

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**EFFECTO DEL ÁREA HUMEDECIDA EN MICRO-RIEGO SOBRE
EVAPOTRANSPIRACIÓN Y PRODUCCIÓN**

KAREN ESTHER SOTOMAYOR PAVEZ

PROYECTO DE TÍTULO
PRESENTADO A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL AGRÍCOLA.

CHILLÁN-CHILE

2022

**EFFECTO DEL ÁREA HUMEDECIDA EN MICRO-RIEGO SOBRE
EVAPOTRANSPIRACIÓN Y PRODUCCIÓN**

Aprobado por:

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

Profesor Guía

Camilo Souto Escalona
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
Profesor Asistente

Profesor Guía

Jerónimo Paredes Cáceres
Ingeniero Matemático, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Nicole Uslar Valle
Ingeniera Civil Agrícola, Ph.D.
Profesor Asistente

Director de Departamento

María Eugenia Gonzáles Rodríguez
Ingeniera agrónoma, Ph.D.
Profesor Asociado

Decana

AGRADECIMIENTOS

Al centro de recursos hídricos para la agricultura y la minería – CRHIAM, proyecto ANID/FONDAP/15130015 y al proyecto VRID N° 2021000217INI.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	1
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 Objetivo general	8
1.2 Objetivos específicos	8
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Área humedecida y tipo de suelo	9
2.2 Textura del suelo y forma del bulbo húmedo	10
2.3 Relación materia orgánica- humedad aprovechable.....	24
2.4 Relación potencial mátrico-humedad	25
2.5 Área humedecida versus evapotranspiración	27
2.6 Desarrollo radical y área humedecida	35
2.7 Área y volumen humedecido vs producción	40
3. CONCLUSIONES.....	52
4. LITERATURA CITADA	54

ÍNDICE DE TABLAS

Página

Tabla 1. Superficie mojada estimada para distintas texturas del suelo, profundidad de raíces, suelo y grados de estratificación, para un emisor de 4 L/h, en condiciones normales de funcionamiento.	15
Tabla 2. Regresión exponencial de la relación de radio (Rh) y profundidad (Ph) de humedecimiento con respecto al volumen de agua aplicado (Vap) para dos tipos de suelo (areno francoso y franco arcilloso).	17
Tabla 3. Porcentajes recomendados de suelo mojado según el cultivo.....	44
Tabla 4. Rendimientos y tamaño de frutos para la temporada 2006/2007 para cinco tratamientos regados con patrones diferenciales.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquemas de tres diferentes formas de bulbo húmedo dependiendo de la textura del suelo para la misma cantidad de agua aplicada.	12
Figura 2. Perfiles del frente húmedo en función al tiempo de infiltración para suelo Franco arcilloso y Suelo Areno Francoso.	16
Figura 3. Bulbo húmedo para dos tipos de suelo en función del caudal del gotero y tiempo de riego.	18
Figura 4. Sistema de coordenadas esferoidal alargado.....	21
Figura 5. Descarga del gotero vs diámetro de humedecimiento para tres tipos de suelo de la ecuación lineal.	23
Figura 6. Curva de retención de humedad para distintos tipos de suelos, potencial matricial (Ψ_m) vs porcentaje de agua extraída por el cultivo.	26
Figura 7. Diferencia esquemática de los flujos de transpiración (T), evaporación (E) y radicación neta (R_n), para riego localizado y riego convencional.	30
Figura 8. Formación de corona circular de sales del bulbo húmedo en micro-riego.....	39
Figura 9. Comparación de Variación del contenido de humedad para riego de alta frecuencia vs riego convencional.	42
Figura 10. Producción (tha^{-1}) de naranjos cv. Valencia de 35 años, para las temporadas 2003/04, 2004/05 y 2005/06, utilizando 4 y 10 goteros respectivamente.	48

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Ecuación de Richards: conservación del masa.....	20
Ecuación 2. Diametro de humedecimiento según Karmeli (1985).....	22
Ecuación 3. Radiación neta.....	28
Ecuación 4. Porcentaje de suelo mojado (PSM) según Ferreyra y Sellés (2013).....	45

EFFECTO DEL ÁREA HUMEDECIDA EN MICRO-RIEGO SOBRE EVAPOTRANSPIRACIÓN Y PRODUCCIÓN

EFFECT OF THE WETTED AREA IN MICRO-IRRIGATION ON
EVAPOTRANSPIRATION AND ITS PRODUCTION

Palabras claves: Evapotranspiración, área humedecida, micro-riego, cultivo.

RESUMEN

El presente estudio considera una revisión bibliografía actualizada de investigaciones y artículos científicos que relacionan el efecto del área humedecida en micro-riego sobre la evapotranspiración y producción. Se identificó los principales parámetros del área humedecida en micro-riego y sus efectos en los cultivos, tales como: el tipo de suelo, la evapotranspiración, el desarrollo radical y la producción. La agricultura ha sido una actividad tradicional donde se han podido observar avances y nuevas tecnologías que han permitido incluir, analizar y mejorar de manera meticulosa estos factores, que finalmente se ve reflejado en un ahorro económico al poder lograr con mayor certeza ajustes en la aplicación del agua en riego. Es esencial conocer las propiedades y características del perfil físico del suelo para estimar un patrón de mojamiento o distribución del bulbo húmedo ya que se encuentra en directa relación con la distribución radical y la evapotranspiración del frutal. Incorporar mejoras en la agricultura engloba diversas áreas tales como fertilización, mecanización, riego, postcosecha, etc., todas ellas llevan a un desarrollo comercial del país en beneficio su población, la cual año tras año va

en aumento junto con la demanda alimentaría. En el presente estudio se evidencian investigaciones y prácticas que se han desarrollado para mejorar la producción de cultivos y cuidar los recursos hídricos.

EFFECT OF THE WETTED AREA IN MICRO-IRRIGATION ON EVAPOTRANSPIRATION AND ITS PRODUCTION

Keywords: Evapotranspiration, wetted area, micro-irrigation, cultivation.

ABSTRACT

The present study, considered an updated, is a bibliographic review of research and scientific articles. They relate the effect of the area moistened in micro-irrigation on evapotranspiration and production. The main parameters of the area moistened in micro-irrigation and its effects on crops were identified, such as soil type, evapotranspiration, root development, and production. Agriculture has been a traditional activity where advances and new technologies has been introduced. That have made it possible to meticulously include, analyze and improve these factors, such as the application of the irrigation water. It reflects on economic savings. It is essential to know the properties and characteristics of the physical profile of the soil to estimate a pattern of wetting or distribution of the wet bulb since it is directly related to the root distribution and evapotranspiration of the fruit tree. Incorporating improvements in agriculture encompasses various areas such as fertilization, mechanization, irrigation, post-harvest, etc., all of which lead to the commercial development, especially for a nation and its population, which is increasing year after year, along with the food demand. This present study researches and practices what have been developing to improve crop production and to save water resources.

1. INTRODUCCIÓN

La escasez de recursos hídricos se ha convertido en un problema clave que restringe el desarrollo global. Junto con el progreso y el desarrollo de la ciencia y tecnología, la población a nivel mundial ha aumentado, y, por consecuencia, ha aumentado también la demanda de alimentos y recursos hídricos. Como resultado de esta crisis, producir más alimentos con un mínimo de agua se ha convertido en el foco de diversos científicos alrededor del mundo (Morales *et al.*, 2010; Gispert *et al.*, 2013; Kang *et al.*, 2017; Bryla *et al.*, 2011; Deng *et al.*, 2006).

Actualmente, el mayor usuario de agua en el mundo es la agricultura y Chile no es la excepción. En los resultados preliminares del último CENSO nacional realizado entre 2020-2021 se contabilizaron 902.158 ha de riego (ODEPA, 2022). La necesidad de ahorrar agua ha llevado a la agricultura a buscar alternativas para su sustentabilidad y reducción del impacto en el ambiente. Afortunadamente, cada vez hay más conocimientos y tecnologías disponibles que ayudan a incrementar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura. La explicación está en que en la mayor parte de las nuevas áreas de riego se ha establecido el riego presurizado, ya sea micro-riego (localizado) por goteo o micro-aspersión/microjet y/o riego por aspersión, los cuales son sistemas mucho más eficientes (Medrano *et al.*, 2007), desde el punto de vista teórico, por sus condiciones en el manejo y operación que, al parecer, es más simple

de efectuar. Sin embargo, estudios recientes consideran el riego por surco como una buena alternativa (Holzapfel *et al.*, 2021).

El sistema de riego presurizado en Chile representa un 28% de las áreas regadas con cultivos, hortalizas, frutales y otros sistemas de producción. De este 28%, el 23% corresponde a micro-riego o riego presurizado de alta frecuencia (goteo, cinta y micro aspersión), y un 5% aproximadamente a riego presurizado de baja frecuencia (aspersión). Se ha establecido que los sistemas de microriego han mejorado la eficiencia en la aplicación de agua, lo que ha permitido aplicar adecuados volúmenes al cultivo, y a su vez mejorar aún más la distribución del agua en el terreno, con el fin de favorecer un desarrollo homogéneo del cultivo y la obtención de mayores y mejores rendimientos (López-Olivari, 2016).

El riego por goteo es un tipo de riego localizado, el cual ha ampliado su uso desde cultivos comerciales tradicionales de alto valor, como algodón, tomate, uvas, frutas y verduras de invernadero, a cultivos alimentarios como maíz, papas, soja, entre otros (Kang *et al.*, 2017).

Además de mejorar los sistemas de aplicación de agua, independiente del seleccionado, es fundamental suplir los requerimientos hídricos de los cultivos. Para ello es necesario una elección adecuada del coeficiente de cultivo (Allen *et al.*, 2006) para cada estado fenológico, y esto es vital para determinar los requerimientos de agua (Gispert *et al.*, 2013). Relacionando el coeficiente de cultivo con los parámetros ambientales se obtiene una estimación de la evapotranspiración del cultivo/frutal (Allen *et al.*, 2006), ya que se enlazan

indicadores ambiente-suelo-planta para conseguir un valor que represente lo más certero posible el agua que se devuelve a la atmosfera por la suma de dos fenómenos por separados. La primera es la transpiración que corresponde a el agua transferida principalmente por las hojas de los cultivos, y la segunda es la evaporación (E) que corresponde a el agua evaporada desde la superficie del suelo. Recientemente, Souto (2019) ha desarrollado un modelo de balance de energía superficial que puede ser utilizado para estimar el efecto y la significancia de la evaporación (E) desde áreas de suelo húmedas y secas de la evapotranspiración total, e informar estudios de balance de agua para optimizar el manejo de riego.

En diversos estudios se ha analizado el comportamiento de los cultivos al suplir la evapotranspiración. La incorporación de agua al cultivo basado en su requerimiento, se ejecuta por medio del riego por goteo, del cual han considerado la necesidad de lograr un porcentaje específico de área húmeda para mejorar su aplicación y producción (Gispert *et al.*, 2013), ya que se ha demostrado que existe una respuesta diferencial clara en términos de manejo de cultivos a diferentes dosis de riego. Dependiendo de su capacidad de adaptación (Gutiérrez-Gordillo *et al.*, 2019), se puede mejorar la eficiencia en el uso del agua, que se ve afectada por el porcentaje de suelo cubierto por el riego y la forma geométrica que posee el área de suelo húmedo (Gispert *et al.*, 2013).

Conociendo la importancia de los sistemas de riego en la cantidad de suelo humedecido el presente estudio se focaliza en analizar investigaciones

asociadas con los efectos del área humedecida, su tamaño y distribución con respecto a la producción del cultivo, la evaporación del suelo y transpiración de la planta, buscando patrones óptimos de humedecimiento.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Analizar el efecto del área humedecida en la producción y evapotranspiración del cultivo bajo micro-riego.

1.2 Objetivos específicos

- Analizar los patrones de humedecimiento del agua en el suelo considerando la distribución de laterales y emisores en riego por goteo.
- Relacionar la producción con el patrón de humedecimiento del suelo.
- Evaluar los factores que inciden en la transpiración y evaporación de suelo bajo micro-riego para diferentes áreas de humedecimiento.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Idealmente, solo el agua transpirada por las plantas de cultivo se suministraría para el riego, de esta forma, bajo un cuidadoso plan de riego, cada planta recibiría la cantidad de agua necesaria para lograr su producción; pero, como es lógico, hay otras variables que influyen en esta relación. Por una parte, tenemos el suelo, este dependiendo de sus propiedades retendrá una mayor o menor fracción de agua, y el agua que no es retenida por el suelo en la zona radical de extracción tiende a evaporarse a la atmósfera o drenar a la napa subterránea, al igual que el agua que es retenida pero no utilizada por el cultivo. Por otro lado, la forma de suministrar el agua, como se ha mencionado con anterioridad a través del riego localizado es el que posee una eficiencia de aplicación teórica mayor y permite que las raíces obtengan el nivel de agua y los nutrientes necesarios. El efecto de la localización se manifiesta en modificar la evaporación (E) y la transpiración (T), la distribución de las raíces, un régimen especial de sales, cantidad de emisores y suelo mojado, entre los principales.

En este punto se hará una búsqueda de información de las variables mencionadas para así comprender de mejor forma la relación que existe entre los factores que influyen en la producción y desarrollo de los cultivos.

2.1 Área humedecida y tipo de suelo

El objetivo del riego es mantener el suelo con un nivel de humedad adecuado que permita obtener los más altos rendimientos al menor costo posible. Con el

riego se intenta suplir la precipitación cuando ésta es insuficiente para cubrir las necesidades hídricas del cultivo.

El suelo juega un rol importante en el manejo del agua de riego, ya que es el medio donde se produce la absorción efectiva por parte de las raíces extractantes. Por lo que se requiere un riego de calidad para que el agua sea distribuida eficientemente en el suelo (Gómez, 2021).

La distribución del agua, la forma y el tamaño del volumen humedecido varían ampliamente según el tipo de suelo (Gispert *et al.*, 2013), este volumen es denominado bulbo húmedo y corresponde a la zona humedecida por el emisor de riego.

Para un diseñador de sistemas de micro-riego, es importante poder predecir, al menos dentro de una aproximación razonable, las características de la zona regada. Una estimación de las dimensiones y forma del bulbo húmedo se puede conseguir mediante métodos analíticos, numéricos, empíricos y semi-empíricos, o pruebas de campo. Existen diversos factores y métodos que condicionan el área y el volumen humedecido, entre ellos encontramos: el tipo de suelo, su textura, el riego y su aplicación, entre otros.

2.2 Textura del suelo y forma del bulbo húmedo

La cantidad de agua que puede retener el suelo depende de sus propiedades físicas dadas por la textura, estructura, contenido de materia orgánica, profundidad, conductividad eléctrica, entre otras. La textura se encuentra representada por el porcentaje de arena, limo y arcilla. Un suelo presentará

una buena textura cuando los porcentajes de estos elementos en conjunto le entregan a la planta un soporte para un buen desarrollo radical y un adecuado nivel nutricional. La textura también condiciona el movimiento del agua en el suelo, por ejemplo, en suelos arenosos las partículas son más gruesas y el agua se mueve con mayor facilidad en forma descendente, así la forma del bulbo húmedo es más bien alargada en profundidad y el tamaño dependerá del tiempo de funcionamiento del emisor. De forma opuesta se comporta el suelo arcilloso, donde las partículas son finas y el movimiento predominante del agua es de forma lateral, por lo tanto, el bulbo húmedo será más ancho que alargado. Los suelos francos se componen de partículas mixtas, entre gruesas, medianas y pequeñas, formando un bulbo húmedo simétrico, estos suelos (francos) son los predominantes en la zona sur de Chile, donde se encuentran las mayores labores agrícolas (López-Olivari, 2016).

Como se ha mencionado anteriormente, la textura del suelo condiciona el movimiento del agua. Los suelos pesados tienen una menor velocidad de infiltración, lo que hace que el radio de la superficie húmeda sea mayor, esta es una de las primeras razones por la que el bulbo se extiende horizontalmente. Pero, sobre todo, el mayor porcentaje de micro-poros de los suelos arcillosos hace que las fuerzas matriciales dominen sobre las gravitacionales en una mayor gama de humedad que en el caso de suelos arenosos, y en consecuencia la redistribución horizontal es más amplia en los suelos arcillosos.

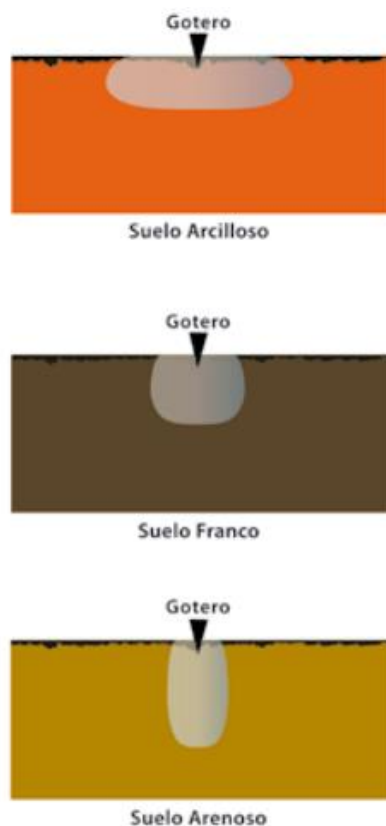


Figura 1. Esquemas de tres diferentes formas de bulbo húmedo dependiendo de la textura del suelo para la misma cantidad de agua aplicada. Fuente: López-Olivari, 2016.

Las formas de bulbo húmedo mostradas en Figura 1 se deben al proceso de infiltración, donde los emisores de riego arrojan pequeños caudales de agua creando una superficie muy reducida de suelo húmedo, cuyo radio se ve extendido a medida que el riego continúa y la velocidad de infiltración disminuye. Al disminuir la velocidad de infiltración, la conductividad hidráulica va en aumento, aproximándose a la saturación, y el gradiente del potencial disminuye en una proporción mucho mayor, es decir, hasta que el gradiente de potencial se hace cero o toma un valor tan pequeño que puede

considerarse cero. La disminución de la velocidad de infiltración favorece el incremento del área húmeda y se estabiliza una vez que iguala la pluviometría del riego (caudal del emisor dividido por la superficie húmeda) logrando un nuevo estado de equilibrio entre las fuerzas actuales. (López-Olivari, 2016).

Si la cantidad de agua agregada en la superficie es suficientemente grande como para que haya percolación hacia las capas más profundas, ocurre un estado llamado capacidad de campo, que indica el límite superior o máximo de agua útil para la planta que queda retenida en el suelo contra la fuerza de gravedad (Holzapfel *et al.*, 2021). El exceso de agua aplicada genera percolación profunda y se incorpora a las capas inferiores, contribuyendo a una rápida elevación de la napa freática (Angella *et al.*, 2016). Este proceso puede producirse naturalmente por lluvias o ser provocado por el hombre aplicando riego superficial por gravedad, por aspersión o por goteo. La importancia de su conocimiento para la ingeniería del riego es fundamental para el control de la recarga al perfil del suelo, así como también para el manejo del lavado de suelos salinos y alcalinos sometidos al proceso de recuperación (López-Olivari, 2016).

Así, el suelo, toma una gran relevancia a la hora de regar. Por esto varios científicos han realizado investigaciones en torno al tema. Por ejemplo, Fernández y Perry (1995), a través de una investigación en donde se estudiaron dos tipos de suelos, demostraron que el crecimiento radical se ve muy afectado por las condiciones del suelo, encontrando que alrededor del 91-94% de las raíces estaban localizadas en los primeros 60 cm de profundidad

en suelo franco limoso. Sin embargo, en suelo franco arenoso fino solo un promedio del 60% de las raíces se encontraban en los primeros 60 cm de profundidad. Por otro lado, Lecaros-Arellano *et al.* (2021) aplicaron el mismo volumen de agua en distintos tratamientos logrando patrones de humedecimiento distintos. Los autores notaron que las raíces de la misma plantación crecieron de forma más superficial al tratarse de un suelo franco arcilloso, en cambio en el suelo franco arenoso crecieron más en profundidad. En ambos tipos de suelo, a medida que se alejaban los emisores del tronco y se incrementaba el área humedecida, se pudo notar un desaprovechamiento del agua, en este caso en particular para la especie de manzanos Gala Brookfield, injertados en porta-injerto enano M.9.

Normalmente existen diferencias en el desarrollo y producción de la planta asociados frecuentemente al manejo de riego, es decir, al volumen de suelo humedecido. Por esta razón se han intentado cuantificar los bulbos húmedos para diferentes tipos de suelo, así es como han surgido diferentes métodos a lo largo de los años. Keller (1978), citado por Gil-Marín (2001), llevó a cabo una investigación en dos suelos (areno-francoso y franco-arcilloso) con el objetivo de determinar sus características hidro-edafológicas con fines de diseño para riego por goteo. El estudio mostró variados diámetros de humedecimiento para tres texturas a dos profundidades evaluadas. Los resultados del estudio son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Superficie mojada estimada para distintas texturas del suelo, profundidad de raíces, suelo y grados de estratificación, para un emisor de 4 L/h, en condiciones normales de funcionamiento.

Profundidad de raíces y suelo (m)	Textura del suelo	Grado de estratificación del suelo		
		Homogéneo	Estratificado	En capas
		Diámetro de suelo mojado (m)		
0,80	Ligero	0,50	0,80	1,10
	Medio	1.00	1,25	1,70
	Pesado	1.10	1,70	2,00
1,70	Ligero	0.80	1,50	2,00
	Medio	1.25	2,25	3,00
	Pesado	1.70	2.00	2.50

Fuente: Keller, 1978.

La utilización de los datos entregados en la Tabla 1, se puede realizar tras haber comprobado que las condiciones de diseño sean similares a las empleadas por Keller (1978). Como se puede observar de Tabla 1, el movimiento del agua no solo depende de la textura del suelo, sino también de su perfil físico (homogéneo, estratificado o en capas). Cabe mencionar que en el estudio no aparece definido el volumen de agua aplicado para lograr esos diámetros, es por esto que Gil-Marín (2001), realizó un ensayo más completo en donde se analizó las formas y dimensiones de bulbo húmedo en goteo para diferentes caudales y volúmenes de agua en suelos franco arcilloso y areno francoso. En ese ensayo se comprobó lo descrito por diversos autores (Pachepsky y Rawls, 1999; Pizarro, 1996; Fereres, 1981) en donde la velocidad de infiltración en suelos más pesados fue menor que para el caso de suelos livianos, lo que trajo consecuencias en las dimensiones del bulbo húmedo, alcanzando un área mayor de superficie mojada. Además, el mayor porcentaje

de porosidad del suelo franco arcilloso hace que las fuerzas matriciales dominen sobre las gravitacionales trayendo como consecuencia una mayor redistribución horizontal que la del suelo areno francoso.

A continuación se muestra el perfil de humedad para dos tipos de suelo de acuerdo a Gil-Marín (2001) (Figura 2).

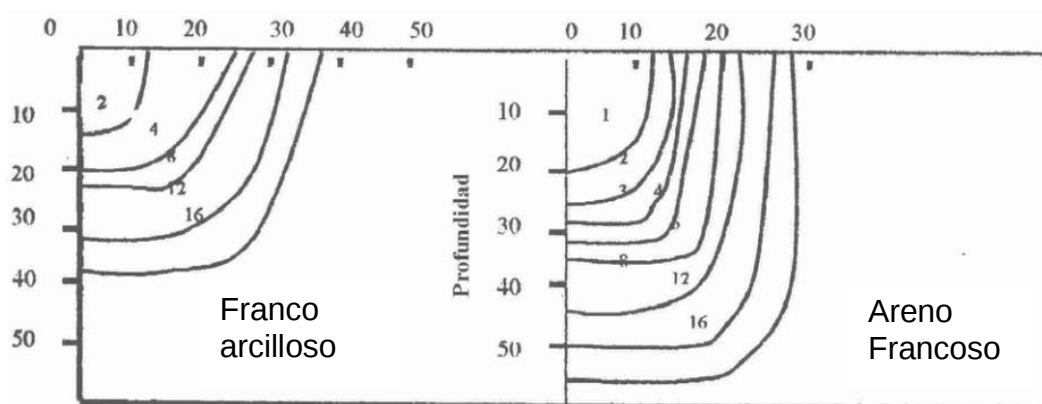


Figura 2. Perfiles del frente húmedo en función al tiempo de infiltración para suelo Franco arcilloso y Suelo Areno Francoso. Fuente: Gil-Marín, 2001.

En ambos casos a medida que se incrementa el volumen de agua aplicado el frente de humedad avanzó, tanto en profundidad como en sentido horizontal, desde el emisor, aumentando el volumen del suelo mojado. En base a esta investigación se encontraron ecuaciones de regresión de tipo exponencial con coeficientes de regresión mayores a 91% (Tabla 2).

Tabla 2. Regresión exponencial de la relación de radio (Rh) y profundidad (Ph) de humedecimiento con respecto al volumen de agua aplicado (Vap) para dos tipos de suelo (areno francoso y franco arcilloso). Rh y Ph en cm y Vap en L.

Tipo de suelo	Relación			
	Rh v/s Vap	r ²	Ph v/s Vap	r ²
Areno Francoso	$Rh = 12,378V_{ap}^{0.2445}$	0.94	$Ph = 17,588V_{ap}^{0.3352}$	0.98
Franco Arcilloso	$Rh=9,8709V_{ap}^{0.5016}$	0.92	$Ph=8,9016V_{ap}^{0.4391}$	0.97

De Tabla 2 se recomienda utilizar dichas ecuaciones en el caso de tener propiedades del suelo similares. 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 (criterio de diseño), este antecedente se obtiene a partir de una buena estimación de la forma y dimensiones del bulbo húmedo.

Similarmente, Pizarro (1996) realizó un ensayo de perfil de suelo humedecido, midiendo en dos tipos de suelo (arena y franco) regados por goteo la distancia vertical y horizontal aplicando dos caudales (4 y 20 L/h) y tres volúmenes de agua aplicada (4, 8 y 16 L). Los resultados obtenidos pueden ser vistos en Figura 3.

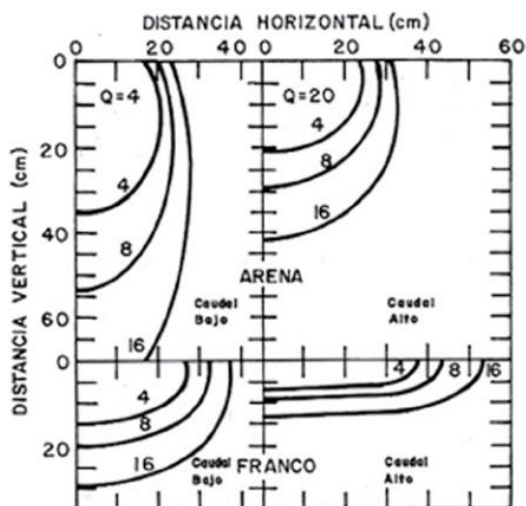


Figura 3. Bulbo húmedo para dos tipos de suelo en función del caudal del gotero y tiempo de riego. Fuente: Pizarro, 1996.

Resultados relevantes obtenidas en torno a la forma del bulbo es que se extiende más horizontalmente en los suelos más pesados, también si el caudal se mantiene constante, la extensión superficial del bulbo no varía mucho con el tiempo, pero en profundidad sí se va extendiendo. Ahora, si el caudal del emisor es mayor, mayor es la extensión horizontal del bulbo. En la Figura 3 se muestra que el aumento del bulbo húmedo no es directamente proporcional al tiempo de aplicación. En el caso de la arena el mayor radio del bulbo es de 23 cm con un bajo caudal y para un caudal alto es de 28 cm. Bajo las mismas condiciones, para el caso de un suelo franco, los radios son de 32 y 44 cm, respectivamente. Para ambos tipos de suelo el aumento del radio fue del orden de 25-35%, mientras que el caudal tuvo un aumento del 500%. Concluyendo en que la extensión del bulbo húmedo no se puede modificar indefinidamente variando el caudal ni el tiempo de riego. Para conseguir una determinada

superficie mojada de suelo a cierta profundidad, la variable más importante sobre la que se puede actuar es el número de emisores (Pizarro,1996).

Morales *et al.* (2010) evidenciaron lo descrito por Pizarro (1996) realizando un ensayo donde se aplicó la misma dosis de riego a distintos tratamientos diferenciados en el patrón de mojamiento. Los resultados mostraron que el porcentaje del volumen de suelo mojado por una sola línea de laterales por hilera de árboles para dos tratamientos fue similar (16 y 18%), independiente de las distancias desde el tronco y distintos caudales de los goteros. El único que dio un aumento significativo del porcentaje de suelo húmedo fue el tratamiento regado con dos laterales de goteros por hilera, resultando un 44%. Por otra parte, se incrementaron las horas de riego, provocando un aumento del área mojada; sin embargo, como consecuencia del aumento del tiempo de riego se incrementaron las pérdidas por percolación, disminuyendo la eficiencia de aplicación del método ya que parte del agua aplicada no fue aprovechada por el cultivo.

Teniendo en cuenta la importancia de la geometría del bulbo húmedo, Gómez (2021) presentó una propuesta de investigación basada en la ecuación de Richards (que describe la distribución espacio-temporal de agua en un suelo no saturado). Gómez (2021) plantea el uso de coordenadas esféricas alargadas en vez de coordenadas cartesianas, y así poder encontrar soluciones que describan la distribución espacio-temporal de agua en el suelo. La experiencia muestra que el bulbo húmedo en el riego por goteo tiene la forma de un esferoide truncado y al expresar la ecuación de Richards en

coordenadas esferoidales podría traducirse en una simplificación en la búsqueda de soluciones para goteo, y eventualmente conducir a la obtención de nuevos modelos. La siguiente ecuación representa la conservación de la masa del sistema [Ecuación 1].

$$C \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{K}{a^2 [\sinh^2(\eta) + \sin^2(\theta)]} x \left(\frac{\partial^2 H}{\partial \eta^2} + \frac{1}{K} \frac{\partial K}{\partial \eta} \frac{\partial H}{\partial \eta} + \coth(\eta) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right) + S \quad [1]$$

Lo principal es ser consistente con las unidades de medida, θ es el contenido volumétrico del agua y es adimensional (m^3m^{-3} o $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), H es el potencial hídrico (m o cm), K_i ($i = x, y, z$) es la conductividad hidráulica (cms^{-1} o ms^{-1}) y $S(z, t)$ representa la intensidad de una fuente-sumidero de agua ($\text{m}^3\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$ o $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$), C es la derivada del contenido de agua respecto al potencial hidráulico ($1 \cdot \text{m}^{-1}$ o $1 \cdot \text{cm}^{-1}$), η es una coordenada esferoidal alargada y a es la distancia entre el origen del sistema coordenado y el foco de la elipse que genera al esferoide (ver Figura 4).

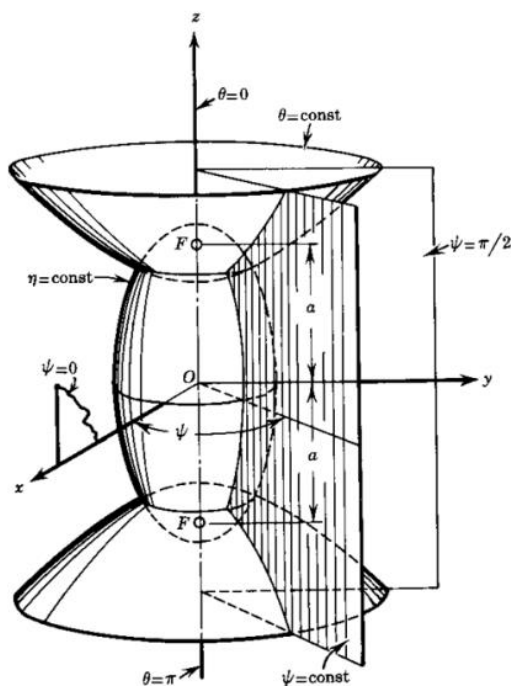


Figura 4. Sistema de coordenadas esférico alargado. Fuente: Gómez, 2021.

Gómez (2021) indica que la reescritura de la ecuación de Richards no solo da paso para obtener ecuaciones que eventualmente podrían ser usadas para describir el bulbo húmedo, sino también expresar la ecuación en términos de potencial mátrico, aplicar modelos para conductividad hidráulica o, como se hizo en esta investigación donde se profundizó en el término “S” de fuente-sumidero, más precisamente en la extracción radical del agua.

Dada la complejidad de la ecuación es que se han presentado otros modelos como el desarrollado por Schwartzman y Zur (1986), analizado por Gómez (2021). Éste último propone que el volumen y la geometría del suelo humedecido por un emisor de riego por goteo debería ser un objetivo del

proceso de diseño de un sistema, en vez de un resultado de este, afirmando que este método es el inverso del usual, donde el volumen humedecido representa el resultado final del proceso de diseño. Además, propone un proceso cuantitativo para realizarlo junto con Schwartzman y Zur (1986).

Haciendo uso de este método se cuantifica la distribución de agua en el suelo en torno a los emisores del riego por goteo, y desde ahí el uso de goteros con una tasa de descarga conocida y separación entre ellos, esto según las condiciones del suelo y de la plantación. El modelo de Schwartzman y Zur (1986) es mucho menos complejo y simplificado que la ecuación de Richards, aunque la ecuación de Richards no está limitada y obtendría mejores resultados. Mediante la ecuación de Richards, eventualmente se podrían modelar patrones de mojamiento en diferentes tipos de suelo, pero hasta ahora solo se conocen soluciones para algunos casos en particular. Estimar correctamente un patrón de humedad de goteros es una tarea difícil, y las ecuaciones relacionadas tienen un gran grado de dificultad, por lo que se ha intentado buscar alternativas con métodos más sencillos.

Es así como Gómez (2021) analizó dos métodos del diámetro de humedecimiento que describe la relación entre la descarga de un gotero y el diámetro de humedecimiento, para suelos finos, medio y grueso. Uno es el modelo lineal que relaciona la descarga de un gotero y el diámetro de humedecimiento, que está descrita por la expresión: [Ecuación 2].

$$D_H = mq_e + b \quad [2]$$

Donde D_h es el diámetro de humedecimiento (m), q_e es el caudal del emisor (l/h), m es la pendiente de la recta y b el intercepto en el eje Y.

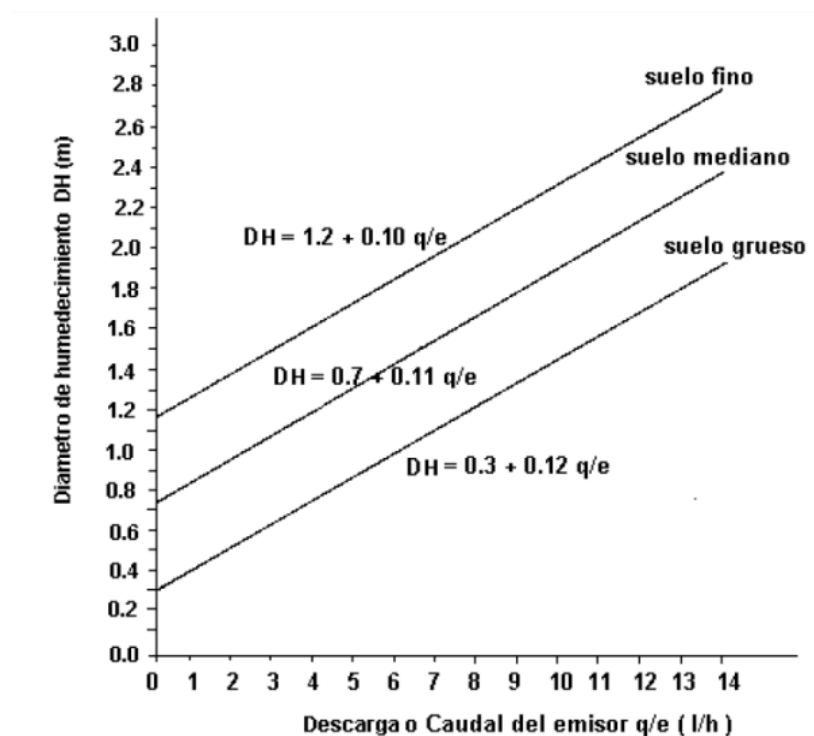


Figura 5. Descarga del gotero vs diámetro de humedecimiento para tres tipos de suelo de la ecuación lineal. Fuente: Karmeli, 1985.

El otro modelo analizado por Gómez (2021) está basado en la ecuación de Schwartzman y Zur (1986). El resultado de la comparación de ambos métodos fue que, en general, si bien se aproximaron los resultados, se observaron diferencias que no son despreciables hasta inaceptables que van desde 0.5 a 1.0 m, notando la importancia de la conductividad hidráulica saturada. El modelo lineal es más sencillo y deja un amplio rango de valores de conductividad hidráulica, ya que se debe elegir según la clasificación de suelos

“fino”, “mediano” y “grueso” (Gómez, 2021). Así la ecuación de Richards sería la más acertada de acuerdo a la cantidad de variables que relaciona.

2.3 Relación entre la materia orgánica y humedad aprovechable

El agua es retenida en el suelo, principalmente mediante un proceso de adsorción, y la tensión con la que el agua es adsorbida varía según el tipo de suelo, la presencia de materiales orgánicos y el contenido de agua (Pachepsky y Rawls, 1999). El cambio de uso de suelo y las prácticas de manejo agrícola y forestal modifican las propiedades inherentes a su fertilidad física, y esto repercute sobre el contenido de materia orgánica y la capacidad de almacenamiento de agua (Browman *et al.*, 1999), esto se atribuye al reciclaje de materiales orgánicos entre los tipos de suelos, el cual contribuye a incrementar la humedad aprovechable del suelo (Gicheru *et al.*, 2004).

De acuerdo a Salcedo-Pérez *et al.* (2007), quienes realizaron una investigación para generar un indicador con base en la medición de la superficie específica y el contenido de materia orgánica para estimar la humedad aprovechable en distintos tipos de suelo. Encontraron que los suelos con menor humedad aprovechable son justamente los que menor materia orgánica tienen, y los suelos en condiciones naturales o los de reciente incorporación son los de mayor valor de humedad aprovechable. Esto muestra que el contenido de materia orgánica es una variable determinante para estimar el indicador que permita definir el nivel de retención de agua por un suelo, independiente de su origen o manejo. Con esto se podría concluir que

la humedad aprovechable es una de las variables más significativas del suelo, ya que presenta una relación directa con la productividad de los sistemas agrícolas.

2.4 Relación entre el potencial mátrico y humedad de suelo

Si en un suelo se agrega agua en la superficie, en la capa superior los poros se llenan casi totalmente con el líquido. Este comienza a moverse a partir de una zona de transición en condiciones de flujo insaturado siguiendo el gradiente de potencial, es decir, hacia las capas más profundas del suelo.

El potencial mátrico es la parte del potencial total que se debe a las fuerzas de atracción del agua por la superficie de las partículas sólidas del suelo y a las fuerzas de atracción molecular entre las propias moléculas del agua. El conjunto de estos dos tipos de fuerzas hace que el agua sea retenida por adsorción (por la matriz del suelo) y por capilaridad (por las mismas moléculas de agua) en suelos con un contenido hídrico por debajo del nivel de saturación. El potencial mátrico es el más importante de los componentes del potencial total desde el punto de vista agronómico (Angella *et al.*, 2016).

Para igual contenido de humedad los distintos suelos retienen el agua con distinta energía, es decir, la relación potencial mátrico y humedad de suelo varía para cada tipo de suelo. Se trata de un fenómeno de superficie, para un mismo peso de suelo, las arcillas presentan una superficie mucho mayor: un gramo de arena gruesa puede tener una superficie de 1000 cm² mientras que el mismo peso de arcilla puede alcanzar los 800 cm². Por lo tanto, la textura

influye de forma muy importante en la capacidad de retención de agua de los suelos.

Otra causa de que los suelos arcillosos retengan más agua es que las micelas de arcilla presentan cargas negativas, debido a la sustitución de iones de aluminio y sílice por otros cationes de menor valencia. Estas cargas negativas se unen al polo positivo de las moléculas de agua, estableciendo un puente de hidrógeno (Pizarro, 1996). A continuación, se muestra la curva de retención de humedad y los niveles de energía a utilizar para mover el agua del suelo a las raíces (Figura 6).

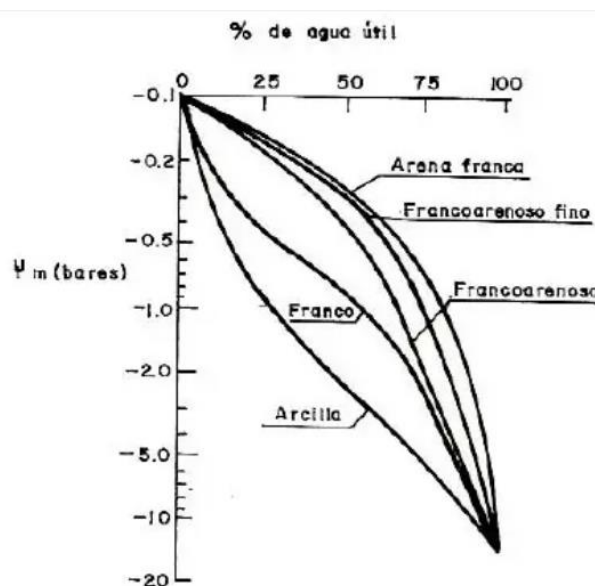


Figura 6. Curva de retención de humedad para distintos tipos de suelos, potencial matricial (Ψ_m) vs porcentaje de agua extraída por el cultivo. Fuente: Pizarro, 1996.

En la Figura 6 se muestra la curva de retención de humedad en donde las ordenadas muestran el potencial mátrico y las abscisas el porcentaje de agua

extraída del suelo que se encuentra entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Si trazamos una línea vertical de arriba hacia abajo, la primera curva que se intercepta corresponde a la arena, la cual utiliza considerablemente menos energía para extraer el mismo porcentaje de agua que la última curva correspondiente a la arcilla, que es un suelo más pesado (Pizarro,1996).

2.5 Relación área humedecida y evapotranspiración

La evapotranspiración es un proceso que tiene lugar en la relación cultivo-suelo-atmósfera, donde el agua se transfiere a la atmósfera y que a su vez el cultivo necesita recuperar para su óptimo crecimiento y desarrollo. Así, la evapotranspiración representa la suma de dos fenómenos por separado que ocurren simultáneamente: transpiración y evaporación. La transpiración de las plantas es la pérdida de vapor de agua a través de los estomas (principalmente de las hojas) y la evaporación de agua que se produce desde la superficie de suelo (López-Olivari, 2016), y en riegos por aspersión por deriva y agua interceptada por las hojas.

Los estudios en torno al agua en la agricultura tienen una finalidad en común que es maximizar la eficiencia de los recursos hídricos, la cual se puede mejorar a través de las técnicas agrícolas a nivel de riego, de campo o de plantas y el transporte eficaz de agua a la zona de las raíces, minimizando las pérdidas provocadas por evaporación y transpiración.

Hemos hablado de la forma del bulbo húmedo producido por goteo, riego que, al estar bien diseñado y operado, es un sistema cuya eficiencia es de alrededor de un 90% gracias a que su localización logra humedecer solo la parte efectiva de las raíces, reduciendo la evaporación del suelo en comparación con otros métodos de riego como tendido o aspersión, donde mojan toda la superficie del suelo. Esto se debe a que se utilizan pequeños volúmenes de agua con una alta frecuencia, disminuyendo el área del suelo húmedo y por ende la evaporación, aunque sí es cierto que al estar constantemente húmeda la superficie, la evaporación también muestra valores importantes.

El movimiento de agua del estado líquido a gaseoso (vapor de agua) ocurre tanto en la transpiración como en la evaporación, donde se requiere una fuente de energía que es proporcionada por la radiación solar directa, diferencia de presión de vapor existente entre la superficie del suelo u hoja y el ambiente circundante.

El fenómeno de evaporación se debe a la radiación, y en este caso la superficie terrestre, como todos los objetos a temperatura superior al cero absoluto, emiten radiación de onda larga cuya intensidad depende de varios factores. Si se hace un balance entre radiación que incide en una determinada superficie y la que se emite, el resultado es la radiación neta (R_n).

Al realizar un balance de energía en la superficie, la radiación neta se distribuye en [Ecuación 3]:

$$R_n = H + \lambda E + G \quad [3]$$

Donde R_n es la radiación neta (W/m^2), H es el calor sensible (W/m^2), λE es el calor latente (W/m^2) y G es el flujo de calor del suelo (W/m^2).

La evaporación se mide comúnmente con micro-lisímetros. Estos instrumentos permiten medir la evaporación en circunstancias en las que métodos tradicionales no son prácticos, permitiendo medir en condiciones de cobertura parcial o sombra parcial, o en otras situaciones en las que la resolución espacial de los lisímetros tradicionales es demasiado grande (Boast y Robertson, 1982; Souto, 2019).

La evaporación del suelo desnudo se describe comúnmente en dos etapas (Idso *et al.*, 1974). La etapa I está gobernada por las condiciones atmosféricas, con evaporación limitada solo por la energía disponible en la capa superior del suelo y por el gradiente de vapor entre el suelo y la atmósfera. Durante la etapa II, la evaporación se convierte principalmente en una función del contenido de agua del suelo, las propiedades hidráulicas del suelo y los gradientes de temperatura (Deol *et al.*, 2012).

El proceso de transpiración puede incrementarse bajo un riego localizado, ya que el suelo seco se calienta más que el suelo húmedo, por lo que emite más radiación de onda larga, que es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo emisor, en este caso el suelo, provocando un aumento directo e indirecto de la temperatura de follaje y en consecuencia un aumento de la transpiración. Lo anterior es relevante en árboles frutales de poca edad, siembras de cultivos y hortalizas de baja altura (Pizarro, 1996).

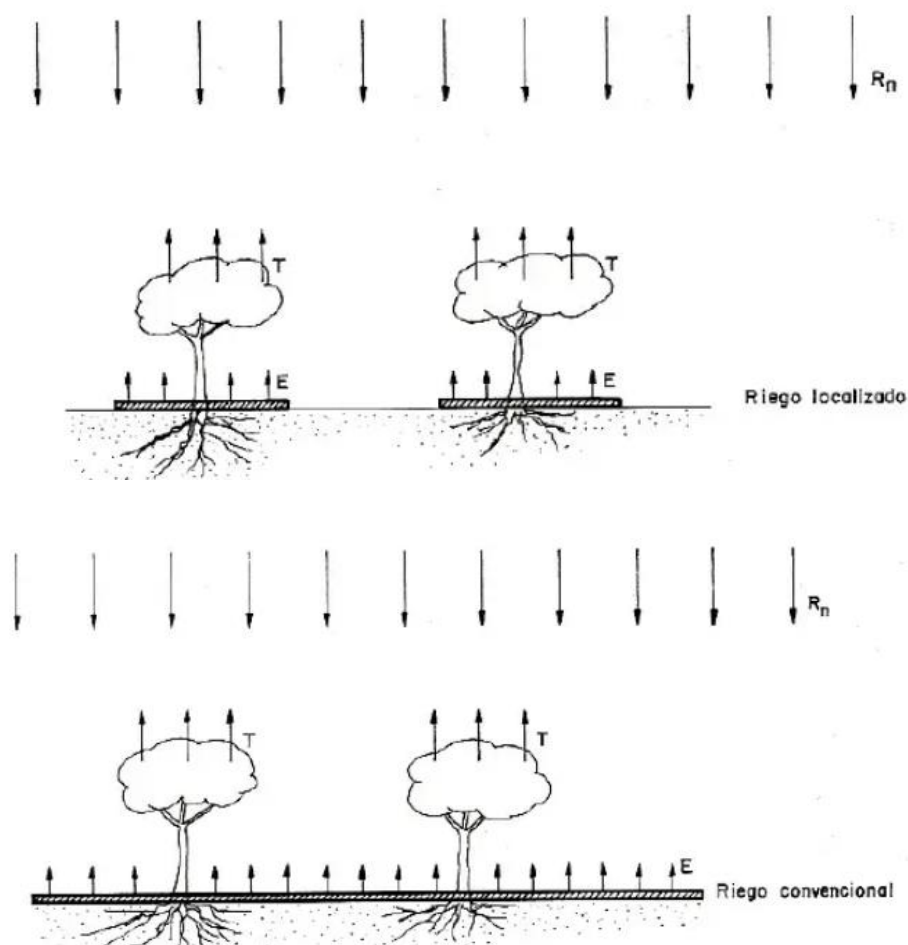


Figura 7. Diferencia esquemática de los flujos de transpiración (T), evaporación (E) y radiación neta (R_n), para riego localizado y riego convencional. Fuente: Pizarro, 1996.

La transpiración de la planta ocurre cuando el agua se mueve desde el suelo a la superficie de la raíz, alcanzando los vasos xilemáticos hasta llegar a las células del mesófilo, en donde la planta pierde vapor de agua a través de estomas (poros minúsculos que se encuentran principalmente en la epidermis de las hojas de las plantas).

El efecto de la alta frecuencia de riego también favorece el efecto de la transpiración, ya que en los riegos convencionales la humedad desciende bastante en los días anteriores al riego y la transpiración se puede ver reducida. Este hecho solo se presenta cuando el intervalo de riegos es incorrecto, por tanto, no se considera inherente al sistema de riego, aunque en la práctica es una situación que se presenta con frecuencia (Silva *et al.*, 2015). La cantidad de agua utilizada por transpiración de las plantas es mucho mayor a la cantidad de agua que pueden retener en su interior para su crecimiento y fotosíntesis. Así, la transpiración puede considerarse como el consumo de agua que necesitan las plantas.

Con el fin de poder cuantificar la evapotranspiración se introduce el concepto de evapotranspiración potencial (ETP) por Penman (1948) y Wilm *et al.*, (1944), quienes definen ETP como la tasa máxima de evaporación de una superficie completamente sombrada por un cultivo verde, sin limitación de un suministro hídrico. A partir de los trabajos de estos autores se han desarrollado y publicado una gran variedad de métodos como Monteith (1965) o Blaney *et al.* (1952).

Monteith (1965) fue la más acertada, ya que comprendía una gran cantidad de variables involucradas; sin embargo, nace la inquietud de que en distribución dispersa y agrupada en mosaicos de vegetación, característica de las zonas semiáridas constituye un ejemplo dónde no se puede satisfacer los supuestos de la aproximación de Monteith, por lo que trabajos posteriores extendieron el modelo a dos o más fuentes (Shuttleworth y Wallace, 1985; Choudhury y

Monteith, 1988; Shuttleworth y Gurney, 1990) para predecir la evaporación y transpiración por separado.

Souto (2019) propuso un modelo de balance de energía superficial para suelos parcialmente humedecidos (SEB-PW) basándose en modelos de múltiples capas para estimar el flujo de calor latente y sensible del suelo, modelo en el cual utilizaron el método de renovación de superficie y mediciones de micro lisímetros, logrando separar la transpiración del cultivo, evaporación del suelo seco y húmedo. El modelo fue evaluado en un par de viñedos con sistema de micro-riego donde el análisis de sensibilidad mostró que la calibración de los parámetros de la resistencia de la canopia y resistencias del suelo son necesarios para estimar la evaporación y transpiración que ocurren en diferentes cultivos y texturas de suelo (Souto, 2019). El modelo SEB-PW, encontró que la evaporación del suelo con respecto a la evapotranspiración total, correspondía al 28-46% después de eventos de riego.

Adicionalmente, el modelo SEB-PW fue evaluado en dos sitios de avellanos europeos, uno regado por micro-aspersión (S1) y otro regado por goteo (S2). En cada sitio de estudio se instaló una estación de evapotranspiración para medir los componentes SEB (balance de energía superficial) y las variables micro-meteorológicas. Las mediciones del SEB mostraron algunas diferencias que fueron relacionadas con el método de riego (Souto, 2019). López-Olivari *et al.* (2016) sugirieron que el tamaño y la densidad de la canopia, IAF (índice de área foliar), P (área sombreada), la poda y los sistemas de riego tienen un efecto importante en el SEB. A medida que crece la canopia, su efecto de

sombra cubre cada vez más las áreas húmedas, reduciendo así la radiación que llega al suelo y, en consecuencia, la energía disponible para la E desde el área húmeda. Como el sistema de riego por micro-aspersión generó mayor área húmeda en comparación del riego por goteo, la evaporación fue mayor. Sin embargo, la gran diferencia se obtuvo con la aplicación de agua, donde la evaporación desde áreas no mojadas con respecto a la evaporación total medida fue de 32% para el sitio S1 y para el sitio S2 fue de 35%, en comparación con la evaporación de áreas mojadas donde para el sitio S1 se midió una evaporación de 68% y para el sitio S2 una evaporación de 65%.

Estos resultados entregados por el modelo de SEB-PW fueron similares a los medidos con micro-lisímetros, por lo que se recomienda utilizar este modelo para estudios futuros donde se quiera conocer la cantidad de evaporación del suelo en diferentes sistemas de micro-riego y analizar el consumo de agua por separado, en T, E y ET total (Souto, 2019).

Este modelo también demostró la relación directa que existe entre E y la fracción de suelo húmedo (P_w), donde se indica que el área de suelo humedecido por un sistema de riego por micro-aspersión es conceptualmente mayor que la de un sistema de riego por goteo, por lo tanto, las disminuciones de ET para un sistema de riego por goteo están asociadas con la disminución de E.

Yanusa *et al.* (2004) (citados en Souto, 2019) midieron la evaporación con micro-lisímetros en cuatro zonas y encontraron que, durante los periodos lluviosos, cuando toda la superficie del suelo estaba mojada, el proceso de

evaporación representa hasta el 80% de la evapotranspiración total (etapa I de E), y sin una adición sustancial de agua, la E disminuyó a menos del 9% de su valor original. La disminución progresiva de E ocurre porque, a medida que las capas cercanas a la superficie del suelo se secaron, la conductividad hidráulica no saturada también disminuyó (Souto, 2019).

Espadafor *et al.* (2018) señalaron que en almendros se notaba una respuesta mejorada de crecimiento y transpiración cuando se aumentaba el volumen de suelo mojado. Gispert *et al.* (2013), han demostrado con un modelo de simulación de olivo que, en árboles regados por goteo, la transpiración puede estar limitada por el volumen del suelo mojado. Además, establecieron que el diseño de riego debe considerar que, en condiciones de baja disponibilidad de agua de riego, se debe limitar el área del suelo mojado para minimizar las pérdidas por evaporación.

En resumen, el efecto que provoca la localización y la alta frecuencia es disminuir la evaporación e incrementar la transpiración. El balance volumen supone una disminución del conjunto evapotranspiración, cuya magnitud depende de varias características como la masa de follaje, superficie total de las hojas, volumen de la copa, entre las principales. Como estas características son difíciles de cuantificar se ha intentado representarlas por la “fracción de área sombreada”, que es la fracción de la superficie del suelo sombreada al medio día, y que se suele representar por la letra “A”. Cuanto menor es “A” mayor es la reducción de la evapotranspiración en riego localizado respecto al riego convencional (Pizarro,1996).

La fracción de área sombreada está dada por la cantidad de follaje verde (hojas) en relación con el área del marco de plantación y varía a lo largo de la temporada de acuerdo con el tipo de cultivo. A mayor desarrollo del cultivo, mayor es el porcentaje de cobertura y mayores son sus necesidades hídricas. En la determinación de la evapotranspiración de cultivo para huertos en formación (1º a 5º año en terreno, aproximadamente) se debe considerar un factor de cobertura del huerto, el que toma valores de 0.1 para el primer año y se incrementa gradualmente hasta alcanzar el valor de 1.0 para un huerto adulto. En general, se puede afirmar que cuando la vegetación de un huerto ocupa un 70% o más del marco de plantación estamos en presencia de una plantación adulta (*Holzapfel et al.*, 2021).

2.6 Desarrollo radical y área humedecida

Las raíces son una especie de puente entre el suelo y la planta, mediante ellas, el agua del suelo pasa al tallo de la planta, que luego llega a las hojas y eventualmente a la atmósfera. El movimiento vertical del agua depende de varios factores, como el tipo de suelo, de la planta y de las condiciones atmosféricas (Gómez, 2021), factores mencionados en el apartado I.

En la sección 2.4 se ha descrito cómo la técnica de goteo mantiene un alto potencial mátrico del agua en un volumen reducido de suelo, suministrando el agua necesaria justo en el lugar de extracción de las raíces, ahora debemos enfocarnos en qué posición está el sistema radical y como a través del agua

podemos afectar su distribución y crecimiento para usarlo a favor de los cultivos.

Dentro de las características y ventajas que conlleva el microriego, encontramos que las tuberías del sistema pueden transportar agua y nutrientes hacia los emisores para derivarla a la zona de raíz de cada planta. Por lo expuesto es importante conocer el desarrollo radical del cultivo, ya que se quiere lograr un mayor aprovechamiento por parte de las raíces.

Debido a los pequeños volúmenes de agua suministrada a la planta, los nutrientes y el aire en la zona de la raíz del cultivo, pueden alcanzar la mejor relación de acoplamiento versus un riego convencional, lo que proporciona un ambiente óptimo para el crecimiento de los cultivos.

Las raíces presentan un extraordinario dinamismo, plasticidad y rápida adaptación al régimen de humedad concentrada en el bulbo húmedo, este puede contener una densidad de raíces de 3 a 4 veces más que un suelo con riego no localizado (López-Olivari, 2016). La mayor concentración de raíces no solo da lugar a una mayor extracción de agua del suelo por la superficie de absorción, sino que además cualquier partícula de agua encuentra la raíz más próxima a menos distancia.

Por otra parte, las raíces no se limitan al bulbo húmedo ya que fuera de él también existe humedad, sobre todo en climas lluviosos. Además, fuera del bulbo húmedo pueden encontrar un ambiente con menos toxinas y con algunos nutrientes cuya concentración haya disminuido en el bulbo húmedo. Amoros (1991) señala que un árbol con riego localizado puede dar

rendimientos aceptables con el 35% del sistema radical bien regado y nutrido convenientemente, aunque lo aconsejable sea más del 50%, considerándose óptimo entre el 70 y 80%.

Algunos investigadores han estudiado como es el patrón de extracción de humedad en la zona de raíces, por ejemplo, Cifuentes (2008) realizó un estudio en naranjos cv. Valencia, midiendo el contenido de humedad del suelo a 0.6, 1.6 y 3.0 m del tronco para tres estratas de suelo correspondientes a 0-30, 30-60 y 60-90 cm de profundidad respectivamente. Cifuentes (2008) encontró que para todos los casos la estrata de 30-60 cm se mantuvo con valores de humedad inferiores a la capacidad de campo, indicando una mayor absorción de agua por parte de las raíces extractantes, ya que una parte esencial del sistema radical de los cítricos (65% de las raíces) está localizada en los primeros 50 cm del suelo (Loussert, 1992). Lo anterior también confirmaría lo aseverado por Boman *et al.* (1999), Dinamarca (2001), Holzapfel *et al.* (2001) y Henríquez (2005), quienes señalan que el patrón de extracción de agua y distribución radical de los cítricos se encuentran en los primeros 60 cm de profundidad.

Los cambios espacio temporal del agua en el suelo no solo afectan la temperatura, la aireación y el transporte de solutos en el suelo, sino también el crecimiento y la distribución de las raíces extractantes de los cultivos y frutales (Pivonia *et al.*, 2004). Bryla *et al.* (2011) realizaron un estudio del crecimiento y necesidades de agua en plantas de arándanos bajo diferentes métodos de riego, el cual indicó que el riego excesivo reduce la cantidad de

oxígeno disponible para las plantas en la zona de la raíz, disminuyendo el crecimiento de estas y la absorción de nutrientes.

Junto con la aplicación de riego, se aportan sales que prácticamente no son evaporadas, en consecuencia, van en aumento hasta que se aplique el próximo riego. El efecto de las sales disueltas es aumentar la presión osmótica de la solución y en consecuencia dificultar la adsorción de agua por las raíces. La alta frecuencia en los riegos facilita la absorción de agua por el doble efecto de mantener alta la humedad y baja la salinidad. La distribución típica bajo el emisor está representada por una zona muy lavada, rodeada por un tramo de baja salinidad que coincide prácticamente con el volumen ocupado por el bulbo húmedo.

Las sales se acumulan en la periferia del bulbo (Figura 8) y sobre todo en la superficie del suelo, donde presentan una especie de corona circular blanca, teniendo un efecto favorable de concentrar las raíces en la zona de mayor humedad y menor salinidad, pero en cambio en la periferia del bulbo establece una barrera al desarrollo de las raíces, lo que dificulta que estas exploren la parte de suelo situada fuera del bulbo húmedo.



Figura 8. Formación de corona circular de sales del bulbo húmedo en micro-riego. Fuente: Rottenberg, 2019.

En el caso de los árboles frutales, las raíces se desarrollan en áreas favorables del suelo, pero en el caso de plantas anuales se corre el riesgo de que se siembre en zonas superficiales más salinizadas, lo que puede perjudicar a la germinación, que es una fase del ciclo vegetal muy sensible a la salinidad.

Las raíces de los frutales tienen diferentes grados de adaptabilidad a los excesos de humedad del suelo, siendo el secoano uno de los más tolerantes a la anaerobiosis (crecimiento en ausencia de oxígeno), seguido del membrillo, peral, manzano y cítricos. Por otra parte, el ciruelo, cerezo, damasco, durazno, palto, almendro y olivo, son muy sensibles o extremadamente sensibles a contenidos altos de humedad o a la existencia de problemas de drenaje en el suelo, especialmente durante el crecimiento activo de las raíces. En

condiciones de déficit de humedad del suelo, las raíces de los frutales tienden a detener su crecimiento y a suberizar los extremos, no recuperando de manera expedita su capacidad de absorber agua cuando el suelo vuelve a humedecerse (*Holzapfel et al.*, 2021).

2.7 Área y volumen humedecido versus producción

Un análisis de la relación entre la producción y la calidad del fruto con respecto al patrón de humedecimiento del suelo para el mismo volumen de agua aplicada es un factor importante y necesario de evaluar.

En general se ha encontrado que bajo riego localizado se obtienen mayores producciones y un incremento en la calidad del producto. Esto se asocia a que: bajo riego por goteo y microaspersión se aplican los niveles de agua requerido por el cultivo en forma más precisa y controlada para los diferentes estados de desarrollo, logrando la calidad y producción esperada, que es difícil por ahora en otros sistemas de riego (*Holzapfel*, 2000). Esto sigue siendo cierto, ya que estos sistemas permiten aplicar en la actualidad fertilizantes y otros productos químicos en forma efectiva y en base a las necesidades parciales del cultivo (*Holzapfel et al.*, 2021).

Varias investigaciones concuerdan que se podría obtener una estrategia de riego deficitario sin afectar la producción de los cultivos. Esta teoría ha sido foco de varias investigaciones (*Gispert et al.*, 2013; Zapata-Sierra y Manzano-Agugliaro, 2017; Martí *et al.*, 2018) por su disminución en el nivel de agua aplicada, por ende, menores costos asociados a la producción. De la misma

manera, un exceso de agua no tiene mejores rendimientos en términos de producción.

El riego de alta frecuencia tiene beneficios para la producción, pues al mantener el suelo humedecido constantemente, la adsorción de agua por las raíces exige un esfuerzo menor a la planta y la producción se desarrolla en mejores condiciones, aumentando los rendimientos.

Que los cultivos obtengan altos rendimientos no depende del sistema de riego como tal, sino del régimen de humedad del suelo, esto quiere decir que: en el riego convencional, cuanto mayor es el intervalo entre riegos, más se aproxima al umbral de humedad (valor de humedad límite hasta donde el cultivo no se reciente), por lo que, en términos agronómicos, se busca acortar ese intervalo. En cambio, desde el punto de vista de costos de operaciones de riego interesa alargar el intervalo aumentando la dosis de riego. Es por esta razón que se utiliza el riego localizado de alta frecuencia, ya que se trabaja alejado del umbral de humedad y, además, se logra una mejor aplicación de los fertilizantes (Pizarro,1996).

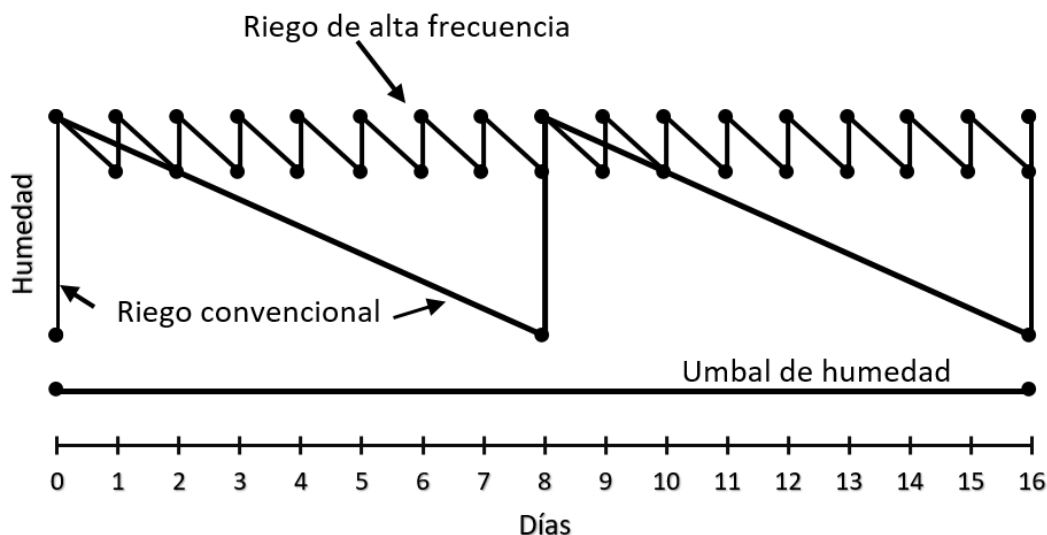


Figura 9. Comparación de variación del contenido de humedad para riego de alta frecuencia vs riego convencional. Fuente: Pizarro, 1996.

En la Figura 9 se esquematiza como varía el contenido de humedad “ θ ” en un intervalo de 8 días versus el caso de un riego diario de alta frecuencia, donde normalmente se trabaja alejado del valor del umbral. El valor umbral de humedad en el suelo depende de varios factores, fundamentalmente del tipo de cultivo, y que se caracteriza por que mientras θ se mantenga por encima de ese valor, la producción del cultivo en cuestión no se reciente. Sin embargo, en los suelos de poca capacidad de retención es difícil conseguir esta condición, se necesitarían intervalos de 2, 3 ó 4 días en riegos convencionales, de forma que si se aplican intervalos mayores la producción se reciente.

El primer día después del riego es el más afectado, pues al estar mojada la superficie se produce una evaporación mayor. Souto (2019) encontró que la E

promedio disminuyó de 2,3 mm día⁻¹ el primer día después del riego a 0,8 mm día⁻¹ durante los días siguientes. Los patrones de aumento y disminución de E corresponderían al efecto de frecuencia de riego.

Lecaros-Arellano *et al.* (2021) también notaron una estabilización del humedecimiento del suelo, manteniendo este la capacidad de campo al aumentar la frecuencia de riego de tres veces por semana a todos los días en la especie la especie Gala Brookfield, injertados en porta-injerto enano M.9

En los suelos arenosos o poco profundos, los riegos localizados de alta frecuencia pueden aumentar las producciones; sin embargo, para los suelos arcillosos hay que evitar esta modalidad de riego, puesto que este puede provocar problemas al cultivo por falta de aireación. Como se ha mencionado, si se utilizan elevadas dosis de riego provoca la saturación del suelo los días posteriores al riego, junto con este fenómeno se provoca la destrucción superficial de la estructura del suelo y la consiguiente formación de superficie compacta. En cambio, en microriego solo se satura en un volumen muy reducido el suelo próximo al emisor. A partir de esta zona saturada hay un gradiente de concentración de oxígeno, que aumenta al acercarse a la periferia del bulbo húmedo.

Un estudio del efecto de la distribución del suelo húmedo en un campo de arándanos realizado por Holzapfel *et al.* (2015), indica que el rendimiento del fruto se vio significativamente afectado por el número de laterales de goteo por hilera, resultando mayor el rendimiento de frutos en cuatro laterales por hilera en comparación a dos o seis por hilera, todos aplicando la misma cantidad de

agua por planta. Ejecutando esta práctica nos conduce a plantearnos la posibilidad de disminuir los marcos de plantación; no obstante, tal disminución se ve limitada por las necesidades de luz de follaje, por lo que hay que ser muy prudente al tratar de ejecutar esta práctica.

¿Hasta qué punto se puede reducir el volumen del suelo mojado sin reducir los rendimientos?, es una pregunta muy importante sobre la cual los conocimientos son limitados. Una cifra del 30 a 40% es generalmente aceptada, por debajo de esto se corre el riesgo de que sea insuficiente. Por encima de esos valores la situación es más segura. Las observaciones realizadas en frutales indican que es necesario utilizar un porcentaje de suelo mojado más altos que el 30 a 40% (Ferreyra y Sellés, 2013). Gómez (2021) plantea que el suelo mínimo a humedecer correspondería aproximadamente al 40%, en general dependiendo de la distribución de las raíces.

Tabla 3. Porcentajes recomendados de suelo mojado según el cultivo.

Cultivo	PSM (%)
Vides	30 – 40
Frutales	40 – 50
Hortalizas	55 – 65

Fuente: Ferreyra y Sellés, 2013.

En la Tabla 3 se muestra el porcentaje de suelo mojado (PSM) recomendado en función del tipo de cultivo. Estos valores pueden aumentar dependiendo la aridez del clima y cuanto más arenosa o arcillosa sea la textura del suelo.

El porcentaje de suelo mojado (PSM) según Ferreyra y Sellés (2013) se puede estimar como [Ecuación 4]:

$$PSM = \frac{\text{Área mojada por emisores}}{\text{Área total}} * 100 \quad [4]$$

Black y West (1974), trabajando en manzanos jóvenes, obtuvieron una reducción de un 25% de la evapotranspiración de cultivo (ETc) al reducir el volumen de suelo mojado en un 25%. En función de este experimento básico, varios investigadores han realizado trabajos a efectos de determinar el porcentaje de suelo mojado necesario para no afectar los rendimientos en naranjos (Moreshet *et al.*, 1983; Koo y Smajstrla, 1985), durazneros, almendros y olivos (Willoughby Y Crockroft, 1974; Fereres, 1981; Gispert *et al.*, 2013).

Gispert *et al.* (2013) aportó demostrando que se puede reducir el consumo total de agua del cultivo de olivo sin afectar su producción. Los resultados obtenidos en su investigación evidenciaron que una reducción del 20% en la dosis de riego no tuvo efecto significativo en la producción de frutos y tampoco en la elaboración de subproductos.

Al realizar investigaciones entre temporadas, se ha notado la particularidad de no demostrar diferencias significativas entre tratamientos, sino que, entre temporadas, como es el caso de Cifuentes (2008), quien realizó un análisis comparativo sobre el efecto de la aplicación de agua, fertilización y localización, en la producción y calidad de naranjos cv. Valencia, para tres

temporadas consecutivas de riego. Dicho ensayo obtuvo como resultados que el rendimiento y la calidad de la fruta muestran diferencias entre los tratamientos de localización de aplicación de agua y fertilizante solo entre temporadas.

Como resultado de la producción bajo efectos de aplicación diferenciada de agua, Cifuentes (2008) encontró que para la primera temporada la mayor producción fue para el tratamiento con un 40% de reposición del volumen teórico de agua requerido para la temporada (Vat), para la segunda temporada el tratamiento con un 50% de Vat y para la tercera temporada con un 75% de Vat. Este comportamiento se atribuyó a que los naranjos al tercer año de haberles impuesto un nuevo régimen hídrico, se empezaron a adecuar a las nuevas condiciones.

Lo expuesto anteriormente orienta a varios investigadores que apuntan que se puede aplicar un riego deficitario sin afectar en la producción, incluso valores inferiores al 100% son adecuados para los cultivos. Holzapfel *et al.* (2001), encontraron que en los naranjos cv Thompson Navel, la producción aumentó con mayores niveles de agua aplicada y fertilización hasta un valor de un 67% de reposición, disminuyendo para valores de 100%, debido al alto contenido de humedad que alcanza el suelo por el excesivo volumen de agua aplicada. Otro ejemplo de esto es la investigación realizada por Trincado (2005) en Paltos, donde encontró que, en términos de producción, tras aplicar riego deficitario se obtiene un mayor rendimiento (kg ha^{-1}) en los cultivos regados con un 40% del volumen teórico requerido. Cabe mencionar que esta

producción fue reflejada en el cuarto año, los años anteriores igualmente la producción fue en aumento, pero en proporciones menores.

Junto con la idea de disminución del volumen humedecido, también se busca variar la superficie humedecida y estudiar cómo se comporta la producción al extender o disminuir el área humedecida.

Es por esta razón que Cifuentes (2008) incluyó un estudio donde evaluó el efecto del área humedecida en la producción de naranjos para tres temporadas, obteniendo como resultados un aumento en la producción para la primera temporada; sin embargo, en la segunda y tercera temporadas se ve una cierta disminución, pero a su vez una estabilización de las mismas (Figura 10). Lo anterior se debe principalmente a la mejora que se realizó en la metodología de aplicación del agua, ya que el huerto pasó de utilizar 4 goteros de 8 L h^{-1} por árbol distribuidos en una línea a utilizar 10 goteros de 4 L h^{-1} distribuidos en dos líneas. Lo anterior es consistente con lo dicho por Amoros (1991), quien afirma que los rendimientos mejoran al aumentar la superficie humedecida del árbol.

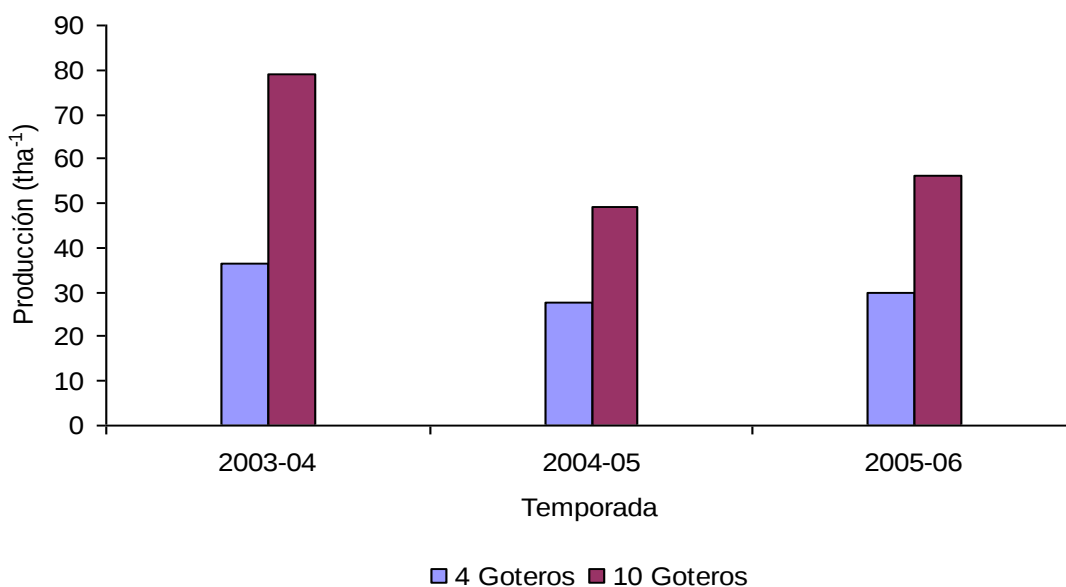


Figura 10. Producción ($t\ ha^{-1}$) de naranjos cv. Valencia de 35 años, para las temporadas 2003/04, 2004/05 y 2005/06, utilizando 4 y 10 goteros respectivamente. Fuente: Cifuentes (2008).

Dos años después, Morales *et al.* (2010) realizó un ensayo similar con durazneros cv. Dixiland, donde presentó cinco tratamientos, todos regados con la misma dosis de agua, pero variando su patrón de mojado mediante el uso de diferentes emisores. Respecto a la producción obtenida en la primera cosecha del ensayo, los cuatro tratamientos regados (T2, T3, T4 y T5, los primeros tres con una línea de goteros por hilera y el último, con dos líneas de goteros por hilera) rindieron significativamente más que el secano (T1), aunque sin diferencias significativas entre ellos. Se insinúa una tendencia similar a la del crecimiento vegetativo, por ejemplo: T3, regado por goteros de $4\ L\ h^{-1}$ a 1 m, obtuvo árboles más grandes y quizás por eso mismo mayor producción. El autor plantea la hipótesis que los efectos de estos tratamientos,

en un cultivo de hojas perenne, serán acumulativos y se podrán expresar en años sucesivos. De los tratamientos regados, el T5 fue el que obtuvo el menor número de frutos, aunque de mayor tamaño, sin diferir significativamente de los otros tratamientos.

Tabla 4. Rendimientos y tamaño de frutos para la temporada 2006/2007 para cinco tratamientos regados con patrones diferenciales.

	Rendimiento (kg árbol ¹)	Número de frutos	Tamaño (g fruto ¹)*
T1	12,52 b	94 c	134 b
T2	19,87 a	132 ab	152 a
T3	22,11 a	145 a	157 a
T4	19,91 a	130 ab	155 a
T5	17,50 a	110 bc	166 a

* Letras distintas muestran diferencias significativas entre tratamientos. Fuente: Morales et al., 2010.

Cifuentes (2008), también evaluó el efecto en la producción de naranjos mediante la localización de la aplicación del agua, fijando las líneas de goteros a 40, 60, 80 y 120 cm desde el tronco, obteniendo que: a medida que se alejan las líneas de goteros desde el tronco del árbol, este comienza a disminuir su producción para las tres temporadas de riego, siendo en general el tratamiento que se ubicó a 60 cm el que presentó la más alta producción. Este resultado coincide con una parte del proyecto FONDEF realizado por Trincado (2005), que se centró en analizar el efecto de la aplicación diferencial del agua, dosis de fertilización y localización, en producción y calidad del palto, en donde se aplicó niveles diferenciales de agua. Simultáneamente, evaluó el efecto de la localización del emisor (microjet con un radio de mojamiento de 1 m) a

diferentes distancias desde el tronco del árbol (40, 60 y 100 cm), con una aplicación de agua de un 80% del volumen total requerido (V_{tr}), y dosis de fertilización normal (FN). En dicho ensayo obtuvo como resultados una mayor producción estadísticamente no significativa para los emisores ubicados a 60 cm del tronco del árbol.

Morales *et al.* (2010), al contrario de Cifuentes (2008) no evidenció ninguna respuesta a la variación del porcentaje de suelo mojado para todas las variables analizadas. En ningún caso el T5, que mojaba más del doble de volumen que los otros tratamientos, tuvo una respuesta diferencial.

Autores como Girona *et al.* (2010) investigaron al respecto, encontrando que los rendimientos en manzanos injertados en portainjertos M.9 enanizantes, que crecen en suelo franco, fueron mayor con un gotero por árbol debido a una menor evaporación del suelo y una infiltración más profunda en el perfil del suelo que con dos goteros por árbol. Lecaros-Arellano *et al.* (2021) realizaron un estudio de los efectos del número de laterales de goteo sobre el rendimiento y calidad de las manzanas cultivadas en dos tipos de suelo, franco-arcilloso y franco-pedregoso. Utilizaron un diseño de riego donde se mantuvo el mismo volumen de agua aplicada en cada tratamiento, pero logrando patrones de humectación diferenciales. Se encontró una respuesta positiva al aumento de número de emisores en el suelo franco-pedregoso, cuatro líneas de goteros más allá de las dos líneas de goteo normales que usan los agricultores. Por otro lado, el suelo franco arcilloso tuvo mayores rendimientos regando con un lateral por hilera, esta respuesta indica que se

humedecía suficiente volumen de suelo bajo esas condiciones, probablemente en la zona de mayor extracción de las raíces. Finalmente, este estudio enfatiza en la necesidad de mojar suficiente volumen de suelo bajo riego por goteo, independiente de las cantidades de riego, en suelos de textura ligera en particular.

Kutschel-Otárola *et al.* (2020) enfatiza la importancia de mantener unas condiciones adecuadas de distribución de humedad del suelo, ya que el tipo de suelo y los patrones de humectación bajo riego por goteo tienen una influencia importante en el rendimiento de los árboles bajo diferentes estrategias de riego, ya que proporcionan un almacenamiento y amortiguación significativos para plantas, lo que permite producir “más cultivo por gota de agua”.

3. CONCLUSIONES

De acuerdo a los antecedentes recopilados podemos concluir que:

1. En general, se ha encontrado que la mejor forma de humedecer el suelo es distribuir la dosis de riego abarcando una mayor área, asociado con la distribución de laterales y emisores. Los estudios coinciden en que los emisores de riego deben ubicarse a una distancia entre 0.4 - 0.6 m desde el tronco y humedecer hasta una profundidad de 60 cm, ya que en dicho sector se encuentran la mayor cantidad de raíces extractantes.
2. Los patrones de humedecimiento del suelo a través de los sistemas de riego tienen gran influencia en factores como la evapotranspiración y producción.
3. Estimar el área humedecida es un proceso muy complejo, esto asociado principalmente a la sensibilidad que presentan los diferentes modelos a factores como el tipo de suelo y su conductividad hidráulica, que varía en rangos importantes de magnitud.
4. El bulbo húmedo tiene influencia en la evapotranspiración y producción, por lo que es necesario que su volumen y geometría sea un objetivo importante en el diseño de los sistemas de riego.

6. El uso de micro riego permite disminuir la evaporación y aumentar la transpiración; asociado a una menor área de mojamiento, y un aumento de la temperatura de follaje proveniente de una mayor área de suelo seco.

7. En general podemos establecer que se ha realizado un importante número de estudios referidos al área humedecida y producción. Sin embargo, es necesario realizar estudios con mayor profundidad sobre el efecto de evaporación y transpiración al variar el patrón de mojamiento del cultivo.

Finalmente, existe una gran cantidad de autores que han desarrollado investigaciones entorno a la optimización de los recursos hídricos, aportando en nuevos lineamientos para su cuidado y mejor uso de acuerdo a las condiciones actuales de clima y medioambiente, puesto que este elemento es esencial para la vida y año tras año se vuelve más escaso.

4. LITERATURA CITADA

1. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración de cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje N°56. FAO. Roma, Italia.
2. Amoros, M. 1991. Riego por goteo en cítricos. Mundi-Prensa Libros. Madrid, España.
3. Angella, G., C. Frías y R. Salgado. 2016. Conceptos básicos de las relaciones agua – suelo - planta. Colección Divulgación N°93. INTA Ediciones. Santiago del Estero, Argentina.
4. Black, J.D.F., D.W. West. 1974. Water uptake by an apple tree with various proportions of the root system supply with water. In: Proceedings of the second international drip irrigation congress. July 07-14,1974. California University. San Diego, USA.
5. Blaney, H., W. Criddle and L. Rich. 1952. Consumptive use of water. Trans. Am. Soc. Civil Eng. 117: 948-967.
6. Boast, C.W., T.M. Robertson. 1982. A “Micro-lysimeter” method for determining evaporation from bare soil: Description and laboratory evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J. 46(4): 689-696.

7. Boman, B., Y. Levy and L. Parsons. 1999. Water management. pp: 72-81.
In: L.W. Timmer and L.W. Duncan (Eds.). Citrus heath management.
The American Phytopathological Society. St. Paul, USA
8. Browman, R.A., M.F. Vigil, D.C. Nielsen and R.L. Anderson. 1999. Soil organic matter changes in intensively cropping dryland systems. Soil Sci. Soc. Am. J. 63(1): 186-191.
9. Bryla, D.R., J.L. Gartung and B.C. Strik. 2011. Evaluation of irrigation methods for Highnush Blueberry-I. Growth and water requirements of young plants. HortScience 46(1): 95-101.
10. Choudhury, B.J., J.L. Monteith. 1988. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. Q. J. R. Meteorol. Soc. 114(480): 373-398.
11. Cifuentes, M.H. 2008. Análisis comparativo sobre el efecto de la aplicación de agua, fertilización y localización, en la producción y calidad de naranjos cv. Valencia, para tres temporadas de riego. Memoria de titulación, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
12. Deng, X.-P., L. Shan, H. Zhang and N.C. Turner. 2006. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. Agric. Water Manag. 80(1-3): 23-40.

13. Deol, P., J. Heitman, A. Amoozegar, T. Ren and R. Horton. 2012. Quantifying nonisothermal subsurface soil water evaporation [en línea]. *Water Resour. Res.* 48(11). <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2012WR012516>>. [Consulta: 10 abril 2022].

14. Dinamarca, O.M. 2001. Efecto del volumen de agua aplicado fertilización sobre la producción de naranjos (*Citrus sinensis*) cv. Thompson de quince años. Memoria de título, Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía. Chillán, Chile.

15. Espadafor, M., F. Orgaz, L. Testi, I.J. Lorite, O. García-Tejera, F.J. Villalobos and E. Fereres. 2018. Almond tree response to a change in wetted soil volume under drip irrigation. *Agric. Water Manag.* 202: 57-65.

16. Fereres, E. 1981. Papel de la fisiología vegetal en la micro-irrigación. Recomendaciones para el manejo mejorado En: IV Seminario latinoamericano “Riego por goteo y riego localizado”. 21–27 junio, 1981. IICA. Barquisimeto, Venezuela.

17. Fernández, R.T., R.L. Perry and D.C. Ferree. 1995. Root distribution patterns of nine apple rootstock in two contrasting soil types. *Am. Soc. Hortic. Sci.* 120(1): 6-13.

18. Ferreyra, R., G. Sellés. 2013. Manual de riego para frutales: Uso eficiente del agua de riego y estrategias para enfrentar períodos de escasez. Boletín INIA N°278. INIA La Platina. Santiago, Chile.
19. Gicheru, P., C. Gachene, J. Mbuvi and E. Mare. 2004. Effects of soil management practices and tillage systems on surface soil water conservation and crust formation on a sandy loam in semi-arid Kenya. Soil Tillage Res. 75(2): 173-184.
20. Gil-Marín, J.A. 2001. Forma y dimensiones del bulbo húmedo con fines de diseño de riego por goteo en dos suelos típicos de sabana. UDO Agríc. 1(1): 42-47.
21. Girona, J., M.H. Behboudian, M. Mata, J. Del Campo and J. Marsal. 2010. Exploring six reduced irrigation options under water shortage for 'Golden Smoothee' apple: Responses of yield components over three years. Agric. Water Manag. 98(2): 370-375.
22. Gispert, J.R., F. Ramírez de Cartagena, J.M. Villar and J. Girona. 2013. Wet soil volume and strategy effects on drip-irrigated olive trees (cv. 'Arbequina'). Irrig. Sci. 31: 479–489.
23. Gómez, F. 2021. Propuestas de investigación: Ecuación de Richards en coordenadas esferoidales alargadas, para la descripción del bulbo húmedo en el riego por goteo. Universidad de Concepción, Facultad de

Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile (Documento de clases, fernagomez@udec.cl).

24. Gutiérrez-Gordillo, S., V.H. Durán-Zuazo and I. García-Tejero. 2019. Response of three almond cultivars subjected to different irrigation regimes in Guadalquivir river basin. *Agric. Water Manag.* 222: 72-81.
25. Henríquez, K.A. 2005. Efecto de la aplicación de agua, fertilización y localización, en producción y calidad de naranjos cv Valencia. Memoria de titulación, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
26. Holzapfel, E. 2000. Riego por goteo y microjet [en línea]. INIA, Chile. <<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/28569/NR25858.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. [Consulta: 10 abril 2022].
27. Holzapfel, E.A., C. Lopez, J.P. Joublan y R. Matta. 2001. Efecto del agua y fertirrigación en el desarrollo y producción de naranjos cv. *Thompson navel*. *Agric. Téc. (Chile)* 61(1): 51-60.
28. Holzapfel, E., J. Jara and A.M. Coronata. 2015. Number of drip laterals and irrigation frequency on yield and exportable fruit size of highbush blueberry grown in a sandy. soil. *Agric. Water Manag.* 148: 207-212.

29. Holzapfel, E., X. Orrego, J. Jara, L. Salgado y C. Souto. 2021. Riego y drenaje en frutales. Manuales FIA CRHIAM. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
30. Idso, S.B., R.J. Reginato, R.D. Jackson, B.A. Kimball and F.S. Nakayama. 1974. The three stages of drying of a field soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 38(5): 831-837.
31. INE (Chile). 2007. Cambios estructurales en la agricultura chilena. Análisis intercensal 1976 – 1997 - 2007. Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago, Chile.
32. Kang, S., X. Hao, T. Du, L. Tong, X. Su, H. Lu, S. Li, Z. Huo, X. Li and R. Ding. 2017. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: From research to practice. Agric. Water Manag. 179: 5-17.
33. Karmeli, D., G. Peri and M. Todes. 1985. Selection of emitters pp: 20-42. In: Irrigation systems: design and a operation. Oxford University Press. Cape Town, South Africa.
34. Keller, J. 1978. Trickle irrigation. In: National engineering handbook. U.S. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Washington D.C., USA.

35. Koo, R.C.J., A.G. Smajstrla. 1985. Trickle irrigation of citrus on sandy soils in a humid region. In: Drip/trickle irrigation in action: Proceedings of the third international drip/trickle irrigation congress. November 18-21, 1985. ASAE. St. Joseph, USA.
36. Kuschel-Otárola, M., D. Rivera, E.A. Holzapfel, N. Schütze, P. Neumann and A. Godoy-Faúndez. 2020. Simulation of water-use efficiency of crops under different irrigation strategies [en línea]. *Water* 12(10). <<https://www.mdpi.com/2073-4441/12/10/2930>>. [Consulta: 10 abril 2022].
37. Lecaros-Arellano, F., E. Holzapfel, E. Fereres, D. Rivera, N. Muñoz and J. Jara. 2021. Effects of the number of drip laterals on yield and quality of apples grown in two soil types [en línea]. *Agric. Water Manag.* 248: 68-95. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377421000469>>. [Consulta: 10 abril 2022].
38. López-Olivari, R. 2016. Manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial para el Sur de Chile: Conceptos y consideraciones básicas en métodos y programación de riego para optimizar el recurso hídrico. Boletín INIA N°340. INIA Carillanca. Temuco, Chile.
39. Loussert, R. 1992. Los agrios. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.

40. Martí, R., M. Valcárcel, M. Leiva-Brondo, I. Lahoz, C. Campillo, S. Roselló and J. Cebolla-Cornejo. 2018. Influence of controlled deficit irrigation on tomato functional value. *Food Chem.* 252: 250-257.
41. Medrano, H., J. Bota, J. Cifre, J. Flexas, M. Ribas-Carbó y J. Gulías. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investig. Geogr.* (43): 63-84.
42. Monteith, J.L. 1965. Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19: 205-334.
43. Morales, P., M. García-Petillo, R. Hayashi y L. Puppo. 2010. Respuesta del duraznero a diferentes patrones de aplicación del agua. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.* 14(1): 17–24.
44. Moreshet, S., Y. Cohen and M. Fuchs. 1983. Response of mature “Shamouti” orange trees to irrigation of different soil volumes at similar levels of available water. *Irrig. Sci.* 3:223-236.
45. ODEPA (Chile). 2022. Resultados preliminares del VIII CENSO agropecuario y forestal [en línea] ODEPA, Chile. <<https://www.odepa.gob.cl/contenidos-rubro/estadisticas/estadisticas-productivas/resultados-preliminares-del-viii-censo-agropecuario-y-forestal>>. [Consulta: 10 abril 2022]

46. Pachepsky, Y.A., W.J. Rawls. 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer function as affected by grouping soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(6): 1748-1757.
47. Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London Ser. A Math. Phys. Sci.* 193(1032): 120-145.
48. Pivonia, S., R. Cohen, S. Cohen, J. Kigel, R. Levita and J. Katan. 2004. Effect of irrigation regimes on disease expression in melon plants infected with *Monosporascus cannonballus*. *Eur. J. Plant Pathol.* 110: 155-161.
49. Pizarro, F. 1996. Riegos localizados de alta frecuencia (RALF). Goteo, microaspersión, exudación. (3a. ed.). Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
50. Rottenberg, O. 2019. Manejo de la salinidad en la solución del sustrato. Salinidad y fertirrigación [en línea] Metroflor-Agro, Colombia. <<https://www.metroflorcolombia.com/manejo-de-la-salinidad-en-la-solucion-del-sustrato-salinidad-y-fertirrigacion/>>. [Consulta: 27 septiembre 2022].
51. Salcedo-Pérez, E., A. Galvis-Spinola, T.M. Hernández-Mendoza, R. Rodríguez-Macias, F. Natera-Zamora, R. Bugarin-Montoya y R. Carrillo-

- González. 2007. La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. *Terra Latinoam.* 25(4): 419-425.
52. Schwartzman, M., B. Zur. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *J. Irrig. Drain. Eng.* 112(3): 242-253.
 53. Shuttleworth, W.J., J.S. Wallace. 1985. Evaporation from sparse crops an energy combination theory. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 111(469): 839-855.
 54. Shuttleworth, W.J., R.J. Gurney. 1990. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 116(492): 497-519.
 55. Silva, P., H. Silva, M. Garrido y E. Acevedo. 2015. Manual de estudios y ejercicios relacionados con el agua en el suelo y su uso por los cultivos. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
 56. Souto, C.I. 2019. Transpiración de cultivo y evaporación de suelo para cultivos de cobertura parcial y suelos parcialmente humedecidos. Tesis, Doctor en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos Hídricos en la Agricultura. Universidad de Concepción, Dirección de Postgrado. Chillán, Chile.
 57. Trincado, J.C. 2005. Relaciones agua – Planta en paltos (*Persea americana Mill.*) cv. Hass, sector Peumo, Provincia Cachapoal, VI Región. Memoria

de título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.

58. Willoughby, P., B. Cockroft. 1974. Changes in root patterns of peach trees under trickle irrigation. In: Proceedings of the second international drip irrigation congress. July 07-14,1974. California University. San Diego, USA.
59. Wilm, H.G., C.W. Thornthwaite, E.A. Colman, N.W. Cummings, A.R. Croft, H.T. Gisborne, S.T. Harding, A.H. Hendrickson, I.E. Houk, J. Kittredge, C.H. Lee, C.-G. Rossby, T. Saville and C.A. Taylor 1944. Report of the committee on transpiration and evaporation, 1942-43. Eos Trans. Am. Geophys. Union 25(5): 683-693.
60. Zapata-Sierra, A.J., F. Manzano-Agugliaro. 2017. Controlled deficit irrigation for orange trees in Mediterranean countries. J. Clean. Prod. 162: 13-140.