región de La Araucanía: Primeros resultados productivos y económicos. *Boletín INIA N°203.* INIA Carillanca. Temuco, Chile.
15. FIA (Chile). 2008. Resultados y lecciones en avellano europeo. *Proyectos de innovación en zona centro sur VII Región del Maule a XIV Región de Los Ríos. Serie Experiencias de Innovación para el Emprendimiento Agrario N°10.* FIA. Santiago, Chile.
16. Figueroa, J.P. 2009. El riego por goteo subterráneo en el mundo. *ChileRiego* (40): 18-23.
17. Franco, V.A. 2018. Evaluación de la eficiencia del método de riego por goteo. Documento final de proyecto de investigación, Ingeniero Agrónomo. Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Cevallos, Ecuador.
18. Gargurevich, G. 2017. La clave está en la eficiencia [en línea]. *RedAgrícola*, Chile. <<https://www.redagricola.com/pe/la-clave-esta-la-eficiencia/>>. [Consulta: 01 junio 2022].
19. Girona i Gomis, J. 1994. Respuesta fisiológica y productiva del estrés hídrico en diferentes especies frutales: Melocotonero (*Prunus persica* L. Batash), avellano (*Corylus avellana* L) y nogal (*Juglans regia*). Tesis, Dr. Ingeniero Agrónomo. Universitat de Lleida, Departament de Medi

Ambient i Ciències del sòl, Escola Tècnica Superior D'enginyeria Agrària. Lleida, España.

20. Gispert, J.R. 2003. Evaluación del volumen de suelo húmedo en micro-irrigación. Influencia del porcentaje de este volumen sobre el comportamiento del olivo (*Olea europaea* L; cult. 'Arbequina'). Estudios de la Zona no Saturada del Suelo 6: 51-57.
21. Gispert, J.R. 2008. Investigación para caracterizar el volumen de suelo húmedo (VSH) en riego localizado: Influencia del VSH en olivo (*Olea europaea* L.), manzano (*Malus domestica* BORKH.) y avellano (*Corylus avellana* L.). Memoria, Doctor Ingeniero Agrónomo. Universitat de Lleida, Departament de Medi Ambient i Ciències del sòl, Escola Tècnica Superior D'enginyeria Agrària. Lleida, España.
22. Gispert, J.R., F. Ramírez de Cartagena, J.M. Villar y M. Rovira. 2015. Efecto del volumen de suelo húmedo en riego localizado para el cultivo del avellano (*Corylus avellana* L.). ITEA 111(2): 109-126.
23. González, D.R. 2015. Análisis técnico de diferentes criterios y factores para diseñar un sistema de microriego: Estudio de caso. Proyecto de título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería. Chillán, Chile.
24. González, M., M. Palacios. 2022. El cultivo de avellano en seto II: Aspectos de manejo e intensificación [en línea]. Synergynuts, España. <<https://synergynuts.upct.es/avellano/avellano-en-seto/>>. [Consulta: 20 junio 2022].
25. Hansen, V.E. 1960. New concepts in irrigation efficiency. Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.) 3(1): 55-64.
26. Hazelnut Company. 2017. Agrichile e INACAP abordaron desarrollo de la industria del avellano europeo en Chile [en línea]. Frutícola Agrichile. <<https://agrichile.cl/noticias/agrichile-e-inacap-abordaron-desarrollo-de-la-industria-del-avellano-europeo-en-chile/>>. [Consulta: 10 mayo 2022].
27. 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.
28. Holzapfel, E.A. 1993. Riego gravitacional [en línea]. INIA, Chile. <<https://hdl.handle.net/20.500.14001/37956>>. [Consulta: 29 septiembre 2022].

29. Holzapfel, E.A. 2000. Riego por goteo y microjet [en línea]. INIA, Chile. <<https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/28569>>. [Consulta: 29 septiembre 2022].
30. Holzapfel, E.A., W.A. Abarca, V.P.S. Paz, J.L. Arumí, A. Rodríguez, X. Orrego y M.A. López. 2007. Selección técnica-económica de emisores. Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient. 11(6): 547-556.
31. Holzapfel, E.A., M.A. Mariño. 2008. Irrigation in agriculture. pp: 2033-2039. In: Encyclopedia of ecology. Volume 1 A-C. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
32. 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.
33. Holzapfel, E., D. Rivera y J.L. Arumí. 2020. Tecnología de manejo de agua para una agricultura intensiva sustentable. (2a. ed.). Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
34. Ibarra, M. 2004. Evaluación de la aplicación de agua en riego por surco, para frutales con sistemas de aducción de baja presión. Memoria de título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Riego y Drenaje. Chillán, Chile.
35. Iglesias, I. 2021. Sistema de conducción y evolución del avellano [en línea]. Agromillora, Chile. <<https://www.agromillora.com/olint/sistemas-de-conduccion-y-evolucion-del-avellano/>>. [Consulta: 20 junio 2022].
36. Jiménez, M.Á. 2008. Integración de los procesos agronómicos e hidráulicos del riego a presión en un entorno SIG para la gestión eficiente de comunidades regantes. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Valencia, España.
37. Karmeli, D., G. Peri and M. Todes. 1985. Irrigation systems: Design and operation. Oxford University Press. Oxford, UK.
38. León, E.A. 2005. Análisis técnico de un sistema de riego por microaspersión en manzano (*Malus pumilla* M.). Memoria de título, Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía. Chillán, Chile.
39. Matas, J.C. 1995. Nuevas tecnologías para aumentar la eficiencia del riego superficial. Proyecto de título, Ingeniero Agrónomo. Pontificia

Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía, Departamento de Fruticultura y Enología. Santiago, Chile.

40. Medina, L.R. 2019. Criterio para una elección y uniformidad de riego: Características de goteros. *Revista Campo Tecnología I+D+i* 4(13): 30-33.
41. Muñoz, N.I. 2017. Efecto del número de laterales de riego por goteo en la producción de manzanos. Proyecto de título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
42. Nievas, W., P. Villareal. 2021. El cultivo del avellano: Aspectos agroambientales y económicos para el Alto Valle del Río Negro. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.
43. Orrego, X. 2007. Manejo de agua en frutales. Manuales FIA de apoyo a la formación de recursos humanos para la innovación agraria para profesores(as) de educación media técnico-profesional agropecuaria. FIA. Universidad de Concepción. Santiago, Chile.
44. Pefaur, J. 2022. Boletín de la fruta, mayo 2022 [en línea]. ODEPA, Chile. <<https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-de-fruta-mayo-2022>>. [Consulta: 10 mayo 2022].
45. Perdomo, A. 2010. Plantación de frutales [en línea]. AgroCabildo, Chile <https://www.agrocabildo.org/publicaciones_detalle.asp?id=358>. [Consulta: 29 septiembre 2022].
46. Podestá, L., J. Girona y G. Reginato. 2011. Riego. pp: 121-133. En: M. Ojer y G. Reginato (Eds.). *Producción de durazno para industria*. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.
47. Quezada, C. 2019. *Fundamentos de riego*. (2a. ed.). Publicaciones del Departamento de Suelos y Recursos Naturales N°6. Universidad de Concepción. Facultad de Agronomía. SAG. Chillán, Chile.
48. Rojas, W., Y. Nakamura y L. Ferrada. 2001. Programación para riego presurizado en frutales: Conceptos aplicados a partir de la experiencia en la Provincia de Limarí. CNR. INIA. Santiago, Chile (Documento de trabajo, iniaova@entelchile.net).
49. Sapag, N., R. Sapag. 2008. *Preparación y evaluación de proyectos*. (5a. ed.). McGraw-Hill. Bogotá, Colombia.

50. Souto, C., E. Holzapfel y O. Lagos. 2021. Manejo de agua en manzanos. Rev. Frutíc 43(2): 34-40.
51. Tapia, F., A. Osorio. 1999. Conceptos sobre diseño y manejo de riego presurizado. INIA Intihuasi. La Serena, Chile.
52. Torazno, J.O. 2007. ¿Cómo orientar una plantación? Frutic. Diversif. 13(53): 42-46.
53. Uslar, M.A. 2006. Evaluación de los polinizantes azul y blanco en un cultivar Barcelona de avellano europeo (*Corylus avellana* L., Betulaceae). Tesis, Licenciado en Agronomía. Universidad Austral de Chile, Facultad Ciencias Agrarias, Escuela de Agronomía. Valdivia, Chile.
54. Valenzuela, A., J. Jara. 1979. Fundamentos de riego y drenaje: Guía de laboratorio. Universidad de Concepción. Chillán, Chile.
55. Velasco, J. 2009. Buenas prácticas para mejorar la eficiencia de riego: Riego por surcos y con aducción californiana. Chileriego (37): 21-25.
56. Vera, M. 2021. Claves para el establecimiento de un huerto de avellano europeo [en línea]. RedAgrícola, Chile. <<https://www.redagricola.com/cl/claves-para-el-establecimiento-de-un-huerto-de-avellano-europeo/>>. [Consulta: 01 junio 2022].
57. Yévenes, G.A. 2013. Evaluación económica de tecnologías energéticas alternativas, en el diseño de un sistema de riego por goteo en avellano europeo (*Corylus avellana* L.) a nivel de prefactibilidad. Tesis, Ingeniero Agrónomo. Universidad de La Frontera, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales. Temuco, Chile.
58. Zazueta, F.S. 1992. Micro irrigación. ICFA International. México D.F., México.

8. ANEXOS

Anexo A: Ajuste de la subunidad de riego

El ajuste de la subunidad al área del predio va a depender de cuántas veces o sectores o posturas que se regarán simultáneamente durante el día, considerando un tiempo de riego disponible de 20 horas.

$$N1 (\text{set}) = \frac{\text{HRDD}}{\text{TR}} \quad \text{Ecuación 46.}$$

, donde N = Número de sectores que se riegan diariamente. HRDD= Horas de riego disponible diario (20 horas). TR = Tiempo de riego según las necesidades hídricas del frutal para cada sistema de riego.

El número de sectores que riegan durante la frecuencia de riego queda detallado en la Ecuación 47.

$$N2 (\text{set} - \text{día}) = N1 * \text{FR} \quad \text{Ecuación 47.}$$

La estimación del área mínima a regar queda detallada en la Ecuación 48.

$$A_{\text{sub}} = \text{Área total a regar (há)} / N2 \quad \text{Ecuación 48.}$$

La estimación del caudal de diseño (Qd) queda detallada en la Ecuación 49.

$$Qd \text{ (L / día)} = Vt \text{ (L / día árbol)} * \text{Densidad de plantación (árbol / há)} * \text{Asub (há)} * N1 \quad \text{Ecuación 49.1.}$$

Así, el caudal de diseño en litros por segundo queda de la siguiente manera.

$$Qd \text{ (L / s)} = Qd \text{ (L / día set)} * FR \text{ (días)} / Tr \text{ (h)} * 3600 \text{ (s / h)} \quad \text{Ecuación 49.2.}$$

Luego, el caudal de diseño que se debe entregar a cada hectárea corresponde

a:

$$Qd \text{ (L / s há)} = Qd \text{ (L / s)} / \text{Área total a regar (há)} \quad \text{Ecuación 49.3.}$$

Tabla 25. Caudal de diseño para sistema de riego presurizado dentro de las 48 há, donde FR (frecuencia de riego), TR (tiempo de riego) y A (área mínima a regar).

Sistema de riego	FR (días)	TR (h)	N1	N2	A (há)	Qd (L / s há)
Goteo	5	TR = 13,0	1	5	9,6	1,33
	diario	TR = 3,0	7	7	6,9	5,79
Microaspersión	4	TR = 10,0	2	8	6	2,15
	diario	TR = 3,0	7	7	6,9	7,17

A modo de ejemplo, realizará el diseño hidráulico del sistema de riego por microaspersión con FR = 4 días y TR = 10 horas.

En las Tablas 26 y 27, se detallan el largo máximo permisible para el lateral como para el secundario, siendo: diámetro interno de la tubería (Dint), presión de operación (Pop), presión de entrada o máxima (Pmáx.), número de árboles

a lo largo de la hilera, caudal de la tubería (Q) para el sistema de riego por microaspersión.

Tabla 26. Estimación del largo máximo del lateral (L) ajustado en relación a las pérdidas de carga total con salidas múltiples (h_f) en microaspersor.

Dint. (mm)	Pop. (m)	Pmáx. (m)	n	Q ($m^3 s^{-1}$)	L (m)	h_f (m)
16	20	3,0	15	0,00025	60	2,18
20	20	3,0	20	0,00033	80	1,66

Tabla 27. Estimación del largo máximo del secundario o manifold (L) ajustado en relación a las pérdidas de carga totales con salidas múltiples (h_f) en microaspersor.

Dint. (mm), secundario	Dint. (mm), lateral	Pmáx. (m.c.a.)	L (m)	Q ($m^3 s^{-1}$)	h_f (m)
75	16	1,0	110	0,0055	0,83
	20	1,0	90	0,0060	0,82
90	16	1,0	160	0,0080	1,00
	20	1,0	130	0,0087	0,97
110	16	1,0	210	0,0105	0,82
	20	1,0	180	0,0120	0,93

Se seleccionó como largo máximo del lateral y secundario (80 y 180 m, respectivamente) por sus cualidades hidráulicas (pérdidas de carga, fricción, acumulación de sedimentos, entre otros).

Tabla 28. Dimensionamiento máximo subunidades de riego donde largo del lateral (L_l), largo del secundario (L_s), área mínima a regar por postura (A_{sub}), pérdida de carga lateral ($H_f l$) y pérdida de carga secundario ($H_f s$).

L_l (m)	L_s (m)	A_{sub} (há)	$H_f l$ (m)	$H_f s$ (m)
100	180	1,44 ha	1,65	0,93

Tabla 29. Ajuste subunidades de riego a la dimensión del predio donde largo del lateral (L_l), largo del secundario (L_s), área mínima a regar por subunidad (A_{sub}), caudal del secundario por subunidad (Q_s) y caudal de diseño por hectárea (Q_d).

L_l (m)	L_s (m)	Subunidades	Enumeración	A_{sub} (há)	Q_s (L / s há)	Q_d (L / s há)
80	120	48	1,...,48	1,2	10,0	2,15

El área total de las subunidades, a través del ajuste, es igual a 48,0 há, las pérdidas de carga de los laterales son de 1,66 m.c.a. y consigo las pérdidas de carga de cada secundario es igual a 0,28 m.c.a.

Tabla 30. Diámetro óptimo económico diseño sistema de riego por microaspersión.

Tubería	L (m)	Q ($m^3 s^{-1}$)	CT (\$)	DOE (mm)	Clase	H_f (m)
Matriz	6	0,0129	7.376	160	PN 10	0,023
Submatriz 1	300	0,0077	119.555	160	PN 10	0,447
Submatriz 2	180	0,0052	41.719	160	PN 10	0,130
Submatriz 3	700	0,0129	164.050	160	PN 10	0,210
Submatriz 4	180	0,0052	41.719	160	PN 10	0,130

La pérdida de carga total dentro de la tubería de conducción es igual a 0,94 m.c.a. y la pérdida de carga total correspondiente a las tuberías de riego es igual a 2,88 m.c.a.

Tabla 31. Caudal de entrega a cada grupo de subunidades.

Sector		Grupo de subunidades	Área total (há)	Caudal de diseño (L / min)
A	A1	1, ..., 5	6	774
	A2	6, ..., 10	6	774
B	B1	11, ..., 15	6	774
	B2	16, ..., 20	6	774
C	C1	21, ..., 25	6	774
	C2	26, ..., 30	6	774
D	D1	31, ..., 34	4,8	86

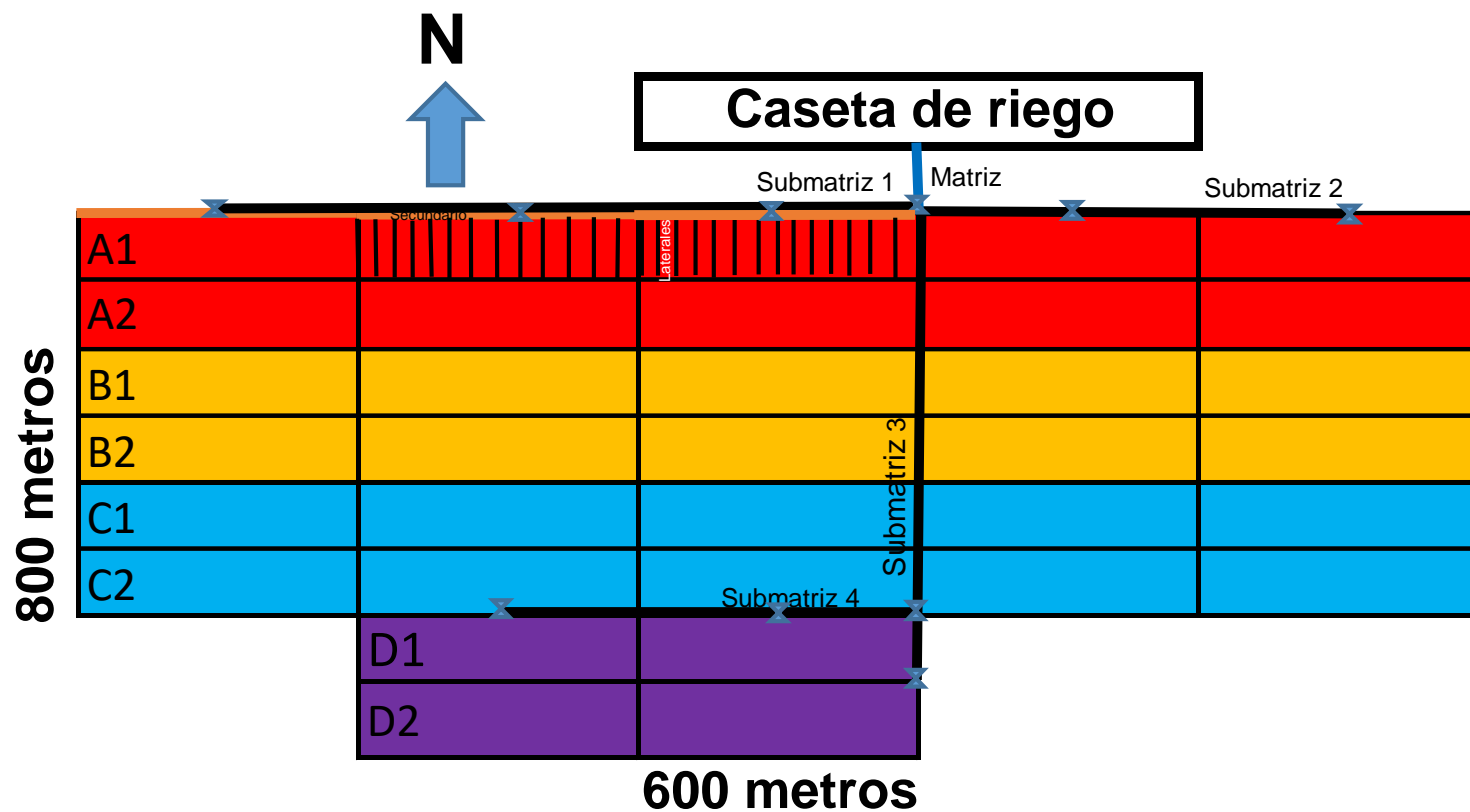


Figura 14. Posicionamiento de las subunidades y tuberías principales en el huerto modelo de avellanos europeos riego por microaspersión.

Anexo B: Costos de implementación

Tabla 32. Costos de implementación sistema de riego por microaspersión

Ítem, microaspersor	Cantidad	Costo unitario	Precio total
Planza 3/4" (100 metros)	653	\$ 36.590	\$ 23.893.270
Válvula solenoide	42	\$ 28.990	\$ 1.217.580
Válvula de aire	42	\$ 32.150	\$ 1.350.300
Tubo PVC C6 200 mm, 6 m	785	\$ 81.519	\$ 63.992.415
Tubo PVC C6 110 mm, 6m	2.400	\$ 36.481	\$ 87.554.400
Microaspersor	16.320	\$ 550	\$ 7.344.000
Conector gromith	16.320	\$ 263	\$ 4.292.160
Conector a cinta	16.320	\$ 294	\$ 4.798.080
Goma gromet	16.320	\$ 65	\$ 1.060.000
Final de línea	653	\$ 25	\$ 16.325
Válvula de pie	3	\$ 4.339	\$ 13.017
Bomba	9	\$ 1.477.590	\$ 13.298.310
Filtro de arena	9	\$ 2.600.000	\$ 23.400.000
Caseta	1	\$ 500.000	\$ 500.000
Panel eléctrico	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
Mano de obra	1	\$ 800.000	\$ 800.000
Instalación eléctrica	1	\$ 500.000	\$ 500.000
Equipo de fertirriego	1	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000
Subtotal			\$ 238.030.657
		IVA 19%	\$ 283.256.657
		TOTAL POR HECTÁREA	\$ 5.901.177

Tabla 33. Costos de implementación sistema de riego por surco automatizado.

	Unidades	Costo unitario	Costo total
Válvulas eléctrica RAF P 31 4" 110 m ³ /hr	24	\$ 325.000	\$ 7.800.000
Tubería blanca con goma (6M ,C2 ,D 250 mm ,em 6,7 mm), desde embalse a cajas de distribución	90	\$ 85.588	\$ 7.702.920
Tubería blanca con goma (6M ,C2 ,D 250 mm ,em 6,7 mm), desde caja de distribución a válvulas inteligentes	222	\$ 85.588	\$ 19.000.536
Tubería blanca con goma (6M ,C2 ,D 250 mm, em 6,7 mm), alimentación al hidrante	296	\$ 85.588	\$ 25.334.048
Tubería blanca 1M C6 D75 mm, hidrante	360	\$ 39.923	\$ 14.372.280
Conector válvula 250 mm	4	\$ 3.843	\$ 15.372
Válvula cámara 250 mm	4	\$ 137.488	\$ 549.952
Controlador Galeon GSI	1	\$ 1.215.885	\$ 1.215.885
Remoción de tierra embalse	2528 m ³	15 m ³ /hr - 20.000 \$/hr	\$ 3.370.667
Remoción de tierra zanja	2313 m ³	15 m ³ /hr - 20.000 \$/hr	\$ 3.084.000
Subtotal			\$ 82.445.660
Instalación del sistema (10%)			
Total			\$ 90.690.226
Total por hectárea			\$ 1.889.380

Anexo C: Índices de adaptabilidad

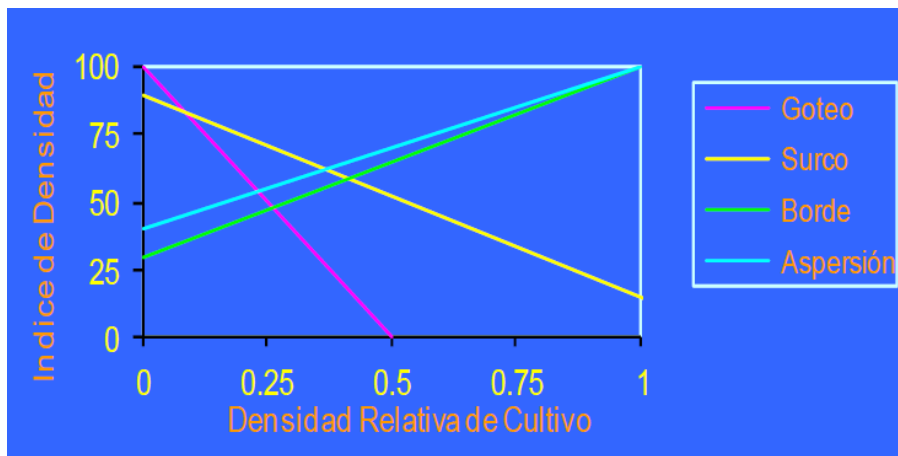


Figura 15. Índice de densidad del cultivo

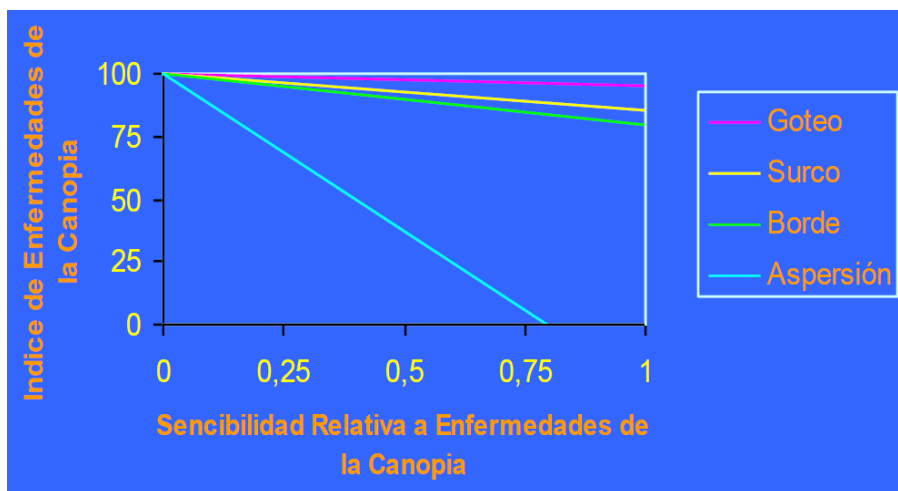


Figura 16. Índice de sensibilidad a enfermedades de la canopía.

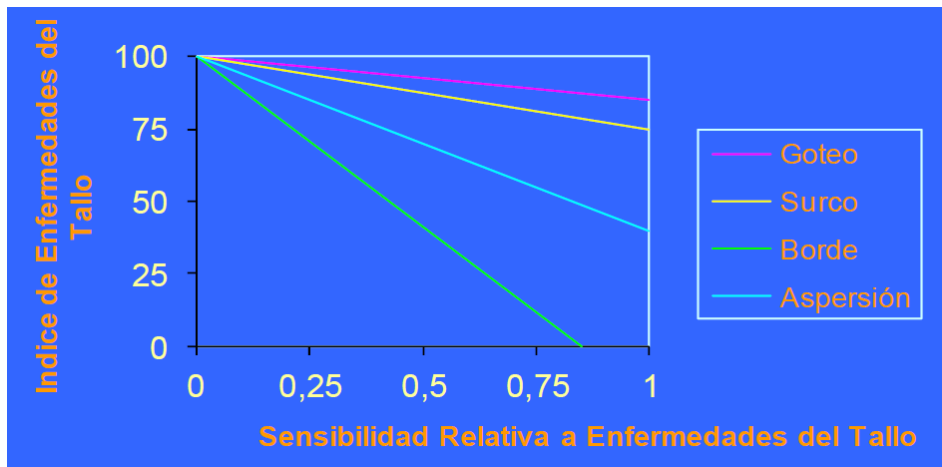


Figura 17. Índice de sensibilidad a enfermedades del tallo.

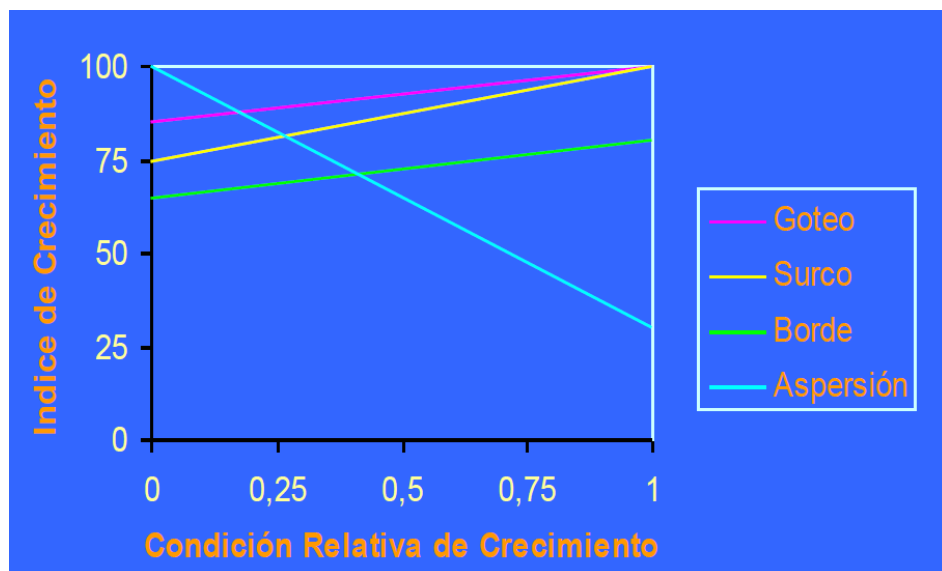


Figura 18. Índice asociado al tipo de crecimiento del cultivo.

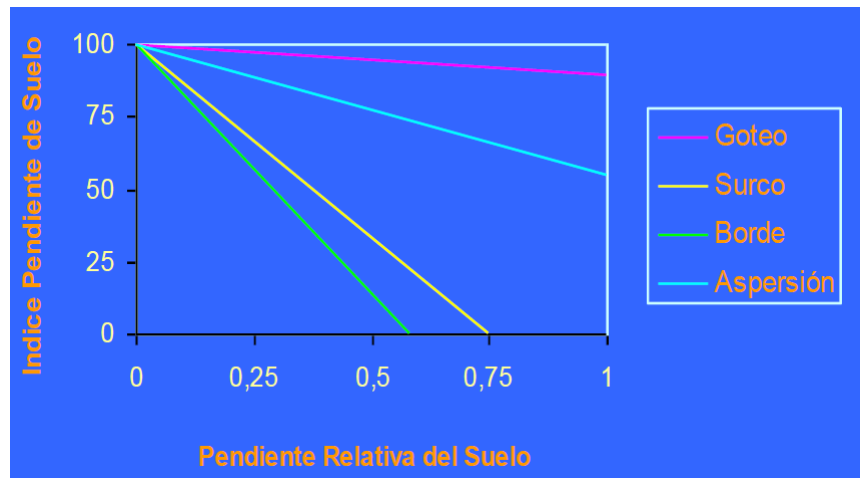


Figura 19. Índice asociado al tipo de suelo.

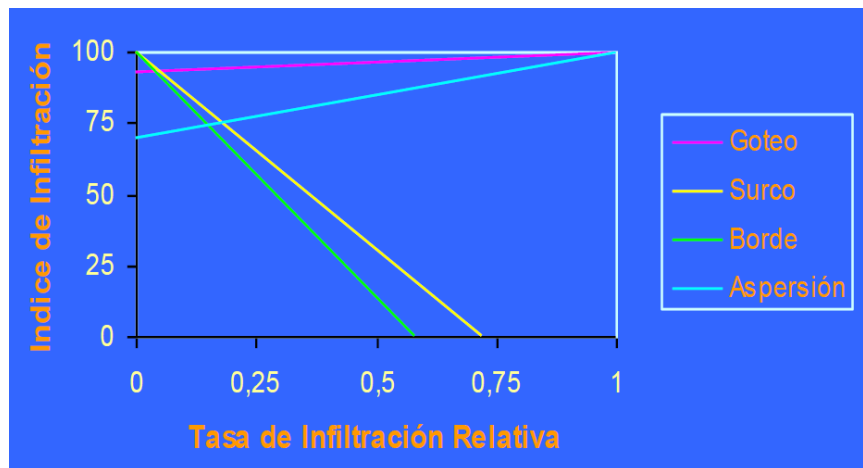


Figura 20. Índice infiltración del suelo.

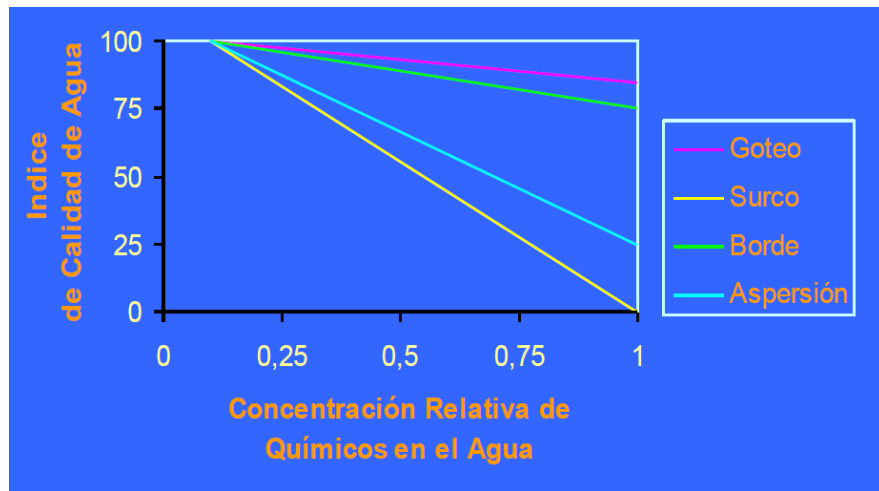


Figura 21. Índice calidad del agua (Químicos en el agua).

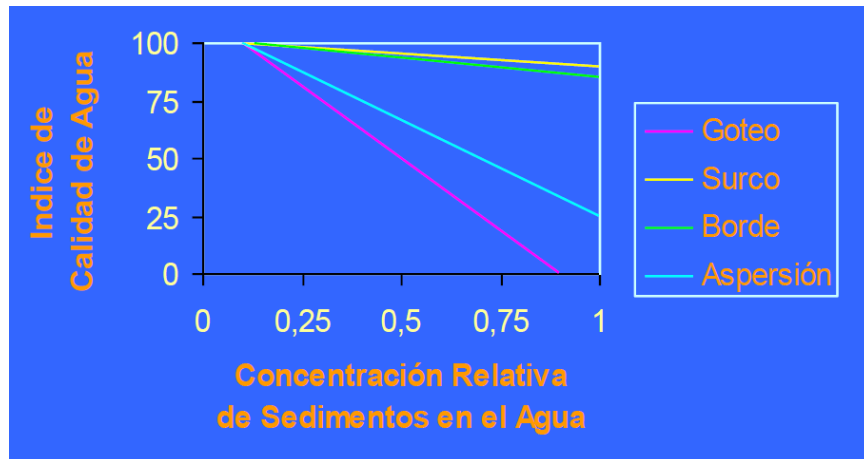


Figura 22. Índice calidad del agua (Sedimentos en el agua).

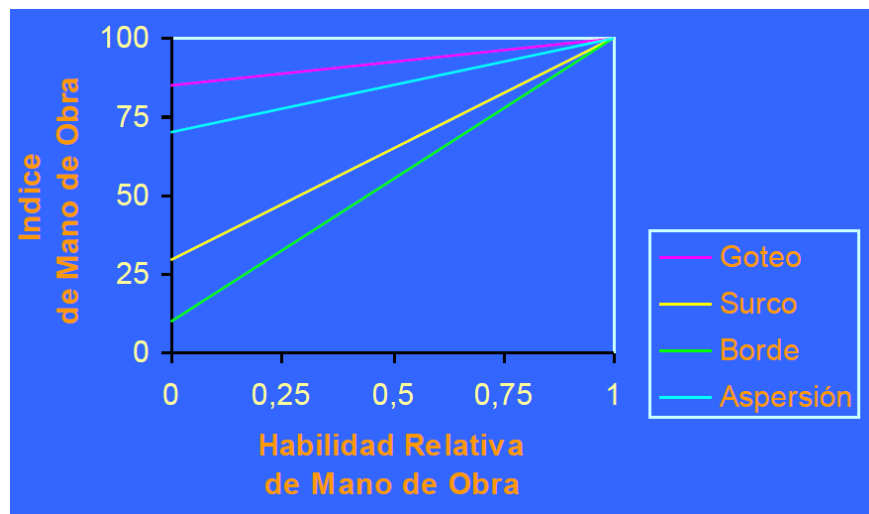


Figura 23. Índice de recursos humanos.

Anexo D: Sistema de riego por goteo subterráneo

Siendo un riego presurizado, el sistema de riego subterráneo o subsuperficial (SDI), se define como la aplicación de agua por debajo de la superficie, directo a las raíces utilizando emisores de microirrigación con un caudal menor a 7,5 L / h. con varias ventajas por sobre otros sistemas como: uso más eficiente reduciendo evaporación, percolación y escorrentía produciendo rendimientos similares o mayores, aumentando así la eficiencia en el uso del agua. Por ejemplo, en un huerto comercial de cítricos se puede ahorrar entre 22,3 y 27,9% de agua usando un sistema de SDI con respecto a un sistema de riego convencional (Badilla, 2020).

Por lo anterior, el SDI tiene potencial como instrumento, por sobre otros métodos de aplicación, para transportar fumigantes o mejoradores de la

oxigenación del suelo debido a que entrega la sustancia de manera dirigida, eficiente en el uso de agua y uniforme (Badilla, 2020).

David R. Bryla de USDA ARS (USA) comparó en California Central los requerimientos de agua y los rendimientos de un huerto de 5 años de durazneros 'Crimson Lady', regados con microaspersión y SDI. Temprano en la temporada los árboles regados con microaspersión requirieron cerca del doble de agua para mantener el mismo potencial hídrico, medido como potencial hídrico del tallo a medio día, que los regados con SDI. Sin embargo, a medida que se desarrollaba el follaje, se requirió relativamente cada vez menos agua con microaspersión (Figuroa, 2009).

Para el final de la temporada, los árboles regados con SDI usaron un 26% menos de agua que los regados con microaspersión. El SDI además incrementó el tamaño de la fruta en un 8% y la cosecha apta para el mercado en un 29%, por sobre la microaspersión. Consecuentemente se incrementó la eficiencia de uso del agua en durazno en un 74% (Figuroa, 2009).

El riego superficial y el SDI requieren de equipos semejantes. Pero en el subterráneo se debe prestar especial atención a la filtración del agua de riego, para evitar la interrupción del flujo en las tuberías, ya que no es posible monitorear visualmente las fallas (Figuroa, 2009).

Según explica Peter Copestake Director de Copersa, las principales diferencias en mantención, operación y control entre el goteo tradicional y SDI

es que, el SDI al no presentar agua en la superficie no se ve si hay obstrucciones o roturas. Esto obliga a que el equipo de filtración sea de máxima garantía para que el agua llegue al SDI sea la idónea y así mismo el contador de agua (caudalímetro) o rotura de la línea (incremento de caudal). Con un SDI también es importante disponer de sensores de humedad en la zona radicular para controlar el nivel de humedad en el suelo (Figueroa, 2009).

El incremento de coste de la tubería de riego por goteo SDI es de aproximadamente un 15% por sobre las tuberías de riego tradicional. Esto se debe a la incorporación del Treflan en el plástico de los goteros y al hecho de que se fabrica a una escala menor que las tradicionales.

El incremento del coste de instalación es aproximadamente un 25% por sobre las instalaciones tradicionales. Lo que se debe principalmente a la necesidad de utilizar un tractor para excavar las zanjas de las secundarias de suministro y drenaje (Figueroa, 2009).

El incremento de los componentes de riego, el coste de las piezas de instalación (exceptuando la tubería) es de cerca de un 10% sobre las tradicionales. Esto se debe a la necesidad de utilizar accesorios de conexión de seguridad, válvulas automáticas de descarga en las secundarias de drenaje, ventosas trifuncionales en puntos altos, contador para la comprobación de los caudales y sensores de humedad del suelo. Algunos de estos elementos se utilizan opcionalmente en instalaciones tradicionales, pero en SDI son obligatorios.

El coste de mantenimiento para ambos sistemas de riego, es semejante.