



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**GENERACIÓN DE UN PROTOCOLO PARA EL USO DE SONDA TDR EN
CALICATA, EN EL MANEJO DEL RIEGO EN UVA DE MESA**

MIGUEL ARTURO CONTRERAS PÉREZ

**Santiago, Chile
2022**



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**GENERACIÓN DE UN PROTOCOLO PARA EL USO DE SONDA TDR EN
CALICATA, EN EL MANEJO DEL RIEGO EN UVA DE MESA**

**GENERATION OF A PROTOCOL FOR THE USE OF THE TDR PROBE IN PIT,
IN THE MANAGEMENT OF IRRIGATION IN TABLE GRAPES**

MIGUEL ARTURO CONTRERAS PÉREZ

**Santiago, Chile
2022**



UNIVERSIDAD DE CHILE



FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

GENERACIÓN DE UN PROTOCOLO PARA EL USO DE SONDA TDR EN CALICATA, EN EL MANEJO DEL RIEGO EN UVA DE MESA

Memoria para optar al título
Profesional de Ingeniero Agrónomo

MIGUEL ARTURO CONTRERAS PÉREZ

		Calificaciones
PROFESOR GUÍA Sr. Rodrigo Callejas R. Ingeniero Agrónomo, Dr. sc. agr	Rodrigo Callejas Firmado digitalmente por Rodrigo Callejas Fecha: 2022.07.18 11:11:45 -04'00'	6,6
PROFESORES EVALUADORES Sra. Karen Sagredo U. Ingeniera Agrónomo, Ph. D.		6,7
Sr. Ricardo Pertuzé C. Ingeniero Agrónomo, Ph. D.		6,3

Santiago, Chile
2022

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Finalmente llego el momento que tan lejano veía, gracias a todas las personas que me acompañaron y fueron parte de esta etapa de mi vida, en especial a mis papas, Miguel y Tatiana, sin ellos no lo hubiese podido lograr, gracias por las veces que estuvieron ahí para apoyarme y también presionarme. Gracias a mi profesor guía, Rodrigo Callejas por la paciencia y la ayuda que en todo momento me dio, sin nunca dejarme de lado. También agradecer a Valentina Busquets, por siempre ser un pilar y una fuente de buenos consejos para los momentos más difíciles, también destacar a los grandes amigos que me dejo esta etapa y que sin lugar a duda sin ellos la universidad hubiese sido distinta. Gracias a la facultad de Ciencias Agropecuarias por darme la oportunidad de haber estudiado ahí, mi decisión no pudo haber sido mejor.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Hipótesis	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
MATERIALES Y MÉTODOS	5
Lugar de estudio	5
Parte 1. Revisión bibliográfica	5
Materiales	5
Métodos	5
Parte 2. Protocolo para el uso de sonda TDR en calicata, como herramienta para la determinación de la frecuencia de riego	5
Metodología	5
Análisis estadístico	7
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	8
Parte 1. Revisión bibliográfica	8
Sistema radical y potencial productivo en la vid	8
Ciclo anual del crecimiento de las raíces en la vid	9
Factores que afectan el crecimiento de las raíces	12
Contenido del agua en el suelo	17
Profundidad de crecimiento de las raíces	19
Profundidad efectiva de raíces	19
Bulbo de humectación o mojamiento en el riego por goteo	19
Factores que determinan el tamaño del bulbo	21
Consideraciones para establecer un protocolo para el uso de sonda TDR en calicata.	30
Parte 2. Protocolo para el uso de equipos TDR en calicata, como herramienta para la determinación de la frecuencia de riego	31
Aspectos prácticos al usar el equipo TDR.....	31
Ubicación de la calicata en el parronal.....	31
Momentos a evaluar con TDR.....	34
Ejemplo de la representación gráfica de los datos obtenidos con el TDR 150	35
Función de agotamiento y planilla de cálculos automatizada	35
Estudio de casos a modo de ejemplo.....	39

CONCLUSIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	47

RESUMEN

En muchos huertos frutales, el control del riego se realiza evaluando calicatas, y con el tacto el contenido de agua del suelo, tratando de definir el tiempo y la frecuencia de riego, así como la distribución de raíces en el perfil. Sin embargo, estas evaluaciones del contenido de agua en el suelo son subjetivas, es por ello que en el presente trabajo se planteó como objetivo generar un protocolo para el uso discontinuo de equipos TDR en calicata, destinado a optimizar el manejo del riego en uva de mesa en suelos de texturas medias. De esta manera se podrá establecer una medición objetiva, permitiendo establecer la conformación del bulbo de humectación en el suelo y la digitalización de los datos. En una primera parte, se realizó una revisión bibliográfica sobre el comportamiento de las raíces de vides para esta especie, entregando antecedentes sobre el potencial productivo y su relación con el crecimiento de las raíces en la temporada (ciclo anual) y los factores que determinan el crecimiento de estas. Se analizó el comportamiento del bulbo de mojado en relación al sistema de riego por goteo, considerando el efecto del tipo de suelo sobre la distribución del agua en el perfil, descarga de los emisores de un sistema de riego por goteo, la distancia entre emisores y el número de líneas de riego a usar. En una segunda parte, se llevó a cabo la generación de un protocolo para el uso de la sonda TDR en la calicata, apoyado en la información anterior y evaluaciones en terreno. Se propone en una planilla Excel, que a partir de los datos del TDR en calicata, se pueda proyectar el agotamiento del agua en el suelo en función de evapotranspiración (ET_o) y el coeficiente de cultivo (K_c), según el estado fenológico en que se ejecuta la evaluación.

Palabras clave: raíces, riego por goteo, bulbo de humectación, vid.

ABSTRACT

In many fruit orchards, irrigation control is carried out by evaluating the water content of the soil in pits and by touch, trying to define the time and frequency of irrigation, as well as the distribution of roots in the profile. However, these evaluations of the water content in the soil are subjective, which is why in the present work the objective was to generate a protocol for the discontinuous use of TDR equipment in test pits, aimed at optimizing irrigation management in grapes from table on medium textured floors. In this way it will be possible to establish an objective measurement, allowing to establish the conformation of the humidification bulb in the soil and the digitization of the data. In the first part, a bibliographic review was carried out on the behavior of the roots of vines for this species, providing information on the productive potential and its relationship with the growth of the roots in the season (annual cycle) and the factors that determine the growth of these. The behavior of the wetting bulb in relation to the drip irrigation system was analyzed, considering the effect of soil type on the distribution of water in the profile, discharge of the emitters of a drip irrigation system, the distance between emitters and the number of irrigation lines to use. In a second part, the generation of a protocol for the use of the TDR probe in the pit was carried out, supported by the previous information and field evaluations. It is proposed in an Excel spreadsheet, that from the TDR data in the pit, the depletion of water in the soil can be projected based on evapotranspiration (ET_o) and the crop coefficient (K_c), according to the phenological state in which the evaluation is executed.

Keywords: TDR, roots, wetting bulb, vine.

INTRODUCCIÓN

El clima mediterráneo que caracteriza al país hace fuertemente dependiente a sus plantaciones frutícolas de la entrega artificial de recursos hídricos (Apey, 2020). Independientemente de la mayor disponibilidad de este recurso en la medida en que se avanza hacia el sur de Chile, llama la atención de manera alentadora que sobre el 81% de la superficie de frutales en el país esté bajo la condición de riego tecnificado y sólo 16,6% se riegue por métodos tradicionales (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA], 2020). Los sistemas de riego tecnificado como el goteo tienen eficiencias muy altas, 90% o más, por lo que su uso se ha generalizado en todas aquellas zonas con problemas de seguridad de riego (Antúnez *et al.*, 2010).

A pesar de la implementación del riego tecnificado como medio para incrementar el uso eficiente del agua de riego, se hace necesario mejorar la gestión de la labor, planificando en forma óptima cuánto y cuándo regar (Mounzer *et al.*, 2008). Como herramientas y métodos para la determinación de estos parámetros, se ha usado en la fruticultura el balance hídrico del suelo, uso de tensiómetros, el método ET_o-K_c (FAO, 2006), y lo más reciente la masificación del uso de sondas de riego FDR y TDR, de lecturas continuas o discontinuas (Muñoz-Carpena *et al.*, 2012).

El balance hídrico del suelo consiste en su evaluación como un sistema, con entradas y salidas de agua, que permiten realizar un balance de la disponibilidad de agua total que pueda llegar a disponer una planta, una pradera o un huerto frutal. En el sistema continuo, y considerando un riego por goteo eficiente, se evalúan las variables de precipitación efectiva (mm) y riego (mm) como entradas al sistema y, como salidas, se tiene la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas en una sola variable, denominada evapotranspiración de cultivo (ET_c) (FAO, 2006). Para su determinación, se necesita conocer el valor de la evapotranspiración de referencia (ET_o), calculado mediante la ecuación de Penman-Monteith, utilizando variables ambientales (radiación, velocidad del viento, entre otras), y un factor de corrección por el tipo de cultivo sobre el suelo, denominado K_c que se obtiene de la literatura (Ferreira *et al.*, 2001).

Con respecto a las sondas de capacitancia FDR (Frecuence Domain Reflectometry) y TDR (Time Domain Reflectometry), se sustentan en el mismo principio de medir la constante dieléctrica del suelo para estimar el contenido de agua en el mismo (Whalley, 1994; Muñoz-Carpena, 2012). La sonda TDR de medición discontinua para uso en calicata, a diferencia de las sondas fijas instaladas en terreno (Callejas *et al.*, 2013), es un método destructivo pero que permite evaluar mayores puntos de observación en el campo, obteniendo así una idea más general del estado hídrico del suelo (Fieldsout, 2009). Adicionalmente, las evaluaciones en calicata permiten obtener una estimación del tamaño o comportamiento del bulbo de mojamiento (tamaño) en respuesta al sistema y criterio de

riego, especie frutal, tipo de suelo, compactación, entre otros factores. De esto se destacan dos puntos centrales a considerar en las evaluaciones: abertura hacia la lateral (entrehilera) y profundidad de mojamiento.

Es importante considerar que en la actualidad existe un gran número de superficie de vides de mesa y otros frutales, donde el criterio de riego se define través de la evaluación subjetiva del contenido de agua en el suelo usando calicatas (al tacto), creándose la necesidad de generar una metodología objetiva para esa evaluación a través del uso de estos equipos TDR, generando indicadores o estimadores de riego, en base a las lecturas obtenidas en las calicatas.

Hipótesis

La evaluación del contenido del agua de riego en calicata usando sonda TDR permite determinar la frecuencia de riego en parronales de uva de mesa, en suelos de texturas medias.

Objetivo general

Generar un protocolo para el uso de sonda TDR en calicata, en el manejo del riego en uva de mesa en suelos de texturas medias.

Objetivos específicos

- 1) Realizar una revisión bibliográfica sobre la profundidad de raíces en las vides de mesa, profundidad efectiva (zona activa en el consumo de agua) y volumen de suelo destinado para su cultivo, en función del sistema de riego por goteo.
- 2) Basado en la información obtenida en el objetivo específico 1, generar un protocolo para el uso de sonda TDR en calicata, como herramienta para la determinación de la frecuencia de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de estudio

El trabajo se realizó en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, Laboratorio de Viticultura.

Parte 1. Revisión bibliográfica

Materiales

Se utilizaron diversas fuentes de información, tales como libros, memorias de título, tesis y revistas científicas impresas o disponibles en internet, relacionadas con el tema en cuestión. Además, se recopiló información de las bases de datos disponibles en la Universidad de Chile.

Métodos

Respecto al ámbito o espectro de búsqueda, la información estuvo delimitada a la profundidad de raíces, profundidad efectiva de raíces y al volumen de suelo por planta, considerando al tamaño de bulbo del sistema de riego tecnificado para vid de mesa.

Parte 2. Protocolo para el uso de sonda TDR en calicata, como herramienta para la determinación de la frecuencia de riego

Metodología

Existe un gran número de productores agrícolas que usan la observación subjetiva del contenido de agua en el suelo a través de la construcción de calicatas (“calicateo”). Las observaciones, interpretación, el análisis y toma de decisiones respecto a lo que se observe en ellas es una técnica compleja y que requiere de experiencia (Callejas *et al.*, 2014), por lo que en base a esto se planteó la tarea de desarrollar una metodología práctica y objetiva, que permita mejorar esta forma de definir el tiempo y frecuencia de riego.

Para este caso se ha elegido el sensor TDR 150 (Figura 7), básicamente por dos razones:

- 1) Ofrece una lectura de alta precisión y resolución espacio temporal, rápida, confiable y que permite el acceso a muestras mínimamente disturbadas para evaluar el contenido hídrico y la conductividad hidráulica del suelo (Mojid y Cho, 2004).
- 2) Es un equipo robusto que soporta el uso periódico en terreno, respecto de otras alternativas de construcción más frágil.



Figura 7. Equipo de medición de humedad del suelo TDR 150.

El equipo trae diferentes tipos de vástagos, un par de 200 mm y otro par de 120 mm como se muestra en la Figura 8, permitiendo evaluar en la calicata misma o utilizar el equipo en evaluaciones desde la superficie del suelo sin tener que hacer calicatas (evaluaciones de control de abertura de bulbo).



Figura 8. Vástagos para TDR 150.

Para realizar las diferentes mediciones con el equipo se consideró:

- a) Aspectos prácticos en terreno para un óptimo uso del equipo TDR.
- b) La ubicación y tamaño de la calicata, para realizar una buena lectura con el equipo.

- c) Los momentos a evaluar con el TDR, para este estudio se llevaron a cabo mediciones con el TDR en punto de recarga en todos los parrones.

Las evaluaciones realizadas con el TDR 150, son correlacionadas con datos de ETo obtenidos de estaciones climáticas cercanas a la zonas de estudio y con los Kc de las vides para los estados fenológicos de las evaluaciones.

Finalmente se propone una función de agotamiento de agua fácilmente disponible en relación a la demanda hídrica basada en la información de la revisión bibliográfica y del cálculo de la lámina de agua disponible, proponiendo la profundidad efectiva de raíces, ancho del bulbo y volumen total de suelo.

Análisis estadístico

Se seleccionaron 3 cuarteles en distintas zonas de la región centro norte del país. En cada uno de estos cuarteles se realizó 1 medición (sin repetición) con equipo TDR 150.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parte 1. Revisión bibliográfica

La información de esta primera parte está delimitada a las características generales del sistema radical, profundidad efectiva de raíces y al volumen de suelo por planta, considerando el tamaño de bulbo del sistema de riego tecnificado para vid de mesa.

Sistema radical y potencial productivo en la vid

Es muy importante tener una visión objetiva y clara del suelo en función de las raíces, ya que ellas son las encargadas del balance de carbohidratos de la vid; absorben agua y nutrientes indispensables para el crecimiento aéreo y fructificación, captan señales positivas o negativas desde el suelo, las cuales son transmitidas bioquímicamente a la parte aérea, lo que tendrá un efecto directo en el desarrollo de la fruta (Richards, 1983; Ruiz *et al.*, 2007). Por lo tanto, es fundamental tener la capacidad de cuantificar el volumen de raíces, su calidad y su localización en el suelo, para determinar los puntos críticos que puedan estar afectando la expresión óptima de un parrón determinado (Callejas *et al.*, 2012)

Se ha demostrado que el sistema radical y la parte aérea se encuentran en un “equilibrio funcional”. En esta relación, las raíces y los brotes responden en términos de crecimiento y funcionalidad, a la eficacia con que el órgano complementario de la planta obtiene sus necesidades básicas del medio, mientras que la respuesta a factores externos depende del estado interno de la planta y, es aquí donde intervienen reservas orgánicas, nutrientes y hormonas (Honorato *et al.*, 1990).

Richards (1983) mencionaba que la relación entre crecimiento de la parte aérea y la actividad del sistema radical de la planta de la vid existe y es íntimo. En este sentido y según Ruiz (2000), la condición y calidad del sistema de raíces es la que define casi en su totalidad el desarrollo y vigor de las plantas, por ende, el nivel de calidad de producción de los huertos. Específicamente para las vides y en términos de funcionalidad, se ha determinado que las raíces más importantes son aquellas de menor diámetro y de color blanco, generalmente llamadas raíces finas o activas. Mientras más raíces de este tipo existan, mayor rendimiento presentará el parrón (Figura 1) (Mullins *et al.*, 1992; Sellés *et al.*, 2003; Ruiz *et al.*, 2007).

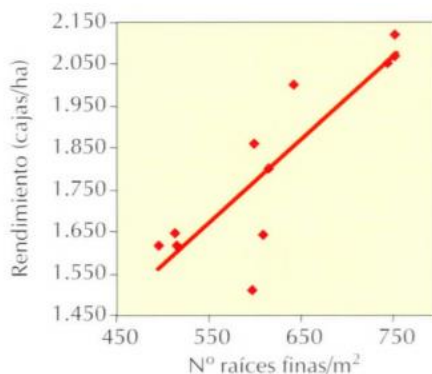


Figura 1. Relación entre rendimiento (cajas de 8,2 kg·ha⁻¹) y número de raíces finas en vid de mesa, cv. Thompson Seedless (Sellés *et al.*, 2003).

Considerando la edad de las plantas, se puede inferir que éstas generan sus raíces estructurales en los primeros centímetros del perfil de suelo y de ellas se desarrolla su crecimiento de extensión y ramificación (Richards, 1983). Las raíces estructurales varían de 6 a 100 mm de diámetro, de ellas se generan pequeñas raíces permanentes, las cuales poseen un diámetro variable de 2 a 6 mm, estas crecen de forma horizontal y vertical. Estas raíces se extienden y ramifican en unas pocas raíces de extensión media, en la mayoría de los casos de 1 a 2 mm de diámetro y de rápido crecimiento. Estas mueren a las pocas semanas de emerger, por lo que deben ser reemplazadas constantemente (Richards, 1983). De igual forma, Mullins *et al.* (1992) mencionan que las raíces de vid menores a 0,6 mm son descritas como extremadamente sensibles y que su actividad metabólica disminuye a medida que su pigmentación aumenta en función del tiempo, encontrándose que son ellas las que en forma importante se relacionan con el potencial productivo de las vides (Honorato *et al.*, 1990; Callejas *et al.*, 2012).

Ciclo anual del crecimiento de las raíces en la vid

Según Sellés y Ferreyra (2007), y Callejas *et al.* (2010) existen factores que afectan el crecimiento de las raíces tales como la concentración de nutrientes en la solución suelo, el contenido de agua del suelo, aireación, resistencia mecánica al paso de las raíces, e interacciones físicas con el suelo. El grado de desarrollo de la raíz condiciona la tasa de absorción de agua por la planta, lo que afecta importantes procesos fisiológicos como la fotosíntesis, respiración, elongación celular y muchas otras actividades metabólicas, y, cuando estos procesos no son limitantes para el crecimiento de las raíces, se puede establecer una relación entre la tasa de crecimiento de las raíces y las temperaturas del suelo, estableciéndose que con temperaturas de suelo superiores a 6°C comienza el crecimiento del sistema radical, siendo las temperaturas óptimas de 25° a 30°C, según Richards (1983).

En general, el crecimiento radical tiende a incrementarse con el aumento térmico hasta que se alcanza un nivel óptimo, después del cual disminuye (McMichael y Burke, 1998; Callejas *et al.*, 2010). Ibacache y Lobato (1995) determinaron una relación lineal significativa entre la intensidad de crecimiento de raíces de vid y la temperatura de suelo a 20 y 50 cm de profundidad, pero esta relación solo fue observada desde el inicio de la temporada hasta el primer “peak” de crecimiento. Al respecto, Callejas *et al.* (2010) observaron crecimiento radical durante todo el año en la zona norte de Chile (Atacama), presentando menor intensidad en el mes de julio (invierno). Las raíces mostraron diferentes patrones en la distribución de la intensidad de crecimiento según profundidad, con variaciones entre los sitios de hasta cinco veces en la máxima intensidad de crecimiento anual. Suelos con difusividades térmicas altas presentaron ambientes favorables para el crecimiento de raíces.

Ibacache y Lobato (1995) al estudiar el comportamiento de las raíces de las vides en la Región de Coquimbo, determinaron que su crecimiento posee dos periodos en los que se produce un gran desarrollo del sistema radical. El primer periodo, mayor que el segundo, según los investigadores, ocurre al inicio de la primavera de forma paulatina y alcanza un máximo crecimiento al final del estado de floración. En este primer “peak” las raíces son más gruesas, sobre 1mm de diámetro. El segundo periodo se produce en otoño, después de la cosecha de la fruta y antes de la caída de hojas, con raicillas finas menores a 1mm de diámetro. Richards (1983) menciona que el ritmo de crecimiento de las raíces no es constante, lo que es corroborado por Callejas *et al.* (2010), pero hay registros que en primavera las raíces podrían crecer hasta 1 cm por día.

Rojas (2008) al igual que Ibacache y Lobato (1995), y trabajando en la variedad Sultanina en la Región Metropolitana, encontró que las raíces de las vides poseen dos “peaks” de crecimiento (Figura 2). El primer se presentó al final de estado de floración, con temperaturas de suelo cercanas a los 20°C, mientras que el segundo “peak” ocurrió luego de la cosecha cercano a la primera quincena del mes de abril, con temperaturas de suelo cercanas a los 15°C. El primer “peak” fue mucho más intenso, corroborando lo dicho por Ibacache y Lobato (1995), cuya intensidad se tradujo en raíces más largas.

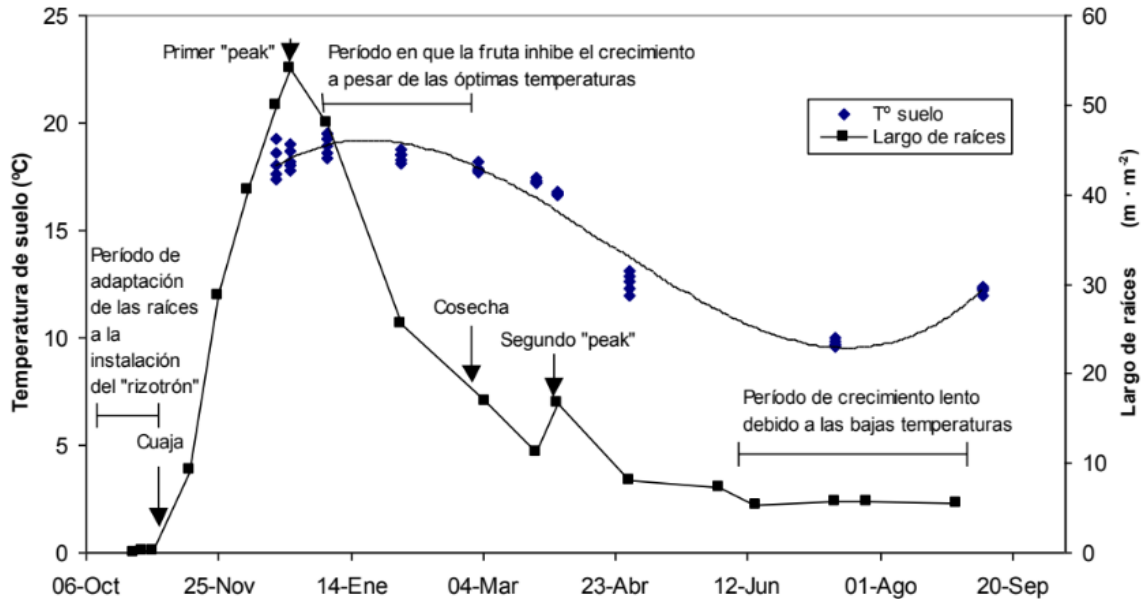


Figura 2. Seguimiento del crecimiento de raíces de uva de mesa “Sultanina” mediante “Rizotrón” en la Región Metropolitana (Rojas, 2008).

Los estudios dejan en evidencia que gracias a la diversidad climática que existe en nuestro país, el cultivo de uva de mesa y su sistema radical al ser dependiente de la temperatura del suelo, podría tener diferentes fechas para estos dos “peaks” de crecimiento. En el norte del país se podría asumir que el primer “peak” podría alcanzarse antes, debido a las altas temperaturas que existen de forma temprana en la temporada y en relación al segundo “peak” en este caso coincide con la fecha estipulada por Ibacache y Lobato (1995).

El primer “peak” se ha relacionado con crecimientos superficiales, abundantes en raicillas finas y su intensidad se ha catalogado como dependiente del nivel de reservas de la raíz (Terence *et al.*, 2002). De manera similar, McKenrey (1984) determinó que la ocurrencia del segundo “peak” implicó la necrosis de raicillas del primer “peak”, mientras que Eissenstat *et al.* (2001) observaron que las raíces producidas cerca de floración y en superficie perduraron menos que las producidas tarde en la temporada y en profundidad, además de asociar una mayor supervivencia para las raíces más gruesa. Este segundo “peak” es considerado un periodo de recuperación de reservas y de aumento en la concentración de los elementos N, P y K en las raíces finas y los tejidos de raíz (Bates *et al.*, 2002). Kliewer y Fuller (1973) determinaron una reducción significativa en la acumulación de materia seca de la raíz, cuando se deshoja en época de cosecha en vides sin fruta.

Ibacache y Lobato (1995) al igual que Rojas (2008), determinaron que cuaja y crecimiento del fruto coinciden con el periodo de crecimiento radical de tasa más baja, probablemente por el importante sumidero que significan los frutos en ese período (agua, hidratos de

carbono nutrientes). Esta disminución de la tasa en el período de mayor demanda de agua podría indicar que este elemento es suministrado a la vid, por las raíces más viejas (Van Zyl, 1988).

Factores que afectan el crecimiento de las raíces

Como se mencionó anteriormente existen factores que afectan el crecimiento de las raíces tales como resistencia mecánica del suelo al paso de las raíces, aireación e interacciones físicas con el suelo, nutrientes, contenido de agua del suelo (Sellés y Ferreyra, 2007; Callejas *et al.*, 2010)

A continuación, se presentan los factores que pueden afectar el crecimiento de las raíces:

Resistencia mecánica. Sellés *et al.* (2012) la define como la capacidad del suelo para dificultar la penetración de un cuerpo rígido. Esta propiedad se mide con un instrumento llamado penetrómetro, el cual mide la presión que ejerce el suelo a que dicho instrumento lo penetre y cuya magnitud de presión se mide en megapascales (MPa) (Sellés *et al.*, 2003).

A medida que la resistencia mecánica a la penetración del suelo aumenta, el crecimiento de las raíces se ve considerablemente afectado, para detenerse completamente con valores cercanos a 3 MPa (Sellés *et al.*, 2012). En el caso de las vides, el crecimiento radical comienza a verse afectado con valores de 1 MPa (Lanyon *et al.*, 2004), y se detiene con valores de 2 MPa (Van Huyssteen, 1983).

Densidad aparente. Es un factor que afecta directamente la presencia de raíces en el perfil de suelo. Representa un índice de la masa seca de partículas en un volumen total de suelo, que incluye partículas y poros (Antúnez *et al.*, 2015). La textura y el contenido de materia orgánica son otros factores que influyen en la densidad aparente de un suelo y por regla general, se establece que suelos de textura fina y con mayor contenido de materia orgánica tienen densidades aparentes más bajas que suelos de textura gruesa con bajos contenidos de materia orgánica (Taboada y Álvarez, 2008).

Valores bajos de densidad aparente indican suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de las raíces, por el contrario, valores altos implican compactación de los suelos y resistencia mecánica al enraizamiento (Honorato, 2000). En suelos compactados el desarrollo de raíces es escaso o nulo, señalándose que densidades aparentes mayores a $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$ representaban suelos que resultan limitantes para el crecimiento radical (Van Zyl, 1988). Valores de densidad aparente para suelos no compactados son: en suelos arenosos de $1,65 \text{ g cm}^{-3}$; para suelos franco arenoso de $1,5 \text{ g cm}^{-3}$; suelos de textura franca de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$; franco arcillosos de $1,33 \text{ g cm}^{-3}$; arcillo arenosos de $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ y los suelos arcillosos de $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ (Antúnez *et al.*, 2015).

Aireación. La aireación de un suelo depende de la distribución y tamaño de los poros y, es un factor crítico para el desarrollo de las raíces de vid (Sellés *et al.*, 2012). En la mayoría de

las especies, el espacio poroso ocupado por aire no debe ser inferior a 10%, sin embargo, en vides el límite adecuado para el desarrollo de raíces se encuentra entre 12 y 15%, permitiendo una adecuada respiración e intercambio de oxígeno y dióxido de carbono del suelo con la atmósfera (Richards, 1983).

Benavides (1992) señala que, en la mayoría de los casos, las raíces crecen a través de los poros preexistentes y, si el material de la matriz es deformable, la raíz penetra y puede crecer hasta que otro factor diferente a la resistencia mecánica controle la elongación, aun en el caso de materiales no porosos. En un estudio realizado por Ruiz *et al.* (2007), se evidenció que la densidad radical aumenta al incrementarse la macroporosidad del suelo (Figura 3).

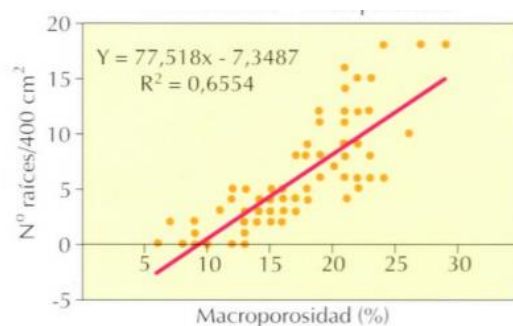


Figura 3. Relación entre la macroporosidad del suelo (%) y la densidad radical (Nº raíces/400 cm² de suelo), en vides de mesa cv. Thompson Seedless (Ruiz *et al.*, 2007).

Materia orgánica. Es un componente importante a la hora de mejorar las propiedades físicas del suelo, y por ende, mejorar de manera extraordinaria el hábitat de las raíces permitiendo, aumentar la productividad, donde su presencia es escasa (Baginsky *et al.*, 2010). Se ha demostrado que la aplicación de enmiendas orgánicas tiene efectos benéficos en las propiedades físicas del suelo, aumentando la estabilidad de los agregados, la distribución del tamaño de poros, la infiltración de agua y la capacidad de retención de esta en el perfil (Seguel *et al.*, 2003).

La consecuencia directa de la materia orgánica en el suelo se manifiesta en la estabilidad estructural, la cual es definida como la persistencia de los agregados frente a determinadas fuerzas destructivas, permitiendo mantener la funcionalidad física del suelo (Horn y Fleige, 2009). Su incorporación al suelo permite mejorar la estructura, reduciendo el impacto de la compactación, siendo esta uno de los principales factores que influyen en el bajo nivel de profundización de raíces, incrementando la capacidad de retención de agua y el intercambio gaseoso, lo que finalmente resulta en un mayor desarrollo de raíces (Zhang *et al.*, 2005)

Cuando existe una alta densidad de raíces en los primeros 20 centímetros del perfil, esta condición podría estar relacionada al mayor contenido de materia orgánica (Morlat y Jacquet, 1993). Van Zyl (1988) asegura que un alto índice de enraizamiento tiene relación con que el suelo posea condiciones favorables para el desarrollo de una mayor proporción de raíces finas en relación con raíces gruesas.

Nutrientes. La presencia de nutrientes en el suelo promueve el crecimiento de raíces, particularmente en lugares donde la concentración de éstos es óptima (Chassot *et al.*, 2001).

Nitrógeno (N). El N es un macroelemento que juega un papel importante en las comunicaciones de raíces y brotes, siendo fundamental para maximizar la productividad de las plantas y las aplicaciones agronómicas (Gu *et al.*, 2018).

Se ha demostrado que el crecimiento de las raíces no es aleatorio, sino que es guiado por mecanismos moleculares que detectan la presencia y disponibilidad de nitrato en el suelo (Zhang *et al.*, 2017), confirmando que este elemento puede afectar la distribución de raíces en el suelo, y por ello es que la tasa de aplicación óptima de N podría aumentar la distribución de raíces en la capa en la que se aplicó el fertilizante, promoviendo la absorción de nutrientes y aumentando la capacidad fotosintética de las plantas.

En las vides el N es absorbido por las raíces principalmente como nitrato (NO_3^-) y también como amonio (NH_4^+) (Sierra, 2001). Cantidades moderadas de nitrógeno nítrico impactan en la actividad hormonal, por lo que las raíces de las plantas crecen constantemente en búsqueda de nuevas áreas de suelo rico en este elemento (Chen, 2020). Sin embargo, la concentración de este compuesto en el suelo no es homogénea, por lo que cuando las plantas encuentran una veta rica en nitratos, la planta inicia la formación de raíces laterales, de esta forma consiguen que sus sistemas radicales sean más densos en las zonas del suelo donde hay mayor densidad de nutrientes (Chen, 2020).

Fósforo (P). Es un macroelemento primario esencial y, determinante para el crecimiento inicial de los tejidos vegetales, especialmente de las raíces (Sierra, 2001). Es relativamente inmóvil en el suelo, por lo tanto, el mecanismo de adquisición es principalmente por difusión e interceptación, de modo que la absorción depende directamente del desarrollo radical (Essington, 2003). La distribución de raíces se ve afectada directamente por la disponibilidad de fósforo en el suelo (López-Bucio *et al.*, 2003), es por esto que, en suelos con una baja concentración de fósforo, se inducen cambios morfológicos en la raíz, como el aumento en la densidad y elongación de pelos radicales (López-Bucio *et al.*, 2003; Zhu *et al.*, 2005) y la formación de raíces laterales (López-Bucio *et al.*, 2003). Por otra parte, otros trabajos señalan que contenidos adecuados de fósforo aumentan el largo total de raíces y promueven la generación de raíces laterales (He *et al.*, 2003). Toda variación en la morfología de la raíz como respuesta a disponibilidad de fósforo, apunta a aumentar la eficiencia de adquisición de este elemento.

Potasio (K). El potasio es un macronutriente que puede constituir hasta el 10% del peso seco de la planta, es esencial para su crecimiento, funciones metabólicas y tolerancia al estrés (Leigh y Wyn Jones, 1984). El crecimiento y desarrollo del sistema de raíces depende del potasio en varios niveles, por ejemplo, la síntesis de proteínas y la actividad enzimática de las células de la raíz necesitan niveles adecuados de potasio para mantener el pH citoplasmático (Sustr *et al.*, 2019). En la zona de maduración radical, los pelos radicales crecen apicalmente mediante la acción de flujos de potasio, la función de ellos es fundamental, sobre todo cuando hay suelos pobres en potasio, ya que los pelos logran captar potasio y esta capacidad dependerá del largo del pelo (Rigas *et al.*, 2001).

El potasio también afecta la relación de partición de biomasa de raíz a brote, a través del transporte de floema (Cakmak *et al.*, 1994). Además, los cambios adaptativos de la arquitectura del sistema radicular y la cobertura del pelo de la raíz evolucionaron en las plantas para mejorar la absorción de potasio en condiciones limitantes (Sustr *et al.*, 2019).

Uno de los requisitos para la elongación celular es la acumulación de soluto para crear el potencial osmótico interno necesario para la presión de turgencia. El potasio es el principal soluto requerido en las vacuolas para la elongación de las células debido a que aumenta el potencial osmótico favoreciendo la entrada de agua (INTAGRI, 2017). Sierra (2001), describe a este nutriente como fundamental para la elongación celular, principalmente para el crecimiento, extensión de raíces y su metabolismo. Es por lo anteriormente mencionado que la falta de potasio, además de afectar el crecimiento radical lateral, también limita la absorción de agua y otros nutrientes al tener menor cantidad de pelos absorbentes (Sierra, 2001; Sustr *et al.*, 2019). Lo anterior se acrecienta en suelos con bajo suministro de potasio, como lo son suelos arenosos, fallas en el manejo de agua de riego y daños del sistema radical, también se puede agregar que en suelos con problemas de compactación la respiración de la raíz es reducida, lo cual influirá en la absorción de potasio (Sierra, 2001).

Calcio (Ca). Emanuelsson (1984) cataloga a los iones de calcio como macronutrientes “esenciales” para el desarrollo de la raíz, jugando, un rol fundamental en el crecimiento y elongación de las ellas. Con ausencia de calcio el crecimiento de raíces se detiene en pocas horas debido a que este elemento no se transporta por el floema, es por esto que, aunque la planta contenga Ca, le es imposible transportarlo hasta las raíces (Sierra, 2001). El movimiento de este elemento en la planta se da exclusivamente por la corriente xilemática desde las raíces hacia órganos como las hojas y frutos. Asimismo, el crecimiento de la raíz está condicionado por el pH, requiriéndose que este elemento deba aplicarse en mayor concentración en el suelo cuando el pH es bajo, para poder contrarrestar el efecto adverso de las altas concentraciones de aluminio y suelos ácidos sobre el crecimiento de las plantas (Emanuelsson, 1984). Por ello, el encalado es muy importante en suelos ácidos, ya que además de corregir el pH, también provee de Ca para el crecimiento de las raíces (Rincón *et al.*, 2003)

Boro (B). Es un microelemento fundamental para el desarrollo de cualquier tejido vegetal, pues es indispensable para el proceso de división y elongación celular (Razeto, 1993). Normalmente las deficiencias de B son corregidas mediante aplicaciones al follaje, pero dado que también es fundamental para el desarrollo de raíces, la aplicación de B al suelo en condiciones de déficit se propone como una alternativa para mejorar el crecimiento de raíces, cuyos ápices son los primeros tejidos en detener su crecimiento en condiciones deficitarias (Desmartis, 2012).

Diversos procesos se alteran ante una deficiencia de B, siendo la más rápida la inhibición o cesación de la elongación de raíces (Marschner, 1986). Estas toman el B a través de la combinación de transporte pasivo por la bicapa lipídica, y canales transportadores conocidos como aquagliceroporinas (Dordas y Brown, 2000). Considerando que el rol que juega el B en el desarrollo de las raíces es fundamental, sería indispensable incorporar aportes de B en los programas de fertilización al suelo, en aquellos casos en que se presenten condiciones de déficit (Marschner, 1986).

Zinc (Zn). Este metal considerado un microelemento es un constituyente de numerosas enzimas como anhidrasas, oxidasas y peroxidasas y desempeña un papel importante en regular el metabolismo del nitrógeno, la multiplicación celular, la fotosíntesis y la síntesis de auxinas (Rout y Das, 2003).

El zinc activa la enzima triptófano sintetasa, encargada de la síntesis del triptófano, para la biosíntesis de la auxina ácido indolacético (AIA), afectando la expansión foliar y el crecimiento de brotes en zonas meristemáticas (Gil *et al.*, 2012). Con deficiencia de zinc la síntesis de auxina queda reducida al no sintetizarse el triptófano, que requiere la actuación de la enzima activada por el zinc, la cual une la serina y el anillo indólico (Gil, 1995). Por lo tanto, un reducido crecimiento de la planta y de las hojas es consecuencia de deficiencias severas de Zn, atribuido a bajos niveles de auxinas en la planta.

Durante el crecimiento de las plantas es fundamental tener una disponibilidad continua de Zn en la zona de raíces (Cakmak, 2014). Este elemento actúa sobre las membranas de las células radicales, y, en su ausencia, las células pierden su estabilidad y se vuelven permeables (Cakmak, 2014). La ausencia de zinc puede tener un efecto sobre el pH de la rizósfera, posiblemente a través de un efecto sobre la actividad de la membrana (Cakmak, 2014). Las raíces siendo permeables exudan al suelo varios compuestos ricos en carbono, azúcares y aminoácidos, los que alimentan a los patógenos, y por ende, existe mayor susceptibilidad al ataque de estos organismos (Cakmak, 2014). Un adecuado aporte de Zn permite controlar la exudación de estos compuestos, y en consecuencia la infección de raíces por patógenos se reduce drásticamente.

Contenido del agua en el suelo

La cantidad de agua en el suelo afecta muchos procesos fisiológicos, incluyendo el intercambio de gas con la atmósfera, la difusión de nutrientes a las raíces de las plantas, la temperatura del suelo y la velocidad con la que los solutos se mueven a través de la zona radical durante el riego o lluvia (Jury *et al.*, 1991).

El transporte de agua hacia las raíces de la planta ocurre en la zona no saturada, definida normalmente como zona vadosa, la cual se ubica entre el nivel freático y la superficie del suelo (Dexter, 2004). En esta zona, la fase líquida se encuentra confinada entre las superficies sólidas del suelo y el aire presente en él (Jury *et al.*, 1991), donde la relación entre el contenido de agua y aire determina en gran medida el crecimiento radical (Hillel, 1998; Richards, 1983).

Si bien se sabe que existen 4 factores que son de suma importancia para el desarrollo y crecimiento de raíces, tales como la disponibilidad de agua, la resistencia mecánica, la aireación y la temperatura, es la condición hídrica la que controla el comportamiento de los otros factores (Sellés y Ferreyra, 2007).

Con respecto a la relación agua y resistencia mecánica, a medida que el contenido de humedad aumenta, disminuye la resistencia mecánica del suelo al crecimiento radical, este efecto es catalogado como deseable, pero de manera simultánea en un suelo con exceso de agua se ve afectada la relación agua y aire, reduciendo la aireación de este y, eventualmente, puede llegar a un cuadro de asfixia radical, lo cual limitaría la actividad de las raíces (Sellés *et al.*, 2012). Por otro lado, mientras menos agua tiene el suelo, mayor es la resistencia mecánica y, a medida que esto sucede, el crecimiento y funcionamiento de las raíces también se ve afectado, la planta no logrará desarrollarse de manera completa, lo que resultará en un rendimiento bajo o en una pérdida total de rendimiento (Yazar y Sezen, 2006).

Según Bustos (1996), el déficit hídrico produce cambios metabólicos en organismos fotosintéticos, aumenta la resistencia a la difusión del CO₂, induce la síntesis de componentes importantes en el ajuste osmótico, todos ellos considerados efectos no estomáticos, e induce modificaciones en las respuestas de la fotosíntesis a factores ambientales ligados al cierre estomático. Un déficit de agua en la planta reduce el crecimiento de la baya, el impacto es aún mayor cuando la aflicción ocurre durante la etapa I de su crecimiento, ya que no es recuperable posteriormente (Gil, 2000).

Cabello *et al.* (2009), afirman que si se excede el agua requerida para suplir la evapotranspiración del cultivo, no se incrementa el rendimiento de este y el agua aplicada al suelo se pierde por evaporación y/o percolación profunda, incluso, si se aplica mucha más agua, el rendimiento podría decaer como resultado del anegamiento o la lixiviación de nutrientes desde la zona de raíces. En plantas de vid, distintos abastecimientos de agua en el

suelo pueden provocar cambios en la acumulación de materia seca en cada una de las etapas fenológicas del cultivo (Gómez del Campo *et al.*, 2002). Este cambio en la acumulación de materia seca es producto de la alteración de la fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática y el potencial hídrico (Gómez del Campo *et al.*, 2002; Gómez del Campo *et al.*, 2007).

Con respecto a la fuerza con la que el agua es retenida por la matriz del suelo, esta también influye en otros procesos, incluyendo la eficiencia de extracción de agua por parte de las plantas, el drenaje que ocurre bajo gravedad y el grado de movimiento ascendente de agua y solutos en contra de la gravedad (Hillel, 1982; Jury *et al.*, 1991). En la matriz del suelo, el espacio poroso es aquella parte del volumen que no está ocupada por partículas sólidas, pero sí por gases y por agua; se encuentra íntimamente relacionado con la textura, la estructura y el contenido de materia orgánica (Hillel, 1998). La porosidad se relaciona con propiedades como retención y movimiento del agua, aireación, transferencia de gases en la rizósfera y la facilidad con que las raíces pueden penetrar en el suelo y absorber nutrientes (Hillel, 1998).

FAO (2005) establece que la succión máxima que pueden ejercer las plantas para extraer agua del suelo varía con el cultivo, pero el valor generalmente aceptado es de cerca de 15 veces la presión atmosférica, es decir, 1,5 MPa. Cuando el agua ha sido agotada hasta este valor, la que permanece en el suelo será aquella almacenada en los poros menores a 0,0002 mm de diámetro y esta medida corresponde al punto de marchitez permanente (PMP) del suelo, y el agua retenida a succiones mayores a que PMP no está disponible para las plantas (FAO, 2005). Una planta que esté por tiempo prolongado bajo condiciones de déficit hídrico tendrá importantes cambios en los niveles hormonales, aumentando de manera significativa los niveles de ácido abscísico (ABA) en ella, alcanzando valores 40 veces superior respecto a los niveles de plantas bien hidratadas (Barceló, 1990). Para la vid el crecimiento radicular comienza a verse afectado con valores medidos a capacidad de campo, del orden de 1 MPa y este se detiene con valores de 2 MPa (Sellés *et al.*, 2012).

Finalmente, el nivel freático también es un tema en cuestión y puede influir de manera negativa sobre la planta, ya que, además del déficit de oxígeno, puede tener implicaciones en la toma de nutrientes por parte de las plantas (Zambrano *et al.*, 2003). En un ensayo, Eden *et al.* (1951) observaron que los síntomas de deficiencia de nitrógeno en la planta se acentuaron a medida que el nivel freático se aproximó a la superficie del suelo. Igual experiencia señalaron Harris *et al.* (1962) para otros cultivos en un suelo orgánico. Estos últimos consideraron que disminuyó la tasa de mineralización al reducirse la actividad microbiológica con el déficit de oxígeno y con la menor temperatura del suelo. La presencia de un nivel freático a poca profundidad puede favorecer un serio problema para la producción agrícola, limitar la respiración del cultivo, ya que el espesor de suelo localizado dentro de la franja capilar se encuentra en una condición de casi saturación, y, si el agua freática es salina, el efecto perjudicial puede ser peor (Wind, 1955; Oosterbaan, 1994).

Profundidad de crecimiento de las raíces

Estudios realizados a las raíces en vid, demostraron que estas poseen el potencial para crecer hasta 6 m de profundidad de suelo (Seguin, 1972). El sistema radical de la vid se caracteriza por su gran volumen explorado y de baja densidad de raíces (Nagarajah, 1987; Morano y Kliwer, 1994). Aunque los suelos sean de diferentes orígenes y estructuras, una gran parte de las raíces de la vid se encuentran en el primer metro de profundidad de suelo (Richards, 1983). En la parte superior se encuentran las raíces laterales finas, las cuales conforman el área absorbente más importante para la planta (Richards, 1983; Callejas *et al.*, 2010). Es aquí donde se presenta el mayor número de raíces finas menores a 2 mm, cuya cantidad dependerá de la textura del suelo (Silva *et al.*, 1991; Pérez, 2007).

Profundidad efectiva de raíces

La profundidad efectiva de raíces quedará definida como el rango promedio de profundidad de suelo en donde las raíces obtienen en mayor proporción nutrientes y agua, siendo este sitio de gran importancia para el desarrollo y crecimiento de la planta. En la viticultura bajo riego se estima que más del 50% de las raíces en vid se concentran en los primeros 60 cm de profundidad, siendo estas las más importante desde el punto de vista funcional (Van Zyl, 1988). Esto se ve ratificado para la variedad Thompson Seedless, donde Silva *et al.* (1991), informa que la mayor proporción de raíces activas se encuentra entre los 40 a 60 cm de profundidad.

Bulbo de humectación o mojamiento en el riego por goteo

Concepto de bulbo de humectación. Pizarro (1996) describe como bulbo húmedo al volumen de suelo humedecido por un emisor de riego localizado. El movimiento del agua en el suelo determina la forma y el tamaño del bulbo húmedo, teniendo una gran importancia, ya que en él se desarrolla el sistema radical de las plantas (Evans *et al.*, 2007). Fernández (2010) indica que los emisores al descargar agua sobre el suelo forman un pequeño charco a medida que avanza el tiempo determinado de riego, de esta manera el bulbo húmedo se hace cada vez más grande en función del tiempo. Cuanto más húmedo se encuentra el suelo, la velocidad de infiltración del agua disminuye favoreciendo al incremento del radio del charco y cuando el caudal del emisor dividido por la superficie del charco iguala a la velocidad de infiltración, el charco se estabiliza. A partir del disco de suelo saturado del charco, el agua se distribuye por los poros hacia los alrededores, zona donde la humedad es menor (Pizarro 1996).

Consideraciones para un buen diseño del riego. El cómo se distribuye el agua en el suelo tiene una directa implicancia sobre el desarrollo del sistema radical, y en los árboles frutales se concentra en el volumen de suelo mojado por el sistema de riego, aumentando la

densidad radical y la eficiencia de extracción de agua y nutrientes (Bresler, 1977). Al respecto, para lograr el éxito productivo de una especie frutal no siempre es necesario alcanzar grandes volúmenes de suelo mojado, pero si mantener en excelentes condiciones de agua y oxígeno en el bulbo que se estimó al momento de diseñar el sistema de riego (Callejas *et al.*, 2014).

Para el diseño de un riego por goteo es necesario establecer un valor mínimo del volumen del suelo a humedecer y debe tener como mínimo una superficie entre el 30 al 40 por ciento de la superficie sombreada por los árboles (Pandey *et al.*, 2003; Zur, 1996). Según Karmeli *et al.* (1985) para el caso de frutales, el porcentaje mínimo de la superficie mojada del suelo debe ser superior al 33% de la zona radical, sobre todo en lugares donde prevalecen climas áridos.

Karmeli *et al.* (1985) también indican que el emisor es un elemento que se relaciona directamente con el bulbo de mojamiento, por lo que es fundamental una buena selección de él. El emisor debe ser de buena calidad para que así su vida útil sea prolongada, existe una tendencia a seleccionar emisores de menor costo, lo que a menudo provoca problemas por la mala calidad y la poca durabilidad de los goteros. En un sistema de riego por goteo, un porcentaje importante de la inversión inicial corresponde a las tuberías laterales y los emisores (Karmeli *et al.*, 1985).

Aspectos prácticos del manejo del riego tecnificado y efecto sobre la planta. Este sistema de riego como se mencionó anteriormente se caracteriza por aplicar de forma continua pequeñas cantidades de agua al suelo, que serán tomadas por la planta. Esta agua es entregada por emisores, en este caso llamados goteros, los cuales se ubican a lo largo de una manguera conocida con el nombre de lateral. El sistema trabaja a presiones que van de los 7 hasta los 40 metros de columna de agua (m.c.a), con caudales que varían entre 2 y 10 L por hora (Lagos *et al.*, 2004). La elección del caudal se hace en base al tipo de suelo, a la velocidad de infiltración de este, al tiempo de riego y a los requerimientos propios del cultivo (Lagos *et al.*, 2004). La definición de cuantos emisores se utilizará por planta puede variar entre 1 y 8, y en general, depende de la superficie, volumen de suelo humedecido, fluctuando entre un 10% y 60% del área total (Lagos *et al.*, 2004).

El riego por goteo posee grandes ventajas por sobre los riegos tradicionales, tales como, mayor uniformidad de distribución de agua, la posibilidad de aplicar fertilizantes vía riego y menores costos en mano de obra (Sellés *et al.*, 2003). Ferreyra y Sellés (1997) afirman que en épocas en que exista desarrollo del sistema radical, el contenido de agua no debe ser excesivo, ya que esta situación dificulta la difusión de oxígeno en el suelo, afectando directamente la respiración de las raíces, pudiendo provocar la muerte de estas en casos extremos. Estudios exponen que los árboles durante el invierno son tolerantes a periodos 3 a 5 veces más largos de anaerobiosis que en verano (Ferreyra y Sellés, 1997). Bajo este contexto, el principio básico de usar riego por goteo es mantener un alto potencial hídrico

del agua en un volumen reducido de suelo, para conseguir esto se deben realizar aplicaciones diarias de agua, para reponer lo consumido el día anterior (Bresler, 1977).

Bresler (1977) menciona que existe la posibilidad de disminuir la frecuencia de riego, lo que implicaría un aumento en el volumen de agua aplicado en el siguiente riego y gracias a esto, el tamaño del bulbo húmedo aumentaría, particularmente en suelos de textura fina, además de un aumento en la aireación del suelo, debido a que los ciclos de riego son más distantes unos de otro. En base a lo anterior el riego por goteo diario podría ser reemplazado por manejos que contemplen riegos de mayor duración y menor frecuencia, obteniéndose bulbos húmedos más amplios y profundos, mejorando las condiciones de humedad y aireación para el crecimiento de las plantas. Adicionalmente, se lograría un mayor volumen de suelo explorado por el sistema radical, lo que se traduce en un mayor crecimiento de la parte aérea de la planta y por ende mayor productividad (Sellés *et al.*, 2003).

En trabajos desarrollados por Sellés *et al.* (2003) en uva de mesa en suelo franco, se encontraron tendencias claras a mayores producciones con riego por goteo con una frecuencia de 3 a 6 días que con riego diario. Se evidenció que una disminución de la frecuencia de riego resulta en un aumento del volumen de agua aplicado en cada riego, lo que trae asociado un incremento del tamaño del bulbo, en particular en suelos de texturas finas y un aumento del contenido de aire en el suelo entre los ciclos de riegos. Por lo que es correcto afirmar que un rango óptimo de humedad para el desarrollo de las plantas corresponde al rango que, por una parte no provoque problemas de aireación y por otra parte donde la resistencia mecánica del suelo no limite el desarrollo de raíces, siendo el rango más estrecho en suelos que presentan altas densidades aparentes o con su estructura deteriorada (Sellés *et al.*, 2003).

Es por lo anteriormente mencionado, la cantidad de agua entregada por el sistema de riego debe ser óptimo para el desarrollo de las plantas, es decir, alcanzar una humedad del suelo en donde las plantas no sufran problemas de aireación y por otra parte donde la resistencia mecánica del suelo no limite el desarrollo de raíces, siendo el rango más estrecho en suelos que presentan altas densidades aparentes o con su estructura deteriorada.

Factores que determinan el tamaño del bulbo

El bulbo depende principalmente de las propiedades y características del perfil de suelo, el volumen y el caudal de agua aplicado, los cuales a su vez dependerán de la descarga del emisor, la distancia entre emisores y el número de líneas de emisores (Ferrándiz, 2017).

a) Efecto del tipo de suelo.

López (2016) afirma que el tipo de suelo juega un rol muy importante para estimar la forma y tamaño del bulbo húmedo. El agua en los diferentes tipos de suelo se

mueve en todas direcciones, pero en unos casos lo hace con mayor facilidad que en otros, dependiendo de la porosidad del suelo: en los poros grandes el agua circula por su propio peso, desde arriba hacia abajo, mientras que en los poros pequeños el agua circula por capilaridad en todas direcciones (López, 2016).

Los poros en un perfil de suelos son muy importantes, estos están relacionados con la textura y determinan la capacidad de retención de agua de un suelo. López (2016) indica que en suelos arenosos se presentan poros de gran tamaño, es por esto que el agua circula con gran facilidad en profundidad y se forma un bulbo alargado verticalmente como se muestra en la Figura 4 (Hao *et al.*, 2007), el tamaño dependerá del tiempo que tenga el gotero funcionando en ese suelo. De manera contraria en suelos donde predomina la arcilla el agua se extiende de forma lateral más que en profundidad, debido a su gran cantidad de microporos, esto genera un bulbo con forma achatada en donde el agua cuesta que ingrese en profundidad al perfil. Si combinamos estos dos tipos de suelo tendremos un suelo franco de partículas mixtas entre gruesas, medias y pequeñas, por lo que el bulbo húmedo tendrá la forma y características de ambos (Fuentes, 1992).

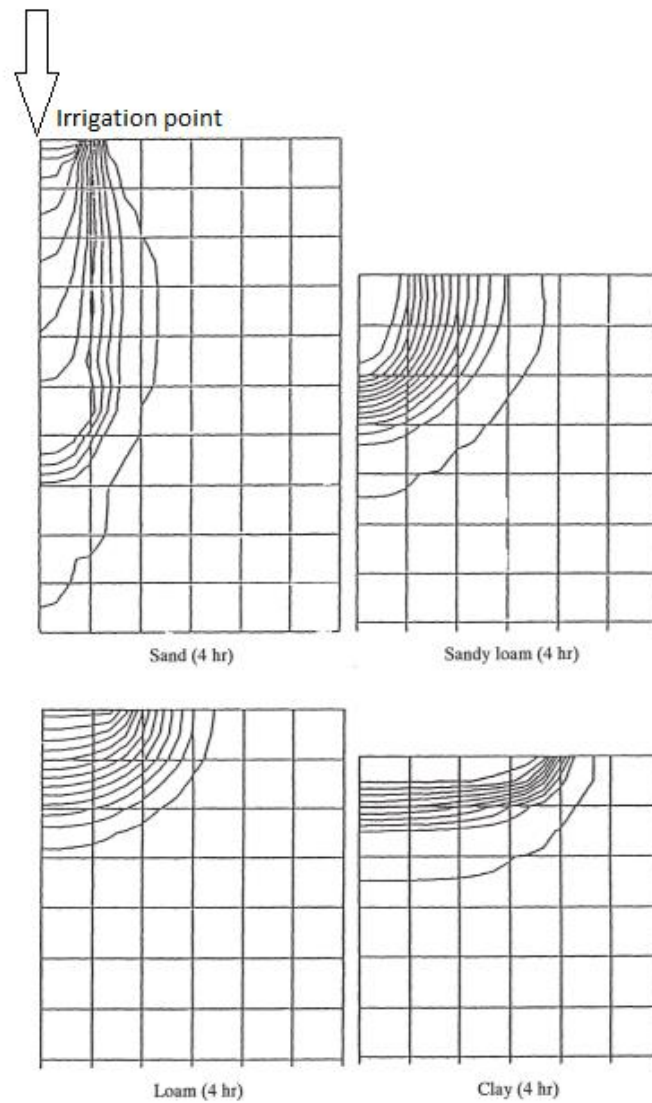


Figura 4. Bulbos de mojado según textura del suelo, luego de un riego de 4 horas, con descarga de $1 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$. (Fuente: Hao *et al.*, 2007).

Si bien cada caso es particular, en el Cuadro 1 se muestra algunos diámetros de mojado referenciales para distintos tipos de suelo y profundidad de raíces.

Cuadro 1. Diámetros referenciales de bulbo de mojamamiento según textura del suelo y profundidad de raíces.

Profundidad de raíces y textura del suelo	Grado de estratificación del suelo		
	Homogéneo	Estratificado	En capas
Diámetro de mojado (m)			
Profundidad = 0,8 m			
Arenoso	0,50	0,80	1,10
Franco	1,00	1,25	1,70
Arcilloso	1,10	1,70	2,00
Profundidad= 1,7 m			
Arenoso	0,80	1,50	2,00
Franco	1,25	2,25	3,00
Arcilloso	1,70	2,50	2,50

(Fuente: Pizarro, 1996)

b) Descarga de los emisores y volumen de agua a reponer.

Pizarro (1996) describe la forma como los emisores dejan fluir gota a gota el agua sobre una superficie puntual de suelo, formando un pequeño charco o disco de suelo saturado, y su radio va extendiéndose a medida que el riego continúa. El tamaño del charco depende del caudal que sale por el emisor: a mayor caudal corresponde una superficie mayor del charco y, por tanto, un bulbo más extendido en sentido horizontal (Pizarro, 1996).

Gil-Marín (2001) indica que el diseño de un sistema de riego por goteo comienza con la determinación del caudal y número de emisores necesarios para mojar un determinado volumen de suelo. Para esto es de suma importancia y necesario tener una buena estimación de la forma y dimensiones del bulbo húmedo formado por un emisor, la cual depende de la textura, del volumen y caudal de agua aplicado por el emisor. De lo anterior se desprende que el patrón de mojado depende de una serie de factores, lo cual dificulta las estimaciones teóricas.

La Figura 5 (Pizarro, 1996) muestra cómo varía la forma y tamaño del bulbo húmedo en dos suelos distintos, aplicando la misma cantidad de agua con goteros de diferente caudal. En un suelo arenoso, con un gotero de bajo caudal ($4 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$) la forma del bulbo húmedo tiende a ser de manera vertical, mientras que utilizando un gotero de alto caudal ($20 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$) la forma del bulbo húmedo tiende a ser de manera horizontal y vertical. Por el contrario, si el suelo es arcilloso o franco, la forma del bulbo húmedo para un gotero de bajo caudal ($4 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$) tiende a ser horizontal y vertical. Usando un gotero de alto caudal ($20 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$) la forma que puede tener el

bulbo definitivamente es más horizontal, ya que el suelo recibe más agua de la que éste puede infiltrar, generándose un desplazamiento hacia los lados del gotero (Pizarro, 1996).

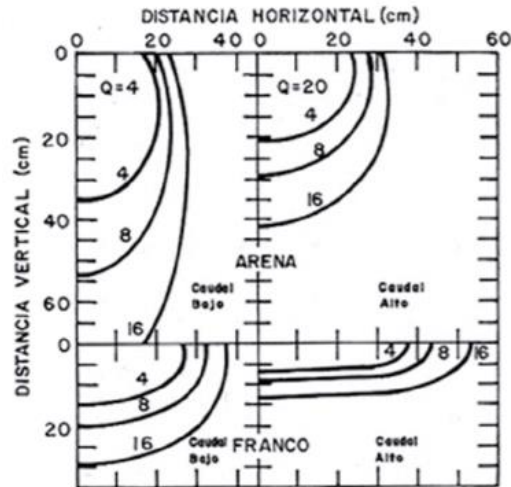


Figura 5. Bulbo húmedo para dos tipos de suelo en función del caudal del gotero y tiempo de riego (Pizarro, 1996).

El porcentaje de superficie mojada (P) en este sistema de riego, indica que solo una fracción del suelo está humedecido, esta fracción depende del frutal, suelo y caudal de los emisores. En zonas áridas y semiáridas el valor de P no debe ser menor que 33% y para regiones de riego complementario donde las precipitaciones son aportes significativos de agua para la planta, puede ser reducido hasta 20% (Karmeli *et al.*, 1985).

$$P = \frac{Am \times 100}{A}$$

Am : Área mojada por el emisor.

A : área que corresponde el espaciamiento.

Para tener claro el volumen de agua a reponer es necesario saber el requerimiento real de agua (V_t) en litros por día por árbol, el cual se puede determinar multiplicando el marco de plantación correspondiente por la evapotranspiración actual (Holzapfel, 1997) dividido por la eficiencia de aplicación. Así:

$$V_t = \frac{ET \cdot Sp \cdot Sh}{Ea}$$

V_t : Volumen total de agua (L/día/árbol).

Sp: espaciamiento de árboles en la hilera (m).

Sh: espaciamiento entre hileras (m).

Ea: eficiencia de aplicación.

Luego de esto es necesario saber cuántos emisores se destinarán por planta (N), se debe considerar el volumen requerido a aplicar asociado a las horas de operación y el caudal del emisor. Así:

$$N = \frac{Vt}{qe * NHR}$$

NHR: número de horas de riego al día que opera la subunidad.

qe: descarga o caudal del emisor (L·h⁻¹).

El área de humedecimiento para un determinado número de emisores fue establecida con el criterio de humedecer al menos a un tercio (33%) del área correspondiente al marco de plantación, cuando se trata de frutales. Para la determinación del número de emisores necesarios para satisfacer el porcentaje de suelo mínimo a humedecer se pueden utilizar emisores de 2, 4 y 8 L·h⁻¹. Karmeli *et al.* (1985) han desarrollado ecuaciones que permiten determinar el diámetro humedecido de los emisores en distintos tipos de suelos, conociendo la descarga. Así para un suelo arcillo limoso la relación es:

$$DH = 0,7 + 0,11qe$$

DH = diámetro de humedecimiento (metros).

qe= descarga o caudal del emisor (L/h).

c) Distancia entre emisores.

Fernández (2010), menciona que son los elementos de la red que producen y controlan la salida de agua desde los laterales. Lo más usual es que los emisores estén situados a cierta distancia unos de otros, por lo que la salida del agua se produce de manera discreta a lo largo del lateral de riego formando los bulbos húmedos (Fernández, 2010).

Se recomienda que la distancia de los goteros en la línea estén entre los 30 y 50 cm unos de otros, para humedecer el camellón completo, ya que la profundidad efectiva de las raíces se sitúa principalmente en los primeros 60 cm (Pizarro, 1996).

Según Fernández (2010) los goteros deben contar con las siguientes características:

- Caudal relativamente bajo, pero uniforme y constante, siendo poco sensibles a las variaciones de presión.

- Diámetro y velocidad de paso de agua, suficiente para que no se obture fácilmente.
- Fabricación robusta y poco costosa, de esta manera podrán resistir la agresividad química y ambiental.
- Uniformidad de fabricación perfecta.
- Estabilidad de la relación caudal/presión a lo largo de su vida.
- Poca o nula sensibilidad a los cambios de temperatura.
- Reducida pérdida de carga.

Este distanciamiento debe asegurar un traslape de los bulbos húmedos, la disposición de los emisores tiene que ser de tal manera que los bulbos se traslapen, de lo contrario las raíces tendrán dificultades en atravesar la zona seca, situada entre bulbos de mojado (Rivulis Irrigation Ltda, 2019). Se puede colocar los goteros a una mayor distancia, pero se debe tener un mayor control en el manejo del sistema. En la Figura 4 (Rivulis Irrigation Ltda, 2019) que se presenta a continuación, se grafica a lo que se debe apuntar por planta al establecer el número de emisores por cada una de ellas, la cantidad de emisores por planta definidos no deben formar bulbos independientes, sino que deben formar un solo gran bulbo.



Figura 6. Espaciamiento correcto de emisores para lograr un gran bulbo por planta (Fuente: Rivulis Irrigation Ltda., 2019).

Chipana (2009), define al porcentaje respecto al radio del bulbo húmedo, dicho porcentaje debe estar entre el 15% y el 30%, la separación de emisores para que se dé un determinado solape puede ser estimado mediante la ecuación:

$$Se = r(2 - a/100)$$

Donde:

Se = separación entre emisores (m)

r = radio del bulbo húmedo (m)

a = porcentaje de solapamiento (%)

d) Número líneas de riego

En un estudio realizados por Sellés *et al.* (2013) en el Valle del Aconcagua, se determinó que el volumen explorado por las raíces es mayor al suelo que normalmente humedece 1 línea de goteo, este nivel de exploración es inducido probablemente por las lluvias invernales y el movimiento de la línea hacia la entrehilera. Como el sistema radical logra colonizar lateralmente hasta el 70 a 80% de la distancia entre hilera en algunos casos, se ha llegado a la conclusión que una línea de riego no es suficiente para mojar la mayor parte del sistema radical, lo que se traduce que durante la temporada una gran parte del sistema se mantiene en suelo seco. Esto se genera un déficit hídrico de carácter acumulativo, lo que se reflejará en una caída del potencial hídrico xilemático durante la temporada (Sellés *et al.*, 2013).

Sellés *et al.* (2013) indican que una mejor distribución del volumen del agua aplicada sobre el parronal, mediante el uso de una doble línea de riego, permite ampliar el área de suelo mojada, de esta manera es posible saciar la necesidad hídrica que queda en la entre hilera, esto permite tener a las plantas en un óptimo estado hídrico durante la temporada. Trabajos previos realizados en el Valle de Aconcagua por Sellés *et al.* (2003), mostraron que, al aumentar el área de suelo mojado, aumentaba la cantidad de raíces y, como consecuencia, la producción. En relación a esto, Ruiz *et al.* (2004) muestran que, al aumentar la densidad del sistema radical, disminuye la incidencia de baya blanda.

e) Eficiencia agronómica del riego (Eu)

La Comisión Nacional de Riego (2014) define la eficiencia agronómica del riego como el producto de la eficiencia de aplicación, la eficiencia del almacenamiento y la eficiencia de distribución (Coeficiente de Uniformidad) del agua en el suelo, por lo que el modelo de cálculo utilizado es el siguiente:

Eficiencia agronómica = Ef. aplicación x Ef. Almacenamiento x Ef. distribución

La eficiencia de aplicación determina la parte del agua que no es retenida en la zona radical, en relación al total del agua aplicada en el suelo (Antúnez *et al.*, 2010). Los sistemas de riego por goteo alcanzan eficiencias teóricas del orden del 90% al 95% (Antúnez *et al.*, 2010).

$$Ef.Apl = \frac{Agua\ aplicada - Agua\ no\ retenida}{Agua\ aplicada}$$

La eficiencia de almacenamiento se define como la relación entre el agua almacenada en un volumen de suelo, como efecto del riego, y el agua necesaria para llevar ese mismo volumen de suelo hasta capacidad de campo, en toda la profundidad de arraigamiento del cultivo (CNR, 2014). Por lo tanto, para esta

eficiencia de almacenamiento se asumirá que luego del riego todo el suelo del bulbo al ser humectado queda en capacidad de campo, por lo que su eficiencia de almacenamiento sería máxima, ósea 1.

$$Ef. Alm = \frac{Volumen\ de\ agua\ almacenado}{Volumen\ de\ agua\ necesario\ para\ CC}$$

La eficiencia de distribución se define como la relación que existe entre el promedio de profundidad alcanzada por el agua en el perfil de suelo, durante el riego, y la desviación de este promedio, para un número de puntos específicos de muestreo (CNR, 2014). En otras palabras, determina la uniformidad de entrega de agua por los emisores (goteros o microaspersores) al suelo (Antúnez *et al.*, 2010). Para tener una distribución eficiente del agua, el coeficiente de uniformidad (CU) deber ser lo más cercano al 100% y no inferior a 90% (Liotta, 2000).

$$Ef. Dist = 1 - \frac{\sum |x - M|}{n * M}$$

Donde:

“x”, corresponde a la lámina de agua almacenada en el perfil del suelo en cada punto de muestreo.

“M”, representa la lámina de agua promedio infiltrada en el total de los puntos de muestro.

“n”, es el número de puntos de muestreo.

$$CU = \frac{q_{25}}{q_m} \times 100$$

Donde:

“ q_m ”, es el caudal promedio de una instalación de riego.

“ q_{25} ” es el caudal medio de los emisores que constituyen el 25% que distribuye el caudal más bajo.

Por lo anterior la demanda bruta de agua que necesita un cultivo bajo riego por goteo, quedara definida por la multiplicación entre la ETc y Eu.

$$ETc \times (Ef. Apl \times Ef. Alm \times Ef. Dist) = Demanda\ Bruta$$

Consideraciones para establecer un protocolo para el uso de sonda TDR en calicata

Considerando la información expuesta en esta primera parte y el desafío de generar un protocolo para el uso de la sonda TDR en calicata para estimar la frecuencia de riego en un suelo de texturas medias, podemos señalar que las principales consideraciones a tomar en cuenta respecto a la raíz y el bulbo de mojado usando 2 líneas de goteo son:

- 1) La profundidad de raíces efectivas debe ser equivalente a una profundidad de 60 cm.
- 2) El ancho de bulbo debe tener un diámetro de 80 cm en superficie (40 cm a cada lado del tronco) y equivalente a 120 cm a los 60 cm de profundidad, en suelos de textura media.
- 3) La eficiencia agronómica de riego (Eu) que dependerá de cada campo, pero se debe esperar acercarse a los valores óptimos:
 - Ef. Aplicación de 95%.
 - Ef. Almacenamiento de 100%.
 - Ef. Distribución 90%.

Parte 2. Protocolo para el uso de equipos TDR en calicata, como herramienta para la determinación de la frecuencia de riego

Aspectos prácticos al usar el equipo TDR

El daño que generalmente sufre este equipo es en los vástagos o sondas de puntas delgadas. Esto sucede por intentar de evaluar en sectores muy compactados o que una piedra se trabe entre los vástagos o puntas. Por esto es importante no forzar los vástagos contra el perfil de suelo, si estos no entran con una fuerza moderada es recomendable hacer la medición unos centímetros hacia el costado.

Es recomendable fortalecer las calibraciones de fábrica con evaluaciones en el suelo del campo donde se trabajará. Por lo tanto, es importante evaluar condiciones crecientes de contenido de agua en el suelo con el equipo y coleccionar las muestras para ser llevada a un laboratorio especializado. Lo mismo es recomendable para el caso de la conductividad eléctrica.

Ubicación de la calicata en el parronal

Por definición, una calicata es un corte vertical en el suelo que permite realizar una inspección para obtener información de algunas de sus propiedades y dinámicas físicas, químicas, y biológicas como también de su descripción morfológica permitiendo determinar la aptitud frutal del suelo para llevar a cabo una plantación (Carrasco *et al.*, 2009). De la misma forma y una vez establecido el huerto, puede ser utilizada por productores y asesores para el control subjetivo del riego (Carrasco *et al.*, 2009).

La construcción de una óptima calicata demanda bastante tiempo, es por esto que la selección del lugar donde esta se realice, para una interpretación adecuada, debe cumplir con algunos requisitos, considerando siempre que la unidad a evaluar es el “Sector de Riego”:

- El sector donde se realiza la calicata debe ser representativa de la unidad descrita o del sector de riego, para esto, es importante recorrer el predio observando su topografía y en función de la información entregada por los productores, agrupar inicialmente sectores similares (Callejas *et al.*, 2014).
- Se debe considerar la variedad o sectores que presenten sintomatología visual similar, lo que puede ser apoyado por fotografías aéreas o imágenes satelitales. Se debe tener especial atención con las plantas, ya que en ellas es donde se ven los síntomas de posibles problemas en el huerto, como nulo crecimiento vegetativo, inadecuado crecimiento de los brotes, hojas pequeñas, colores anormales de hojas, defoliación temprana, mala calidad y baja producción de fruta (Callejas *et al.*,

2014). En resumen, se debe elegir una planta representativa del sector de riego y de, un adecuado potencial productivo.

- Como se muestra en la Figura 9 las dimensiones correctas para construir una calicata (Callejas *et al.*, 2014) son las siguientes:
 - A) Distancia desde el tronco: se debe realizar en forma perpendicular a la sobre hilera a 40 centímetros del tronco de la planta.
 - B) Profundidad de la calicata: debe tener 1 metro de profundidad (según el suelo lo permita), para facilitar el trabajo dentro de ella.
 - C) Ancho de la calicata: su ancho debe ser de 140 a 160 cm (80 cm desde el tronco para cada lado de la entrehilera).

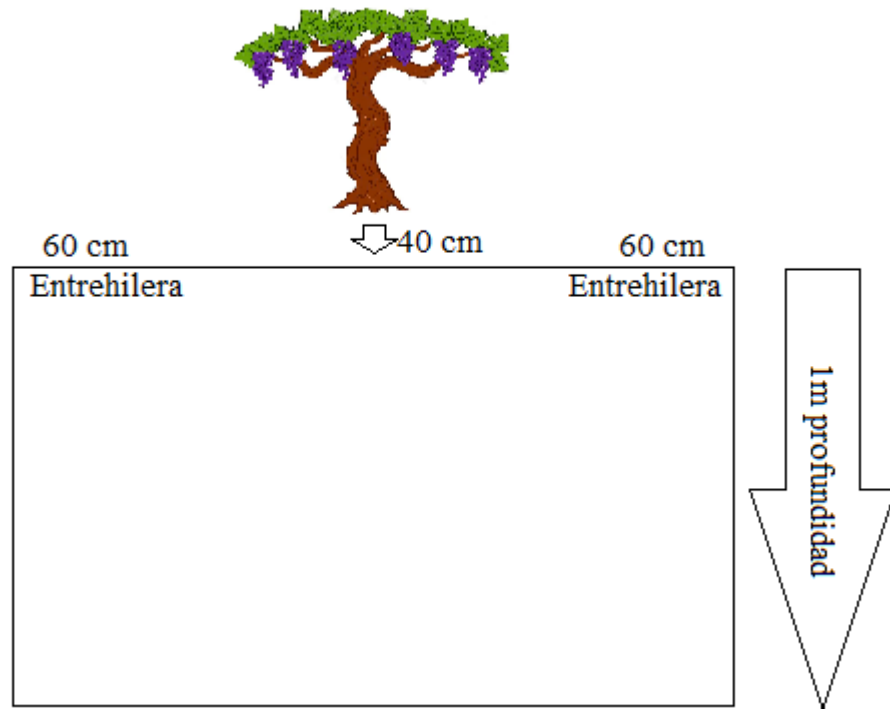


Figura 9. Dimensiones referenciales para construir una calicata óptima para ser evaluada con equipo TDR.

Para lograr una correcta lectura del suelo con el equipo TDR es necesario seguir una serie de pasos e instrucciones (Callejas *et al.*, 2014).

- 1) Se deben construir las calicatas justo antes de su evaluación (no usar calicatas antiguas).

- 2) Las evaluaciones en la pared de la calicata deben ser normalmente cada 10 a 20 cm a cada lado del tronco, tomando a este como punto cero. En profundidad, se debe considerar cada 10 a 20 cm (Ejemplo: 5, 15, 25, 35, 45 y 55 cm de profundidad). Se aconseja usar una malla (Figura 10, izquierda) para lograr una mayor precisión y orden en las mediciones, de esta manera se podrá realizar una evaluación sistemática del contenido de agua en el bulbo de mojamiento, utilizando equipos TDR.



Figura 10. Izquierda, malla de puntos utilizada para realizar mediciones de humedad con TDR dentro de una calicata (Callejas *et al.*, 2014). Derecha, listones de madera referenciales.

- 3) Se propone utilizar una plantilla de registro de datos, ya sea en papel o digital.
- 4) Posteriormente se debe hacer ingreso a la calicata y comenzar a realizar las mediciones con el TDR siguiendo un orden, de arriba abajo o desde izquierda a derecha del perfil, para facilitar la obtención de los datos.
- 5) Sacar la malla y dejar expuesta las raíces usando un mini rastrillo, para proceder a fotografiar la pared de la calicata con las raíces a la vista. Usar un listón de madera bicolor (con franjas rojo y blanco de 10 cm cada una) de 1m de largo a modo de referencia (Figura 10, derecha), para mejorar la interpretación de las fotografías.
- 6) Las evaluaciones deben ser digitalizadas en una planilla de cálculos para luego ser procesadas, por ejemplo, utilizando el graficador Sigmaplot.

- 7) Adicionalmente se procede a realizar cálculos para estimar la frecuencia de riego, ocupando la función de agotamiento del agua fácilmente disponible, que se propone más adelante.

Momentos a evaluar con TDR

- a) Antes de un riego

Es uno de los momentos más importantes pensando en la frecuencia. Se realiza antes de la programación de un nuevo riego (umbral de riego) permitiendo al agricultor estimar el contenido de agua en el bulbo de humectación del suelo, justo antes de un nuevo riego. Se podrá corroborar si la frecuencia está definida correctamente en base al umbral de riego previamente establecido (Candia y Ferreyra, 2015).

- b) Entre riegos

Al evaluar el contenido de agua en el suelo entre riegos, se puede realizar un control de su comportamiento, pudiendo definir zonas de mayor presencia de raíces activas, debido a un mayor grado de agotamiento de agua desde el suelo, en otras palabras, aquellas zonas que tengan un valor inferior al promedio de las mediciones del bulbo, será el reflejo de la zona activa de raíces (Callejas *et al.*, 2014).

- c) Después de un riego

Permite controlar el tiempo de riego, estimando a la profundidad que está llegando el frente de mojado, así como la conformación del bulbo, principalmente los registros de lateralización según los tiempos y frecuencias de riego (Candia y Ferreyra, 2015). Adicionalmente, esta evaluación podrá ayudar a definir si la eficiencia de almacenamiento es alta (igual a 1), reflejando que después del riego y pasado el periodo de percolación por efecto de la gravedad, todo el suelo del bulbo quedó a capacidad de campo (Candia y Ferreyra, 2015).

Las evaluaciones logradas a través de esta medición y al relacionarlas con datos de ETo obtenidos de estaciones climáticas y los Kc de las vides para los estados fenológicos de las evaluaciones, permitiría realizar una estimación de la cantidad de días a esperar para volver a regar.

Es importante considerar que, si la evaluación se va a realizar en forma permanente como parte de los manejos del campo, es recomendable partir con la calibración que propone el equipo según tipo de suelo, pero en paralelo realizar una calibración local. Se debe evaluar en la calicata con el equipo y en paralelo tomar muestras de suelo de las calicatas evaluadas (por sector de riego) y mandarlas a laboratorio, con el objetivo de generar una curva de ajuste entre el contenido volumétrico que determina el TDR y los valores reales que se obtienen en laboratorio. De esta

manera, se mejora la exactitud de la determinación de la frecuencia con esta metodología, al realizar el balance.

Ejemplo de la representación gráfica de los datos obtenidos con el TDR 150

Luego de haber obtenido los datos en una calicata, se procede a generar una imagen del bulbo de mojamiento (Figura 11), en donde se puede notar en este caso que los primeros centímetros del perfil poseen un bajo contenido de agua, queda evidenciado también los sectores en donde se concentran los sitios de raíces activas, representado por colores verdes que representan un menor contenido volumétrico de agua que colores azules.

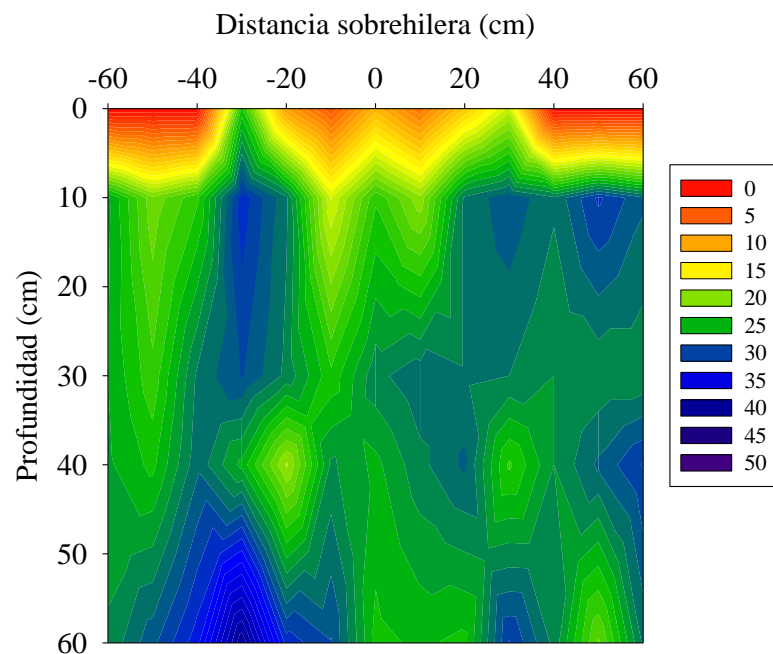


Figura 11. Representación gráfica del contenido volumétrico (θ) de agua en el bulbo de mojamiento medido en punto de recarga en un perfil de suelo de textura media. Los colores de la grafica representan dicho contenido volumétrico.

Función de agotamiento y planilla de cálculos automatizada

Las evaluaciones logradas con el TDR 150 deben ser correlacionadas con datos de ET_o obtenidos de estaciones climáticas cercanas y con los K_c de las vides para los estados fenológicos de las evaluaciones (FAO, 2006), de manera de estimar la frecuencia de riego. Si la evaluación se realiza justo antes de un riego y se considera la eficiencia agronómica del riego (demanda bruta), podría estimarse el tiempo de riego óptimo.

Stock de agua en el bulbo de humectación: A continuación, se realizará la propuesta teórica basada en la información de la revisión bibliográfica y del cálculo de la lámina de

agua disponible, proponiendo la profundidad efectiva de raíces, ancho del bulbo y volumen total de suelo. Con esta información se propone una función de agotamiento de agua fácilmente disponible en relación a la demanda hídrica.

Para la generación de una plantilla de calculos, que permita estimar la oferta de agua disponible por el bulbo de humectación, evaluado con el equipo TDR, se quiere de los siguientes parámetros:

- 1) Profundidad del suelo efectiva de acuerdo al crecimiento de las raíces: considerando la profundidad efectiva del sistema radical, se propone utilizar los primeros 60 cm de suelo, el cual es representado en la Figura 12 por "Z".
- 2) Ancho del bulbo: se estableció un trapecio como figura geométrica representativa del área mojada. Este trapecio tiene un ancho superior " b " de 0,8 m y uno inferior " B " de 1,2 m a $Z = 60$ cm. Las aristas laterales del trapecio van cayendo de forma diagonal.
- 3) Altura de cada horizonte: como la densidad de puntos a evaluar con TDR en calicata es a 20×10 cm de profundidad, se propone que cada capa de suelo tenga una altura de 10 cm, los cuales están representados por z_1 , z_2 , z_3 , z_4 , z_5 y z_6 en la Figura 12.

Estas dimensiones fueron apoyadas según el tamaño que podría tener el bulbo de mojamamiento que estableció Pizarro (1996).

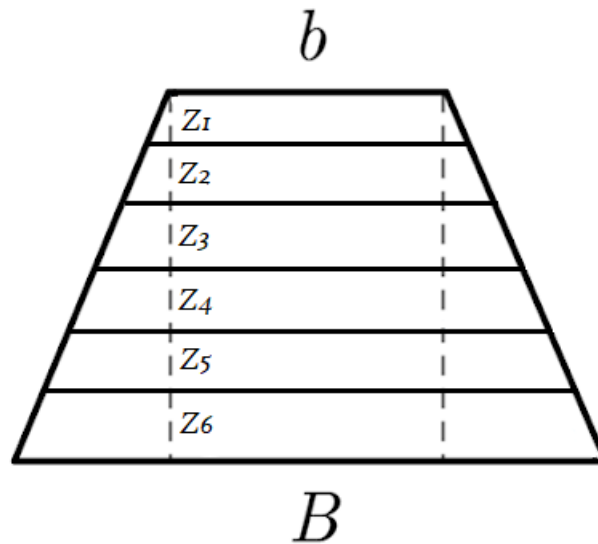


Figura 12. Representación gráfica del área del bulbo de mojamamiento dividido en 6 horizontes de 10 cm cada uno.

Para obtener el porcentaje de suelo efectivo y considerando lo anteriormente señalado, se procedió a calcular el área utilizada en el suelo por el bulbo de mojamamiento. Considerando un marco de plantación 3×3 m ($1111 \text{ plantas} \cdot \text{ha}^{-1}$), y asumiendo que se tiene un bulbo

parejo en toda la hilera de plantación, se calculó el volumen de suelo húmedo y volumen de suelo por hectárea, ambos a profundidades de 0,6 metros (Cuadro 2).

Cuadro 2. Parámetros y valores utilizados para el cálculo de porcentaje de suelo efectivo del bulbo de mojamiento

Parámetro	Valor
Ancho superior trapecio " <i>b</i> " (m)	0,8
Ancho inferior trapecio " <i>B</i> " (m)	1,2
Altura trapecio " <i>h</i> " (m)	0,6
Marco plantación (m)	3 x 3
Plantas/ha (unidad)	1.111
Número de hileras (unidad)	33
Largo de hileras (m)	100
Volumen suelo húmedo ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	2.016
Volumen de suelo total ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	6.000
Suelo efectivo del bulbo (%)	33,6

Posteriormente, se fijaron 6 rangos de profundidad, 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 30 cm, 30 a 40 cm, 40 a 50 cm y 50 a 60 cm. Con este método se generaron "Z" de 10 cm de profundidad, y con ello se procedió a estimar el *stock* de agua efectivo en esa capa de suelo, en relación al porcentaje del bulbo que cada una representa (Cuadro 3). Finalmente, la sumatoria de todas las capas, hasta la profundidad efectiva, entregó la oferta de agua del bulbo.

Para estos efectos se consideró:

- Capacidad de campo (**CCs**): es el contenido de agua presente en el suelo después de ser mojado abundantemente y dejado drenar por 24 (arena) a 48 horas (arcilla), en este caso se determinó con sonda y simultáneamente fue evaluada con el TDR (Zúñiga, 2014). Se recomienda realizarlo en invierno luego de una lluvia importante o luego de un importante riego, asegurándose que el bulbo de humectación llegue a nivel de saturación.
- Punto de recarga (**PR**): o Umbral de Riego, corresponde al porcentaje de agua aprovechable el cual podrá ser determinado por el productor o asesor (Zúñiga, 2014). Pero se recomienda que se apoyen con las Líneas de Gestión generadas por una sonda de capacitancia de lectura continua (Ej: Enviroscan) o, con el uso de una Bomba de Scholander y de acuerdo a los umbrales óptimos de potenciales xilemáticos para la especie.

- **NAP:** Nivel de Agotamiento Permisible teórico, corresponde a la cantidad de agua entre capacidad de campo y punto de recarga, la cual esta fácilmente disponible para la planta (Zúñiga, 2014).

Cuadro 3. Ejemplo de cálculo de *stock* de agua efectivo en el bulbo de la capa z1 (10-20 cm).

Parámetro	Valor	
CCs con TDR.	35,00	%
Contenido de agua en el suelo en PR con TDR	24,13	%
Contenido de agua almacenada según NAP	21,00	%
<i>Stock</i> de agua práctico según TDR (CCs - PR)	108,71	mm/m
<i>Stock</i> de agua teórico según NAP (CCs - NAP)	140,00	mm/m
Cálculo de <i>stock</i> de agua en los 10 cm	10,87	mm
<i>Stock</i> de agua efectivo en el bulbo	1,74	mm

CCs: Capacidad de Campo, PR: Punto de Recarga; NAP: Nivel de agotamiento Permisible teórico.

Estimación de la demanda de las vides. Se debe obtener la ETo de la localidad donde se ubica el parronal, en lo posible de plataformas digitales que en la actualidad proyectan la ETo de la semana. Posteriormente y tal como se mencionó, se procede a definir el Kc de la vid de mesa (Ferreyra *et al.*, 2001) para el momento en que se esta evaluando, obteniendo la ETc en mm/día.

Se debe considerar la eficiencia agronómica del riego que se está utilizando, compuesto por:

Eficiencia de aplicación (95%), eficiencia de almacenamiento (100%) y eficiencia de distribución o coeficiente de uniformidad (90%), de manera de obtener la demanda bruta a satisfacer con el riego. Es importante que en el campo se determinen cada una de estas eficiencias, para cada caso en particular.

Función de agotamiento. A partir de la información antes mencionada y a modo de resumen, se presenta la función de agotamiento a ser utilizada en la determinación de la frecuencia de riego con TDR.

$$\text{Días entre riego} = \frac{\text{Contenido de agua en el bulbo efectivo} * \text{Ef. riego}}{Kc * ETo}$$

Estudio de casos a modo de ejemplo

A continuación, se presentan los resultados de 3 unidades productivas medidas con TDR en calicata, correspondientes a campos con parronales de buena a excelente calidad de uva ubicados en la zona centro norte del país que presentan riego mediante el apoyo de sondas de capacitancia de lectura continua, sobre suelos de texturas medias.

Unidad 1. Predio ubicado en la Comuna de San Felipe, Provincia de San Felipe, Región de Valparaíso. La evaluación fue obtenida 1 día antes del riego el 12 de marzo del 2020. La variedad que se encuentra en el predio corresponde a Red Globe (sin portainjerto, en pie franco).

Planilla evaluación de la unidad se puede apreciar en el cuadro 4, en tanto la gráfica de evaluación en la figura 13.

Cuadro 4. Planilla de mediciones con TDR en punto de recarga, Región de Valparaíso.

Profundidad (cm)	Distancia entrehilera (cm)							\bar{x} Capa
	60	40	20	0	20	40	60	
-10		15,7	7,1	11,5	5,1	17,0		11,3
10	29,2	29,0	20,3	23,8	17,9	22,6	26,2	24,1
20	27,2	28,1	28,7	27,7	24,3	25,8	26,0	26,8
30	31,1	26,5	27,7	25,7	27,2	26,7	26,2	27,3
40	28,2	27,9	25,2	24,7	30,1	31,2	27,2	27,8
50	24,7	30,1	29,7	29,8	31,6	27,7	28,1	28,8
60	23,7	32,8	30,3	31,5	30,0	26,0	30,4	29,2

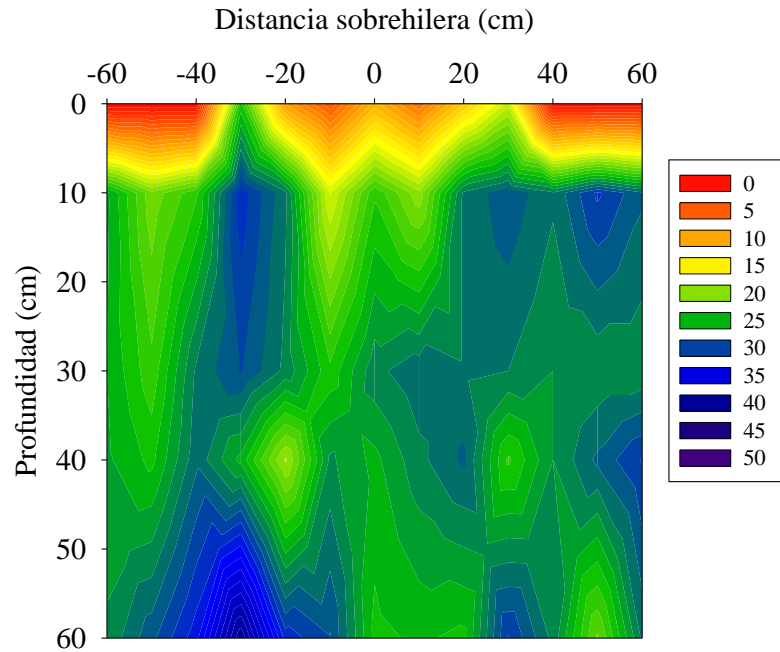


Figura 13. Representación gráfica del bulbo de mojado medido en punto de recarga en un perfil de suelo de la “Unidad 1”.

El cálculo de días entre riego para la “Unidad 1” entre los diferentes estados fenológicos fueron calculados y se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Planilla para cálculo de días entre riego.

Estado Fenológico Desde	Estado Fenológico Hasta	Kc	ET _o promedio (mm/día)	ET _c (mm/día)	Eficiencia Riego	Días entre riego
Yema	Floración	0,60	2,4	1,4	0,90	7
Floración	Cuaja	0,70	5,2	3,6	0,90	3
Cuaja	Pinta	0,92	5,7	5,2	0,90	2
Pinta	Madurez	0,95	6,2	5,9	0,90	2
Madurez	Fin de cosecha	0,85	5,5	4,7	0,90	2
Fin cosecha	Caída de hojas	0,50	2,6	1,3	0,90	8

Finalmente, en el caso de la Unidad 1 se estimó que hay un *stock* de 11,14 mm en el bulbo de mojado. En base a lo anteriormente mencionado los periodos con alta evapotranspiración de referencia y alto coeficiente de cultivo, cuaja a fin de cosecha, los días entre riego no deberían superar los 2 días, según el punto de riego que definió el *stock* de agua que existe entre punto de riego y capacidad de campo.

Unidad 2. Predio ubicado en la comuna de San Felipe, Provincia de San Felipe, Región de Valparaíso, la medición fue obtenida 1 día antes del riego el 10 de marzo del 2020. La variedad que se encuentra en el predio corresponde a Sultanina (sin portainjerto, en pie franco).

Planilla evaluación de la unidad se puede apreciar en el cuadro 6, en tanto la gráfica de evaluación en la figura 14.

Cuadro 6. Planilla de mediciones con TDR en punto de recarga, Región de Valparaíso.

Profundidad (cm)	Distancia entrehilera (cm)							\bar{x} Capa
	60	40	20	0	20	40	60	
-10		16,7	14,9	15,6	19,6	16,0		16,5
10	21,0	24,6	28,6	14,3	29,6	22,0	22,2	23,2
20	14,5	26,0	31,3	28,1	29,9	19,8	19,1	24,1
30	12,4	24,9	29,9	35,0	21,5	24,7	22,7	24,4
40	11,3	28,9	19,8	25,2	16,9	15,9	15,3	19,0
50	18,9	22,3	16,2	22,7	18,9	19,3	19,7	19,7
60	19,6	18,2	24,5	16,9	13,7	20,4	22,5	19,4

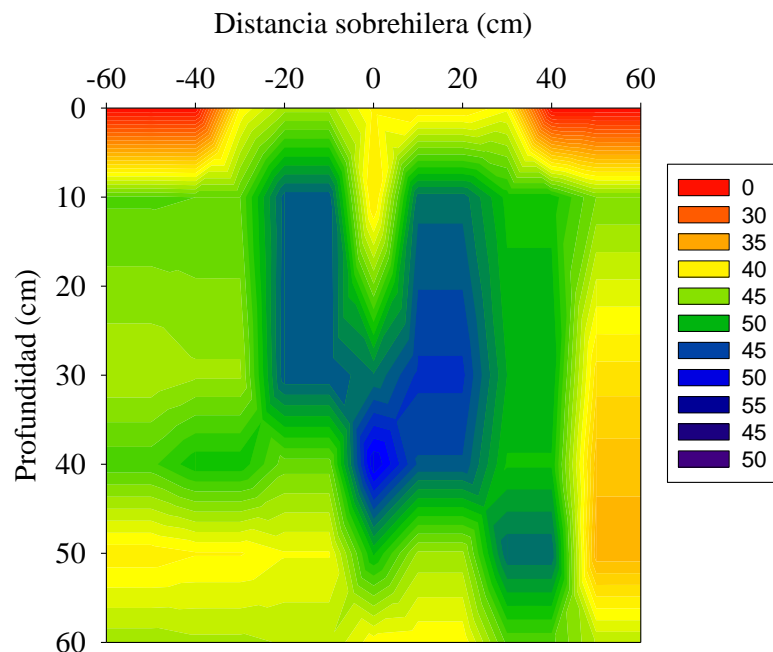


Figura 14. Representación gráfica del bulbo de mojado medido en punto de recarga en un perfil de suelo de la "Unidad 2".

El cálculo de días entre riego para la “Unidad 2” entre los diferentes estados fenológicos fueron calculados y se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Planilla para cálculo de días entre riego.

Estado Fenológico Desde	Estado Fenológico Hasta	Kc	ETo promedio (mm/día)	ETc (mm/día)	Eficiencia Riego	Días entre riego
Yema	Floración	0,60	2,4	1,4	0,9	11,0
Floración	Cuaja	0,70	5,2	3,6	0,9	4,3
Cuaja	Pinta	0,92	5,7	5,2	0,9	3,0
Pinta	Madurez	0,95	6,2	5,9	0,9	2,7
Madurez	Fin de cosecha	0,85	5,5	4,7	0,9	3,4
Fin cosecha	Caída de hojas	0,50	2,6	1,3	0,9	12,1

En el caso de la Unidad 2 se estimó que hay un *stock* de 15,78 mm en el bulbo de mojamiento. En base a lo anteriormente mencionado los periodos con alta evapotranspiración de referencia y alto coeficiente de cultivo, cuaja a fin de cosecha, los días entre riego no deberían superar los 4 días, según el punto de riego que definió el *stock* de agua que existe entre punto de riego y capacidad de campo.

Unidad 3. Predio ubicado en la Comuna de San Felipe, Provincia de San Felipe, Región de Valparaíso. La evaluación fue obtenida 1 día antes del riego el 05 de enero del 2021. La variedad que se encuentra en el predio corresponde a Sweet Saphyre (portainjerto Harmony).

Planillas de evaluación de la unidad se puede apreciar en los cuadros 8 y 9, en tanto las gráficas de evaluación en las figuras 15 y 16.

Cuadro 8. Planilla de mediciones con TDR en capacidad de campo, Región de Valparaíso.

Profundidad (cm)	Distancia entrehilera (cm)							\bar{x} Capa
	60	40	20	0	20	40	60	
-10	30,7	29,4	29,4	26,4	31,2	31,2	32,2	30,1
10	29,8	32,4	28,3	28,4	30,0	29,1	29,6	29,7
20	33,3	33,5	30,0	29,5	34,1	33,4	32,3	32,3
30	32,1	36,6	33,0	32,8	34,5	33,3	31,1	33,3
40	35,2	34,7	35,1	33,9	35,7	34,6	33,4	34,7
50	36,1	36,9	36,3	34,0	36,6	35,2	34,6	35,7
60	35,2	35,5	35,4	33,1	35,6	34,1	33,7	34,7

Cuadro 9. Planilla de mediciones con TDR en punto de recarga, Región de Valparaíso.

Profundidad (cm)	Distancia entrehilera (cm)							\bar{x} Capa
	60	40	20	0	20	40	60	
-10	26,6	27,3	23,5	18,1	28,9	27,9	25,2	25,4
10	25,7	28,5	28,1	24,3	30,0	27,2	25,6	27,1
20	30,5	30,4	29,8	25,6	36,2	32,5	31,3	30,9
30	29,0	35,5	31,9	26,5	32,7	32,4	29,1	31,0
40	34,8	33,4	34,2	26,2	34,8	29,0	29,3	31,7
50	32,3	30,7	30,5	27,5	36,4	30,2	29,8	31,1
60	31,4	29,5	29,7	26,8	35,3	29,4	28,7	30,1

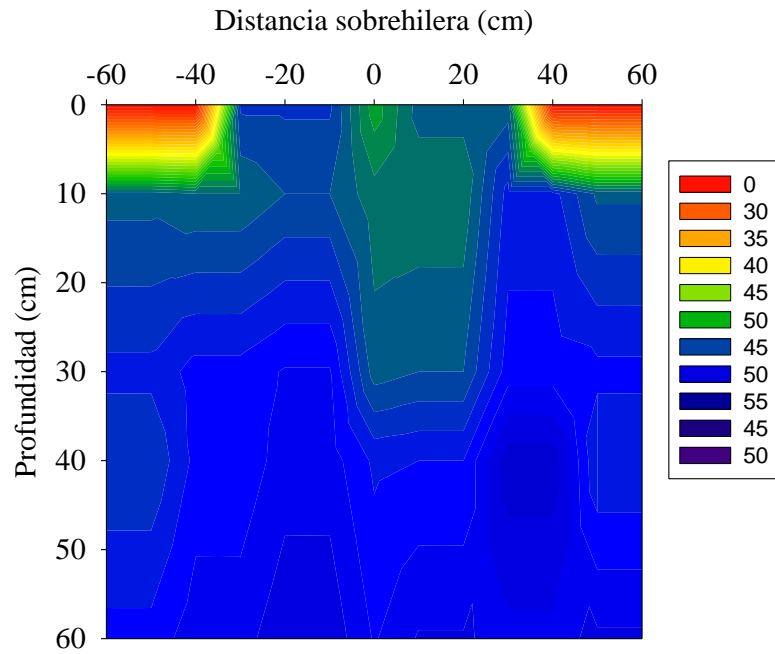


Figura 15. Representación gráfica del bulbo de mojado medido en capacidad de campo perfil de suelo de textura media.

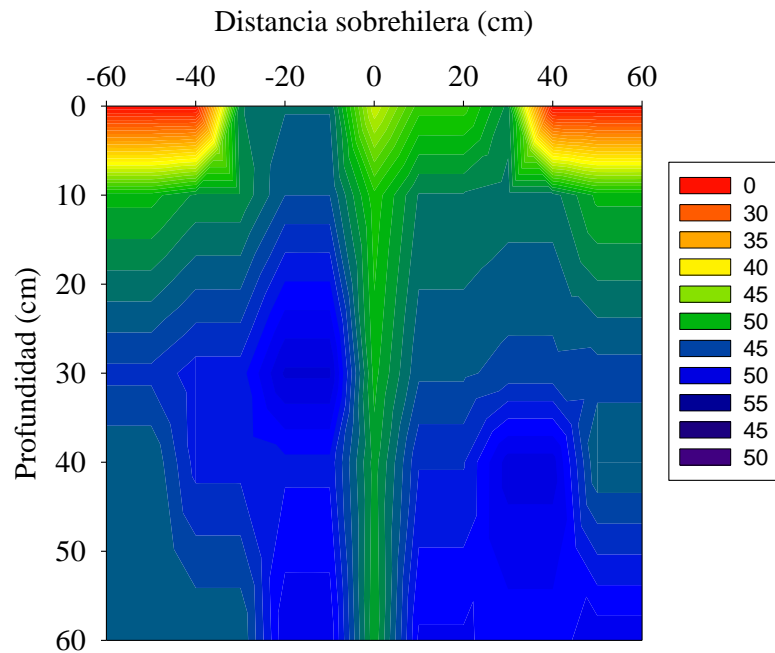


Figura 16. Representación gráfica del bulbo de mojado medido en punto de recarga en un perfil de suelo de textura media.

El cálculo de días entre riego para la “Unidad 3” entre los diferentes estados fenológicos fueron calculados y se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Planilla para cálculo de días entre riego.

Estado Fenológico Desde	Estado Fenológico Hasta	Kc	ETo promedio (mm/día)	ETc (mm/día)	Eficiencia Riego	Días entre riego
Yema	Floración	0,60	2,4	1,4	0,9	7,5
Floración	Cuaja	0,70	5,2	3,6	0,9	3,0
Cuaja	Pinta	0,92	5,7	5,2	0,9	2,1
Pinta	Madurez	0,95	6,2	5,9	0,9	1,8
Madurez	Fin de cosecha	0,85	5,5	4,7	0,9	2,3
Fin cosecha	Caída de hojas	0,50	2,6	1,3	0,9	8,3

En el caso de la Unidad 3 a diferencia de las unidades 1 y 2, se realizaron mediciones con el TDR en punto de recarga y en capacidad de campo, con la diferencia entre las mediciones se estimó que hay un *stock* de 12,06 mm en el bulbo de mojamiento. En base a lo anteriormente mencionado en los periodos con alta evapotranspiración de referencia y alto coeficiente de cultivo, cuaja a fin de cosecha, los días entre riego no deberían superar los 2 días.

CONCLUSIONES

La funcionalidad y crecimiento de las raíces están determinados principalmente por las características del suelo y un adecuado manejo del agua de riego.

El riego tecnificado limita el volumen de suelo que usan las plantas, requiriéndose para compensar esta situación un óptimo manejo del bulbo de mojado para lograr altas densidades de raíces.

Para un marco de plantación 3x3 m (1111 plantas·ha⁻¹) y asumiendo que se tiene un bulbo parejo en toda la hilera de plantación, con un ancho superior de 0,8 m y un ancho inferior de 1,2 m, con una profundidad de 0,6 m, se define que el volumen de suelo efectivo corresponde a 2016 m³·ha⁻¹.

El sitio activo de las raíces en vides se ubica entre los primeros 60 cm de suelo.

Al establecer un protocolo práctico para la estimación de la frecuencia de riego, es posible estimar los días entre cada riego de manera objetiva usando el TDR en calicata, generando una función de agotamiento del agua disponible.

Es recomendable que la información y propuestas presentadas en este documento, sea comprobada en terreno durante una temporada de trabajo para validar los parámetros establecidos.

BIBLIOGRAFÍA

Antúnez, B. y S. Felmer. 2009. Boletín del nodo de riego en el secano, Región de O'Higgins. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N°190. Litueche, Chile. Disponible en <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR36468.pdf> (Consultado en Julio de 2020).

Antúnez, A., D. Mora, y S. Felmer. 2010. Región de O'Higgins: Eficiencia en sistemas de riego por goteo en el secano. Tierra Adentro. no. 88. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/5140> (Consultado en agosto de 2021).

Antúnez, A., S. Felmer, M. Vidal, R. Morales, F. Fuentes, y E. Coz. 2015. Propiedades físico-hídricas del suelo en el cultivo del maíz grano. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N°312. Rengo, Chile. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7894> (Consultado en junio de 2021).

Apey, A. 2020. Cuencas hidrográficas y fruticultura chilena: análisis preliminar del riego u el empleo. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias – Odepa. Ministerio de Agricultura. Disponible en https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/69857/Cuencas_hidrograficas_y_fruticultura_chilena.pdf (Consultado en agosto 2021)

Barceló, J. 1990. Fisiología vegetal. Ediciones pirámide S.A. Madrid, España.

Baginsky, C., O. Seguel y A. Contreras. 2010. Impacto en la utilización de cultivos y enmiendas orgánicas sobre la funcionalidad del suelo. MAVAL. Santiago, Chile.

Bates, T.R., R. Dunst, and P. Joy. 2002. Seasonal dry matter, starch and nutrient distribution in Concord grapevine roots. HortScience (37)2, 313–316.

Benavides, C. 1992. Características y manejo del suelo en áreas potenciales de cultivo del manzano: zona centro sur y sur. P.3-11. En: Universidad de Chile. Producción y perspectivas de nuevos cultivares de manzano. Publicaciones Misceláneas Agrícolas N° 39. 107 p.

Bustos, L. 1996. Efecto del estrés hídrico y dos niveles de luminosidad sobre la fotoinhibición en el cultivo de frejol (*Phaseolus vulgaris*, L.). 81 p. Tesis Ing. Agr., Universidad de Chile, Facultad de cs. Agrarias y forestales. Santiago, Chile.

Bresler, E. 1977. Trickle-drip irrigation: principle and application to soil water management. Advances in Agronomy, 29,343-393

- Cabello, M., M. Castellanos, F. Romojaro, C. Martínez-Madrid and F. Ribas. 2009. Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates. *Agricultural of Water Management*, 96 (5), 866–874. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.006> (Consultado en marzo de 2021).
- Callejas, R., Canales, P., García. 2010. Relationship between root growth of “Thompson Seedless” grapevines and soil temperature. *Revista Chilena de investigación agrícola*, 69(4), 496-502.
- Callejas, R; Rojo, E; Benavides, C; Kania, E. 2012. Crecimiento y distribución de raíces y su relación con el potencial productivo de parrales de vid de mesa. *Agrociencia*, 46, 23-25.
- Callejas, R.; J. Navarrete; M. Rioseco. 2013. Líneas de gestión del riego: Umbrales para interpretar los datos de humedad del suelo registrados por sondas de capacitancia. *Antumapu Profesional*, 2 (3), 1-17.
- Callejas, R., J. Vera, C. Kremer, J. Covarrubias, C. Benavides, y M. Rioseco. 2014. Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Serie Ciencias Agronómicas N° 23. Santiago, Chile.
- Candia, R. y Ferreyra, R. 2015. Herramientas y métodos para monitorear la humedad en el suelo en el palto. La Cruz: Ficha Técnica INIA La Cruz. no. 02. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/67078> (Consultado: 13 junio 2022).
- Cakmak I., C. Hengeler, and H. Marschner. 1994. Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants. *Journal of Experimental Botany*, 45,1251–1257. Disponible en <https://academic.oup.com/jxb/article-abstract/45/9/1251/510129?redirectedFrom=fulltext> (Consultado en abril de 2021).
- Cakmak, I. V. 2014. ¿Por qué las plantas necesitan zinc? 3er. Congreso Internacional de Nutrición y Fisiología Vegetal Aplicadas. INTAGRI. Guadalajara, Jalisco, México.
- Chassot, A., P. Stamp., and W. Richner. 2001. Root distribution and morphology of maize seedlings as affected by tillage and fertilizer placement. *Plant Soil*, 231,123-135
- Chen, J., L. Liu. Z. Wang, Y. Zhang, H. Sun, S. Song, Z. Bai, Z. Lu, and C. Li. 2020. Nitrogen Fertilization Increases Root Growth and Coordinates the Root–Shoot Relationship in Cotton. *Frontiers in Plant Science*, 11, 880. Disponible en <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.00880/full> (Consultado en abril de 2021).

Chipana. 2009. Principios de Riego y Drenaje. IRTEC. Facultad de Agronomía UMSA. La paz, Bolivia.

Comisión Nacional del Riego. 2014. Estudio básico “diagnóstico de la eficiencia de aplicación del riego en Chile”. Santiago, Chile.

Dexter, A. 2004. Soil physical quality part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, 120(3-4),227-239. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670610300291X> (Consultado en de abril 2021).

Desmartis, D. 2012. Efecto de las aplicaciones de boro al suelo sobre la concentración foliar del elemento y el crecimiento de raíces en vid “Flame Seedless”. 27p. Tesis Ing. Agr., Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile.

Dordas, C. and P. Brown. 2000. Permeability of boric acid across lipid bilayers and factors affecting it. *The Journal of Membrane Biology*, 175, 95-105.

Eden, A., G. Alderman, and C. Baker. 1951. The effect of ground water-level upon productivity and composition of fenland Grass. *The Journal of Agricultural Science*, 41,191-202.

Emanuelsson, J. 1984. Root growth and calcium uptake in relation to calcium concentration. *Plant and Soil*, 78(3), 325-334. Disponible en <http://www.jstor.org/stable/42934585> (Consultado en mayo de 2021).

Eissenstat, D.M., L. Comas, and L. Anderson. 2001. A case of effects of canopy pruning and irrigation on Concord root dynamics. *Pennsylvania Fruit News*, 81,74-76.

Essington, M. 2003. *Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach*. CRC Press. Florida, Estados Unidos.

Evans, R., I. Wu, A. Smajstrala 2007. Microirrigation systems. En: Hoffman, G.J., Evans, R.G., Jensen, M.E., Martin, D.L., Elliot, R.L. Design and operation of farm irrigation systems. 2. ed. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers,17,632-683 p.

FAO, 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Roma, Italia. Disponible en <http://www.fao.org/3/y4690s/y4690s00.htm#Contents> (Consultado en marzo de 2021).

FAO, 2006. Evapotranspiración del Cultivo. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Italia, Roma. Disponible en <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm> (Consultado en abril de 2021).

Ferrándiz, J. 2017. Estudio del manejo del agua de riego mediante sensores de humedad. 83p. Tesis título. Universidad Miguel Hernández de Elche. Escuela Politécnica Superior De Elche. Elche, España.

Ferreira, R. y G. Sellés. 1997. Manejo del Riego en Condiciones de Restricción Hídrica. Serie INIA N° 67. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Centro Regional de Investigación La Platina. Santiago, Chile.

Ferreira, R., G. Sellés, e I. Sellés. 2001. "Riego Deficitario Controlado en Uva de Mesa". Estrategias de Riego para Enfrentar Situaciones de Escasez de Agua en Frutales. Boletín N° 60. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA. Santiago, Chile.

Fernández, R. 2010. Manual de riego para agricultores; manual y ejercicios. Instituto de investigación y formación Agraria y Pesquera. Sevilla, España.

Fuentes Yague, J. 1996. Técnicas de riego. 2da Edición. Mundi Prensa. España, Madrid.

Fieldscout. s.f. TDR soil moisture meter, product manual. 2009. Disponible en <http://www.specmeters.com/assets/1/22/6440TDR1001.pdf>

Gil, F. 1995. Elementos de la fisiología vegetal. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.

Gil, G. 2000. La producción de fruta, fruto de clima templado y subtropical y uva devino. Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

Gil-Marín, A. 2001. Forma y dimensiones del bulbo húmedo con fines de diseño de riego por goteo en dos suelos típicos de sabana. Revista UDO Agrícola 1,42-47.

Gil, I., M. Marroquin, y L. Martínez. 2012. Efecto del zinc sobre la inducción de ramas productivas en gulupa (*Passiflora edulis Sims*). Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 6,152-160. Disponible en <https://doi.org/10.17584/rcch.2012v6i2.1973> (Consultado en marzo de 2021)

Gu, J., Z. Li, Y. Mao, P. Struik, H. Zhang, L. Liu. 2018. Roles of nitrogen and cytokinin signals in root and shoot communications in maximizing of plant productivity and their agronomic applications. Plant Science 274,320–331. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.06.010> (Consultado en marzo de 2021).

- Gómez del Campo, M., C. Ruiz and J.R. Lissarrague. 2002. Effect of water stress on leaf area development, photosynthesis, and productivity in Chardonnay and Airén grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 53 (2), 138-143.
- Gómez del Campo, M., P. Baeza, C. Ruiz, V. Sotés and J.R. Lisarrague. 2007. Effect of previous water conditions on vine response to rewatering. *Vitis*, 46 (2), 51-55.
- Hao, A., A. Mariu, T. Haraguchi, and Y. Nakano. 2007. Estimation of wet bulb formation in various soil during drip irrigation. *Journal-Faculty of Agriculture Kyushu University*, 52,187-193. Disponible en <http://dx.doi.org/10.5109/9304> (Consultado en junio de 2021).
- Harris, C., H. Erickson, N. Ellis and J. Landon. 1962. Water level control in organic soil, as related to subsidence rate, crop yield and response to nitrogen. *Soil Science* 94,158-16.
- He Y., H. Lian and X. Yan. 2003. Localized supply of phosphorus induces root morphological and architectural changes of rice in split and stratified soil cultures. *Plant and Soil* 248, 247-256. Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1022351203545> (Consultado en marzo de 2021).
- Hillel, D. 1982. *Introductions to soil physics*. Academic Press. Orlando, EE. UU.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press. San Diego, EE. UU.
- Honorato, R., H. Silva y C. Bonomelli. 1990. Productividad de parronales de la Región Metropolitana y sus relaciones edáficas. *Ciencia e Investigación Agraria* 17 (3), 133-143.
- Honorato R. 2000. *Manual de Edafología (4ª Ed.)*. Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- Holzapfel, E. A. 1997. Riego por goteo y microaspersión. En: *Riego Presurizado*. Chillán: Univ. de Concepción, Fac. Ing. Agrícola, Depto. de Recursos Hídricos.
- Horn, R., and H. Fleige. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in northwest Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research*, 102(2), 201-208.
- Ibacache, A. y A. Lobato. 1995. Periodos de crecimiento de raíces en vid. *Revista Frutícola* 16(1), 23-26.
- INTAGRI. 2017. *Las Funciones del Potasio en la Nutrición Vegetal*. Serie Nutrición Vegetal Núm. 100. Artículos Técnicos de Intagri. México. Disponible en <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/las-funciones-del-potasio-en-la-nutricion-vegetal>

INTAGRI. 2017. Fósforo y Calcio en el Crecimiento de la Raíz. Serie Nutrición Vegetal. Núm. 104. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 3p. Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/fosforo-y-calcio-en-el-crecimiento-de-la-raiz>. (Consultado en abril de 2021)

Jury, W., W. Gardner, and W. Gardner. 1991. Soil physics. 5ª ed. John Wiley and Sons. New York, USA.

Karmeli, D., G. Peri, M. Todes. 1985. Irrigation Systems: Design and operation. Oxford University Press. Cape Town, England.

Kliwer, W.M., and R.Fuller. 1973. Effect of time and severity of defoliation on growth of roots, trunk, and shoots of "Thompson Seedless" grapevines. Am. J. Enol.Vitic. (24)2, 59-64.

Lagos, O., H. Uribe, y J. Silva. 2004. Riego en frutales y vides. No.120. Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillan, Chile. Disponible en: <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7048> (Consultado en abril de 2021).

Lanyon, D., A. Cass, and D.Hansen. 2004. Effect of soil properties on vine performance. Report No. :34/04. CSIRO Land and Water. Adelaide, Australia.

Leigh, R., and G. Wyn Jones. 1984. A Hypothesis relating critical potassium concentrations for growth to the distribution and functions of this ion in the plant cell. New Phytologist. 97,1-13. Disponible en <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1984.tb04103.x> (Consultado en junio de 2021)

Liotta, M. 2000. Evaluación del coeficiente de uniformidad en equipos de riego presurizado. INTA. San Juan, Argentina.

López, J., J. Hernández Abreu, A. Pérez, J. González. 1992. Riego localizado. MAPA-IRYDA. Madrid, España.

López-Bucio, J., A. Cruz-Ramírez and L. Herrera-Estrella. 2003. The role of nutrient availability in regulating root architecture. Current Opinion in Plant Biology, 6,280-287.

Marschner, H. 1986. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. Toronto, Canada.

Mojid, M., y H. Cho. (2004). Evaluation of the time-domain reflectometry (TDR)-measured composite dielectric constant of root mixed soils for estimating soil-water content and root density. Journal of Hidrology, 295, 263-275.

- McKenrey, M. 1984. Grape root phenology relative to control of parasitic nematodes. *American Journal of Enology and Viticulture*, 35(4), 206-210.
- McMichael, L., and J.J Burke. 1998. Soil temperature and root growth. *HortScience* 33(6),947-950.
- Morlat, R., and A. Jacquet. 1993. The soil effects on the grapevine root system in several vineyards of the Loire valley (France). *Vitis*, 32, 35-42.
- Morano, L., and M. Kliewer. 1994. Root distribution of three grapevine rootstocks grafted to Cabernet Sauvignon grown on a very gravelly clay loam soil in Oakville, California. *American Journal of Enology and Viticulture*, 45, 345-348.
- Mounzer, Oussama H., Vera, Juan, Tapia, Luis M., García-Orellana, Yelitza, Conejero, Wenceslao, Abrisqueta, Isabel, Ruiz-Sánchez, Ma. Carmen, & Abrisqueta-García, José Ma. 2008. Irrigation scheduling of peach trees (*Prunus persica* L.) by continuous measurement of soil water status. *Agrociencia*, 42(8), 857-868
- Mullins, M. G., A. Bouquet and L. E. Williams. 1992. *Biology of the grapevine*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Muñoz-Carpena, R., S. Shukla, and K. Morgan. 2012. Field devices for monitoring soil water content. Southern Regional Water Program. Department of Agriculture. Florida, USA. Disponible en http://www.bae.ncsu.edu/topic/go_irrigation/docs/Field-devices-monitoring-.pdf. (Consultado en abril de 2021).
- Nagarajah. S. 1987. Effects of soil texture on the rooting patterns of Thompson Seedless vines on own roots and on Ramseyroot-stock in irrigated vineyards. *American Journal of Enology and Viticulture*, 38 (1), 54-59.
- Nario, A., Pino, I., Albornoz, M.A. y Baherle, P. 2002. Uso de isótopos en estudios de distribución y actividad radicular. Boletín N° 18. Pp 166-169. En: Sociedad chilena de la ciencia del suelo. IX Congreso nacional de la ciencia del suelo. Talca, Chile, 4-6 de noviembre de 2002.
- Oosterbaan, R. 1994. *Agricultural drainage criteria*.
- ODEPA. 2020. Cuencas hidrográficas y fruticultura chilena: análisis preliminar del riego y el empleo. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias – Odepa. Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. Disponible en <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/69857/Cuencas%20hidrograficas%20y%20fruticultura%20chilena.pdf> (Consultado en Abril de 2021).

- Pandey, A., G. Rajput, S. Shrivastava. 2003. Effect of drip Irrigation on soil moisture distribution in clay soils of Madhya Pradesh - A case study. *Indian Journal Soil Conservation*, (3) 248-252.
- Pérez, C. 2007. Efecto de la poda de raíces y tratamientos complementarios en dos tipos de suelos del Valle de Copiapó en vid “Sultanina”. 29p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile.
- Pizarro, F. 1996. Riegos Localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación. 3era edición. Mundi-Prensa. Bilbao, España.
- Razeto, B. 1993. La nutrición mineral de los frutales: deficiencias y excesos. SQM, Santiago, Chile.
- Richards, D. 1983. The grape root system. *Horticultural Reviews*, 5,127-168. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1002/9781118060728.ch3> (Consultado en marzo de 2021).
- Rigas S., G. Debrosses, K. Haralampidis, F. Vicente-Agullo, K. Feldmann, A. Grabov, L. Dolan, and P. Hatzopoulos. 2001. *TRHI* encodes a potassium transporter required for tip growth in Arabidopsis root hairs. *The Plant Cell* 13:139–151. Disponible en <https://doi.org/10.1105/tpc.13.1.139> (Consultado en mayo de 2021).
- Rincón, J., Y. Gallardo, M. Leal, y Y. Rojas. 2003. Efecto de la relación calcio:fósforo en el suelo sobre el crecimiento y nodulación de plantas jóvenes de *Acacia mangium* (Willd). *Bioagro*, 15(2), 97-105. Disponible en http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612003000200004 (Consultado en mayo de 2021).
- Rivulis Irrigation Ltd, 2019. Selección de la línea / cinta de goteo correcta para su sistema de riego por goteo de campo abierto. <https://es.rivulis.com/seleccion-de-la-linea-cinta-de-goteo-correcta-para-su-sistema-de-riego-por-goteo-de-campo-abierto/>
- Rojas, R. 2008. Poda de Raíces y tratamiento complementario sobre la distribución y crecimiento de las raíces en vid “Sultanina”. 26p. Tesis título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile.
- Rout, G.R. y P. Das. 2003. Effect of metal toxicity on plant growth and metabolism: I. Zinc. *Agronomie*, 23, 3-11.
- Ruiz, R. 2000. Dinámica nutricional en cinco parrones de diferente productividad del valle central regado de Chile. *Agricultura Técnica*, 60(4),379-398.

Ruiz, R., S. Moyano y T. Navia. 2004. Acumulación de compuestos nitrogenados en relación al problema de baya blanda en uva de mesa. Agricultura técnica. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/32904> (Consultado en abril de 2021).

Ruiz, R., G. Sellés y R. Ahumada. 2007. Aspectos físicos del suelo y calidad de fruta en parronales de uva de mesa. pp. 101-114. En: Muñoz, I., M. González y G. Sellés. (Eds.). Manejo de Suelo y Riego en Vides para Vino y Mesa. Serie Actas 39. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA, Santiago, Chile. 196 p.

Sellés, G., R. Ferreyra, G. Contreras, R. Ahumada, J. Valenzuela, y R. Bravo. 2003. Manejo de riego por goteo en uva de mesa cv. Thompson Seedless cultivada en suelos de textura fina. Agricultura Técnica, 63(2), 180-192.

Sellés, G., y R. Ferreyra. 2007. Criterios para controlar el riego en uva de mesa. En: Muñoz, I., M. González, y G. Sellés. (eds). Manejo de Suelo y Riego en Vides para Vino y Mesa. Serie Actas 39. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA, Santiago, Chile. pp: 15-58

Sellés, G., R. Ferreyra, R. Ruíz, R. Ferreyra, y R. Ahumada. 2012. Compactación de suelos y su control: estudio de casos en el Valle de Aconcagua. Bol. N° 234. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7460> (Consultado en marzo de 2021).

Sellés, G.; R. Ferreyra; C. Aspillaga y C. Zúñiga. 2012. Requerimientos de riego en uva de mesa: experiencias en el Valle de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile. Disponible en http://platina.inia.cl/uvaconcagua/docs/pubs/INIA_B0242.pdf. (Consultado en abril de 2021).

Sellés, G., R. Ferreyra, C. Aspillaga, y C. Zúñiga. 2013. Área de suelo mojado y umbral de regadío: Riego en uva de mesa. Tierra adentro, 102, 31-40.

Seguin, M. 1972. Répartition dans l'espace du système racinaire de la vigne. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 274, 2178-2180.

Seguel, O., V. García de Cortázar y M. Casanova. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. Agricultura Técnica, 63(3): 287-297.

Silva, H.; R. Honorato y C. Bonomelli. 1991. Crecimiento radical y desarrollo de la vid variedad Thompson Seedless. Revista Aconex, 34: 14-21.

Sierra, C. 2001. Fertilización en vides de Mesa. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Intihuasi. Boletín INIA N° 74. La Serena, Chile. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/6826/NR29095.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Consultado en febrero de 2021).

Sustr, M., A. Soukup, and E. Tylova. 2019. Potassium in Root Growth and Development. *Plants*, 8(10), 435. Disponible en <https://doi.org/10.3390/plants8100435> (Consultado en mayo de 2021).

Terence, R., R. Dunst, and P. Joy. 2002. Seasonal dry matter, starch, and nutrient distribution in “Concord” grapevine roots. *HortScience*, (37) 2, 313-316.

Taboada, M., y C. Álvarez. 2008. Fertilidad Física de los Suelos. 2da Edición. Facultad Agronomía (UBA). Buenos Aires, Argentina.

Van Huyssteen, L. 1983. Interpretation and use of penetrometer data to describe soil compaction in vineyards. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 4, 59-65.

Van Zyl, J. L. 1988. The grapevine root and its environment. Department of agriculture and water supply. Republic of South Africa.

Wind, G. 1955. A field experiment concerning capillary rise of moisture in heavy clay soil. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 3,60-69. Disponible en <https://doi.org/10.18174/njas.v3i1.17827> (Consultado en marzo de 2021).

Whalley, R. 1994. Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. *Journal of Soil Science*, 44 (1), 1-9.

Yazar, A. and S. Sezen. 2006. Effects of full and deficit irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the arid southeast Anatolia region of Turkey. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Land and Water Management for Sustainable Irrigated Agriculture*, Adana Turkey. 4-8 April. Cukurova University, Adana. Turkey.

Zambrano, F. R. Villafañe, y R. Figueroa. 2003. Efecto de la profundidad del nivel freático sobre la producción de tomate en un suelo franco arenoso y bajo condiciones de invernadero. *Agronomía Tropical*, 53(4),22-31. Disponible en http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2003000400003&lng=es&tlng=es. (Consultado en mayo de 2021).

Zhang, B., R. Horn and P. Hallet. 2005. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Soil Science Society of American Journal*, 69(3), 864-871.

Zhang, H., A. Khan, D. Tan, and H. Luo. 2017. Rational water and nitrogen management improves root growth, increases yield and maintains water use efficiency of cotton under mulch drip irrigation. *Frontiers in Plant Science*, 8:912. Disponible en <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00912> (Consultado en marzo de 2021).

Zhu, J., S. Keappler, and J. Lynch. 2005. Mapping of QTL controlling root hair length in maize (*Zea mays* L.) under phosphorus deficiency. *Plant Soil*, 270,299-310. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11104-004-1697-y> (Consultado en abril de 2021).

Zur B. 1996. Wetted soil volume as design objective in trickle irrigation. *Irrigation Science*, (16),101-105.

Zúñiga, C. 2014. Calibración e interpretación de lecturas de sensores que determinan el contenido de agua en el suelo. La Cruz: Informativo INIA La Cruz. no. 28. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.14001/4618> (Consultado en agosto 2021).