

# Evapotranspiración de cultivos y lisimetría

Juan Eduardo León Ruíz  
Juan Eduardo León Terán



ESPOCH  
2023

## **Evapotranspiración de los cultivos y lisimetría**

---

# Evapotranspiración de los cultivos y lisimetría

---

Juan Eduardo León Ruíz  
Juan Eduardo León Terán



**Dirección de  
Publicaciones**



**esPOCH**

**Evapotranspiración de los cultivos y lisimetría**

© 2023 Juan Eduardo León Ruíz, Juan Eduardo León Terán

© 2023 Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Panamericana Sur, kilómetro 1 ½  
Instituto de Investigaciones  
Dirección de Publicaciones Científicas  
Riobamba, Ecuador  
Teléfono: 593 (03) 2 998-200  
Código Postal: EC0600155

Aval ESPOCH

Este libro se sometió a arbitraje bajo el sistema de doble ciego  
(*peer review*)

Corrección y diseño:  
La Caracola Editores

Impreso en Ecuador

Prohibida la reproducción de este libro, por cualquier medio,  
sin la previa autorización por escrito de los propietarios del  
*Copyright*

CDU: 631

Evapotranspiración y lisimetría

Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Dirección de Publicaciones, año 2023

183 pp. vol: 17,6 x 25 cm

ISBN: 978-9942-44-541-4

I. Agronomía. Técnicas agrícolas

## ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	13
Introducción .....	14
Capítulo I. Evapotranspiración de cultivos .....	17
1.1. Evapotranspiración.....	17
1.2. La evapotranspiración con Lisímetros .....	24
1.3. El Coeficiente del cultivo (Kc).....	25
Capítulo II: principios de lisimetría .....	46
2.1. Definición de lisímetro .....	46
2.2. Tipo de lisímetros .....	47
2.3. Tanque de Evaporación Tipo A .....	50
2.4. Funciones de un Lisímetro .....	54
2.5. Principales limitaciones en la instalación de lisímetros .....	54
2.6. Metodologías aplicadas para la instalación y uso de lisímetros.....	58
Capítulo III: protocolo del centro de estudios de riego de la ESPOCH para el diseño e instalación de lisímetros.....	60
3.1. Diseño y construcción de bloque de 7 lisímetros de drenaje y Rhizotron de hormigón .....	60
3.2. Instalación del bloque de lisímetros .....	61
3.3. Calibración del bloque de lisímetros.....	62
3.4. Manejo y operación del bloque de lisímetros y Rhizotrones .....	64
3.5. Resultados del protocolo del centro de estudios de riego de la ESPOCH.....	65
3.5.1. Diseño y construcción de bloque de siete lisímetros de drenaje y <i>rhizotron</i> de hormigón.....	65
3.5.2. Instalación del bloque de lisímetros .....	67
3.5.3. Calibración del Bloque de Lisímetros .....	68

Capítulo IV: experiencias de estudios sobre recursos hídricos y lisimetría .....	70
Diseño, implementación y calibración de bloque de 7 lisímetros de drenaje para ajuste del coeficiente de cultivo (kc) .....	70
4.1. Ubicación .....	70
4.2. Fase de campo .....	74
4.3. Instalación del bloque de lisímetros .....	81
4.4. Implementación de un sistema automatizado de Riego por goteo parcial, a campo abierto en la Estación Experimental Tunshi de la Facultad de Recursos Naturales .....	84
4.5. Experiencias desarrolladas con varios cultivos en la ESPOCH .....	109
4.5.1. Experiencias de estudios aplicados al cultivo de la papa .....	109
4.5.2. Experiencia de estudio aplicada al cultivo de brócoli .....	121
4.5.3. Experiencia de estudio aplicado al cultivo de cebolla .....	131
4.5.4. Experiencia de estudio aplicado al cultivo de lechuga .....	138
4.5.5. Experiencia de estudio aplicado al cultivo de zanahoria .....	143
4.5.6. Experiencia de estudio aplicado al cultivo de maíz .....	150
4.5.7. Experiencia de estudio aplicado al cultivo de frejol .....	157
4.5.8. Experiencia de estudio aplicado al cultivo de fresas .....	165
Conclusiones .....	171
Referencias bibliográficas .....	172

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Parámetros Físicos del Suelo del Bloque de Lisímetros. ....	67
Tabla 3.2. Análisis químico del bloque de lisímetros. ....	68
Tabla 3.3. Calibración de bloque de lisímetros de drenaje. ....	69
Tabla 4.1. Coeficiente de drenaje en lisímetro de drenaje. ....	84
Tabla 4.2. Características Arduino (ARBOX RELAY). ....	100
Tabla 4.3. Cálculo del panel. ....	105
Tabla 4.4. Especificaciones del panel fotovoltaico. ....	105
Tabla 4.5. Propiedades del acero inoxidable 302 (Fe/Cr18/Ni8). ....	106
Tabla 4.6. Especificaciones técnicas conductores eléctricos. ....	107
Tabla 4.7. Duración de las fases, requerimiento hídrico y lámina de riego promedio de cada fase fenológica según manejo (con riego y sin riego). ....	112
Tabla 4.8. Contenido relativo de agua (%) de seis genotipos de papa ( <i>Solanum spp.</i> ) a los 45 DDS con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo. ....	118
Tabla 4.9. Rendimiento por tamaño del tubérculo de seis genotipos de papa ( <i>Solanum spp.</i> ) con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo. ....	120
Tabla 4.10. Duración de las etapas del ciclo comercial del cultivo de brócoli ( <i>Brassica oleracea</i> L. var. Avenger) bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015. ....	124
Tabla 4.11. Requerimientos hídricos y lámina de riego aplicada en las etapas fenológicas del cultivo brócoli. ....	126
Tabla 4.12. Duración de los estados fenológicos en la cebolla colorada ( <i>Allium cepa</i> L.) variedad Burguesa con riego por método de lisimetría. ....	132
Tabla 4.13. Duración de los estados fenológicos en la lechuga ( <i>Lactuca sativa</i> L.) var. Winterhaven (ddt). ....	140
Tabla 4.14. Duración de las etapas fenológicas por tratamientos de riego para zanahoria ( <i>Daucus carota</i> L.) var. Chantenay. ....	145
Tabla 4.15. Lámina, frecuencia y números de riegos en el cultivo de la zanahoria ( <i>Daucus carota</i> L.) var. Chantenay. ....	148

Tabla 4.16. Duración de las etapas fenológicas por tratamientos en el cultivo del maíz. ....	153
Tabla 4.17. Duración de las etapas del ciclo comercial del cultivo de fréjol ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.) var. Kalima por tratamientos.....	158
Tabla 4.18. Requerimientos hídricos y lámina de riego aplicada en las etapas fenológicas del cultivo frejol ( <i>P. vulgaris</i> ) var. Colima.....	161
Tabla 4.19. Análisis económico. Relación beneficio - costo del cultivo frejol ( <i>P. vulgaris</i> ) var. Calima por tratamiento. ....	164
Tabla 4.20. Análisis económico. Relación beneficio - costo del cultivo por tratamiento el cultivo de la fresa ( <i>Fragaria ananassa</i> ) cultivar Albión. ....	170

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Representación de los factores que afectan a la evapotranspiración en sus diferentes conceptos.....	19
Figura 1.2. Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ ), bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) y bajo condiciones no estándar ( $ET_{c_{aj}}$ ).....	23
Figura 1.3. Comportamiento del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) según crecimiento del cultivo. ....	26
Figura 1.4. Rangos extremos de $K_c$ para cultivos completamente desarrollado, en respuesta a variaciones climáticas y meteorológicas. ....	28
Figura 1.5. Valores de $K_c$ para cultivos completamente desarrollados. ....	29
Figura 1.6. Curva del coeficiente del cultivo ( $k_c$ ).....	30
Figura 1.7. Rangos típicos esperados de valor de $K_c$ par las cuatro etapas del crecimiento.....	31
Figura 1.8. Curva del coeficiente único del cultivo (A) y del coeficiente dual del cultivo (B) según las etapas fenológicas. ....	34
Figura 2.1. Lisímetro de pesada .....	48
Figura 2.2. Descripción del tanque Tipo A. ....	51
Figura 3.1. Malla metálica .....	66
Figura 3.2. Volumen de agua ( $m^3$ ) aplicado por lisímetro .....	69
Figura 4.1. Diseño de lisímetro Tipo A .....	71
Figura 4.2. Diseño de lisímetro Tipo B .....	72
Figura 4.3. Diseño 3D bloque de siete lisímetros de drenaje.....	73
Figura 4.4. Extracción de capas de suelo en el bloque de lisímetros.....	75
Figura 4.5. Estructura metálica de rhizotron.....	75
Figura 4.6. (a) Construcción de la base y pared externa de lisímetros, (b) Construcción de la pared interna del bloque de lisímetros, (c) Aplicación de impermeabilizante en lisímetros.....	76
Figura 4.7. Bloque de lisímetros construido. ....	77
Figura 4.8. Lectura de compactación de capas del suelo.....	78
Figura 4.9. Pruebas de infiltración en capas del suelo. ....	78
Figura 4.10. Prueba de densidad aparente. ....	80

Figura 4.11. (a) Incorporación de malla metálica, (b) Incorporación de canto rodado, (c) Incorporación de malla plástica. ....	81
Figura 4.12. (a) Incorporación y compactación de capas de suelo (b) Verificación de compactación con penetrómetro, (c) Instalación de sistema de riego y tensiómetro y bloques de yeso. ....	82
Figura 4.13. Etapas de la implementación del sistema automatizado.....	85
Figura 4.14. Ubicación del Proyecto.....	86
Figura 4.15. Conexión entrada del PLC.....	87
Figura 4.16. Conexión de salidas por relé del PLC. ....	87
Figura 4.17. PCB Layout placa transmisora .....	89
Figura 4.18. Placa transmisora terminada.....	90
Figura 4.19. 3D Visualizer placa receptora.....	99
Figura 4.20 Placa receptora terminada.....	100
Figura 4.21. Diagrama de etapas de control. ....	101
Figura 4.22. Mapa solar de Ecuador. ....	103
Figura 4.23. Humedad del suelo y profundidad radicular del manejo Con Riego (A) y Sin Riego (B) en Macají, provincia Chimborazo.....	113
Figura 4.24. Emergencia (%) de seis genotipos de papa ( <i>Solanum spp.</i> ) a los 45 DDS con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo. ....	114
Figura 4.25. Cobertura del suelo (A) y vigor de la planta (B) de seis genotipos de papa ( <i>Solanum spp.</i> ) a los con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo.....	115
Figura 4.26. Floración (A) y tuberización en días (B) de seis genotipos de papa ( <i>Solanum spp.</i> ) con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo.....	116
Figura 4.27. Promedio de senescencia en días de seis genotipos de papa ( <i>Solanum spp.</i> ) con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo.....	117
Figura 4.28. Promedio de tubérculos por planta de seis genotipos de papa ( <i>Solanum spp.</i> ) con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo.....	118
Figura 4.29. Rendimiento por planta de seis genotipos de papa ( <i>Solanum spp.</i> ) con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo.....	119
Figura 4.30. Coeficiente de cultivo (Kc) ajustado de brócoli para Tratamiento 1 bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, provincia Chimborazo 2015. ....	125
Figura 4.31. Requerimientos hídricos y lámina de riego aplicadas en el ciclo comercial del cultivo de brócoli bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015. ....	126

Figura 4.32. Número de hojas (A) y altura de la planta (B) del cultivo de brócoli bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015. ....	127
Figura 4.33. Días de aparición de la pella (A), días de inicio de la cosecha (B), diámetro de la pella (C) y peso de la pella (D) del cultivo de brócoli bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015. ....	128
Figura 4.34. Rendimiento (Ay B) del cultivo de brócoli bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015 .....	129
Figura 4.35. Huella hídrica del cultivo de brócoli ( $m^3 T^{-1}$ ) bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015. ....	130
Figura 4.36. Coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) por etapa fenológica del ciclo del cultivo de cebolla colorada por método lisimetría. A: 25%, B: 50% y C: 75% de abatimiento de la humedad del suelo. ....	133
Figura 4.37. Porcentaje de prendimiento, altura de la planta, diámetro del pseudotallo y número de hojas del cultivo de brócoli bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015. ....	135
Figura 4.38. Peso total de la planta, peso del bulbo, diámetro polar y diámetro ecuatorial del cultivo de brócoli bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015. ....	136
Figura 4.39. Rendimiento del cultivo de brócoli bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015. ....	137
Figura 4.40. Coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) mediante el método de lisimetría, mediante tanque de evaporación tipo A y mediante fórmulas FAO para la lechuga. ....	140
Figura 4.41. Análisis de varianza para las variables altura de la planta, diámetro polar y ecuatorial en la cosecha y el rendimiento. ....	141
Figura 4.42. Huella hídrica en el cultivo de la lechuga ( $L kg^{-1}$ ).....	142
Figura 4.43. Variables evaluadas en el cultivo de la zanahoria en las etapas fenológicas. A: Altura de la planta (cm), B. Diámetro del hombro de la raíz (cm), C. Peso fresco de la planta (g), D. Peso seco de la planta (g). ....	146
Figura 4.44. Volumen de agua ( $l m^{-2}$ ) aplicada en cada etapa del cultivo de zanahoria. ....	147
Figura 4.45. Rendimientos del cultivo de la zanahoria ( <i>Daucus carota L.</i> ) var. Chantenay.....	149
Figura 4.46. Huella hídrica ( $l kg^{-1}$ ) en el cultivo de la zanahoria con diferentes láminas de agua. ....	150
Figura 4.47. Emergencia (%) (A) y altura de la planta (cm) (B) del cultivo del maíz ( <i>Zea mays L.</i> ) var. INIAP 102 con diferentes láminas de riego. ....	153

Figura 4.48. Diámetro del tallo (mm) (A) y altura de formación del choclo (cm)(B) del cultivo del maíz ( <i>Zea mays L.</i> ) var. INIAP 102 con diferentes láminas de riego.....	154
Figura 4.49. Peso choclos por planta (A) y Rendimiento (B) del cultivo del maíz ( <i>Zea mays L.</i> ) var. INIAP 102 con diferentes láminas de riego.....	155
Figura 4.50. Huella hídrica del cultivo del maíz ( <i>Zea mays L.</i> ) var. INIAP 102 con diferentes láminas de riego. ....	156
Figura 4.51. Huella hídrica del cultivo del maíz ( <i>Zea mays L.</i> ) var. INIAP 102 con diferentes láminas de riego. ....	159
Figura 4.52. Huella hídrica del cultivo del maíz ( <i>Zea mays L.</i> ) var. INIAP 102 con diferentes láminas de riego. ....	159
Figura 4.53. Huella hídrica del cultivo del maíz ( <i>Zea mays L.</i> ) var. INIAP 102 con diferentes láminas de riego. ....	160
Figura 4.54. Requerimiento hídrico y lámina de riego total aplicada en el ciclo de cultivo frejol ( <i>P. vulgaris</i> ) var. Calima hasta la cosecha en verde. ....	161
Figura 4.55. Altura y promedio de vainas por planta del cultivo frejol ( <i>P. vulgaris</i> ) var. Calima por tratamiento. ....	162
Figura 4.56. Rendimiento de <i>P. vulgaris</i> var. Calima por tratamiento.....	163
Figura 4.57. Huella hídrica del cultivo frejol ( <i>P. vulgaris</i> ) var. kalima por tratamiento. ....	164
Figura 4.58. Porcentaje de necrosis en los bordes de las hojas nuevas en planta a los 80 DDT para el cultivo de la fresa ( <i>Fragaria ananassa</i> ) cultivar Albión. ....	166
Figura 4.59. Número de flores por planta a los 125DDT para el cultivo de la fresa ( <i>Fragaria ananassa</i> ) cultivar Albión.....	167
Figura 4.60. Número de flores por planta a los 125DDT para el cultivo de la fresa ( <i>Fragaria ananassa</i> ) cultivar Albión.....	168
Figura 4.61. Diámetro ecuatorial y polar (mm) para el cultivo de la fresa ( <i>Fragaria ananassa</i> ) cultivar Albión.....	168
Figura 4.62. Diámetro ecuatorial y polar (mm) para el cultivo de la fresa ( <i>Fragaria ananassa</i> ) cultivar Albión.....	169

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1. $ET_0$ promedio para diferentes regiones agroclimáticas (mm día <sup>-1</sup> ).....	21
Cuadro 1.2. Valores comunes de la fracción del suelo cubierta por vegetación ( $f_c$ ) y de expuesta a la luz del sol ( $1-f_c$ ).....	40
Cuadro 2.1. Coeficientes de tanque evaporímetro ( $K_p$ ) para diversas localizaciones y ambientes de los tanques (Serie FAO Riego y drenaje, 24). ...	52
Cuadro 2.2. Coeficientes de tanque evaporímetro ( $K_p$ ): ecuaciones de regresión derivadas del Cuadro 2.1.....	52
Cuadro 3.1. Coeficiente de drenaje.....	63
Cuadro 4.1. Interpretación de las lecturas en centibares.....	110
Cuadro 4.2. Interpretación de lecturas de los bloques de yeso.....	111
Cuadro 4.3. Tratamientos y descripción.....	122
Cuadro 4.4. Descripción de los tratamientos de riego para zanahoria ( <i>Daucus carota L.</i> ) var. Chantenay.....	144
Cuadro 4.5. Descripción de los tratamientos de riego en el cultivo de maíz...	151
Cuadro 4.6. Etapas fenológicas del cultivo del maíz.....	152
Cuadro 4.7. Descripción de los tratamientos fertirriego para cultivo de fresa ( <i>Fragaria ananassa</i> ) cultivar Albión.....	165
Cuadro 4.8. Soluciones nutritivas (mg/l) para el cultivo de la fresa ( <i>Fragaria ananassa</i> ) cultivar Albión.....	165

## RESUMEN

La producción agropecuaria a escala mundial tiene, entre sus principales misiones, abastecer de alimentos a la población y promover el desarrollo socioeconómico de las comunidades. El déficit de agua provocado por el aumento de la temperatura y las variaciones en los regímenes pluviales a consecuencia del cambio climático tiene efectos directos sobre los rendimientos de los cultivos. Los indirectos afectan la disponibilidad de agua de riego en los sistemas agrícolas. La utilización eficiente de este recurso se impone como una necesidad para lograr un desarrollo agrario sustentable. El uso de los lisímetros permite desarrollar estrategias para determinar de manera aproximada los requerimientos hídricos de los cultivos.

Este libro está estructurado en cuatro capítulos. En el primero, se abarcan las distintas definiciones de lisímetros, evapotranspiración de referencia y el coeficiente del cultivo, los factores que lo afectan y cómo puede ser determinado. El segundo capítulo se ocupa de los principios de lisimetría, tipos y funciones de los lisímetros, las metodologías para su instalación y uso, y los factores que inciden en su funcionamiento adecuado. El tercer capítulo se centra en describir el protocolo del centro de estudios de riego de la Espoch para el diseño e instalación de lisímetros, como experiencia práctica. Por último, en el cuarto capítulo, se presentan experiencias de estudios sobre recursos hídricos y lisimetría, desarrollados en la Estación Experimental Tunshi de la Facultad de Recursos Naturales para varios cultivos. La obra puede constituir un referente práctico a la hora de manejar los sistemas de riego por los profesionales de la agricultura.

## INTRODUCCIÓN

La escasez de agua afecta principalmente al 52 % de la población mundial que vive en regiones áridas y semiáridas (Gheysari et al., 2017). Se considera un recurso escaso. Es indiscutible que la agricultura de riego en el futuro se desarrollará en un ambiente restringido del recurso agua debido, por una parte, a la mayor prioridad de uso por el sector urbano y al hecho de que actualmente el mayor porcentaje del agua disponible se destina a la agricultura (76 %).

En la agricultura, se consume el mayor volumen de agua y a la vez se produce la mayor afectación de esta, lo que provoca la disminución de los recursos hídricos existentes (Villa, 2014). En los países en vía de desarrollo, el consumo alcanza el 95 %, por lo que es necesario el estudio de demanda y consumo (Paraguay, 2017).

El aumento de la temperatura y las variaciones en los regímenes pluviales, como efectos biológicos del cambio climático, tienen incidencia directa sobre los rendimientos de los cultivos, así como indirecta en la disponibilidad de agua de riego (Nelson et al., 2009). Este recurso socioeconómico es escaso, por existir una alta demanda de agua para fines domésticos e industriales, lo que amenaza la sostenibilidad de las aguas subterráneas y afecta la agricultura, la silvicultura, la industria y el agua potable, motivo por el cual es esencial que los recursos hídricos sean gestionados de manera estratégica y sostenible (Gabriel, 2017).

Los óptimos requerimientos hídricos de un cultivo que permiten maximizar su rendimiento y calidad, así como su diseño agronómico correspondiente, son los elementos clave para el adecuado manejo y la planificación de un determinado sistema de riego (superficie, aspersión o goteo). Las necesidades de agua de los cultivos van a depender del entorno agroecológico donde se encuentre el mismo, ya sea este un cultivo herbáceo o leñoso, de ciclo anual o plurianual (Otero et al., 2017).

El riego constituye una de las actividades más importantes dentro del sector agrícola donde las precipitaciones no pueden suplir las demandas de agua de los cultivos, principalmente en lo que se refiere a la producción fundamental, a la

dinámica del sector relacionado con ella y al empleo generado (FAO, 2017). Por ello la necesidad de un uso eficiente y responsable.

La insuficiente dotación de agua para riego ya es la norma, en vez de la excepción, por lo que el manejo del riego debe cambiar de paradigma. En vez de hacer énfasis en la producción por unidad de área, debe enfocarse en la producción por unidad de agua consumida; o sea, su productividad marginal, con el objetivo fundamental de realizar una agricultura de riego sustentable (Trout y Bausch, 2017).

La programación de riego es una de las herramientas para regular la cantidad de agua que se debe aplicar en un cultivo que crece bajo condiciones de clima y suelo determinados. Esta técnica consiste en aplicar agua a los cultivos en el tiempo y la cantidad necesarios para maximizar su producción y hacer un uso eficiente de ese recurso (Risco et al., 2018). Según la metodología de la FAO, para el cálculo de las necesidades netas de riego de los cultivos, se necesita conocer las siguientes variables, analizadas mensualmente: temperatura máxima media, temperatura mínima media, humedad relativa media, velocidad del viento, heliofanía efectiva (para la estimación de la radiación solar) y lluvia (Allen et al., 2006).

En diversas partes del mundo, ha sido objeto de estudio la estimación de los requerimientos hídricos de los cultivos, a fin de encontrar una expresión que cuantifique este parámetro, se adapte a las condiciones edafoclimáticas de producción potencial de cultivo en consideración y que, a la vez, sea fácil su aplicación (León et al., 2016). Con este objetivo se realizan aproximaciones que permitan determinar, de la manera más precisa, la evapotranspiración (ET). A partir del dato de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), se estima la evapotranspiración de cada cultivo (ET<sub>c</sub>), utilizando coeficientes únicos de cultivo (K<sub>c</sub>).

Entre los métodos que permiten estimar la evapotranspiración en los cultivos, se encuentran los lisímetros, considerados el método directo más empleado y eficaz. Estos se clasifican en dos tipos: de pesada, en que se determina el peso del agua empleada, y de drenaje, en que el gasto de agua se precisa por la diferencia de la que se aplica y la que se drena (Chávez y Mesías, 2018). Los sistemas de riego actuales, la inversión en agricultura y la ciudadanía toda deben considerar las variaciones futuras producidas por el cambio climático y la disponibilidad de agua.

Siguiendo la línea de trabajo expuesta, la elaboración del presente libro sobre evaporación y lisimetría pretende ser una herramienta de consulta para mejorar las prácticas de riego. En la elaboración del libro, se han considerado además de las normativas existentes, las novedosas tecnologías y la experiencia del Centro Experimental de Riego de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Espoch), Facultad de Recursos Naturales.

# CAPÍTULO I.

## EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVOS

En el capítulo, se expresan los conceptos de evaporación, transpiración y evapotranspiración, así como los factores que las afectan. Se define la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>) y el coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>). También se examinan los factores que afectan la evapotranspiración, las unidades en las cuales se expresa y la manera en la cual puede ser determinada.

### 1.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN

Primeramente se deben establecer los conceptos de evaporación y transpiración como procesos a través de los cuales se pierde agua desde la superficie del suelo.

La **evaporación** del agua es un proceso físico muy frecuente en la naturaleza, por lo que sus efectos son muy conocidos. Por la evaporación, el agua cambia su estado, pasando de líquido a gaseoso o de vapor de agua. La evaporación se incrementa cuando lo hace la radiación solar que alcanza la superficie que evapora, la temperatura del ambiente, la velocidad del viento y la superficie evaporante, y pasa lo contrario con el incremento de la humedad de la atmósfera. Las unidades frecuentes de evaporación del agua serán, por ejemplo, litros por metro cuadrado por día (que equivale a milímetros por día), metros cúbicos por hectárea y metros cúbicos por hectárea y campaña, entre otros (Feader, 2018).

La **transpiración** se define como la pérdida de agua en la planta en forma de vapor. Aunque se puede perder una pequeña cantidad del vapor de agua a través de pequeñas aberturas (denominadas *lenticelas*) en la corteza del tallo y en las ramas jóvenes, la mayor proporción (más del 90 %) se produce en las hojas (Sánchez y Aguirreola, 2013). Este proceso es también un fenómeno de superficie,

por lo que su valoración no solamente depende de la capacidad evaporativa de la atmósfera, sino también del tipo de cultivo, estado de desarrollo vegetativo, vigor, manejo del cultivo y microclima creado dentro de la cubierta vegetal.

Influyen además en este proceso, todos los factores que pueden ser limitantes del crecimiento de la cubierta vegetal de las plantas, entre los que se encuentran: temperaturas extremas, contenido de agua y aireación en el suelo, desarrollo radicular, disponibilidad de nutrientes (sobre todo nitrógeno), así como la salinidad de los suelos y el agua de riego (Feader, 2018).

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. El concepto de evapotranspiración nace como consecuencia de la dificultad de separar e identificar la evaporación del suelo y la transpiración de los cultivos de una superficie amplia y uniforme.

La FAO (Allen et al., 2006) manifiesta que se conoce como **evapotranspiración** (ET) a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo, estos son evaporación y transpiración del cultivo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con su desarrollo y finalmente cuando este cubre todo el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal.

La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo como, por ejemplo,  $1 \text{ mm día}^{-1}$  es equivalente a  $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ , ya que una hectárea tiene una superficie de  $10\,000 \text{ m}^2$  y 1 milímetro es igual a 0,001, una pérdida de 1mm de agua es correspondiente a una pérdida de  $10 \text{ m}^3$  de agua por hectárea (Allen et al., 2006).

Las características propias de las superficies foliares de los diferentes cultivos, así como la duración de las fases de desarrollo de la cubierta de la copa en el caso de que no sufra ninguna limitación ambiental, se deben considerar para la determinación de su evapotranspiración (ET). Así, las disimilitudes en los diferentes cultivos de la resistencia al paso del vapor de agua por los estomas en la transpiración, la cubierta del suelo por la copa, la altura del cultivo, las características aerodinámicas del cultivo, la capacidad de reflejar la luz de las hojas (albedo) y las características del sistema radicular del cultivo determinan diferentes valores de ET para cultivos que se encuentran en las mismas condiciones climáticas (Feader, 2018).

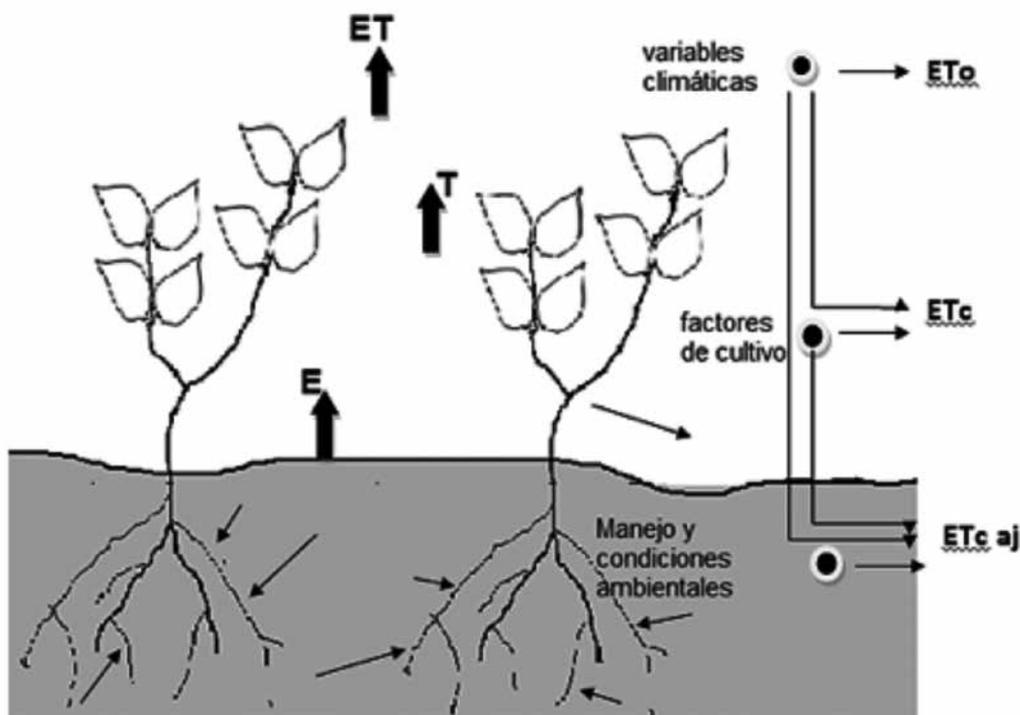
## Variables climáticas

Los principales parámetros climáticos que afectan a evapotranspiración son la radiación solar, la temperatura ambiental, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han diseñado varios procedimientos para determinar la evapotranspiración cuando se cuenta con registros climáticos mediante modelos matemáticos desarrollados. Puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_0$ ), que representa una pérdida de agua en una superficie cultivada estándar (Allen et al., 2006).

## Factores de cultivo

Las características fenotípicas de cada especie, variedad y etapa de desarrollo conllevan a diferentes niveles de  $ET$ , donde, conforme el cultivo crece y se

Figura 1.1. Representación de los factores que afectan a la evapotranspiración en sus diferentes conceptos



Fuente: Allen et al., 2006.

desarrolla, cubre el suelo y aumenta así la tasa de ET, como consecuencia del incremento del índice de área foliar y de la altura de la planta (Intagri, 2017).

### Manejo de cultivo

Uno de los elementos de mayor efecto es la disponibilidad de agua en el suelo. La cual está relacionada con las características del suelo (textura, estructura, densidad aparente, etc.). De igual forma, la incidencia de plagas y enfermedades, saturación del perfil, prácticas culturales, entre otros, pueden aumentar o disminuir la tasa de evaporación (Intagri, 2017). La cantidad de agua que se pierde por evapotranspiración es un factor importante para determinar el riego (fig. 1.1).

### Tipos de evapotranspiración

#### a) Evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ )

La cantidad de agua que las plantas transpiran es mucho mayor que la que usan para su crecimiento y fotosíntesis. La transpiración puede considerarse, por tanto, como el consumo de agua de la planta (Calvache, 2012, citado por Paguay, 2017). Los únicos factores que afectan  $ET_0$  son los parámetros climáticos.

La  $ET_0$  se estima a partir de distintas variables meteorológicas para lo cual existen diferentes fórmulas. Este índice expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo.

A partir de la necesidad de contar con un método estándar para el cálculo de la  $ET_0$ , sobre la base de la información meteorológica, la FAO recomienda el método Penman-Monteith como el único para determinar la evapotranspiración de referencia. Esto requiere de valores diarios de temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar y velocidad del viento registrados a dos metros de altura (Martínez, 2004). Este método ha sido seleccionado debido a que se aproxima de una manera cercana la  $ET_0$  de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Además, se han desarrollado procedimientos para la estimación de los parámetros climáticos faltantes (cuadro 1.1).

Cuadro 1.1. ETo promedio para diferentes regiones agroclimáticas (mm día<sup>-1</sup>).

Regiones	Temperatura promedio durante el día (°C)		
	Templada ~10°C	Moderada 20°C	Caliente >30°C
Trópicos y subtropicos			
• húmedos y subhúmedos	2 – 3	3 – 5	5 – 7
• áridos y semiáridos	2 – 4	4 – 6	6 – 8
Regiones templadas			
• húmedos y subhúmedos	1 – 2	2 – 4	4 – 7
• áridos y semiáridos	1 – 3	4 – 7	6 – 9

Tomado de Allen et al., 2006.

El cálculo de la  $ET_o$  se puede hacer a mano con la ayuda de una hoja de cálculo, o por medio de una computadora. La  $ET_o$  puede también estimarse a partir de la evaporación de una superficie de agua.

La ecuación FAO Penman-Monteith

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde

- $ET_o$  evapotranspiración de referencia (mm d-1)
- $R_n$  radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m-2d-1)
- $R_a$  radiación extraterrestre (mm d-1)
- $G$  flujo del calor de suelo (MJ m-2d-1)
- $T$  temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
- $u_2$  velocidad del viento a 2 m de altura (m s-1)
- $e_s$  presión de vapor de saturación (kPa)
- $e_a$  presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$	déficit de presión de vapor (kPa)
$\Delta$	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C <sup>-1</sup> )
$Y$	constante psicrométrica (kPa °C <sup>-1</sup> )

La ecuación determina la evapotranspiración de la superficie hipotética de referencia y proporciona un valor estándar con el cual se puede comparar la evapotranspiración en diversos períodos del año y en otras regiones, así como también puede relacionarse con la evapotranspiración de otros cultivos.

Las diferencias en la anatomía de las hojas, características de las estomas, propiedades aerodinámicas e incluso el albedo ocasionan que la evapotranspiración del cultivo difiera de la evapotranspiración del cultivo de referencia bajo las mismas condiciones climáticas.

Estos valores de la evapotranspiración del cultivo de referencia se obtienen de los datos meteorológicos del lugar, y representan la evapotranspiración posible en ese lugar de un cultivo que no tiene déficit de agua.

### Evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ )

La evapotranspiración o necesidad (consumo) de agua por los cultivos es la usada por las plantas en la transpiración más la evaporada directamente desde la superficie del suelo (León, 2016). Por lo tanto, la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) varía fundamentalmente según el estado fenológico del cultivo y el clima.

Normalmente se mide en mm día<sup>-1</sup> o mm mes<sup>-1</sup>, y depende de la interacción entre factores climáticos, botánicos, edáficos y de manejo del cultivo. La evapotranspiración es baja en los primeros estadios de la etapa de crecimiento de la planta; se incrementa a medida que la planta crece en altura y en área foliar, hasta alcanzar un máximo en la etapa de fructificación, y luego disminuye progresivamente hasta la etapa de cosecha (León, 2016).

La evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) se calcula como:

$$ET_c = ET_o * K_c \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde

$ET_c$  evapotranspiración del cultivo (mm d<sup>-1</sup>)

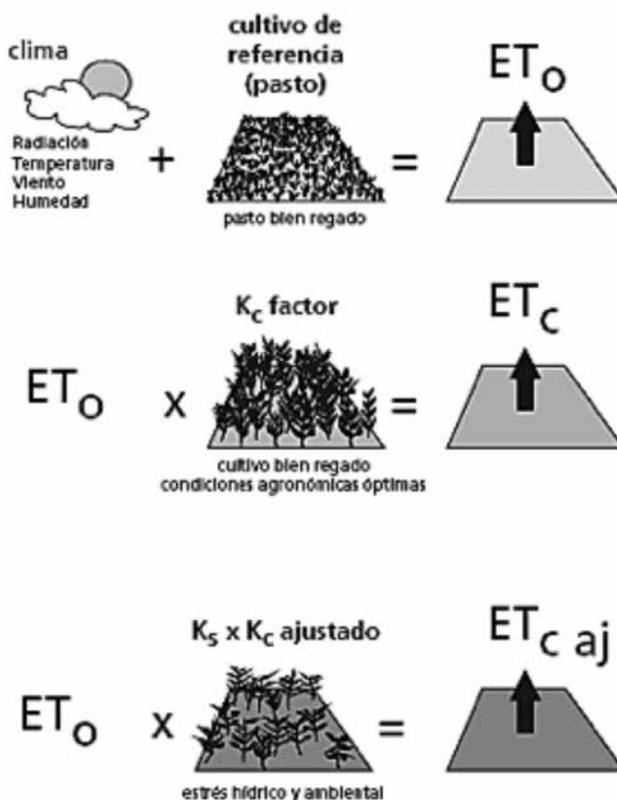
$ET_0$  evapotranspiración de referencia (mm d-1)

$K_c$  coeficiente del cultivo (Allen et al., 2006)

Los valores de  $ET_c$  de los diferentes cultivos propios de la zona son los valores que se utilizarán normalmente en el diseño de los sistemas de riego, ya que generarán los valores máximos de necesidades de riego considerando la precipitación efectiva del lugar, la eficiencia del sistema de riego y las necesidades adicionales de agua para el lavado de las sales del medio de cultivo.

Según la publicación de la FAO número 66 de Riegos y Drenajes, *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*, el cálculo de los valores de  $ET_c$  están referidos fundamentalmente para los cultivos herbáceos extensivos. Para los cul-

Figura 1.2. Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_0$ ), bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) y bajo condiciones no estándar ( $ET_{c\ aj}$ ).



Tomado de Allen et al., 2006.

tivos leñosos como consecuencia de sus características aerodinámicas propias de la arquitectura de la copa hace que se deban modificar los valores de  $ET_c$  ajustándolos ( $ET_{c\ aj}$ ) (Allen et al., 2006).

Por otro lado, la evaporación del cultivo bajo condiciones no estándar ( $ET_{c\ aj}$ ) se refiere a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes de las condiciones estándar (fig. 1.2). Cuando se presentan condiciones no estándar, son necesarios factores de corrección para ajustar  $ET_c$  ( $ET_{c\ aj}$ ), estos factores reflejan el efecto del ambiente y del manejo cultural de las condiciones de campo.

Los métodos disponibles de campo para medir la evapotranspiración son difíciles de realizar y manejar, con mantenimiento caro y delicado. Dentro de este grupo están los **lisímetros** (depósitos aislados llenos de suelo donde se desarrolla el cultivo) en los cuales se controla completamente la zona radicular del cultivo y se puede determinar de manera precisa el agua que se pierde por evaporación y transpiración.

### 1.2. LA EVAPOTRANSPIRACIÓN CON LISÍMETROS

Los lisímetros se han constituido en un método estándar para medir la ET (Payero e Irmak, 2008). Se usan para medir la ET real del cultivo y la ET del cultivo de referencia.

El uso de los lisímetros es la forma directa y exacta de medir la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), a partir de recipientes o estructuras que aíslan parte del suelo cultivado llamado lisímetro, durante un período determinado, siempre que la instalación se asemeje totalmente al cultivo. Aunque no se dispone de ellos en todas partes, los lisímetros se utilizan muy habitualmente (Salisbury y Ross, 2000).

El suelo contenido en ellos puede ser suelo no alterado (monolito) o suelo alterado. La evapotranspiración ocurrida en un tiempo determinado puede determinarse por pesada del recipiente con el suelo y el cultivo o por un balance de entrada y salida de agua; en el primer caso se trata de lisímetros de pesada y en el segundo, de lisímetros de volumen o drenaje (García et al., 2012).

En lisímetros de drenaje, la evapotranspiración es medida por un período dado, por la diferencia entre la cantidad de agua de drenaje, recogida en el fondo de los lisímetros y la cantidad total de agua ingresada. Un requerimiento de los lisímetros es que la vegetación dentro e inmediatamente fuera del mismo sea idéntica (la misma altura e índice de área foliar) (Allen et al., 2006)

La determinación de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) o de referencia ( $ET_o$ ) mediante lisimetría se calcula mediante la siguiente relación:

$$ET_c \text{ o } ET_o = D_a - D_d \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde

$ET_c$  evapotranspiración del cultivo ( $\text{mm d}^{-1}$ )

$ET_o$  evapotranspiración de referencia ( $\text{mm d}^{-1}$ )

$D_a$  cantidad de agua aplicada (mm)

$D_d$  cantidad de agua drenada (mm) (Allen et al., 2006)

### 1.3. EL COEFICIENTE DEL CULTIVO ( $K_c$ )

El efecto de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo está integrado en un solo coeficiente denominado coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) (Fernández et al., 2010).

Según Martínez (2004), el *coeficiente de cultivo* ( $K_c$ ) representa el efecto del cultivo sobre el proceso de transpiración que depende de las características del cultivo (fig. 1.3), especie, variedad, etapa de desarrollo, el área foliar (Oliveira et al., 2016; Oliveira et al., 2018).

Se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad \text{Ecuación (4)}$$

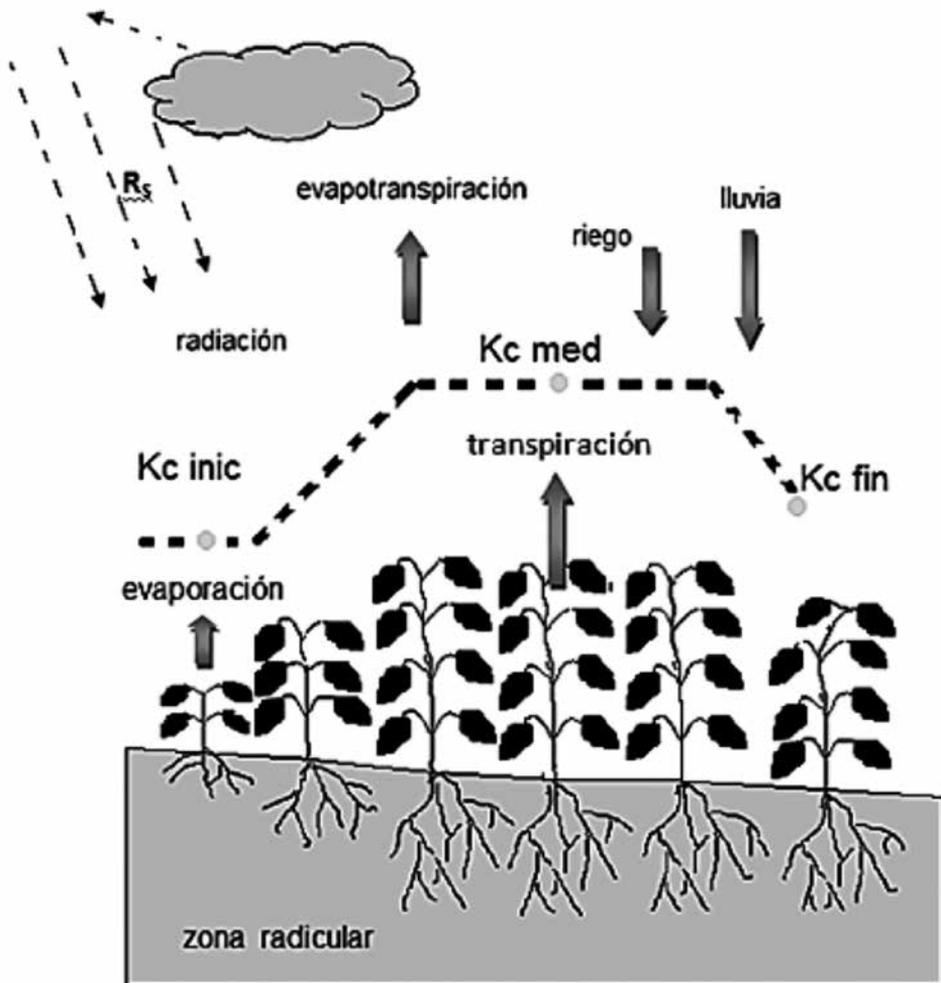
Donde

$K_c$  coeficiente de cultivo (adimensional)

$ET_c$  evapotranspiración del cultivo ( $\text{mm d}^{-1}$ )

$ET_o$  evapotranspiración de referencia ( $\text{mm d}^{-1}$ )

Figura 1.3. Comportamiento del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) según crecimiento del cultivo



Tomado de Allen et al., 2006.

Según Garay (2009), la determinación de  $K_c$  tiene una serie de aplicaciones, entre las que plantea:

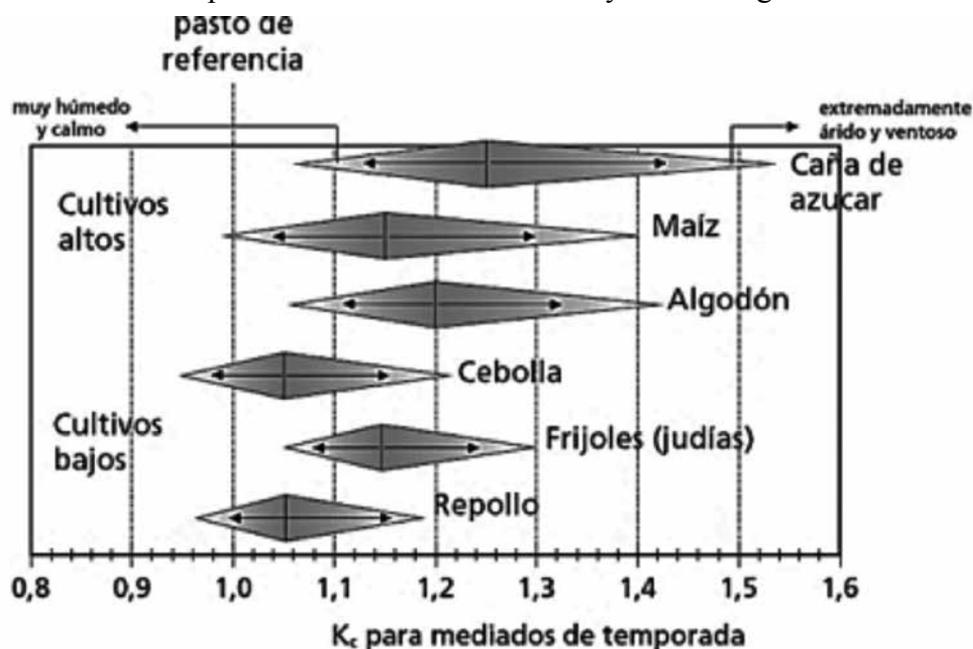
1. Permite elaborar calendarios de riego para los cultivos, fijar láminas e intervalos de riego en función de la eficiencia del riego. Esto permite apoyar la planificación de cultivos y riegos por cultivo.
2. Con relación al agua de riego con alto contenido de sales en solución, el uso consecutivo permite determinar las láminas de sobrerriego, necesarias para prevenir problemas de salinización de los suelos.
3. Estimar los volúmenes adicionales de agua que será necesarios aplicar a los cultivos en el caso que la lluvia no aporte la cantidad suficiente de agua.
4. Determinar en grandes áreas (cuencas) los posibles volúmenes de agua en exceso que habrá que drenar.
5. Determinar de forma general la eficiencia con la que se está aprovechando el agua y, por lo mismo, planificar adecuadamente el mejoramiento y superación de todo un conjunto de elementos que intervienen en el desarrollo de un distrito de riego.

Según Maldonado (2012), entre los factores que afectan los valores de  $K_c$ , se encuentran: sistema de conducción, tipo de manejo, lugar, características del cultivo, fechas de siembra, ritmo de crecimiento, desarrollo del cultivo, duración del período vegetativo, condiciones de nutrición del cultivo, y la frecuencia de la lluvia o riego, especialmente en la primera etapa de crecimiento.

El tipo de cultivo puede influir a partir de las diferencias de albedo, altura de las plantas, propiedades aerodinámicas, así como características de los estomas y hojas de las plantas. Se presentan diferencias entre la evapotranspiración en un cultivo bien desarrollado y regado y la de referencia  $ET_0$ .

Durante el período de crecimiento del cultivo, la variación del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo. Los espaciamientos estrechos entre plantas, así como la mayor altura y rugosidad de la superficie de gran cantidad de cultivos agrícolas producen como consecuencia que se presenten  $K_c$  mayores a 1,0 (fig. 1.4).

Figura 1.4. Rangos extremos de  $K_c$  para cultivos completamente desarrollados, en respuesta a variaciones climáticas y meteorológicas



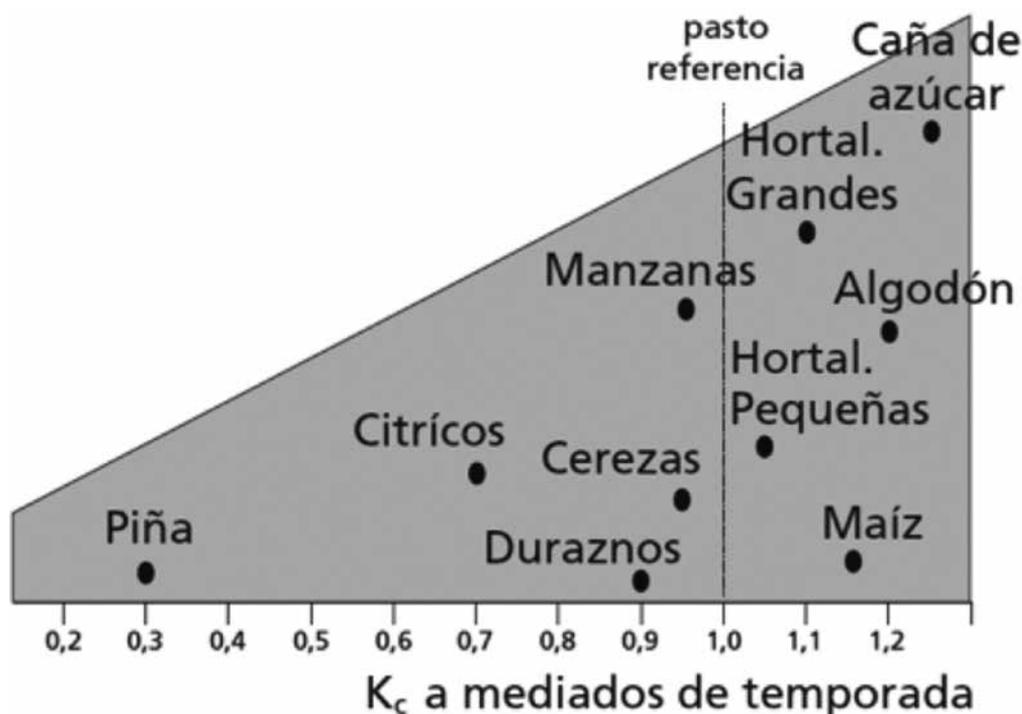
Tomado de Allen et al., 2006.

Los límites superiores son para condiciones de extrema aridez y de velocidad del viento fuerte, mientras que los límites inferiores representan las condiciones de alta humedad y vientos suaves. Los valores de  $K_c$  son menores en caso de cultivos de poca altura, y mayores en los cultivos altos, como respuesta a los cambios de las condiciones climáticas y meteorológicas.

Bajo condiciones de alta humedad y vientos suaves,  $K_c$  es menos dependiente de las diferencias de los componentes aerodinámicos incluidos  $ET_c$  y  $ET_o$ , por lo que el valor de  $K_c$  para cultivos agrícolas con cobertura completa no excederá a 1,0, por más de un valor de 0,05.

Por otra parte, los cultivos que cierran los estomas por el día (piña) y o que los presentan por el envés de la hoja o gran resistencia de las hojas, tendrán  $K_c$  menores. De igual manera para los árboles con gran desarrollo que cubren el suelo en un 70 % se obtendrán valores de  $K_c$  menores que 1,0. (fig. 1.5).

Figura 1.5. Valores de  $K_c$  para cultivos completamente desarrollados



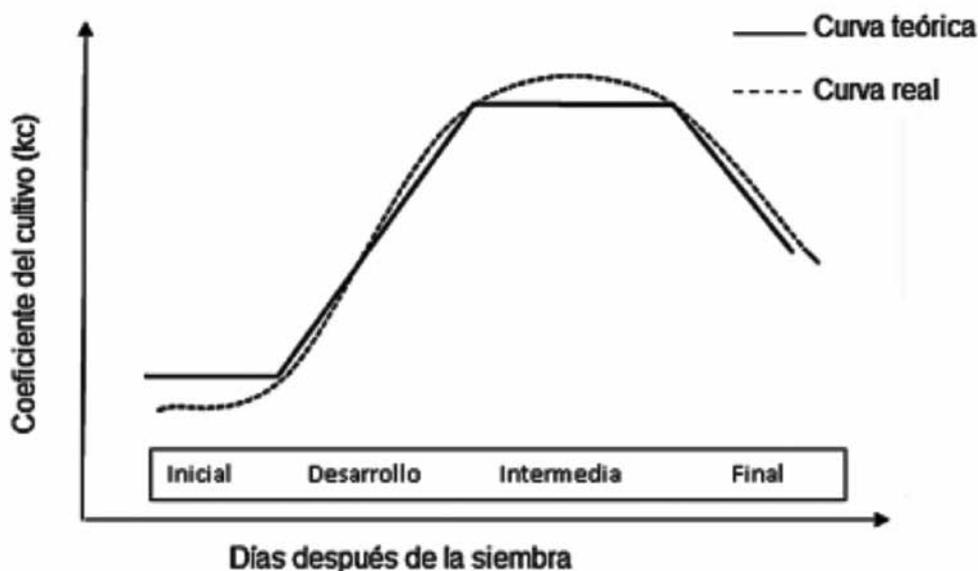
Tomado de Allen et al., 2006.

Esta variación del coeficiente  $K_c$  a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva del coeficiente del cultivo. Para describirla y construirla, se necesitan solamente tres valores de  $K_c$ : los correspondientes a la etapa inicial ( $K_{c\ ini}$ ), la etapa de mediados de temporada ( $K_{c\ med}$ ) y la etapa final ( $K_{c\ fin}$ )<sup>1</sup> (fig. 1.5).

La evaporación del suelo incide directamente en los valores de  $K$ . Para cultivos que cubren completamente el suelo refleja principalmente las diferencias en transpiración, y dependerá del nivel de humedad que tenga el suelo.  $K_c$  más alto con suelo húmedo y menos con suelo seco.

1 Procedimiento de cálculo de  $K_c$  ( $_{ini, med}$  y  $_{fin}$ ). Allen et al., 2006, pp. 114-127.

Figura 1.6. Curva del coeficiente del cultivo ( $K_c$ )



Tomado de Allen et al., 2006.

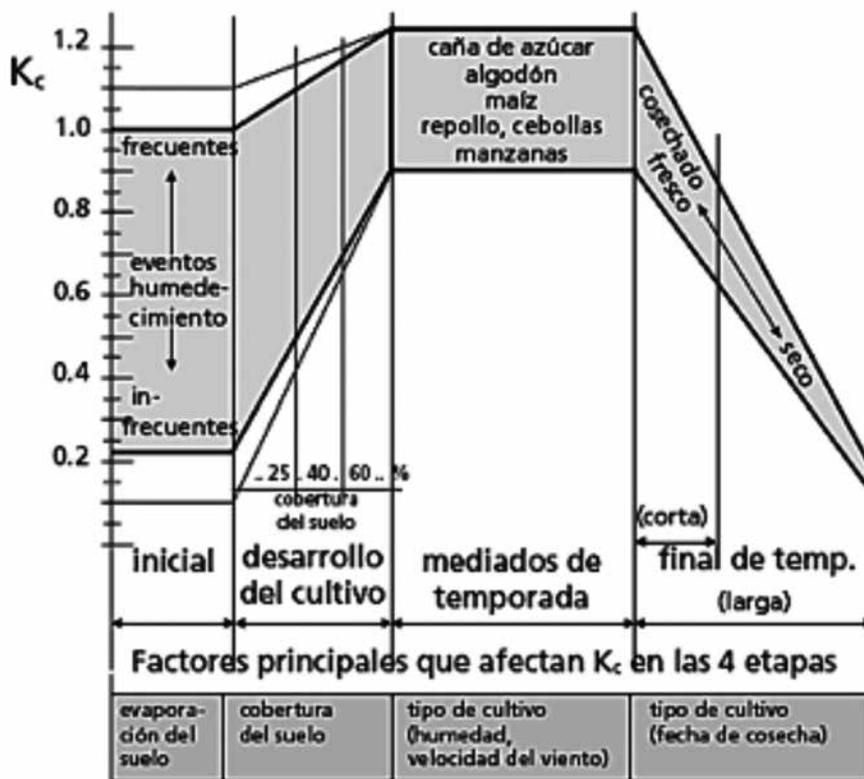
Las etapas fenológicas del cultivo tienen una incidencia marcada en el coeficiente ( $K_c$ ), ya que, a medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área cubierta por vegetación, como la altura y el área foliar del cultivo variarán progresivamente.

Debido a las diecinueve diferencias en evapotranspiración, también variará el valor de  $K_c$  que se presenta durante las etapas de crecimiento y desarrollo del cultivo. Este período de crecimiento puede ser dividido en cuatro etapas: inicial, de desarrollo del cultivo, intermedia y final (fig. 1.7).

La etapa inicial está comprendida entre la fecha de siembra y el momento que el cultivo alcanza aproximadamente el 10 % de cobertura del suelo. Entonces, el área foliar es pequeña y la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación del suelo, por lo que el  $K_c$  será alto cuando haya humedad en el suelo y bajo cuando el suelo esté seco.

La etapa de desarrollo está comprendida desde el momento en que la cobertura del suelo alcanza un 10 % hasta la cobertura efectiva completa, que, para una gran variedad de cultivos, se corresponde con el inicio de la floración. La

Figura 1.7. Rangos típicos esperados de valor de  $K_c$  para las cuatro etapas del crecimiento



Tomado de Allen et al., 2006.

finalización de la etapa en la floración se justifica porque es difícil determinar visualmente la cobertura en algunos cultivos (ej: cereales de invierno y primavera y algunos pastos). El  $K_c$  para esta etapa es superior a la etapa inicial.

La etapa intermedia comprende entre la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez, entendido este por el comienzo de la senectud, amarillamiento o senescencia y caída de las hojas, o la aparición del color marrón en el fruto, hasta el grado de reducir la evapotranspiración del cultivo en relación con la  $ET_0$  de referencia. Esta etapa es la más larga para cultivos permanentes y anuales, siendo relativamente corta para cultivos hortícolas con cosechas frescas. El  $K_c$  alcanza su valor máximo en esta etapa; es relativamente constante para la mayoría de los cultivos y prácticas culturales.

Por último, la etapa final o tardía comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. El valor de  $K_c$  al finalizar la etapa refleja el efecto de las prácticas de cultivo y el manejo del agua. El estado de senescencia se asocia con una conductancia menos eficiente de los estomas, lo que causa una reducción en el valor de  $K_c$ .

De manera general, cuando se evalúa la tasa de evapotranspiración, se debe considerar adicionalmente la gama de prácticas locales de manejo que actúan sobre los factores climáticos y de cultivo que afectan la ET. Las prácticas del cultivo y el método de riego pueden alterar el microclima, afectar las características del cultivo o afectar la capacidad de absorción de agua del suelo y la superficie del cultivo. De ahí la importancia de realizar estudios para regiones específicas.

### Enfoques de coeficientes de cultivo único y dual

En el enfoque del *coeficiente único del cultivo*, los efectos de transpiración del cultivo y la evaporación del suelo son combinados en un  $K_c$  único. Como la evaporación en el suelo puede fluctuar diariamente como resultado de la lluvia o el riego, el  $K_c$  único del cultivo es solamente la expresión de los efectos promedio en el tiempo (varios días) de la evaporación del cultivo.

Este coeficiente único se utiliza para estudios de planificación y para diseño de sistemas de riego donde se consideren los efectos promedio de la humedad del suelo. Este es el caso de los sistemas de riego por superficie y aspersión, en que el intervalo entre riegos sucesivos es de varios días, entre diez o más. Por lo tanto, para un manejo típico del riego, es válido aplicar el procedimiento del  $K_c$  promediado.

De acuerdo con el enfoque del coeficiente dual del cultivo, se determinan por separado los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo. Se utilizan dos coeficientes, el basal del cultivo ( $K_{cb}$ ) para describir la transpiración de la planta, y el de evaporación del agua del suelo ( $K_e$ ) para la evaporación que ocurre en la superficie del suelo. El coeficiente único se reemplaza por:

$$K_c = K_{bc} + K_e \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde

$K_{bc}$         coeficiente basal del cultivo

$K_e$         coeficiente de evaporación del agua del suelo

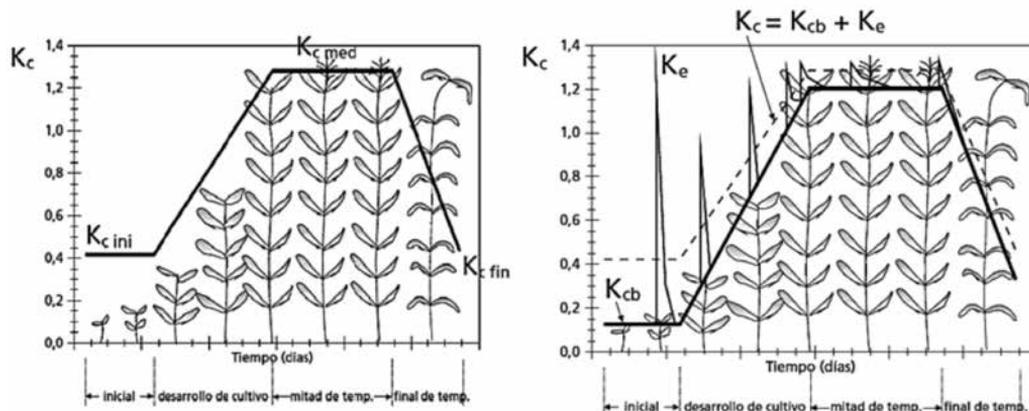
El coeficiente basal del cultivo es definido como el cociente entre  $ET_c$  y  $ET_o$  cuando la superficie del suelo se encuentra seca, pero donde el contenido promedio de agua en la zona radicular es adecuado para mantener totalmente la transpiración de la planta. El  $K_{bc}$  representa la línea base potencial del valor de  $K_c$  en ausencia de los efectos adicionales introducidos por el humedecimiento del suelo a través del riego o precipitación. El  $K_e$  describe el componente de la evaporación que ocurre en la superficie del suelo. Si el suelo está húmedo, el  $K_e$  puede ser grande; sin embargo, en ningún caso, la suma de  $K_{bc}$  y  $K_e$  podrá exceder un valor máximo,  $K_{c\max}$ , el que se define por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo para el proceso de evapotranspiración. La estimación del valor de  $K_e$  requiere del cálculo del balance diario del agua en el suelo, para determinar el contenido de humedad remanente en la capa superior del suelo.

El procedimiento del coeficiente dual requiere de una mayor cantidad de cálculos numéricos que el del coeficiente único. Es preferible para los casos de los calendarios de riego en tiempo real, para los cálculos de balance del agua en el suelo, y para las investigaciones donde sean importantes tanto los efectos de las variaciones diarias del humedecimiento de la superficie del suelo y su impacto en el valor diario de  $ET_c$ , como el patrón de humedecimiento del perfil del suelo y los flujo de percolación profunda, como los riegos de alta frecuencia a través de microirrigación o sistemas de movimiento lateral como los pivotes centrales o los sistemas de movimiento linear.

Debido a que el coeficiente único  $K_c$  considera los efectos promedio de la evaporación del suelo, la curva del coeficiente dual del cultivo  $K_{bc}$ , la cual describe solamente la transpiración de la planta, se situará por debajo del valor de  $K_c$  (fig. 1.8).

Las curvas de  $K_c$  muestran la etapa inicial con los valores menores (dependiendo de la evaporación del suelo), que comienzan a aumentar en la etapa de desarrollo rápido de la planta y alcanzan su valor máximo o cercano al máximo ( $K_{c\med}$ ) y el valor  $K_c$  comienza a disminuir hasta alcanzar un valor mínimo al final de la temporada de crecimiento  $K_{c\fin}$  (fig. 1.8 A)

Figura 1.8. Curva del coeficiente único del cultivo (A) y del coeficiente dual del cultivo (B) según las etapas fenológicas



Tomado de Allen et al., 2006.

La mayor diferencia entre los valores de  $K_c$  y  $K_{cb}$  ocurre en la etapa inicial de crecimiento, cuando la evapotranspiración está constituida principalmente por la evaporación del suelo y cuando la transpiración es relativamente pequeña.

El procedimiento de cálculo de la evapotranspiración del cultivo es el siguiente:

1. Identificar las etapas de desarrollo del cultivo, determinando la duración de cada etapa y seleccionando los valores correspondientes de  $K_c$ .
2. Ajustar los valores de  $K_c$  seleccionados según la frecuencia de humedecimiento o las condiciones climáticas durante cada etapa.
3. Construir la curva del coeficiente de cultivo (la cual permite la identificación de  $K_c$  para cualquier etapa durante el período de desarrollo).
4. Calcular  $ET_c$  como el producto de  $ET_o$  y  $K_c$ .

Determinación numérica del valor de  $K_c$

Se puede determinar el valor del coeficiente  $K_c$  para un período determinado de la temporada de crecimiento. Se considera que el valor de  $K_c$  durante la etapa inicial y la etapa intermedia es constante e igual al valor de  $K_c$  durante la etapa

considerada. Durante las etapas de desarrollo y final, el valor de  $K^c$  varía en forma lineal entre los valores de la próxima etapa ( $K_{c\text{prox}}$ ), el cual corresponde al  $K_c$  fin de en el caso de la etapa final:

$$K_{ci} = K_{cprev} + \left[ \frac{i - \Sigma(L_{prev})}{L_{etapa}} \right] (K_{cprox} - K_{cprev}) \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde

$i$  número del día dentro de la temporada de crecimiento (1... duración de la etapa de crecimiento)

$K_{ci}$  coeficiente del cultivo para el día  $i$

$L_{etapa}$  duración de la etapa considerada (días)

$\Sigma(L_{prev})$  suma de las duraciones de las etapas previas (días)

Para el cálculo del coeficiente dual del cultivo

$$ET_c = (K_{cb} + K_e)ET_o \quad \text{Ecuación (7)}$$

Este procedimiento del coeficiente dual es más complicado y requiere de más cálculos que el coeficiente único del cultivo. Se recomienda su uso cuando se requieran estimaciones más precisas del valor de  $K_c$ , por ejemplo, cuando se determina el calendario de riego diario de campos individuales.

El procedimiento de cálculo de la evapotranspiración del cultivo  $ET_c$ , consiste en:

1. Identificar las duraciones de las etapas de desarrollo del cultivo y seleccionar valores de  $K_{cb}$  correspondientes.
2. Ajustar valores de los coeficientes  $K_{cb}$  seleccionados de acuerdo con las condiciones climáticas en cada etapa.
3. Construir la curva del coeficiente basal del cultivo (lo que permite determinar los valores de  $K_{cb}$  para cualquier período durante la temporada de crecimiento).
4. Determinar valores diarios de  $K_e$  para la evaporación en la superficie del suelo.

5. Calcular  $ET_c$  como el producto de  $ET_o$  y  $(K_{cb} + K_e)$ .

Cuando el suelo está húmedo, la evaporación ocurre en una tasa máxima; sin embargo, el valor del coeficiente de cultivo ( $Kc = Kcb + Ke$ ) no puede exceder a un  $Kc_{max}$ . Este valor estará determinado por la cantidad de energía disponible para la evaporación en la superficie del suelo ( $Kcb + Ke \leq Kc_{max}$ ), o  $Ke \leq (Kc_{max} - Kcb)$ .

A medida que la superficie del suelo se va secando una menor cantidad de humedad estará disponible para la evaporación, por lo que la evaporación comenzará a reducirse en función de la cantidad de agua remanente en la capa superficial del suelo, es decir:

$$Kc = K_r (K_{c_{max}} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{c_{max}} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde

$K_e$  coeficiente de la evaporación en el suelo

$K_{cb}$  coeficiente basa del cultivo,

$K_{c_{max}}$  valor máximo de  $K_c$  después del riego o lluvia,

$K_r$  coeficiente adimensional de reducción de la evaporación, dependiente de la lámina acumulada de agua agotada (evaporada) de la capa superficial del suelo

$f_{ew}$  fracción del suelo que se encuentra simultáneamente expuesto y humedecido, es decir la fracción de la superficie del suelo a partir de la cual ocurre la mayor parte de la evaporación

Después de la lluvia o el riego, el valor de  $K_r = 1$ , y la evaporación será limitada por la cantidad de energía disponible para el proceso. A medida que se seca la superficie, este valor será menos porque la evaporación se reduce. El  $K_r$  será igual a cero cuando no exista agua para ser evaporada en la superficie del suelo.

El procedimiento de cálculo consiste en determinar:

1. El límite superior de  $K_{c_{max}}$ .
2. El coeficiente de reducción de la evaporación en el suelo.
3. La fracción expuesta y humedecida del suelo  $f_{ew}$ .

La estimación del valor de  $K_r$  requiere del cálculo de un balance diario de la humedad en la capa superficial del suelo.

El valor de  $K_{c_{max}}$  tiene un rango que oscila alrededor de 1,05 y 1,30, cuando se utiliza la evapotranspiración de pasto de referencia  $ET_0$ :

$$K_{c_{max}} = \max\left\{1,2 + [0,04(u_2 - 2) - 0,004 (HR_{min} - 45)]\left(\frac{h}{3}\right)^{0,3}, \{K_{cb} + 0,05\}\right\}$$

Ecuación (9)

Donde

$h$  altura máxima promedio de las plantas durante el período de cálculo considerado (etapa inicial, desarrollo, mediados de temporada o final) (m)

$K_{cb}$  coeficiente basal del cultivo

Max ( ) valor máximo de los parámetros entre los { } que están separados por comas

La ecuación asegura que el valor de  $K_{c_{max}}$  sea siempre mayor o igual que la suma de  $K_{bc} + 0,05$ . Esto significa que la superficie húmeda aumentara el valor de  $K_{cb} + 0,05$  después de un humedecimiento completo de la superficie del suelo, aun con completa cobertura vegetal. Se utiliza el valor de 1,2 en lugar de 1 para el cálculo de  $K_{c_{max}}$ , debido al efecto del incremento de la rugosidad aerodinámica de los cultivos circundante durante las etapas de desarrollo, a mediados y final de crecimiento, lo que incrementa la transferencia del vapor por turbulencia a partir de la fracción expuesta del suelo.

El coeficiente 1,2 también refleja el impacto de la reducción del albedo en un suelo húmedo, así como la contribución del calor almacenado en el suelo antes del humedecimiento, factores que pueden incrementar la evaporación con relación a la de referencia. El intervalo de tiempo para el cálculo de  $K_{c_{max}}$  puede variar entre diario a mensual.

### Coefficiente de reducción de la evaporación del suelo ( $K_r$ )

En la etapa 1, *limitada por la energía disponible*, al comienzo del ciclo de secado, después de la lluvia o riego, el contenido de agua se corresponderá con la capacidad de campo y el agua agotada por evaporación,  $D_e$ , será igual a cero. Durante esta etapa,  $K_r = 1$ .

La lámina acumulada de evaporación al final de esta etapa será igual a AFE (agua fácilmente evaporable), la que representa la lámina máxima de agua que puede ser evaporada sin restricciones de la capa superficial del suelo durante la etapa. Esta oscila normalmente entre los 5 mm y 12 mm; es mayor en los suelos de textura media y fina.

La segunda etapa, de *reducción de la evaporación*, se inicia cuando el valor de  $D_e$  supera AFE. En este punto, la superficie del suelo se encontrará visiblemente seca y la evaporación a partir de la porción expuesta del suelo se reducirá en proporción a la cantidad de agua remanente en la superficie del suelo.

$$K_r = \frac{AET - D_{e,i-1}}{AET - AFE} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Para  $D_{e,i-1} > AFE$

Donde

$K_r$  coeficiente adimensional de reducción de la evaporación, dependiente del agotamiento de la humedad (lámina acumulada de evaporación), en la parte superior del suelo ( $K_r = 1$  cuando  $D_{e,i-1} \leq AFE$ )

$D_{e,i-1}$  lámina acumulada de evaporación (agotamiento) en la capa superficial del suelo al final del día<sub>*i-1*</sub> (del día anterior) (mm)

AET lámina acumulada máxima de evaporación (agotamiento) en la capa superficial del suelo cuando  $K_r = 0$  (AET = agua evaporable total) (mm)

AFE lámina acumulada de evaporación al final de la etapa 1 (AFE = agua fácilmente evaporable) (mm)

### Fracción expuesta y humedecida del suelo ( $f_{ew}$ ): procedimiento de cálculo

Cuando toda la superficie del suelo se humedece, la fracción de la superficie a partir de la cual ocurre la mayor parte de la evaporación,  $f_{ew}$  estará definida esencialmente como  $(1 - fc)$ , donde  $fc$  es la fracción promedio de la superficie del suelo que está cubierta por la vegetación y  $(1 - fc)$  será la fracción aproximada de la superficie del suelo que se encuentra expuesta. En el caso de los sistemas de riego que humedecen solo una fracción de la superficie del suelo,  $f_{ew}$  deberá limitarse a  $fw$ , la cual representa la fracción que se humedece a través del riego. Se calcula como:

$$f_{ew} = \min(1 - fc, fw) \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde

- 1 -  $fc$  fracción expuesta promedio del suelo, la cual no se encuentra cubierta (o sombreada) por la vegetación [0,01-1],
- $fw$  fracción expuesta promedio del suelo humedecida por el riego o la lluvia [0,01-1]

En el caso del riego por goteo, donde la mayor parte de la superficie humedecida puede encontrarse por debajo de la vegetación y estar sombreada, un procedimiento general podría consistir en multiplicar  $fw$  por  $[1 - (2/3) fc]$ .

Para la fracción de la superficie del suelo humedecida por el riego y la lluvia ( $fw$ ), como alternativa para cada día de aplicación de agua considerado, se pueden usar las siguientes reglas para determinar  $fw$  para un día y los días siguientes de una manera más simple:

1. Si la superficie es humedecida por riego y lluvia insignificante (<3 a 4 mm):  $fw$  es igual al  $fw$  para el sistema de riego.
2. Si la superficie es humedecida por riego y lluvia significativa (>3 a 4 mm):  $fw$  es igual a 1 (precipitación).
3. Si la superficie es humedecida por riego:  $fw$  es igual al  $fw$  del sistema de riego;
4. Si la superficie es humedecida por una lluvia significativa (es decir >3 a 4 mm), sin la presencia de riego:  $fw = 1$ .

5. Cuando no existe ni riego ni lluvia significativa:  $f_w$  es igual al  $f_w$  del día anterior.

La fracción del suelo cubierta por la vegetación se denomina  $f_c$ . Por lo tanto, el término  $(1 - f_c)$  representa la fracción del suelo expuesta a la luz solar y la ventilación del aire, donde ocurre la evaporación en el suelo humedecido. El valor de  $f_c$  debe ser inferior a 0,99. Se puede calcular:

$$f_c = \left( \frac{K_{cb} - K_{cmin}}{K_{cmax} - K_{cmin}} \right)^{1+0,5h} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde

$f_c$  fracción efectiva de la superficie del suelo que se encuentra cubierta por la vegetación [0-0,99]

$K_{cb}$  valor del coeficiente basal del cultivo para un día o período particular

$K_{cmin}$  valor mínimo de  $K_c$  para suelo sin cobertura y seco [~0,15-0,20]

$K_{cmax}$  valor máximo de  $K_c$  inmediatamente después del humedecimiento

$h$  altura promedio de la planta [m]

Cuadro 1.2. Valores comunes de la fracción del suelo cubierta por vegetación ( $f_c$ ) y de expuesta a la luz del sol ( $1 - f_c$ )

<b>Etapas de crecimiento del cultivo</b>	<b><math>f_c</math></b>	<b><math>1 - f_c</math></b>
Etapas iniciales	0,0-0,1	1,0-0,9
Etapas de desarrollo	0,1-0,8	0,9-0,2
Etapas intermedias	0,8-1,0	0,2-0,0
Etapas finales	0,8-0,2	0,2-0,8

Para la estimación de  $K_e$ , se requiere del cálculo de un balance diario del agua presente en la capa superficial del suelo con el objetivo de determinar la lámina acumulada de evaporación o agotamiento. Se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$De, i = de, i - 1 - (Pi - ROi) - \frac{Ii}{fw} + \frac{Ei}{few} + Tew, i + DPe, i \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde

$D_{e,i-1}$  lámina acumulada de evaporación (agotamiento) después de un humedecimiento completo, originada a partir de la fracción expuesta y humedecida de la porción superior del suelo, al final del día i-1 (mm)

$D_{e,i}$  lámina acumulada de evaporación (agotamiento) después de un humedecimiento completo al final del día i (mm)

$P_i$  precipitación en el día i (mm)

$RO_i$  escurrimiento del agua precipitada en la superficie del suelo en el día i (mm)

$I_i$  lámina de riego en el día i que infiltra en el suelo (mm)

$E_i$  evaporación en el día i que infiltra en el suelo (mm)

$T_{ew,i}$  lámina de transpiración que ocurre en la fracción expuesta y humedecida de la capa superficial del suelo en el día i (mm)

$D_{pe,i}$  pérdidas por percolación profunda que ocurren a partir de la capa superficial del suelo en el día i, cuando el contenido de humedad en el suelo excede la capacidad de campo (mm)

$fw$  fracción de la superficie del suelo humedecida a través del riego (0,01-1)

$few$  fracción expuesta y humedecida del suelo (0,01-1)

Al asumir que la capa superficial del suelo se encuentra a capacidad de campo, después de una lluvia fuerte o riego, se asume que el valor mínimo de agotamiento  $D_{e,i}$  es igual a cero. A medida que se seca la superficie, aumenta el valor de  $D_{e,i}$  y, en ausencia de algún evento de humedecimiento,  $D_{e,i}$  alcanzará progresivamente su valor máximo AET.

En ese momento no existirá agua para evaporar,  $K_r$  será igual a cero, y el valor de  $D_{e,i}$  se mantendrá igual a AET hasta que la parte superior del suelo sea humedecida nuevamente. En este caso los límites impuestos al valor de  $D_{e,i}$  son:  $0 \leq D_{e,i} \leq AET$ . Cuando se asume que se ha agotado todo el agua superficial para iniciar los cálculos,  $D_{e,i-1} = AET = 1000 (\theta_{fc} - 0,5 \theta_{wp}) Ze$ .

Se asume que la evaporación que ocurre por debajo de la vegetación está incluida en el valor de  $K_{cb}$ , por lo que no es cuantificada de manera explícita. Solo se calcula en la porción expuesta y humedecida de la capa superficial del suelo. El componente de evaporación  $E_i$  se define por el producto  $K_e ET_o$ . El cociente  $E_i/few$  representa la concentración real de la evaporación que ocurre sobre la fracción del suelo que se encuentra tanto expuesta como humedecida.

Exceptuando el caso de los cultivos de raíces poco profundas (profundidad máxima de la zona radicular es  $<0,5$  a  $0,6$ ), la cantidad de transpiración es pequeña y puede ser ignorada ( $T_{ew} = 0$ ). Para los cultivos sembrados en hilera, la mayor cantidad de agua es extraída por debajo de la cobertura vegetal; por lo tanto, se puede asumir que la lámina  $T_{ew}$ , que ocurre en la fracción  $few$  de la superficie del suelo es igual a cero.

Después de la ocurrencia de una lluvia intensa o riego, el contenido de humedad en la superficie del suelo (capa  $Ze$ ) podría exceder al valor de  $CC$ . Según este procedimiento simple, se asume que el contenido de humedad del suelo será igual a  $\theta_{FC}$  después del evento completo de humedecimiento, por lo que  $D_{e,i}$  será igual a cero. El drenaje (percolación) del agua que se produce a partir de la capa superficial del suelo se calcula de la siguiente forma:

$$DPe,i = (Pi - ROi) + \frac{Ii}{fw} - De,i - 1 \geq 0 \quad \text{Ecuación (14)}$$

Cuando el contenido de humedad de la capa evaporante se encuentre por debajo de la  $CC$  (es decir,  $D_{e,i} > 0$ ), no habrá drenaje de agua en la capa superficial del suelo y  $D_{pe,i} = 0$ .

Cuando se realicen los cálculos correspondientes al procedimiento del  $K_{cb} + K_e$ , estos deberán seguir el siguiente orden:  $K_{cb}$ ,  $h$ ,  $K_{c\ max}$ ,  $fc$ ,  $kw$ ,  $few$ ,  $K_r$ ,  $K_e$ ,  $E$ ,  $D_{pe}$ ,  $de$ ,  $I$ ,  $K_c$  y  $ET_c$ .

### ET<sub>c</sub> bajo condiciones de estrés hídrico

Las fuerzas que actúan sobre el agua presente en el suelo disminuyen su energía potencial y la hacen menos disponible para su extracción por las raíces de las plantas. Cuando el suelo está húmedo, el agua presente tiene una energía potencial alta, con libertad de movimiento y puede ser extraída fácilmente por las raíces. En suelos secos, tiene energía potencial baja, siendo retenida fuertemente por fuerzas capilares y de adsorción a la matriz del suelo, lo que la hace menos extraíble por el cultivo.

Si esa energía potencial cae por debajo de cierto valor umbral, se dice que el cultivo se encuentra estresado. Los efectos del estrés hídrico son incorporados al multiplicar el coeficiente basal del cultivo por el **coeficiente de estrés hídrico, K<sub>s</sub>**:

$$ET_{c_{aj}} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o \quad \text{Ecuación (15)}$$

Cuando se producen limitaciones debido a la disponibilidad de agua en el suelo,  $K_s < 1$ . Cuando no existan condiciones de estrés por falta de humedad del suelo,  $K_s = 1$ . El coeficiente  $K_s$  describe el efecto del estrés hídrico en la transpiración del cultivo. Cuando se utiliza el coeficiente único del cultivo, el efecto del estrés hídrico se incorpora en el valor de  $K_c$  de la siguiente forma:

$$ET_{c_{aj}} = K_s K_c ET_o \quad \text{Ecuación (16)}$$

Disponibilidad de agua en el suelo se refiere a la capacidad de un suelo de retener el agua disponible para las plantas: agua disponible total (**ADT**). Después de una lluvia o riego, el suelo comenzará a drenar agua hasta alcanzar la capacidad de campo (CC), esta representa la cantidad de agua que un suelo bien drenado retiene en contra de las fuerzas gravitatorias, o sea, la cantidad de agua remanente en el suelo cuando el drenaje descendente ha disminuido significativamente.

En ausencia de una fuente de agua, el contenido de humedad se reducirá en la zona radicular. A medida que aumenta el consumo de agua por la planta, el agua remanente será menor y retenida con mayor fuerza por el suelo, lo que reducirá su energía potencial y hará más difícil su extracción. Eventualmente, se alcanzará un punto donde el cultivo no podrá extraer agua, o sea extracción nula, y se habrá alcanzado el punto de marchitez. El coeficiente de marchitez permanente es el contenido de humedad del suelo en el cual las plantas se marchitan permanentemente. El total de agua disponible en la zona radicular será la diferencia entre los contenidos de humedad CC y el punto de marchitez permanente.

$$ADT = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r \quad \text{Ecuación (17)}$$

Donde

ADT total de agua disponible en la zona radicular del suelo [mm]

$\theta_{FC}$  contenido de humedad a capacidad de campo [ $m^3 m^{-3}$ ]

$\theta_{WP}$  contenido de humedad en el punto de marchitez permanente [ $m^3 m^{-3}$ ]

$Z_r$  profundidad de las raíces [m]

La lámina ADT representa la cantidad de agua que un cultivo puede extraer de su zona radicular y cuya magnitud depende del tipo de suelo y la profundidad radicular.

A pesar de que, en teoría, existe agua disponible hasta alcanzar el punto de marchitez permanente, la cantidad de agua extraída por el cultivo se reducirá significativamente antes de alcanzar el punto de marchitez permanente. La fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable (AFA) en el suelo;

$$AFA = p ADT \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde

AFA agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo [mm]

$p$  fracción promedio del total de agua disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico (reducción ET) [0-1]

El factor  $p$  varía de un cultivo a otro, con valores entre 0,30 para las plantas de raíces poco profundas, a tasas altas de  $ET_c$  ( $>8 \text{ mm d}^{-1}$ ), hasta 0,70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de  $ET_c$  ( $< 3 \text{ mm d}^{-1}$ ). Un valor de 0,50 para  $p$  es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos. El valor  $p$  está en función del poder evaporante de la atmósfera.

Es necesario mencionar que no es totalmente correcto expresar la tolerancia de los cultivos al estrés hídrico como una función de la fracción ( $p$ ). La tasa de extracción de agua por las raíces depende más directamente del nivel de energía

potencial del agua (potencial matricial del suelo y la conductividad hidráulica asociada), que por el contenido de agua. Debido a que estos potenciales matriciales pueden corresponder a distintos tipos de suelo con diferentes contenidos de humedad, el valor  $p$  es también función del tipo de suelo. Para suelos de textura fina (arcillosos), los valores  $p$  pueden ser reducidos en un 5-25 %, mientras para suelos de textura más pesada (arenosos) pueden incrementarse en un 5-10 %.

### **Coefficiente de estrés hídrico ( $K_s$ )**

El contenido de humedad en la zona radicular puede ser expresado en función del agotamiento de humedad en la zona radicular ( $D_r$ ), es decir la cantidad de agua faltante con respecto a la capacidad de campo. En capacidad de campo, el agotamiento en la zona radicular es igual a cero ( $D_r = 0$ ). Las situaciones de estrés se iniciarán cuando el valor de  $D_r$  sea igual a AFA. Para  $D_r > AFA$ ,  $K_s$  es calculado como:

$$K_s = \frac{ADT - D_r}{ADT - AFA} = \frac{ADT - D_r}{(1-p)ADT} \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde

$K_s$  es un factor adimensional de reducción de la transpiración que depende de la cantidad de agua disponible en el suelo [0-1]

$D_r$  agotamiento de humedad en la zona radicular [mm]

ADT agua disponible total en la zona radicular del suelo [mm]

$p$  fracción de la ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico [-].

Luego de calcular el valor  $K_s$ , se calcula la evapotranspiración ajustada  $ET_{c\ aj}$  por medio de las ecuaciones 15 o 16, dependiendo de los coeficientes utilizados para determinar evapotranspiración. Cuando el agotamiento en la zona radicular sea menor que AFA,  $K_s = 1$ .

## CAPÍTULO II PRINCIPIOS DE LISIMETRÍA

En este capítulo, se definen los principios de lisimetría, tipos y funciones de lisímetros. Se presentan, además, las metodologías aplicadas para la instalación y uso de lisímetros y los factores que afectan su instalación.

### 2.1. DEFINICIÓN DE LISÍMETRO

Si se aísla la zona radicular del cultivo y si se controlan los procesos que son difíciles de medir, los diversos términos en la ecuación de balance de agua en el suelo se pueden valorar con apreciable exactitud, lo que es posible con el método de lisimetría.

La palabra lisímetro es derivada de la palabra griega *lysis* que significa «disolución» o «movimiento» y *metron*, que significa «medida» (Aboukhaled et al., 1982). Podría ser interpretada entonces como la medida del agua infiltrada en el suelo (Howell et al., 1991).

Los lisímetros son dispositivos que permiten estimar de manera directa el balance de masas del agua del suelo y de los solutos solubles y no solubles que son aplicados al suelo. Se pueden considerar como un instrumento muy adecuado dado que permite realizar mediciones de volúmenes y flujos de agua, y solutos en el suelo.

La lisimetría mide la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) a partir de un lisímetro considerado como un método directo. El lisímetro consigue medir la cantidad que se pierde por evapotranspiración y drenaje; por tanto, también se puede conocer el volumen de agua que queda en el suelo.

En el interior del lisímetro, se encuentra el cultivo patrón que es la materia de análisis de la cantidad de agua evaporada o transpirada. Según Vásquez et al.

(2017), este método generalmente se usa en trabajos de investigación, y es poco empleado en estudios de requerimiento de agua de los cultivos de proyectos de irrigación en marcha.

## 2.2. TIPO DE LISÍMETROS

Los lisímetros difieren en sus características, desde unos muy sencillos hasta otros de gran precisión. Difieren por su tamaño (Abedinpour, 2015, Gebler et al., 2015), pueden ser: pequeño si la superficie experimental es  $<0,5 \text{ m}^2$ ; estándar, cuando la superficie oscila entre  $0,5$  y  $1 \text{ m}^2$ , y grande, si la superficie es  $> 1 \text{ m}^2$  (Lanthaler, 2004).

González et al. (2020) presentan diferentes funcionalidades de los lisímetros, desde el monitoreo al crecimiento y estimación del consumo de agua de los cultivos, hasta la verificación de modelos de movimiento de agua y solutos a través del perfil de suelo, entre otros.

Según la forma de medición de la evapotranspiración existen dos tipos básicos de lisímetros, *de balance* y *de pesada*.

### **Lisímetro de balance o drenaje**

Este indica que la capacidad de almacenamiento de la humedad del suelo permanece constante, y donde el uso del agua por cultivo es la diferencia entre el agua aplicada y la drenada.

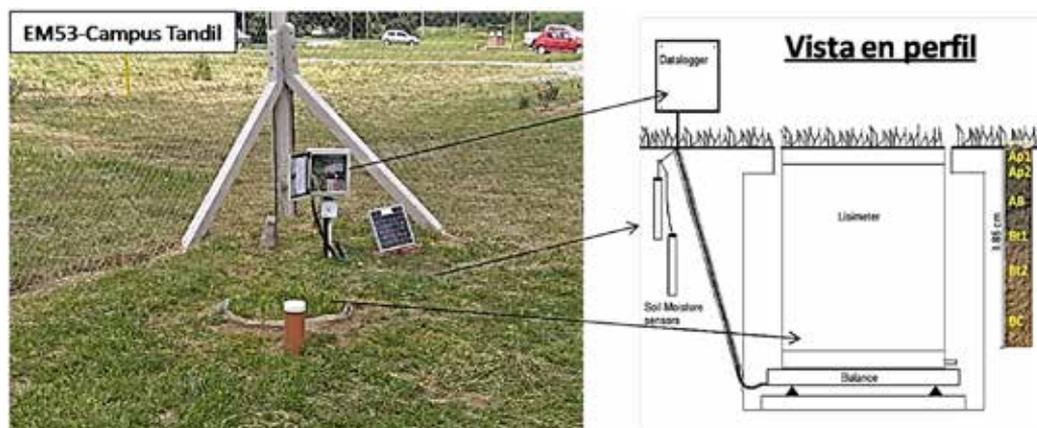
### **Lisímetro de pesada**

El *lisímetro de pesada* determina el peso del consumo de agua por el cultivo por la pérdida de peso entre las aplicaciones de agua. En estos, se utiliza la característica intrínseca del agua, cuya densidad es conocida  $1 \text{ t m}^{-3}$  a  $20 \text{ °C}$ , lo que facilita medir la evapotranspiración gravimétricamente en lugar de disturbar el suelo para obtener un contenido de humedad con base en peso, o medir el conte-

nido de humedad con base en volumen con alguno de los métodos conocidos de medición de humedad.

Wright (1991) señala que los *lisímetros de pesada* son instrumentos de gran utilidad para determinar la ET del cultivo y de referencia y, por ende, el coeficiente del cultivo. Pueden ser clasificados en volumétricos o gravimétricos, donde la ecuación 2 es fácilmente aplicable para determinar el balance hídrico del suelo y obtener indirectamente la  $ET_o$  o la  $ET_c$  del cultivo.

Figura 2.1. Lisímetro de pesada



Fuente: Lisímetro de pesada (Olmedo et al., s.f.)

Los lisímetros de pesada generalmente tienen un sistema hidráulico o una celda de carga conectada a un sistema electrónico que permite desplegar la pérdida de peso del contenedor, midiendo directamente  $ET_c$  o  $ET_o$  (González et al., 2020). Estos tienen la ventaja de una mayor precisión y las posibilidades de obtener resultados en lapsos cortos, pero sus costos de instalación, operación y mantenimiento son altos; los lisímetros de drenaje no presentan la misma precisión y los lapsos de registro no pueden ser inferiores a las 48 horas, pero sus costos de instalación, operación y mantenimiento son relativamente bajos (Tuñón, 2000).

A continuación, se presentan algunos tipos de esta clase de lisímetros (González et al., 2020).

Contenedores comerciales: consisten en emplear recipientes comunes donde el material vegetal (cultivo) sembrado pueda desarrollarse apropiadamente y el contenedor le permita desarrollar las capacidades productivas similares a las que se desarrollarían si el cultivo estuviese sembrado en el suelo. Estos contenedores llenos con el mismo material de suelo circundante se pesan frecuentemente, por lo general diariamente, y la pérdida de peso entre dos mediciones corresponderá al agua perdida durante el período, la cual puede ser expresada en términos de lámina de agua al dividir por el área del recipiente.

Como estos evapotranspirómetros son livianos, no se necesita ubicarlos sobre básculas, sino en el suelo, y se sacan de allí para pesarlos. Evidentemente estos instrumentos son de uso muy limitado, la precisión depende del diseño experimental y la instrumentación usada, y no es aplicable para todo tipo de cultivo. Estos lisímetros se podrían catalogar como móviles.

Lisímetro estacionario: aquellos cuyo dispositivo sensor permite transferir los cambios de peso en forma instantánea al sistema de registro. De información, que puede ser en forma continua o discreta. Los sensores pueden ser de balanzas, constituidas por celdas de carga o de funcionamiento hidráulico, donde el cambio de peso dentro del lisímetro se transfiere a cambio de presión del fluido que lo está soportando.

Los lisímetros de funcionamiento hidráulico, o flotantes, depositan el contenedor con suelo flotando directamente en un soporte o membrana, puede ser un neumático lleno de agua u otro fluido. Una vez que se deposita el contenedor con suelo en el mismo, este transfiere en forma de presión, cuando se aplica agua o precipitación se refleja en cambio de peso del contenedor, monitoreado continuamente.

El riego a partir de estos lisímetros se puede realizar sobre la base de los contenidos de humedad del contenedor de sustrato, lo que implicaría una sustancial diferencia con lo que actualmente se lleva a cabo: pulsos de riego aplicados a intervalos de tiempos fijos. Lo que inexorablemente conduce a desperdicios de agua y fertilizantes.

Los lisímetros, para la mayoría de los ingenieros, por su perfil de formación, fueron concebidos para estimar ET; sin embargo, otras mediciones (experimentales) pueden ser realizadas, entre las que podrían señalarse: determinar funciones de producción y productividad de los cultivos, estimar los efectos de altura del

nivel freático sobre los rendimientos de los cultivos, modelar y verificar procesos de transporte de solutos miscibles y no miscibles, estimar los procesos de salinidad en el suelo, entre otros (González et al., 2020).

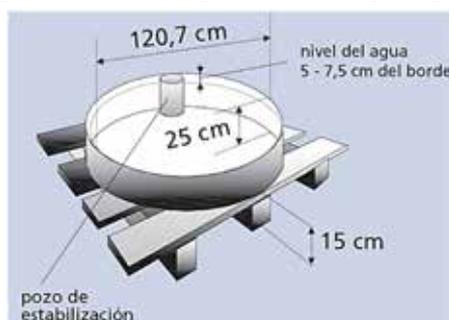
De manera general, Lanthaler (2004) expone el uso de los lisímetros para diferentes campos de investigación: en la entrada de sustancia antropogénica en los agroecosistemas. Movimiento de nutrientes, sales, acumulación de nutrientes, pesticidas, lixiviación de agroquímicos; el destino de productos fitosanitarios en los cultivos y suelos a diferentes niveles freáticos; demanda de agua en zonas agrícolas por los cultivos; balance hídrico y de nutrientes para zonas agrícolas; comparación de sistemas de cultivo y su influencia en la cantidad de agua de infiltración y su calidad; evaluación de riesgos de contaminación de las aguas subterráneas por herbicidas y pesticidas; obtención de indicadores de calidad de agua de filtración, para ser utilizados como valores de referencia en la validación de la predicción de las aguas de drenaje de otras áreas contaminadas; investigaciones de la eficacia de los sistemas de sellado de superficies para pozos que fueron de explotación minera; efecto de la precipitación en la lixiviación de contaminantes, y precisión en la planificación del riego.

### 2.3. TANQUE DE EVAPORACIÓN TIPO A

De acuerdo con Allen et al. (2006), los tanques proporcionan una medida de efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre el proceso evaporativo de una superficie abierta de agua. Aunque el tanque evaporímetro responde de una manera similar a los mismos factores climáticos que afectan la transpiración del cultivo, varios factores producen grandes diferencias en la pérdida de agua de una superficie libre evaporante y de una superficie cultivada.

El tanque tipo A es circular, 120,7 cm de diámetro y 25 cm de profundidad. Se construye de hierro galvanizado o láminas de metal (0,8 mm). Se sitúa en una plataforma de madera en forma de reja que se encuentra a 15 cm por encima del nivel del suelo, y debe estar a nivel. Una vez instalado, el tanque se llena con agua hasta 5 cm por debajo del borde y el nivel del agua no debe disminuir hasta más de 7,5 cm por debajo del borde (fig. 2.1).

Figura 2.2. Descripción del tanque tipo A



El agua debe ser regularmente cambiada, al menos semanalmente, para eliminar la turbidez. Si el tanque es galvanizado debe ser pintado anualmente con pintura de aluminio. La pintura de las paredes del tanque puede afectar la evaporación. Los coeficientes presentados se aplican para tanques galvanizados pintados anualmente con aluminio y a tanques de acero inoxidable. No se requiere corrección para los valores de Epan en caso de que las superficies interiores y exteriores del tanque evaporímetro estén pintadas de blanco. Un aumento en Epan de hasta 10 % puede ocurrir cuando las paredes se pintan de negro.

Las mallas sobre los tanques deben evitarse y deben ser protegidos con mallas de seguridad para evitar el acceso a los animales. Las lecturas se realizan diariamente temprano en la mañana.

Para la velocidad del viento como factor se sugiere que, en caso de que el tanque se encuentre dentro de un cercado y rodeado de cultivos de gran altura (ej. Maíz, 2,5 m), los coeficientes necesitarán ser incrementados hasta en un 30 % en climas ventosos y secos, mientras que para condiciones tibias y húmedas solo se requiere un aumento del 5-10 % de  $K_p$ . Los  $K_p$  para diversas cubiertas de suelo, área tampón y condiciones climáticas se presentan en el cuadro 2.1 y las ecuaciones de regresión para  $K_p$  en el cuadro 2.2.

Cuadro 2.1. Coeficientes de tanque evaporímetro ( $K_p$ ) para diversas localizaciones y ambientes de los tanques (serie FAO Riego y drenaje, 24).

Tanque clase A	Caso A: tanque situado en una superficie cultivada				Caso B: tanque situado en un suelo desnudo			
HR media		Baja	Media	Alta		Baja	Media	Alta
		< 40	40-70	> 70		< 40	40-70	> 70
Velocidad del viento (m s <sup>-1</sup> )	Distancia del cultivo a barlovento (m)				Distancia del cultivo a barlovento (m)			
baja	1	,55	,65	,75	1	,7	,8	,85
< 2	10	,65	,75	,85	10	,6	,7	,8
	100	,7	,8	,85	100	,55	,65	,75
	1000	,75	,85	,85	1000	,5	,6	,7
Moderada	1	,5	,6	,65	1	,65	,75	,8
2-5	10	,6	,7	,75	10	,55	,65	,7
	100	,65	,75	,8	100	,5	,6	,65
	1000	,7	,8	,8	1000	,45	,55	,6
Alta	1	,45	,5	,6	1	,6	,65	,7
5-8	10	,55	,6	,65	10	,5	,55	,65
	100	,6	,65	,7	100	,45	,5	,6
	1000	,65	,7	,75	1000	,4	,45	,55
Muy alta	1	,4	,45	,5	1	,5	,6	,65
> 8	10	,45	,55	,6	10	,45	,5	,55
	100	,5	,6	,65	100	,4	,45	,5
	1000	,55	,6	,65	1000	,35	,4	,45

Tomado de Allen et al., 2006.

Cuadro 2.2. Coeficientes de tanque evaporímetro ( $K_p$ ): ecuaciones de regresión derivadas del cuadro 2.1.

Tanque clase A situado en cultivo verde circundante	$K_p = 0,18 - 0,0286 u_2 + 0,0422 l_n(\text{borde}) + 0,1434 \ln(HR_{\text{media}}) - 0,000631 [\ln(\text{bordadura})]^2 \ln(HR_{\text{media}})$
Tanque clase A situado en suelo desnudo	$K_p = 0,61 + 0,00341 HR_{\text{media}} - 0,000162 u_2 HR_{\text{media}} - 0,00000959 u_2 \text{ Borde} + 0,00327 u_2 \ln(\text{Borde}) - 0,00289 u_2 \ln(86,4 u_2) - 0,0106 \ln(86,4 u_2) \ln(\text{Borde}) + 0,00063 [\ln(\text{borde})]^2 \ln(86,4 u_2)$

Tomado de Allen et al., 2006.

Las consideraciones expuestas en los cuadros anteriores o ecuaciones correspondientes pueden no ser suficientes para incluir todos los factores ambientales locales, por lo que puede requerirse un ajuste. Para ello, los autores recomiendan realizar una adecuada calibración de  $E_{pan}$  con relación a  $ET_o$  calculada con el método FAO Penman-Monteith. También es conveniente instalar el tanque dentro de un área cultivada verde con un tamaño de por lo menos 15 m \* 15 m, en la cual el tanque no debe estar situado en el centro, sino a una distancia de por lo menos 10 m del borde del cultivo en dirección del viento.

Por otra parte, la reflexión de la radiación solar del agua en el tanque puede mostrar una diferencia del 23 % asumido para el cultivo de referencia. El almacenaje de calor dentro del tanque puede ser apreciable y puede causar una significativa evaporación durante la noche, mientras que la mayoría de los cultivos transpiran solo durante el día. Se distinguen además diferencias en la turbulencia, temperatura y humedad del aire que se encuentra inmediatamente sobre estas superficies. La transferencia de calor que se produce a través de las paredes del tanque también afecta el balance energético.

A pesar de estas diferencias entre los métodos, el uso de la evaporación del tanque para predecir la  $ET_o$  para períodos de diez días puede ser considerado confiable si se usa correctamente. La evaporación del tanque está relacionada con la evapotranspiración de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque:

$$ET_o = K_p \times Evap \quad \text{Ecuación (20)}$$

$ET_o$     evapotranspiración de referencia (mm día-1)

$K_p$     coeficiente del tanque evaporímetro

Evap    evaporación del tanque evaporímetro (mm día-1)

Con la utilización de este método, se puede encontrar una relación entre la tasa de evaporación producida en un lisímetro y la tasa de evaporación producida en el tanque de evaporación clase A.

El tanque ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para estimar la evapotranspiración de referencia observando la pérdida por evaporación de una superficie de agua y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con  $ET_o$ .

En caso de faltar datos, la velocidad del viento puede ser estimada tomando un valor global de  $u^2 = 2 \text{ m s}^{-1}$ . HR media se puede aproximar con la temperatura del aire  $HR_{media} = 50e^{0.04(T_{min})} / e^{0.04(T_{max})} + 50$ .

### 2.4. FUNCIONES DE UN LISÍMETRO

Los lisímetros son generalmente una herramienta que ayuda a evaluar la confiabilidad de los procedimientos empíricos, dichos lisímetros son recipientes grandes, llenos de suelo, ubicados en el campo para representar sus características naturales, en las cuales las condiciones agua-suelo-planta pueden ser reguladas y controladas (León, 2016).

El lisímetro aplica el concepto del balance hídrico del suelo a la programación de riego; es el único método disponible para medir directa y continuamente el contenido de humedad del suelo. Los lisímetros proporcionan el método de campo más fiable para estudiar la evapotranspiración (Fernández et al., 2010).

Estos dispositivos tienen gran importancia, ya que permiten estimar de manera directa el balance de masas de agua del suelo y de los solutos solubles y no solubles que son aplicados al suelo. Se pueden considerar como instrumentos muy adecuados dado que permiten realizar mediciones de volúmenes de agua y solutos en el suelo. Sin embargo, podrían resultar costosos porque además exigen personal de investigación entrenado, aunque la precisión de la información obtenida facilitaría los procesos de investigación que se lleven a cabo (González et al., 2020).

### 2.5. PRINCIPALES LIMITACIONES EN LA INSTALACIÓN DE LISÍMETROS

González et al. (2020) consideran que, cuando se instala un lisímetro, las condiciones hidráulicas e hidrofísicas naturales se alteran induciendo a errores

en las mediciones obtenidas, por lo que deben plantearse estrategias para su minimización.

Los propios autores, citando a López (1970), Tzenova (1978), Grillo (1983), Howell *et al.* (1991) y Lanthaler (2004), plantean los siguientes errores y sugerencias para evitar en la construcción de lisímetros:

*Efecto oasis:* los valores obtenidos son para la posición del lisímetro, lo que implica eliminar el aumento de disipación del vapor por calor latente, debido a la presencia de aire más caliente y seco en el lisímetro. Ello implica que se requiere extender significativamente la superficie contigua al lisímetro con el mismo cultivo que se va a usar para el experimento, en el caso de que se esté investigando sobre uno. Se deben evitar igualmente construcciones y árboles en las zonas aledañas, con el objetivo de que sea representativo de las condiciones climáticas e hidrológicas de la zona, con el fin de poder realizar escalamiento de los resultados y minimizar los errores.

*Efecto pared:* se presenta por la imposibilidad del flujo lateral entre el lisímetro y las zonas aledañas, con lo cual se presenta advección en pequeña escala desde las paredes del lisímetro hacia el cultivo debido a calor latente. Este efecto se puede minimizar si se reduce la relación de superficie de pared a superficie evapotranspirante bajo medición, construyendo lisímetros de pared muy delgada y máxima área posible. Otro aspecto que debe ser minimizado es el flujo preferencial que se puede dar a lo largo de las paredes.

*Área y profundidad:* un área de paredes mayor que la superficie experimental y la forma de los lisímetros produce una limitante en la veracidad de los resultados obtenidos, llamado efecto lateral. Una manera de reducir el efecto de la relación entre la superficie de paredes y superficie experimental es construir lisímetros con una superficie experimental mayor, que incide en los costos de construcción, funcionamiento hidráulico y, para el caso de lisímetros de pesada, la medición del peso. Los autores plantean que, en relación con la influencia lateral de acuerdo con la forma de los lisímetros, la circular es la de menor influencia, muy similar a la forma cuadrada; además, está disminuye en la medida en que la superficie experimental es mayor.

*Alteración del suelo:* al colocar el suelo en los lisímetros se modifican la retención de humedad, difusividad del calor, densidad y arreglo de los horizontes; por lo que es importante colocar las capas de suelo en orden original, tratando de

mantener igual la densidad, debido a su relación directa con la compactación y a su vez con el desarrollo de las raíces.

Sobre este aspecto, León (2016) dice que los lisímetros son bastante susceptibles a los efectos de la variabilidad espacial del suelo, por lo que este factor debe tenerse muy en cuenta en la decisión del lugar de instalación. También debe tenerse en cuenta que los flujos laterales que, en condiciones naturales, pueden producirse en el suelo no ocurren en los lisímetros de igual forma. Esto no es un gran problema en suelos ligeros, pero puede serlo en suelos arcillosos.

*Flujo de calor:* el almacenamiento y el flujo de calor en las paredes de lisímetro no deben ser diferentes a las del suelo adyacente. La diferencia de conductividad térmica entre el material de las paredes de los lisímetros y el suelo produce alteración en el balance de energía. Se tiene que garantizar el equilibrio de calor entre el suelo en el lisímetro y el suelo circundante no alterado. Para minimizar este error, se debe realizar una selección adecuada del material, así como de la disposición de los lisímetros. Si se tienen lisímetros de pesaje circulares, independientes y metálicos conviene sellarlos bien en la parte superior con un material aislante y flexible con el fin de evitar intercambio de aire con diferentes temperaturas, entre el exterior y las cámaras entre los recipientes.

*Equilibrio de humedad y drenaje:* en la parte inferior del lisímetro, se produce un cambio brusco entre el suelo y material más permeable generalmente (gravas, arenas) debido a la interrupción del perfil natural de los suelos; esto genera irregularidades en la presión y los flujos de agua. Se genera un almacenamiento al final del lisímetro cuyo resultado es que el flujo de agua ocurre cuando la presión hidráulica supera la presión de aire (atmosférica), los poros se saturan y el agua de drenaje queda acumulada (en contraste con las condiciones naturales del suelo). Por ello, un buen sistema de drenaje en el fondo del lisímetro garantiza que no haya acumulación de humedad en esta parte del mismo.

Un manejo inadecuado de los controles que permiten un flujo apropiado de agua puede afectar la evapotranspiración con errores significativos en los resultados obtenidos.

Una vez que se produzca ingreso de agua al lisímetro por precipitación, se genera modificación del flujo de agua en el suelo y de drenaje en el perfil del suelo y en el fondo de este, lo que afecta directamente el consumo de agua del cultivo. En este sentido, es importante que los lisímetros dispongan de mecanismos

para controlar la cantidad de agua de ingreso, mediante el uso de alguna de las dos alternativas: a) emplazar un mecanismo para evitar la caída de agua directamente al lisímetro utilizando un protector móvil de lluvia cuando la precipitación afecta una variable de investigación, como por ejemplo, el estudio sobre el efecto de los niveles de humedad en la producción; b) en el caso de los lisímetros descubiertos, es necesario implementar equipos de medición cercanos a la estación de lisímetros (pluviógrafos) para cuantificar de manera precisa la precipitación caída, con el fin de establecer un apropiado balance hídrico. Algunas veces, podría ser diferente la precipitación medida a la que reciben los lisímetros. Este aspecto es fácilmente corregible con la medición en tiempo real de las variables involucradas en el balance hídrico.

**Cultivo:** con respecto al cultivo que se sembrará, se pueden mencionar factores como la profundidad de las raíces, la cobertura vegetal y corte de materia verde. Con el fin de minimizar errores en las mediciones, es necesario diseñar lisímetros de acuerdo con el cultivo objeto de estudio, para definir la profundidad en función de la profundidad efectiva. También es necesario diferenciar si el experimento busca obtener la ETo o la ETc, dados los requerimientos de cobertura para el primer caso. Es importante especificar el tipo de cultivo que se planea sembrar para determinar ETo; es decir, si son gramíneas o alfalfa. Cuando se realiza el experimento para determinar ETc es necesario definir la densidad de siembra, de otra manera no podrían generalizarse los resultados obtenidos. En cuanto al corte de materia verde (aplicable a cultivo estándar, generalmente pasto o alfalfa), este debe ser frecuente para evitar remoción de materia vegetativa en activo estado fisiológico, que afecta el consumo potencial.

*Sensibilidad de las mediciones:* debido a que los cambios de humedad son pequeños, se requieren instrumentos con muy buena precisión. Es igual de importante garantizar una relación favorable entre la superficie con el volumen, por lo que se recomienda reducir la profundidad del tanque, teniendo en cuenta no limitar el desarrollo radicular.

## 2.6. METODOLOGÍAS APLICADAS PARA LA INSTALACIÓN Y USO DE LISÍMETROS

Para la instalación y operación del lisímetro, se deben tener presente las siguientes consideraciones:

El recipiente del lisímetro es un tanque de 210 litros cortado en la parte superior. En la parte inferior del tanque, se instala un sistema de tuberías de drenaje las cuales sirven para que el exceso de agua pueda drenar y posteriormente esos datos servirán para realizar los cálculos para el riego. Después de instalado el sistema de drenaje se coloca una mezcla de brea con parafina para que el exceso de agua no quede retenido y no afecte el registro de datos. Luego se coloca una capa de 20 cm de piedra fina y malla metálica, a continuación, se colocan capas de suelo teniendo cuidado de que la resistencia al corte del suelo sea lo más parecida al terreno donde se realiza el trabajo de investigación.

El borde del lisímetro debe sobresalir 5 cm del nivel del suelo para evitar el ingreso de agua superficial. Las capas de suelo dentro del lisímetro tienen la misma secuencia y la resistencia. Esto puede determinarse mediante un presionómetro, simulando así las mismas condiciones de compactación (León, 2016).

Una vez instalado el lisímetro a través de la siguiente relación matemática dada por Garay (2009), se determina el volumen de agua que se debe aplicar dentro del lisímetro.

$$V_a = (ET_o * ND * A)C \quad \text{Ecuación (21)}$$

Donde

- $V_a$  volumen de agua que se debe aplicar
- $ET_o$  evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>)
- ND número de días de un riego a otro
- AI área del lisímetro (m<sup>2</sup>)
- C coeficiente de seguridad para efectuar drenaje

Inicialmente, para determinar el volumen de agua que se debe aplicar en el lisímetro, se utiliza la ecuación donde se considera  $ET_o$ , la cual se obtiene del lisímetro de referencia. Posteriormente se reemplaza por el valor de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), determinada por el lisímetro del cultivo.

## **CAPÍTULO III. PROTOCOLO DEL CENTRO DE ESTUDIOS DE RIEGO DE LA ESPOCH PARA EL DISEÑO E INSTALACIÓN DE LISÍMETROS**

### **3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BLOQUE DE SIETE LISÍMETROS DE DRENAJE Y RHIZOTRON DE HORMIGÓN**

#### **Materiales de lisímetro**

Software – AutoCad, retroexcavadora, malla electrosoldada (dimensiones 10x10 cm, Ø 5 mm), hormigón simple ( $f' C= 210 \text{ kg/cm}^2$ ), malla armada (dimensiones 20 x 20 cm, Ø 10 mm), acero de refuerzo ( $f_y = 42, 00 \text{ Kg/cm}^2$ ), manguera negra (Ø1/2”) y cajetines plásticos, impermeabilizante líquido.

#### **Materiales de *rhizotrons***

Estructura metálica (dimensiones de 1,10 m x 0,55 m), vidrio templado con dimensiones de 1,10 m x 0,55 m, espesor 10 mm, geomembrana (1000 micras).

#### **Metodología**

El bloque de lisímetros fue diseñado con el *software* AutoCad. La base del lisímetro está construida de una forma cónica iniciando con una profundidad de 0,6 m y finalizando a una profundidad de 1,1 para obtener un desnivel y lograr el drenaje. A la profundidad de 1,10 m se coloca tubería de 50 mm con una válvula de esfera en su exterior que servirá para la recolección del agua drenada. Cada lisímetro tiene un ancho de 1,97 m por 2,49 m, las paredes externas e internas del bloque de lisímetros tienen un espesor de 0,17 m.

En los lisímetros, se instalaron *rhizotrons* que están ubicados en la pared interna. El vidrio insertado en la pared es templado de 10 mm de dimensiones de

1,1 m y 0,5 m con cuadrículas a 0,05 m que sirven como medios de observación del crecimiento radicular, los *rhizotrons* están apoyados en una estructura metálica, en la parte exterior del *rhizotron* se coloca una geomembrana de 1000 micras de espesor para impedir el paso de la luz solar a las raíces.

Con retroexcavadora, se extrajeron cuatro capas consecutivas de suelo de 0,20 m de profundidad cada capa hasta llegar a los 0,80 m. La base de los lisímetros se construyó con malla electrosoldada y hormigón simple. En la construcción de las paredes externas e internas de los lisímetros, se utilizó malla armada, de acero de refuerzo, u hormigón simple. En toda la pared interna de los lisímetros, se instalaron guías de electricidad para puntos eléctricos distribuidos equitativamente.

### 3.2. INSTALACIÓN DEL BLOQUE DE LISÍMETROS

#### **Materiales**

Penetrómetro manual, infiltrómetro de doble anillo, pala de desfonde, simulador de lluvia, balanza digital, canto rodado, compactador de suelo y barreno.

#### **Metodología**

En la parte exterior del bloque de lisímetros, a una distancia de dos metros, se determinó la velocidad de infiltración, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, agua útil, densidad aparente. Se determinaron parámetros físicos y químicos, textura, dureza, pH, macro, microelementos, materia orgánica y conductividad eléctrica.

En la base interna de cada lisímetro, para evitar el paso de partículas gruesas y evitar el taponamiento de la tubería y válvula, se coloca una malla metálica, el suelo del lisímetro entre 0,6 m y 0,8 m se reemplazó por material pétreo. Encima de este se colocó malla plástica como material filtrante, el lisímetro se relleno con el suelo extraído en el mismo orden de salida, tomando en consideración la dureza de compactación hasta llegar al nivel del suelo. En cada lisímetro, se rea-

lizaron tres camellones o lomos a una directa de 0,60 m y 0,3 m de surco. Para la aplicación del riego, se instaló tubería PVC de 32 mm con una válvula de esfera de paso seguido por un caudalímetro. En cada lomo, se instaló una línea de riego con cinta de goteo con goteros cada 0,30 m con un caudal de goteo de 1,6 l h<sup>-1</sup>. Se instalaron tres tensiómetros a 0,10 m, 0,30 m y 0,50 m de profundidad.

### 3.3. CALIBRACIÓN DEL BLOQUE DE LISÍMETROS

#### Materiales

Tensiómetros (0,15, 0,30 y 0,45 m), bloques de yeso, barreno, cápsulas metálicas, balanzas de precisión, estufa, humidímetro, depósito de drenaje, probeta, sistema de riego por goteo (caudalímetro, tuberías, válvulas y accesorios de varios diámetros).

#### Metodología

Para determinar el contenido de humedad en el suelo, se utilizaron tensiómetros, bloques de yeso a profundidades de 0,15, 0,30 y 0,45 m. También se determinó con el método gravimétrico mediante la ecuación (22) propuesta por Ekanayake (1994), citada por León et al. (2016).

$$CAS = [(PF - PS) * 100] * PS - 1 \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde

CAS    contenido de agua en el suelo (%)

PF    peso fresco de la muestra (g)

PS    peso seco de la muestra (g)

Para determinar el volumen de agua para llegar a la capacidad de campo, en el primer riego, se utiliza la ecuación (23) propuesta por CER (2019).

$$VCC = CC - CAS 100 * Dap \rho_w * A_l \quad \text{Ecuación (23)}$$

Donde

VCC volumen de agua a capacidad de campo (m<sup>3</sup>)

CC valor de la capacidad de campo (%)

CAS contenido de agua en el suelo (%)

Z profundidad de la capa (m)

Dap densidad aparente de la capa de suelo (g/cm<sup>3</sup>)

Pw densidad del agua (g/cm<sup>3</sup>)

Al Área de lisímetro (m<sup>2</sup>)

Para el primer riego en los lisímetros se dota del volumen de agua hasta llegar a capacidad de campo, ecuación (22), y para la obtención de drenaje se debe aplicar un sobrerriego adicional, el mismo que se aplicará el 25 % del VCC. Si no hay drenaje, se aumenta el porcentaje de agua adicional hasta lograrlo (cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Coeficiente de drenaje

VCC (l)	Sobre riego adicional para exigir drenaje	Coeficiente de drenaje (Cd)
Volumen de agua a capacidad de campo	25 %	VCC + 0,25 del VCC
	50 %	VCC + 0,50 del VCC
	75 %	VCC + 0,75 del VCC
	100 %	VCC + 1,0 del VCC

Fuente: CER, 2019

Para determinar la cantidad de agua para regar en cada , a partir del segundo riego se utiliza, la ecuación (24) mencionada en León et al. (2016), citada por Peña (2018).

$$Va = Etp * ND * Al * Cd \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde:

Va volumen aplicado (l)

ETp evapotranspiración del cultivo de referencia (mm)

ND número de días que hay de riego a riego, en el momento que deja de drenar el lisímetro

Al área del lisímetro (m<sup>2</sup>)

Cd coeficiente de drenaje

### 3.4. MANEJO Y OPERACIÓN DEL BLOQUE DE LISÍMETROS Y RHIZOTRONS

#### Metodología

##### Determinación de la evapotranspiración

**Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>):** para el cálculo de ET<sub>o</sub>, se selecciona un lisímetro en el cual se debe sembrar a voleo semilla de pasto Ray grass (*Lolium multiflorum*) manteniendo el cultivo en condiciones ideales de humedad hasta que alcance una altura de 12 cm y posteriormente se aplica la fórmula lisimétrica mediante la ecuación propuesta por CER (2019).

$$ET_p/ET_o = \frac{R-D}{ND} \quad \text{Ecuación (25)}$$

Donde

ET<sub>o</sub>/ET<sub>c</sub> evapotranspiración (mm día<sup>-1</sup>)

R agua agregada por riego o precipitaciones (mm)

D agua drenada durante el período de análisis (mm)

ND número de días que hay de un riego a otro

**Evapotranspiración de cultivo (ET<sub>c</sub>):** para el cálculo de la ET<sub>c</sub>, en los lisímetros se siembra el cultivo seleccionado a las densidades de siembra recomendadas. Se determina la evapotranspiración del cultivo aplicando la ecuación (4) mencionada por Allen et al. (2006, citado por León et al., 2016).

### **Cálculo del coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>)**

Para el cálculo del K<sub>c</sub>, se utiliza la ecuación mencionada en Allen et al. (2006, citado por León et al., 2016).

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad \text{Ecuación (26)}$$

Donde

K<sub>c</sub>      coeficiente de cultivo (adimensional)

ET<sub>c</sub>    evapotranspiración del cultivo (mm día<sup>-1</sup>)

ET<sub>o</sub>    evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>)

## **3.5. RESULTADOS DEL PROTOCOLO DEL CENTRO DE ESTUDIOS DE RIEGO DE LA ESPOCH**

### **3.5.1. Diseño y construcción de bloque de siete lisímetros de drenaje y rhizotron de hormigón**

El bloque de lisímetros de drenaje se conforma de siete lisímetros de 2,49 m por 1,97 m, lo que da un área de 4,9 m<sup>2</sup>. Se designó al lisímetro 7 para la determinación de la evapotranspiración de referencia; en los lisímetros 1, 2 y 3 se sembrará una especie; a su vez, en los lisímetros 4, 5 y 6 se sembrará otra especie. Así se tendrá dos especies simultáneas para evaluar con tres repeticiones, lo que servirá para un análisis estadístico.

Los *rhizostrons* se ubican en los lisímetros en la pared interna del bloque de lisímetros de drenaje, los cuales servirán para la determinación de profundidad radicular. La grada de ingreso tiene un ancho de 1 m. Todo el bloque de lisímetros de drenaje tiene dimensiones de 8,11 m por 7,07 m. Se utilizó malla electrosoldada de 5 mm de diámetro en la base de los lisímetros y en la del bloque de lisímetros.

Se utilizó malla armada de 10 mm de diámetro para la pared interna y para las divisiones entre lisímetros para impedir la obstrucción de válvulas y tuberías de drenaje (fig. 3.1). Todos los lisímetros fueron diseñados y construidos con un desnivel de 0,5 m lo cual provocará drenaje del volumen de agua ingresado al mismo.

Figura 3.1. Malla metálica



### 3.5.2. Instalación del bloque de lisímetros

Se determinan los parámetros físicos del suelo en campo como compactación y tasa de infiltración. En el laboratorio, se determinan capacidad de campo, punto de marchitez permanente, textura y estructura (tabla 3.1).

Tabla 3.1. Parámetros físicos del suelo del bloque de lisímetros

Lisímetro	Compactación (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Tasa de infiltración (mm/h)	Densidad aparente (Kg/l)	Capacidad de campo (%)*	Punto de marchitez permanente (%)*	Textura
1	4,90	104,17	1,48	28,34	10,11	F. limoso
2	5,64	108,3	1,40	28,34	10,11	F. limoso
3	5,12	102,11	1,50	28,34	10,11	F. limoso
4	5,16	115,61	1,43	28,45	9,68	F. limoso
5	5,17	144,40	1,38	28,45	9,68	F. limoso
6	5,08	79,96	1,45	28,45	9,68	F. limoso
7	5,23	104,83	1,42	28,77	10,00	F. limoso
X	5,19	108,49	1,44	28,02	9,91	

Fuente: CER, 2019, \*Fuente: IIAP, 2019

Se determinó un grado de correlación confiable ya que su valor de 0,9 corrobora una correlación positiva, lo que indica que, a medida que se profundiza el suelo, el grado de compactación aumenta, con una disminución de la velocidad de infiltración, así como la restricción del crecimiento radicular, lo que puede ocurrir por diversos factores.

La tasa de infiltración de todo el bloque de lisímetros, en los primeros minutos (dos a diez minutos), es alta, empezando con 1082,36 mm h<sup>-1</sup> y llegando al minuto 10 con 76,97 mm h<sup>-1</sup>, desde cuando empieza a disminuir notablemente hasta llegar al minuto 280, con una velocidad de 7 mm h<sup>-1</sup>. Esta disminución se debe a que la compactación del suelo aumenta en función de la profundidad como lo mencionan Villazón et al. (2015) que demuestran que existe un aumento de compactación a los 0,3 m, lo que dificulta la infiltración del agua en el suelo. Resultados similares obtu-

vieron Denioa et al. (2000) al realizar estudios en suelos con textura franco limosa, como la del presente estudio, en la que se corrobora que la velocidad de infiltración disminuye en suelos compactados.

La tabla 3.2 muestra valores promedio de todos los lisímetros, los que, si se interpretan según los estándares de Rioja (2002), la materia orgánica (MO) presenta nivel bajo, la conductividad eléctrica (CE) es inapreciable, el potencial hidrógeno (pH) es medianamente básico, hay fósforo (P) en un nivel bajo, potasio (K) en un nivel muy bajo, calcio (Ca) en un nivel bajo, magnesio (Mg) y nitrógeno (N) en un nivel muy alto.

Tabla 3.2. Análisis químico del bloque de lisímetros.

Lisímetro	MO (%)	CE (dS /m)	Ph	NH <sub>4</sub> (ppm)	P (ppm)	S (ppm)	K (meq/100ml)	Ca (meq/100ml)	Mg (meq/100ml)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	B (ppm)	Sumatoria de bases (meq/100ml)
L1-2-3(0-0,20m)	1,40	0,26	7,33	48,00	10,00	3,90	0,24	9,80	4,60	0,40	13,30	43,00	2,10	0,60	14,64
L1-2-3(0,20m-0,40m)	1,00	0,14	7,59	41,00	7,20	2,50	0,11	9,40	4,20	0,30	13,30	35,00	1,50	0,50	13,71
L1-2-3(0,40m-0,60m)	0,90	0,11	7,81	34,00	10,00	1,80	0,07	9,70	4,10	0,40	12,50	31,00	0,80	0,30	13,87
L4-5-6 (0-0,20m)	1,80	0,57	7,45	40,00	14,00	10,00	0,33	9,50	4,30	0,30	11,30	51,00	2,90	0,50	41,13
L4-5-6 (0,20m-0,40m)	1,20	0,28	7,48	39,00	8,00	6,60	0,16	9,90	4,30	0,30	12,10	36,00	1,40	0,30	13,36
L4-5-6 (0,40m-0,60m)	0,90	0,17	7,78	43,00	7,20	4,10	0,06	9,00	4,10	0,40	12,00	33,00	0,70	0,40	13,16
L7 (0-0,20m)	1,50	0,33	7,39	57,00	11,00	2,10	0,26	9,80	4,50	0,40	12,20	48,00	2,90	0,50	14,56
L7 (0,20m-0,40m)	1,30	0,32	7,31	41,00	10,00	1,90	0,22	9,90	4,40	0,40	12,70	43,00	1,80	0,50	14,52
L7 (0,40m-0,60m)	0,90	0,14	7,89	32,00	15,00	1,70	0,07	9,80	4,00	0,30	11,40	33,00	1,20	0,60	13,87
X	1,21	0,26	7,54	41,67	10,27	3,84	0,17	9,64	4,28	0,36	12,31	39,22	1,70	0,47	13,98

MO: materia orgánica  
 CE: conductividad eléctrica  
 Datos obtenidos mediante promedio de las respectivas capas

Fuente: INIAP, 2019

### 3.5.3. Calibración del bloque de lisímetros

Luego de dar los riegos respectivos a todos los lisímetros para su llegada a capacidad de campo y el sobrerriego adicional, se determinó con qué porcentual de riego se logró llegar a la capacidad de campo en cada lisímetro (tabla 3.3).

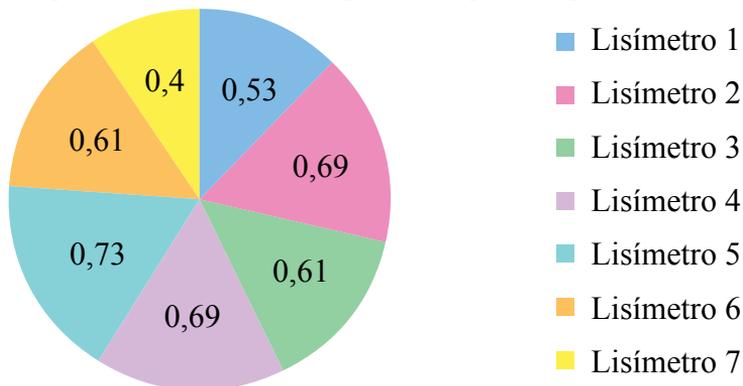
Tabla 3.3. Calibración de bloque de lisímetros de drenaje

Lisímetro	CAS	VCC	Sobre riego adicional para exigir drenaje	Cd
U	Contenido de agua en el suelo (%) antes del riego	Volumen de agua a capacidad de campo (m <sup>3</sup> )	(%)	(%)
1	16,04	0,53460	25	0,25
2	11,59	0,69020	25	0,25
3	13,68	0,60542	25	0,25
4	11,59	0,69347	25	0,25
5	10,03	0,73257	25	0,25
6	13,68	0,61375	25	0,25
7	19,25	0,39789	25	0,25

Fuente: CER, 2019

La figura 3.2 muestra el volumen aplicado en cada lisímetro y su respectivo sobrerriego con su valor volumétrico. Como resultado, se obtuvo para el lisímetro 1: 0,13 m<sup>3</sup>, lisímetro 2: 0,61 m<sup>3</sup>, lisímetro 3: 0,61 m<sup>3</sup>, lisímetro 4: 0,69 m<sup>3</sup>, lisímetro 5: 0,73 m<sup>3</sup>, lisímetro 6: 0,61 m<sup>3</sup>, lisímetro 7: 0,40 m<sup>3</sup>. En todos los lisímetros se mantiene el mismo sobrerriego en porcentual de un 25 %.

Figura 3.2. Volumen de agua (m<sup>3</sup>) aplicado por lisímetro



## **CAPITULO IV. EXPERIENCIAS DE ESTUDIOS SOBRE RECURSOS HÍDRICOS Y LISIMETRÍA**

### **Diseño, implementación y calibración de bloque de siete lisímetros de drenaje para ajuste del coeficiente de cultivo ( $K_c$ )**

#### **4.1. UBICACIÓN**

La presente investigación se realizó en los predios de la Estación Experimental Tunshi en el Centro Experimental del Riego (CER) de la Facultad de Recursos Naturales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en el cantón Riobamba, Provincia de Chimborazo, Ecuador, ubicada a una altitud de 2727 m.s.n.m. Latitud:  $1^{\circ}45'1.52''S$  Longitud:  $78^{\circ}37'36.25''W$ , coordenadas: UTM 17S Datum WGS84, X: 764032.8 Y: 9806358.

#### **Fase de precampo. Diseño**

##### **Diseño de bloque de siete lisímetros de drenaje**

Para el desarrollo del plano del bloque de lisímetros, se utilizó el *software* AutoCad en el que se diseñaron dos tipos de lisímetros: tipo A y tipo B bajo el nivel del suelo con las siguientes características:

### 1) Lisímetro tipo A

El lisímetro tipo A tiene forma prisma pentagonal (fig. 4.1) con las siguientes dimensiones:

Ancho 1,97 m

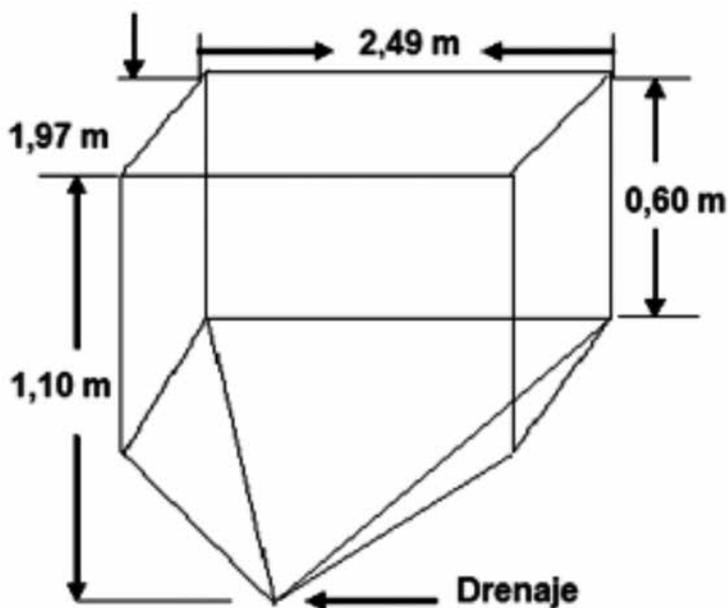
Largo: 2,49 m

Profundidad inicial: 0,6 m

Profundidad de zonas de drenaje: 1,10 m

El desnivel de profundidades tiene como objetivo provocar el drenaje correspondiente. En la profundidad de zona de drenaje, se coloca una tubería de 50 mm de material PVC acompañada de una válvula de bola de 50 mm del mismo material.

Figura 4.1. Diseño de lisímetro tipo A



Fuente: Salazar, 2020

## 2) Lisímetro tipo B

El lisímetro tipo B tiene forma de prisma trapezoidal (fig. 4.2) con las siguientes dimensiones:

Ancho: 1,97 m

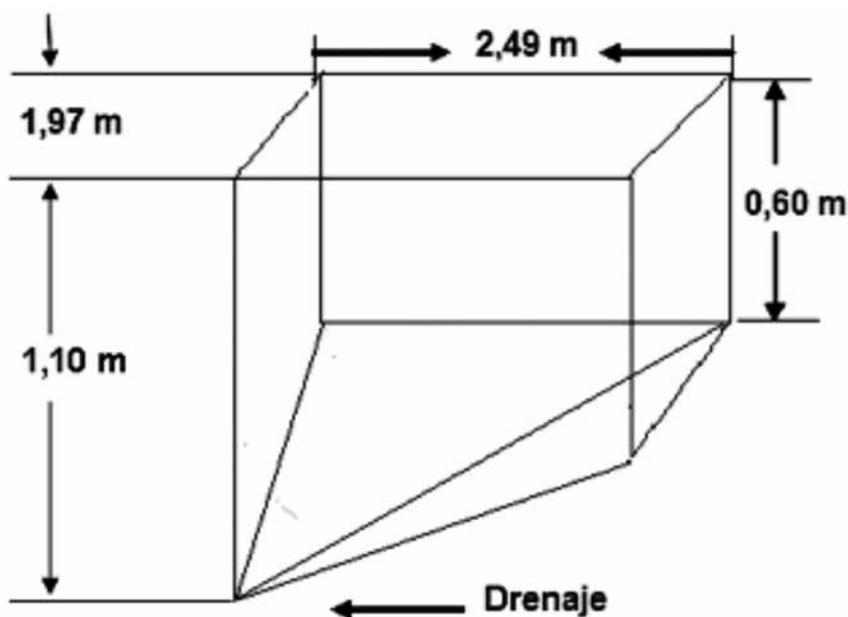
Largo: 2,49 m

Profundidad inicial: 0,60 m

Profundidad de zonas de drenaje: 1,10 m

El desnivel de profundidades tiene como objetivo provocar el drenaje correspondiente. En la profundidad de zona de drenaje, se coloca una tubería de 50 mm de material PVC acompañada de una válvula de bola de 50 mm del mismo material.

Figura 4.2. Diseño de lisímetro tipo B



Fuente: Salazar, 2020

Con el diseño de los dos tipos de lisímetros, se procedió a formar el bloque de siete lisímetros (fig. 4.3) con las siguientes características:

Lisímetro 1: tipo B

Lisímetro 2: tipo A

Lisímetro 3: tipo B

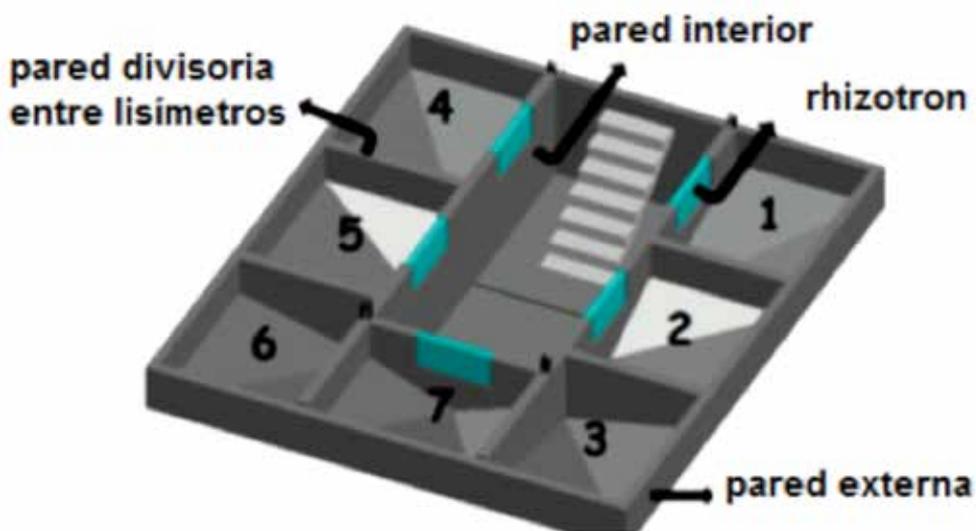
Lisímetro 4: tipo B

Lisímetro 5: tipo A

Lisímetro 6: tipo B

Lisímetro 7: tipo A

Figura 4.3. Diseño 3D, bloque de siete lisímetros de drenaje



Fuente: Salazar, 2020

La división entre cada lisímetro y la pared interna del bloque con un espesor de 0,17 m y la pared externa del bloque con un espesor de 0,15 m.

Se diseñó un marco metálico de dimensiones 1,1 m por 0,5 m con doble entrada. En la interior, se colocará vidrio templado de 10 mm, en la entrada exterior se colocará geomembrana de 1000 micras de espesor con dimensiones de 1,1 m por 0,5 m. Estos marcos se ubicarán en la parte frontal interna de los lisímetros 1, 2, 4, 5 y 7.

Para ingresar al cuarto de observación, se diseñaron gradas con dimensiones de 0,3 m por 1 m con una altura de 0,2 m.

Se diseñaron siete depósitos de drenaje de vidrio cubierto con estructura metálica con dimensiones de 0,5 m por 0,5 m por 0,4 m, acompañada en el lado derecho con una regleta metálica para determinar la altura o la lámina de agua drenada.

## 4.2. FASE DE CAMPO

### Construcción de bloque de siete lisímetros de drenaje

Definida la ubicación del bloque de lisímetros de drenaje, se delimitó con cal el borde externo de cada uno de los siete lisímetros. Posteriormente, con la ayuda de la maquinaria retroexcavadora, se extrajeron cuatro capas de suelo a diferentes profundidades de cada lisímetro (fig. 4.4):

Capa 1: 0 m – 0,2 m de profundidad

Capa 2: 0,2 m – 0,4 m de profundidad

Capa 3: 0,4 m – 0,6 m de profundidad

Capa 4: 0,6 m – 0,8 m de profundidad

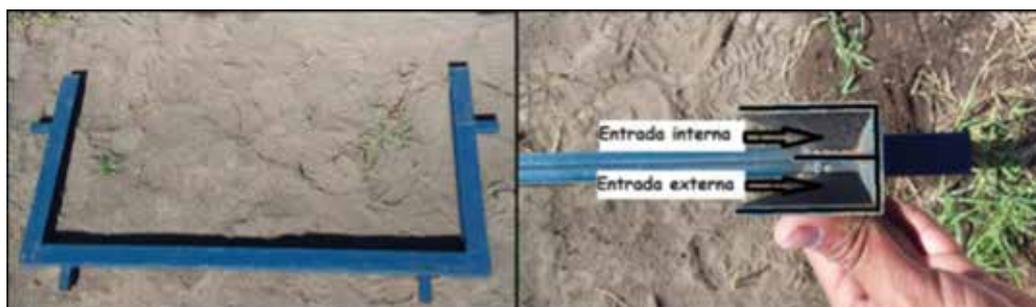
Figura 4.4. Extracción de capas de suelo en el bloque de lisímetros



Fuente: Salazar, 2020

Para la construcción de la base de los lisímetros se utilizó malla electrosoldada y hormigón simple. Las paredes externas e internas de los lisímetros se hicieron con malla armada, acero de refuerzo y hormigón simple. En la construcción de la pared interna del bloque se implementó la estructura metálica correspondiente al *rhizotron* que consta de dos entradas (fig.4.5). En la entrada interna, se colocó vidrio templado de 10 mm de espesor recubierto en su borde con silicona. En la entrada exterior, se colocó geomembrana de 1000 micras de espesor.

Figura 4.5. Estructura metálica de rhizotron



Fuente: Salazar, 2020

En toda la estructura interna del bloque de lisímetros se instalaron dos guías de electricidad para puntos eléctricos utilizando manguera negra, cajetines y, posteriormente, el interior de cada lisímetro fue impermeabilizado con impermeabilizante líquido (fig. 4.6).

Figura 4.6. (a) Construcción de la base y pared externa de lisímetros.  
(b) Construcción de la pared interna del bloque de lisímetros.  
(c) Aplicación de impermeabilizante en lisímetros



Fuente: Salazar, 2020

Los resultados finales del bloque de lisímetros construidos se muestran en la figura 4.7.

### **Caracterización de parámetros físico-químicos del suelo**

A una distancia paralela a cada lisímetro, se determinaron los parámetros hídricos del suelo con la respectiva metodología:

### **Identificación de horizontes**

Para la identificación de horizontes, se tomaron en consideración variables de color, estructura, consistencia y la presencia o ausencia de carbonatos.

Figura 4.7. Bloque de lisímetros construido



Fuente: Salazar, 2020

### Compactación

Para determinar el grado de dureza del suelo, se utilizó un penetrómetro manual (fig. 4.8), se introdujo en cuatro puntos equidistantes de la capa de estudio y se obtuvo un promedio de los datos, los mismos que están dados en unidades de  $\text{Kgf cm}^{-2}$ .

Figura 4.8. Lectura de compactación de capas del suelo



Fuente: Salazar, 2020

### Velocidad de infiltración

La velocidad de infiltración fue obtenida mediante el infiltrómetro Turf Tec (fig. 4.9), que se colocó a nivel de la superficie y se procedió a introducir 0,05 m y posteriormente se aplicó agua en el anillo exterior e interior.

Figura 4.9. Pruebas de infiltración en capas del suelo.



Fuente: Salazar, 2020

Para la determinación de velocidad de infiltración instantánea y la velocidad de infiltración básica, se aplicaron las ecuaciones 27 (Pizarro et al., 2017) y 28 (Génova et al., 2017), respectivamente.

### Velocidad de infiltración instantánea

$$I = (Dh * 600) * t - 1 \quad \text{Ecuación (27)}$$

Donde

- I      velocidad de infiltración (mm h<sup>-1</sup>)
- Dh     diferencia entre altura de agua (cm)
- t      diferencial de tiempo (min)

### Velocidad de infiltración básica

$$I_b = K (-600n)^n \quad \text{Ecuación (28)}$$

Donde

- I<sub>b</sub>    velocidad de infiltración básica
- k      factor numérico adimensional. Representa la velocidad de infiltración en cm h<sup>-1</sup> durante el intervalo inicial, se obtiene analítica o gráficamente y es el parámetro del ajuste de los datos de campo al modelo
- n      exponente que varía entre 0 y<sup>-1</sup>

### Densidad aparente

Para la determinación de la densidad aparente, se aplicó el método del hoyo, el mismo que consistió en realizar una excavación de un hoyo en el suelo (0,25 m por 0,25 m por 0,25 m), extrayendo y pesando la cantidad de suelo que ocupaba el hoyo para obtener la masa de suelo en estado húmedo.

Se determinó el volumen del hoyo colocando un plástico en el hoyo y aplicando agua previamente medida con el uso de una probeta (Gabriels y Lobo, 2006) (fig. 4.10).

Figura 4.10. Prueba de densidad aparente



Fuente: Salazar, 2020

Del suelo extraído, se tomó una muestra de suelo de 200 g, la que se sometió a una temperatura de 105°C por veinticuatro horas y se determinó el porcentaje de humedad, con el cual se hace una relación para el total del suelo extraído para obtener así el dato de la masa del suelo. Con los datos obtenidos se aplica la ecuación 29.

$$DA = (P_{ss}) * Vol - 1 \quad \text{Ecuación (29)}$$

Donde

DA      densidad aparente

P<sub>ss</sub>    peso del suelo (g)

Vol    volumen del suelo (m<sup>3</sup>)

### Textura, capacidad de campo y punto de marchitez permanente

La textura fue determinada mediante el método Boyocus. Para la capacidad de campo y punto de marchitez permanente, se realizó la metodología ollas de presión de Richards (INIAP, 2019).

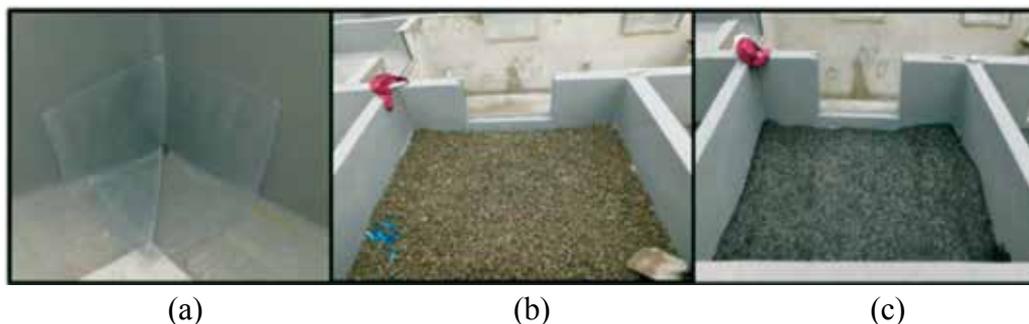
### Macroelementos, microelementos, pH, conductividad eléctrica y materia orgánica

La metodología empleada fue Olsen modificado, Curcumina y Fosfato de calcio para macroelementos y microelementos. Para la determinación de pH, se utilizó la metodología de suelo: agua (1:2, 5); para conductividad eléctrica, pasta saturada y, para materia orgánica, dicromato de potasio (INIAP, 2019).

## 4.3. INSTALACIÓN DEL BLOQUE DE LISÍMETROS

En la zona de drenaje de cada lisímetro, se colocó una malla metálica (0,5 m por 0,5 m) con el objetivo de evitar el paso de partículas gruesas. Luego se colocaron capas de suelo con la particularidad que la capa 4 se reemplazó con canto rodado para permitir el drenaje y fue cubierta en la parte superior con una malla plástica (fig. 4.11).

Figura 4.11. (a) Incorporación de malla metálica. (b) Incorporación de canto rodado. (c) Incorporación de malla plástica.



Fuente: Salazar, 2020

Con referencia a las capas 3, 2 y 1, fueron colocadas en función al grado de compactación que se obtuvo inicialmente ayudados con un compactador manual. Se debe mencionar que en la capa 1 se formaron tres camellones de 0,6 m de ancho por 0,3 m con la excepción del lisímetro 7, el cual estaba destinado para la determinación de evapotranspiración del cultivo de referencia, Ray grass (*Lolium multiflorum*).

Para obtener el nivel ideal de humedad en los lisímetros, se instaló un sistema de riego, con tuberías PVC de 32 mm y válvulas de esfera de paso y caudalímetros en cada uno de los lisímetros.

En cada camellón se instaló una línea con una cinta de goteo con goteros cada 0,3 m y con un caudal de goteros de 1,6 l ha<sup>-1</sup>. Para determinar el comportamiento de la humedad del suelo, se utilizaron tensiómetros y bloques de yeso a profundidades de 0,10 m, 0,30 m y 0,50 m (fig. 4.12).

Figura 4.12. (a) Incorporación y compactación de capas de suelo.  
(b) Verificación de compactación con penetrómetro.  
(c) Instalación de sistema de riego, tensiómetro y bloques de yeso.



(a)

(b)

(c)

Fuente: Salazar, 2020

## Calibración de bloque de siete lisímetros de drenaje

En cada lisímetro, se procedió a realizar el siguiente proceso para cada capa de suelo colocada previamente:

### 1) Contenido de humedad por capa

Se determinó el contenido de humedad de cada capa de suelo realizando una calibración con los datos registrados de tensiómetros, bloques de yeso y método gravimétrico. Para este último método se utilizó la ecuación (22).

### 2) Volumen de agua a capacidad de campo

Para conocer el volumen de agua para llegar a capacidad de campo en cada capa se aplicó la ecuación (30) propuesta por CER (2019).

$$VCC = [(CC - CAS) * 100 - 1] * Z * Dap * Al \quad (\text{Ecuación 30})$$

Donde:

VCC volumen de agua a capacidad de campo (m<sup>3</sup>)

CC valor de capacidad de campo (%)

CAS contenido de agua en el suelo (%)

Z profundidad de la capa (m)

Dap densidad aparente de la capa de suelo (g cm<sup>3-1</sup>)

Al área de lisímetro (m<sup>2</sup>)

El volumen de agua para llegar a capacidad de campo del lisímetro está en función de los valores de las tres capas. Para esto se realizó una sumatoria y de esta forma se determinó la cantidad de agua total que necesita el lisímetro para llegar al nivel deseado.

### 3) Volumen de agua a capacidad de campo

Al llegar al volumen a capacidad de campo es importante obligar a generar un drenaje a cada lisímetro, para lo que se debe aplicar un sobrerriego adicional, el mismo que puede ir desde el 25 % hasta el 100 % de capacidad de campo, dependiendo de las características hídricas del suelo (tabla 4.1).

Tabla 4.1. Coeficiente de drenaje en lisímetro de drenaje

VCC (1)	Sobrerriego adicional para exigir drenaje	Coeficiente de drenaje (Cd)
Volumen de agua a capacidad de campo	25 %	VCC + 0,25 del VCC
	50 %	VCC + 0,50 del VCC
	75 %	VCC + 0,75 del VCC
	100 %	VCC + 1,0 del VCC

Fuente: CER, 2019

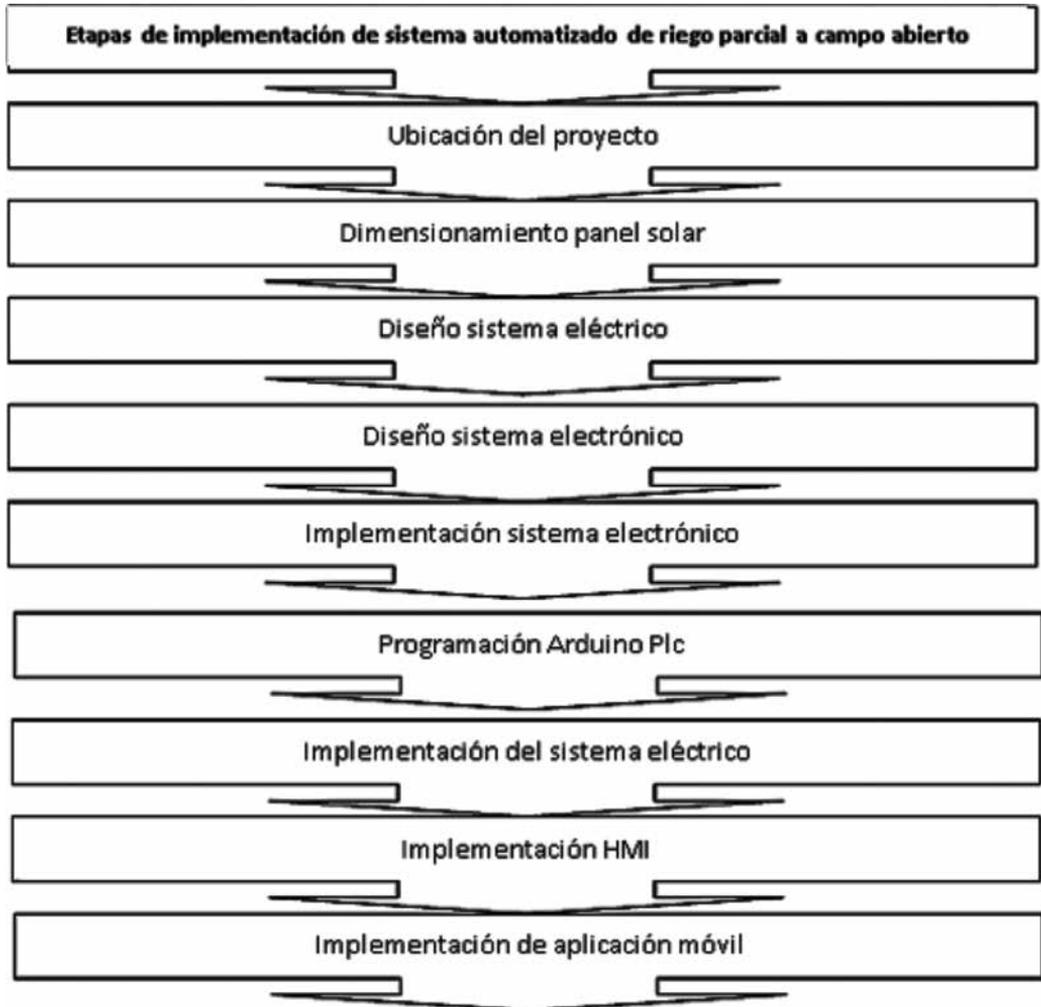
Para calcular la cantidad de agua que se debe regar en cada lisímetro a partir del segundo riego, se puede emplear la ecuación (24) utilizada en León et al. (2016), que permite determinar los requerimientos hídricos de la especie que se va a cultivar.

#### 4.4. IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE RIEGO POR GOTEO PARCIAL, A CAMPO ABIERTO EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL TUNSHI DE LA FACULTAD DE RECURSOS NATURALES

En el presente epígrafe se detalla la implementación de un sistema automatizado de riego por goteo parcial a campo abierto, tanto de los sistemas de *hardware* —circuitos eléctricos, electrónicos, diseño de PBC, ensamblaje de tablero y control, sistema de panel solar— como de los de *software* —programación de Arduino PLC, placas controladoras esclavo maestro, interfaz hombre-máquina y desarrollo de aplicación móvil—. La figura 4.13 muestra las etapas de implementación del sistema.

Para la implementación del proyecto, se aplicó el método heurístico, también conocido como «ideal», con el que, mediante reglas empíricas, se llega a una solución que consiste en imaginar, crear, innovar mediante pasos aplicables, para la solución de problemas.

Figura 4.13. Etapas de la implementación del sistema automatizado



Fuente: Chulde, 2017

## Ubicación del proyecto

El proyecto se desarrolló en la escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, en la Estación Experimental Tunshi, ubicada en la parroquia Licto, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo, latitud Sur  $1^{\circ}44'54''$ , altitud 2710 m.s.n.m. (fig. 4.14).

Figura 4.14. Ubicación del proyecto

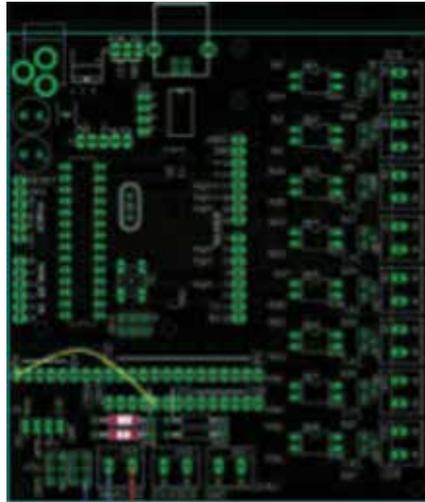


Fuente: Google Maps

## Conexión de entradas y salidas del Arduino PLC

La figura 4.15 muestra los diagramas de conexión de entradas y salidas de Arduino PLC.

Figura 4.15. Conexión entrada del PLC

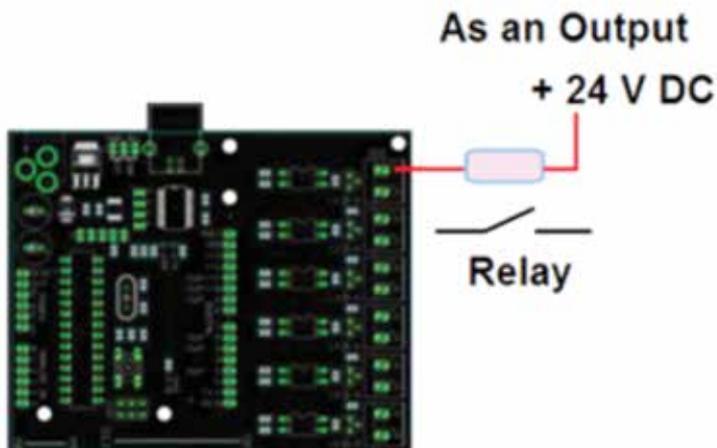


Fuente: Rodríguez, 2014

### Relación de salidas por relé al Arduino PLC

Configuración de conexión de salidas por relé del PLC (fig. 4.16).

Figura 4.16. Conexión de salidas por relé del PLC



Fuente: Rodríguez, 2014

### **Diseño del sistema eléctrico**

#### **Circuito transmisor de datos**

La placa PBC se encarga de transmitir los datos de dos sensores de humedad para detectar la humedad par e impar del sembrío de papa, por medio de módulos RF. También incluye una fuente reguladora de voltaje, controlador del panel solar, Arduino pro-mini, leds indicadores y borneras de conexión.

#### **Conexión de módulo RF Apc200a a la tarjeta transmisora**

Se realizó la conexión del módulo RF Apc200a. Se utilizó TX-RX, que permite una comunicación con otro de las mismas características utilizando comunicación serial. Este es el dispositivo que permite comunicar la tarjeta transmisora con el tablero de control.

#### **Conexión de la PCB transmisora**

La PCB transmisora se halla alimentada por un panel solar, que tiene una fuente tipo Buck LM2596S que regula y alimenta con 5v al Arduino pro-mini. A sus pines 16, 17 está conectado el módulo RF Apc200a; a los pines digitales 4, 5, 6, 7, leds indicadores de transmisión de datos y se utilizan los pines analógicos A0, A1 para la conexión de los sensores de humedad YL-38 respectivamente. Todos los sensores están conectados a la alimentación de 5v.

#### **Código de programación de la tarjeta transmisora**

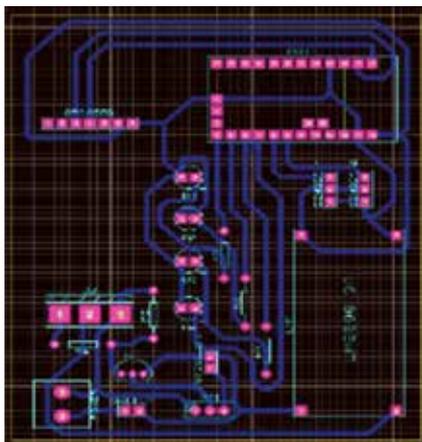
```
Unsigned total=0;
void setup() {
  Serial.begin(19200);
  {
  void loop() {
    int val = analogRead(A0);//sensor de humedad de lectura par
```

```
int val2 = analogRead(A1);//sensor de humedad de lectura impar  
val = map(val, 0,1023,99, 0);  
val2 = map(val2, 0,1023,99, 0);  
total= val*100;  
total= total+val2;  
Serial.print(total);  
delay(500)  
Serial.print("\n");  
{
```

### Diseño de PBC transmisora

Para diseñar el circuito se utilizó el *software* Proteus 8.5, que permite diseñar tanto el circuito esquemático y el PCB Layout al mismo tiempo (fig. 4.17). Terminado el diseño, se procede a hacer PCB en la baquelita. Para ello se utilizó una máquina CNC, para el diseño de las pistas.

Figura 4.17. PCB Layout placa transmisora



Fuente: Chulde, 2017

Terminado el diseño de las pistas en la baquelita, se procede a soldar todos los elementos electrónicos que permitirán el funcionamiento de esta (fig. 4.18).

Figura 4.18. Placa transmisora terminada.



Fuente: Chulde, 2017

### **Circuito receptor de datos**

La placa PCB se encarga de recibir los datos de dos sensores de humedad par e impar del sembrío de papa, por medio de módulos RF, módulo de reset Arduino pro-mini, Arduino Uno. También incluye una fuente reguladora de voltaje Shield GSM, sensor de lluvia, sensor de rayos UV, sensor de temperatura y borneras de conexión.

### **Conexión del módulo RF Apc200a a la tarjeta receptora**

Se realizó la conexión del módulo RF Apc200a. Se utilizó TX-RX, que permite una comunicación con otro módulo transmisor de las mismas características utilizando comunicación serial. Este es el dispositivo que permite comunicar la tarjeta receptora con el módulo transmisor.

## Conexión de la PCB receptora

La PCB receptora se alimenta por una fuente de 24 Dc, tiene una fuente tipo Buck LM2596S que regula y alimenta con 5v al Arduino pro-mini. A sus pines 4, 5 está conectado el módulo RF Apc200a; led indicador al pin digital 13; a los pines analógicos A4, A5 está conectada la comunicación I2C; al Arduino Uno se conecta el Shield GSM Sim900. Se utilizan los pines analógicos A4, A5 para la conexión I2C respectivamente. Todos los sensores están conectados a la alimentación de 5v.

## Código de programación de la tarjeta receptora

```
Int ledon=13;

#include<Wire.h>

#include<SoftwareSerial.h>

SoftwareSerial SIM900(7, 8);

Strind c;

int b;

int humedad1=0;

int humedad2=0;

int varaux=0;

String mensaje="";

String bomba1="";

String bomba2="";

String numero="";

String condicion="";

int luz=0;

int aupí =0;
```

```
int a;
int aux1=0;
int aux2=0;
int aux3=0;
int aux4=0;
int reset=2;
void setup()
{
pinMode(bomba1no, OUTPUT);
pinMode(bomba1nc, OUTPUT);
pinMode(bomba2no, OUTPUT);
pinMode(bomba2nc, OUTPUT);
pinMode(ledon, OUTPUT);
```

```
pinMode(reset, OUTPUT);
Wire.begin();
Serial.begin(19200);
SIM900.begin(19200);
pinMode(A0, INPUT);
pinMode(A1, INPUT);
pinMode(A2, INPUT);
delay(2000);
SIM900.print("AT+CMGF=1\r");
delay(500);
SIM900.print("AT+CNMI=2,2,0,0,0\r");
delay(500);
digitalWrite(bomba1no, LOW);
digitalWrite(bomba1nc, LOW);
digitalWrite(bomba2no, LOW);
digitalWrite(bomba2nc, LOW);
delay(5000);
}
void loop()
{
digitalWrite(reset, HIGH);
digitalWrite(ledon, HIGH);
if(SIM900.available()>0)
{
```

```
Mensaje=SIM900.readString().substring(1,150);
//Serial.print(mensaje);
numero=mensaje.substring(17,27);
aupí na =mensaje.substring(2,4);
Serial.println(mensaje);
//Serial.println( aupí na );
//Serial.println(numero);
}
valll = analogRead(A1);
valluz = analogRead(A0);
voltaje=map(valluz,0,1023,0,5000);//0-5000mV
if((voltage>=990)&(voltage<=2800))uv=(float)map(voltage,990,2800,0,1500)/100else uv=0;
valtemp = analogRead(A2);
lluvia = map(valll, 0, 1023, 100, 0);
float mv = (5000 / 1024.0) * valtemp;
aupí na o = mv / 10;
Serial.print("Voltage = " +String(voltage) + "mV");
//Serial.println("\t\tUV = " + String(uv) + "mW/cm^2");
// delay(100);
if (condicion == "IN")
{
SIM900.print("AT+CMGF=1\r");
Serial.print("AT+CMGF=1\r");
```

```
delay(500);
SIM900.println("AT+CMGS = \"+59397385664\"\\r");
delay(500);
SIM900.print("HUMEDAD UNO: ");
SIM900.println(humedad1);
SIM900.print("HUMEDAD DOS: ");
SIM900.println(humedad2);
SIM900.print("LLUVIA:");
SIM900.println(lluvia);
SIM900.print("TEMPERATURA:");
SIM900.println(temperatura);
SIM900.print("UV:");
SIM900.print(uv);
SIM900.println("SISTEMA PAR: ");
SIM900.print("BOMBA UNO: ");
SIM900.println(bomba1);
SIM900.println("SISTEMA IMPAR: ");
SIM900.print("BOMBA DOS: ");
SIM900.println(bomba2);
//SIM900.PRINT("LISTO: ");
SIM900.println((char)26);
delay(500);
SIM900.println()
delay(500);
```

```
Serial.println("SMS enviadooooooooooooooooooooooooooooo");
If(b>100){
varaux=b;
humedad1=varaux/100;
humedad2=varaux-(humedad1*100);
Serial.print(Humedad1: “);
Serial.print(humedad1);
Serial.print(Humedad2: “);
Serial.print(humedad2);
Serial.print(“Lluvia: “);
Serial.print(lluvia);
Serial.print(“Temperatura: “);
Serial.print(temperatura);
Serial.print(“UV: “);
Serial.print(uv);
Serial.print(“Trama: “);
Serial.println(varaux);
}
}
if(aux1=0)
{
if(humedad1<=20)
{
Serial.println(“MENOR 20 HIGH RELE BOMB UNO ACTIVADA”);
```

```
digitalWrite(bomba1no, HIGH);
digitalWrite(bomba1nc, LOW);
aux1=1;
aux2=0;
}
if(aux2=0)
{
if(humedad1>=50)
{

Serial.println("MAYOR 50 HIGH RELE BOMB UNO DESACTIVADA");
digitalWrite(bomba1no, HIGH);
digitalWrite(bomba1nc, LOW);
aux1=1;
aux2=0;
}
}
if(aux3==0)
{
if(humedad2<=20)
{

Serial.println("MENOR 20 HIGH RELE BOMBA DOS ACTIVADA");
digitalWrite(bomba2no, HIGH);
digitalWrite(bomba2nc, LOW);
```

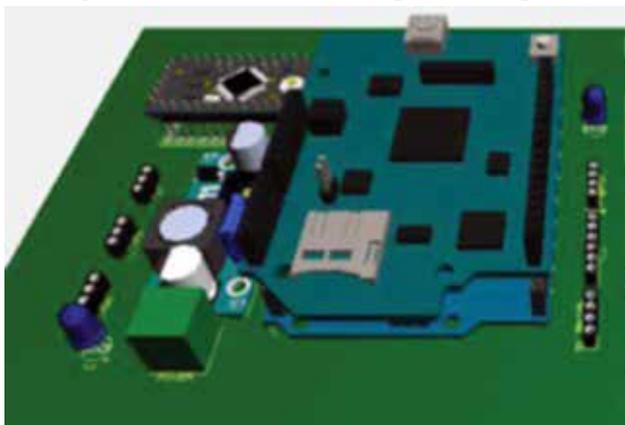
```
aux3=1;
aux4=0;
}
}
if(aux4==0)
{
if(humedad2>=50)
{
Serial.println("MAYOR 50 HIGH RELE BOMBA DOS DESACTIVADA");
digitalWrite(bomba2no, HIGH);
digitalWrite(bomba2nc, LOW);
aux3=0;
aux4=1;
}
}
delay(1000);
digitalWrite(reset, LOW);
if(aux1==1)
{
bomba1="ON";
}
if(aux1==0)
{
bomba1="OFF";
```

```
}  
if(aux2==0)  
{  
bomba2="ON";  
}  
if(aux2==1)  
{  
bomba2="OFF";  
}
```

### Diseño de PCB receptora

Para diseñar el circuito, se utilizó el *software* Proteus 8.5 el que permite diseñar tanto el circuito esquemático y el PCB Layout al mismo tiempo, terminado el diseño se procede hacer PCB en la baquelita, para ello se utilizó una máquina CNC para el diseño de las pistas (fig. 4.19 y 4.20).

Figura 4.19. 3D Visualizer placa receptora



Fuente: Chulde, 2017

Figura 4.20. Placa receptora terminada



Fuente: Chulde, 2017

#### Programación de PLC Arduino (ARBOX RELAY)

En el sistema de control, se utilizó PLC Arduino (ARBOX RELAY) (tabla 4.2), con las siguientes características:

Tabla 4.2. Características Arduino (ARBOX RELAY).

<b>PLC Arduino (ARBOX RELAY)</b>	
<b>Procesador</b>	Arduino genuino Uno
<b>Pines digitales</b>	60 a 10 v
<b>Pines analógicos</b>	60 a 10 v
<b>Alimentación</b>	12 a 24 v
<b>Entradas digitales</b>	4 entradas Relay
<b>Comunicación</b>	SPI, I2C, RS-232

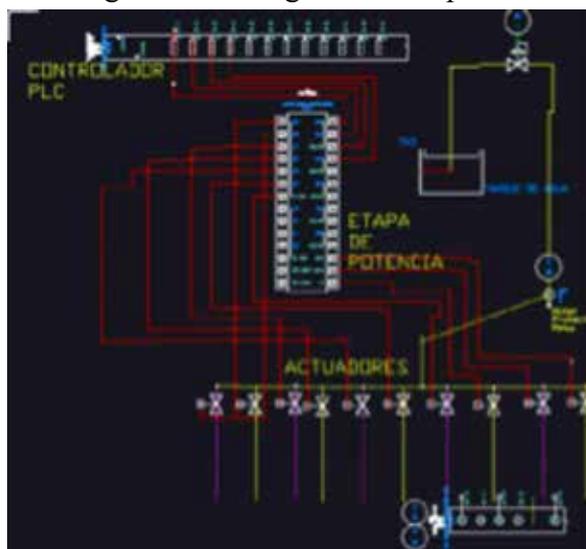
Realizado por: Kleber Chulde, 2017

Para la programación del Arduino PLC, se utilizó el *software* Arduino 1.8.1. Para Windows, su principal función es controlar todo el funcionamiento del sistema, lectura de los sensores de humedad, lluvia, temperatura, rayos UV y activar los actuadores según el algoritmo de control que está programando el controlador *on/off* aplicando el tratamiento 1.

Los parámetros establecidos fueron: el sistema se activará cuando la humedad sea menor al 13,4 % y se desactivará cuando la humedad llegue al 14 % que es la capacidad de campo, la temperatura, cantidad de rayos ultravioletas influyen para tener en cuenta las condiciones climáticas del día y, en caso de lluvia, el sensor suspenderá la actividad del sistema, mediante el control de los actuadores electroválvulas y motor.

El Arduino PLC se encuentra programando lo siguiente: pantalla Nextion HMI Tft 5.0 Inc serial, sensor de lluvia YL-3, área de detección de 48 mm y una velocidad de respuesta de menor a 100 ms, sensor de temperatura LM35 que da la temperatura ambiente en °C, sensor de rayos UV MI8511, los datos de radiación se dan eb ( $\text{mW cm}^{-2}$ ) que trabaja en todas las condiciones climáticas, y las salidas que activarán los contactores de las electroválvulas y motor (figura 4.21).

Figura 4.21. Diagrama de etapas de control



Fuente: Chulde, 2017

## **Alimentación PLC**

### *Entrada*

- 5 v** alimentación de voltaje para PLC
- 24 v** alimentación de voltaje para los Relay PLC

### *Salida*

- 24 v** alimentación de voltaje para los Relay activadores contactores

## **Sensores del sistema**

### *Entrada*

- A0** dato analógico del sensor de rayos ultravioleta UV
- A1** dato analógico del sensor de lluvia
- A2** dato analógico del sensor de temperatura

### *Salida*

- D3** activación voltaje para los Relay de contactor de actuadores
- D4** activación voltaje para los Relay de contactor de actuadores
- D5** desactivación voltaje para los Relay de contactor de actuadores
- D6** desactivación voltaje para los Relay de contactor de actuadores

## **HMI Serial**

### *Entrada*

- D11** transmisor de datos TX del controlador a la HMI
- D12** receptor de datos RV del HMI al controlador

## Comunicación Rs-232

### Entrada

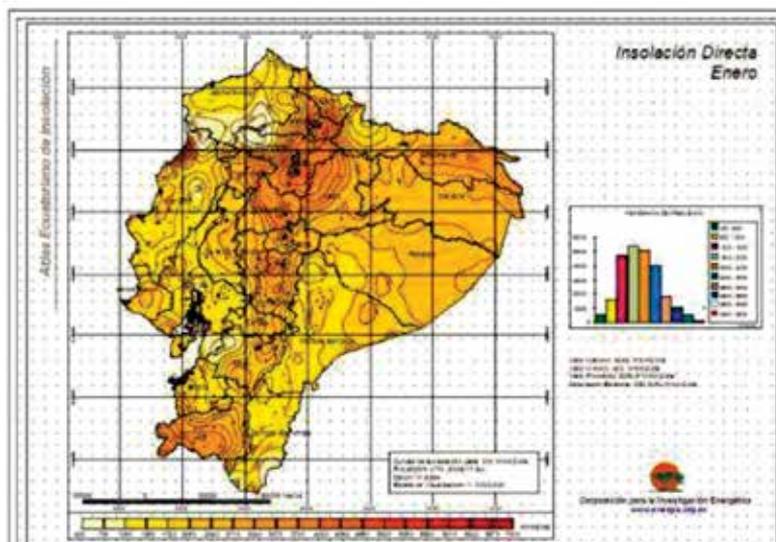
- D7 comunicación de Shilid GSM
- D8 comunicación de Shilid GSM
- D7 comunicación RS-232 módulo tarjeta receptora de datos de humedad par e impar
- D8 comunicación RS-232 módulo tarjeta receptora de datos de humedad par e impar

## Diseño del panel solar

### Radiación solar del sistema de generación fotovoltaico

Para determinar la radiación solar en la provincia de Chimborazo, se obtuvieron datos de ASE (Atlas Solar Ecuador) de Conelec. La figura 4.22 indica la insolación directa promedio, con una media anual 4750 Wh/m<sup>2</sup>/día en Riobamba.

Figura 4.22. Mapa solar de Ecuador



Fuente: Atlas de insolación CIE

El dimensionamiento del sistema fotovoltaico debe garantizar un perfecto funcionamiento en empleo de la radiación solar de la provincia. Se deben tomar muchos aspectos en cuenta: orientación, inclinación y radiación para poder utilizar al máximo la energía solar.

### **Incidencia de la radiación solar**

La incidencia de radiación solar depende de dos tipos: radiación solar directa, que es aquella que llega directamente a la planta; y difusa, cuya dirección ha sido modificada por diversos motivos: densidad atmosférica, precipitación, días nublados, entre otros.

### **Posición e inclinación del panel fotovoltaico**

Para lograr absorber la mayor cantidad de radiación en las horas de la mañana y mediodía, el ángulo de inclinación es de  $18^{\circ}$ - $21^{\circ}$ , se forma entre la superficie horizontal y la superficie del panel solar. Para este caso, se utilizó un ángulo de  $18^{\circ}$ , que permita optimizar y garantizar el funcionamiento del sistema de transmisión de datos.

### **Selección del panel solar**

Para determinar los watts del panel solar es necesario conocer todas las cargas que van a estar conectadas al mismo. Los datos de corriente, voltaje y potencia son importantes para el cálculo que permite determinar de cuantos watts son necesarios para que el sistema trabaje perfectamente (tabla 4.3).

Una vez realizado el cálculo del panel, resultó que es necesario uno de 20,15 W. A este resultado se le suma una tolerancia de 25 % para una mayor eficiencia y da un total de 25 W.

Este sistema trabaja diez horas y tiene un sistema de *backup* de energía. Se seleccionó un panel policristalino de 30 W. La tabla 4.4. muestra sus especificaciones técnicas.

Tabla 4.3. Cálculo del panel

Item	Corriente (A)	Potencia (W)	Tiempo (h)	energía (wh)
APC200A	0,028	0,14	10	1,4
Aduino Nano	0,04	0,2	10	2
Fuente Buck	1	5	10	50
Leds	0,06	0,3	10	3
Módulos de humedad	0,07	0,35	10	3,5
Fotocelda	0,005	0,025	10	0,25
Transistor	0,0026	0,013	10	0,13
Resistencias	0,0035	0,0175	10	0,175
			Total	60,455 Wh
Eficiencia	60 %			100,75333 Wh
Horas de sol		5h	Panel	20,1516667 W

Realizado por: Kleber Chulde, 2017

Tabla 4.4. Especificaciones del panel fotovoltaico

Descripción	Características
<b>Potencia máxima</b>	30 vatios
<b>Voltaje</b>	18 voltios
<b>Corriente</b>	1,667 amperios
<b>Voltaje del circuito abierto</b>	23,1 voltios
<b>Tecnología</b>	Policristalino
<b>Número de celdas</b>	36
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	-48 +85 °C
<b>Equipo para exterior</b>	Puede estar expuesto al sol y agua
<b>Garantía</b>	25 años
<b>Tamaño</b>	67x35x2,5cm-2 Kg

Realizado por: Kleber Chulde, 2017

### Diseño del soporte para el panel poli-cristalino

Para el diseño, primero se esbozó la estructura en solidworks. Ya terminada con medidas se procede a realizar en acero inoxidable AISI 302, seleccionado porque es muy versátil para construcciones metálicas que van a estar expuestas a la intemperie, tiene varias características para soldadura, la resistencia a corrosión es excelente en servicio intermitente (tabla 4.5).

Tabla 4.5. Propiedades del acero inoxidable 302 (Fe/Cr18/Ni8)

<b>Propiedades eléctricas</b>	
Resistividad eléctrica (u OHM cm)	70-72
<b>Propiedades físicas</b>	
Densidad (g cm <sup>3</sup> )	7,92
Punto de fusión (°C)	1400-1420
Alargamiento (%)	< 60
Dureza Brinell	160-190
Impaco Izod (Jm <sup>-1</sup> )	20-136
Módulo de elasticidad (Gpa)	190-210
Resistencia a la tracción (Mpa)	510-1100
<b>Propiedades térmicas</b>	
Coefficiente de expansión térmica (x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	15-18
Conductividad térmica a 23 °C (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	16,3

Realizado por: Kleber Chulde, 2017

### Dimensionamiento de conductores eléctricos

La ecuación 31 se utilizó para el dimensionamiento de los conductores eléctricos, determinando la caída de tensión en circuitos monofásicos

$$\Delta V = IreL$$

Ecuación 32: caída de tensión del conductor eléctrico bifásico.

$$\Delta V = 2IreL$$

Donde:

I corriente

Reresistencia del conductor

L distancia a la carga

Los conductores eléctricos son sólidos o cableados, tienen una condición suave, cubiertos por termoplástico de cloruro de polivinilo resistente a la humedad y temperatura, utilizados en la industria, comercial, residencia, control eléctrico (tabla 4.6).

Tabla 4.6. Especificaciones técnicas conductores eléctricos

Calibre AWG o MCM	Sección (mm <sup>2</sup> )	Formación	Espesor aislam. (mm)	Espesor chaqueta (mm)	Diam. exterior (mm)	Peso total (kg/km)	Capacidad de corriente		Tipo cable	Altem de embal.
		No. de hilas por diámetro (mm)								
20	0,519	1x0,813	0,38	0,10	1,77	7,07	15	10	TFN	A,B
18	0,823	1x1,02	0,38	0,10	1,98	10,94	15	10	TFN	A,B
16	1,31	1x 1,29	0,38	0,10	2,25	16,48	20	15	TFN	A,B
14	2,08	1x 1,63	0,38	0,10	2,59	23,17	35	25	THHN	A,B
12	3,31	1x2,05	0,38	0,10	3,01	34,16	40	30	THHN	A,C
10	5,26	1x2,59	0,51	0,10	3,81	55,04	55	40	THHN	A,D
8	8,34	1x3,26	0,76	0,13	5,04	91,22	80	55	THHN	A,B
16	1,31	19x0,30	0,38	0,10	2,46	17,95	20	15	TFN	A,B
14	2,08	19x0,38	0,38	0,10	2,86	23,80	35	25	THHN	A,B
12	3,31	19x0,47	0,38	0,10	3,31	35,70	40	30	THHN	A,C
10	5,26	19x0,60	0,51	0,10	4,22	56,20	55	40	THHN	A,D
8	8,37	7x1,23	0,76	0,13	5,47	93,70	80	55	THHN	A,B,E
6	13,30	7x1,55	0,76	0,13	6,43	141,30	105	75	THHN	A,E
4	21,15	7x1,96	1,02	0,15	8,22	227,60	140	95	THHN	A,E
2	33,62	7x2,47	1,02	0,15	9,75	34,10	190	130	THHN	A,E
1	42,36	7x2,78	1,27	0,18	11,24	446,20	220	150	THHN	A,D,E
1/0	53,49	19x1,89	1,27	0,18	12,35	553,30	260	170	THHN	D,E,Z
2/0	67,43	19x2,12	1,27	0,18	13,50	688,70	300	195	THHN	D,E,Z
3/0	85,01	19x2,39	1,27	0,18	14,85	856,1069	350	225	THHN	D,E,Z
4/0	107,20	19x2,68	1,27	0,18	16,30	1026,50	405	260	THHN	D,E,Z

Fuente: Electroclable C.A

### **Cálculo de conductor eléctrico para fase de control**

Para determinar el conductor eléctrico, se tienen los siguientes datos:

$$V = 110 \text{ V}$$

$$I = 0,7 \text{ A}$$

$$L = 6 \text{ m}$$

Según los datos ofrecidos en la tabla de especificaciones técnicas de conductores, el cable seleccionado es el # 16 AWG con una resistencia de 13,5 ohm km<sup>-1</sup>. Luego se procede a calcular la caída de tensión del conductor eléctrico con la ecuación 32.

### **Selección del contactor**

Para elegir el contactor, se deben considerar los siguientes factores: tensión de alimentación de la bobina, en este caso 24 V; número de activaciones de la bobina *on/off*; arco eléctrico que produce cada vez que se active en contactor; corriente que consume carga y los tipos de contactor según modelo.

Se detallan las actividades de mantenimiento que garantizarán el cuidado eficaz del sistema. La *optimización del sistema*, que se encuentra estrechamente ligada con la eficacia, que implica lograr la meta planteada al menor tiempo y con uso de la menor cantidad de recursos, con los indicadores *consumo de agua* y la *uniformidad del riego*.

A modo de resumen, los sensores utilizados conforman entre sí todos los instrumentos necesarios para llevar a cabo el monitoreo eficaz que permita controlar la cantidad de agua suministrada al cultivo. Por otra parte, el sistema de riego por goteo parcial posee uniformidad de riego óptima, comparado con otros sistemas, con un ahorro del recurso agua equivalente al 40 %, en relación con el consumo del sistema manual anterior.

## 4.5. EXPERIENCIAS DESARROLLADAS CON VARIOS CULTIVOS EN LA ESPOCH

### 4.5.1. Experiencias de estudios aplicados al cultivo de la papa

Los requerimientos hídricos de la papa varían entre 1000-1200 mm, bien distribuidos durante el ciclo del cultivo, con una mayor demanda en las etapas de germinación y crecimiento. El rendimiento disminuye considerablemente si esta deficiencia ocurre en estas etapas iniciales, por lo que es necesario efectuar riego en los períodos críticos del cultivo, cuando no ocurren precipitaciones. Las etapas finales del desarrollo del cultivo son las más susceptibles al déficit hídrico, y no toleran sequía en períodos prolongados (Olivares y Hernández, 2019).

El Ministerio de la Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca (Magap, 2006) reportó que los efectos del cambio climático ya se evidencian en Ecuador. Es el caso de la provincia de Chimborazo donde las épocas definidas de lluvia han desaparecido, siendo menor la disponibilidad de agua, lo que afecta los cultivos y provoca pérdidas en el rendimiento.

Atendiendo a lo anterior, el Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), a través del Programa de Raíces y Tubérculos Rubro Papa (PNRT Papa), y la Facultad de Recursos Naturales de la EsPOCH, escuela de Ingeniería Agronómica, iniciaron actividades en campo para la selección de genotipos con tolerancia a la sequía en la Sierra central ecuatoriana (Bonilla, 2009; Jaramillo, 2012).

Con el objetivo de evaluar los genotipos de papa (*Solanum spp.*) con características de tolerancia al déficit hídrico, se realizaron dos manejos: uno en condiciones favorables para el desarrollo del cultivo (con riego) y el segundo con un aporte hídrico reducido en el estado fenológico de floración (sin riego), a través de un sistema de riego por goteo.

Se realizó un calendario de riego con los siguientes parámetros de evaluación: contenido de humedad del suelo con tensiómetros, bloques de yeso a profundidades 0-15, 15-30 y 30-45 cm, determinado por el método gravimétrico con la ecuación propuesta por Ekanayake (1994).

El potencial mátrico se determinó por medio de tensiómetros que se colocaron en el lomo del surco, a una profundidad de 15, 30, 45 y 60 cm. La lectura se realizó por la mañana, ya que el movimiento del agua en el suelo y la planta es insignificante. La interpretación se hizo de acuerdo con el cuadro 4.1 (Ekana-yake, 1994 y Fuente, 2006).

Cuadro 4.1. Interpretación de las lecturas en centibares

Lectura Centibares	Estado	Explicación/acción
0	Saturado	Estado de saturación para cualquier tipo de suelo. Si la lectura persiste, indica problemas de drenaje fuerte y aireación pobre.
5-10	Exceso	Exceso de humedad para el desarrollo de la planta. Es indicador de que el drenaje continúa.
10-20	Capacidad de campo	Indica CC para la mayoría de los suelos. Aportaciones de agua se perderían por percolación con el consiguiente lavado de nutrientes.
20-30	Rango de inicio de riego	Buen nivel de agua disponible y aireación en suelos de textura fina y media. No se requiere riego.
30-40	Seco	Indica el riego para suelos de arena fina, y para la mayoría de los suelos bajo régimen de riego por goteo.
40-60		Indica el inicio del riego para la mayoría de los suelos. Suelos francos inician entre 40-50 cb.
70		Inicia el rango de estrés, pero es probable que aún no sufra daño el cultivo.
80		Lecturas mayores son posible, pero la columna de agua del aparato puede romper entre los 80-85 cb, dependiendo de la altura del instrumento con respecto al nivel del mar.

Fuente: Fuente, 2006

También se utilizaron bloques de yeso (sensores). Se colocaron a una profundidad de 15, 30 y 45 cm. Las lecturas se realizaron con medidor de humedad y la interpretación de las lecturas de acuerdo con el cuadro 4.2 (Delmhorst, 1999).

Cuadro 4.2. Interpretación de lecturas de los bloques de yeso

Tipo de suelo	No riego necesario	Riego para ser aplicado	Zona de peligro, insuficiente humedad del suelo
Fino	80-100 (92-10 cb)	60-80 (173-92 cb)	Bajo 60 (173 cb)
Medio	88-100 (65-10 cb)	70-88 (125-65 cb)	Bajo 70 (125 cb)
Grueso	90-100 (58-10 cb)	80-90 (92-58 cb)	Bajo 80 (92 cb)

Fuente: Delmhorst (1999). Cb=centibares

Se determinaron  $ET_c$ ,  $ET_o$ ,  $K_c$  (fórmula de Hargraves). El diseño experimental contó con un diseño de parcela dividida, parcela grande (factor riego) y las parcelas pequeñas fueron genotipos y se realizaron tres repeticiones. Se utilizaron seis genotipos de papa: G1 estela (variedad testigo tolerante), G2 natividad (variedad testigo), G3 superchola (variedad testigo susceptible), G4 \*10-10-97 (bolonax) (CHS625x *S. pausissectum*), G5 \*07-29-11 (ASO861xHSO213), G6 \*98-02-06 (INIAP gabriela x INIAP margarita). De la combinación de los factores en estudio, quedaron doce tratamientos.

Durante el período de crecimiento de los genotipos de papa, según los tipos de manejo, se presentaron cambios en función del grado de crecimiento vegetativo y la cobertura del suelo. El valor se modificó en el tiempo, creciendo con la planta hasta llegar a un máximo, y luego disminuyó. Influyeron no solo las características agronómicas de cada genotipo, sino también el factor medioambiental, las características del suelo, las prácticas agrícolas y el riego aplicado (tabla 4.7). El genotipo con mayor requerimiento hídrico durante todo el ciclo fue INIAP Estela, por debajo de los valores establecidos por la FAO de 500-700 mm.

Tabla 4.7. Duración de las fases, requerimiento hídrico y lámina de riego promedio de cada fase fenológica según manejo (con riego y sin riego)

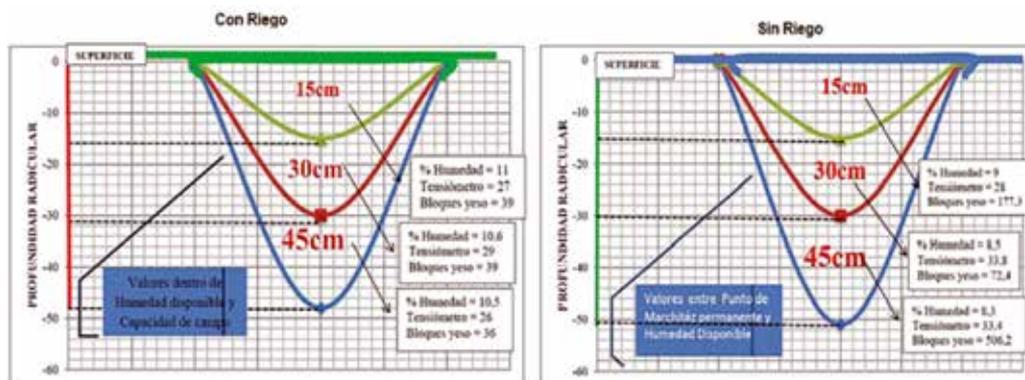
GENOTIPO	CARACTERÍSTICAS	FASE							
		Inicial		Desarrollo		Intermedia		Final	
	Tipo de cultivo	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR
Estela	Duración de la fase (días)	39	39	26	25	12	13	62	61
	Requerimiento hídrico (mm m <sup>-2</sup> )	71,7	72	82	66	38	35	225	158
	Lámina de riego (mm)	9	10	17	14	18	15	32	24
Natividad	Duración de la fase (días)	30	30	31	31	10	9	70	68
	Requerimiento hídrico (mm m <sup>-2</sup> )	44,4	48	90	78	33	23	243	174
	Lámina de riego (mm)	8	9	16	14	17	16	30	22
Superchola	Duración de la fase (días)	38	38	33	32	14	14	59	56
	Requerimiento hídrico (mm m <sup>-2</sup> )	63	68	104	85	50	28	193	143
	Lámina de riego (mm)	9	10	17	14	21	11	33	26
07-29-11	Duración de la fase (días)	41	41	37	37	19	21	43	39
	Requerimiento hídrico (mm m <sup>-2</sup> )	71	77	118	97	92	55	128	102
	Lámina de riego (mm)	10	10	18	15	26	16	35	28
98-02-06	Duración de la fase (días)	42	42	32	33	16	16	49	47
	Requerimiento hídrico (mm m <sup>-2</sup> )	74	79	101	85	68	29	167	138
	Lámina de riego (mm)	10	10	17	14	24	10	34	28
10-10-97	Duración de la fase (días)	40	40	36	36	18	18	45	42
	Requerimiento hídrico (mm m <sup>-2</sup> )	68	74	113	93	83	47	145	118
	Lámina de riego (mm)	9	10	17	14	26	14	35	28

CR: con riego, SR: sin riego

Con la aplicación de riego (fig. 4.23 A), los valores de humedad del suelo (franco arenoso), a profundidades de 0-15, 15-30 y 30-45 cm con el método gravimétrico se mantuvieron entre humedad disponible y capacidad de campo (10,5 % - 11 %), sin llegar a punto de marchitez permanente. Con tensiómetros, los valores estuvieron entre 26-29 centibares, reconocidos dentro de un rango de buen nivel de agua disponible y aireación. En el caso de los bloques de yeso, los niveles de humedad estuvieron entre 36-39 centibares, los que están en el rango adecuado (10-51 centibares) para el desarrollo del cultivo, que incide positivamente en la emergencia, crecimiento y desarrollo y, sobre todo, en un buen rendimiento de los genotipos de papa.

Sin la aplicación de riego (fig. 4.23 B), las humedades del suelo a las profundidades estudiadas mostraron valores entre 8,3-9 % con el método gravimétrico, los que se acercan al punto de marchitez permanente, lo que, de mantenerse así, impide el desarrollo normal del cultivo.

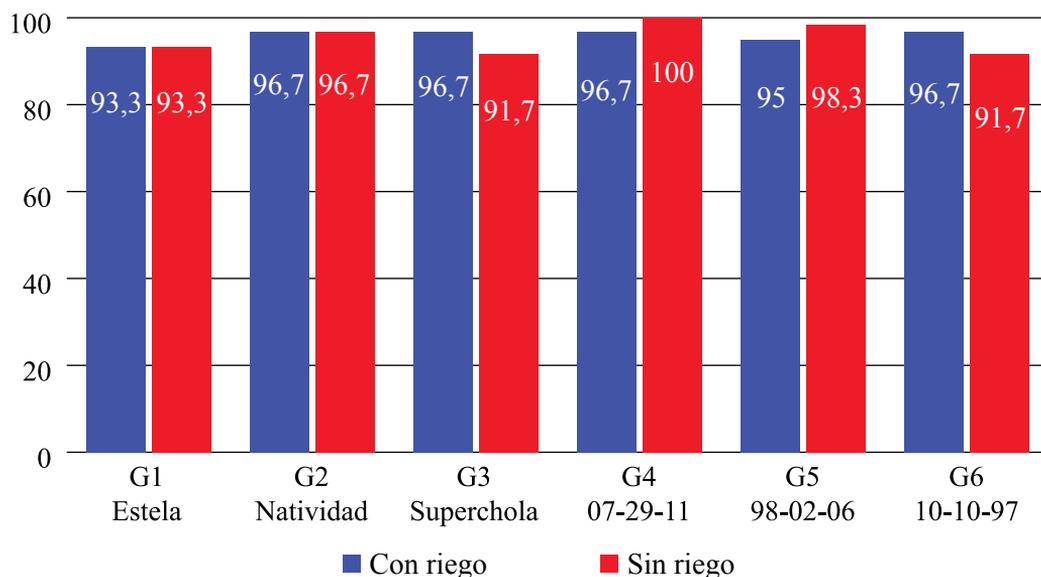
Figura 4.23. Humedad del suelo y profundidad radicular del manejo con riego (A) y sin riego (B) en Macají, provincia Chimborazo



El potencial mátrico del suelo con los tensiómetros se mantuvo en rangos de 28-33,4 centibares, que se consideran como un rango de buen nivel de agua disponible y aireación, pero propenso a necesitar el suministro de riego. Para los bloques de yeso, los niveles de humedad están fuera del rango (10-51 centibares); esto pudo estar dado porque, en la etapa de floración, se suspendió el riego por un período de veinte días (fig. 4.23 B).

El porcentaje de emergencia de los genotipos con tolerancia al déficit hídrico a los 45 DDS no mostró diferencias estadísticas significativas, porque la dotación de agua fue similar en todos los tratamientos y se utilizó semilla de buena calidad, con un promedio general de 95,56 % (fig 4.24).

Figura 4.24. Emergencia (%) de seis genotipos de papa (*Solanum spp.*) a los 45 DDS con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo

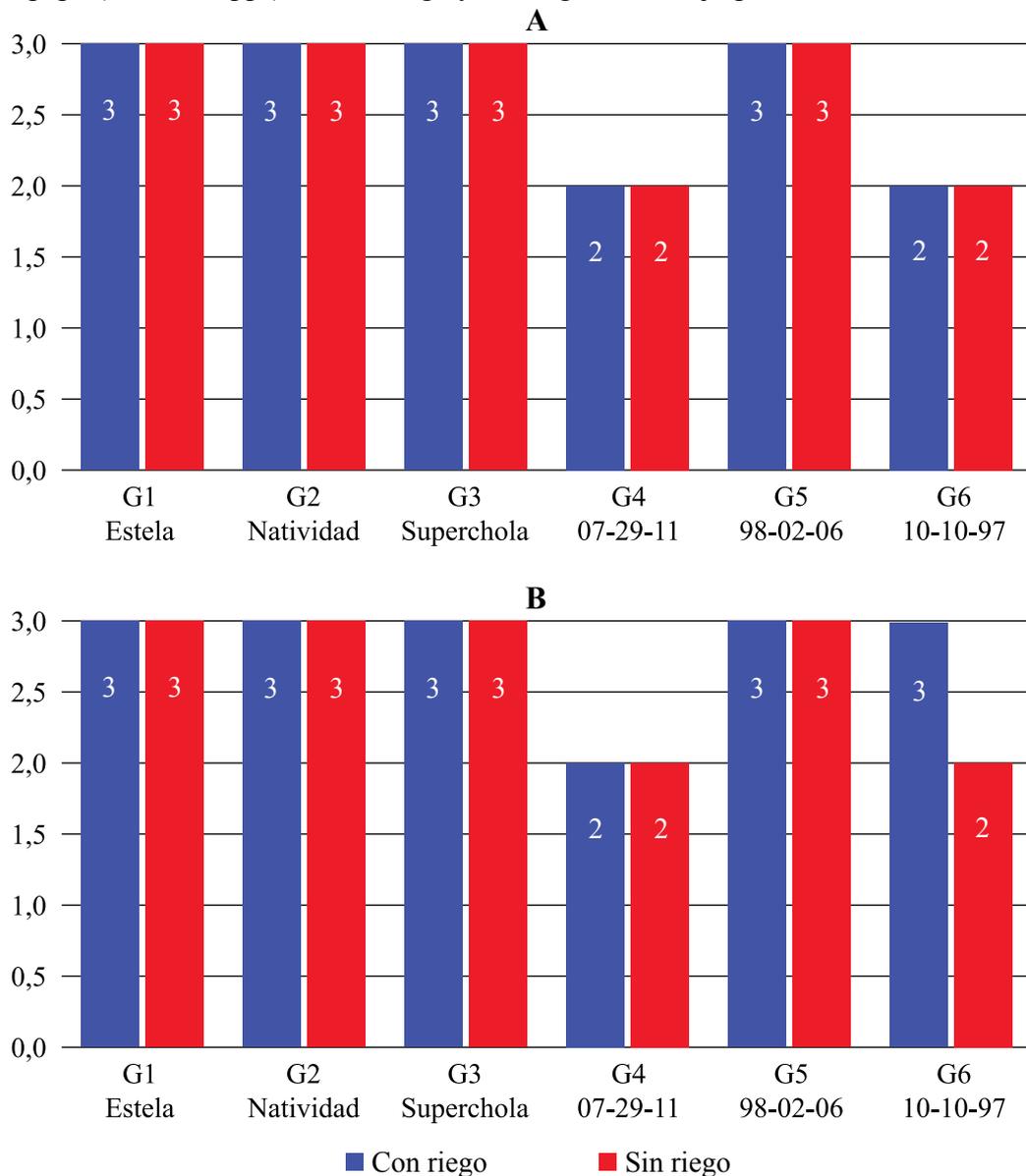


La altura de la planta a los 45 DDS señala diferencias estadísticas significativas con un promedio general de 29,9 cm. Las variedades INIAP estela, INIAP natividad, superchola y clon 98-02-06 presentaron la mayor cobertura del suelo con valores de 3, en los dos manejos (con riego y sin riego) y los demás clones con valores de 2, lo que permite asegurar que el estrés hídrico no afectó a ningún genotipo estudiado (fig. 4.25 A).

En relación con el vigor de la planta (fig. 4.25 B), las variedades INIAP estela, INIAP natividad, superchola y el clon 98-02-06, en los dos manejos en estudio, presentaron mayor vigor con calificación «vigorosa», o sea presentaron frondosidad y cubrieron el surco. Por otra parte, el clon 07-29-11, en ambos manejos, tuvo calificación «medio». El cultivar 10-10-97 sin riego presentó grado 2 «medio» atribuido a la deficiencia de agua.

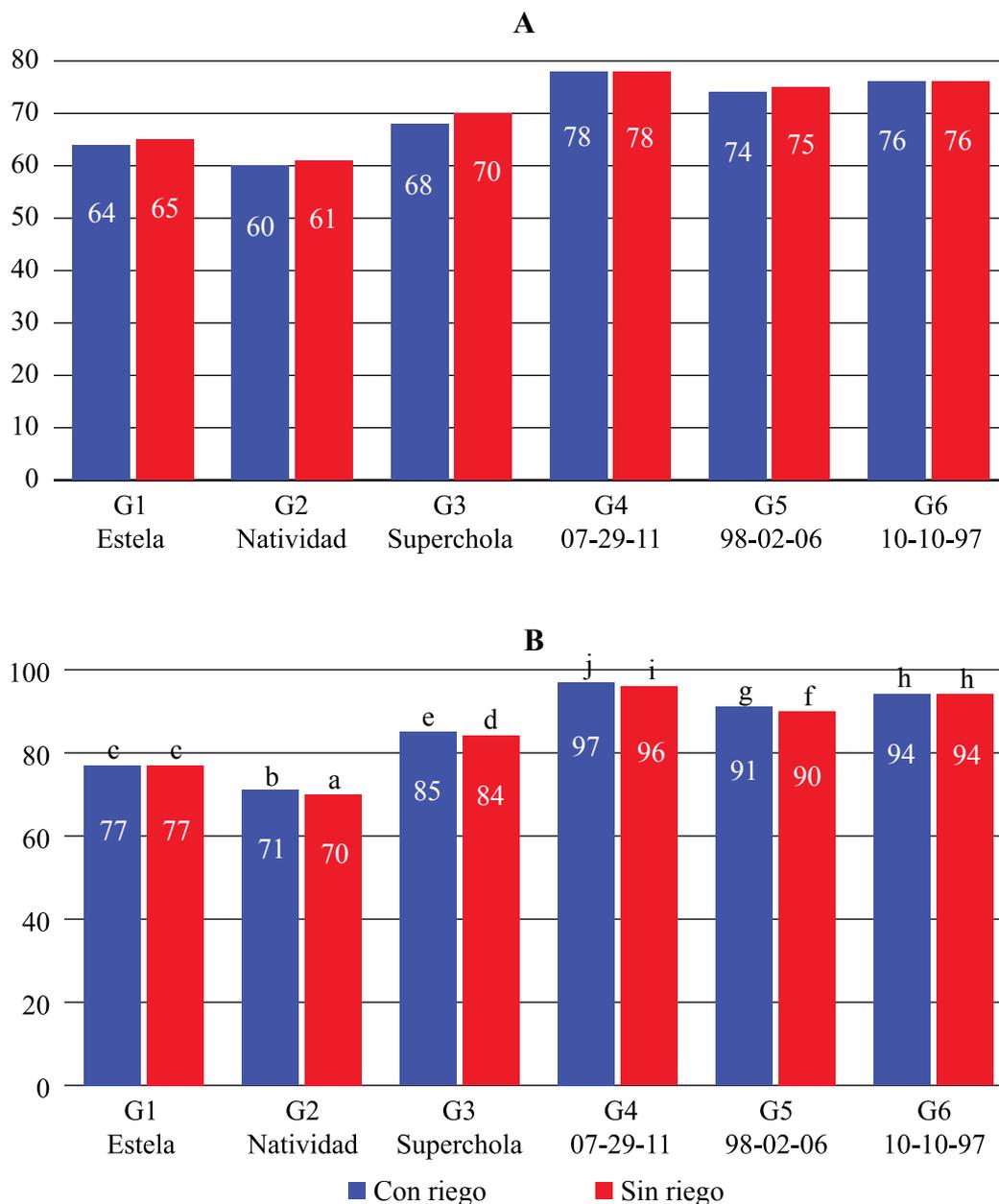
El genotipo en el manejo con riego demora entre uno y dos días más que los tratamientos sin riego en alcanzar la floración (fig. 4.26 A). La tuberización (fig. 4.27 B) mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, con

Figura 5.25. Cobertura del suelo (A) y vigor de la planta (B) de seis genotipos de papa (*Solanum spp.*) los con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo



un promedio general de ochenta y cinco días. La variedad INIAP natividad (sin riego) inició la tuberización a los setenta días y el clon 07-29-11 (con riego) llegó a la tuberización a los noventa y siete días.

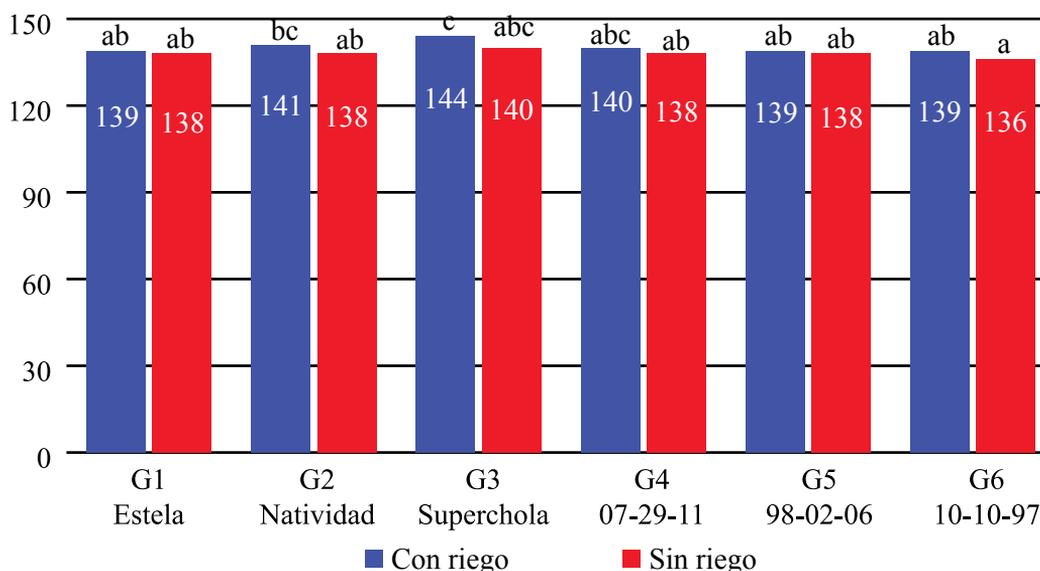
Figura 4.26. Floración (A) y tuberización en días (B) de seis genotipos de papa (*Solanum spp.*) con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

El análisis de varianza para días a la senescencia de los genotipos de papa con tolerancia al déficit hídrico establece diferencias altamente significativas para riego, genotipos y significativas para repeticiones. El promedio general fue de 139 días. El genotipo más precoz fue el clon 10-10-97 (sin riego) con 137 días. El genotipo más tardío fue la variedad Superchola (fig. 4.27)

Figura 4.27. Promedio de senescencia en días de seis genotipos de papa (*Solanum spp.*) con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

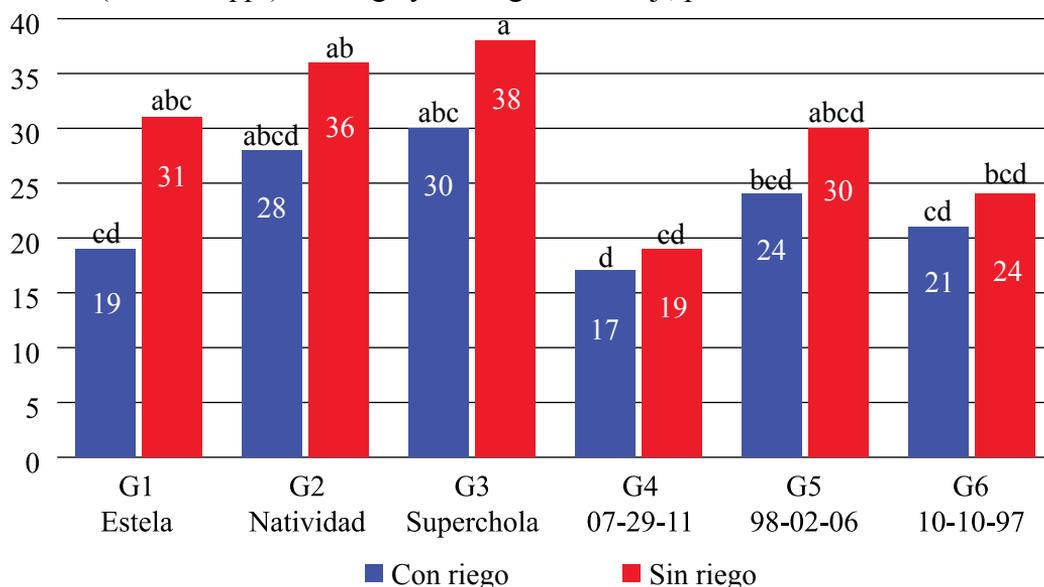
La variedad Superchola (con riego) presentó el mayor contenido relativo de agua; en cambio, el clon 07-29-11 (sin riego) presentó el menor contenido (tabla 4.8).

En relación con el número de tubérculo por plantas, la variedad superchola (sin riego) fue superior; en cambio el clon 07-29-11 (con riego) tuvo el menor número (fig. 4.28).

Tabla 4.8. Contenido relativo de agua (%) de seis genotipos de papa (*Solanum spp.*) a los 45 DDS con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo

Riego	Genotipos	Medias (Spad)		
		Antes del déficit hídrico	Déficit	Recuperación
CR	INIAP estela	78,53 ab	81,00 ab	80,23 a
CR	INIAP natividad	80,80 ab	83,83 a	82,57 a
CR	Superchola	83,83 a	85,00 a	81,97 a
CR	07-29-11	79,60 ab	81,23 ab	77,33 a
CR	98-02-06	77,93 ab	76,57 abc	77,10 a
CR	10-10-97	72,90 ab	71,17 abcd	70,03 <sup>a</sup>
SR	INIAP estela	79,17 ab	74,57 abcd	78,87 a
SR	INIAP natividad	80,53 ab	75,63 abcd	79,07 a
SR	Superchola	77,50 ab	71,63 abcd	79,50 a
SR	07-29-11	65,57 b	62,17 d	76,33 a
SR	98-02-06	72,33 ab	68,03 bcd	77,63 a
SR	10-10-97	69,20 ab	63,13 cd	71,73 a

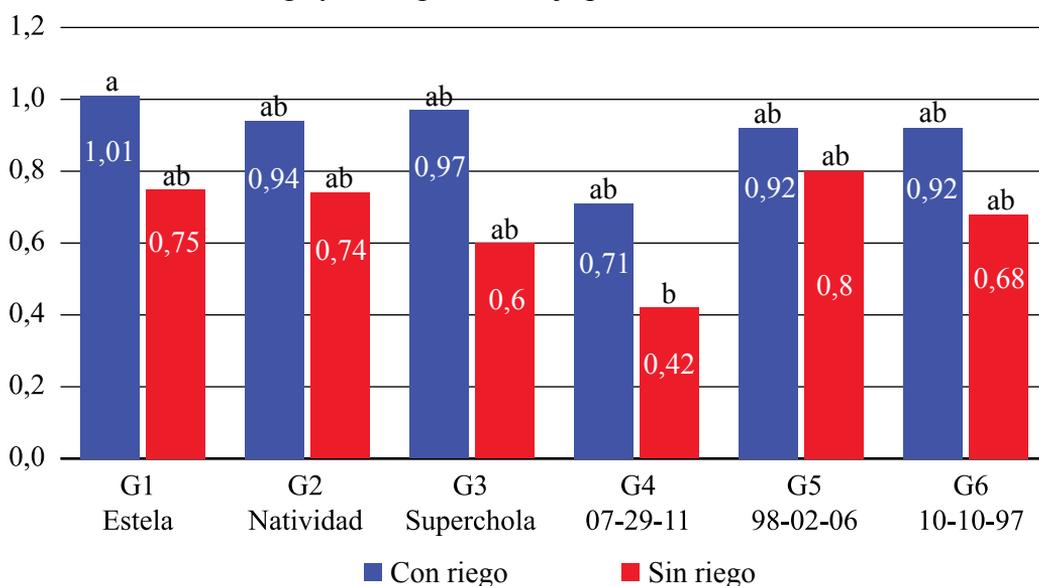
Figura 4.28. Promedio de tubérculos por planta de seis genotipos de papa (*Solanum spp.*) con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

El genotipo con mayor rendimiento por planta (kg/planta) fue INIAP estela (con riego) con una media de 1,03 kg. Por el contrario, el clon 07-29-11 (sin riego) presentó el menor rendimiento con 0,43 kg (fig. 4,29).

Figura 4.29. Rendimiento por planta de seis genotipos de papa (*Solanum spp.*) con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

Para el rendimiento de papa en categoría «comercial», hubo diferencias altamente significativas para el factor riego y significativas para genotipos, el promedio general fue 1,83 kg. En esta categoría, el clon 10-10-97 (con riego) tuvo el mayor rendimiento y la variedad superchola (sin riego) tuvo el más bajo (tabla 4.9).

Tabla 4.9. Rendimiento por tamaño del tubérculo de seis genotipos de papa (*Solanum spp.*) con riego y sin riego en Macají, provincia Chimborazo

Riego	Genotipos	Medias (Spad)		
		Comercial	Semilla	No Comercial
CR	INIAP estela	2,83 ab	8,40 abc	a,53 ab
CR	INIAP natividad	2,70 ab	8,47 abc	2,80 ab
CR	Superchola	1,30 bc	10,47 a	2,87 ab
CR	07-29-11	3,03 ab	6,93 abcd	1,43 b
CR	98-02-06	2,47 abc	8,87ab	2,47 ab
CR	10-10-97	4,43 a	6,73 abcd	2,27 ab
SR	INIAP estela	1,13 bc	6,63 abcd	3,97 a
SR	INIAP natividad	0,57 bc	5,90 bcd	4,67 a
SR	Superchola	0,00 c	4,60 cd	4,73 a
SR	07-29-11	1,13 bc	4,07 d	1,40 b
SR	98-02-06	1,50 bc	6,50 abcd	3,37 ab
SR	10-10-97	0,90 bc	5,67 bcd	3,93 a

Para categoría «semilla», existieron diferencias altamente significativas para el factor riego, con un promedio general 6,54 kg. La variedad superchola (con riego) presentó el mayor rendimiento y el clon 07-29-11 (sin riego), el menor.

La categoría «no comercial» manifestó diferencias altamente significativas para riego y genotipos, con un promedio general de 3,04 kg (tabla 4.9). Los genotipos superchola, INIAP natividad, INIAP estela y el clon 10-10-97 (sin riego) presentaron el mayor rendimiento. Por el contrario, en el manejo (con riego), estos genotipos alcanzaron menores rendimientos.

A manera de conclusión, se puede plantear que los genotipos con mayor tolerancia al déficit hídrico fueron INIAP estela, clon 98-02-06, INIAP natividad y el clon 10-10-97. Por otra parte, se reconoce que el rendimiento categoría *comercial* es un indicador relevante para determinar la tolerancia al déficit hídrico.

#### 4.5.2. EXPERIENCIA DE ESTUDIO APLICADA AL CULTIVO DE BRÓCOLI

Es un cultivo originario del mediterráneo y Asia menor, pertenece a la familia *Brassicaceae*. En Italia, Libia y Siria se recolectaron los primeros ejemplares de esta planta, proveniente de las coles y coliflores. Es cultivo se asienta en zonas templadas (Sagarpa, 2011) y, en Ecuador, se cultiva en varias zonas de la Sierra.

Las zonas adecuadas para este cultivo se caracterizan por ser húmedas y montañosas, con clima templado y frío, con alturas entre los 2700 y 3200 m.s.n.m., por lo que la región andina del país se convierte en ideal para su cultivo (Zambrano, 2012).

Ecuador figura entre los diez primeros países exportadores de brócoli congelado. La distribución por provincias en la exportación es la siguiente: Pichincha (8,5 %), Cotopaxi (83 %), Tungurahua (3,5 %), Chimborazo (5 %); mientras que el mercado local está constituido por: Pichincha (25 %), Cotopaxi (20 %), Tungurahua (20 %), Chimborazo (30 %).

El brócoli es la segunda alternativa de exportación de la Sierra ecuatoriana. Su producción ha mostrado un alto dinamismo en los últimos años, ya que esta actividad genera mucha mano de obra y aporta a la generación de divisas.

#### Requerimientos hídricos

El agua es un factor limitante en el cultivo de brócoli, ya que es necesario un aporte por riego para su correcto desarrollo (Risco et al., 2018). Según Haro y Maldonado (2009), existe poca información sobre las necesidades de agua para el brócoli en el país; sin embargo, se ha establecido que su cultivo entre los 2700 y 3200 m.s.n.m. requiere de 500 mm de agua, dosificada de 3,5 a 5 mm día<sup>-1</sup>.

Para alcanzar altos rendimientos y calidad de las inflorescencias, la planta no debe sufrir estrés hídrico, ya sea por déficit o exceso de agua y/o calidad de esta. El consumo total por el cultivo es de 400 m<sup>3</sup> de agua ha<sup>-1</sup> (Vallejo, 2013). En el caso de riego por gravedad, la lámina disponible será cuando se haya abatido entre el 40 % y el 60 % de la humedad disponible del suelo y, en el riego por goteo, cuando se haya abatido del 15 % al 20 % (González, 2010).

La importancia del agua de riego en la producción de brócoli está ampliamente documentada y se han descrito pautas para su manejo en diferentes países como Botswana (Imtiyaz et al., 2000), Alemania (Gutezeit, 2004), España (López et al., 2009), Turquía (Erdem et al., 2010) y Estados Unidos (Johnson et al., 2016). Risco et al. (2018) consideran que no se dispone de información suficiente acerca de las estrategias de riego para este cultivo en las condiciones edafoclimáticas de la Sierra ecuatoriana.

El estudio fue realizado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Espoch), campus Macají de la provincia Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales en el Centro Experimental de Riego (CER), Ecuador (1°39'18,82"S, 78°40'39,39"W, 2821 m.s.n.m.). El suelo tiene baja materia orgánica (1,20 %), pH ligeramente alcalino (7,70), textura franco arenoso, capacidad de campo 14 %, densidad aparente 1,55g cm<sup>-3</sup> y punto de marchitez permanente 5 %.

Se usaron plántulas de brócoli variedad avenger (AV) de grano fino y domador (DOM) de grano fino y mediano, y láminas de riego, según los siguientes tratamientos.

El diseño experimental fue factorial constituido por dos factores (dosis de riego e híbridos) con seis tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos consistieron en tres niveles de reposición del tanque evaporímetro (50 % (R50), 100 % (R100) y 150 % (R150) de la evaporación del tanque clase A, para facilitar la aplicación práctica (cuadro 4.3). Se realizó el cálculo semanal de las dosis de riego en función de la evaporación. El  $K_c$  fue de 0,7 en la etapa inicial de crecimiento, de 0,7 a 1,05 durante el desarrollo vegetativo hasta alcanzar cobertura completa, y de 1,05 a 0,95 en la fase de emergencia de la pella.

Cuadro 4.3. Tratamientos y descripción

Tratamientos	Métodos	Descripción
T1	Método 1	lámina de riego determinada por lisímetro
T2	Método 2	lámina de riego determinada por cálculo empírico
T3	Método 3	lámina de riego determinada por el cálculo de la evapotranspiración de referencia mediante el tanque evaporímetro

Se evaluaron las siguientes variables en diez plantas: altura de la planta, número de hojas, aparición de la pella, diámetro ecuatorial de la pella, peso de la pella, días inicio de la cosecha, materia seca, rendimiento (por categorías y  $\text{kg ha}^{-1}$ ), huella hídrica.

La instalación y operación del lisímetro se efectuó respetando las consideraciones para su uso, en relación con el borde y la colocación de las capas. Se empleó la relación matemática dada por Garay (2009) para el cálculo del volumen de agua ( $V_a$ ) que se debe aplicar en el lisímetro.

Inicialmente, en la ecuación, se consideró la  $ET_o$ . Posteriormente fue reemplazada por el valor de la  $ET_c$  determinado por el lisímetro. El valor de la  $ET_c$  correspondió al método 1 (T1), la lectura y el registro se realizó en veinticuatro horas. La frecuencia de riego estuvo dada por el período en que cesó el drenaje del lisímetro.

Los datos de la evaporación se tomaron diariamente mediante la utilización del tanque evaporímetro tipo A y el dato pluviométrico. El método 2 (T2) corresponde a las láminas que fueron determinadas mediante el cálculo de forma empírica de la  $ET_c$  ( $ET_cE$ ).

Los datos de HR, velocidad del viento y barlovento, interpolados permitieron la obtención del  $K_p$  y posteriormente el cálculo de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ), se registraron diariamente y de manera automática en períodos de una hora. El valor de  $ET_o$  correspondió al método 3 (T3), en que las láminas de riego estuvieron en función de la  $ET_o$ . La reposición hídrica se realizó cuando se consumió el 20 % de la humedad aprovechable (González, 2010).

## Resultados

Hubo un incremento de la precipitación durante el ciclo del cultivo, inicialmente con 9,66 mm en mayo, 15,12 mm para junio y 18,60 mm para el mes de julio. Así, resultó una precipitación efectiva de 43,38 mm, considerada baja y que no supe los requerimientos hídricos del cultivo. Según Haro y Maldonado (2009), este cultivo, a 2700-3000 m.s.n.m, requiere 500 mm de agua dosificado de 3,5 a 5 mm  $\text{día}^{-1}$  por lo que se debe recurrir al riego.

La humedad relativa promedio en el mes de julio fue de 68,45 %, de 70,39 % para mayo, y disminuyó en junio con un valor de 65,83 %.

Las etapas fenológicas del ciclo comercial del cultivo se identificaron según metodología descrita por Díaz y Jaramillo (2006). La etapa inicial está comprendida desde el trasplante hasta la formación de cuatro hojas verdaderas. La etapa de desarrollo, desde el fin de la etapa inicial hasta la aparición de la pella. La etapa intermedia comprende desde la aparición de la pella hasta el inicio de la cosecha y la etapa final desde el inicio de la cosecha hasta el final de esta (tabla 4.10).

Tabla 4.10. Duración de las etapas del ciclo comercial del cultivo de brócoli (*Brassica oleracea* L. var. Avenger) bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015

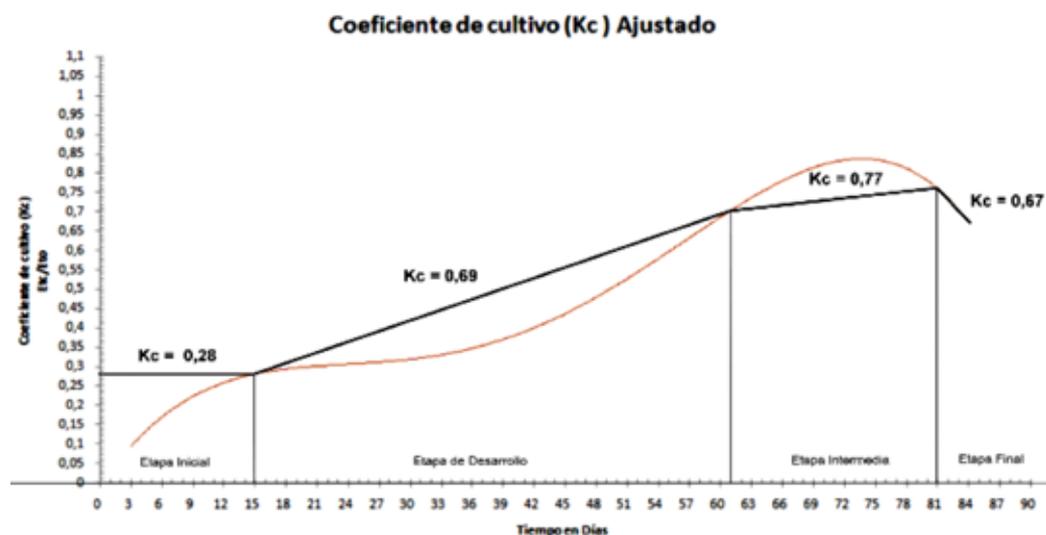
Tratamientos	Fase inicial	Fase desarrollo	Fase intermedia	Fase final	Total
T1	15	46	20	10	91
T2	15	53	21	12	101
T3	15	50	22	10	97

Las etapas fenológicas no difieren en gran medida de los estudios realizados por Díaz y Jaramillo (2006) y Apaella y Huachos (2008), solo con diferencias para la etapa de desarrollo, cuando se reporta por los autores una duración de cuarenta y cuarenta y seis días respectivamente. La duración final del ciclo del cultivo fue de 91, 101 y 97 días por tratamientos, lo que pudo estar dado por una sobreoferta de agua que provoca un letargo en la duración de las etapas (Allen et al., 2006), con un aporte de 142,3, 174,1 y 246,3 mm de agua por tratamientos, respectivamente. Autores como López et al. (2009), en España para este cultivo aplicaron 249 mm de agua de riego. Johnson et al. (2016), en campos comerciales en Estados Unidos calcularon un promedio de 600 mm de agua aplicada.

Mediante la fórmula de Hargraves, se determinó el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) ajustado por etapa fenológica del ciclo comercial de brócoli (fig. 4.30). En la etapa inicial (primeros quince días), los valores de  $K_c$  oscilan entre 0,19 y 0,37, con un valor promedio durante este período de 0,19. El cultivo cuenta con 4,78 hojas y cobertura del suelo es reducida. El valor ajustado de  $K_c$  es 0,28.

En la etapa de desarrollo, se incrementa el consumo de agua. Los valores de  $K_c$  ascienden desde 0,11 a 0,83, con un promedio de 0,42. Se determina un valor ajustado de  $K_c$  de 0,69. Para la etapa intermedia, existe un mayor consumo de agua con valores de  $K_c$  entre 0,47 y 1,25, con un valor de  $K_c$  ajustado de 0,77. Los valores de  $K_c$  disminuyen en la etapa final, a entre 0,5 y 0,74 y, de acuerdo a la gráfica, con un modelo polinómico, se determina un valor ajustado de 0,67.

Figura 4.30. Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) ajustado de brócoli para tratamiento 1 bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, provincia Chimborazo, 2015



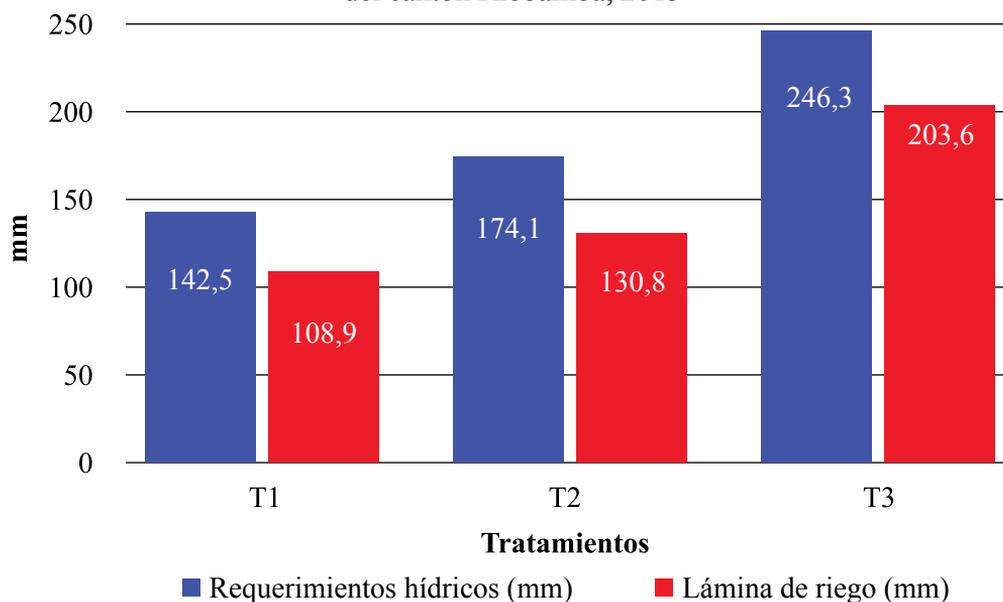
En la tabla 4.11, se muestran los requerimientos hídricos y láminas de riego aplicadas al cultivo por etapa fenológica.

Tabla 4.11. Requerimientos hídricos y lámina de riego aplicada en las etapas fenológicas del cultivo brócoli

Tratamientos	Requerimientos hídricos (mm)				Lámina de riego (mm)			
	Fase inicial	Fase desarrollo	Fase intermedia	Fase final	Fase inicial	Fase desarrollo	Fase intermedia	Fase final
T1	9,8	77,3	49,5	5,9	7,1	55,3	40,6	5,9
T2	14,9	139	20,2	0	12,1	113	5,7	0
T3	43,3	144,2	58,8	0	40,4	119,5	43,7	0

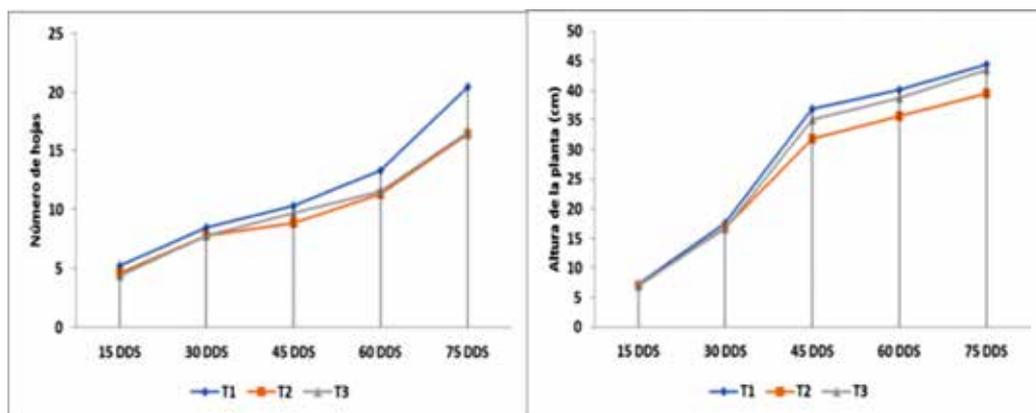
Los requerimientos hídricos y láminas de riego total aplicadas en el ciclo comercial del cultivo de brócoli se muestran en la figura 4.31, en que el tratamiento 3 (tanque evaporímetro) tuvo los mayores volúmenes de agua. Se obtuvo un abatimiento promedio para T1 de 40 % a 50 % de la humedad disponible, mientras que, para T2 y T3, se aplicó un abatimiento de 20 %.

Figura 4.31. Requerimientos hídricos y lámina de riego aplicadas en el ciclo comercial del cultivo de brócoli bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015



El mayor número de hojas y altura de la planta se obtuvo con el tratamiento 1 en todos los períodos evaluados (fig. 4.32). A los quince y treinta días no existieron diferencias entre los tratamientos, dado el poco desarrollo radicular y, en general, del cultivo.

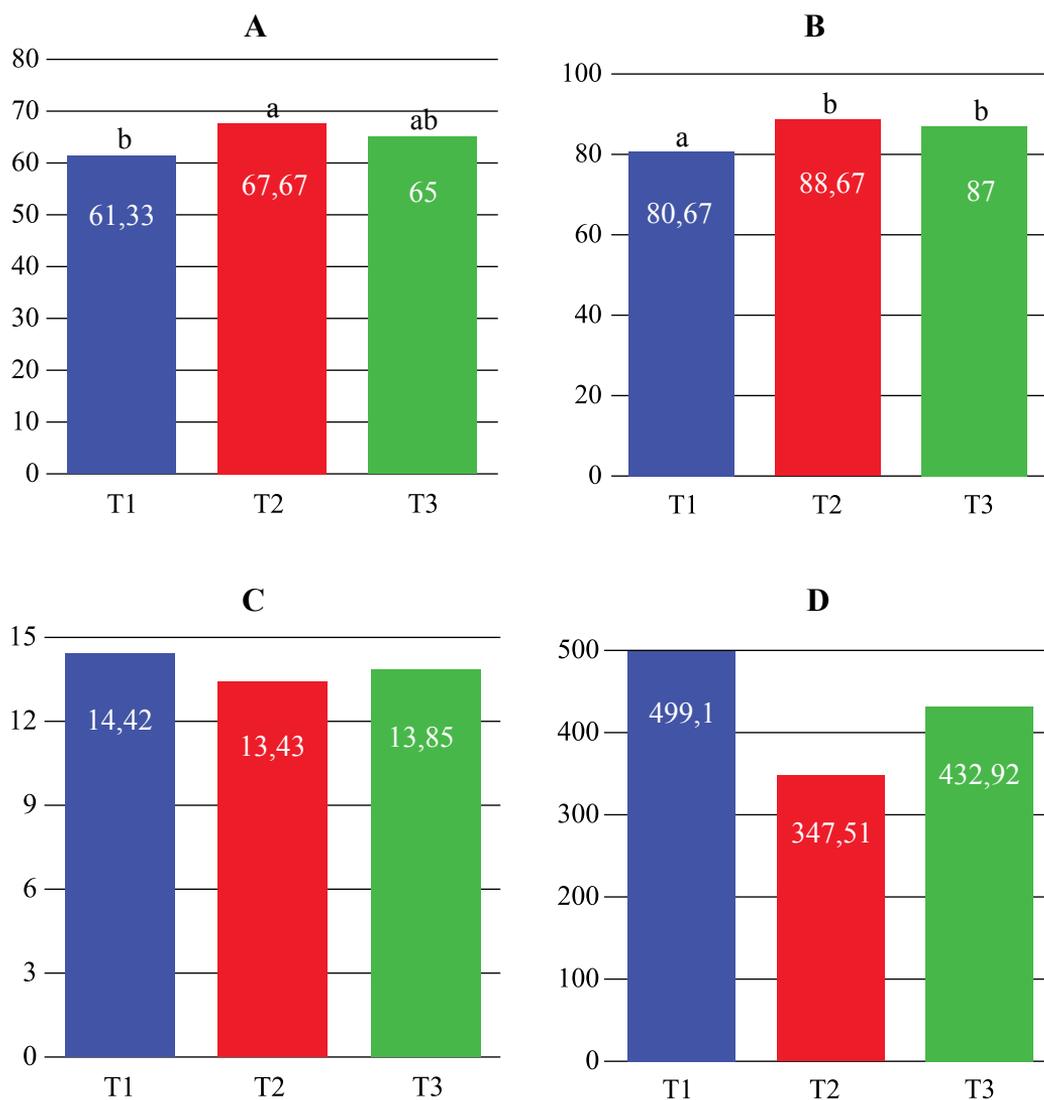
Figura 4.32. Número de hojas (A) y altura de la planta (B) del cultivo de brócoli bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015



Entre los cuarenta y cinco y sesenta días, no existen diferencias en la altura de la planta, resultado que se afectó por un daño mecánico causado por un aporque muy alto seguido de un riego que disminuyó el crecimiento y no por la aplicación de los tratamientos. A los setenta y cinco días, el T1 y T3 recibieron mayor cantidad de agua respecto al T2, por lo que existe incidencia en este parámetro.

En relación con los parámetros de recolección, se observaron diferencias entre los tratamientos aplicados. Al momento de la aparición de la pella, existió un requerimiento de 87,2; 154 y 187,5 mm para los tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente (figura 4.33 A). El promedio de los días de aparición fue de 64,65 DDT, con diferencias estadísticas altamente significativas entre el T1 y T2.

Figura 4.33. Días de aparición de la pella (A), días de inicio de la cosecha (B), diámetro de la pella (C) y peso de la pella (D) del cultivo de brócoli bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015



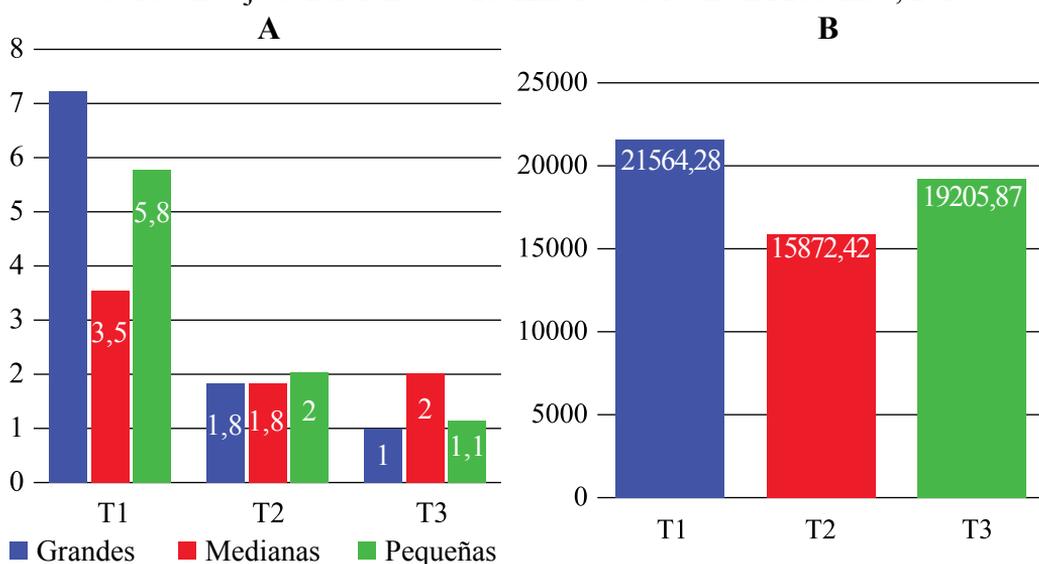
Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

Para el parámetro días de inicio de la cosecha (fig. 4.33 B), el promedio fue de 85,45 DDT, con diferencias estadísticas altamente significativas entre el T1 y el resto. Al inicio de la cosecha, el requerimiento hídrico se comportó con 136,7; 174,1 y 246,3 mm para los tratamientos (T1, T2 y T3), respectivamente, lo que pudo provocar las diferencias, porque, bajo condiciones de sobre oferta de agua, se provoca un letargo en la duración de las etapas.

Los parámetros diámetro de la pella y peso de la pella (figura 4.33 C y D) tuvieron similar tendencia en los tres tratamientos, lo que indica que las láminas aplicadas no produjeron cambios en dicho órgano, con un promedio de 13,90 cm y 426,18 g, respectivamente.

Al realizar la categorización de las pellas (fig. 4.34 A), en el tratamiento 1, el rendimiento de las pellas grandes representa un 71,84 % del total, mientras que las pellas medianas y pequeñas representan el 18,21 % y 9,85 % respectivamente. Para el tratamiento 2, las pellas grandes representan el 47,97 %, las medianas, 24,73 % y las pequeñas un 27,30 % del rendimiento total. En el Ttratamiento 3, las pellas grandes representan 64,58 % del rendimiento total, las medianas y pequeñas, el 22,57 % y 12,85 %, respectivamente. De esta manera, en la categoría de pellas grandes sobresale el T1 y en las medianas el T2, todo ello influenciado por la aplicación de los tratamientos.

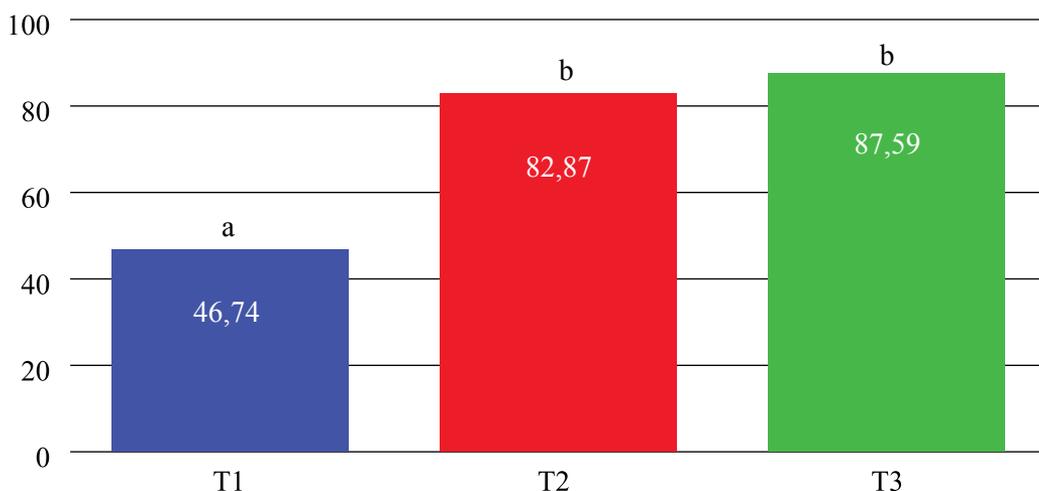
Figura 4.34. Rendimiento en kilogramos (A) y kilogramos por ha. (B) del cultivo de brócoli bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015



La diferencia numérica a favor del T1 y T2 dentro de los componentes del rendimiento se debe a que no se disminuyó el riego durante el período de formación y desarrollo de la pella (figura 4.34 B). Comparando los rendimientos obtenidos con los estimados por Magap (2012), indica que la provincia Chimborazo presenta un rendimiento de 11 090 kg ha<sup>-1</sup>. Los tres tratamientos en estudio superan dicho rendimiento, pero este es inferior al reportado para la provincia Cotopaxi (2 8220 kg ha<sup>-1</sup>).

Según los resultados (figura 4.35), de las tres metodologías utilizadas para determinar los requerimientos hídricos de *B. oleracea* var. Avenger, el T2 y T3 sobreestiman dichos requerimientos, ya que, para producir una tonelada de pellas de brócoli para estos tratamientos, se requieren de 82,87 m<sup>3</sup> y 87,59 m<sup>3</sup>, respectivamente; mientras que para el T1 se requiere de 46,75 m<sup>3</sup>.

Figura 4.35. Huella hídrica del cultivo de brócoli (m<sup>3</sup> T<sup>-1</sup>) bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

De las tres metodologías utilizadas para determinar los requerimientos hídricos del cultivo de brócoli, el tratamiento con las fórmulas FAO (T2) y tanque evaporímetro (T3) sobreestiman dichos requerimientos en 43,58 % y 46,61 %, para producir una tonelada de pellas, por encima del tratamiento con uso de lisímetro (T1).

Aunque el T1 recibió 21,40 % y 60,6 % menos agua con respecto al T2 y T3, esto no se tradujo en diferencias estadísticas en el rendimiento, lo que es interesante desde el punto de vista de eficiencia en la aplicación de agua.

El mayor beneficio neto lo obtuvo el T1 con USD 3773,12 y una relación costo beneficio de 1,25 expresado en términos de rentabilidad de 25 %.

A manera de resumen, al no existir diferencias estadísticas en el rendimiento por la aplicación de los tratamientos, se determina que, bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) de brócoli es de 142,5 mm. Con la utilización de los lisímetros el cultivo, necesita menos agua para obtener mayor rendimiento.

### 4.5.3. Experiencia de estudio aplicado al cultivo de cebolla

La cebolla de bulbo ocupa el cuarto lugar en producción mundial de hortalizas, ya que alcanzó una producción de 84 millones de toneladas en 2013 (FAO, 2016), lo que resalta la importancia de este cultivo escala mundial.

Debido al sistema radicular superficial, la cebolla de bulbo requiere de un suministro de riego en el momento y con la intensidad adecuada para favorecer la absorción de agua y nutrientes y obtener altos rendimientos (Álvarez et al., 2017).

Se utilizó la variedad burguesa con el método de riego por lisimetría, con un diseño de bloques completamente al azar, con tres tratamientos y tres repeticiones. Las láminas de riego fueron aplicadas sobre la base del balance hídrico del lisímetro de drenaje (método de lisimetría). Tratamiento 1, constituido por la reposición de la lámina de riego al abatir 25 % de agua útil del suelo (T1); la reposición de la lámina de riego al abatir 50 % de agua útil del suelo (T2); y la reposición de la lámina de riego al abatir 75 % de agua útil del suelo (T3) consumida de la zona radicular, a partir de tensiómetros ubicados a 15 cm y 30 cm de profundidad.

Se determinaron  $ET_o$ ,  $ET_c$ ,  $K_c$  (Garay, 2009) y la huella hídrica. Se calculó el porcentaje de prendimiento a los quince días, altura de la planta, número de hojas y diámetro del pseudotallo a los treinta, sesenta y noventa días después del trasplante. Después de la cosecha, se determinó el diámetro polar y ecuatorial de la cebolla, peso del bulbo y rendimiento  $kg\ ha^{-1}$ .

Se determinaron cuatro estados fenológicos: formación de nuevas hojas, crecimiento y desarrollo vegetativo, bulbificación y maduración. En cada etapa, se evidenciaron cambios en variables estudiadas desde el momento del trasplante hasta la cosecha (tabla 4.12).

Tabla 4.12. Duración de los estados fenológicos en la cebolla colorada (*Allium cepa* L.) variedad burguesa con riego por método de lisimetría

Tratamientos	Fase inicial	Fase desarrollo	Fase intermedia	Fase final	Total
T1 (25 %)	17	46	52	35	150
T2 (50 %)	17	45	49	32	143
T3 (75 %)	17	50	46	28	135

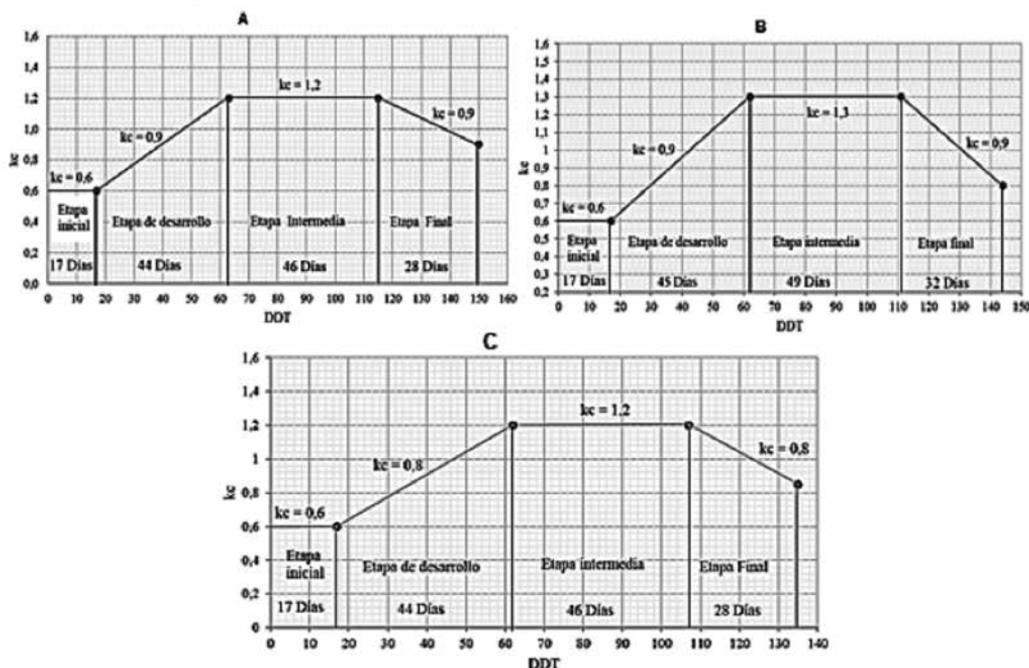
El comportamiento de las etapas fenológicas se acerca a lo señalado por la FAO 56 (Allen et al., 2006), en que se manifiesta que la etapa inicial puede estar alrededor de los dieciséis días; la de desarrollo, de treinta y cinco días; la intermedia, de cuarenta y nueve días, y, en la final, Vásquez (2008) y Cely (2010) la sitúan en treinta y cuatro días. El ciclo total tuvo una duración acorde con Allen et al. (2006). Las diferencias pueden estar dadas por las láminas de riego aplicadas en cada tratamiento, además del clima, la genética y su manejo, factores que poseen una incidencia directa en la duración de las etapas fenológicas del cultivo, los que son propias de cada localidad (Allen et al., 2006).

### Coefficiente del cultivo ( $K_c$ ) ajustado para cebolla colorada (*Allium cepa* L.) var. burguesa

Los valores de  $K_c$  iniciales fueron de 0,6 para los tres tratamientos, debido a que no influyó la cantidad de agua aplicada. En esta etapa, existe similitud en la altura de la planta, área foliar y cobertura del suelo, y la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación del suelo. En la etapa de desarrollo, el coeficiente del cultivo fue de 0,9 (T1 y T2) y 0,8 (T3), con diferencias entre los tratamientos, debido a diferentes láminas y frecuencias de riego aplicadas (fig. 4.36).

En la etapa intermedia, el coeficiente de cultivo para T1 y T3 fue de 1,2 y, para el T2, uno mayor de 1,3. En esta etapa, el  $K_c$  alcanza su valor máximo y relativamente constante para la mayoría de los cultivos. Para la etapa final, se tuvieron los valores siguientes: T1 y T2,  $K_c = 0,9$ ; y T3,  $K_c = 0,8$ , menores que en las etapas de desarrollo e intermedia, lo que puede estar dado por la senescencia de las plantas y la reducción del número de riegos.

Figura 4.36. Coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) por etapa fenológica del ciclo del cultivo de cebolla colorada por método lisimetría. A: 25 %, B: 50 % y C: 75 % de abatimiento de la humedad del suelo



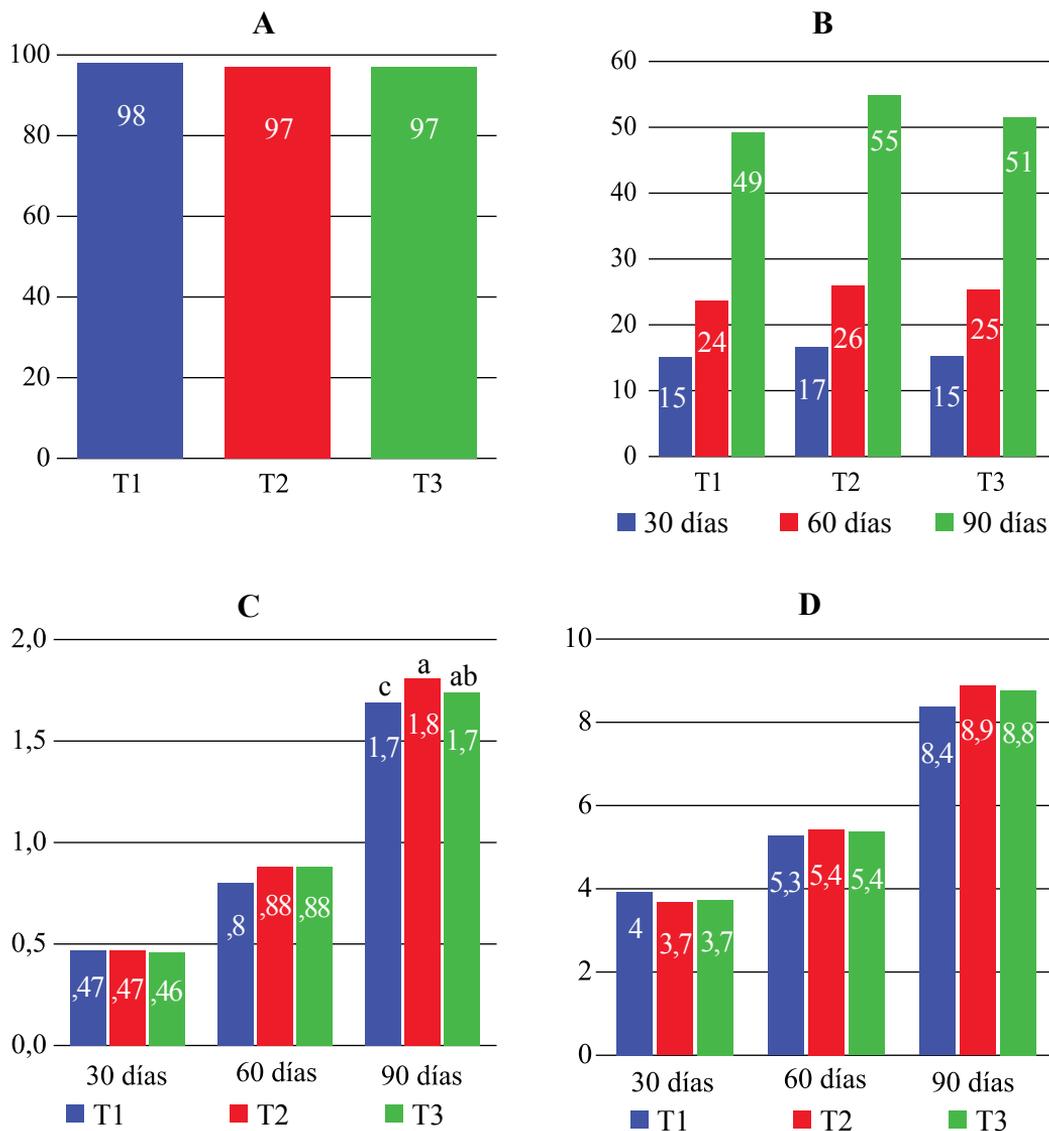
Es necesario señalar que los datos que aporta la bibliografía sobre  $K_c$  recogen todo el ciclo del cultivo, comenzando desde la siembra, y esta investigación se inició en el momento del trasplante. Por otra parte, las etapas del cultivo no se corresponden para todas las latitudes (Allen et al., 2006), los  $K_c$  y escalas de fenología que sugieren son útiles como una guía general y para propósitos comparativos, por lo que debe buscarse información local.

Con el análisis de varianza, se determinó que la variable prendimiento a los quince días no presentó diferencias significativas entre los tratamientos (fig. 4.37 A). De igual manera, en la altura de la planta a los treinta y sesenta días después del trasplante (DDT) (fig. 4.37 B), el número de hojas a los treinta, sesenta y noventa DDT y el diámetro del pseudotallo a los treinta y sesenta DDT (fig. 4.37 C).

Solo se presentaron diferencias estadísticas significativas a los noventa DDT para el diámetro del pseudotallo, cuando los tratamientos 2 y 3, superaron al T1 (fig. 4.37 D).

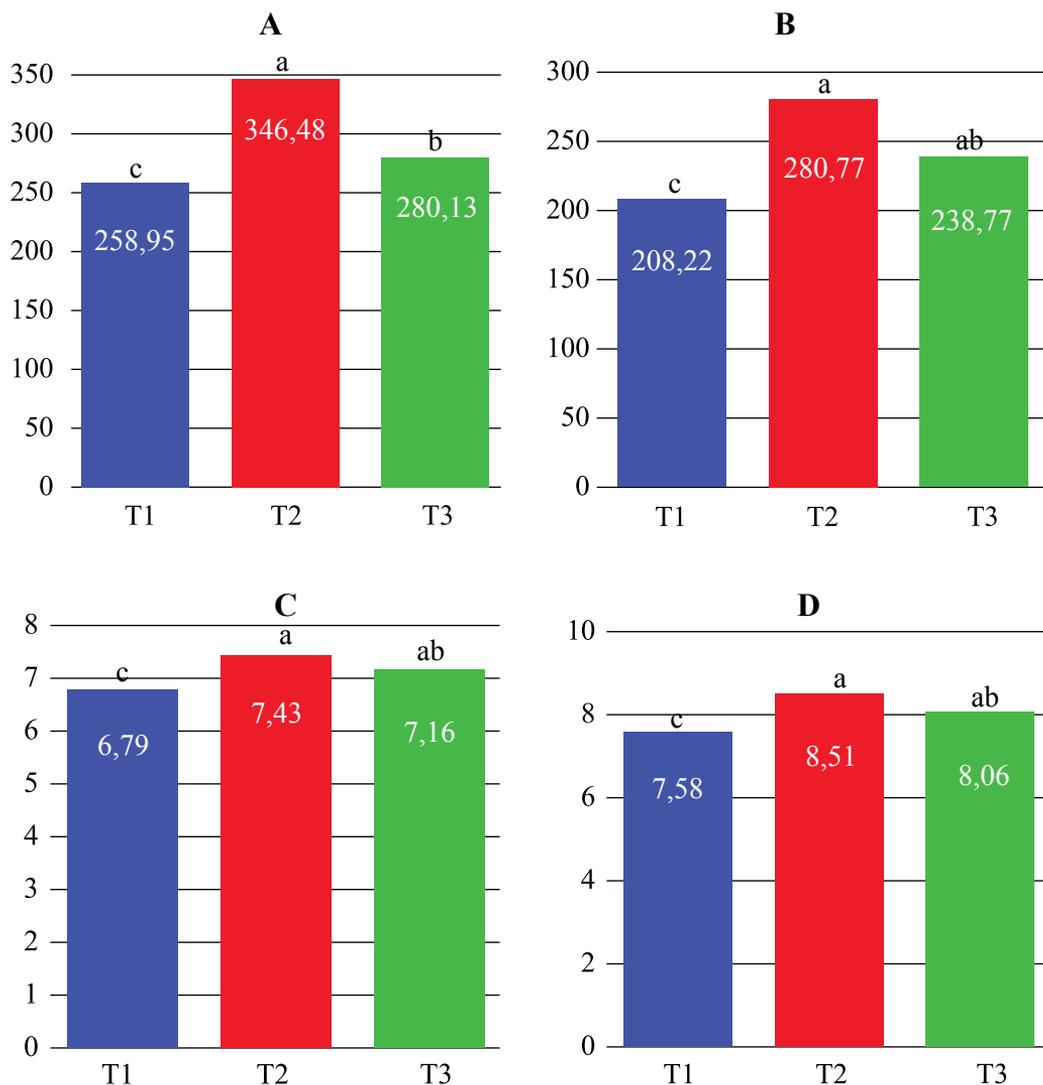
Las variables peso total de la planta, peso del bulbo, diámetro polar y diámetro ecuatorial mostraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. Los mejores resultados los obtuvo el T2, seguido del T3 (fig. 4.38). Los resultados obtenidos demuestran que, cuando hay mayor crecimiento y desarrollo de la planta, mayor área foliar, existe mayor acumulación de sustancias fotosintéticas y de reserva que van desde las hojas hasta el bulbo (Chanalata y Margothe, 2013).

Figura 4.37. Porcentaje de prendimiento (A), altura de la planta (B), diámetro del pseudotallo (C) y número de hojas (D) del cultivo de brócoli bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

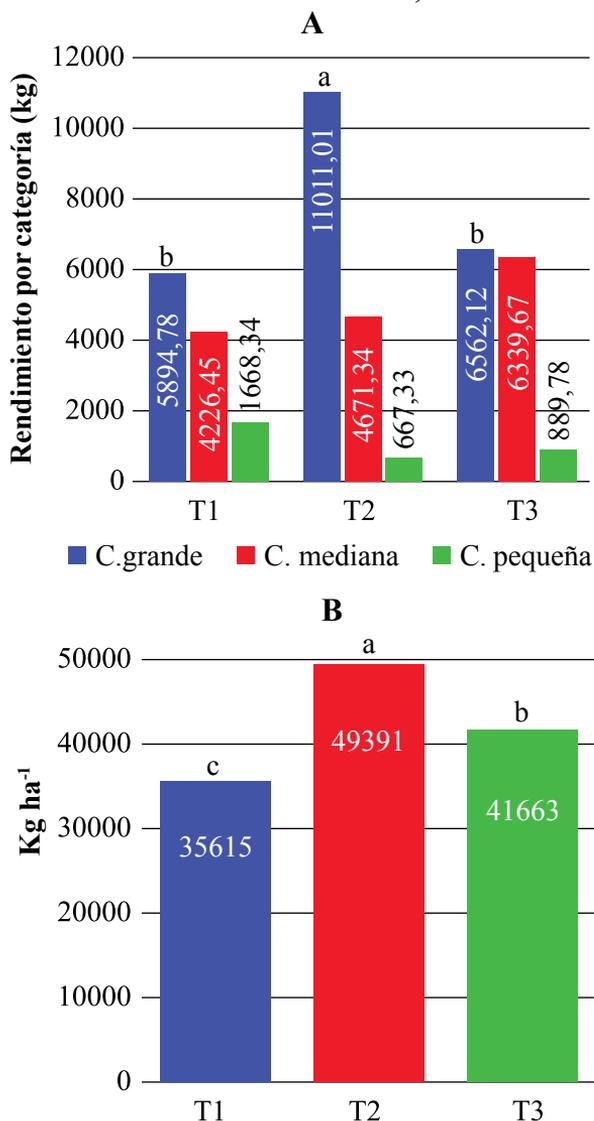
Figura 4.38. Peso total de la planta en gramos (A), peso del bulbo en gramos (B), diámetro polar en centímetros (C) y diámetro ecuatorial en centímetros (D) del cultivo de cebolla bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

Para el rendimiento, se determinaron tres categorías: grande, mediana y pequeña. En la categoría grande, se presentaron diferencias estadísticas significativas con los mayores rendimientos en el T2, en que se aplicó una lámina de 550,7 mm (figura 4.39 A).

Figura 4.39. Rendimiento del cultivo de cebolla bajo condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba, 2015



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

Las diferencias entre los tratamientos están dadas por las láminas de riego aplicadas, con diferencias entre las variables altura de la planta, diámetro del pseudotallo, tamaño del bulbo, que presentan un mejor rendimiento.

El mayor rendimiento total por hectárea fue para el T2 (49 391 kg ha<sup>-1</sup>), seguido por el T3 y con menor rendimiento el T1. Según Freire (2012), el rendimiento de la cebolla variedad burguesa alcanza 43 304 kg ha<sup>-1</sup>, superado por el T2 en este estudio (fig. 4.39 B).

La huella hídrica tuvo a los 150 DDT, un promedio general de 73,7 l kg<sup>-1</sup>, con diferencias estadísticas entre los tratamientos. El tratamiento 2 fue superior al requerir la menor cantidad de agua para producir un kilogramo de masa seca (111,53 l kg<sup>-1</sup>), seguido del T3 (127,88 l kg<sup>-1</sup>) y el T1 (166,05 l kg<sup>-1</sup>). Por la eficiencia en el consumo de agua, el T2 presentó mayor beneficio-costo de USD 1,92 con una rentabilidad del 92 %.

Se demostró que con el T2, con el uso del método de riego por lisimetría y la reposición de la lámina de riego al abatir 50 % de agua útil del suelo, el Kc ajustado para la cebolla colorada variedad burguesa, bajo las condiciones edafoclimáticas del cantón Riobamba es de 0,6-0,9-1,3-0,9 para las cuatro etapas. Este tratamiento presentó una menor huella hídrica, un mayor rendimiento y mejor relación beneficio-costo.

### 4.5.4. Experiencia de estudio aplicado al cultivo de lechuga

Se utilizaron plántulas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. winterhaven. El diseño experimental fue de bloques completamente al azar, con tres tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos quedaron conformados de la siguiente manera: aplicación de la lámina de riego sobre la base de la información del lisímetro de drenaje, cuando deja de drenar el lisímetro (T1); aplicación de la lámina de riego sobre la base de la información del tanque de evaporación tipo A, cuando ha consumido el agua útil en el suelo del 25 % (T2); aplicación de la lámina de riego sobre la base de la información utilizando las fórmulas empíricas (FAO), cuando ha cumplido el agua útil en el suelo del 25 % (T3).

Se utilizó lisímetros de drenaje (taques plásticos de forma cilíndrica, diámetro 0,58 m; de largo = 0,8 m; volumen = 0,26 m<sup>3</sup>), recipientes plásticos de 20 l,

tanque de evaporación tipo A, anenómetro, pluviógrafo, pluviómetro, sistema de riego por goteo no autocompensado (streamline + 16001.60L/h 0,15M 2200 m).

Se recolectaron datos de velocidad del viento, evaporación, humedad relativa desde el trasplante hasta la cosecha. La información se utilizó para determinar  $K_p$  en el cálculo de la evaporación de referencia.

Se consideraron los elementos descritos para la instalación y operación del lisímetro. Una vez instalado, se usó la ecuación dada por Garay (2009) para el cálculo del volumen de agua en la primera reposición. Se utilizó la metodología dada por León (2017) en el primer riego para  $ET_0$  y luego fue reemplazada por el valor de la  $ET_c$ .

Se determinó el contenido de humedad inicial del suelo mediante un muestreo con barreno a profundidad de 30 cm en los lomos donde se trasplantarían las plántulas. Las láminas de riego fueron determinadas a partir de la capacidad de campo durante todo el ensayo. La disponibilidad de agua en el suelo se determinó por el método gravimétrico (León, 2012).

El ensayo estuvo constituido por una parcela neta de 30 m por 30 m de largo, con 900 m<sup>2</sup> y 45 514 plantas por ensayo. La densidad de trasplante de 0,15 m entre plantas y 0,40 m entre hilera, con una sola hilera por lomo.

Se evaluó la fenología de la planta a partir del número de plantas prendidas (fase inicial), días transcurridos desde el trasplante a la fase de roseta (fase de desarrollo), días transcurridos hasta la formación del repollo (fase intermedia) y días transcurridos hasta la cosecha (fase final).

Se determinaron los parámetros biométricos altura de la planta, contenido de clorofila, diámetro polar y ecuatorial del repollo, contenido relativo de agua (WRC) según metodología Smart y Bingham (1974), contenido de materia seca en planta y repollo (Bonierbale et al., 2010), peso del repollo a la cosecha, rendimiento repollo por parcela (kg), rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) y la huella hídrica.

En cada etapa se evidenciaron cambios en variables estudiadas desde el momento del trasplante hasta la cosecha. El ciclo total tuvo una duración de ochenta y dos, ochenta y nueve y ochenta y seis días después del trasplante y resulta acorde a lo expresado por la FAO (Allen et al., 2006) (tabla 4.13).

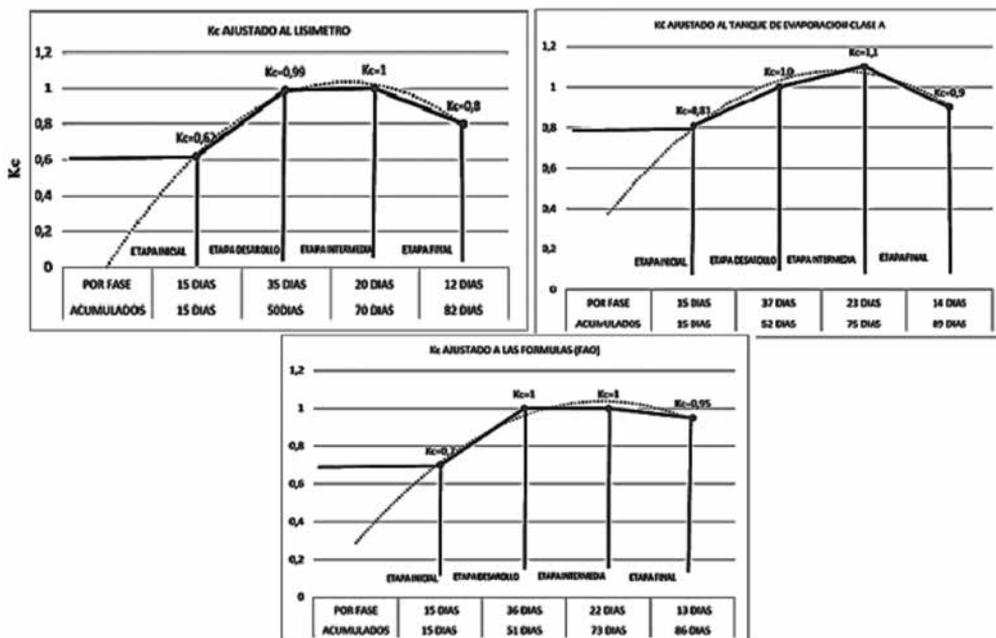
Tabla 4.13. Duración de los estados fenológicos en la lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. winterhaven (DDT).

Tratamientos	Fase inicial	Fase desarrollo	Fase intermedia	Fase final	Total
Lisímetros	15	35	20	12	82
Tanque tipo A	15	37	23	14	89
Fórmulas FAO	15	36	22	13	86

(DDT) días después del trasplante

Al aplicar un modelo polinómico del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) ajustado para cada una de las etapas fenológicas del cultivo de la lechuga determinadas por el método de lisimetría y por tanque evaporímetro Tipo A y por formulas de la FAO, se encontraron diferencias en la duración de las etapas, los días totales del cultivo y la lámina de riego aplicada (fig. 4.40).

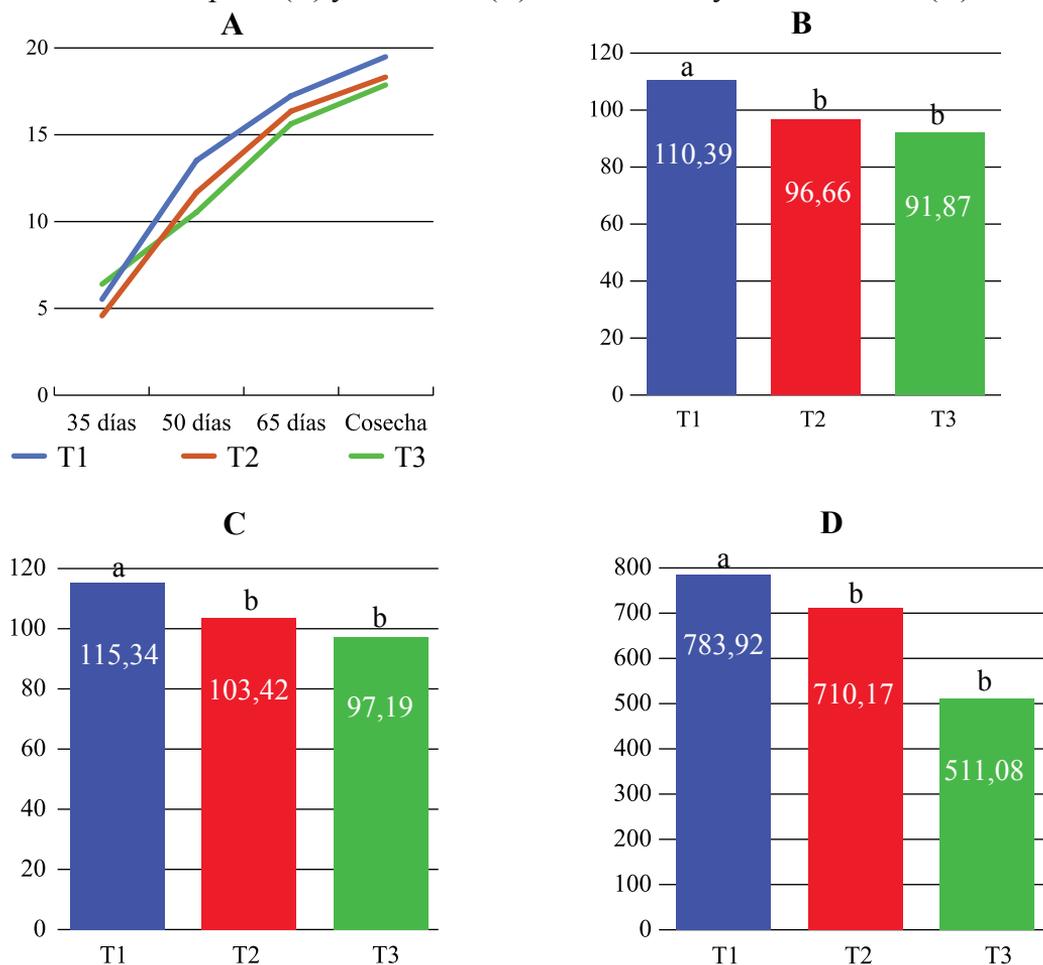
Figura 4.40. Coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) mediante el método de lisimetría, mediante tanque de evaporación tipo A y mediante fórmulas FAO para la lechuga



Los resultados evidencian que las diferencias se presentan en el  $K_c$  por etapas, fundamentalmente en la etapa inicial y final; la duración total, cuyo menor número de días correspondió al método de lisimetría; al igual que en la lámina aplicada de agua durante todo el ciclo, que fue menor (440,83 mm), tanque evaporímetro A (453,90 mm) y fórmulas FAO (449,03 mm).

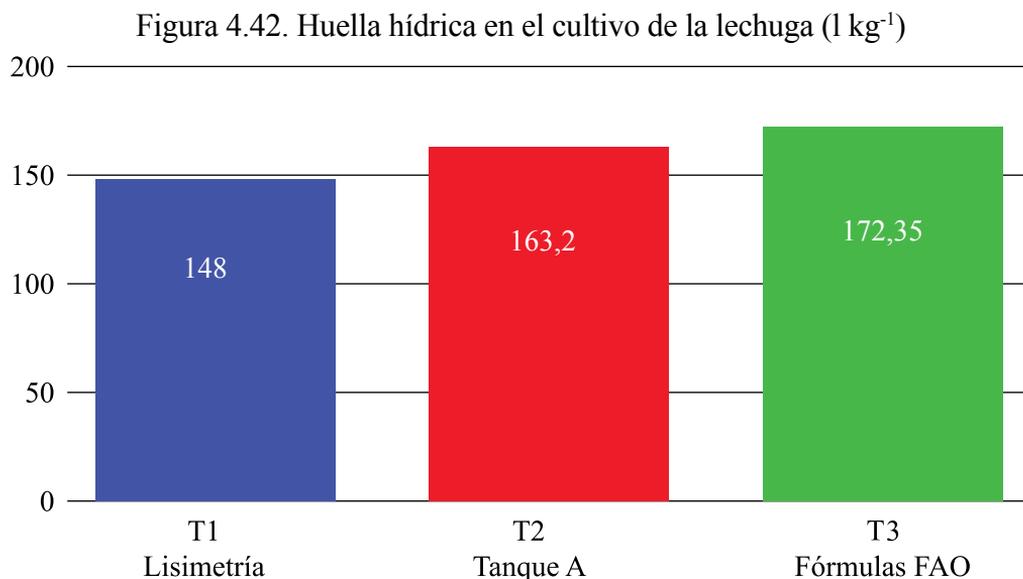
Al realizar el análisis de varianza, la lisimetría (T1) tuvo mejor comportamiento, con diferencias estadísticas significativas para las variables altura de la planta, diámetro polar y ecuatorial en la cosecha y el rendimiento (fig. 4.41).

Figura 4.41. Análisis de varianza para las variables altura de la planta (A), diámetro polar (B) y ecuatorial (C) en la cosecha y el rendimiento (D)



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

En la huella hídrica, el mejor comportamiento lo mostró el T1, al necesitar 148 litros por cada kilogramo de producción. Las diferencias están dadas por las láminas de riego aplicadas por tratamiento (T1 de 440,83 mm; T2 de 453,90 mm y T3 de 449,03 mm) (fig. 4.42).



De acuerdo con Taiz et al. (2015), cuando el suelo está saturado, los gases como el  $\text{O}_2$  y el  $\text{CO}_2$  se difunden más lentamente en el agua, por lo que se hacen inaccesibles para las raíces de la planta. Con la falta de oxígeno, disminuye la producción de moléculas energéticas como el ATP, lo que provoca una reducción del metabolismo radicular, y disminuye la absorción de agua y nutrientes (Sauter, 2013). Entonces se puede causar una disminución de masa seca cuando el agua aplicada es mayor si el suelo está saturado.

Desde el punto de vista económico, el T1 presentó mayor beneficio-coste con USD 1,59 y una rentabilidad del 58,86 %.

De acuerdo con el suministro de agua al cultivo de la lechuga mediante la aplicación de la lámina de riego, el lisímetro de drenaje gastó menos cantidad de

agua para producir un kilogramo de lechuga, con 440,90 l m<sup>2</sup>, con valores de Kc 0,62-0,99-1-0,8 para las etapas inicial, desarrollo, intermedia y final respectivamente. Con la utilización de los lisímetros, se obtiene 29,6 t ha<sup>-1</sup>.

#### 4.5.5. Experiencia de estudio aplicado al cultivo de zanahoria

El cultivo de la zanahoria es muy exigente en riegos, especialmente cuando se realiza sobre suelos secos (Infoagro, 2017). Por su sistema radicular bien desarrollado y por la estructura de sus hojas, la zanahoria soporta bien las sequías ligeras una vez que el cultivo se ha establecido adecuadamente. Se ha demostrado que la irrigación es esencial para obtener buenos rendimientos (Morales, 1995).

Para establecer el riego en el cultivo de la zanahoria, se deben conocer los requerimientos hídricos de la planta y las condiciones de precipitación de la zona donde se va a implementar el cultivo. De esta forma se garantiza que la planta disponga del agua que necesita, ya que el estrés hídrico puede ocasionar pérdidas significativas en la producción, bien sea por falta o por exceso de agua (Ávila, 2015).

Según Caicedo y Sono (2014), se dan en promedio de seis a diez riegos, con mucho cuidado de que no le haga falta en la etapa adulta (después de los setenta días), lo cual provocaría rajaduras en la parte comestible de la zanahoria.

Según Ávila (2015), el cultivo tiene tres períodos críticos. El primero es el período de emergencia, en el cual se requieren riegos cortos y frecuentes, que también indican Caicedo y Sono (2014). Esta etapa va desde la emergencia hasta que las plantas tienen las dos primeras hojas verdaderas.

En la etapa de desarrollo de las hojas y la elongación de la raíz, las necesidades de agua crecen paralelamente al desarrollo del sistema foliar. En la última etapa, se debe aportar agua de forma incremental con el fin de estimular el engrosamiento.

Un cultivo regado de forma progresiva en función del estado de desarrollo de las raíces produce un aumento del rendimiento en mayores calibres. Produce raíces más lisas con las lenticelas menos marcadas (Caicedo y Sono, 2014). Morales (1995) menciona que, con algunos cultivares de zanahoria, el mejor rendimiento se obtiene con 48 % a 54 % de agua en el suelo.

En términos generales, la zanahoria requiere una lámina de riego de 2,5 cm a 4 cm/día con una frecuencia de siete a catorce días que va a depender de factores como tipo de suelo exigencias del cultivar, condiciones climáticas y etapas del cultivo (Morales, 1995).

Se realizó un diseño de bloques al azar con tres tratamientos y tres repeticiones, para comparar la eficacia del método al aplicar las fórmulas establecidas contra la determinación directa por medio del lisímetro y evaporímetro (cuadro 4.4). Se utilizaron semillas de zanahoria (*Daucus carota* L.) var. chantenay. Los tratamientos quedaron conformados de la siguiente manera.

Cuadro 4.4. Descripción de los tratamientos de riego para zanahoria (*Daucus carota* L.) var. chantenay

Tratamientos	Descripción
T1 (tanque evaporímetro tipo A)	Lecturas de la evaporación en el tanque evaporímetro tipo A, la lámina de riego se aplica una vez que se haya consumido el 25 % del agua útil.
T2 (Fórmulas FAO)	Se calculó la evapotranspiración con las fórmulas empíricas de la FAO. La lámina de riego se aplica una vez que se haya consumido el 25 % del agua útil.
T3 (lisimetría)	Se midió la evapotranspiración del cultivo con la utilización de lisímetros de drenaje. La lámina de riego se aplica una vez que el lisímetro deja de drenar.

Se determinaron cuatro etapas fenológicas durante el ciclo del cultivo. Etapa inicial, desde el día de la siembra hasta cuando se observó el 90 % de emergencia (código 09 según escala BBCH). Etapa de desarrollo, empieza al culminar la inicial hasta que el 70 % de plantas formaron hojas verdaderas (código 12 según escala BBCH). Etapa intermedia, desde que finalizó la de desarrollo hasta cuando el 70 % de las plantas empezaron a engrosar las raíces (código 41 según escala BBCH). Etapa final desde que culmina la intermedia hasta cuando las plantas representaron el 70 % del diámetro comercial de la raíz (código 49 según escala BBCH) (Yumbo, 2019). La duración de cada etapa por tratamiento se presenta en la tabla 4.14.

Tabla 4.14. Duración de las etapas fenológicas por tratamientos de riego para zanahoria (*Daucus carota* L.) var. chantenay.

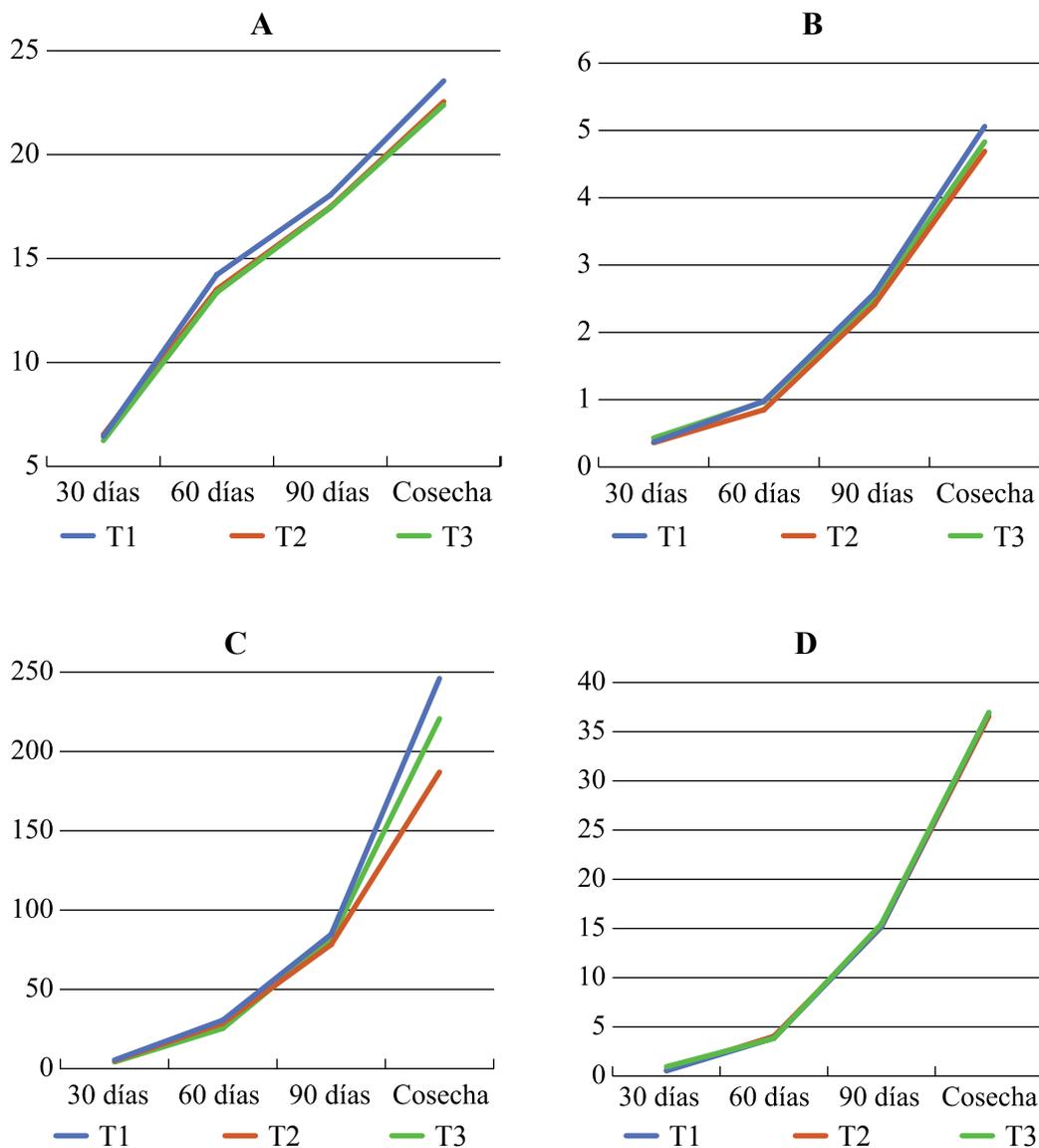
Tratamientos	Fase inicial	Fase desarrollo	Fase intermedia	Fase final	Total
Tanque tipo A	20	38	41	25	124
Fórmulas FAO	20	40	42	28	130
Lisímetro	20	39	42	26	127

Los resultados se corresponden para la etapa inicial con los planteados por Caicedo y Heredia (2014) con una duración entre quince y veinte días. De igual manera, con López et al. (2014) en la etapa de desarrollo con cuarenta y dos días. En la etapa intermedia coinciden con lo expresado por Ávila (2015), en cuarenta y dos días y difieren en alguna medida con los veintiún días logrados en la etapa final.

En cuanto a las variables evaluadas, en la etapa inicial, solo se mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en la variable diámetro del hombro de la raíz (fig. 4.43 B). En la etapa de desarrollo se produce un aumento importante en todas las variables evaluadas, fundamentalmente en la altura de la planta (fig. 4.43 A), lo que concuerda con resultados de Vega et al. (2012) y Forero et al. (2015) y con diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

En la etapa intermedia, se produjeron diferencias estadísticas significativas en las variables evaluadas, excepto en masa seca de la planta (fig. 4.43 D), ya que esta etapa se caracteriza por la acumulación de carbohidratos y el engrosamiento que no cesa.

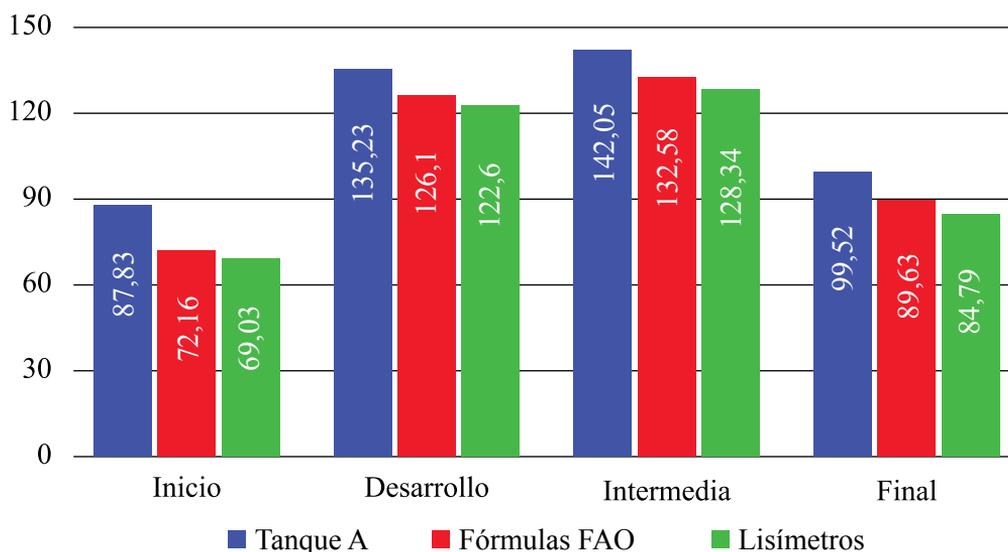
Figura 4.43. Variables evaluadas en el cultivo de la zanahoria en las etapas fenológicas. A: Altura de la planta (cm), B. Diámetro del hombro de la raíz (cm), C. Peso fresco de la planta (g), D. Peso seco de la planta (g)



Requerimientos hídricos en láminas de agua aplicadas al cultivo de la zanahoria por etapa

El volumen de agua aplicado en cada etapa fenológica del cultivo y en cada tratamiento fue diferente (fig. 4.44), en función de los resultados obtenidos de la aplicación de fórmulas para cada método estudiado. De esta forma, la etapa fenológica que más agua demandó fue la intermedia en los tres tratamientos, y la etapa inicial fue la que recibió menor volumen de agua.

Figura 4.44. Volumen de agua ( $l\ m^{-2}$ ) aplicada en cada etapa del cultivo de zanahoria



En el tanque A (T1), en la etapa inicial, se realizó un aporte diario de  $4,39\ l\ m^{-2}$ ; en la de desarrollo, un aporte diario de  $3,56\ l\ m^{-2}$ ; en la intermedia, un aporte de  $3,6\ l\ m^{-2}$ ; y en la etapa final, un aporte diario de  $3,98\ l\ m^{-2}$ . Con las fórmulas de la FAO (T2), los aportes diarios por etapas tuvieron el comportamiento siguiente: fase inicial,  $3,61\ l\ m^{-2}$ ; etapa de desarrollo,  $3,23\ l\ m^{-2}$ ; etapa intermedia,  $3,16\ l\ m^{-2}$ ; y en la etapa final,  $3,45\ l\ m^{-2}$ . En los lisímetros (T3), los aportes diarios se compor-

Tabla 4.15. Lámina, frecuencia y números de riegos en el cultivo de la zanahoria (*Daucus carota* L.) var. chantenay

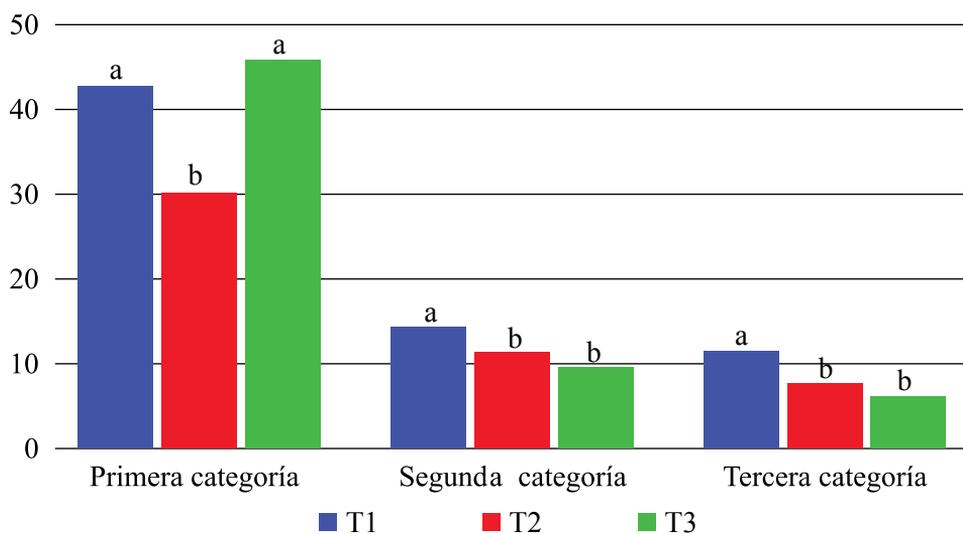
Tratamientos	Etapas fenológicas											
	Inicio			Desarrollo			Intermedia			Final		
	AD (lt m <sup>-2</sup> )	fr (días)	# riegos	AD (lt m <sup>-2</sup> )	fr (días)	# riegos	AD (lt m <sup>-2</sup> )	fr (días)	# riegos	AD (lt m <sup>-2</sup> )	fr (días)	# riegos
Tanque A	8,78	2	10	13,52	4	10	10,14	3	14	12,44	3	8
Fórmula FAO	7,22	2	10	9,50	3	13	9,47	3	14	9,96	3	9
Lisímetros	6,90	2	10	9,43	3	13	9,16	3	14	9,42	3	9

taron de la manera siguiente por etapas: inicial, 3,45 l m<sup>-2</sup>; de desarrollo, 3,07 l m<sup>-2</sup>; intermedia, 3,06 l m<sup>-2</sup>; y en la etapa final, 3,03 l m<sup>-2</sup> (tabla 4.15).

En relación con el número de riegos totales, en el tanque A, fueron cuarenta y dos, y en los tratamientos correspondientes a las fórmulas de la FAO y los lisímetros, se realizaron un total de cuarenta y seis riegos.

Lo rendimientos obtenidos muestran diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (fig. 4.45). El mayor rendimiento se obtuvo con el T1; sin embargo, de primera categoría hubo una mayor producción en el T3. Esto se debe a que, al incrementar el volumen de agua, aumenta la producción, lo que se corresponde con Barbieri et al. (2020), pero se reducen las características comerciales (Carvalho et al., 2016). El T2 mostró el menor rendimiento. Sahara et al. (2006), mencionan en su estudio que al aumentar el régimen de riego hay un aumento en la producción, pero se producen mayores raíces bifurcadas y raíces partidas.

Figura 4.45. Rendimientos del cultivo (t ha<sup>-1</sup>) de la zanahoria (*Daucus carota* L.) var. chantenay, en cuanto a primera, segunda y tercera categoría y rendimiento total



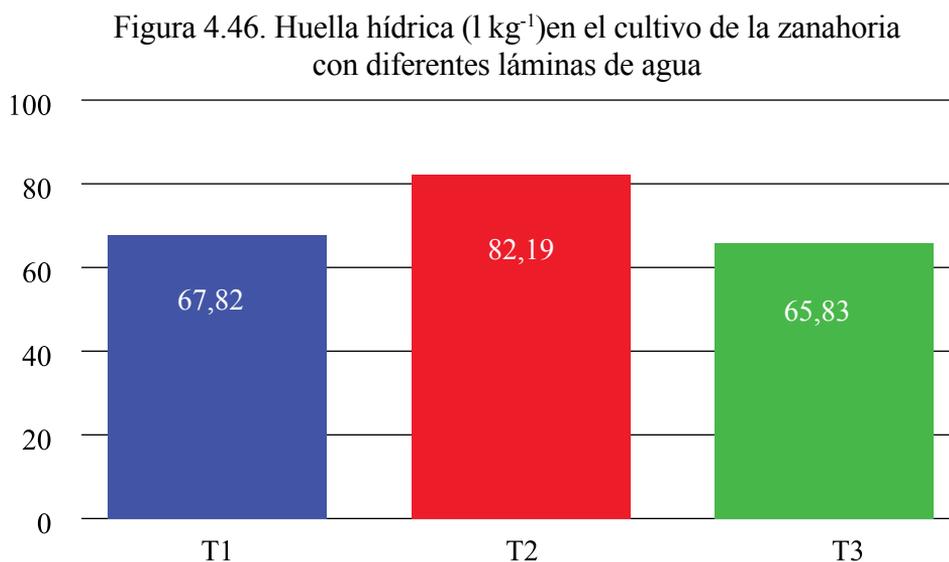
Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

### Huella hídrica

El tratamiento con el uso de lisímetros (T3) requirió menor cantidad de agua para producir un kilogramo en el cultivo de zanahoria (65,83 l kg<sup>-1</sup>). Con la fórmula de la FAO (T2), se requieren 1,99 litros más, y con el tanque A (T1), 14,37 litros más que el anterior (fig. 4.46).

Los resultados expuestos permitieron al tratamiento con tanque tipo A presentar mayor beneficio-costo de USD 1,61 con una rentabilidad de 61 %.

Según los resultados descritos, en la aplicación de agua, el método más apropiado para determinar la lámina de riego en el cultivo de la zanahoria es mediante lisímetros, ya que se obtiene información directa de la necesidad de agua del cultivo. Con este método, la huella hídrica es menor, lo que destaca la eficiencia de los lisímetros de drenaje como método directo para la estimación de la evapotranspiración.



#### 4.5.6. Experiencia de estudio aplicado al cultivo de maíz

El cultivo del maíz en Ecuador tiene gran importancia desde el punto de vista económico, social y cultural. Se cultiva a lo largo y ancho del país, y se consume en todos los meses del año, ya sea en choclo o en seco. Es un cultivo con gran capacidad de adaptación agroclimática, que genera altos rendimientos y buenos ingresos económicos.

De acuerdo con los datos obtenidos por INEC (2012), el maíz se encuentra en el quinto producto más cosechado en el país (Tapia et al., 2017); su producción total aproximada es de 717,940 toneladas de maíz duro anualmente. La región de la Costa es la que más produce con rendimientos 8,74 toneladas, principalmente en Manabí y Guayas (Nicolas et al., 2019), mientras que en la provincia de Guayas se obtienen  $4,75\ t\ ha^{-1}$  (Sacón et al., 2018). Estos rendimientos están dados por la forma en que se manejan los fertilizantes, el tipo de suelo, disponibilidad del agua y el manejo de la densidad de siembra (Nicolas et al., 2019).

Este cultivo se ha adaptado a todos los tipos de suelos. Se desarrolla mejor en suelos con pH entre 6-7, que sean profundos, ricos en materia orgánica, con buen drenaje para evitar asfixia radicular (Infoagro, 2018). Se requiere un rango

de humedad comprendido entre 50 % y 80 %. Se establecieron los siguientes tratamientos (cuadro 4.5).

Cuadro 4.5. Descripción de los tratamientos de riego en el cultivo de maíz

Tratamientos	Descripción
T1 (lisimetría)	Se calculó la evapotranspiración del cultivo con la utilización de lisímetros de drenaje. La lámina de riego se aplicó una vez que el lisímetro dejó de drenar.
T2 (tanque evaporímetro tipo A)	Lecturas de la evaporación en el tanque evaporímetro tipo A. La lámina de riego se aplicó una vez que se había consumido el 25 % del agua útil.
T3 (Fórmulas FAO)	Se calculó la evapotranspiración con las fórmulas empíricas de la FAO. La lámina de riego se aplicó una vez que se había consumido el 25 % del agua útil.

Las necesidades hídricas del cultivo varían según las fases fenológicas. En la fase de crecimiento vegetativo es donde se requiere mayor cantidad de agua y se recomienda un riego a los diez o quince días antes de la floración, considerado el período crítico, porque de ello dependerá el cuajado y la producción obtenida. Por el contrario, en la etapa de engrosamiento y maduración de la mazorca, se debe disminuir la cantidad de agua aplicada (Infoagro, 2018). El cuadro 4.6 describe las etapas fenológicas del cultivo.

Cuadro 4.6. Etapas fenológicas del cultivo del maíz

Etapa	Días	Características
VE	5	El coleóptilo emerge de la superficie del suelo
V1	9	Es visible en cuello de la primera hoja
V2	12	Es visible en cuello de la segunda hoja
Vn		Es visible en cuello de la a hoja n («n» es igual al número definitivo de hojas que tiene la planta, generalmente fluctúa entre dieciséis y veintidós, pero, para la floración, se habrán perdido las cuatro o cinco hojas más bajas)
VT	55	Es visible la última rama de la panícula
R0	57	Antesis o floración masculina. El polen se comienza a arrojar
R1	59	Son visibles los estigmas
R2	71	Etapa de ampolla. Los granos se llenan con un líquido lechoso blanco
R3	80	Etapa lechosa. Los granos se llenan con un líquido lechoso blanco
R4	90	Etapa masosa. Los granos se llenan con una pasta blanca. El embrión tiene aproximadamente la mitad del ancho del grano
R5	102	Etapa dentada. La parte superior de los granos se llena con almidón sólido y, cuando el genotipo es dentado, los granos adquieren la forma dentada. En los tipos tanto cristalinos como dentados es visible una «línea de leche» cuando se observa el grano desde el costado
R6	112	Madurez fisiológica. Una capa negra es visible en la base del grano. La humedad del grano es generalmente de alrededor del 35 %.

Las etapas fenológicas del cultivo del maíz (*Zea mays* L.) var. INIAR 102 fueron identificadas mediante visualización directa al cultivo, sobre la base del desarrollo y crecimiento de este, según Allen et al. (2006) (tabla 4.16). El comportamiento para los tratamientos 1 y 2 se corresponde con lo expuesto por INIAP (2000), que plantea que el ciclo del cultivo para la cosecha en choclo tiene un promedio de 175 días, en dependencia de las condiciones climatológicas y las condiciones de sobreoferta de agua, lo que puede provocar un letargo en el crecimiento y desarrollo del cultivo. La duración pudo estar determinada por la lámina total de agua aplicada 327, 1015 y 533 l m<sup>-2</sup>, para los T1, T2 y T3 respectivamente.

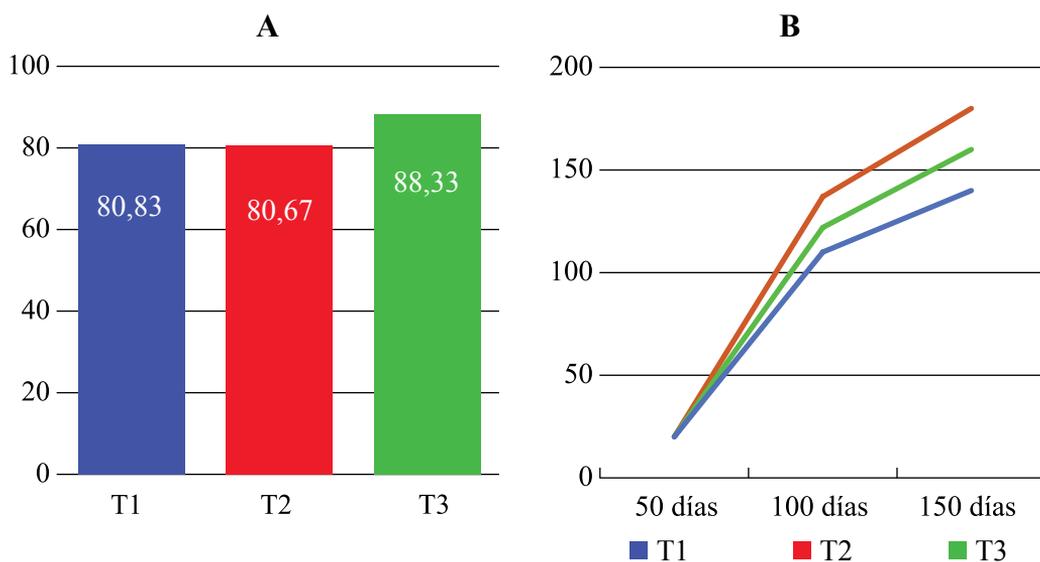
Tabla 4.16. Duración de las etapas fenológicas por tratamientos en el cultivo del maíz

Tratamientos	Fase inicial	Fase desarrollo	Fase intermedia	Fase final	Total
Lisímetro	26	74	38	34	172
Tanque tipo A	25	85	38	40	188
Fórmulas FAO	25	80	35	36	176

### Variables evaluadas

La emergencia de la planta mostró un comportamiento similar para los tres tratamientos. Esto pudo estar dado por el riego a capacidad de campo realizado, lo que facilitó la imbibición de la semilla (fig. 4.47 A). Al respecto, Intagri (2018) indica que una menor absorción de agua en el proceso de imbibición ocasiona retraso en el proceso germinativo y por ende en el proceso de emergencia.

Figura 4.47. Emergencia (%) (A) y altura de la planta (cm) (B) del cultivo del maíz (*Zea mays* L.) var. INIAP 102 con diferentes láminas de riego

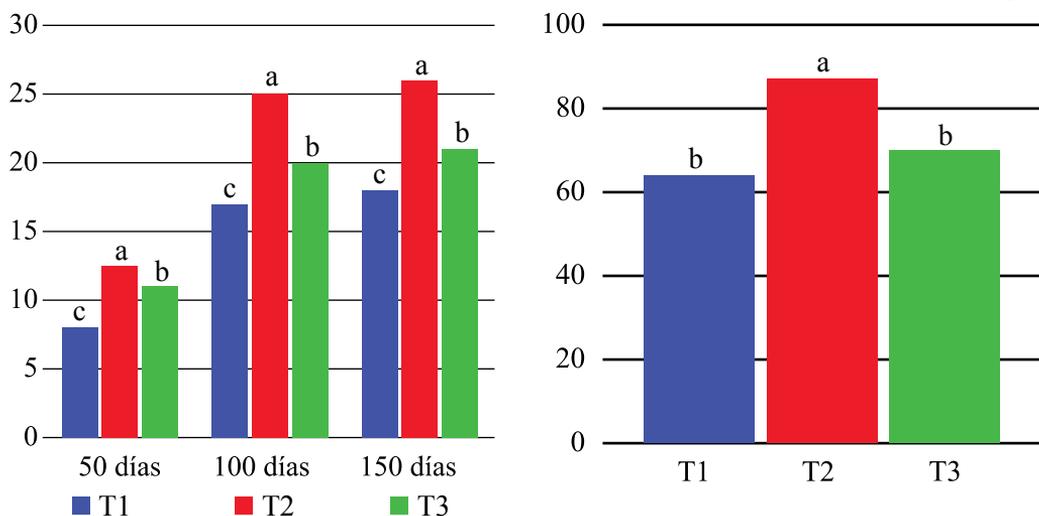


Con respecto a la altura de la planta (fig. 4.47 B), a los 50 DDS, no se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos, con un promedio general de 19 cm. La altura de la planta a los 100 DDS mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos 2 y 3, con respecto al T1. El promedio general fue de 142,3 cm. A los 150 DDS con un promedio general de 167,1 cm los tratamientos 2 y 3 fueron superiores estadísticamente con respecto al T1.

Los resultados pueden estar dados por las láminas de agua aplicadas al cultivo. La altura de la planta será mayor en la medida que la disponibilidad de humedad del suelo lo sea. El déficit hídrico restringe el crecimiento celular, lo que se traduce en menor crecimiento del tallo debido a la menor presión de turgencia en las células.

El diámetro del tallo a los 50 DDS, 100 DDS y 150 DDS con promedios de 9,6 mm, 19,8 mm y 20,5 mm, respectivamente, mostró diferencias estadísticas significativas entre todos los tratamientos, con un mayor diámetro el T2, seguido del T3 y menos diámetro el T1 (fig. 4.48 A).

Figura 4.48. Diámetro del tallo (mm) (A) y altura de formación del choclo (cm) (B) del cultivo del maíz (*Zea mays* L.) var. INIAP 102 con diferentes láminas de riego

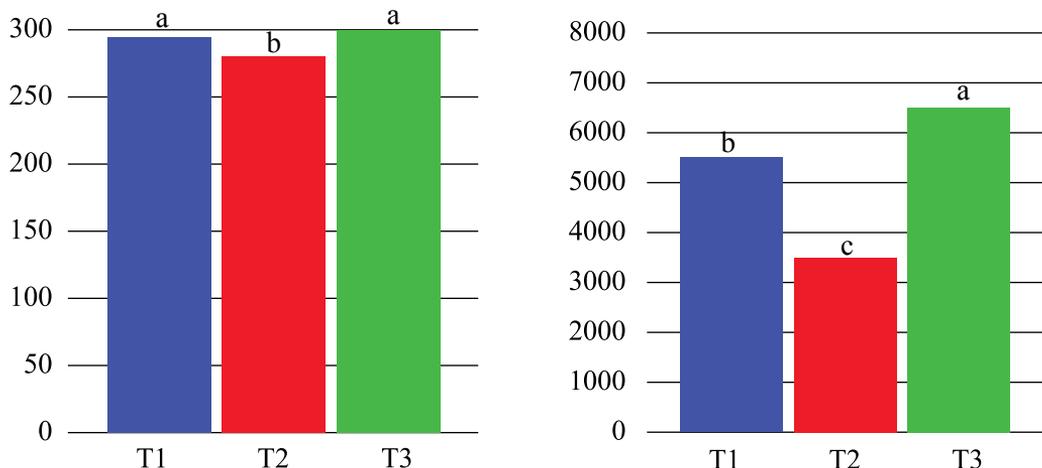


Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

La variable altura a la formación del choclo a los 175 DDS mostró un comportamiento similar a la altura de la planta, con un promedio de 62,8 cm. El tratamiento 2 mostró una mayor altura con diferencias estadísticas significativas con los T3 y T1 (fig. 4.48 B).

El número de choclos por planta se comportó con un promedio general de 2,1 choclos y sin diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos a los 175 DDS. En la variable peso de choclo por planta, con un promedio general de 269,6 g, se presentaron diferencias estadísticas significativas, con mayor peso los T3 y T1 con respecto al T2 (fig. 4.49 A).

Figura 4.49. Peso choclos por planta (A) y rendimiento (B) del cultivo del maíz (*Zea mays* L.) var. INIAP 102 con diferentes láminas de riego



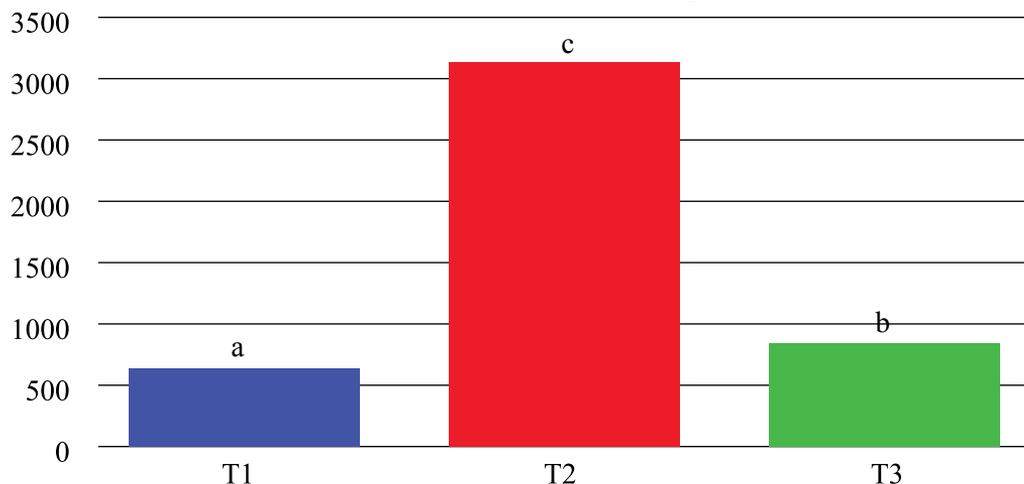
Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

El rendimiento del cultivo con un promedio de 4942,7 kg ha<sup>-1</sup> presentó diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (fig. 4.49 B). El mayor rendimiento lo alcanzó el T3, seguido del T1 y con el menor rendimiento el T2.

El análisis estadístico de la huella hídrica (fig. 4.50) arrojó que existieron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos 1 y 3 con el T2. Al analizar la cantidad de agua aplicada en los tratamientos para producir una tone-

lada de maíz, el T1 requirió menor cantidad de agua, seguido del T3, mientras que el T2 requirió de 500 % más de agua que los dos restantes.

Figura 4.50. Huella hídrica del cultivo del maíz (*Zea mays* L.) var. INIAP 102 con diferentes láminas de riego



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

Es importante destacar que, aunque los T1 y T3 recibieron menor lámina con respecto al T2, esto no se tradujo en diferencias estadísticas significativas en el rendimiento. Al contrario, los que recibieron una menor lámina lograron rendimientos más elevados, por lo que es de interés desde el punto de vista de eficiencia en la aplicación del agua de riego. Los resultados coinciden con los expresados por Álvarez (2016), quien expone que, para producir una tonelada de maíz, se necesitan de 733 m<sup>3</sup> a 875 m<sup>3</sup> de agua.

Al realizar el análisis económico, el tratamiento con mayor beneficio neto fue el T1, con un valor de USD 1614,80 y una relación costo beneficio de 1,11 expresado en términos de rentabilidad de 11 %.

El tratamiento que presenta menos huella hídrica es aquel con lisímetros. El ciclo del cultivo de maíz variedad INIAP 102, bajo condiciones edafoclimáticas

del cantón Riobamba presentó  $K_c$  ajustados de 0,6-1,02-1,02 y 0,9 para las cuatro etapas respectivamente. Se corrobora que la lisimetría es un buen método ya que proporciona información directa y confiable del total de agua requerida para la producción de los cultivos.

#### 4.5.7. Experiencia de estudio aplicado al cultivo de fréjol

El fréjol seco forma el 0,90 % de la producción nacional ecuatoriana, en los cultivos transitorios (Guamán et al., 2020). En los momentos actuales, la sequía produce modificaciones en los indicadores morfofisiológicos y bioquímicos que tienen consecuencia sobre el peso de la semilla y, por ende, sobre el rendimiento del cultivo (Domínguez et al., 2016).

El déficit hídrico en etapas tempranas generalmente afecta el alargamiento y el tamaño del final de las hojas. En la fase reproductiva, disminuye el rendimiento en mayor proporción que cuando solo afecta la fase vegetativa (Polón et al., 2014), lo que depende de la intensidad del estrés hídrico y la tolerancia. Varios autores han considerado los indicadores fenológicos, la pérdida de rendimiento y el índice de susceptibilidad a la sequía, en estudios de evaluación y selección de variedades tolerantes a la sequía (Cardona et al., 2014).

La instalación y operación del lisímetro se efectuaron con las consideraciones dadas por León (2016). Se determinó el volumen de agua ( $V_a$ ) según ecuación de Garay (2009). Los datos de humedad relativa, velocidad del viento y barlovento, para la obtención de  $K_p$  y el cálculo de  $ET_0$  se registraron diariamente. Por otra parte, la reposición hídrica se realizó cuando se consumió el 25 % de humedad aprovechable.

Se utilizó el diseño de bloques completamente al azar (BCA), con tres tratamientos y tres repeticiones. Se determinó el coeficiente de variación, expresado en porcentaje. Cuando las diferencias fueron significativas, se realizó la prueba de Tukey al 5 % para separar medias y el análisis económico se realizó con el método relación beneficio-costos.

Las láminas de riego para cada tratamiento fueron dadas a partir de la puesta a capacidad de campo del suelo en todo el ensayo. Tratamiento T1 corresponde a los lisímetros donde el riego se efectuó una vez que el drenaje cesó; tratamiento

T2 del tanque evaporímetro tipo A y el tratamiento 3 corresponde a la lámina aplicada en función de las fórmulas de la FAO. El riego se efectuó cuando la humedad en el suelo registró el 10,5 % de humedad, o sea cuando se abatió el 25 % de capacidad de campo, o sea determinada por las condiciones climáticas.

Con relación a la duración de las etapas fenológicas, se determinó que el comportamiento fue similar a lo planteado por FAO (2016), donde el tratamiento 1 tuvo la menor duración en todas las etapas. La etapa inicia, con quince días, por debajo de los veinte días aproximadamente, planteados por el autor. La de desarrollo, por debajo de treinta y cinco, cuando se estima para la misma en cuarenta días aproximadamente. En la etapa intermedia, el cultivo utilizó entre veinte y veintidós días. La etapa final se desarrolló entre los cincuenta y uno y cincuenta y seis días, superior a lo expresado por Andino (2011) que son cincuenta y dos días (tabla 4.17).

Tabla 4.17. Duración de las etapas del ciclo comercial del cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.) var. kalima por tratamientos

Tratamientos	Fase inicial	Fase desarrollo	Fase intermedia	Fase final	Total
T1 (lisímetro)	15	32	20	51	118
T2 (tanque evaporímetro tipo A)	15	35	21	56	127
T3 (Fórmulas empíricas FAO)	15	33	22	55	125

La duración del ciclo total del cultivo fue menor en el tratamiento 1 debido al menor aporte de agua con respecto al T2 y T3. La respuesta y acoplamiento de la fenología del cultivo a los factores ambientales, precipitación y riego han sido reconocidos como un criterio importante para la duración del ciclo del cultivo, variedad kalima en el cantón Riobamba, provincia Chimborazo.

Las siguientes figuras (4.51, 4.52, 4.53) analizan el comportamiento del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) en las etapas fenológicas del cultivo para los tres tratamientos, en función de la gráfica con el modelo polinómico. En todos los tratamientos,  $K_c$  tiene un comportamiento similar por etapas. En la inicial, los valores son menores, aumentan en la etapa de desarrollo, se incrementan en la intermedia y disminuyen en la final.\*

Figura 4.51. Huella hídrica del cultivo del fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.) var. kalima con diferentes láminas de riego

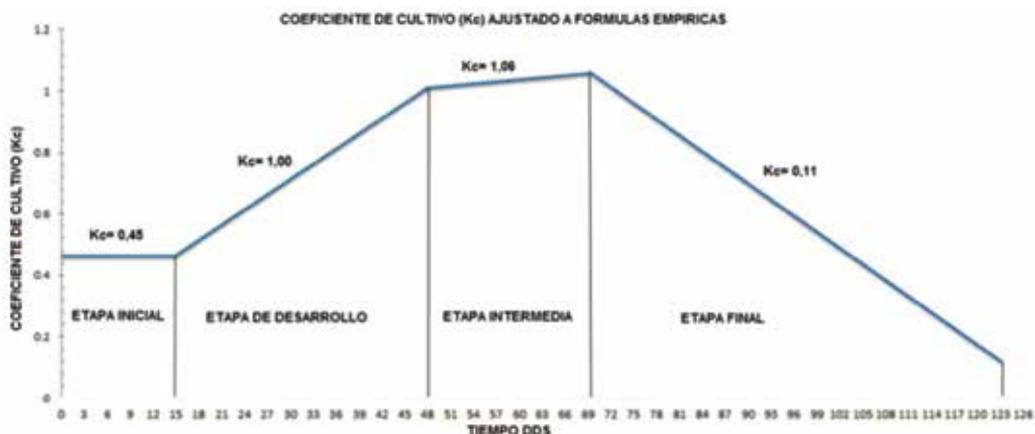


Figura 4.52. Huella hídrica del cultivo del maíz fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.) var. kalima con diferentes láminas de riego

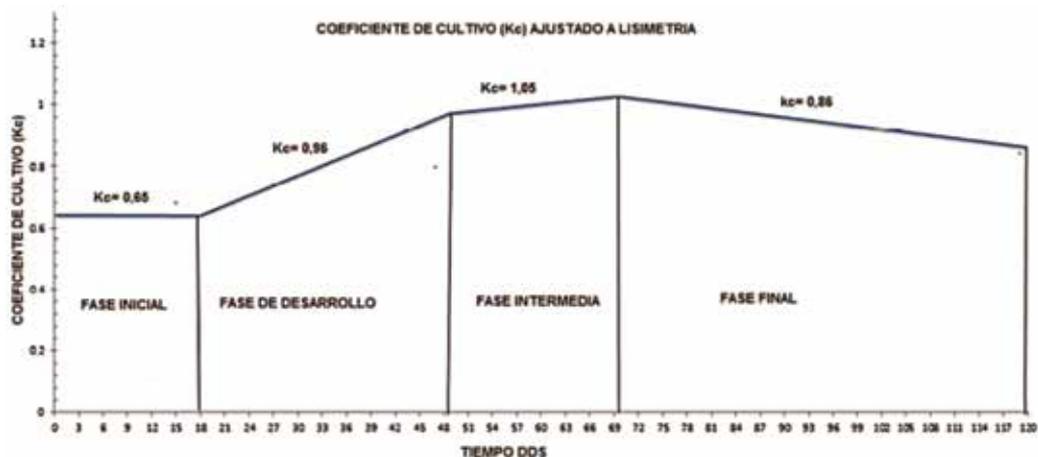


Figura 4.53. Huella hídrica del cultivo del fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.) var. kalima con diferentes láminas de riego



Según Allen et al. (2006), en el libro 56 de la FAO Guía para la determinación de los requerimientos de agua para los cultivos, señalan que el Kc para fréjol en la etapa inicial es 0,15; desarrollo, 0,98; intermedia, 1,19; y final, de 0,35, inferiores a los obtenidos en la investigación. Se debe tener en cuenta que los valores de Kc solo se obtienen a través de la experimentación, ya que el crecimiento de la planta está influenciado por las condiciones cambiantes del clima, condiciones físicas y químicas del suelo, el manejo agronómico, sistema de riego y la capacidad genética del cultivo.

De igual manera, el consumo de agua se incrementa debido a que el área de cobertura vegetal es mayor, los procesos de crecimiento están relacionados con el comportamiento de los potenciales osmóticos y de turgencia, particularmente cuando las plantas están sujetas a variaciones en el contenido de humedad del suelo.

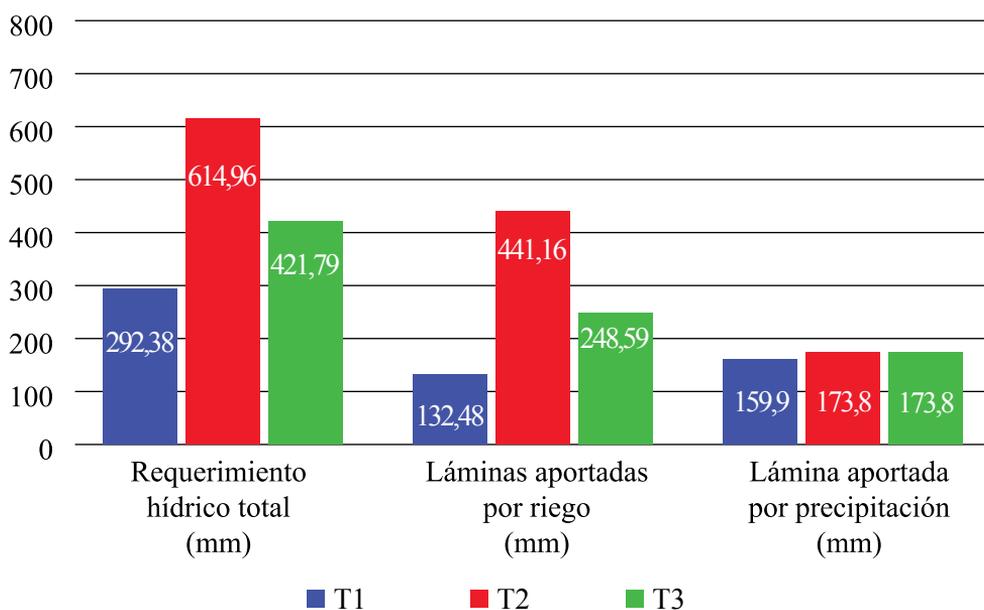
Los requerimientos hídricos y láminas de riego para las etapas fenológicas del cultivo se presentan en la tabla 4.18. En las etapas inicial, de desarrollo e intermedia, los valores de requerimientos hídricos para los tres tratamientos fueron inferiores a los expresados por Allen et al. (2016) de 58,4 mm, 178 mm y 81 mm, respectivamente. Los requerimientos hídricos en la etapa final para todos los tratamientos superaron los de Allen et al. (2016) que plantea 45 mm para la misma.

Tabla 4.18. Requerimientos hídricos y lámina de riego aplicada en las etapas fenológicas del cultivo fréjol (*P. vulgaris*) var. kalima

Tratamientos	Requerimientos hídricos (mm)				Lámina de riego (mm)			
	Fase inicial	Fase desarrollo	Fase intermedia	Fase final	Fase inicial	Fase desarrollo	Fase intermedia	Fase final
T1	33,13	62,51	43,93	152,8	27,13	32,71	20,43	52,21
T2	53,14	174,28	97,64	289,9	47,14	144,48	74,14	175,4
T3	10,55	88,05	69,28	132,9	4,55	58,25	45,78	21,95

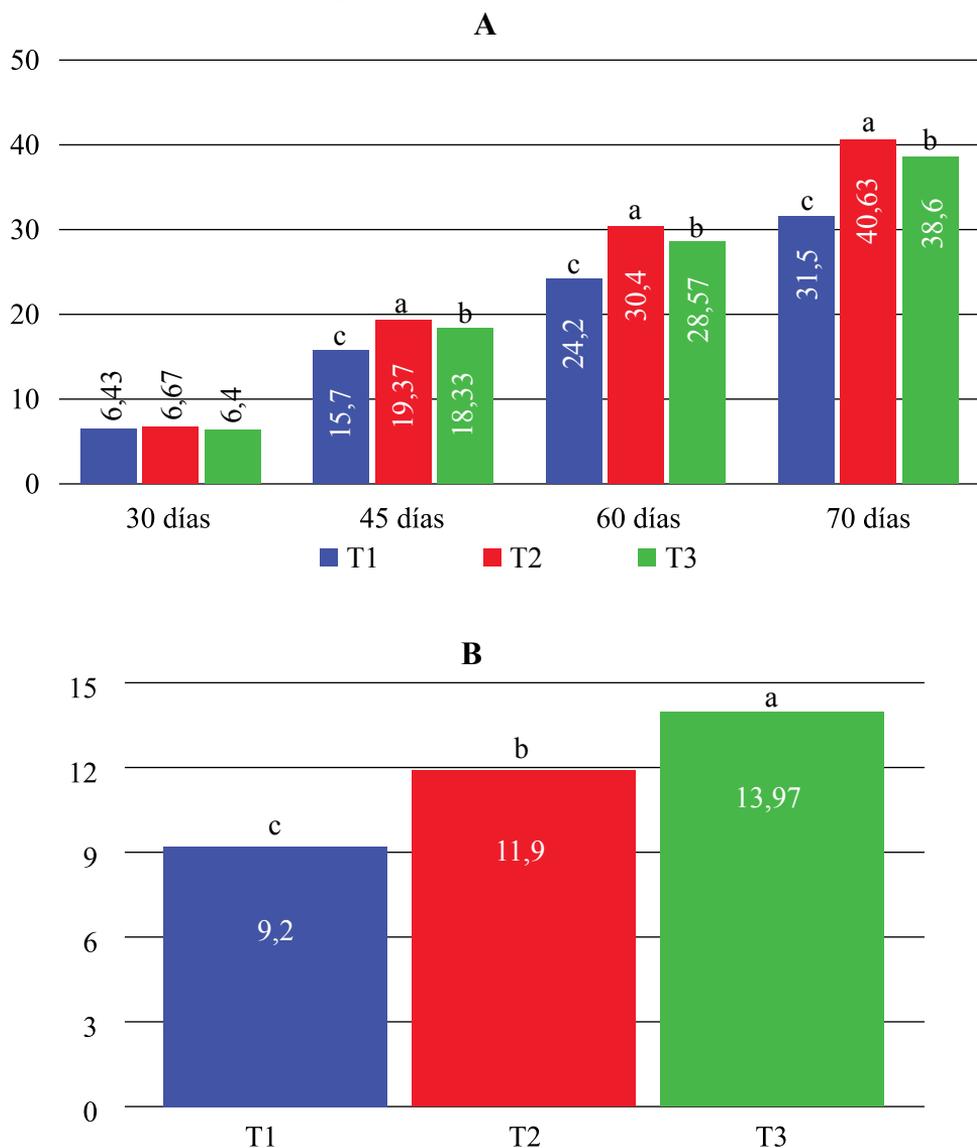
La diferencia del contenido relativo de agua (WRC) (fig. 4.54) fue influenciada por la aplicación de las láminas de riego en cada tratamiento.

Figura 4.54. Requerimiento hídrico y lámina de riego total aplicada en el ciclo de cultivo fréjol (*P. vulgaris*) var. kalima hasta la cosecha en verde



Para el número de vainas por plantas, el mejor tratamiento fue el T2, seguido por el T3 y el T1. Esto pudo suceder porque el fréjol es susceptible al exceso de humedad por lo que el T3, no logró el mayor número de vainas por plantas (fig. 4.55).

Figura 4.55. Altura (cm) (A) y promedio de vainas por planta (B) del cultivo fréjol (*P. vulgaris*) var. kalima por tratamiento

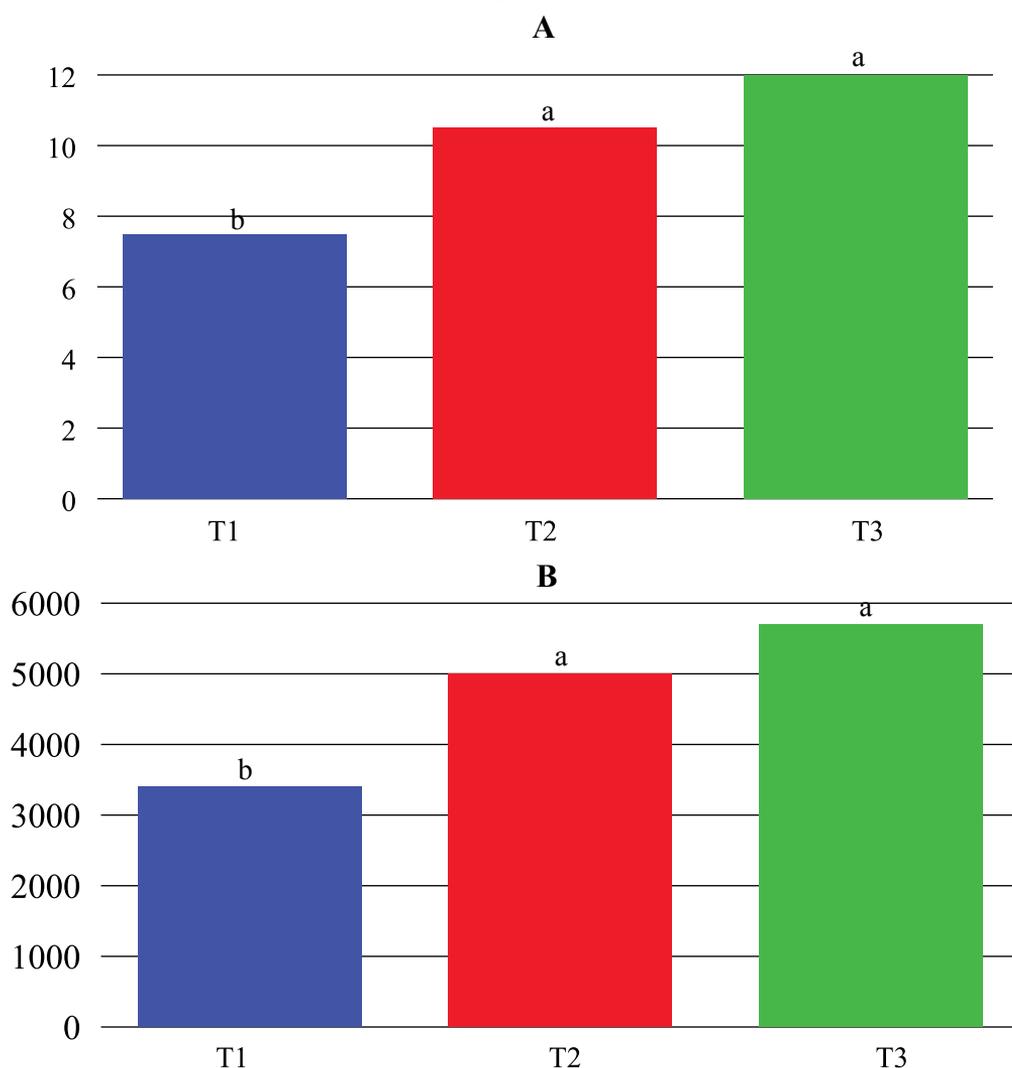


Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

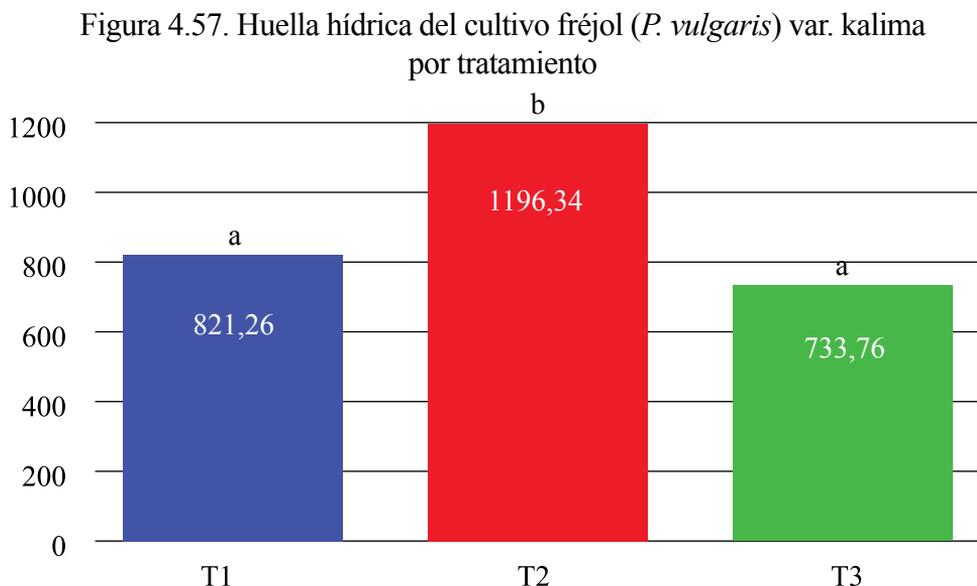
Para el rendimiento por parcela neta, el T3 y T2 lograron el mejor resultado, seguido por el T1. (fig. 4.56). El tratamiento 3 logró mayores rendimientos aunque no logró el mayor número de vainas, pero sí mayor peso.

Figura 4.56. Rendimiento en kilogramos (A) y por hectárea (B) de *P. vulgaris* var. kalima por tratamiento



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

Para la huella hídrica, el T3 y el T1 presentaron los valores más bajos para producir un kilogramo de fréjol. Los valores más altos fueron para el T2 (fig. 4.57)



El tratamiento de mayor beneficio neto resultó el T3, seguido del T2 y por último el T1 (tabla 4.19).

Tabla 4.19. Análisis económico. Relación beneficio-costo del cultivo fréjol (*P. vulgaris*) var. kalima por tratamiento

Tratamiento	Ingreso total	Costo total	B/C	Rentabilidad
T1	2414,30	2101,96	1,15	14,86
T2	3487,33	2101,96	1,66	65,91
T3	3889,71	2101,96	1,85	85,05

#### 4.5.8. Experiencia de estudio aplicado al cultivo de fresas

La investigación se realizó en el sector Durazno Pamba de la parroquia San Luis, con temperatura promedio anual de 14 °C, precipitación promedio anual de 520 mm, humedad relativa 75 %-80 % y el viento de 2,3 ms<sup>-1</sup>. Un ecosistema con clasificación bosque siempre verde montano bajo, sector norte y centro de la cordillera oriental.

Se utilizaron plántulas de fresa (*Fragaria ananassa*) cultivar albión (Chile). Se aplicó un bloque completamente al azar (DBCA, con seis tratamientos y tres repeticiones, dieciocho unidades experimentales. La aplicación de soluciones nutritivas se realizó desde la primera etapa fenológica, según los requerimientos nutricionales (cuadros 4.7 y 4.8).

Cuadro 4.7. Descripción de los tratamientos fertirriego para cultivo de fresa (*Fragaria ananassa*) cultivar albión.

Tratamiento	Dosis (mg Ca/l)
T1	75
T2	100
T3	125
T4	150
T5	175
T6	Agricultor

Cuadro 4.8. Soluciones nutritivas (mg/l) para el cultivo de la fresa (*Fragaria ananassa*) cultivar albión

Elemento/ fase	Solución nutritiva (mg/l)				
	Plantación	Vegetativa	Floración	Cuaje	Recolección
N	140	190	140	140	70
P	90	80	80	60	50
K	150	170	100	100	100
Ca	100	100	110	110	110
Mg	40	50	40	40	35
S	34	28	22	19	19

En la construcción de las camas, se levantaron platabandas con medidas de 40 cm x 40 cm separadas a 40 cm de camino para facilitar las labores fitotécnicas. Se incorporó material orgánico en la construcción de las camas de 15-20 cm de la base.

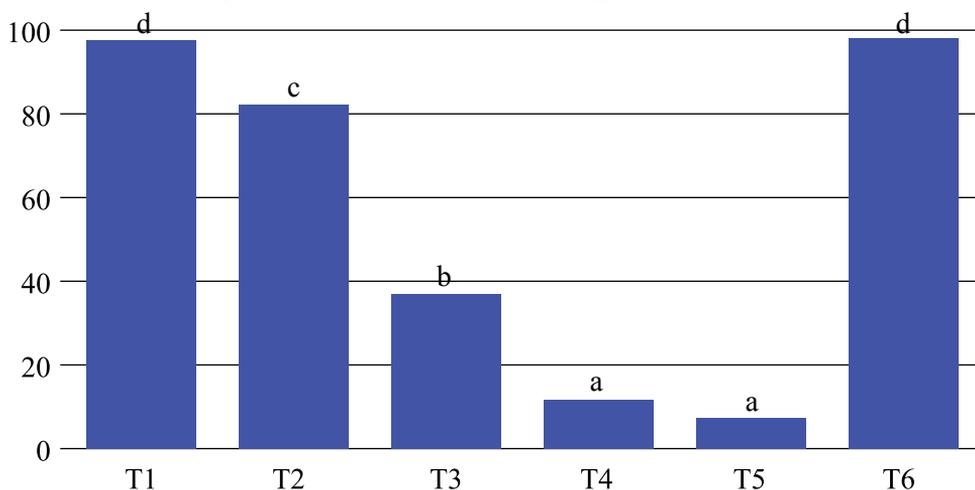
Se colocó la cinta de riego (italiana 2,1 L/h 2200) en la mitad, con goteros cada 20 cm, seguidos del sistema Venturi (española  $\frac{3}{4}$ ) en la tubería principal acoplado con una montura de  $\frac{3}{4}$ .

Los requerimientos hídricos durante el ciclo del cultivo fueron determinados mediante el cálculo de forma empírica por medio del tanque evaporímetro tipo A, según las condiciones climáticas de la estación meteorológica de la Espoch. De la solución madre (20 l), se prepararon las soluciones nutritivas (4,7 l en 20 l de agua) inyectadas por sistema Venturi por cada riego.

Se determinó la necrosis en los bordes de las hojas, número de flores por planta, cuajado de frutos, diámetro polar y ecuatorial del fruto, brix, peso fruto, categorías, rendimiento y la relación costo-beneficio.

En el porcentaje de necrosis en los bordes de hojas nuevas, se presentaron diferencias estadísticas altamente significativas a las 80 DDT. El mayor porcentaje está en las dosis 75 mg Ca/l y el testigo; los menores, en dosis de 175 mg y 150 mg Ca/l (fig. 4.58).

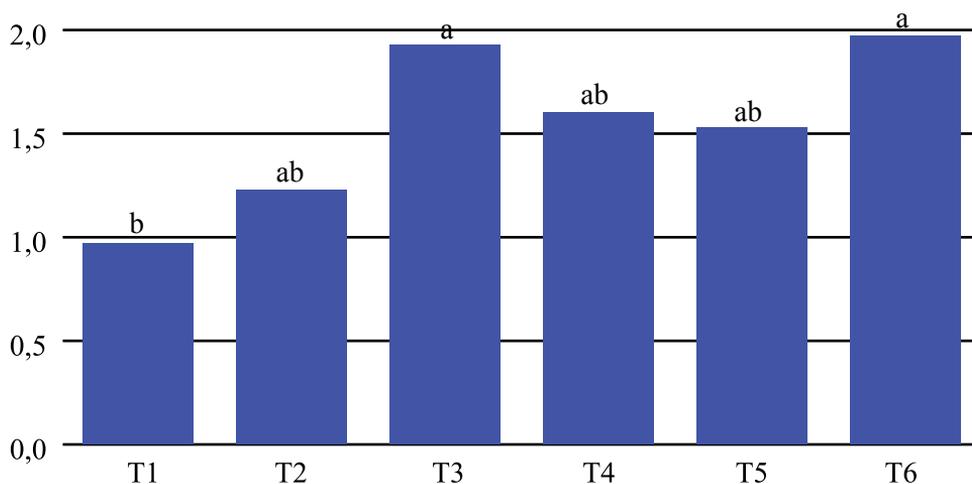
Figura 4.58. Porcentaje de necrosis en los bordes de las hojas nuevas en planta a los 80 DDT para el cultivo de la fresa (*Fragaria ananassa*) cultivar Albión



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

El número de flores presentó diferencias estadísticas significativas, con mayor número de flores el T3 y T6, y el T1 con menor número (fig. 4.59). Este comportamiento se mantuvo a los 140 y 155 DDT.

Figura 4.59. Número de flores por planta a los 125 DDT para el cultivo de la fresa (*Fragaria ananassa*) cultivar albión



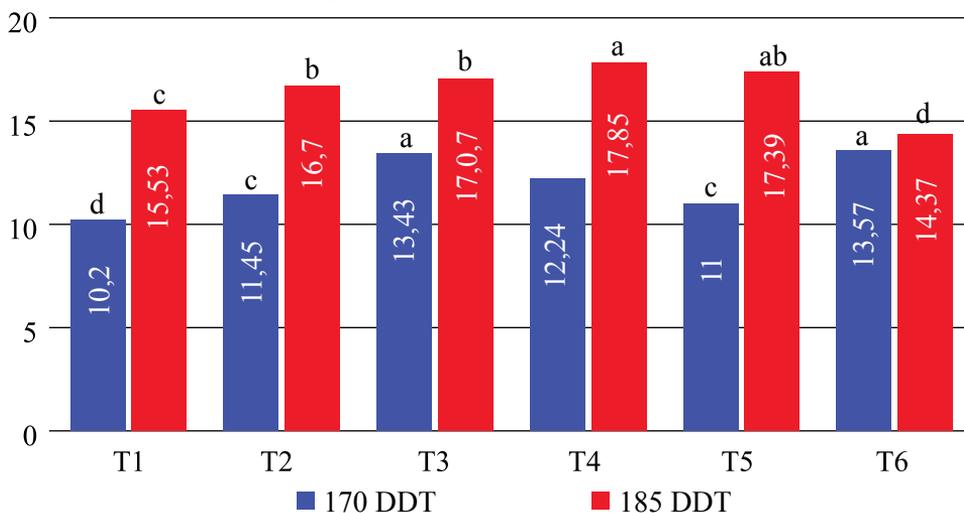
Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

En relación con el número de frutos por planta a los 155 DDT, no se presentaron diferencias estadísticas significativas. Las diferencias entre los tratamientos estuvieron marcadas a los 170 DDT, cuando los T3 y T6 fueron superiores, y a los 180 DDT, cuando los T4 y T5 resultaron con mayor número de frutos (fig. 4.60).

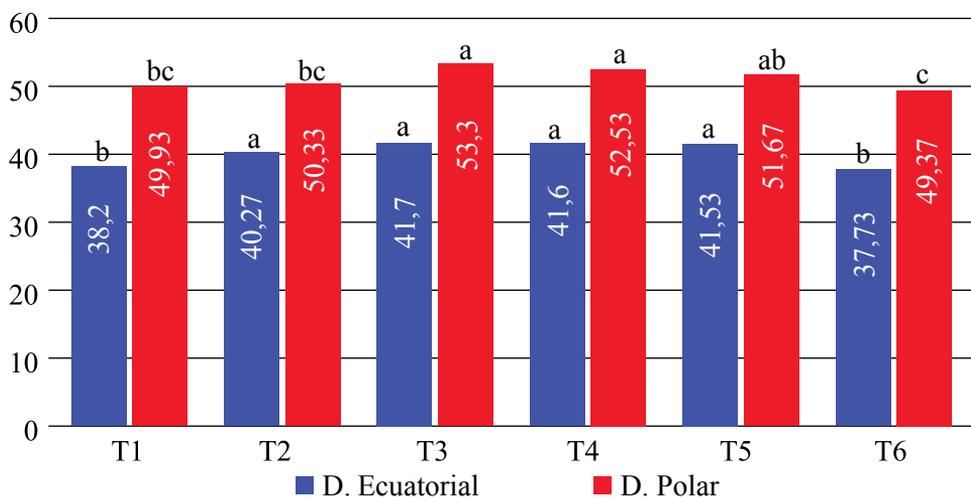
Para el diámetro ecuatorial, se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. T3, T4 y T5 fueron superiores, contrario a los T1 y T6 con menor diámetro (fig. 4.61).

Figura 4.60. Número de flores por planta a los 125 DDT para el cultivo de la fresa (*Fragaria ananassa*) cultivar albión



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

Figura 4.61. Diámetro ecuatorial y polar (mm) para el cultivo de la fresa (*Fragaria ananassa*) cultivar albión

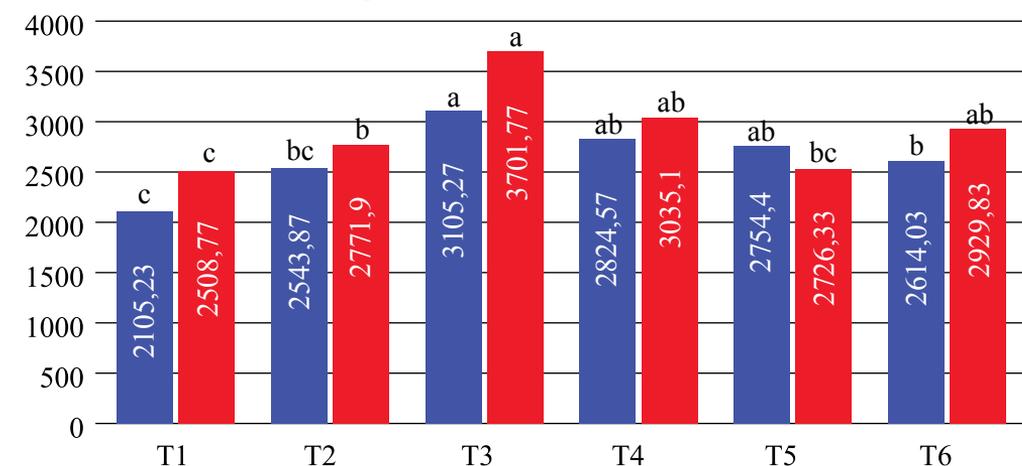


Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

En el diámetro polar del fruto, los T3 y T4 resultaron superiores por encima de 52 mm. El T6, con una media de 49,37, fue el tratamiento con menor resultado.

Las dosis aplicadas influyeron en los rendimientos a los 172 DDT y 179 DDT (fig. 4.62). Se presentaron diferencias estadísticas significativas, siendo superior el T3, y el T1 resultó el de menor rendimiento con una diferencia de 1000 kg.

Figura 4.62. Diámetro ecuatorial y polar (mm) para el cultivo de la fresa (*Fragaria ananassa*) cultivar albión



Medias con letras distintas en la misma columna difieren según prueba Tukey para  $p \leq 0,05$ .

Según el análisis beneficio-coste, con la aplicación de la dosis, se logró una mayor rentabilidad de 134 % y la menor se obtuvo con el T6 (agricultor) (tabla 4.20).

Tabla 4.20. Análisis económico. Relación beneficio-costos del cultivo de la fresa (*Fragaria ananassa*) cultivar albión por tratamiento

Tratamiento	Ingreso total	Costo total	B/C
T1	9744,0	6615,12	1,47
T2	11 595,29	6710,98	1,73
T3	15 719, 53	6727,64	2,34
T4	13 993,41	6744,29	2,07
T5	12 122,35	6760,96	1,79
T6	11 002,35	8096,81	1,36

El mejor tratamiento (T3) estuvo acompañado de una lámina de riego total de 325 mm, con frecuencia de riego de tres días, y una huella hídrica de 43 l kg<sup>-1</sup>. Con la aplicación de 137,5 mg Ca/l<sup>-1</sup> (T3) en la solución nutritiva logró los mayores promedios en las variables evaluadas, y un rendimiento de 55,8 t ha<sup>-1</sup> y 66,6 t ha<sup>-1</sup> al año.

## CONCLUSIONES

El estudio de la evapotranspiración constituye una necesidad para los especialistas en riego y drenaje, que tienen como disyuntiva las variaciones de los regímenes de precipitaciones y temperatura causados por el cambio climático en muchas regiones del mundo. Estas variaciones inciden en mayor evapotranspiración de los cultivos con el consecuente incremento de las necesidades hídricas de los cultivos.

Conocer las necesidades de agua y determinar la huella hídrica, con la consecuente relación costo-beneficio de diferentes cultivos a partir de la estimación de la evapotranspiración potencial sobre la base de coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) obtenidos en Ecuador, permitirá evaluar eficientemente este componente.

Los resultados expuestos a partir de la experiencia con varios cultivos permiten afirmar que existe una correlación entre los tratamientos, y se demuestra además que, al aplicar más agua con el riego, no aumentan los rendimientos en los cultivos. El uso de los lisímetros como método directo aporta información precisa en la determinación de los requerimientos hídricos de las plantas; de igual manera, las fórmulas empíricas aportan una estimación confiable según los datos meteorológicos del área. Sobre esta base, se recomienda el uso de los lisímetros como método directo para tener una buena aproximación de los requerimientos hídricos de los cultivos.

De esta manera, queda demostrada la necesidad de adaptar estrategias de riego más eficientes con herramientas y modelos de cálculo de evapotranspiración, además de la genética de las variedades y su adaptación a las condiciones edafoclimáticas de las distintas regiones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abedinpour, M. (2015). Evaluation of Growth Stage Specific Crop Coefficients of Maize Using Weighing Lysimeter. *Soil & Water Res*, 10 (2): 99-104.
- Aboukhaled, A., Alfaro, A., y Smith, M. (1982). Lysimeters. *Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. Irrigation and drainage paper*, 39.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Servicio de Recursos, Fomento y Aprovechamiento de Aguas. FAO. <http://ftp.fao.org/docrep/fao/009/x0490s/x0490s00.pdf>
- Álvarez H., J. G., Alvarado S., O. H., y Suesca O., F. A. (2017). Efecto de diferentes láminas de riego en el crecimiento y desarrollo de cebolla de bulbo (*Allium cepa* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11 (2): 359-367. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2017v11i2.7345>
- Andino, W. A. (2011). *Evaluación de tres tipos de violes en la producción de fréjol* (tesis de grado ingeniero agrónomo). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Apacla, R. y Huachos, R. (2008). *Necesidades de agua y evaluación de los sistemas de riego intermitente y continuo en el cultivo de brócoli*. [http://ceer.isa.utl.pt/cyted/brasil2008/posters/poster\\_RApacla.pdf](http://ceer.isa.utl.pt/cyted/brasil2008/posters/poster_RApacla.pdf)
- Ávila, E. (2015). *Manual zanahoria*. Cámara de Comercio Bogotá. <http://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/14309/Zanahoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Barbieri, J. D., Lourenco de Freitas os, Dallacort, R., Rezende, R., Ribeiro da Silva, A. B., Fenner, W., et al. (2020). Influence of Soil Coverage on Evapotranspiration and Dual Coefficients on Soybean. *Journal of Experimental Agriculture International*, 42 (6): 111-125.

- Bonierbale, M., Haan, S., y Forbes, A. (2010). *Procedures for Standard Evaluation Trial of Advanced Potato Clones*. International Cooperators Guide. International Potato Center (CIP).
- Bonilla, N. (2009). Evaluación y selección agronómica de cuarenta genotipos de papa (*Solanum tuberosum* L.) para tolerancia a estrés hídrico en tres localidades de la provincia de Chimborazo (tesis de grado ingeniero agrónomo). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Caicedo J., W. F. y Sono H., F. X. (2014). Fertilización química en el cultivo de la zanahoria (*Daucus carota*) con tres fuentes nitrogenadas más el micronutriente boro, precursores de carotenos y vitamina A. Universidad Técnica de Cotopaxi. <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/2560/1/T-UTC-00095.PDF>
- Cardona, C., Jarma, A.J., Araméndiz, H., et al. (2014). Respuesta fisiológicas y bioquímicas del frijol caupi (*Vigna unguilata* L. Walp) bajo déficit hídrico. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.*, 8 (2): 250-261.
- Carvalho, D. F., Neto, O., Felix, L. F., Guerra, J. G., y Salvador, C. A. (2016). Yield, Water Use Efficiency, and Yield Response Factor in Carrot Crop under Different Irrigation Depths. *Ciencia Rural*, 46 (7): 1145-1150.
- Cely, G. (2010). Determinación de parámetros de riego para el cultivo cebolla de bulbo en el distrito de riego del alto Chicamoha. Bogotá, Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/2743/1/790551.2010.pdf>
- Chanalata, C. y Marghoth, Y. (2013). Respuesta de la cebolla perla (*Allium cepa* L.) a cuatro densidades de siembra y dos láminas de riego. Ascázubi, Pichincha (tesis de grado). Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec:8080/handle/25000/1100>
- Chávez, S., y Mesías, D. (2018). Evaluación de tres métodos para determinar el requerimiento hídrico del cultivo de maíz (*Zea mays*. L.) var INIAP 102, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo (tesis de grado ingeniero agrónomo). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/10351>
- Delmhorst. (1999). *Manual de funcionamiento de los bloques de modelo KS-D1*. [www.delmhorst.com](http://www.delmhorst.com)

- Denioa, J., Sosa, O., Zerpa, G., y Martín, B. (2000). *Efecto del pisoteo animal sobre la velocidad de infiltración y sobre otras propiedades físicas del suelo*. Zavalla.
- Díaz, C. y Jaramillo, J. (2006). *El cultivo de crucíferas brócoli, coliflor, col repollo y china. Manual Técnico*, 20. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.
- Domínguez, A., Martínez, Y., Pérez, Y., et al. (2016). Comportamiento de variedades de frijol común, cubanos y venezolanos, cultivados en condiciones de sequía. *Revista Ciencia UNEMI*, 9 (20).
- Erdem, T., Arin, L., Erdem, Y., Polat, S., Deveci, M., Okursoy, H. et al. (2010). Yield and Quality Response of Drip Irrigated Broccoli (*Brassica oleracea* L.) var. Italica under Different Irrigation Regimes, Nitrogen Applications and Cultivation Periods. *Agricultural Water Management*, 97: 681-688.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2016). Yield and Area of Dry Onions in 2010. En *Statistical Database*. <http://fenix.fao.org/faostat/beta/en/?#-data/QC>
- Fernández, D., Martínez, M., Tavarez, C., Castillo, R. y Salas, R. (2010). *Estimación de las demandas de consumo de agua. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*, 73. [http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/INSTRUCTIVO\\_DEMANDAS%20DE%20AGUA.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/INSTRUCTIVO_DEMANDAS%20DE%20AGUA.pdf)
- Feader. Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural. (2018). *Introducción a la evapotranspiración del agua en las plantas cultivadas. Informaciones técnicas*. Dirección General de Desarrollo Rural Centro de Transferencia Agroalimentari, 269.
- Forero U., F.E., Cely R., G. E., Neira R., D. E. (2015). Requerimientos hídricos de la zanahoria (*Daucus carota* L.) durante tres etapas de su desarrollo. *Ciencia y Agricultura*, 12 (2): 43-50. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=560058661005>
- Freire, C. (2012). Aclimatación y rendimiento de 14 cultivares de cebolla colorada (*Allium cepa* L.) a campo abierto, en Macají, cantón Riobamba, provincia

Chimborazo (tesis de grado, ingeniero agrónomo). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Fuente, A. (2006). *Programación de riego con tensiómetros*. <http://www.tensio-metrosuelo/agua.html>

Gabriel, J. (2017). El agua y las consecuencias que esta genera en la agricultura y el medio ambiente. *Journal of the Selva Andina Biosphere*. 5 (1):1-3. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2308-38592017000100001](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-38592017000100001)

Garay, O. (2009). *Manual de uso consuntivo del agua para los principales cultivos de los Andes Centrales peruanos*.

García, M., Puppo, L., Hayashi, R., y Morales, P. (2012). *Metodología para determinar los parámetros de un suelo a campo*. Grupo del desarrollo de Riego. <http://www.grupodesarrolloriego.uy/pdf/2-seminario-2012/metodologia-para-determinar-los-parametros-hidricos-de-un-suelo-a-campo.pdf>

Gebler, S., Hendricks Franssen, H. J., Putz, T., Post, H., Schmidt, M., Vereecken, H. (2015). Actual Evapotranspiration and Precipitation Measured by Lysimeters: A Comparison with Eddy Covariance and Tipping Bucket. *Hydrol Earth Syst Sci*, 19: 2145-2161

Gheysari, M., Sadeghi, S. H., Loescher, H. W., Amiri, S., Zareian, M. J., Majidi, M. M. et al. (2017). Comparison of Deficit Irrigation Management Strategies on root, Plant Growth and Biomass Productivity of Silage Maize. *Agricultural Water Management*, 182: 126-138. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.12.014>

González, J. (2010). Manejo de agua y nutrición del cultivo de brócoli. *Horticultivo*. <http://www.horticultivos.com/manejo-del-agua-y-nutricion-del-cultivo-de-brocoli/>

González M., C. A., Quintero B., Q. R., Flórez R., V. J., y Quintero C., M. F. (2020). Lisímetros volumétricos. Capítulo 9. En V. J. Flórez R. (ed.). *Consideraciones sobre producción, manejo y poscosecha de flores de corte con énfasis en rosa y clavel*, pp. 135-166. Editorial Universidad Nacional de Colombia. <https://www.researchgate.net/publication/341273194>

Guamán G., R. N., Desiderio V., T. X., Villavicencio A., A. F., Ulloa C., S. M., y Romero S., E. J. (2020). Adaptabilidad de cuatro variedades de fréjol

- (*Phaseolus vulgaris* L.) en la parroquia Luz de América, Ecuador. *Siembra*, 7 (1), Universidad Central de Ecuador.
- Gutezeit, B. (2004). Yield and Nitrogen Balance of Brocoli at Different Soil Moisture Levels. *Irrigation Science*, 23: 21-27.
- Haro, M., y Maldonado, L. (2009). *Guía técnica para el cultivo de brócoli en la serranía ecuatoriana*. Editorial Pedagógica.
- Howel, T. A., Schneider, A. D., y Jensen, M. E. (1991). History of Lysimeter Design and Use for Evapotranspiration Measurements [Conference Proceeding Paper]. American Society of Civil Engineers. <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?72381>
- Imtiyaz, M., Mgadla, N. P., Manase, S. K., Chendo, K., y Mothobi, E. O. (2000). Yield and Economic Return of Vegetable Crops under Variable Irrigation. *Irrigation Science*, 19: 87-93.
- Infoagro. 2018. El cultivo del maíz. *Infoagro*. <http://www.infoagro.com/herbaceos/cereales/maiz.htm>
- INIAP. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (2000). *INIAP 102 «blanco blandito mejorado» variedad de maíz blanco harinoso para la provincia de Chimborazo*. <http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/documentos/INIAP%20102%20Blanco%20Blandito%20Mejorado.%20Variedad%20de%20ma%C3%ADz%20Blanco%20harinoso%20para%20la%20provincia%20de%20Chimborazo.pdf>
- Intagri. (2017). La evapotranspiración de los cultivos. *Intagri*. <http://www.intagri.com/articulos/agua-riego/la-evapotranspiracion-de-los-cultivos>
- . 2018. Los procesos de germinación y emergencia en el cultivo de maíz. *Intagri*. <http://www.intagri.com/articulos/cereales/procesos-de-germinacion-y-emergencia-en-el-cultivo-de-maiz>
- Jaramillo, D. (2012). Evaluación y selección de dieciséis genotipos de papa (*Solanum spp.*) con tolerancia al déficit hídrico en dos localidades de la provincia Chimborazo (tesis de grado, ingeniero agrónomo). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Johnson, L. F., Cahn, M., Martin, F., Melton, F., Benzen, S., Farrara, B., et al. (2016). Evapotranspiration-Based Irrigation Scheduling of Head Lettuce and

- Broccoli. *Hort Science*. 51 (7): 935-940. <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/51/7/article-p935.xml>
- Lanthaler, C. (2004). Lysimeter Stations and Soil Hydrology Measuring Sites in Europe. Purpose, Equipment, Research, Results, Future Developments (tesis de maestría). Karl-Franzens-University Granz.
- León R., J. (2012). *Riegos y drenaje*. E-Copycenter.
- . (2016). Modelación matemática para estimar los requerimientos hídricos del cultivo de papa (*Solanum spp.*) en Riobamba, Ecuador (tesis de grado de *doctoris philosophie* en Recursos Hídricos). Epoch. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2833>
- León R., J., Montalvo A., N., Alarcón P., P. (2016). Determinación del coeficiente del cultivo y parámetros biométricos basados en imágenes captadas con drones, lisímetros de drenaje y métodos para el cultivo de la papa (*Solanum spp.*). *Revista del Instituto de Investigación (RIIGEO)*, 19 (37): 177.
- López, L. G., Magaña, L. N., y Vázquez, R. C. (2014). *Componente de agricultura familiar periurbana y de traspatio*. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y alimentación. [www.agriculturafamiliar.mx](http://www.agriculturafamiliar.mx)
- López, U. R., Montoro, A., López, F. P., y Fereres, E. (2009). Evapotranspiration and Responses to Irrigation of Broccoli. *Agricultural Water Management*, 96: 1155- 1161.
- Maldonado, H. (2012). Uso de lisímetros de drenaje artesanales para determinar el Kc de los principales estados fenológicos de la uva de mesa cv. Thompson Seedless en el Valle de Aconcagua (tesis de grado, ingeniero agrónomo). Universidad de Aconcagua.
- Martínez, A. (2004). Necesidades hídricas en cultivos hortícolas. *Revista Horticultura*. [http://www.horticom.com/revistaonline/horticultura/rh177/034\\_041.pdf](http://www.horticom.com/revistaonline/horticultura/rh177/034_041.pdf)
- Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (Magap). (2006). *Boletines agroclimáticos mensuales: 2001-2006*. <http://www.sica.gov.ec/agro/agroclima/bol-mens.htm>
- Morales, J. (1995). *Cultivo de zanahoria*. Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal. <http://www.cedaf.org.do/publicaciones/guias/download/zanahoria.pdf>

- Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, C., et al. (2009). Climate Change: Impact on Agriculture and Costs of Adaptation. *Food Policy Report 21*. International Food Policy Research Institute (IFPRI). <http://www.ofpri.org/publication/climate-change-1>
- Nicolas, G., Bernal, V., Romero, C., Rodríguez, C., y Josee, J. (2019). Expectativas de la cosecha de maíz 2019. *Revista El Productor*. <https://elproductor.com/wpcontent/uploads/2019/04/revista%20abril%20maiz.pdf>
- Olivares, B. O. y Hernández, R. A. (2019). Sectorización ecoterritorial para la producción agrícola sostenible del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Carabobo, Venezuela. *Cienc Tecnol Agropecuaria*, Mosquera (Colombia), 20 (2): 323-338.
- Olivera, G. L., Merlin, O., Er-Raki, S., Khabba, S., y Escorihuela, M. J. (2018). Estimating The Water Budget Components of Irrigated Crops Combining The FAO-56 Dual Crop Coefficient with Surface Temperature and Vegetation Index Data. *Agrc. Water Manag*, 208, 120-131.
- Oliveira T., D. C., Ferreira, E., y Dantas A., A. A. (2016). Temporal Variation of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Calculation of The Crop Coefficient (Kc) from NDVI in Areas Cultivated with Irrigated Soybean. *Ciencia Rural*, 46 (9): 1683-1688.
- Otero, A., Montoya, F., García, C. (2017). *Programación del riego*, Serie técnica, 232. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA.
- Paguay C., S. C. (2017). Determinación de los requerimientos hídricos para el cultivo de la cebolla colorada (*Allium cepa* L.) Var. burguesa en base al contenido de agua en el suelo, en Macají, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo (tesis de grado, ingeniero agrónomo). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/7643>
- Payero, J. O., e Irmak, S. (2008). Construction, Installation, and Performance of Two Repacked Weighing Lysimeters. *Biological Systems Engineering: Irrigation Science* 26 (49): 191-202. Doi: 10.1007/500271-007-0085-9.
- Peña M., R. F. (2018). Riego parcial por goteo a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp.*) variedad victoria, Riobamba, Ecuador (tesis de maestría). Escuela de Posgrado Universidad Nacional Agraria La Molina.

- Polón, P. R., Miranda, C. A., Ramírez A., M. A., y Maqueira L., L. A. (2014). Efectos del estrés de agua sobre el rendimiento de granos en la fase vegetativa en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23 (4): 33-36.
- Risco, D., Gutiérrez, A., Val, J., León, J., Díaz, A., Benalcázar, P., et al. (2018). Programación de riego en brócolis (*Brassica oleracea* L. cv. itálica) en los Andes ecuatorianos. *Idesia*, 36 (1): 57-63.
- Sacón, F. C., Chávez, J. C., Dueñas, J. C., Mendoza, J., Álava, G. L., y García, G. C. (2018). Aplicación foliar de micronutrientes y fitorreguladores como complemento de la fertilización edáfica en maíz amarillo duro. *La Técnica*, 19: 19-30.
- Sagarpa. (2011). *Monografía de cultivos (Brócoli)*. <http://www.sagarp.gob.mx/agronegocios/estudios/documents/monografias/brocoli.pdf>
- Sahara, M., Yadav, A., Dahiya, M., Singh, A., y Singh, V. (2006). Efecto de los niveles de riego en la producción de raíces de variedades de zanahoria recién desarrolladas. *Haryana Journal of Horticultural Sciences*, 35 (3): 364-365.
- Salazar B., F. G. (2020). Diseño, instalación y calibración de bloques de siete lisímetros de drenaje para ajuste de coeficiente de cultivos ( $K_c$ ) (tesis de grado, ingeniero agrónomo). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Salisbury, F. B. y Ross, C. W. (2000). *Fisiología de las plantas. Células: agua, soluciones y superficies*. Paraninfo.
- Sánchez, D. M. y Aguirreola, J. (2013). Transpiración y control estomático. En B. J. Azcón y M. Talón (coord). *Fundamentos de fisiología vegetal*. Mc Graw Hill.
- Sauter, M. (2013). Root Responses to Flooding. *Curr. Opin. Plant Biol.* 16 (3), 282-286. Doi: 10.1016/j.pbi.2013.03.013
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., y Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development*, 6.<sup>a</sup> ed. Sinauer Associates.
- Tapia, C., Paredes, N., Naranjo, E., Tacán, M., Monteros, A., Pérez, C., et al. (2017). *Caracterización morfológica de la diversidad de razas de Zea mays en la Sierra Norte de Ecuador*. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.

- Trout, T. J. y Bausch, W. (2017). USDA-ARS Colorado Maize Water Productivity Data Set. *Irrigation Science*, 35: 241-249. <https://doi.org/10.1007/s00271-017-0537-9>
- Tuñón, J. (2000). *Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas*. Universidad Jaume I Castellón. España.
- Vallejo, J. (2013). *Elaboración de un manual guía técnico práctico del cultivo de hortalizas de mayor importancia socioeconómica de la región interandina*. Universidad Central del Ecuador.
- Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C., y Cañamero, M. 2017. *Fundamentos de la ingeniería de riego*. Q & P Impresores S.R.L.
- Vásquez, S. (2008). Determinación del  $K_c$  durante los estadios fenológicos de cebolla de bulbo (*Allium cepa* L.) en el distrito del alto Chicamoha. Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia.
- Vega, R. T., Méndez, S. C., Rodríguez, M. W. (2012). Análisis del crecimiento de cinco híbridos de zanahoria (*Daucus carota* L.) mediante metodología de análisis funcional. *Agronomía Costarricense*, 36 (2).
- Villa, F. G. (2014). A propósito de la gestión del agua en el mundo contemporáneo. Un enfoque biopolítico. *Anal. Polit.* 74, 109-133. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/anpol/article/view/43721>
- Villazón, J., Martín. G., Rodríguez, Y., y Cobo, Y. (2015). Resistencia a la penetración en un Vertisol Crómico con diferentes usos, manejos y sitios de muestreo. *Pastos y Forrajes* [online]. 38 (2): 162-169. <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v38n2/pyf02215.pdf>
- Wright, J. L. (1991). Using Weighing Lysimeters to Develop Evapotranspiration Crop Coefficients. En ASCE (ed.). *Lysimeter for Evapotranspiration and Environmental Measurements*, pp. 191-199. ASCE.
- Yumbo, G. J. (2019). Evaluación de tres métodos para determinar los requerimientos hídricos en el cultivo de zanahoria (*Daucus carota* L.) var. chantenay en Macají, Cantón Riobamba, provincia Chimborazo (tesis de grado, ingeniero agrónomo). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Zambrano, A. (2012). Exportación de brócoli estable. *El Agro*, 18 (1). <http://www.revitelagro.com/2013/01/18/exportacion-de-brocoli-estable/>

La producción agropecuaria a escala mundial tiene, entre sus principales misiones, abastecer de alimentos a la población y promover el desarrollo socioeconómico de las comunidades. El déficit de agua provocado por el aumento de la temperatura y las variaciones en los regímenes pluviales a consecuencia del cambio climático tiene efectos directos sobre los rendimientos de los cultivos. Los indirectos afectan la disponibilidad de agua de riego en los sistemas agrícolas. La utilización eficiente de este recurso se impone como una necesidad para lograr un desarrollo agrario sustentable. El uso de los lisímetros permite desarrollar estrategias para determinar de manera aproximada los requerimientos hídricos de los cultivos.

Este libro está estructurado en cuatro capítulos. En el primero, se abarcan las distintas definiciones de lisímetros, evapotranspiración de referencia y el coeficiente del cultivo, los factores que lo afectan y cómo puede ser determinado. El segundo capítulo se ocupa de los principios de lisimetría, tipos y funciones de los lisímetros, las metodologías para su instalación y uso, y los factores que inciden en su funcionamiento adecuado. El tercer capítulo se centra en describir el protocolo del centro de estudios de riego de la Espoch para el diseño e instalación de lisímetros, como experiencia práctica. Por último, en el cuarto capítulo, se presentan experiencias de estudios sobre recursos hídricos y lisimetría, desarrollados en la Estación Experimental Tunshi de la Facultad de Recursos Naturales para varios cultivos. La obra puede constituir un referente práctico a la hora de manejar los sistemas de riego por los profesionales de la agricultura.

**Juan Eduardo León Ruiz.** Ingeniero agrónomo graduado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, tiene el título de magíster en Agricultura Sustentable emitido por la UTA, obtuvo el título final de PhD en Recursos Hídricos, otorgado por la Universidad Nacional Agraria La Molina en Lima, Perú, ha realizado varios cursos de capacitación en su área específica en varios países del mundo.

**Juan Eduardo León Terán.** Ingeniero agrónomo graduado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, con orientación en diseño y manejo de sistemas de riego presurizados por medio de *softwares* digitales, con título de máster en Riegos mención Riego Parcelario en la ESPOCH.

ISBN: 978-9942-44-541-4

