

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS



**“RIEGO PARCIAL POR GOTEO A NIVELES DE HUMEDAD DEL
SUELO EN LA PAPA (*Solanum* spp.) VARIEDAD VICTORIA,
RIOBAMBA, ECUADOR”**

Presentada por:

ROBINSON FABRICIO PEÑA MURILLO

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

Lima - Perú

2018

DEDICATORIA

A Dios por ser por ser el inspirador para cada uno de mis pasos dados en mí convivir diario, en memoria de mis abuelitos Juanita y Luis por ser un ejemplo de trabajo y dedicación, a mis papás Luisa y Carlos por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, fomentando en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida, a mi hermana Erika por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso. A toda mi familia porque con sus consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

Robinson

AGRADECIMIENTO

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo, otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

A la Universidad Nacional Agraria La Molina “UNALM” – en especial al Programa de Maestría de Recursos Hídricos por permitirme realizar mis estudios de Maestría.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo “ESPOCH” con su Centro Experimental del Riego (CER) por haberme facilitado la apertura suficiente para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de la investigación.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias “INIAP” con su Programa de Raíces y Tubérculos en especial a Xavier Cuesta y Jorge Rivadeneira.

A mi director de tesis, Dr. Néstor Montalvo por su esfuerzo y dedicación, quien, con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en mí que pueda terminar mis estudios con éxito.

También me gustaría agradecer a mis profesores durante toda mi carrera profesional porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación, y en especial a mis profesores al Mg.Sc. David Ascencios, Mg.Sc. Ricardo Apaclla Nalvarte y Dr. Abel Mejía Marcacuzco por sus consejos, su enseñanza y más que todo por su amistad.

A Nilda, Vilma, Hilda y Lourdes por su valiosa colaboración en mis estudios.

De igual manera agradecer de manera especial y sincera a Juan León por su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida, por su rectitud en su profesión como docente, por sus consejos, que ayudan a formarte como persona e investigador.

Y por supuesto a mis amigos Blanca, Marlon, Zuen, Wendy, Gladis, Eva, Jacinto, Roberto, Aparicio, Edgar, que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado.

Al personal técnico y de campo del Centro Experimental del Riego, Paul Benalcazar, Jorge Segovia, Cristian Inga, Cristian Lema, Daniel Salguero, Juan Gaibor, Daniel Ortiz, Pedro Majín.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos de la investigación	2
1.1.1. General	2
1.1.2. Específicos.....	2
1.2. Justificación de la investigación	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Antecedentes sobre requerimientos hídricos del cultivo de papa.....	4
2.2. El Agua.....	5
2.3. Relación agua-suelo-planta-atmósfera	6
2.3.1. Agua en el suelo.....	6
2.3.2. Relación planta - atmósfera	9
2.3.3. Evapotranspiración	13
2.3.4. Coeficiente de cultivo (K_c)	18
2.4. Sistema de riego.....	20
2.4.1. Fundamentos de riego	21
2.4.2. Riego por goteo.....	23
2.4.3. Riego parcial.....	23
2.4.4. Efectos del riego parcial	25
2.5. Déficit hídrico.....	27
2.5.1. Definición de déficit hídrico.....	27
2.5.2. Estrés hídrico	27
2.5.3. Tolerancia al déficit hídrico.....	28
2.6. Cultivo de papa (<i>Solanum</i> spp.).....	29
2.6.1. Condiciones para la siembra.....	29
2.6.2. Características de la variedad INIAP–Victoria	30
2.6.3. Requerimiento hídrico de la papa	31
2.7. Estadística.....	32
2.7.1. Prueba de Scheffé	32
III. MATERIALES Y MÉTODOS	34
3.1. Zona de estudio.....	34
3.1.1. Condiciones climáticas.....	35

3.1.2. Clasificación ecológica	35
3.2. Características del suelo	35
3.2.1. Características del agua	36
3.3. Materiales y equipos	36
3.3.1. De campo	36
3.3.2. De gabinete	36
3.4. Metodología.....	37
3.4.1. Precampo	37
3.4.2. Fase de campo.....	42
3.4.3. Fase de gabinete.....	50
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
4.1. Variación climática durante la fase experimental.....	52
4.1.1. Temperatura y precipitación.....	52
4.1.2. Humedad relativa y velocidad del viento	53
4.2. Variación de la humedad en el suelo	54
4.2.1. Humedad mediante el método gravimétrico.....	54
4.3. Determinación de los parámetros biofísicos	55
4.3.1. Emergencia	55
4.3.2. Altura de la planta.....	56
4.3.3. Raíz	62
4.4. Relación bulbo de humedecimiento y sistema radicular.....	68
4.5. Identificación del estado fenológico y requerimiento hídrico por etapa fenológica. .	72
4.5.1. Estados fenológicos.....	72
4.5.2. Determinación del coeficiente de cultivo (K_c) de la papa variedad victoria.	77
4.5.3. Determinación del requerimiento hídrico por etapa fenológica	80
4.6. Rendimiento	81
4.6.1. Tubérculos por planta.....	81
4.6.2. Materia seca de tubérculo.....	82
4.6.3. Producción por planta	84
4.6.4. Rendimiento por categorías.....	86
4.6.5. Rendimiento total.....	88
4.7. Relación de agua utilizada y producción	89
4.7.1. Volumen de agua utilizada por kilogramo de producción	89
V. CONCLUSIONES.....	91

VI. RECOMENDACIONES	93
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
VIII. ANEXO	112

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1: Propiedades físicas de los suelos	8
Cuadro 2.2: Valores de coeficiente de cultivo (K_c) del cultivo de papa según el clima y la fase de crecimiento.	20
Cuadro 2.3: Características agronómicas de la variedad INIAP–Victoria	30
Cuadro 3.1: Contenido de nutrientes según el análisis de suelo.	35
Cuadro 3.2: Análisis del agua.	36
Cuadro 3.3: Tratamientos en estudio	37
Cuadro 3.4: Característica del campo experimental	39
Cuadro 3.5: Esquema de análisis de varianza	40
Cuadro 3.6: Escala para determinar los días a la senescencia.	46
Cuadro 4.1: Análisis de varianza para la evaluación de emergencia a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria a los 45 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.	56
Cuadro 4.2: Análisis de la varianza para altura de planta (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria a los 45 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.	57
Cuadro 4.3: Análisis de la varianza para altura (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria a los 75 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.	59
Cuadro 4.4: Prueba de Scheffé (5%) para altura de planta a los 75 días después de la siembra	59
Cuadro 4.5: Análisis de la varianza para altura (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria a los 105 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.	60
Cuadro 4.6: Prueba de Scheffé (5%) para altura de planta a los 105 días después de la siembra.....	61
Cuadro 4.7: Análisis de la varianza para crecimiento de la raíz (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria a los 45 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.	62

Cuadro 4.8: Análisis de la varianza para crecimiento de la raíz (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria a los 85 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.	64
Cuadro 4.9: Prueba de Scheffé (5%) para altura de planta a los 85 días después de la siembra	64
Cuadro 4.10: Análisis de la varianza para crecimiento de la raíz (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria a los 110 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.	65
Cuadro 4.11: Prueba de Scheffé (5%) para crecimiento de la raíz a los 85 días después de la siembra.	66
Cuadro 4.12: Análisis de la varianza para materia seca de la raíz (%) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	67
Cuadro 4.13: Análisis de la varianza para días a la floración (días) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	72
Cuadro 4.14: Prueba de Scheffé (5%) para inicio de floración.....	73
Cuadro 4.15: Análisis de la varianza para inicio de tuberización (días) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	74
Cuadro 4.16: Prueba de Scheffé (5%) para inicio de tuberización	74
Cuadro 4.17: Análisis de la varianza para días a la senescencia a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	75
Cuadro 4.18: Prueba de Scheffé (5%) para inicio de floración.....	76
Cuadro 4.19: Requerimiento hídrico y lámina de riego en el cultivo de papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	80
Cuadro 4.20: Análisis de la varianza número de tubérculos por planta (u) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	81
Cuadro 4.21: Análisis de la varianza para materia seca de tubérculo (%) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	83
Cuadro 4.22: Prueba de Scheffé (5%) para materia seca del tubérculo.....	83

Cuadro 4.23: Análisis de la varianza para rendimiento por planta (kg/planta) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	84
Cuadro 4.24: Prueba de Scheffé (5%) para rendimiento por planta.	85
Cuadro 4.25: Análisis de la varianza para rendimiento por tamaño del tubérculo (t/ha) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.....	86
Cuadro 4.26: Prueba de Scheffé (5%) para rendimiento por tamaño del tubérculo.....	87
Cuadro 4.27: Análisis de la varianza para rendimiento total (t/ha) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	88
Cuadro 4.28: Agua utilizada por kilogramo de producción en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema del sistema suelo-planta-atmósfera.....	10
Figura 2.2: Representación gráfica del rizotrópico y su ubicación en campo.	12
Figura 2.3: Lisímetro de drenaje.	16
Figura 2.4: Curva de coeficiente de cultivo (Kc)	20
Figura 3.1: Ubicación geográfica del ensayo	34
Figura 3.2: Niveles de agua en el suelo.	38
Figura 3.3: Esquema de la parcela experimental, Riobamba, Ecuador, 2018.....	40
Figura 3.4: Labores pre-culturales, Riobamba, Ecuador, 2018.....	41
Figura 3.5: Esquema de distribución de riego, Riobamba, Ecuador, 2018.....	42
Figura 3.6: Labores culturales, Riobamba, Ecuador, 2018.....	44
Figura 3.7: Emergencia del cultivo de papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	44
Figura 3.8: Comportamiento del sistema radicular del cultivo de papa (<i>Solanum</i> spp.) variedad victoria en función del bulbo de humedecimiento del suelo, Riobamba, Ecuador, 2018.....	45
Figura 3.9: Floración del cultivo de papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en función del bulbo de humedecimiento del suelo, Riobamba, Ecuador, 2018.	46
Figura 3.10: Lisímetro de drenaje, Riobamba, Ecuador, 2018.	47
Figura 3.11: Materia seca del cultivo de papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	48
Figura 3.12: Rendimiento del cultivo de papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	49
Figura 4.1: Promedios de temperatura (°C) y precipitación efectiva (mm) durante el ciclo de cultivo de papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	52
Figura 4.2: Promedios de humedad relativa (HR %) y velocidad del viento (m/s) durante el ciclo de cultivo de papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	53
Figura 4.3: Registro de humedad del suelo a 15 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo de papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	54

Figura 4.4: Registro de humedad del suelo a 30 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo de papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	55
Figura 4.5: Promedios de emergencia (%) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria a los 45 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.....	57
Figura 4.6: Promedios de altura (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria a los 45 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.	58
Figura 4.7: Promedios de altura (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria a los 75 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.	60
Figura 4.8: Promedios de altura (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria a los 105 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.	61
Figura 4.9: Promedios de raíz (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria a los 45 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.	63
Figura 4.10: Promedios de raíz (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria a los 85 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.	65
Figura 4.11: Promedios de raíz (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria a los 110 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.	67
Figura 4.12: Promedios de materia seca de la raíz (%) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.....	68
Figura 4.13: Comportamiento radicular en función al bulbo de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	69
Figura 4.14: Patrón de extracción (%) del tratamiento 1 (25% agotamiento) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en función de la profundidad en Riobamba, Ecuador, 2018.	70
Figura 4.15: Patrón de extracción (%) del tratamiento 2 (50% agotamiento) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en función de la profundidad en Riobamba, Ecuador, 2018.	71

Figura 4.16: Patrón de extracción (%) del tratamiento 3 (75% agotamiento) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en función de la profundidad en Riobamba, Ecuador, 2018.	71
Figura 4.17: Promedios de inicio de floración (días) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.....	73
Figura 4.18: Promedios de inicio de tuberización (días) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	75
Figura 4.19: Promedios de días a la senescencia a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	76
Figura 4.20: Coeficiente de cultivo (Kc) por etapa fenológica del cultivo de papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria determinado por Hargraves en Riobamba, Ecuador, 2018.	77
Figura 4.21: Coeficiente de cultivo ajustado (Kc) del cultivo de papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria para el tratamiento 1 con lisímetro en Riobamba, Ecuador, 2018.	78
Figura 4.22: Coeficiente de cultivo ajustado (Kc) del cultivo de papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria para el tratamiento 2 con lisímetro en Riobamba, Ecuador, 2018.	79
Figura 4.23: Coeficiente de cultivo ajustado (Kc) del cultivo de papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria para el tratamiento 3 con lisímetro en Riobamba, Ecuador, 2018.	79
Figura 4.24: Requerimientos hídricos (mm) y lámina promedio (mm) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	81
Figura 4.25: Promedios de tubérculos por planta (u) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.....	82
Figura 4.26: Promedios de materia seca de tubérculo (%) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	84
Figura 4.27: Promedios de rendimiento por planta (kg/planta) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	85
Figura 4.28: Promedios de rendimiento por tamaño del tubérculo (t/ha) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum spp</i>) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	88

Figura 4.29: Promedios de rendimiento total (t/ha) a niveles de humedad del suelo en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.....	89
Figura 4.30: Agua utilizada (m ³) por kilogramo de producción en la papa (<i>Solanum</i> spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.	90

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Coeficientes del tanque clase A para diversas localidades y ambientes de los tanques y varios valores de velocidad media de viento y de humedad relativa.	112
ANEXO 2: Diseño del rizotróon.....	113
ANEXO 3: Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado bajo “estrés hídrico” al 25 % de agotamiento.....	114
ANEXO 4: Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado bajo “estrés hídrico” al 50 % de agotamiento.....	115
ANEXO 5: Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado bajo “estrés hídrico” al 75 % de agotamiento.....	116

RESUMEN

Nuestro conocimiento se resume en buscar la eficiencia de uso de agua, describimos la respuesta del cultivo de papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba-Ecuador, con el objetivo de valorar la utilidad y aplicabilidad de las técnicas y estrategias de “riego parcial con diferentes niveles de humedad en el suelo”, mediante riego localizado en la modalidad de dos mangueras por lomo de surco, las cuales fueron enumeradas, permitiendo dotar láminas riego solo con las impares y luego con las pares, para lo cual se establecieron tres tratamientos con el 25, 50 y 75 % de agotamiento entre los niveles de capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Empleándose la prueba de Scheffé, con un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Las necesidades hídricas se determinaron a partir de la curva de coeficiente de cultivo (K_c), mediante el establecimiento de un lisímetro de drenaje por tratamiento y una estación meteorológica portátil, además del registro diario de la humedad del suelo. El comportamiento de la humedad fue de 12.25%, 10.5% y 8.75 % para el tratamiento 1, 2 y 3 respectivamente. Los K_c para cada etapa fisiológica, a partir de la evapotranspiración del cultivo “Etc” y “Eto” fueron para la etapa inicial 0.35, 0.36, 0.41; para la etapa de desarrollo 0.76, 0.80, 0.87; para la etapa intermedia 0.95, 0.98, 1.02; para la etapa final 0.58, 0.59, 0.63 para el tratamiento 1, 2 y 3 respectivamente. El consumo fue de 4886 m³/ha con 132 días de ciclo de cultivo para el tratamiento 1; de 4552,8 m³/ha con 126 días para el tratamiento 2, de 4284.3 m³/ha con 121 días para el tratamiento 3. El máximo nivel de humedad permisible para la variedad en estudio es hasta el 50%, ya que niveles superiores generarían grandes pérdidas.

Palabras clave: Riego por goteo, Riego parcial, Lisímetro, Balance hídrico, Humedad del suelo.

SUMMARY

Our knowledge is summarized in the search for the efficiency of water use, we describe the response of the potato crop (*Solanum* spp) victory variety in Riobamba-Ecuador, with the objective of assessing the usefulness and applicability of the techniques and strategies of "partial irrigation with different levels of moisture in the soil ", by means of irrigation located in the modality of two hoses per furrow spine, which were enumerated, allowing watering to be provided only with the odd and then with the pairs, for which three treatments were established. 25, 50 and 75% depletion between field capacity levels and permanent wilting point. Using the Scheffé test, with a randomized complete block design with three repetitions. The water needs were determined from the crop coefficient curve (K_c), by establishing a drainage lysimeter by treatment and a portable meteorological station, in addition to the daily record of soil moisture. The humidity behavior was 12.25%, 10.5% and 8.75% for treatment 1, 2 and 3 respectively. The K_c for each physiological stage, from the evapotranspiration of the "Etc" and "Eto" crops were for the initial stages 0.35, 0.36, 0.41; for stage of development 0.76, 0.80, 0.87; for intermediate stage 0.95, 0.98, 1.02; for the final stage 0.58, 0.59, 0.63 for treatment 1, 2 and 3 respectively. The consumption was 4886 m³/ha with 132 days of culture cycle for treatment 1; of 4552.8 m³/ha with 126 days for treatment 2, of 4284.3 m³/ha with 121 days for treatment 3. The maximum permissible humidity level for the variety under study is up to 50%, since higher levels would generate big losses.

Key words: Drip irrigation, Partial irrigation, Lysimeter, Water balance, Soil moisture.

I. INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum L.*) es uno de los principales cultivos tradicionales, orientado al consumo de la población, ocupando el cuarto lugar a nivel mundial, el mismo que se cultiva en 19 millones de hectáreas, con una producción anual de alrededor de 325 millones de toneladas (FAO, 2016). Mencionar que los países en desarrollo producen más de la mitad de la producción total mundial de papa (FAO, 2009) mismos que han expandido sus áreas de cultivo, sin considerar que en cierta medida esta expansión se vea afectado negativamente por el cambio climático global (Thiele *et al.*, 2010).

En tal sentido se prevé que en el periodo 2010 – 2039 se produzca una reducción de 18 a 32% de la productividad, trayendo consigo mayor variabilidad de las precipitaciones y demanda evaporativa (Hijmans, 2003 y Kundzewicz *et al.*, 2007). Por lo tanto, el uso del agua para la agricultura y otras actividades se está convirtiendo en aspecto importante en todo el mundo, ya que la producción de alimentos a nivel mundial de los países en desarrollo se lleva a cabo en un 60% en tierras que dependen de lluvia, teniendo solo un 40 % restante regadío (Kang & Zhang, 2004; Naylor, 2009 y Perry, 2009).

Si bien la elevada incidencia de plagas y enfermedades hasta un punto son responsables de los bajos rendimientos, el principal factor limitante del rendimiento y calidad es el estrés hídrico, estimándose que el rendimiento se puede incrementar en aproximadamente un 50% optimizando el suministro de agua al cultivo (Kumar *et al.*, 2003).

Por lo tanto, es necesario prácticas de riego eficientes que proporcionen un uso más sostenible del agua en el futuro, es así que durante la última década se han desarrollado estrategias de riego innovadoras como el secado parcial de la zona raíz, misma que está enfocado en mojar de forma alterna y espacialmente dos partes distintas del sistema radicular de la planta, es decir la mitad del sistema radicular que estuvo previamente bien regada, entra en secado progresivo (Kang *et al.*, 1998 y Davies *et al.*, 2002).

Es así que las raíces en el suelo húmedo proporcionan agua para el crecimiento, mientras que los del suelo secado producen señales químicas que regulan el crecimiento de los brotes mediante la limitación de la conductancia estomática a través cierre de los estomas, optimizando así el uso del agua mediante la reducción de la transpiración (Loveys *et al.*, 2000). En esta técnica, los ciclos alternos de riego son cruciales para producir y mantener las señales relacionadas con el “estrés-raíz” sin afectar el estado hídrico de la planta. El resultado esperado es razonablemente buenos rendimientos con un ahorro considerable de agua y una mayor eficiencia en el uso del agua, siendo de suma importancia en las zonas donde los recursos hídricos son limitados (Loveys *et al.*, 2000 y Kang & Zhang, 2004).

1.1. Objetivos de la investigación

1.1.1. General

Determinar el efecto de riego parcial por goteo a diferentes niveles de humedad del suelo en el cultivo de papa (*Solanum spp.*) variedad victoria, en Riobamba Ecuador.

1.1.2. Específicos

- Evaluar el comportamiento biofísico en el cultivo de papa (*Solanum spp.*) variedad victoria para los niveles de humedad del suelo.
- Determinar el coeficiente de cultivo “ K_c ” bajo estrés hídrico.
- Determinar la eficiencia del uso del agua en cada uno de los niveles de humedad del suelo.

1.2. Justificación de la investigación

En los últimos años la disponibilidad de los recursos hídricos ha decaído, ocasionando serios problemas para satisfacer las múltiples demandas que cada vez son mayores, siendo necesario el desarrollo de estrategias de riego de ahorro de agua que se adapten a los efectos adversos del cambio climático, con el fin de mejorar la eficiencia de uso del agua de riego. Como consecuencia de estos se desarrolla secado parcial de la zona raíz (PRD) que es una

herramienta basada en reducir el agua aplicada con el mínimo impacto sobre la producción. Por lo tanto, es importante la determinación de la respuesta productiva del cultivo de papa variedad victoria considerada como tolerante a la sequía, ya que en Ecuador las épocas de lluvias ya no son definidas y además sitios considerados como productores de papa ya no obtienen la rentabilidad deseada, dando lugar a que la calidad de vida de los agricultores disminuya, ocasionando un abandono de las tierras.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes sobre requerimientos hídricos del cultivo de papa

En el Ecuador el Centro Experimental del Riego de la ESPOCH, en convenio con el MAG-Subsecretaría de Riego y Drenaje, con el Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias INIAP a través del Programa Nacional de Raíces y Tubérculos Rubro Papa (PNRT-Papa), han efectuado investigaciones relevantes en torno a la optimización del agua:

Bonilla en el año 2009, seleccionó en tres localidades (Tiazo Bajo, Pusniag y Santa Lucía) de la provincia de Chimborazo genotipos considerados como tolerantes a la sequía: INIAP – PAN, Brenda (CIP), R2 (CIP), 97 – 1 – 10, 99 – 38 – 5, 99 – 78 – 5, 04 – 12 – 1, 99 – 66 – 4, 99 – 99 – 2, 04 – 24 – 1, 97 – 1 – 8, 99 – 32 – 1 (Bonilla, 2009).

En el año 2012, se evaluaron dieciséis genotipos en dos localidades (Tunshi Alto y Macají ESPOCH) de la provincia de Chimborazo determinándose como tolerantes: INIAP – Estela y clones 10 – 10 – 97, 07 – 29 – 11 (Jaramillo, 2012).

En el año 2014, se realizó la evaluación agronómica de seis genotipos con tolerancia al déficit hídrico (Macají ESPOCH), dando como resultado que los genotipos INIAP – Estela, 98 – 02 – 06, INIAP – Natividad y 10 – 10 – 97 presentan mayor tolerancia al déficit hídrico (Peña, 2014).

Además, en el año 2016, se desarrolló técnicas de modelación matemática para estimar los requerimientos hídricos del cultivo de papa (*Solanum* spp) (León, 2016).

De igual forma investigaciones en otras latitudes, de gran relevancia:

En el 2012, *partial root-zone drying irrigation and water utilization efficiency by the potato crop in semi-arid regions in China*, el objetivo fue probar la respuesta de tres variedades de papa comparando el riego convencional con el riego de secado parcial de raíz, determinado la eficiencia de uso de agua, así como el rendimiento (Xie *et al.*, 2012).

En el 2017, *effects of water table management on least limiting water range and potato root growth in USA*, el objetivo de este estudio fue evaluar la disponibilidad de agua en el suelo, el crecimiento de la raíz de la papa y el rendimiento de tubérculos bajo diferentes niveles de manejo de la capa freática (Ferreira, 2017).

En el 2018, *potato canopy growth, yield and soil water dynamics under different irrigation systems in Denmark*, el objetivo fue comparar dos sistemas de aplicación de riego y N, en términos de dinámica del agua del suelo, absorción de N, eficiencia en el uso de N y rendimiento de la papa (Zhou *et al.*, 2018).

2.2. El Agua

La superficie del planeta en más del 70 % está cubierta por agua, encontrándose en océanos, lagos, ríos; en el aire, en el suelo. Es así como contribuye en la regulación del clima del mundo y con su fuerza formidable modela la Tierra, haciendo que sus propiedades únicas la hagan esencial para los procesos físico, químicos y biológicos que gobiernan el medio natural (Fernández, 2012).

El agua se constituye en uno de los recursos fundamentales para la vida, junto con el aire, tierra y la energía. Para ello, es necesario no solo velar por la utilización y la distribución eficiente del agua sino también proteger la cuenca de captación antes del consumo, así como el tratamiento de las aguas de desecho después del consumo (Fernández, 2012 y O'meara, 2012).

Lograr su óptima aplicación al considerarse un recurso escaso, es de suma importancia, lo que evitaría grandes problemas en zonas ubicadas en la cuenca baja. Además, que con el crecimiento demográfico mundial obligan a generar alternativas de eficiencia de uso y

conservación. Siendo necesario privilegiar el conocimiento del vínculo existente entre el uso del agua y los ecosistemas que la abastecen (O'meara, 2012).

2.3. Relación agua-suelo-planta-atmósfera

2.3.1. Agua en el suelo

Vásquez *et al.*, (2017) y Hurtado (2002), concuerdan que el suelo se considera como un cuerpo poroso formado por partículas sólidas de diferentes diámetros, tamaños y composición química, con espacios porosos entre ellas, ocupados dichos espacios por aire, agua o ambos. El porcentaje de volumen de poros en relación al volumen de sólidos varía de 35 % - 60 %. Es necesario determinar el movimiento del agua en el suelo y la cantidad de agua que está disponible para las plantas, con factores íntimamente relacionados con la distribución del tamaño de las partículas minerales (textura) en relación con su característica de retener agua. Además, otro aspecto importante es la cantidad de agua que puede almacenar un suelo, relacionado íntimamente con la profundidad radicular y finalmente la manera de reponer el agua del suelo consumida por las plantas, en función de la tecnología disponible (Salgado, 2001).

a. Disponibilidad del agua en el suelo

Hurtado (2002), menciona al suelo como un "reservorio" que contiene cierta cantidad de agua, de la cual sólo una parte está disponible para las plantas, entre el rango de humedad a capacidad de campo (CC, 0.33 bares) y el punto de marchitez permanente (PMP, 0.15 bares), además considerar que niveles superiores a CC, ocasionaran falta de aireación y si persiste hasta daños fisiológicos en el cultivo (Vásquez *et al.*, 2017).

- Saturación (S)

De la Fuente (2006), indica que la saturación constituye la máxima capacidad de almacenamiento de agua de un suelo cuando todos sus poros están llenos de agua, situación que puede observarse inmediatamente después de una lluvia o riego abundante.

- **Capacidad de campo (CC)**

Hurtado (2002) e Hidalgo (2008), definen como capacidad de campo a la máxima cantidad de agua retenida por un suelo con buen drenaje, que alcanza según la textura del suelo 24 a 72 horas posterior al riego o lluvia, donde los micro poros retienen el agua contra la fuerza de gravedad, fácilmente superada por la fuerza de succión de las raíces. Además, para condiciones de escasa evapotranspiración, la capacidad de campo se define como el contenido de humedad cuando $\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right) \rightarrow 0$ (variación del contenido de humedad con respecto al tiempo tiende a cero). Considerar que capacidad de campo se alcanza cuando la tensión del agua en el suelo es de aproximadamente 0.3 bares en suelos arcillosos o de 0.1 bares en suelos de textura media (Vásquez *et al.*, 2017).

- **Punto de marchites permanente (PMP)**

Vásquez e Iglesias (2000) e Hidalgo (2008), explican que el punto de marchitez permanente es el grado de humedad del suelo que rodea la zona radicular de la vegetación, tal que la fuerza de succión de las raíces es menor que las de retención del agua por el terreno, es decir la gradiente de potencial es necesario para que se produzca un flujo de agua, donde las plantas no logran extraer agua para compensar sus necesidades de transpiración, manifestándose síntomas de marchitamiento, caída de hojas, escaso desarrollo o fructificación. Este punto se logra cuando el estado energético (tensión del agua en el suelo) alcanza entre 10 y 20 bares (Enciso, 2005).

- **Humedad aprovechable**

La humedad aprovechable se considera como la cantidad de agua a ser utilizada por los cultivos, siendo la diferencia entre los contenidos de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), considerar también que a medida que disminuye el nivel de humedad del suelo, aumenta progresivamente el esfuerzo del cultivo para extraer agua del suelo, siendo importante no llegar hasta un agotamiento superior a los 40 – 60 % para gravedad, en el caso de riego por goteo el agotamiento deber ser cercano a cero (Vásquez *et al.*, 2017). En el rango del nivel de humedad del suelo que las plantas absorben agua, esta es retenida por el suelo debido a la tensión superficial del agua en contacto con el aire y el ángulo de contacto entre el agua y las partículas del mismo suelo, además por la fuerza de repulsión entre las partículas de arcilla (Vásquez e Iglesias, 2000).

Cuadro 2.1: Propiedades físicas de los suelos

Textura del suelo	Porosidad total (%)	Densidad Aparente D_{ap} (gr/cm ³)	Capacidad de campo θ_{cc} (%)	Punto de marchitez permanente θ_{pmp} (%)	Humedad aprovechable	
					Peso seco ($\theta_{cc} - \theta_{pmp}$) (%)	Volumen ($\theta_{cc} - \theta_{pmp}$) * D_{ap} (%)
Arenoso	38 (32 - 42)	1.65 (1.55 - 1.80)	9 (6-12)	4 (2 - 6)	5 (4 - 6)	8 (6 - 10)
Franco arenoso	43 (40 - 47)	1.50 (1.40 - 1.60)	14 (10 - 18)	6 (4 - 8)	8 (6 - 10)	12 (9 - 15)
Franco	47 (43 - 49)	1.40 (1.35 -1.50)	22 (18 - 26)	10 (8 - 12)	12 (10-14)	17 (14 - 20)
Arcilloso	53 (51 - 55)	1.25 (1.20 - 1.30)	35 (31 - 39)	17 (15 - 19)	18 (16 - 20)	23 (20 - 25)

FUENTE: Vásquez *et al.*, (2017).

b. Medición del contenido de humedad en el suelo

La medición de agua en el suelo es importante dentro de un sistema suelo–planta–atmósfera, destacando varios métodos:

- Método directo o gravimétrico

Según Enciso (2005) y Vasconcelos *et al.* (2003), indican el método gravimétrico es considerado el método fundamental para los diferentes métodos indirectos, el mismo que consiste en extraer muestras (20 – 200 g), las cuales previamente se pesan y posterior se colocan en la estufa por 24 horas a 105°C, para nuevamente pesar y finalmente aplicar la siguiente relación:

$$\text{Contenido humedad suelo (\%)} = \left[\frac{(PF - PS)}{PS} \right] \times 100 \quad (2.1)$$

Dónde: PF Peso fresco de la muestra, PS Peso seco de la muestra de suelo.

- **Método indirecto**

Puede medirse empleando varios instrumentos, previa obtención de la curva de calibración en función del método gravimétrico:

• **Tensiómetro**

De la Fuente (2006) y (Vásquez *et al.* (2017), indican que los tensiómetros son recipientes porosos llenos de agua acoplados a un manómetro o vacuómetro. Presenta una longitud entre los 15 – 130 cm. Se caracteriza por permitir mediar la intensidad de la fuerza con la que el suelo retiene el agua (Martin, 2010).

Ekanayake (1994), menciona que al colar el tensiómetro en el suelo este ejerce una fuerza de succión contra el agua contenida en el recipiente, lo que ocasiona una baja de su nivel, es decir mientras más seco esté el suelo, mayor será la fuerza. El potencial mátrico o fuerza de succión del suelo puede leerse directamente en el tensiómetro en unidades de presión (bares o pascales) a tensiones menores a 0.8 bares, ya que niveles superiores ocasiona ingreso de aire (Vásquez *et al.*, 2017).

2.3.2. Relación planta - atmósfera

Gil *et al.* (2005), manifiesta que la absorción de agua por las plantas consiste en el desplazamiento de agua desde el suelo hasta las raíces, esto es debido a la diferencia de potencial de agua entre la raíz y el suelo, es decir la potencial de agua en el suelo es mayor que el potencial en la raíz. Al presentarse una menor disponibilidad de agua en el suelo, aumenta la tensión es decir se hace más negativo, llegando en ciertas ocasiones ser menor que el potencial de la raíz.

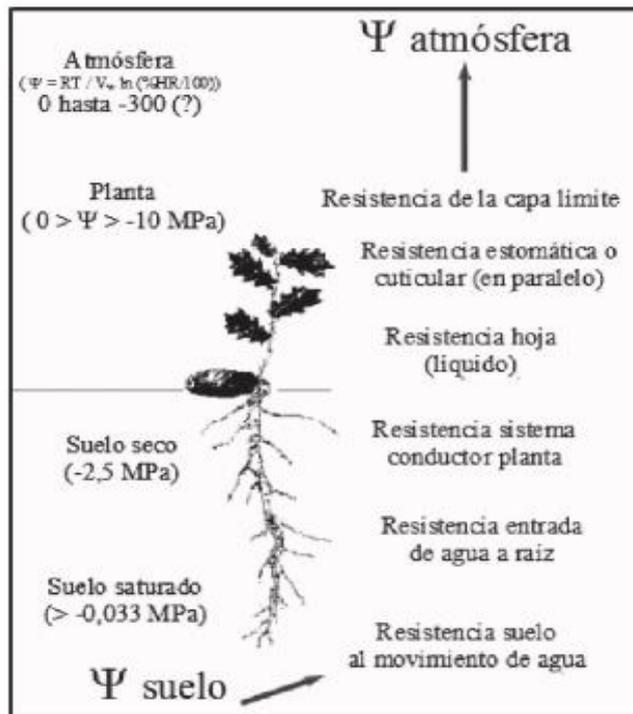


Figura 2.1: Esquema del sistema suelo-planta-atmósfera

FUENTE: Gil *et al.*, (2005).

Vásquez *et al.* (2017), aclara que la absorción de agua del suelo se efectúa a través de la zona pilífera (zona próxima al ápice de las raíces principales o secundarias) debido a que se concentra la mayor cantidad de pelos absorbentes. Siendo los pelos absorbentes los que incrementan el área de contacto entre la raíz y el suelo, que conlleva a la capacidad de absorción de agua. El movimiento del agua en el sistema agua-suelo-planta-atmósfera se debe a las diferencias de potencial existentes:

$$\psi_{\text{suelo}} > \psi_{\text{raíz}} > \psi_{\text{xilema}} > \psi_{\text{hoja}} > \psi_{\text{atmósfera}} \quad (2.2)$$

a. Sistema Radicular

Villegas (2010), indica que el sistema radicular cumple un papel fundamental en la producción de los cultivos, con un determinado patrón de distribución de raíces, siendo un órgano que otorga soporte y anclaje a la planta en el suelo, y es el encargado de absorber el agua y los nutrientes necesarios para el normal crecimiento y desarrollo, dependiente de la edad, condiciones de humedad del suelo y penetración

en el perfil (Vásquez *et al.*, 2017).

La papa posee raíces adventicias, las cuales se desarrollan post-embrionariamente a partir de células vecinas a los tejidos vasculares en brotes, tallos u hojas (Bellini *et al.*, 2014). La ramificación de la raíz es esencial para aumentar el área de superficie del sistema de raíces, lo que permite a la planta aprovechar reservas de agua y nutrientes más distantes y mejorar el anclaje del suelo (Babé *et al.*, 2012).

Iwama (2008), manifiesta que la papa es sensible a la sequía, ya que la profundidad de las raíces y la extracción de agua del suelo es menor en comparación con otros cultivos agrícolas, por el contrario, si su sistema de raíces es desarrollado este refleja altos rendimientos.

Lesczynski & Tanner (1976), enfatizan que la longitud de la raíz a menudo está estrechamente relacionada con la absorción de agua y nutrientes, por lo tanto al regular la tasa de absorción de agua y nutrientes, el sistema radicular influirá en importantes procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la respiración y la elongación celular e indudablemente en la producción de biomasa y en el rendimiento (Mengel & Kiryby, 1982).

Destacar lo que indican (Vásquez *et al.* 2017), los suelos de textura gruesa permiten una mayor profundidad radicular, en comparación de suelos de textura fina, dependiente de la capacidad de retención de agua y de los niveles de humedad a los que está influenciado.

Alonso (1996) y Vásquez *et al.* (2017), recalcan que en comparación con otros cultivos la papa tiene un sistema radicular débil, por eso se necesita un suelo de muy buenas condiciones.

El sistema radicular es fibroso, ramificado y extendido, pudiendo penetrar 0.8 – 1.40 m de profundidad, con gran cantidad de biomasa de la raíz, pero lo normal es que las plantas de esta especie profundicen poco entre los 0.40 - 0.60 m con una fracción de

agua fácilmente disponible en el suelo de 0.25, además el mayor porcentaje de raíces se concentran a los 0.3 m superiores del suelo, lo que limita el acceso a nutrientes y genera que el cultivo sea más susceptible a la escasez de agua, siendo necesario que el riego se maneje de manera que proporcione suficiente agua para la absorción del cultivo sin limitar la aireación del suelo o la resistencia a la penetración de la raíz (Alva *et al.*, 2012; Liao *et al.*, 2016 y Ragassi *et al.*, 2009). Varios métodos nos permiten determinar la profundidad que alcanzan las raíces:

- **Método del rizotrón**

Bernier & Robitaille (2004) y Davis *et al.* (2004), indican que los rizotrones son cámaras insertadas dentro del suelo que permiten la observación frecuente de crecimiento de raíz “in situ”, esta se coloca transversalmente a las líneas de siembra con una grilla de mediación constante en función al cultivo , donde las cámaras presentan una pantalla transparente, con un marco de acuerdo a la disponibilidad del lugar (madera), de esta forma las raíces cercanas a la pantalla servirán como indicador de crecimiento de la raíz, es decir la habilidad de las plantas para absorber agua y sales minerales del suelo (Miranda, 2004).

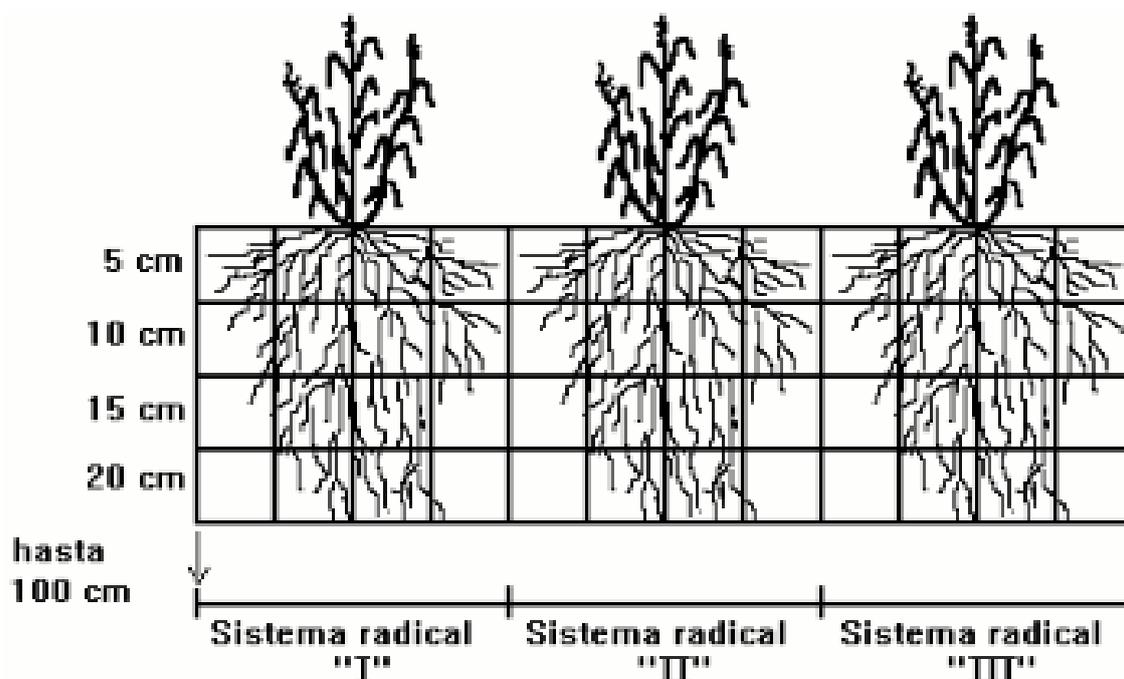


Figura 2.2: Representación gráfica del rizotrón y su ubicación en campo.

FUENTE: Miranda (2004).

2.3.3. Evapotranspiración

a. Definición

La evapotranspiración constituye como el indicador de las necesidades brutas de los cultivos, es decir es una combinación de dos procesos donde el agua pasa a la atmósfera mediante la evaporación de agua desde la superficie del suelo y el proceso de transpiración a través de los tejidos vegetales, con la apertura y cierre de los estomas (FAO, 2008 y Martínez, 2004).

b. Factores que afectan la evapotranspiración

La atmósfera constituye el último eslabón dentro del sistema agua–suelo–planta, para lo cual la determinación de las necesidades de evapotranspiración está influenciada por:

- **Temperatura**

FAO (2008), indica que la radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire, influenciando así sobre la tasa de crecimiento foliar bajo condiciones óptimas de disponibilidad hídrica. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración (Cely, 2010).

- **Radiación**

FAO (2008), la radiación solar real que alcanza una unidad de área evaporante depende de la turbidez de la atmósfera y de la presencia de nubes que reflejan y absorben cantidades importantes de radiación. Es así como, al determinar el efecto de la radiación solar en la evapotranspiración, se debe también considerar que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua.

- **Humedad Relativa**

Fernández *et al.* (2010), aclaran que la energía del sol y del aire circundante es generada una fuerza impulsora para la evaporación del agua, la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirante y el aire circundante es el factor determinante para la remoción de vapor. Importante mencionar que presión real de vapor puede ser relativamente constante a lo largo del día, la humedad relativa fluctúa entre un máximo al amanecer y un mínimo a primeras horas de la tarde (FAO, 2008).

- **Viento**

En la determinación de la evapotranspiración; el viento juega un papel importante en el proceso de remoción de vapor, pero dependiendo del alto grado del viento y de la turbulencia del aire, los cuales transfieren grandes cantidades de aire hacia la superficie evaporante (FAO, 2008).

- **Precipitación efectiva**

La precipitación pluvial constituye en algunos casos la totalidad del contenido de agua en el suelo, con la limitante que solo una fracción está disponible para la planta ya que la otra parte se pierde por evaporación, percolación profunda o escorrentía (Vásquez *et al.*, 2017).

Segerer & Villodas (2006) y Vásquez *et al.* (2017), consideran a la precipitación efectiva como el volumen de agua lluvia empleado por las plantas para satisfacer sus necesidades hídricas y lograr su normal desarrollo (Cely, 2010).

Simpfendorfer (2000), indica que el cultivo de papa en pleno desarrollo, puede transpirar de 2 – 10 mm por día, es así que precipitaciones inferiores a 10 milímetros no son efectivas para el cultivo ya que estas quedan retenidas en las hojas y se evaporan.

c. Evapotranspiración del cultivo de referencia (Eto)

Hidalgo (2008) y FAO (2008), manifiesta que la evapotranspiración de referencia es la tasa de evapotranspiración que se produce en un cultivo de tamaño corto, cubriendo toda la superficie del suelo, con gran potencial de crecimiento y sin ningún tipo de restricción (agua, suelo, etc.). Importante mencionar que el cultivo de referencia es el pasto, así como la alfalfa, es un cultivo muy bien estudiado con respecto a sus características aerodinámicas y superficiales y es aceptado ampliamente como superficie de referencia (Vásquez *et al.*, 2017). La Eto depende exclusivamente de los parámetros climáticos, expresando así 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 (FAO, 2008). Su fórmula es:

$$Eto = Ev * Kp \quad (2.3)$$

Dónde: Kp, se calcula a partir de datos climáticos de la zona como humedad relativa y viento (FAO, 2008).

d. Evapotranspiración del cultivo (Etc)

Hurtado (2002) y FAO (2008), manifiesta que la evapotranspiración o necesidad (consumo) de agua por los cultivos se refiere a la tasa de evaporación directamente desde la superficie del suelo y la transpiración del cultivo, dependiente 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; incrementándose 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. La evapotranspiración del cultivo se calcula (FAO, 2008):

$$Etc = Eto * Kc \quad (2.4)$$

Dónde: Etc evapotranspiración del cultivo [mm d^{-1}], K_c coeficiente del cultivo [adimensional], E_{to} evapotranspiración del cultivo de referencia [mm d^{-1}].

La E_{to} representa un indicador de la demanda climática y el valor de K_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo. Esto permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas (Vásquez *et al.*, 2017).

- **Medición de la evapotranspiración de cultivo**

La determinación de la evapotranspiración de los cultivos puede ser determinada por un sin número de metodologías ya sea directa o indirectamente. Los métodos directos que tienden a presentar información lo más real posible, expresando el valor del consumo total del agua requerida por la planta, se destaca métodos como tanque clase A y lisimétrico. Por otro lado, los indirectos permiten estimar los requerimientos en base a fórmulas empíricas (Fernández *et al.*, 2010).

• **Lisímetros**

Dunne & Leopold (1978), indican que los lisímetros son sistemas que aíslan porciones de suelo (disturbado o no disturbado), en las cuales las condiciones agua-suelo-planta pueden ser reguladas y controladas permitiendo medir las entradas y salidas de agua y el intercambio de humedad, sirviendo para estimar, por diferencia de ambas, la evapotranspiración de una determinada cubierta vegetal (García, 2002).

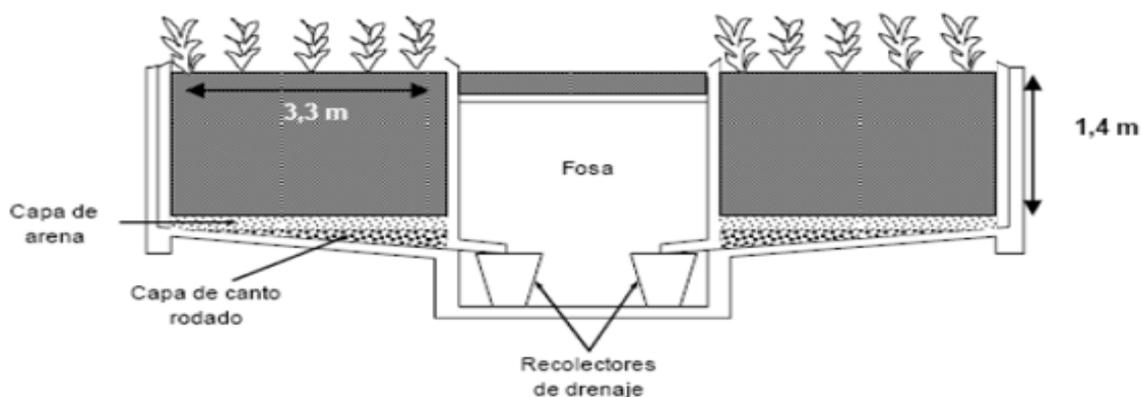


Figura 2.3: Lisímetro de drenaje.

FUENTE: Dunne & Leopold (1978).

La evapotranspiración puede ser calculada ya sea pesando el recipiente con el suelo y cultivo (referente a lisímetros de pesada) o por mediante el balance de entradas y salidas de agua (lisímetros de drenaje) (García, 2002).

Los lisímetros de pesada tienen la ventaja de una mayor precisión y la posibilidad de obtener resultados en lapsos cortos pero sus costos de instalación, operación y mantenimiento son altos; los lisímetros de drenaje no poseen 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).

Chávarri (2008), indica que en su construcción debe tenerse cuidado de restituir el suelo que se excavo en unas condiciones lo más similares posibles a las que se encontraba. Próximo a él debe existir un pluviómetro. La Eto se despeja de la siguiente ecuación de balance hídrico en el lisímetro:

$$\text{Precipitación} = \text{Eto} + \text{infiltración} + \Delta \text{ almacenamiento} \quad (2.5)$$

Para calcular Δ almacenamiento, normalmente se mide la humedad del suelo y a partir de ahí, se calcula una lámina de agua equivalente expresada en mm. Mediante riego el método es más simple, debido a que se debe mantener el suelo en condiciones de humedad óptima y la ecuación sería la siguiente (Chávarri, 2008):

$$\text{Precipitación} + \text{Riego} = \text{Eto} + \text{Infiltración} \quad (2.6)$$

Mencionar que el riego se deber realizar manualmente con una probeta de capacidad de 1000 ml, aplicando uniformemente el agua sobre toda la superficie del lisímetro. Posteriormente la lámina drenada se debe recolectar en un depósito, midiendo este volumen con ayuda de una probeta, este procedimiento depende de las propiedades hidráulicas del suelo con referencia a la frecuencia de aplicación además de las condiciones medioambientales, para lo cual es importante la instalación de una estación meteorológica portátil. Finalmente, en base a los datos obtenidos se calcula la Etc (balance hídrico), la Eto (datos climatológicos) y posteriormente el cálculo de

K_c (Allen *et al.*, 2006):

$$K_c = E_{tc}/E_{to} \quad (2.7)$$

León (2016), indica que para la determinación del volumen a reponer en el lisímetro de drenaje está en función de:

$$V_a = (E_{tc} * ND * A_l) * c \quad (2.8)$$

Dónde: V_a volumen a aplicar, E_{tc} evapotranspiración, ND Número de días que hay de un riego a otro, A_l área del lisímetro, c coeficiente de seguridad para efectuar el riego hasta causar percolación.

2.3.4. Coeficiente de cultivo (K_c)

Beltri (2008) y FAO (2008), indican que el coeficiente de cultivo es un valor que cambia con el tiempo, dependiente del grado de desarrollo y de las etapas fenológicas del cultivo, es decir llega a un máximo y luego disminuye. El K_c presentará distintos valores en relación a las características del cultivo, fecha de siembra, ritmo de desarrollo del cultivo, evaporación del suelo, condiciones climáticas, frecuencia de lluvia o riego por lo tanto el coeficiente K_c constituye una excelente herramienta para:

- Elaborar calendarios de riego para los cultivos, fijar láminas e intervalos de riego en función de la eficiencia de riego, logrando así una planificación del riego.
- Al presentarse altos contenidos de sales en el agua de riego, permitirá determinar láminas de sobre riego, evitando que los suelos se salinicen.
- Permitirá estimar volúmenes adicionales de agua necesarios para épocas que la lluvia no pueda suplir.

- Determinar en grandes extensiones los posibles volúmenes de agua a drenar si hay exceso (Garay, 2009).

a. Fases de desarrollo del cultivo

Fernández *et al.* (2010) y Vásquez *et al.* (2017), señalan que el coeficiente de cultivo (K_c) presentará una variación estacional a lo largo de las diferentes fases de desarrollo del cultivo, mismas que se detalla:

- **Fase inicial**

La fase comprende el periodo entre la germinación y el crecimiento inicial del cultivo, es decir el momento que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo (FAO, 2008).

- **Fase de desarrollo del cultivo**

La fase de desarrollo del cultivo está comprendida desde el momento en que la cobertura del suelo es de un 10% hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa del orden de 70 – 80 % (FAO, 2008).

- **Fase de mediados del periodo (maduración)**

La etapa de mediados de temporada comprende el período de tiempo entre la cobertura completa hasta el inicio de la madurez haciéndose evidente con la decoloración o caída de hojas (FAO, 2008).

- **Fase final del periodo vegetativo (cosecha)**

Comprende el período desde el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia (FAO, 2008).

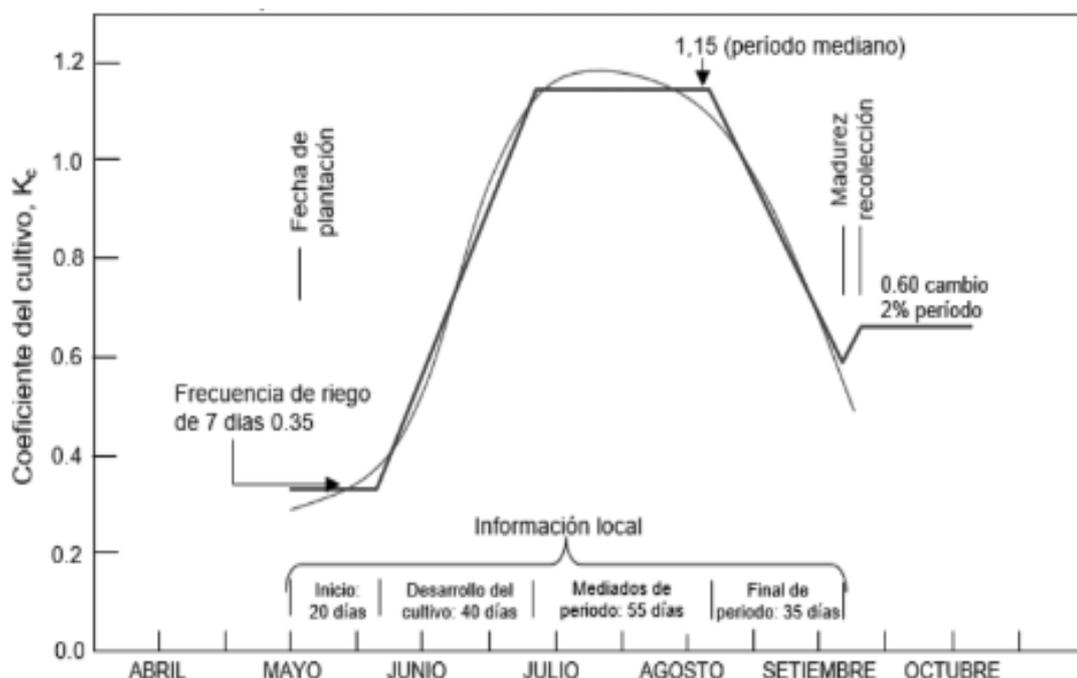


Figura 2.4: Curva de coeficiente de cultivo (K_c)

FUENTE: Vásquez *et al.*, (2017).

Cuadro 2.2: Valores de coeficiente de cultivo (K_c) del cultivo de papa según el clima y la fase de crecimiento.

Papa	Humedad relativa	$HR_{min} > 70\%$		$HR_{min} < 70\%$	
	Viento (m/s)	0 – 5	5 – 8	0 – 5	5 – 8
	Fase de desarrollo	K_c			
	3	1.05	1.00	1.15	1.20
4	0.70	0.70	0.75	0.75	

FUENTE: Vásquez *et al.*, (2017).

2.4. Sistema de riego

El método de riego más adecuado para cada lugar varía según las propiedades del suelo, la topografía, el nivel de la tecnificación del cultivo, el sistema de aprovisionamiento del agua, y las necesidades del cultivo (León, 2016).

2.4.1. Fundamentos de riego

En el riego de los cultivos es importante resolver las siguientes interrogantes: ¿cuándo regar? (frecuencia de riego o intervalo de riego y riego), ¿cuánto regar? (cantidad de agua que se aplica en cada riego), ¿cuánto tiempo regar? (tiempo que se aplica el riego) y ¿cómo regar? (forma o método que se aplica el agua de riego) (Ekanayake, 1994).

El momento óptimo de riego es el máximo porcentaje del volumen de agua disponible en la zona de raíces y que el cultivo pueda aprovechar al máximo sin repercutir en su rendimiento, es decir conocer el momento óptimo podremos planificar el riego (Vásquez *et al.*, 2017).

Por lo tanto, Vásquez *et al.* (2017), manifiestan que el objetivo se debe enfocar en maximizar los beneficios para el productor, a través de la eficiencia de uso de agua en el riego, en tal sentido es necesario tener en cuenta los elementos dentro del sistema suelo-planta-atmosfera como son la capacidad de campo del suelo, profundidad efectiva de raíces, evapotranspiración real del cultivo, edad y fisiología, disponibilidad de agua de riego, precipitación efectiva, eficiencia de aplicación.

El propósito general del riego a corto plazo es mantener el potencial de agua de la planta a niveles que induzcan el crecimiento positivo, por lo tanto, el momento óptimo del riego en papa es decir la tensión de agua en el suelo (bar) está comprendida entre 0.30 – 0.50 bar (Ekanayake, 1994).

a. Lámina neta de riego

La lámina de riego es el espesor de la capa de agua con que una superficie de tierra, supuestamente a nivel, quedaría cubierta por la aportación de un riego. La lámina neta de riego corresponde a la humedad de déficit siendo así la cantidad de agua que debe quedar en la zona de raíces de las plantas, para llevar el suelo a capacidad de campo después de un riego, y que, a su vez corresponderá a la cantidad de agua que puede consumir el cultivo entre dos riegos consecutivos. Para determinar la lámina neta de riego, es necesario conocer la humedad aprovechable del suelo, el umbral de

riego y la profundidad de raíces que se van a mojar (Callejas, 2002).

$$L_n = UR * AU \quad (2.9)$$

Dónde: UR umbral de riego (50%), AU agua disponible para las plantas (mm).

El umbral depende de la sensibilidad del cultivo a la reducción de agua disponible en el suelo, factores climáticos y factores económicos. Para cultivos como hortalizas y flores los valores se ubican entre 30 % - 40 % y en cultivos menos delicados los valores se reducen al 50 % (León, 2012).

b. Frecuencia de riego

Callejas (2002), manifiesta que la frecuencia de riego permite estimar el número de días transcurridos entre dos riegos consecutivos y corresponde al período en que el cultivo agota la lámina neta. Para estimar la frecuencia de riego es necesario conocer la lámina neta y la evapotranspiración real del cultivo (Etc). La frecuencia de riego se puede obtener de la siguiente expresión (León, 2012):

$$Fr = L_n / Etc \quad (2.10)$$

Dónde: Fr frecuencia de riego (días), L_n lámina neta (mm), Etc evapotranspiración del cultivo (mm/día).

c. Lámina bruta de riego

La lámina de riego a aplicar se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$L_b = (Etc * Fr) / E_f \quad (2.11)$$

Dónde: Lb lámina bruta de riego (mm), Etc evapotranspiración del cultivo (mm/día), Fr frecuencia de riego (días), Ef eficiencia de aplicación de agua (León, 2012).

d. Volumen de riego

El volumen de riego a aplicar se determina como:

$$V = Lb * A \quad (2.12)$$

Dónde: V volumen de riego a aplicar (litros), Lb lámina bruta de riego (mm), A área cultivada (m²) (León, 2012).

2.4.2. Riego por goteo

Es un método de riego localizado donde el agua es aplicada en forma de gotas que humedecen el área cercana a la planta, es decir, en el área de mayor concentración de las raíces, este sistema consta de filtros, reguladores de presión tubos conductores, laterales para bajar la presión y emisores, comúnmente denominados “goteros”, y así permitir un ahorro considerable de agua, debido a la reducción de la evapotranspiración y de las pérdidas de agua en las conducciones y durante la aplicación, requiere una relativa alta inversión inicial (Hurtado, 2002 y Romero, 2005).

2.4.3. Riego parcial

a. Definición

Santos *et al.* (2007), manifiestan que el secado parcial de la zona radicular es una nueva técnica de riego que consiste en someter aproximadamente la mitad del sistema radicular a déficit hídrico mientras que el resto del sistema de raíces es irrigado, con el propósito de alterar la fisiología de la planta y explotar eficientemente las señales hidráulicas y químicas, viéndose reflejado en el interés comercial.

b. Características

Mediante el riego parcial, las raíces de la parte regada mantienen un estado hídrico favorable, mientras que las raíces de deshidratación sintetizarán señales químicas, que son transportados a las hojas en el flujo de la transpiración, lo que lleva a la reducción de la conductancia y/o el crecimiento de los estomas y provocando un aumento de la eficiencia del uso del agua (EUA) (Antolín *et al.*, 2006).

Yactato *et al.* (2013), sugieren que a través del riego parcial temprano mejoran la tolerancia a la falta de agua, debido a un proceso de endurecimiento que optimiza el ajuste osmótico.

La finalidad es inducir la producción de ácido absísico (ABA) en las raíces parcialmente secas que sirva como señal para que las hojas reduzcan la apertura estomatal y de esta manera disminuya la pérdida de agua. Al mismo tiempo, las raíces bien irrigadas mantienen el follaje con buen estado hídrico, así como una reducción de citoquininas (Davies *et al.*, 2005).

La frecuencia de conmutación de riego entre las filas de riego parcial tendrá que ser determinado de acuerdo con el tipo de suelo y otros factores como la precipitación, la temperatura y la demanda evaporativa (Santos *et al.*, 2003).

De acuerdo con Bravdo (2005), un control absoluto de secado de raíz no es posible en condiciones de campo y también la redistribución hidráulica de más profundidad a las raíces menos profundas puede impedir que los resultados claros obtenidos en las plantas en maceta se logran en condiciones de campo. Otros autores, por ejemplo, Gu *et al.* (2004), argumentan que la cantidad de agua que se utiliza en lugar del sistema de aplicación explica los efectos del riego parcial.

Kriedemann & Goodwin (2004), señalan que en el riego parcial al igual que en el resto de los métodos de déficit hídrico se debe hacer un ajuste del coeficiente de cultivo (K_c).

El ajuste del K_c implica que las plantas sufren algún grado de estrés, en el caso de la papa se piensa que deberían ser deshidrataciones ligeras (0,5 bar en el suelo y 30 bar en la hoja), ya que hasta estos potenciales las plantas son capaces de recuperar la transpiración y fotosíntesis sin que signifiquen efectos negativos en la producción (Haverkort & MacKerron, 2004).

El riego parcial a nivel de planta estimula mayor desarrollo radicular, lo cual es muy importante en papa por ser un cultivo que se caracteriza por tener raíces superficiales y muy susceptibles al déficit de agua en el suelo. Es así como ocasiona una redirección de fotosintatos hacia los tubérculos y raíces a costo de crecimiento en hojas y estolones. Esto significa que el ciclo de producción es más corto, logrando cosechas más tempranas (Rojas *et al.*, 2007).

Kleinkopf *et al.* (1981), mencionan que las raíces son órganos que se desarrollan en función de la cantidad de agua y suelo y su desarrollo se prolonga durante toda la etapa de cultivo de papa.

2.4.4. Efectos del riego parcial

a. Fisiológicos

El riego parcial de raíces tiene dos fundamentos fisiológicos: normalmente las plantas con un buen régimen de riego mantienen sus estomas extensamente abiertos, en los que una pequeña reducción de su apertura puede reducir sustancialmente la pérdida de agua con un efecto mínimo en la fotosíntesis (Jones, 1992).

Cuando una parte del sistema radicular es expuesto al suelo seco, la planta responde enviando señales desde la raíz hacia las hojas para cerrar los estomas y reducir la pérdida de agua (Davies & Zhang, 1991).

Kang & Zhang (2004), indican que típicamente la tasa de fotosíntesis de las plantas

muestra saturación en respuesta a la apertura de los estomas, mientras que la tasa de transpiración muestra una respuesta más lineal. En ese sentido, se puede esperar que reduciendo la elevada apertura estomatal se podría reducir sustancialmente la pérdida de agua con un pequeño efecto en la tasa de fotosíntesis. Si se logra esto en la práctica, la EUA calculada en función al carbono ganado por unidad de agua perdida se incrementará a un mínimo costo de CO₂ tomado.

Kim *et al.*, (2009) y Lewthwaite & Triggs (2012), indican que, al presentarse la sequía, el agua en la superficie del suelo es limitada, por lo que el sistema de raíces profundas puede jugar un papel clave como primera percepción de señal para encontrar agua disponible.

Supuestamente se podría pensar que el SPR no tiene nada nuevo puesto que en condiciones naturales todas las raíces de una planta no se secan al mismo tiempo. Sin embargo, además del proceso fisiológico más importante que ocurre en el SPR que es la producción de señales químicas (Stoll & Loveys, 2000); este tipo de riego induce la emisión de raíces secundarias y por consiguiente disminuye la sensibilidad de la raíz a la sequía (Zhang & Tardieu, 1996). Un sistema radicular más uniformemente distribuido en el suelo como resultado de la alternancia seco y húmedo puede conllevar a un mejor uso de nutrientes y agua del suelo en toda la zona radicular (Kang *et al.*, 1998).

Alternar las zonas húmedas y secas del sistema radicular es esencial para mantener continua la emisión de señales de la raíz al follaje, ya que la raíz no es capaz de mantener su producción de ABA por largos períodos de tiempo. La frecuencia de la alternancia se determina de acuerdo al cultivo, tipo de suelo y factores ambientales (Kriedemann & Goodwin, 2004).

Dentro de las implicancias agronómicas, Kriedemann & Goodwin (2004), sostienen que en el SPR es más importante tomar en cuenta el factor suelo que el ambiente. La textura y estructura del suelo influyen en la infiltración y los elevados niveles de sales, cuyo efecto se conoce que es mayor cuando hay estrés hídrico.

A diferencia de los métodos convencionales de riego por déficit hídrico en los que los riegos dependen principalmente de la evapotranspiración (ET), en el SPR se debe tener más énfasis en mediciones directas del contenido de agua en la zona radicular. La frecuencia de riegos en el SPR varía de acuerdo a las condiciones ambientales, pero los volúmenes de riego dependen del tipo de suelo y profundidad radicular, sin tener variaciones por condiciones ambientales (Kriedemann & Goodwin, 2004).

2.5. Déficit hídrico

2.5.1. Definición de déficit hídrico

Es la reducción de agua disponible en un suelo para el aprovechamiento de las plantas, lo que genera que el contenido hídrico de los tejidos vegetales presente “estrés hídrico”, ocasionado que los procesos metabólicos (crecimiento y desarrollo) de la planta disminuyan notablemente. Cabe recalcar que la magnitud del efecto negativo y los procesos metabólicos involucrados dependen de la especie, momento del ciclo ontogénico (la sensibilidad puede variar a lo largo del ciclo ontogénico), de la intensidad y duración del estrés hídrico (Chimenti, 2005).

2.5.2. Estrés hídrico

a. Definición

El estrés hídrico constituye a un proceso en el cual la intensidad de la transpiración es superior a la absorción radicular, siendo el primer efecto la pérdida de turgencia, que repercute a la elongación del tallo, la expresión foliar, la apertura estomática y finalmente la disminución de la tasa de crecimiento (Hale & Orcutt, 1987).

b. El estrés hídrico y la sequía

El contenido de agua en el suelo cumple un papel fundamental en la disminución de

flujo de los vegetales, es decir a mayor agua disponible en el suelo mayor energía potencial y esto equivale a mayor extracción por parte de las raíces; caso contrario a menor agua disponible en el suelo, menor energía potencial por ende menor ingreso a la planta (Allen *et al.*, 2006).

El efecto que ocasiona en la planta la falta de agua es: 1) reducción del follaje productivo (escasa emergencia, escasa expansión foliar); 2) reducción de la tasa de fotosíntesis por unidad de área foliar; y 3) reducción del periodo vegetativo o senectud precoz (bajo índice de área foliar) (Ekanayake, 1994).

Importante considerar lo que menciona Ekanayake, (1994) la falta de agua afecta el rendimiento, repercutiendo notoriamente en número y calidad, mencionamos que en la papa se producen con tubérculos en forma de mancuerna o puntiagudos (MacKerron & Jefferies, 1988) y según la intensidad mancha marrón en el interior del tubérculo (Haverkort, 1982).

La planta de papa ante la sequía se genera la reducción de la fotosíntesis, disminuyendo la absorción de CO₂ debido al incremento en la resistencia foliar para el ingreso de carbono, esta disminución de la fotosíntesis y el incremento de la resistencia estomática es debido a la disminución del potencial de agua en las hojas; la gran sensibilidad de las plantas se debe a la poca capacidad de recuperación, luego de finalizado el período de estrés (Ackerson, 1997).

2.5.3. Tolerancia al déficit hídrico

La tolerancia es la capacidad para sobrevivir a un estrés interno, es decir seguir realizando sus procesos fisiológicos durante periodos prolongados de sequía en los que soportan altos grados de deshidratación en sus tejidos (Ledent 2003 y Ekanayake, 1994).

Las plantas tienen diferentes estrategias para adaptarse a la sequía como la disminución del potencial hídrico, estrategia que permite a la planta ser más competitiva la misma que varía según la especie y la etapa fenológica, debido a la acumulación activa de solutos acompañada de una mayor elasticidad de las membranas (May & Milthorpe 1962).

2.6. Cultivo de papa (*Solanum spp.*)

2.6.1. Condiciones para la siembra

El cultivo de papa en su normal desarrollo está influenciado por diferentes factores, que controlan su fisiología:

a. Temperatura

Las características climáticas son preponderantes para que el cultivo pueda cumplir todo su ciclo fenológico con la rentabilidad deseada, es así como está condicionada por factores como la temperatura donde el cultivo no tolera temperaturas mínimas de los 10°C y superiores a los 30°C mismas que inhabilitan el desarrollo del tubérculo (FAO, 2008).

b. Sanidad

Las condiciones climáticas influyen en la presencia de determinadas plagas y enfermedades. Explícitamente la siembra en época seca favorece la presencia de insectos y opuesto en época de lluvia favorece la presencia de enfermedades causada por hongos y bacterias (Egúsquiza, 2014).

c. Suelo

Cualquier forma de preparar el suelo (manual, tracción animal, mecánica) debe asegurar buenas relaciones con el agua, asegurar buen crecimiento de las raíces, reducir la presencia de malas hierbas (Egúsquiza, 2014).

d. Semilla

La semilla de papa debe estar en la edad de brotación múltiple (mínimo dos brotes),

siendo no recomendable una semilla “ciega” generando demora en la emergencia e instalación de malezas; en el caso de semilla “vieja” las plantas son débiles y se producen fallas y en el caso de semilla “desbrotada” es necesario esperar la rebrotación (Egúsquiza, 2014).

2.6.2. Características de la variedad INIAP–Victoria

La variedad de papa INIAP–Victoria constituye como una alternativa para el agricultor siendo tolerante al déficit hídrico, resistente a tizón tardío, alto rendimiento, así como para los consumidores que prefieren genotipos de piel roja-rosada y pulpa amarilla, la cual puede utilizarse para diferentes formas de preparación sopa, frita, tortilla, etc. La variedad INIAP–Victoria proviene del cruzamiento INIAP–Gabriela por INIAP–Fripapa (Cuesta *et al.*, 2011). Las características agronómicas se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 2.3: Características agronómicas de la variedad INIAP–Victoria

Variables	Parámetros
Días a la floración	73 – 94
Días a la cosecha	130 – 150
Vigor por planta	Vigorosa
Cobertura del suelo	Completa
Tubérculos por planta	30
Rendimiento (kg/planta)	1.5
Rendimiento (t/ha)	40
Tamaño del tubérculo:	
Gruesa (%)	50
Mediana (%)	40
Fina (%)	10
Materia Seca del tubérculo (%)	20.90

FUENTE: Cuesta *et al.*, (2011).

2.6.3. Requerimiento hídrico de la papa

Hargreaves & Merkle (2000) e INIA (2013), precisan que conocer el requerimiento hídrico de un cultivo es preponderante ya que constituye la cantidad de agua que necesita la planta para satisfacer sus necesidades fisiológicas, donde la planta pertenece a un microsistema, con aportes hídricos (precipitación efectiva, aporte eventual del nivel freático, capacidad de almacenamiento del suelo) y salidas de agua (evapotranspiración) que al final conlleva a un punto importante que es el balance hídrico (Vásquez *et al.*, 2017).

Por lo tanto, el requerimiento hídrico de un cultivo está en función del potencial de evaporación climático, constitución de la planta y los factores que influyen en su crecimiento (Hargreaves & Merkle, 2000).

FAO (2008), señala que algunas variedades de papa son sencibles a la falta de agua y necesitan una irrigación frecuente y superficial. Generalmente se presentan periodos cortos de estrés hídrico por prácticas inadecuadas de riego, que incluso a pesar de que se riega, ocurre estrés hídrico durante el mediodía debido a las altas tasas de transpiración (Kumar *et al.*, 2003). La limitación hídrica reduce el crecimiento foliar, el índice de área foliar, la cobertura del suelo, la tasa de fotosíntesis por unidad de área foliar, el ciclo se acorta, el índice de cosecha y el número y el tamaño de los tubérculos se reduce. Pero si los períodos de sequía son breves durante el abultamiento del tubérculo conduce a tubérculos en forma de mancuerna, nudosos o puntiagudos (Eiasu *et al.*, 2007).

Bustan *et al.* (2004), manifiestan que, al reducir la transpiración, la sequía conduce a un incremento en la temperatura de la planta que a su vez afecta la formación del tubérculo. Las plantas preesforzadas exhiben un mayor contenido relativo de agua con un potencial de turgencia cero que las plantas sin estrés (Coleman, 1988). Al ser sensible al estrés hídrico es exigente en agua, necesitando de 400 a 700 litros para producir 1 kilogramo de materia seca en los tubérculos (Beukema & Van der Zaag, 1979).

A nivel de campo los requerimientos de agua varían entre 350 y 600 mm, dependiendo del período de duración del cultivo, condiciones ambientales, tipo de suelo y variedad, además

la producción disminuye si no se aporta con más del 50 por ciento del total de agua disponible en el suelo durante el crecimiento (FAO, 2008 y Sood & Singh, 2003).

Las plantas de papa pueden responder con incrementos de hasta 2 t/ha por cada 2 cm de lámina de agua aplicada ya sea por riego o proveniente de la precipitación (Harris, 1992).

Kleinkopf *et al.*, (1981) y Bailey (2000), sostienen que la limitada tolerancia a la sequía se debe a los efectos del ineficaz sistema radicular y la tendencia de los estomas a cerrarse, mermando de esta manera el desarrollo vegetativo en respuesta a reducir el déficit de agua.

Cuando el estrés hídrico es de corta duración la mayoría de las células se recuperan; pero si es prolongada, la planta se marchita (Beukema & Van der Zaag, 1979).

Algunos investigadores señalan que el período crítico al déficit hídrico en la papa es durante la tuberización, requiriéndose de un adecuado suministro de agua desde su inicio hasta la madurez completa de los tubérculos para obtener altos rendimientos (Salter & Goode, 1967; Jensen *et al.*, 2000 y Egúsquiza, 2000), otros sostienen que tanto el periodo de estolonización e iniciación del tubérculo son dos períodos críticos más sensibles al déficit de agua con relación al periodo inicial y maduración (Martínez *et al.*, 1992; Kumar *et al.*, 2003 y Vásquez *et al.*, 2017). Sin embargo, todos coinciden que el principal efecto del estrés hídrico en la papa es la reducción del rendimiento (Jensen *et al.*, 2000).

2.7. Estadística

2.7.1. Prueba de Scheffé

La prueba de Scheffé se aplica para hacer comparaciones múltiples de medias de grupos, relacionado con la prueba del análisis de varianza, incluyéndose en las llamadas pruebas de comparaciones múltiples. Indicar que las pruebas de comparaciones múltiples son pruebas que tratan de concretar una hipótesis alternativa genérica como la de cualquiera de los Test ANOVA (Leal & Lara, 1998).

La prueba de Scheffé además crea un umbral y las diferencias que superen ese umbral serán, para el método, significativas, y las que no lo superen no lo serán. Además la prueba del análisis de la varianza contrasta la hipótesis de igualdad de medias de dos o más grupos. Si el resultado se considera estadísticamente significativo, lo que se puede afirmar es que al menos la media de uno de los grupos es distinta a las restantes, o bien que hay otras medias diferentes entre sí (Lara, 2000).

El siguiente paso consiste en identificar qué grupos son los que tienen medias diferentes entre sí. Las pruebas de comparaciones múltiples corrigen el error para conseguir que no sobrepase el nivel establecido, por ejemplo del 5%. La prueba de Scheffé se realiza comparando todos los posibles pares de medias, pero usando como error típico el valor de la varianza residual obtenida en el análisis de la varianza (Lara, 2000).

$$C = \sum_{i=1}^t a_i u_i \quad (2.13)$$

Hipótesis:

$$H_0: C = 0$$

$$H_1: C \neq 0$$

$$\text{IC 95\% de } C: \quad \hat{C} \pm \sqrt{S_E^2 \sum_{i=1}^t \frac{a_i^2}{n_i}} \sqrt{(t-1)F_{t-1, N-t}(\alpha)}$$

$$\text{Se rechaza } H_0 \text{ si: } |\hat{C}| > \sqrt{S_E^2 \sum_{i=1}^t \frac{a_i^2}{n_i}} \sqrt{(t-1)F_{t-1, N-t}(\alpha)}$$

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Zona de estudio

La presente investigación se realizó en el Centro Experimental del Riego (CER) de la Facultad de Recursos Naturales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Cantón Riobamba, Provincia de Chimborazo, Ecuador.

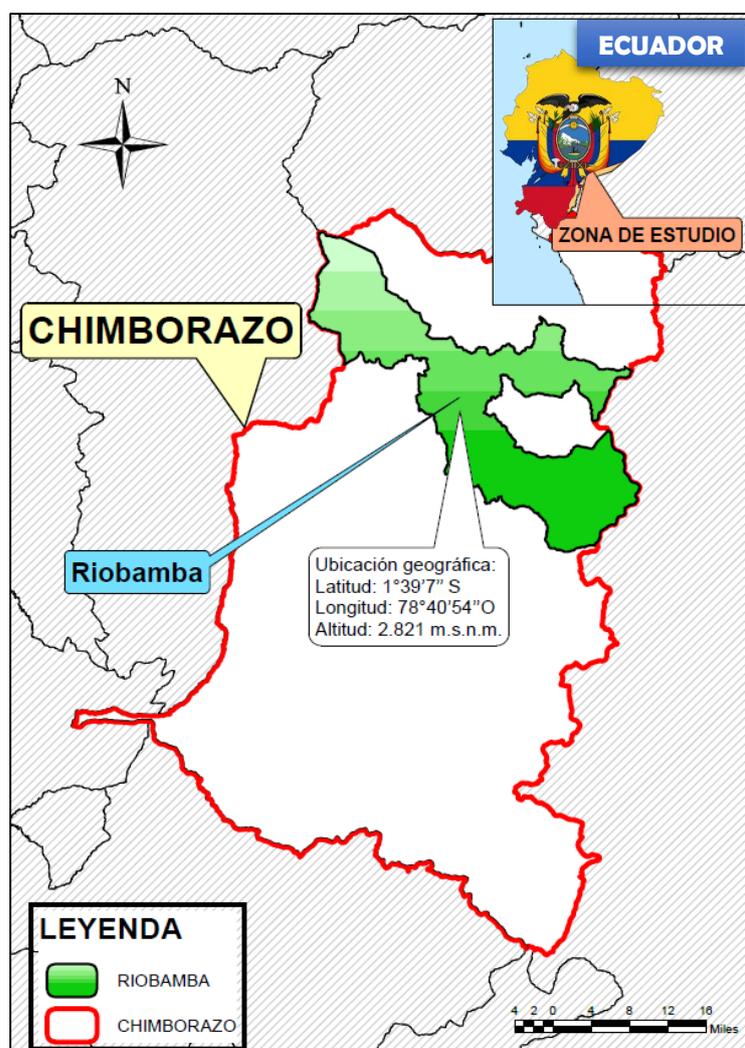


Figura 3.1: Ubicación geográfica del ensayo

3.1.1. Condiciones climáticas

En la zona de estudio se presenta una temperatura media de 13,5 °C, una precipitación media anual de 350 mm/año y la humedad relativa de 59,6 %.

3.1.2. Clasificación ecológica

Según Holdrige (1982), la localidad se encuentra en el rango de estepa espinosa Montano Bajo (eeMB).

3.2. Características del suelo

Los resultados del análisis físico – químico de suelo se presentan en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1: Contenido de nutrientes según el análisis de suelo.

Nutriente	Unidad	Valor	Interpretación
Nitrógeno	ppm	54.00	Medio
Fósforo	ppm	23.00	Alto
Potasio	meq/100ml	0.43	Alto
Calcio	meq/100ml	12.40	Alto
Magnesio	meq/100ml	2.70	Alto
Materia orgánica	%	1.00	Bajo
pH		7.70	Ligeramente alcalino
Textura			Franco Arenoso

FUENTE: Elaboración propia.

3.2.1. Características del agua

Los resultados del análisis químico del agua se presentan en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2: Análisis del agua.

Característica	Unidad	Valor	Interpretación
pH	U	8.7	Alcalino
Temperatura	°C	18	
Conductividad	μS	940	Bajo
Turbidez	U	0.9	Alta
Dureza	mg/l	584	Muy dura
Calcio	mg/l	115	Medio
Magnesio	mg/l	126	Alto

FUENTE: Elaboración propia

3.3. Materiales y equipos

3.3.1. De campo

Semilla de papa certificada, lisímetros de drenaje, sistema de riego a goteo, herramientas de campo, insumos agrícolas, flexómetro, tensiómetros, juego de barrenos, cápsulas para muestras de suelo, infiltrómetro de doble anillo, bandejas de escurrimiento, estación meteorológica portátil, estufa, GPS, cámara de fotográfica.

3.3.2. De gabinete

Laptop, cuaderno de campo, software (ARGIS, AutoCAD, SPSS, Office, Google Earth), información cartográfica, pluviométrica.

3.4. Metodología

3.4.1. Precampo

La primera fase de la investigación consistió en la recopilación de información base de investigaciones previas sobre el cultivo de papa en función al agua de riego y los requerimientos hídricos.

La investigación estuvo constituida por tres tratamientos (Cuadro 3.3), en un área experimental de 1 156 m² (Cuadro 3.4), empleándose un diseño completamente al azar con tres repeticiones (Cuadro 3.5).

a. Tratamientos en estudio

Las características de los tratamientos en estudio se detallan en el **Cuadro 3.3**.

Cuadro 3.3: Tratamientos en estudio

Tratamiento	Descripción
T1	Variedad de papa Victoria con el 25 % del consumo de agua entre los niveles de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).
T2	Variedad de papa Victoria con el 50 % del consumo de agua entre los niveles de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).
T3	Variedad de papa Victoria con el 75 % del consumo de agua entre los niveles de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

FUENTE: Elaboración propia

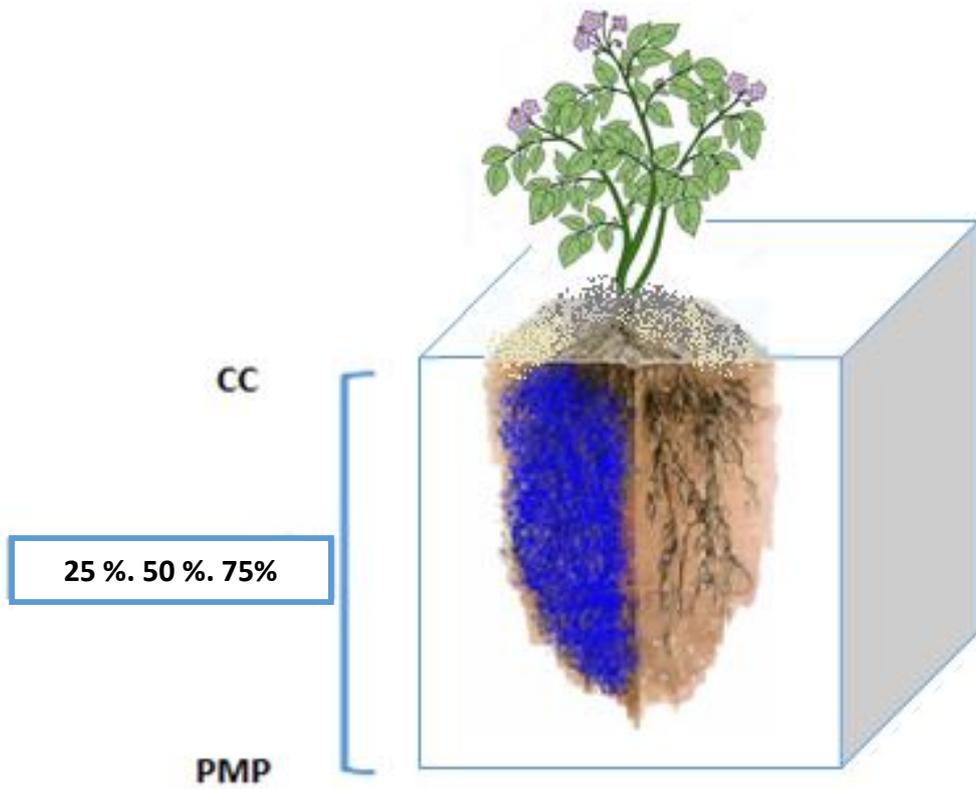


Figura 3.2: Niveles de agua en el suelo.

b. Características de la parcela experimental

Las características de la parcela experimental se detallan en el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.4: Característica del campo experimental

Características	
Número de unidades experimentales	9
Numero de tratamientos	3
Numero de repeticiones	3
Área total de experimento	1 156 m ²
Largo del ensayo	34 m
Ancho del ensayo	34 m
Distancia entre repeticiones	2 m
Número de caminos	5
Características de la unidad experimental	
Número de tubérculos / parcela	300
Número de surcos.	10
Ancho de la parcela	10 m
Largo de la parcela	10 m
Distancia entre surcos.	1 m
Distancia entre plantas.	0,3 m
Número de plantas evaluadas.	10
Área neta de parcela.	9 m ²
Área total de la parcela	900 m ²
Forma de parcela	Cuadrangular

FUENTE: Elaboración propia.

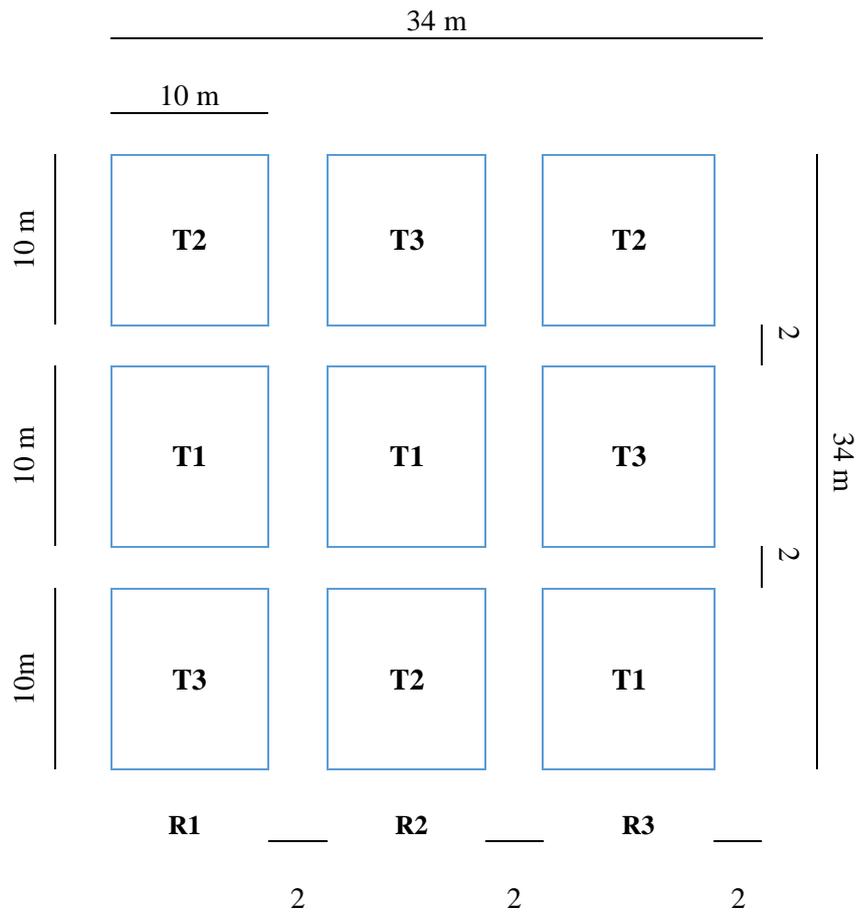


Figura 3.3: Esquema de la parcela experimental, Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

c. Análisis estadístico (ANOVA)

Se utilizó el diseño completamente al azar con tres tratamientos y tres repeticiones:

Cuadro 3.5: Esquema de análisis de varianza

Fuentes de variación	Fórmula	Grados de libertad
Repeticiones	$r - 1$	2
Tratamiento	$t - 1$	2
Error	$(t - 1) * (r - 1)$	4
Total	$t * r - 1$	8

FUENTE: Elaboración propia

d. Análisis funcional

Para los factores e interacciones con significancia estadística se utilizó la prueba de significación de Scheffé al 5%.

e. Labores preculturales

- Análisis de suelo. Se obtuvo una muestra representativa (zig – zag) del área de investigación, a una profundidad de 0 – 0,20 m, la misma que se remitió al laboratorio de suelos y aguas para su análisis físico – químico.
- Preparación del suelo. La preparación del suelo se realizó con la ayuda de un tractor a una profundidad de 0,5 m, y el surcado a una distancia de un 1,0 metro aproximadamente.



Figura 3.4: Labores pre-culturales, Riobamba, Ecuador, 2018.

3.4.2. Fase de campo

Para evaluar el efecto del riego parcial en el cultivo de papa (*Solanum spp.*) se instaló un sistema de riego por goteo con dos mangueras auto compensadas (de fácil acceso y comercial en el país) las mismas que se ubicaron en cada lomo del surco, enumeradas de izquierda a derecha. Cabe mencionar que las mangueras impares tuvieron una tubería independiente de las pares con la finalidad que la planta sufra el efecto del riego parcial. Además los riegos se efectuaron cuando se consumió el 25%, 50% y 75% entre los niveles de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), en cada uno de los lados del surco.

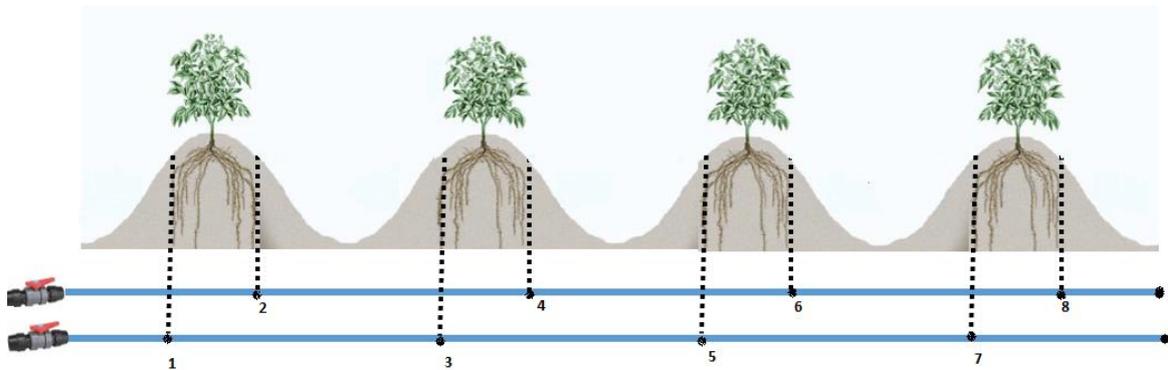


Figura 3.5: Esquema de distribución de riego, Riobamba, Ecuador, 2018.

a. Variación climática durante la fase experimental

Se instaló una estación meteorológica portátil para determinar los factores climáticos reales que influyen en el cultivo; cabe mencionar que se correlacionó con información de la estación meteorológica del INAMHI que se encuentra en la ESPOCH.

b. Variación de la humedad en el suelo

El comportamiento de la humedad del suelo se determinó a través:

- **Humedad mediante el método gravimétrico**

El porcentaje de humedad se determinó extrayendo una muestra de cada tratamiento a una profundidad de 0 – 0,15 m y 0,15 – 0,30 m, en forma diaria y luego aplicando la ecuación (2.1).

c. Labores culturales

- Siembra. La siembra se realizó colocando un tubérculo a una distancia de 0,3 m y una profundidad de 0,1 – 0,12 m.
- Fertilización. La cantidad de fertilizante se dividió en dos partes, la primera a la siembra y la segunda al medio aporque, además de aplicaciones foliares con micronutrientes durante el ciclo del cultivo.
- Rascadillo. Se realizó a los 30 días después de la siembra, además de fertilización nitrogenada complementaria.
- Aporque. Esta labor se realizó para estimular la tuberización.
- Control de plagas y enfermedades. Se realizó aplicaciones de pesticidas según las recomendaciones de manejo integrado del INIAP.
- Cosecha. Se realizó cuando el cultivo alcanzó la madurez fisiológica.



Figura 3.6: Labores culturales, Riobamba, Ecuador, 2018.

d. Medición de parámetros biofísicos

- Porcentaje de emergencia

Se contabilizó el número de plantas emergidas, relacionándolos con el número de tubérculos sembrados en la parcela neta, expresándolo en porcentaje.



Figura 3.7: Emergencia del cultivo de papa (*Solanum* spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

- **Altura de la planta**

La altura se midió a partir del cuello hasta el ápice del tallo en diez plantas tomadas al azar de la parcela neta, a los 45, 75 y 105 días después de la siembra.

- **Profundidad radicular**

La profundidad radicular se basó en la metodología del rizotróon colocando uno por tratamiento, los mismo que tuvieron una dimensión 3 x 1 x 1,5 m, con cobertura artificial y pared frontal de vidrio debidamente cuadrículada a medidas constante de 0,1 m, el registro se realizó a los 45, 85 y 110 días después de la siembra.

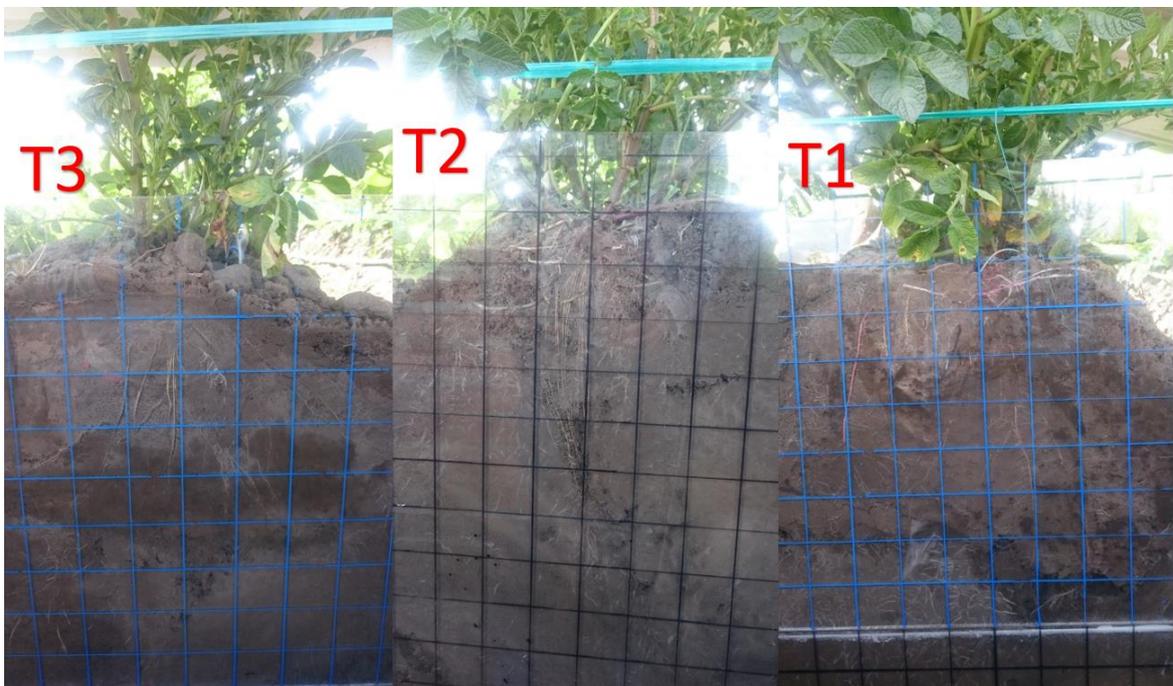


Figura 3.8: Comportamiento del sistema radicular del cultivo de papa (*Solanum* spp.) variedad victoria en función del bulbo de humedecimiento del suelo, Riobamba, Ecuador, 2018.

- e. **Identificación de los estados fenológicos**

- **Tuberización**

Se contabilizó los días transcurridos desde la siembra hasta que el 50% de las plantas de la parcela neta, presentaron estolones con hinchamiento en su extremo. Los valores se expresaron en días después de la siembra (dds).

- **Floración**

Se contabilizó los días transcurridos desde la siembra hasta que el 50% de las plantas de la parcela neta presentaron flores abiertas. Los valores se expresaron en días después de la siembra (dds).



Figura 3.9: Floración del cultivo de papa (*Solanum* spp) variedad victoria en función del bulbo de humedecimiento del suelo, Riobamba, Ecuador, 2018.

- **Senescencia**

Se contó el número de días transcurridos desde la siembra hasta cuando el 50% de las plantas de la parcela neta presentaron el 50% de follaje café. Los valores se expresaron en días después de la siembra (dds).

Cuadro 3.6. Escala para determinar los días a la senescencia.

Valor	Descripción
1	Plantas verdes.
2	Hojas superiores con los primeros signos de amarillamiento.
3	Hojas amarillentas.
4	25% de tejido foliar café.
5	50% de tejido foliar café.
6	Más del 75% del tejido foliar café.
7	Plantas muertas.

FUENTE: Cuesta (2008).

f. Medición de la evapotranspiración

- Lisímetro de drenaje

Los lisímetros de drenaje se instalaron en cada tratamiento, permitiendo determinar la cantidad de agua a dotar en el siguiente riego es decir la lámina a reponer, aplicando la ecuación 2.4.

La evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{to}) es una cantidad que depende exclusivamente de las condiciones del medio ambiente misma se determinó aplicando la ecuación 2.3 y lo que respecta al volumen a aplicar se calcula aplicando la ecuación 2.8.



Figura 3.10: Lisímetro de drenaje, Riobamba, Ecuador, 2018.

g. Coeficiente de cultivo (K_c) bajo estrés hídrico

Se determinó el coeficiente de cultivo K_c bajo estrés hídrico ajustado a cada tratamiento en estudio, tomando en consideración las recomendaciones de la FAO y el valor real obtenido con el lisímetro de drenaje.

h. Rendimiento

- Tubérculos por planta

Se tomó 10 plantas de la parcela neta al azar, de las cuales se contabilizará el número de tubérculos por planta y se realizó un promedio como dato final.

- Materia seca del tubérculo

La determinación de la materia seca se realizó en base a la metodología propuesta por Bonierbale *et al.* (2010), la misma que consiste en picar 5 tubérculos (un total de 500 g aproximadamente) en cubos pequeños de 1 o 2 cm, mezclar bien y tomar submuestras de 200 g cada una que correspondan a todas las partes de los tubérculos, y registrar los datos como peso fresco de la muestra; colocamos la muestra en una bolsa de papel o un recipiente abierto y ponemos en una estufa a 80°C por 72 horas controlando el peso de las muestras a intervalos regulares hasta que tengan peso constante, para finalmente aplicar la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Materia Seca} = (\text{Peso materia seca} / \text{Peso materia húmeda}) * 100 \quad (3.1)$$



Figura 3.11: Materia seca del cultivo de papa (*Solanum* spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

- **Producción por planta**

La producción por planta se calculó en base al peso total de los tubérculos a la cosecha de la parcela neta, dividida para el número de plantas cosechadas, el promedio se expresó en Kg/planta.

- **Rendimiento por categoría**

Para la determinación del rendimiento por categoría se clasificó los tubérculos cosechados de la parcela total en tres categorías: papa comercial de primera (peso mayor a 60 g), papa para “semilla” de segunda (peso entre 30 a 60 g.) y papa de desecho (peso menor a 30 g). Los resultados se expresarán en Kg/categoría.

- **Rendimiento total**

Se determinó cosechando la parcela neta de las tres repeticiones, la misma que se sumó y se sacó un promedio, el resultado se expresará en t/ha.



Figura 3.12: Rendimiento del cultivo de papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

3.4.3. Fase de gabinete

Consolidación y sistematización de la información, en función del análisis estadístico (Prueba de Scheffé al 5%) determinamos el grado de significancia de los tratamientos en estudio.

a. Variación climática durante la fase experimental

El registro de la variación climática influye en la demanda hídrica del cultivo durante su ciclo.

b. Variación de la humedad en el suelo

Permite conocer si el contenido de agua en el suelo influye en el comportamiento del sistema radicular siendo este proporcional al rendimiento.

c. Medición de parámetros biofísicos

Permite determinar si los diferentes niveles de humedad en el suelo, combinado con el secado parcial de raíces influyen en el desarrollo de la planta.

d. Medición de los estados fenológicos

Permite determinar si los estados fenológicos del cultivo están en función de los niveles de humedad en el suelo.

e. Medición de la evapotranspiración

La determinación de la demanda hídrica exacta mediante el uso del lisímetro de drenaje, en función de los niveles de humedad del suelo, determina las cantidades

exactas de agua que requiere el cultivo.

f. Coeficiente de cultivo (K_c)

La finalidad es la obtención de un coeficiente de cultivo (K_c) bajo “estrés hídrico” ajustado bajo una menor disponibilidad de agua, de acuerdo a los tratamiento para la zona de estudio mediante la evapotranspiración de cultivo y de referencia.

g. Rendimiento

Mediante el análisis estadístico con la tabulación de los datos obtenidos permite determinar si al disminuir un porcentaje de los niveles de humedad en el suelo afecta el rendimiento.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Variación climática durante la fase experimental

4.1.1. Temperatura y precipitación

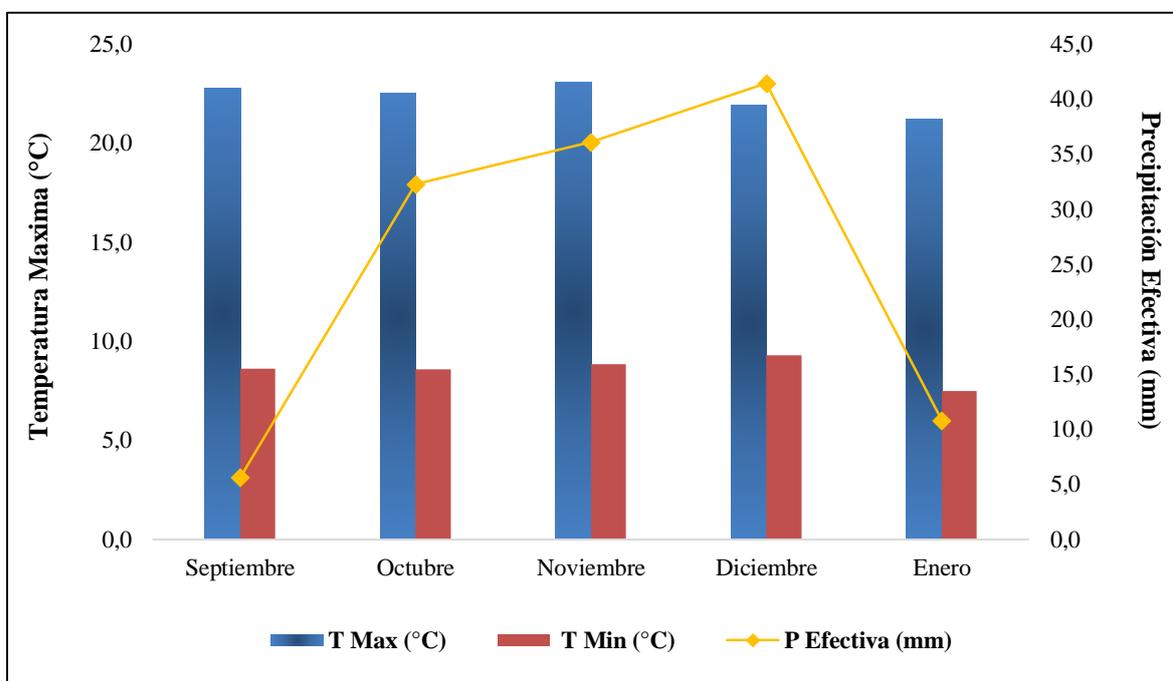


Figura 4.1: Promedios de temperatura (°C) y precipitación efectiva (mm) durante el ciclo de cultivo de papa (*Solanum* spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 4.1 se presenta una fluctuación no relevante de temperatura máxima registrando el mayor valor en el mes de noviembre con 23.1 °C, y en relación a la temperatura mínima esta presentó el valor mínimo en el mes de enero con 7.5 °C, cabe mencionar que durante este mes hubo registros de hasta 3 °C, lo que fue necesario tomar las medidas preventivas para evitar daños en el cultivo, ya que según la FAO (2008), el cultivo no tolera las temperaturas mínimas bajo los 10 °C y máximas a 30 °C mismas que inhabilitan el

desarrollo del tubérculo. En referencia a la precipitación efectiva el máximo registrado es 41.4 mm, lo que según Simpfendofer (2000), considera que precipitaciones inferiores a 10 mm no son efectivas para el cultivo ya que estas quedan retenidas en las hojas y se evaporan.

4.1.2. Humedad relativa y velocidad del viento

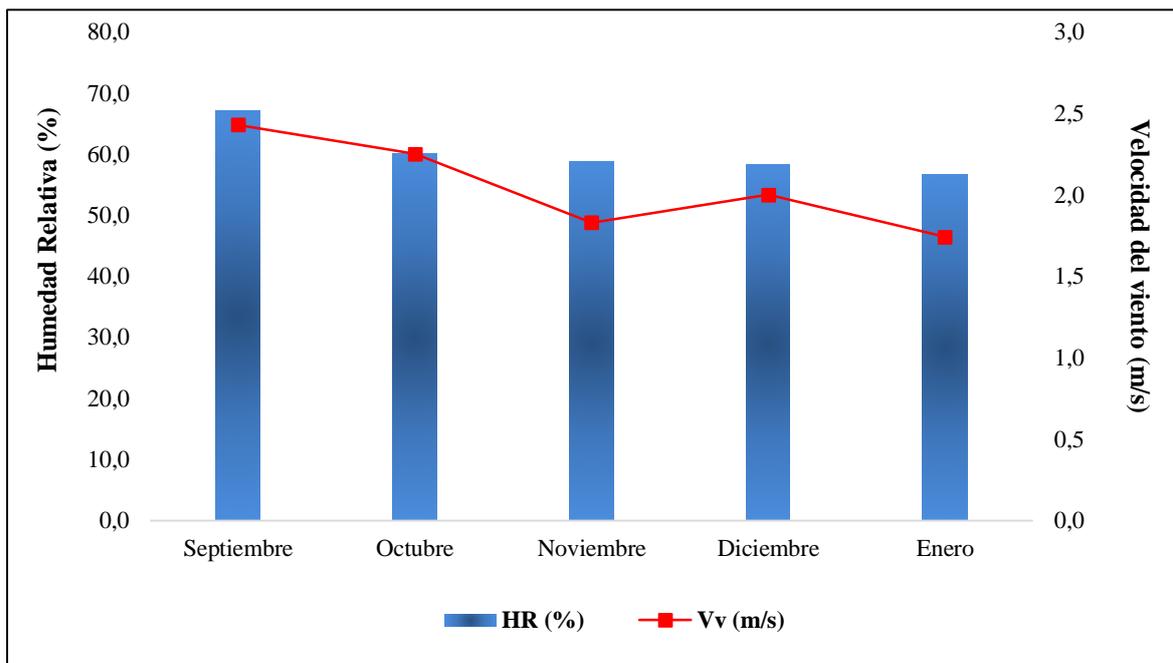


Figura 4.2. Promedios de humedad relativa (HR %) y velocidad del viento (m/s) durante el ciclo de cultivo de papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 4.2 se presenta variaciones de la humedad relativa la misma que va desde 67.3% para el mes de septiembre hasta 56.8% para el mes de enero, en tanto que la velocidad del viento fluctuó de 1.7 a 2.4 m/s sin afectar el incremento de los niveles de transpiración o lesiones necróticas en hojas y tallos (Casierra & Aguilar, 2008).

4.2. Variación de la humedad en el suelo

4.2.1. Humedad mediante el método gravimétrico

a. Humedad a 15 cm de profundidad

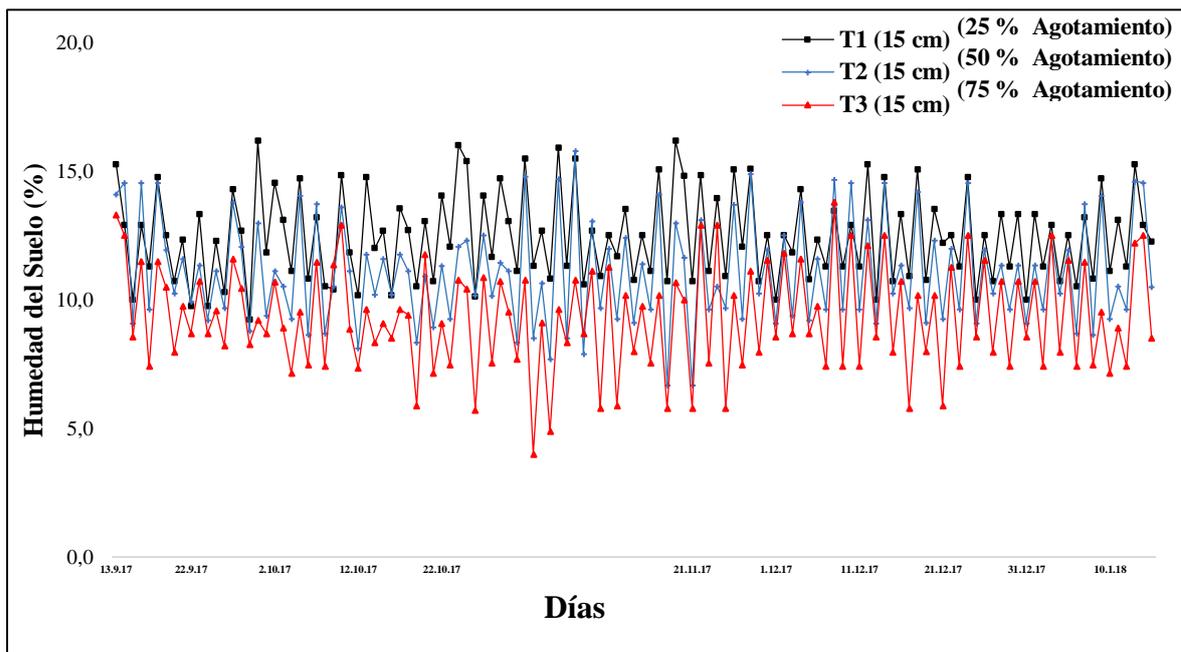


Figura 4.3: Registro de humedad del suelo a 15 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo de papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 4.3 se presenta la variación de la humedad del suelo a 15 cm en base a la configuración experimental, es así que la planta se expuso a lapsos secos y húmedos, generando diferente comportamiento de la raíz, donde el tratamiento 1 se mantuvo a un nivel de mayor de humedad con un promedio de 12.25 %, el tratamiento 2 con 10.5% y el tratamiento 3 con 8.75 %, resultados que si correlacionamos con lo mencionado por Tourneux *et al.* (2003), existe una estrecha correlación entre el contenido de humedad del suelo y el patrón de desarrollo de la raíz, permitiendo incrementar la eficiencia del método de suministro de agua.

b. Humedad a 30 cm de profundidad

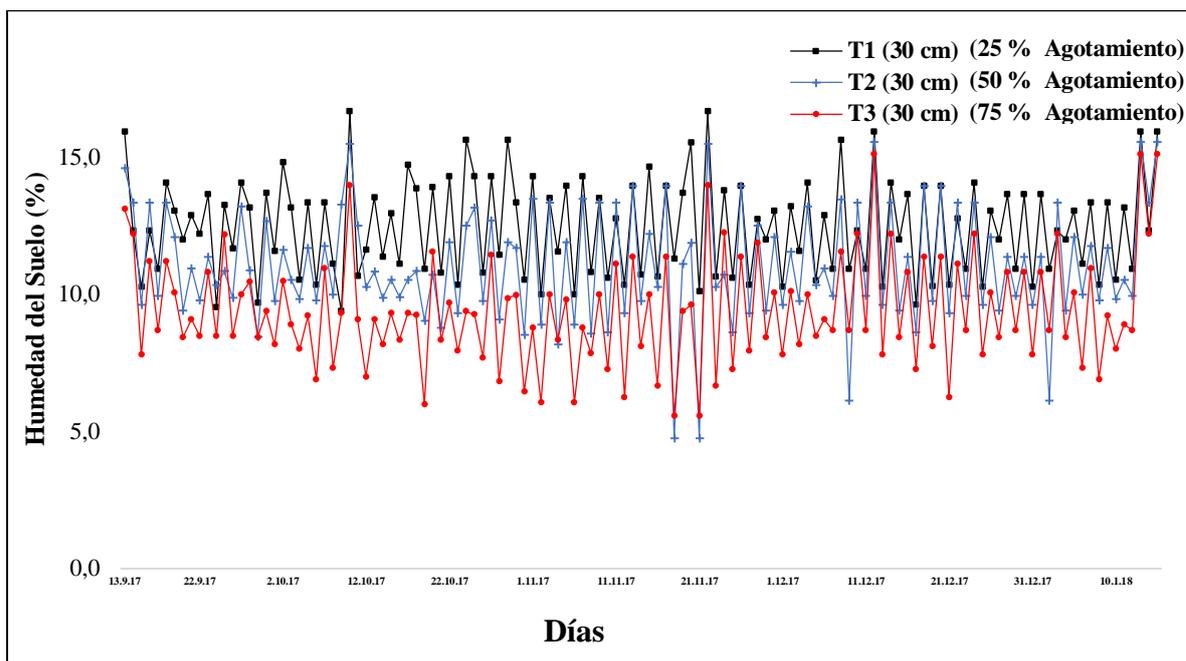


Figura 4.4: Registro de humedad del suelo a 30 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo de papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 4.4 se presenta el comportamiento de la humedad del suelo a la profundidad de 30 cm, donde los patrones de humectación generan la configuración del sistema radicular además estos lapsos de agua ocasionan fisiológicamente un notorio comportamiento de la raíz, como lo mencionan Ahmadi *et al.*, (2010) y Thompson *et al.* (2007), que esto influye en la conductividad hidráulica de la raíz a nivel celular, correlacionado con un elevado nivel de ácido abscísico (ABA).

4.3. Determinación de los parámetros biofísicos

4.3.1. Emergencia

El análisis de varianza para el porcentaje de emergencia a los 45 días después de la siembra (Cuadro 4.1), no expresa diferencias significativas para ninguna de las fuentes de variación, a pesar de que la dotación de agua fue en función de los niveles de humedad del suelo. El

promedio general fue 84.52 % y el coeficiente de variación 11.55 %.

Cuadro 4.1: Análisis de varianza para la evaluación de emergencia a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria a los 45 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	8	
Repeticiones	2	13.22 ns
Tratamientos	2	0.47 ns
Error	4	95.24
Promedio (%)		84.52
CV (%)		11.55

∴ ns = (p > 0.05)

FUENTE: Elaboración propia

En la Figura 4.5 en función al análisis las diferencias entre los tratamientos no son notorias variando desde 84.13% a 84.92%, acotar lo mencionado por Martinez *et al.* (1992), quienes indican que la falta de agua en el periodo crítico como emergencia afecta notablemente el rendimiento final del tubérculo, además de las características de la semilla (sanidad y brotación).

4.3.2. Altura de la planta

a. Altura de planta a los 45 días

El análisis de varianza para la altura de planta a los 45 días después de la siembra (Cuadro 4.2), señala diferencias no significativas entre tratamientos. El promedio general fue 14.21 cm y el coeficiente de variación 26.68 %.

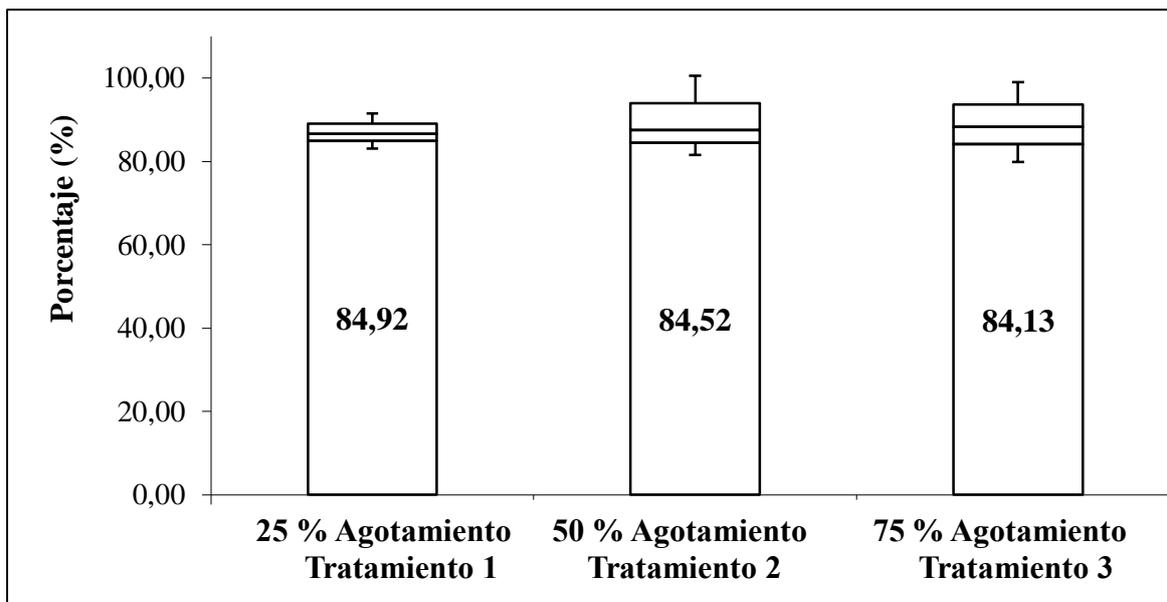


Figura 4.5: Promedios de emergencia (%) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria a los 45 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia

Cuadro 4.2: Análisis de la varianza para altura de planta (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria a los 45 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	8	
Repeticiones	2	2.97 ns
Tratamientos	2	9.24 ns
Error	4	14.38
Promedio (cm)		14.21
CV (%)		26.68

∴ ns = ($p > 0.05$)

FUENTE: Elaboración propia

Las diferencias presentadas en la Figura 4.6 no fueron significativas a pesar que desde el establecimiento del cultivo las láminas de riego aplicadas estuvieron en

función a los tratamientos; considerar lo manifestado por Streck *et al.* (2006), al presentar una menor disponibilidad de agua por un periodo prolongado genera la reducción del área foliar y la altura del tallo, por tanto la cobertura del suelo es menor, correlacionado también con las condiciones medioambientales del lugar (Ojala *et al.*, 1990).

b. Altura de planta a los 75 días

El análisis de varianza para la altura de planta a los 75 días después de la siembra (Cuadro 4.3), señala diferencias significativas entre tratamientos. El promedio general fue 49.74 cm y el coeficiente de variación 6.73 %.

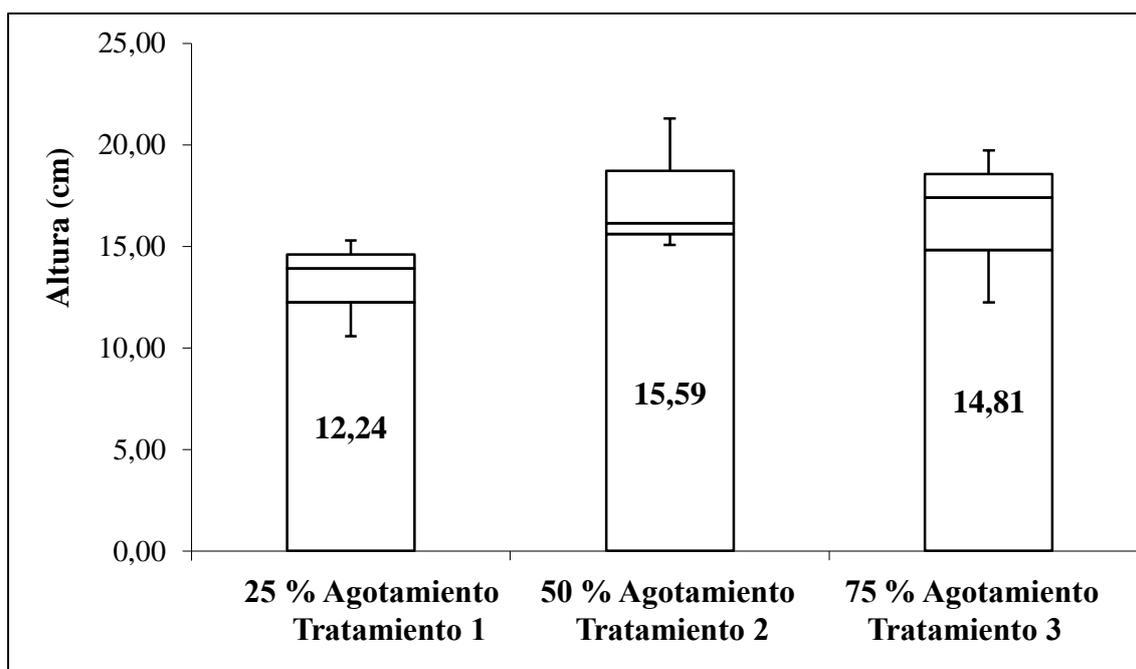


Figura 4.6: Promedios de altura (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria a los 45 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

La persistencia al no dotar de agua a los niveles adecuados es decir no llegar a capacidad de campo en el suelo genera diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 4.7), correlacionado con lo mencionado por Deblonde & Ledent (2001), que indican que el parámetro como la altura del tallo es sensible a la escases

moderada del agua, además que este constituye un indicador suficiente para afectar la producción de tubérculos. En tal sentido al observar el Cuadro 4.4 mediante la prueba de Scheffé se distingue diferencias significativas donde el tratamiento 1 se ubica en el rango “a” con el mayor crecimiento y el tratamiento 3 en el rango “c” con el menor crecimiento.

Cuadro 4.3: Análisis de la varianza para altura (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria a los 75 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	8	
Repeticiones	2	0.11 ns
Tratamientos	2	90.57 *
Error	4	11.20
Promedio (cm)		49.74
CV (%)		6.73

∴ ns = (p>0.05), * = (p<0.05)

FUENTE: Elaboración propia

Cuadro 4.4: Prueba de Scheffé (5%) para altura de planta a los 75 días después de la siembra

Tratamientos	Medias (cm)
T1	54.93 a
T2	50.30 ab
T3	43.99 b

FUENTE: Elaboración propia.

a. Altura de planta a los 105 días

El análisis de varianza para la altura de planta a los 105 días después de la siembra (Cuadro 4.5), señala diferencias significativas entre tratamientos. El promedio general fue de 75,10cm y el coeficiente de variación 3,02 %.

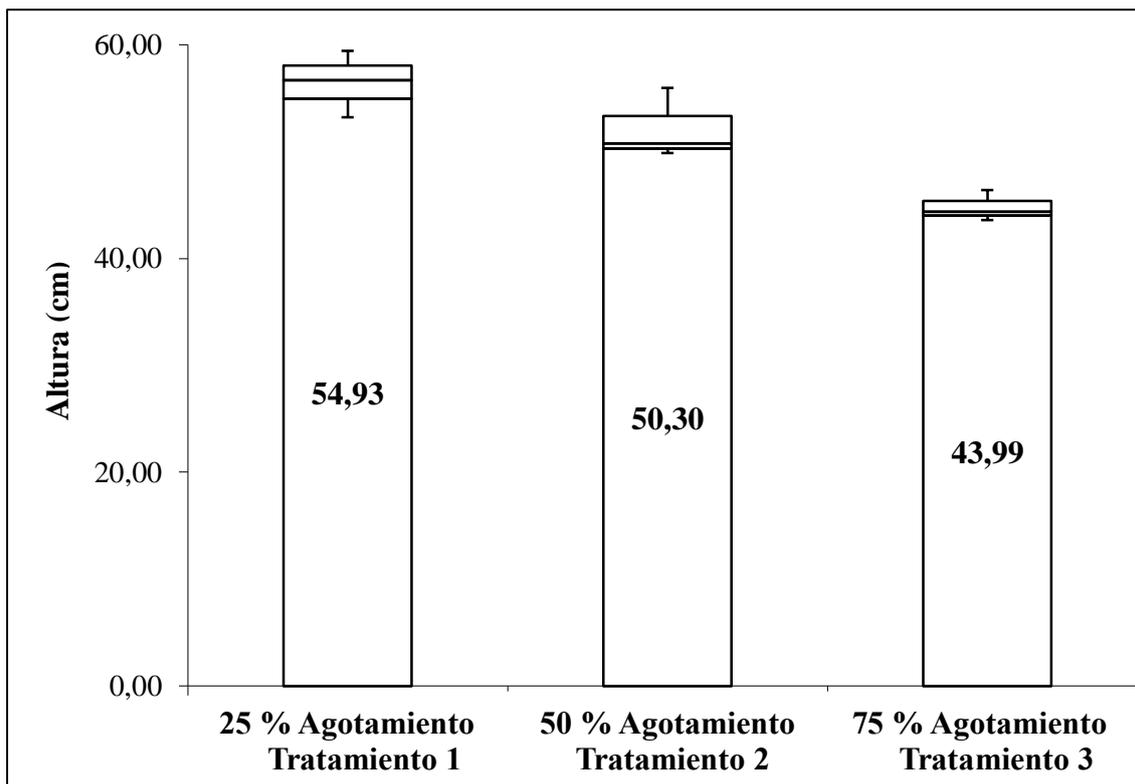


Figura 4.7: Promedios de altura (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria a los 75 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

Cuadro 4.5: Análisis de la varianza para altura (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria a los 105 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	8	
Repeticiones	2	0.97 ns
Tratamientos	2	35.75 *
Error	4	5.14
Promedio (cm)		75.10
CV (%)		3.02

∴ns = (p>0.05), * = (p<0.05)

FUENTE: Elaboración propia.

Al establecer los diferentes niveles de humedad del suelo este genera respuestas notorias en la altura del tallo (Figura 4.8), basado con lo mencionado por Deblonde & Ledent (2001), quienes consideran a la altura del tallo como un parámetro trascendental para discriminar la tolerancia a la falta de agua, ya que se ve reflejado en reprimir la división celular afectando así procesos fisiológicos y bioquímicos (fotosíntesis, traslocación, metabolismo de nutrientes, entre otros) (Jaleel 2008 y Farooq, 2008). Por lo tanto, en referencia al Cuadro 4.6 se observó que existe gran diferencia entre el tratamiento 1 ubicado en rango “a” y tratamiento 3 en el rango “c” con un valor de 6,9 cm, siendo significativo para afectar la producción de tubérculos.

Cuadro 4.6: Prueba de Scheffé (5%) para altura de planta a los 105 días después de la siembra.

Tratamientos	Medias (cm)
T1	78.58 a
T2	75.04 ab
T3	71.68 b

FUENTE: Elaboración propia.

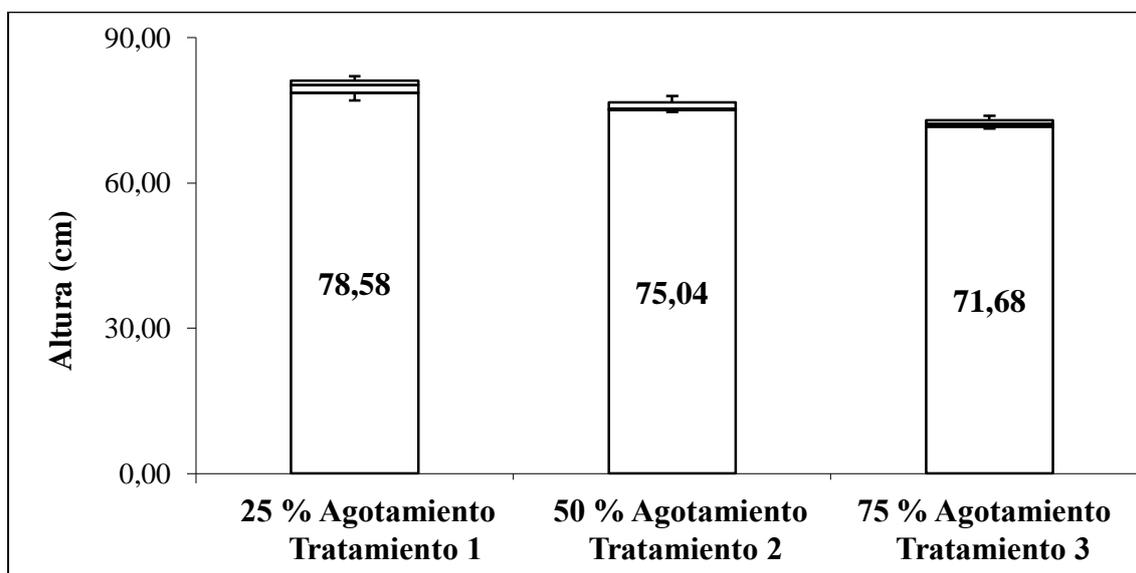


Figura 4.8: Promedios de altura (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria a los 105 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

4.3.3. Raíz

a. Crecimiento de la raíz a los 45 días

El análisis de varianza para crecimiento de la raíz a los 45 días después de la siembra (Cuadro 4.7), señala diferencias no significativas. El promedio general fue 24,50 cm y el coeficiente de variación 36,78 %.

Cuadro 4.7: Análisis de la varianza para crecimiento de la raíz (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria a los 45 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	5	
Repeticiones	1	104.17 ns
Tratamientos	2	104.65 ns
Error	2	8.1
Promedio (cm)		24.50
CV (%)		36.78

∴ns = (p>0.05)

FUENTE: Elaboración propia.

En los primeros estadios de desarrollo de la planta el comportamiento del sistema radicular (Figura 4.9), va a depender de la disponibilidad de agua en el suelo, como mencionan Stalham & Allen (2001), el retener el agua de riego al principio de la temporada podría reducir la extensión de raíces de las papas en comparación con la situación de retener o reducir la cantidad de riego más adelante en la temporada, considerando que la papa tienen la capacidad deficiente para extraer agua y minerales del suelo (Dechassa *et al.*, 2003).

Se observó que a medida que crece la planta, las raíces reorganizan las partículas del suelo, en función de la compactación del suelo ya que es un factor condicionante que la planta tiene que vencer, lo que concuerda con Bengough & Mullins, (1990) y Taylor & Ratliff (1969),

que indican que la resistencia a la penetración del suelo influye en la tasa de elongación de la raíz y el diámetro de las raíces aumenta marcadamente, lo que lleva al crecimiento de raíces agrupadas y la extensión restringida de la raíz.

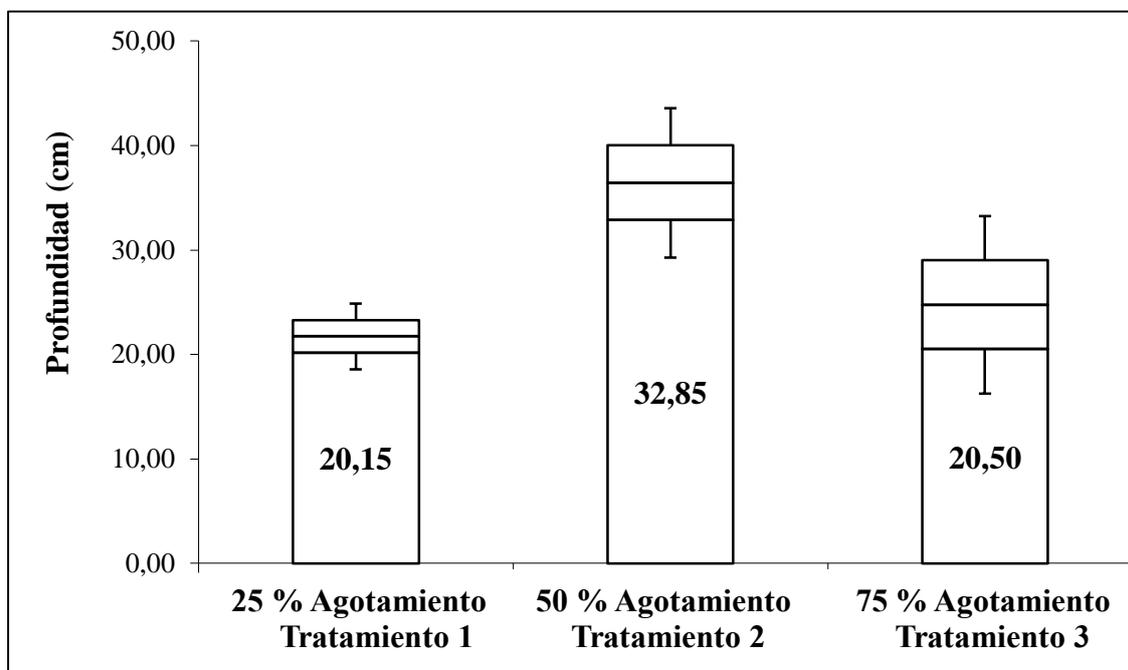


Figura 4.9: Promedios de raíz (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria a los 45 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

b. Crecimiento de la raíz a los 85 días

El análisis de varianza para crecimiento de la raíz a los 85 días después de la siembra (Cuadro 4.8), señala diferencias significativas entre tratamientos. El promedio general fue 60.63 cm y el coeficiente de variación 6.23 %.

Las variaciones en el contenido de agua del suelo ocasionaron una alteración del sistema radicular (Figura 4.10), donde las plantas mejoraron su capacidad de absorción de agua mediante la extensión del sistema de enraizamiento (Benjamin & Nielsen, 2006 y Songsri *et al.*, 2008). La diferencia en profundidad es significativa (Cuadro 4.9) ubicando al T3 en el rango “a” y T1 en el rango “b” con un valor de 23.55 cm. Considerar lo manifestado Joshi, *et al.* (2016), el desarrollo de las raíces se reprime parcialmente, al iniciación del desarrollo

de la planta debido al proceso de tuberización, lo que sugiere que las prácticas para mejorar el enraizamiento antes de esa etapa pueden contribuir a la eficacia de la raíz.

Cuadro 4.8: Análisis de la varianza para crecimiento de la raíz (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria a los 85 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	5	
Repeticiones	1	18.03 ns
Tratamientos	2	277.65 *
Error	2	14.27
Promedio (cm)		60.63
CV (%)		6.23

∴ ns = (p>0.05), * = (p<0.05)

FUENTE: Elaboración propia.

Cuadro 4.9: Prueba de Scheffé (5%) para altura de planta a los 85 días después de la siembra

Tratamientos	Medias (cm)
T3	72.65 a
T2	60.15 ab
T1	49.10 b

FUENTE: Elaboración propia.

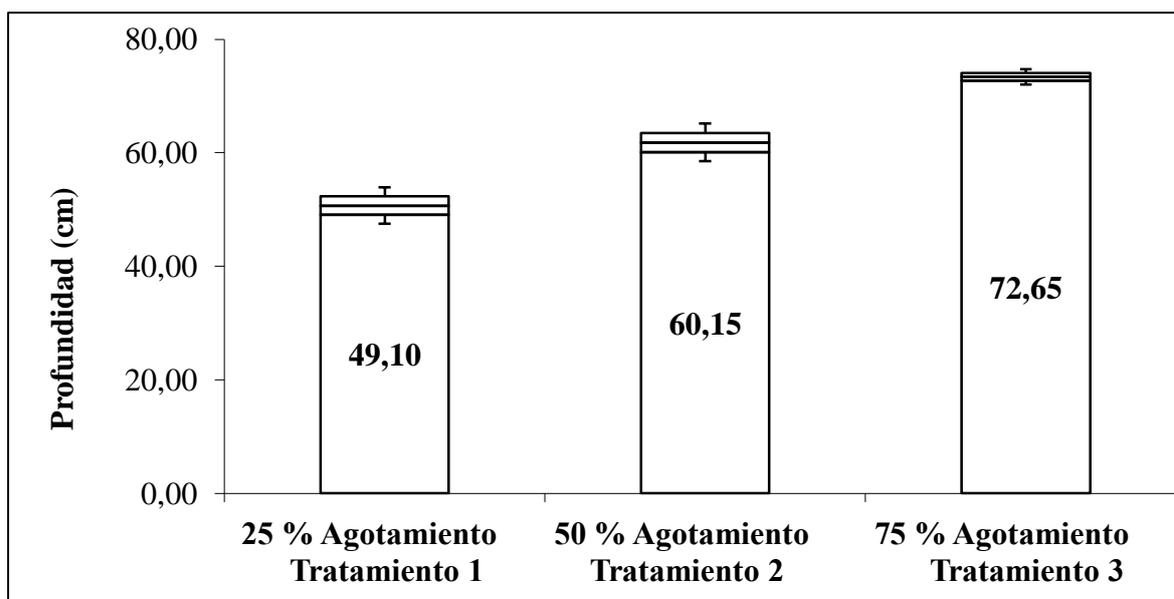


Figura 4.10: Promedios de raíz (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria a los 85 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

c. Crecimiento de la raíz a los 110 días

El análisis de varianza para crecimiento de la raíz a los 110 días después de la siembra (Cuadro 4.10), señala diferencias significativas entre tratamientos. El promedio general fue 67.68 cm y el coeficiente de variación 3.40 %.

Cuadro 4.10: Análisis de la varianza para crecimiento de la raíz (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria a los 110 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	5	
Repeticiones	1	2.53 ns
Tratamientos	2	173.05 *
Error	2	5.29
Promedio (cm)		67.68
CV (%)		3.40

∴ns = (p>0.05), * = (p<0.05).

FUENTE: Elaboración propia.

Los efectos de la disponibilidad de agua en el suelo en función del tiempo, hacen más notoria la respuesta la planta (Figura 4.11), donde la elongación de la raíz del tratamiento 3 en el rango “a” es 18.5 cm superior al tratamiento 1 en el rango “c” (Cuadro 4.11), si relacionamos con las investigaciones realizadas por Stalham & Allen (2004), quienes demostraron que a pesar que la densidad de la raíz de la papa disminuye con la profundidad, estas raíces de las capas más profundas aportaban notablemente al requerimiento total de agua del cultivo, independiente del estado hídrico de las capas superiores del suelo, además que las raíces jóvenes de la capa profunda presentan una alta eficiencia de extracción de agua (Camposeo & Rubino, 2003 y Kang & Zhang, 2004). Acotar que dicha eficiencia comparada con otros cultivos no es tan efectiva (Opena & Porter, 1999). Por último, una posible explicación del aumento aparente en el crecimiento de la raíz en el suelo seco frente al suelo húmedo podría deberse a un menor contenido de oxígeno en el suelo húmedo (Zhang & Davies, 1989).

Cuadro 4.11: Prueba de Scheffé (5%) para crecimiento de la raíz a los 85 días después de la siembra.

Tratamientos	Medias (cm)
T3	77.50 a
T2	66.55 ab
T1	59.50 b

FUENTE: Elaboración propia.

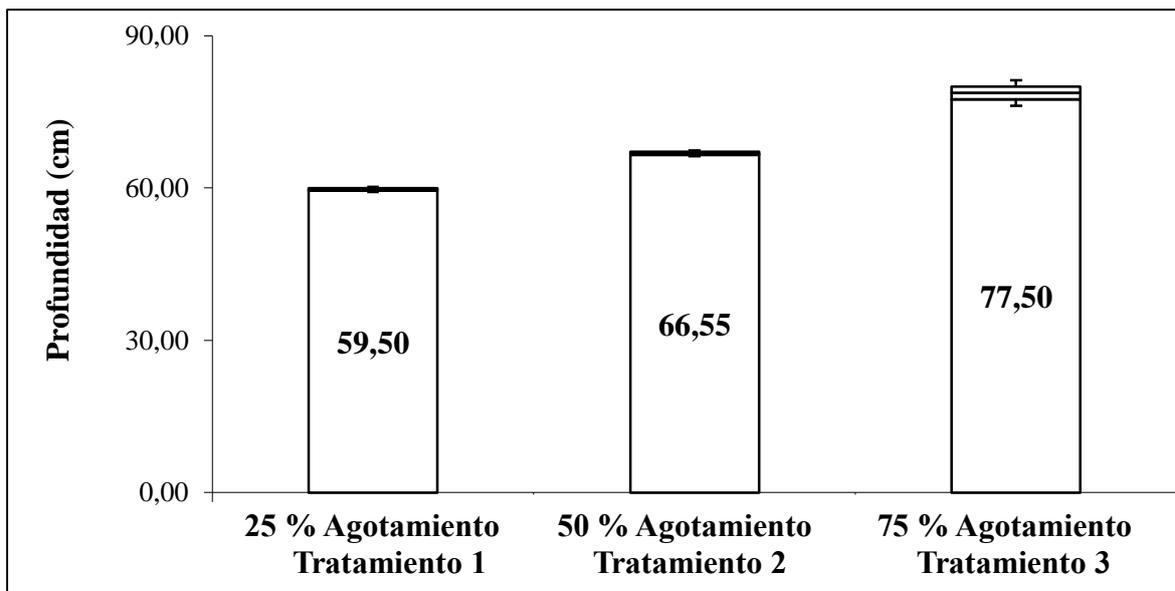


Figura 4.11: Promedios de raíz (cm) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria a los 110 días después de la siembra (dds) en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

d. Materia Seca de la Raíz

El análisis de varianza para materia seca de la raíz (Cuadro 4.12) señala diferencias no significativas para ninguna de las fuentes de variación. El promedio general fue 16.48 % y el coeficiente de variación 23.35 %.

Cuadro 4.12: Análisis de la varianza para materia seca de la raíz (%) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	8	
Repeticiones	2	1.60 ns
Tratamientos	2	6.76 ns
Error	4	14.81
Promedio (%)		16.48
CV (%)		23.35

∴ns = (p>0.05).

FUENTE: Elaboración propia.

El desarrollo del sistema radicular a influenciado en como la planta contrarresta la falta de agua en el suelo, en donde la materia seca de la raíz (Figura 4.12) se correlaciona con el rendimiento del tubérculo, en cierta medida la profundidad de la raíz servirá como un indicador en el rendimiento del tubérculo (Lahlou & Ledent, 2005), sin embargo la profundidad de la raíz contribuye esencialmente a la tolerancia al déficit hídrico.

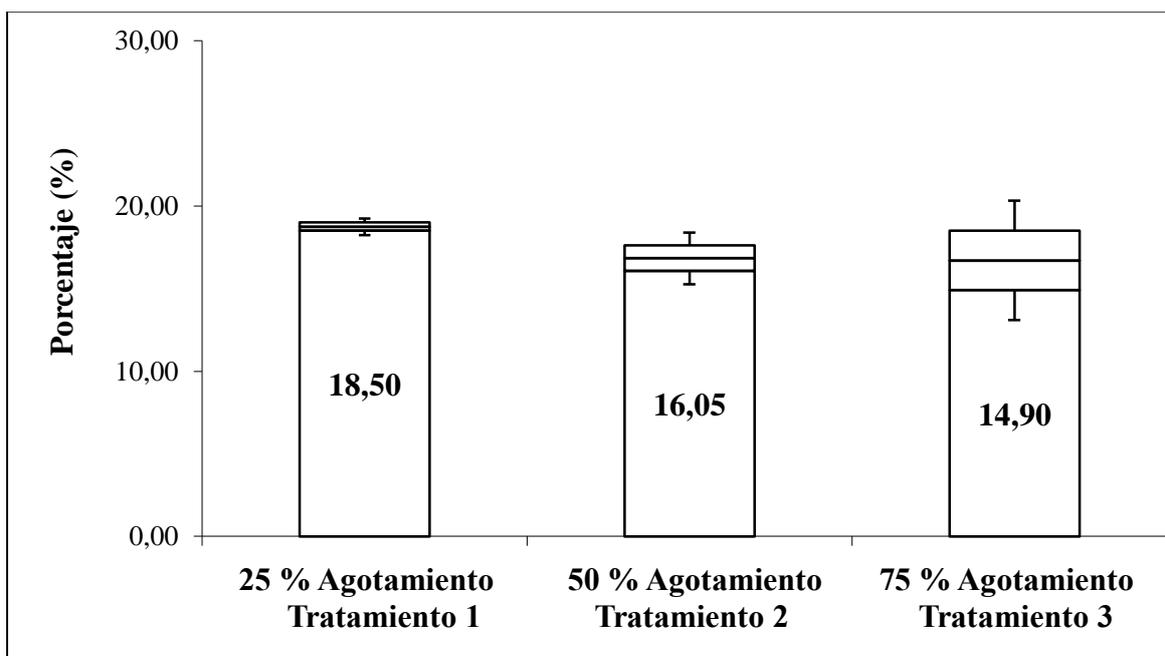


Figura 4.12: Promedios de materia seca de la raíz (%) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

4.4. Relación bulbo de humedecimiento y sistema radicular

El comportamiento de la raíz es altamente significativo (Figura 4.13), donde la concentración de raíces, hasta los primeros 0.30 m arrojan una concentración promedio de 63% y notoriamente la concentración desciende a mayor profundidad dando un promedio de 37 % esto se afirma en base a los estudios realizados por Alva *et al.* (2012); Liao *et al.* (2016); Muñoz *et al.* (2006) y Ragassi *et al.* (2009), quienes señalan que el sistema de raíces de papa a menudo se concentra en los 0.30 m superiores de suelo, y en cierta medida limita la accesibilidad de nutrientes, lo que genera que el cultivo sea más susceptible a la escasez de agua cuando se secan los suelos.

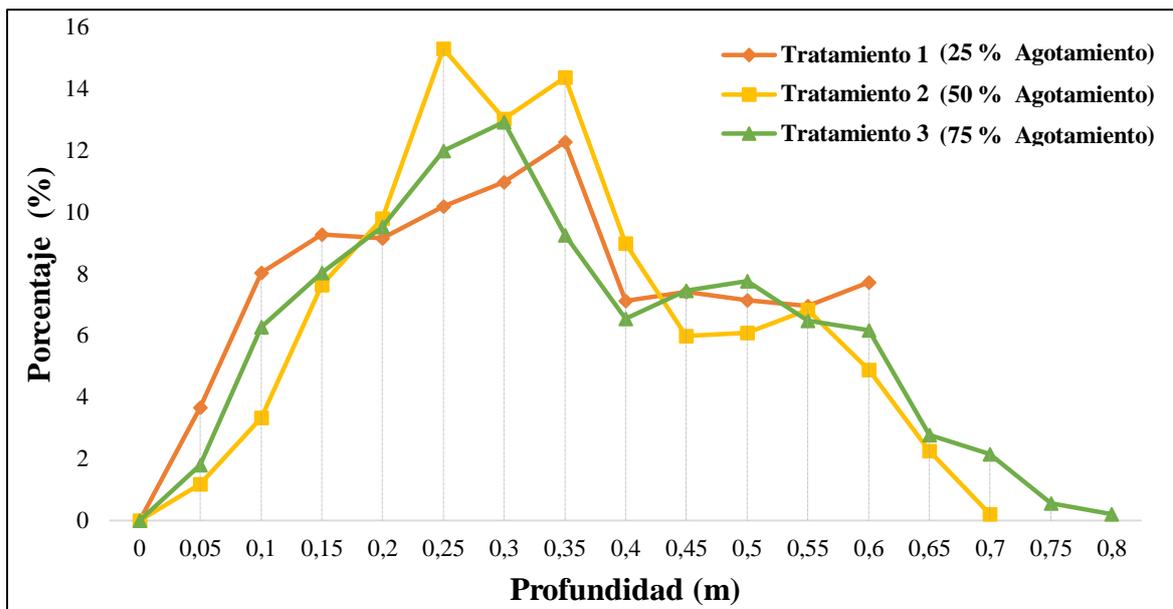


Figura 4.13: Comportamiento radicular en función al bulbo de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

Un aspecto importante que mencionar es que la profundidad de enraizamiento está controlada de manera efectiva por la curva característica de humedad del suelo, en lugar de la densidad aparente. En tal sentido la distribución del agua en el suelo, la textura y estructura del suelo ejerce efectos sobre el crecimiento y la distribución de las raíces (Jones, 1983; Coelho & Or, 1999; Dexter, 2004 y Wang *et al.*, 2006). Cabe mencionar que las limitaciones en la arquitectura de la raíz del cultivo a menudo limitan directamente su rendimiento (Onder *et al.*, 2005 y Wang *et al.*, 2007).

Al suministrar de forma alternada la dotación de agua en cada tratamiento este condiciona, el desarrollo radicular, correlacionado con varios estudios que mostraron que los sistemas de raíces de las plantas de riego parcial tenían una mayor capacidad de exploración del suelo más profunda y que la rehidratación del suelo seco mejoraba enormemente la asignación de biomasa a las raíces en ese suelo (Mingo *et al.*, 2004).

La profundidad de enraizamiento generalmente se extiende de 0.40 a 0.80 m (Martin *et al.*, 1990; Stalham & Allen, 2004 y Wang *et al.*, 2006), lo que en base a nuestros resultados podemos destacar lo siguiente:

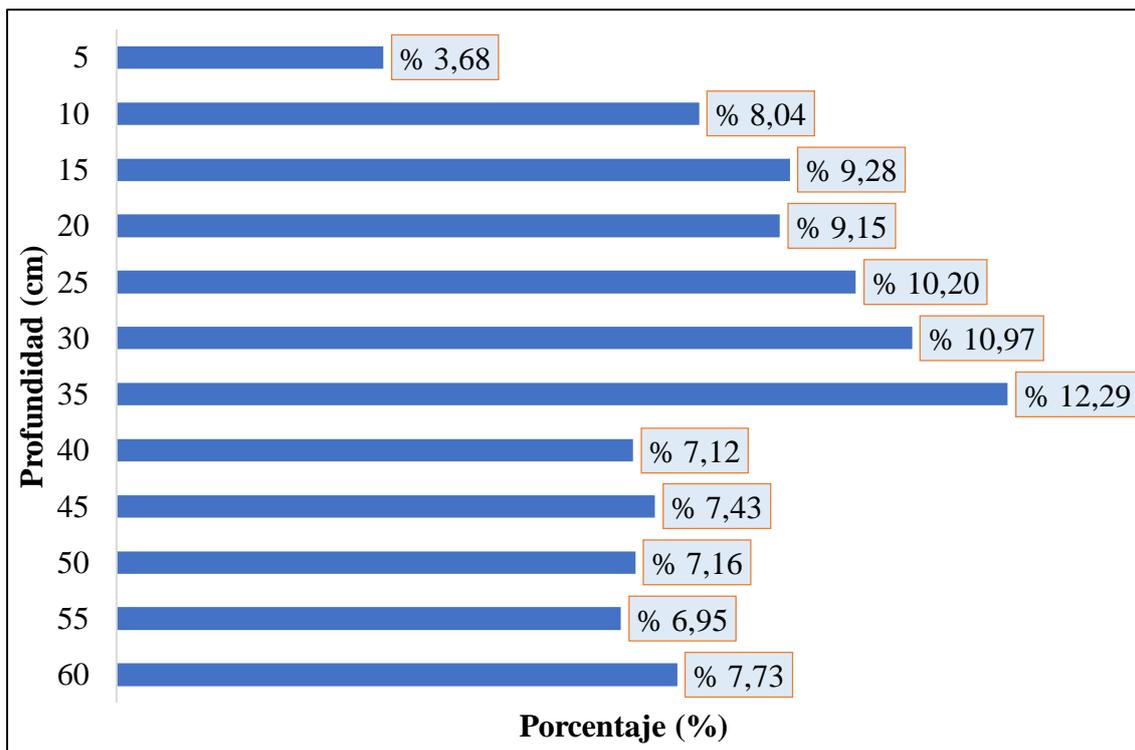


Figura 4.14: Patrón de extracción (%) del tratamiento 1 (25% agotamiento) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en función de la profundidad en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

En el Figura 4.14 se observa que con el comportamiento de humedad del suelo que se mantuvo a un promedio de 12.25% lo que ha influenciado notoriamente en la configuración del sistema radicular, no sobrepasando los 0.60 m, además la mayor concentración de raíces se encuentra en los primeros 0.30 m con un valor 63.61%.

En la Figura 4.15 se observa que en base al comportamiento de humedad del suelo se mantuvo a un promedio de 10.50 %, lo que ha influenciado a que el sistema radicular llegue a 0.70 m, haciendo que la raíz crezca más en búsqueda de agua.

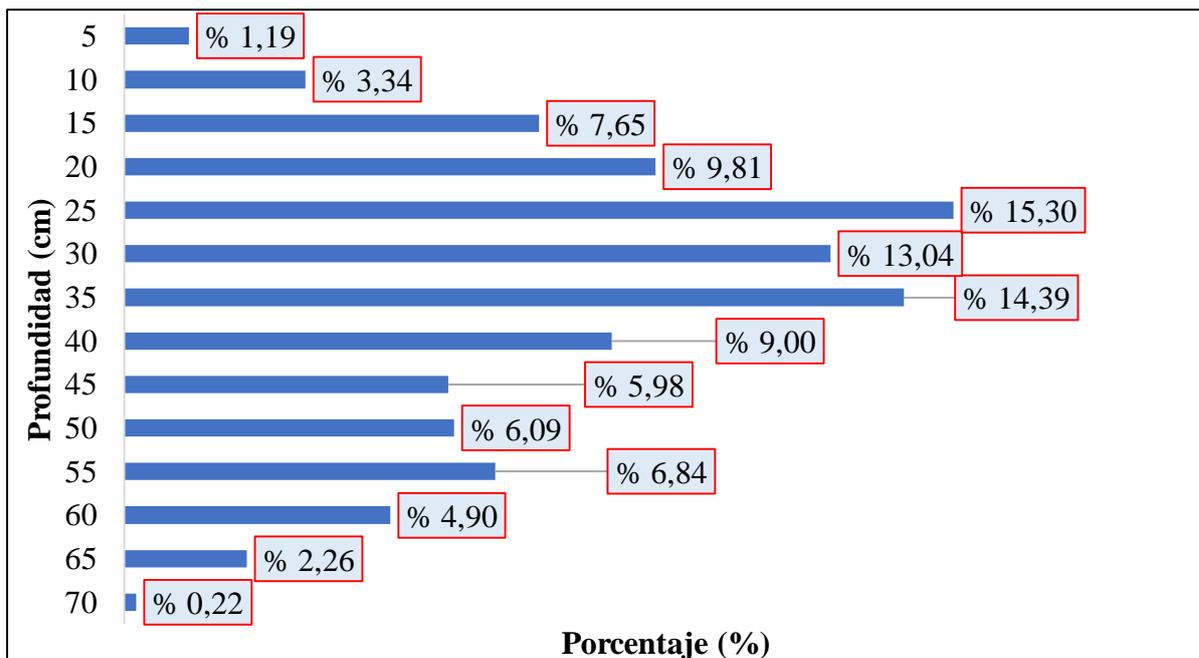


Figura 4.15: Patrón de extracción (%) del tratamiento 2 (50% agotamiento) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en función de la profundidad en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

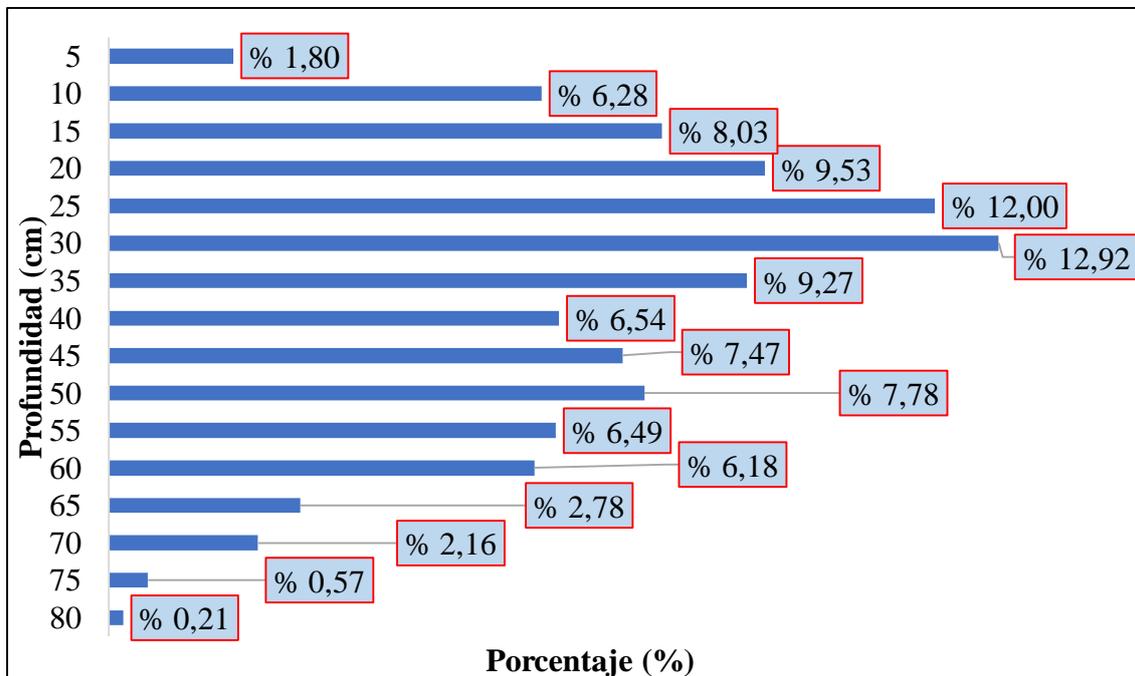


Figura 4.16: Patrón de extracción (%) del tratamiento 3 (75% agotamiento) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en función de la profundidad en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 4.16 el comportamiento radicular fue mayor que los demás tratamientos ya que la planta tuvo que realizar un esfuerzo significativo en la búsqueda de agua hasta una profundidad de 0.80 m. Además, la concentración de raíces en los últimos 0.40 m fue de 40.16 %.

4.5. Identificación del estado fenológico y requerimiento hídrico por etapa fenológica

4.5.1. Estados fenológicos

a. Floración

El análisis de varianza para días a la floración (Cuadro 4.13), señala diferencias altamente significativas para repeticiones y genotipos. El promedio general fue de 75.56 días y el coeficiente de variación de 0.44%.

Cuadro 4.13: Análisis de la varianza para días a la floración (días) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	8	
Repeticiones	2	2.11 **
Tratamientos	2	24.78 **
Error	4	0.11
Promedio (días)		75.56
CV (%)		0.44

∴ ** = (p < 0.01).

FUENTE: Elaboración propia.

En los tratamientos en estudio según la prueba de Scheffé (Cuadro 4.14) el tratamiento 3 florece más rápidamente en relación al tratamiento 1 con una diferencia de 5.67 días (Figura 4.17), correlacionado con trabajos de CIP (2010), que indica que la falta de agua en el suelo puede acelerar o retrasar la floración, la misma que está en función de duración y fuerza de

la sequía, así como de la constitución genética de la planta (Darwish *et al.*, 2006).

Cuadro 4.14: Prueba de Scheffé (5%) para inicio de floración.

Tratamientos	Medias (días)
T1	78.67 a
T2	75.00 b
T3	73.00 c

FUENTE: Elaboración propia.

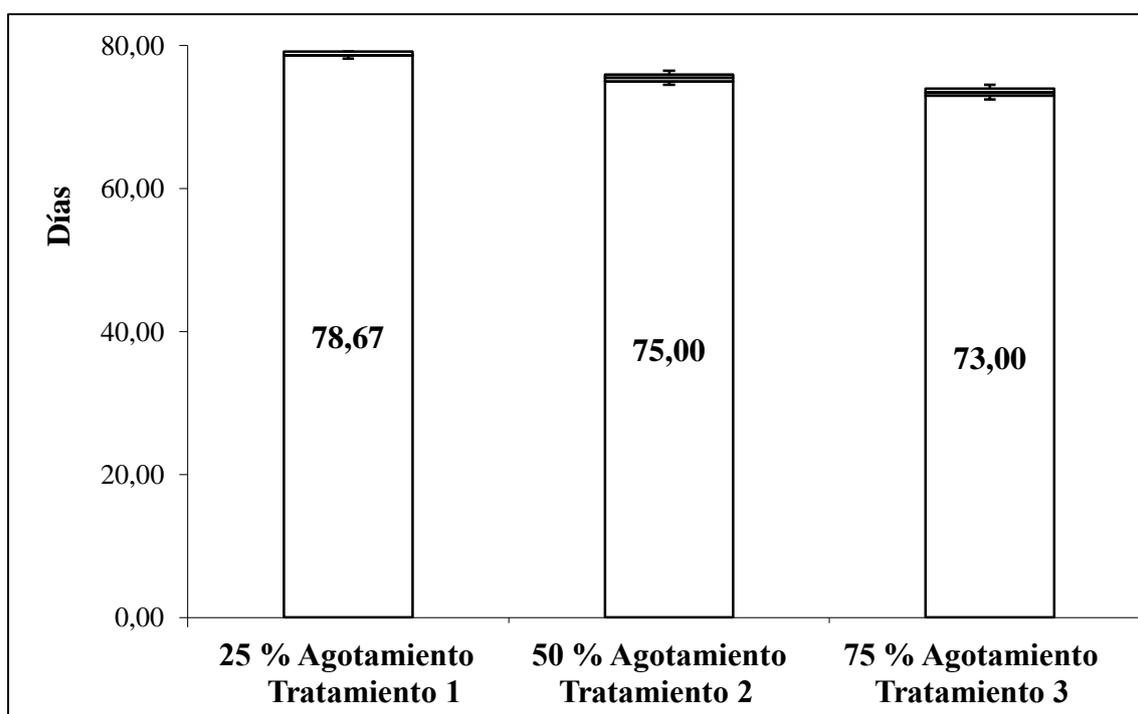


Figura 4.17: Promedios de inicio de floración (días) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

b. Inicio de tuberización

El análisis de varianza para inicio de tuberización (Cuadro 4.15), señala diferencias altamente significativas entre tratamientos. El promedio general fue 79.22 días y el coeficiente de variación 1.43 %.

Cuadro 4.15: Análisis de la varianza para inicio de tuberización (días) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	8	
Repeticiones	2	0.11 ns
Tratamientos	2	44.11 **
Error	4	1.28
Promedio (días)		79.22
CV (%)		1.43

∴ ns = (p>0.05), ** = (p < 0.01)

FUENTE: Elaboración propia.

El no llegar a capacidad de campo en el suelo, ocasiona una alteración en la duración de las etapas fenológicas (Figura 4.18), mediante prueba de Scheffé determina el T1 en el rango “a” siendo el más tardío en tuberizar en relación al T3 en el rango “c” con una diferencia de 7.65 días (Cuadro 4.16), acotar lo mencionado por Vreugdenhil *et al.*, (2007), quienes señalan que el déficit hídrico reduce la eficiencia fotosintética, favoreciendo el fraccionamiento de asimilados hacia el crecimiento de los tubérculos, sobre todo cuando ya existen tubérculos en formación.

Cuadro 4.16: Prueba de Scheffé (5%) para inicio de tuberización

Tratamientos	Medias (días)
T1	83 a
T2	79.33 b
T3	75.33 c

FUENTE: Elaboración propia.

a. Días a la senescencia

El análisis de varianza para días a la senescencia (Cuadro 4.17), señala diferencias altamente significativas entre tratamientos. El promedio general fue 125.56 días y el

coeficiente de variación 1.24 %.

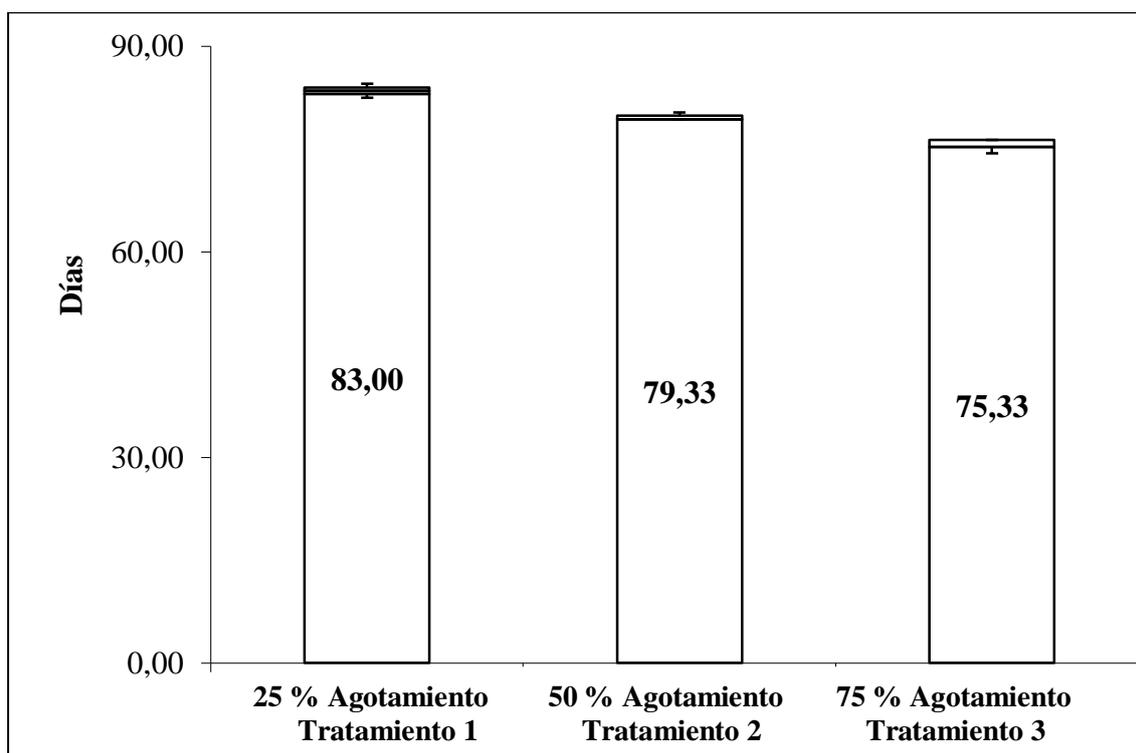


Figura 4.18: Promedios de inicio de tuberización (días) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

Cuadro 4.17: Análisis de la varianza para días a la senescencia a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	8	
Repeticiones	2	5.44 **
Tratamientos	2	80.78 **
Error	4	2.44
Promedio (días)		126.56
CV (%)		1.24

∴ ** = (p < 0.01)

FUENTE: Elaboración propia.

En el Cuadro 4.18 Figura 4.19 observamos que el T3 es el más precoz con 121,7 días en relación al tratamiento 1 que fue el más tardío con 132 días (Figura 4.19), efecto descrito por Rojas *et al.* (2007), que señala que el déficit hídrico ocasiona el acortamiento del crecimiento del follaje (madurez temprana del cultivo), con lo cual se reduce el ciclo de vida del cultivo pero si se mantienen condiciones de humedad adecuada alarga el ciclo del cultivo.

Cuadro 4.18: Prueba de Scheffé (5%) para inicio de floración.

Tratamientos	Medias (días)
T1	132 a
T2	126 b
T3	121.7 b

FUENTE: Elaboración propia.

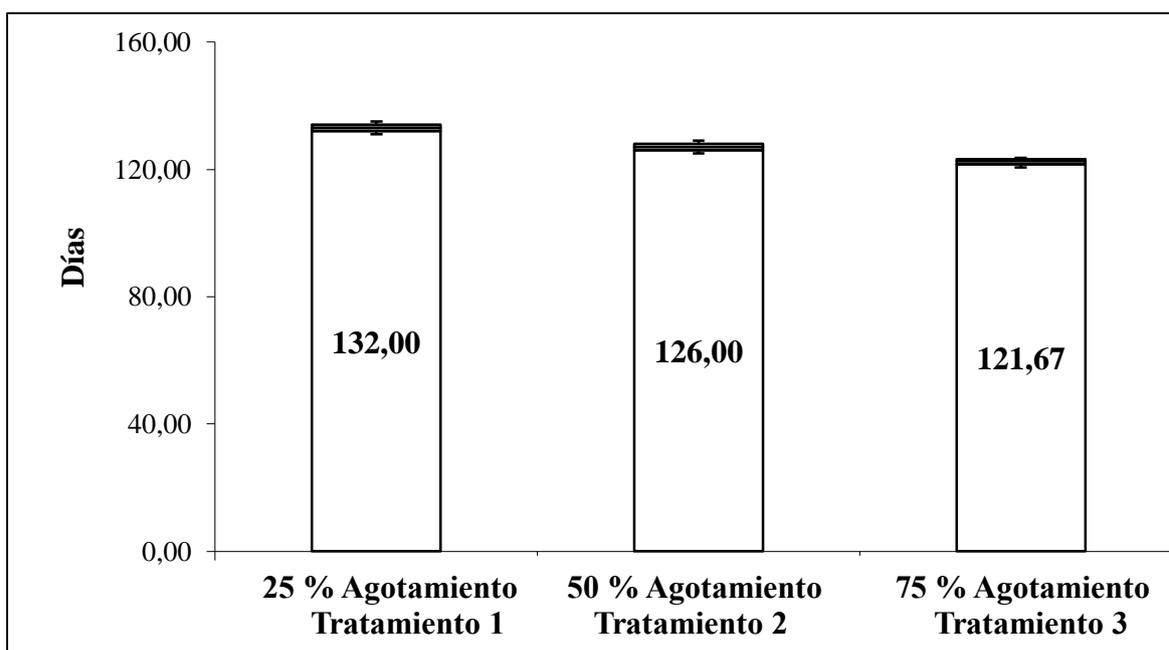


Figura 4.19: Promedios de días a la senescencia a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

4.5.2. Determinación del coeficiente de cultivo (K_c) de la papa variedad victoria

a. Coeficiente de cultivo (K_c)

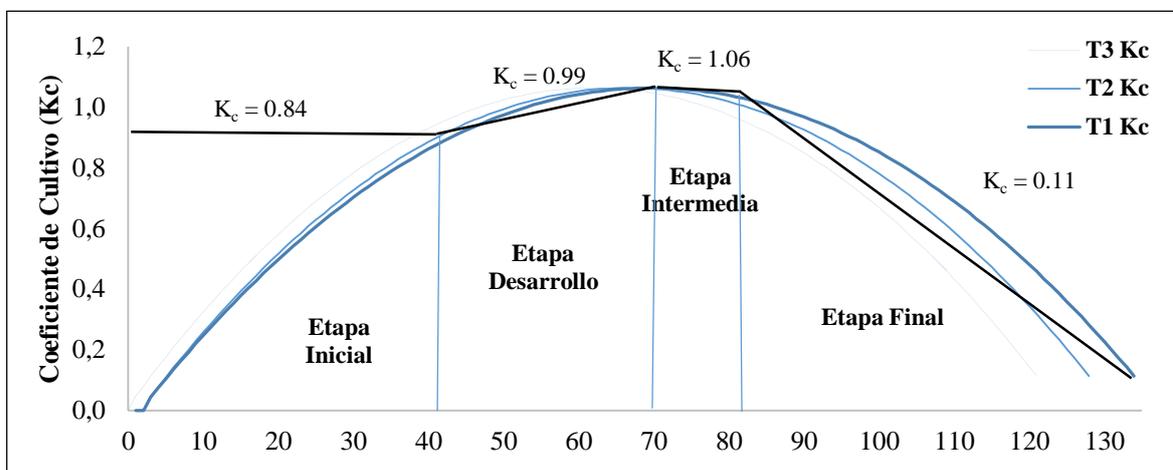


Figura 4.20: Coeficiente de cultivo (K_c) por etapa fenológica del cultivo de papa (*Solanum* spp) variedad victoria determinado por Hargraves en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 4.20 se presenta el coeficiente de cultivo (K_c) por etapa fenológica haciendo uso de la fórmula de Hargraves, donde los valores varían entre 0.84 y 1.06. Resultados que si comparamos con los presentados por Peña (2014), en el periodo Marzo – Septiembre de 0.82 y 1.20 presentan similitud, destacando que la época de siembra y condiciones ambientales como factores condicionantes en la necesidad hídrica del cultivo.

b. Coeficiente de cultivo ajustado (K_c) bajo condiciones de “estrés hídrico”

El comportamiento del coeficiente de cultivo (K_c) presenta modelos polinomiales de tercer orden, donde los valores de K_c hallados varían entre 0.35 y 0.95 para el tratamiento 1 (Figura 4.21), entre 0.36 y 0.98 para el tratamiento 2 (Figura 4.22) y entre 0.41 y 1.02 para el tratamiento 3 (Figura 4.23). En promedio, los K_c variaron entre 0.38 y 0.98 presentando el valor más alto en la etapa intermedia.

Los resultados están por debajo de los valores obtenidos mediante Hargraves que varían desde 0.84 y 1.06 (Figura 4.20) y si lo comparamos con los presentados por Vásquez *et al.* (2017), obtiene valores de 0.70 y 1.00 en condiciones de humedad relativa <70 %, velocidad del viento de 5 – 8 m/s y en el caso de la FAO (2008), varían de 1.15 y 0.75 en climas subhúmedos.

Además, en la etapa intermedia no se logró el comportamiento lineal que presenta la curva característica de la FAO y por el contrario alcanzaron valores de K_c máximo, que oscilaron de 0.95 y 1.02 aproximadamente. La diferencia en duración por etapa fenológica para cada tratamiento es variable, destacando que el tratamiento más tardío fue el tratamiento 1 con 132 dds en relación con el tratamiento 3 que fue el más precoz con 121 dds con una diferencia de 11 días (Cuadro 4.17), esto quiere decir que los niveles de humedad condicionan la fisiología del cultivo (Figura 4.3:).

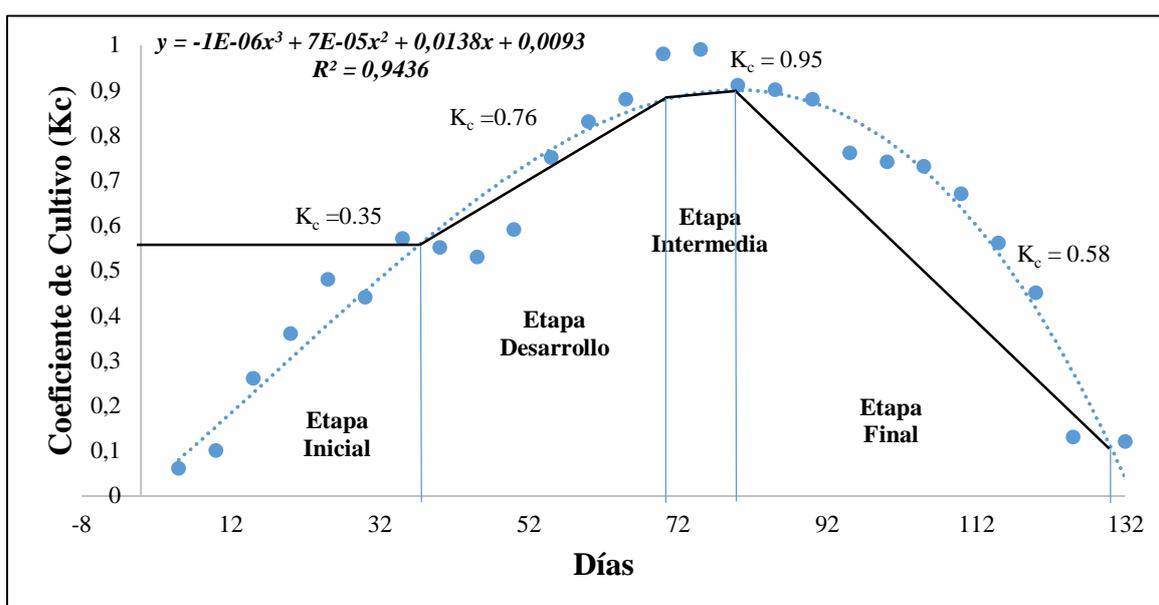


Figura 4.21: Coeficiente de cultivo ajustado (K_c) del cultivo de papa (*Solanum spp*) variedad victoria para el tratamiento 1 con lisímetro en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

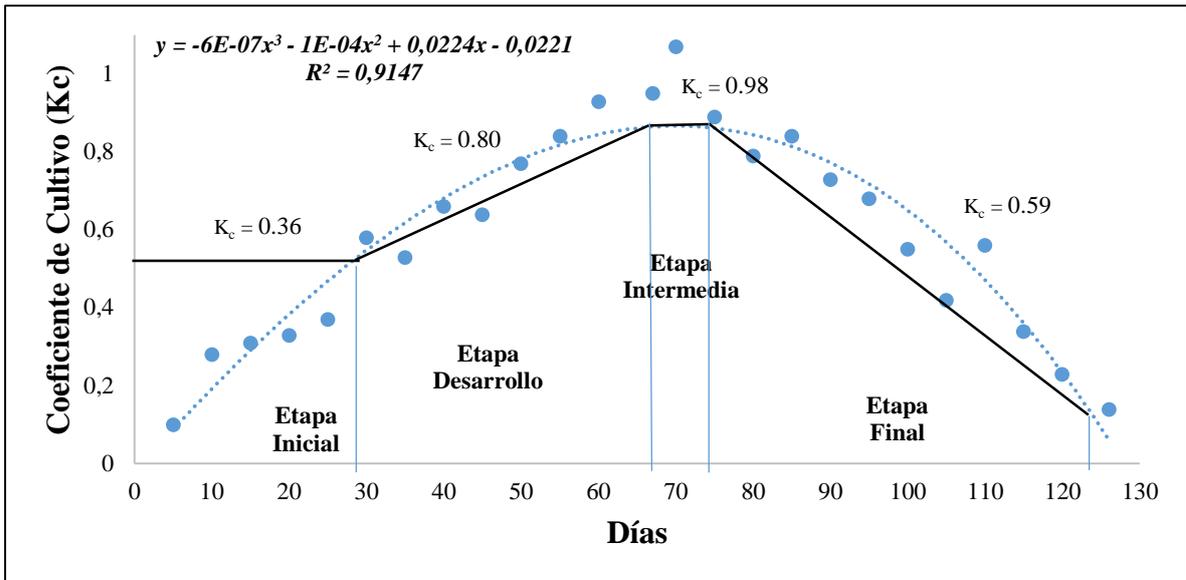


Figura 4.22: Coeficiente de cultivo ajustado (K_c) del cultivo de papa (*Solanum* spp) variedad victoria para el tratamiento 2 con lisímetro en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

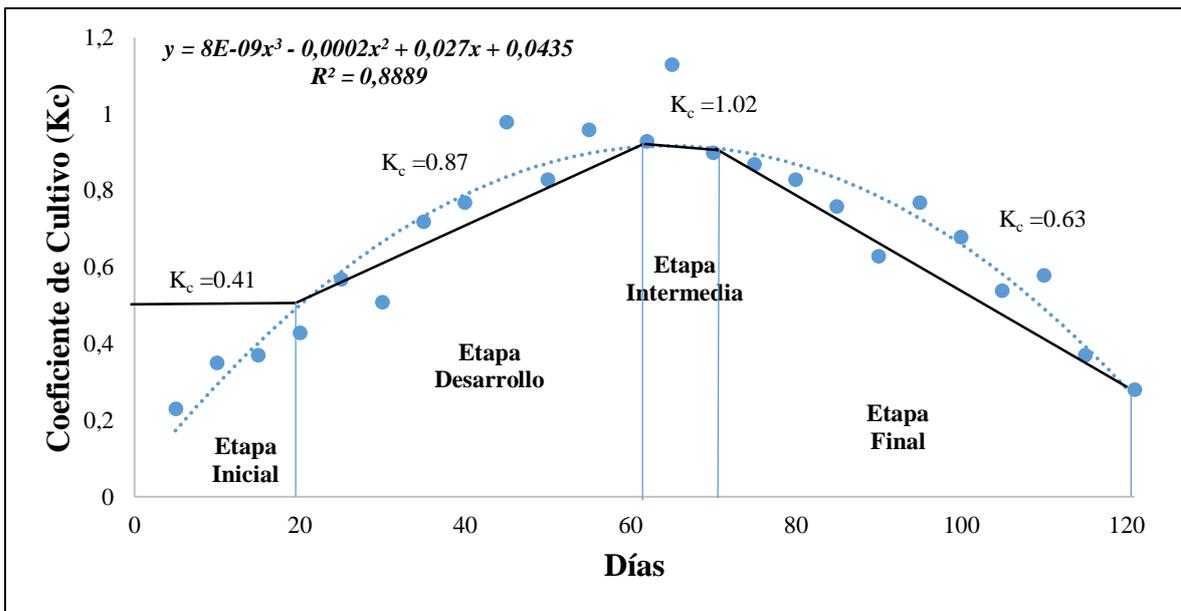


Figura 4.23: Coeficiente de cultivo ajustado (K_c) del cultivo de papa (*Solanum* spp) variedad victoria para el tratamiento 3 con lisímetro en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

4.5.3. Determinación del requerimiento hídrico por etapa fenológica

El requerimiento hídrico (mm), durante el ciclo de cultivo de papa en cada uno de los tratamientos en estudio se presenta en el Cuadro 4.19.

Cuadro 4.19: Requerimiento hídrico y lámina de riego en el cultivo de papa (*Solanum* spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

Etapa	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3	
	Rh	Lr	Rh	Lr	Rh	Lr
Inicial	262.42	6.31	214.12	5.96	144.85	4.87
Desarrollo	57.72	2.88	43.46	2.73	80.4	2.98
Intermedia	15.96	3.03	12.96	2.14	9.37	2.57
Final	152.46	4.07	184.74	4.26	193.81	4.31
Total	488.56	16.29	455.28	15.09	428.43	14.73

*Rh requerimiento hídrico (mm), Lr lámina de riego (mm).

FUENTE: Elaboración propia.

Durante el ciclo de cultivo, cada tratamiento presentó efectos significativos en función al grado de crecimiento vegetativo, profundidad radicular y fundamentalmente el rendimiento, llegando la planta hasta un máximo y luego disminuyendo, influyendo las condiciones medioambientales, características del suelo, las prácticas agrícolas y considerablemente el riego aplicado (Beltri, 2008 y FAO, 2008).

Por lo manifestado el requerimiento hídrico (Figura 4.24) es de 488.56 mm para el tratamiento 1; 455.28 mm para el tratamiento 2 y 428.43 mm para el tratamiento 3 resultados que al comparar con investigaciones de Peña (2014), indica valores de 409 y 416,7 mm en la zona, considerar que la campaña en que se implementó el ensayo fue condicionante en la necesidad hídrica. Otros investigadores Sood & Singh (2003), mencionan que el requerimiento de agua varía entre 350 y 600 mm, dependiendo del período de duración del cultivo, condiciones ambientales, tipo de suelo y variedad, además la producción disminuye si no se aporta con más del 50 por ciento del total de agua disponible en el suelo durante el crecimiento.

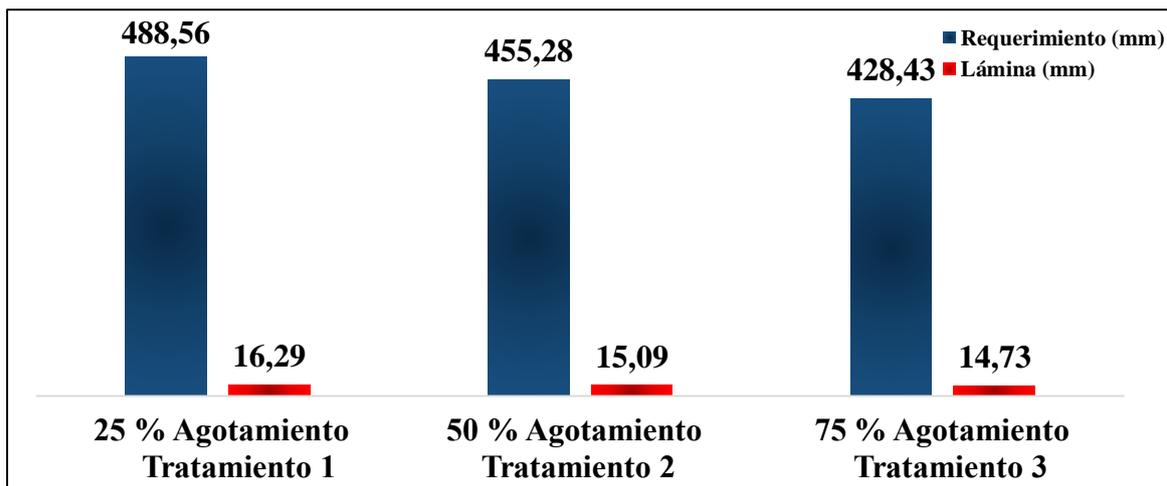


Figura 4.24: Requerimientos hídricos (mm) y lámina promedio (mm) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

4.6. Rendimiento

4.6.1. Tubérculos por planta

El análisis de varianza para el número de tubérculos por planta (Cuadro 4.20), señala diferencias no significativas. El promedio general fue 28.47 unidades y el coeficiente de variación 11.95 %.

Cuadro 4.20: Análisis de la varianza número de tubérculos por planta (u) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	8	
Repeticiones	2	1.97 ns
Tratamientos	2	31.2 ns
Error	4	11.58
Promedio (u)		28,47
CV (%)		11.95

∴ ns = (p>0.05)

FUENTE: Elaboración propia.

Al observar la Figura 4.25 observamos una diferencia no significativa entre el tratamiento 1 y tratamiento 3, importante considerar al respecto Kumar *et al.*, (2003) y Lahlou *et al.*, (2003) explican que al someter a déficit hídrico a la papa, siempre hay tendencia a mayor producción de tubérculos en “cantidad”, todo depende también del medio donde se trabaje ya que según trabajos en invernadero reduce el número final de tubérculos por planta.

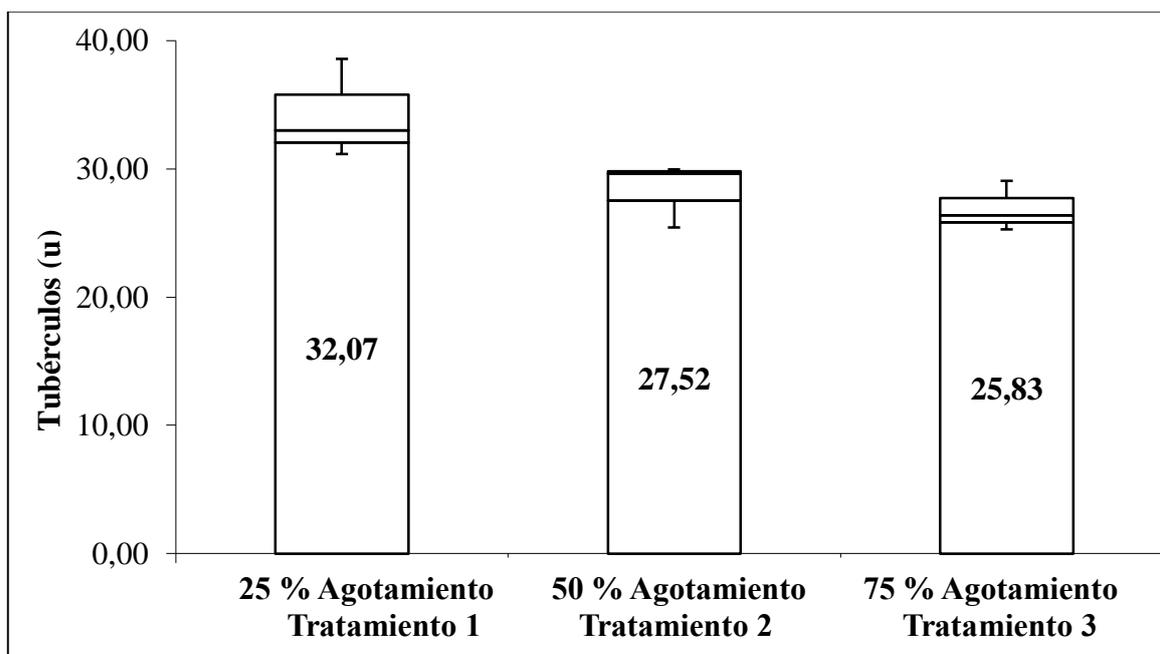


Figura 4.25: Promedios de tubérculos por planta (u) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

4.6.2. Materia seca de tubérculo

El análisis de varianza para materia seca de tubérculo (Cuadro 4.21), señala diferencias altamente significativas para tratamientos. El promedio general fue 25.13% y el coeficiente de variación 2.23 %.

Cuadro 4.21: Análisis de la varianza para materia seca de tubérculo (%) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	8	
Repeticiones	2	0.01 ns
Tratamientos	2	20.64 **
Error	4	0.31
Promedio (%)		25.13
CV (%)		2.23

∴ ns = (p>0.05), ** = (p < 0.01).

FUENTE: Elaboración propia.

En el Cuadro 4.22, la prueba de Scheffé (5%), señala que el tratamiento 3 presenta el mayor contenido de materia seca ubicándolo en el rango “a” en relación al tratamiento 1 con el menor contenido en el rango “c”, correlacionar con la investigación de Deblonde & Ledent (2001), que indica que el peso seco promedio del tubérculo depende del número de tubérculos iniciados, pero también de la intensidad del déficit hídrico influenciada por el cultivo hasta el crecimiento del tubérculo (Figura 4.26), un aspecto relevante que indican Kumar *et al.* (2003) y Jensen *et al.* (2000), señalan que el contenido de materia seca en los tubérculos no es afectado cuando hay condiciones severas de déficit hídrico además tiende a mejorar su “calidad” debido al mayor porcentaje de materia seca en los tubérculos haciéndolo apropiado para la industria de los chips por su color más claro y uniforme, es decir la calidad mejora a medida que se aplica menos agua pero a coste de reducciones en el rendimiento.

Cuadro 4.22: Prueba de Scheffé (5%) para materia seca del tubérculo.

Tratamientos	Medias (%)
T1	22.73 c
T2	24.73 b
T3	27.93 a

FUENTE: Elaboración propia.

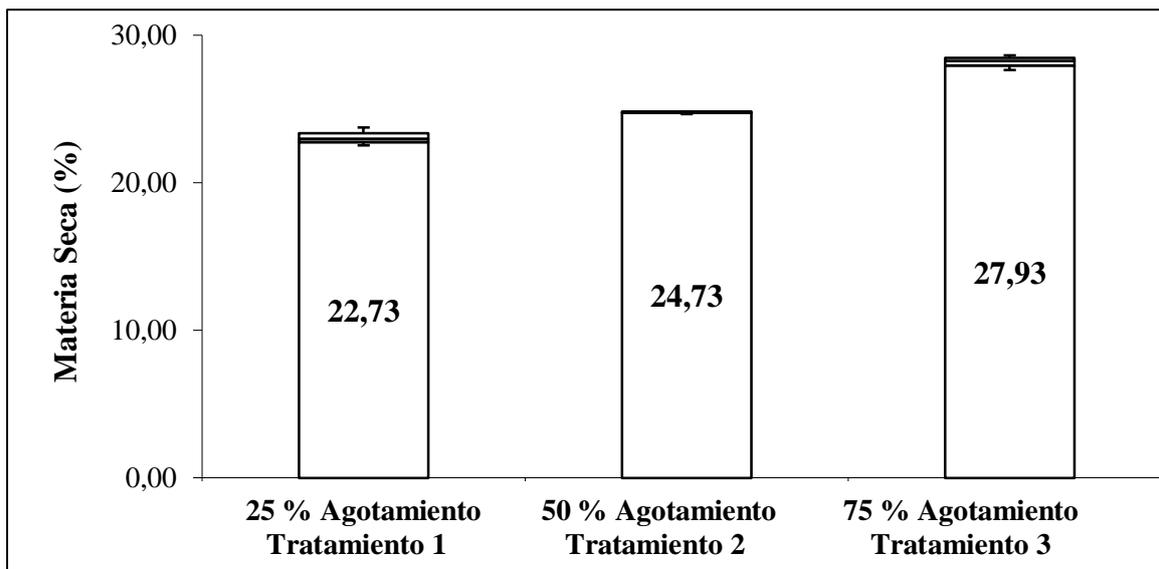


Figura 4.26: Promedios de materia seca de tubérculo (%) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

4.6.3. Producción por planta

El análisis de varianza para la producción por planta (Cuadro 4.23), señala diferencias significativas entre tratamientos. El promedio general fue 1.21 kg/planta y el coeficiente de variación 16.13 %.

Cuadro 4.23: Análisis de la varianza para rendimiento por planta (kg/planta) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	8	
Repeticiones	2	0.01 ns
Tratamientos	2	0.40 *
Error	4	0.04
Promedio (kg/planta)		1.21
CV (%)		16.13

∴ ns = (p>0.05), * = (p<0.05).

FUENTE: Elaboración propia.

En el Cuadro 4.24 según la prueba de Scheffé califica al tratamiento 1 en el rango “a” y al tratamiento 3 en el rango “b” superándolo en casi el doble (Figura 4.27), considerar que según Carli *et al.* (2014) y Schafleitner (2007), el impacto económico a la no dotación de agua en los niveles deseados, se ve reflejado en la calidad del tubérculo, además esto dependerá hasta que punto la planta puede tolerar.

Cuadro 4.24: Prueba de Scheffé (5%) para rendimiento por planta.

Tratamientos	Medias (kg)
T1	1.60 a
T2	1.13 ab
T3	0.88 b

FUENTE: Elaboración propia.

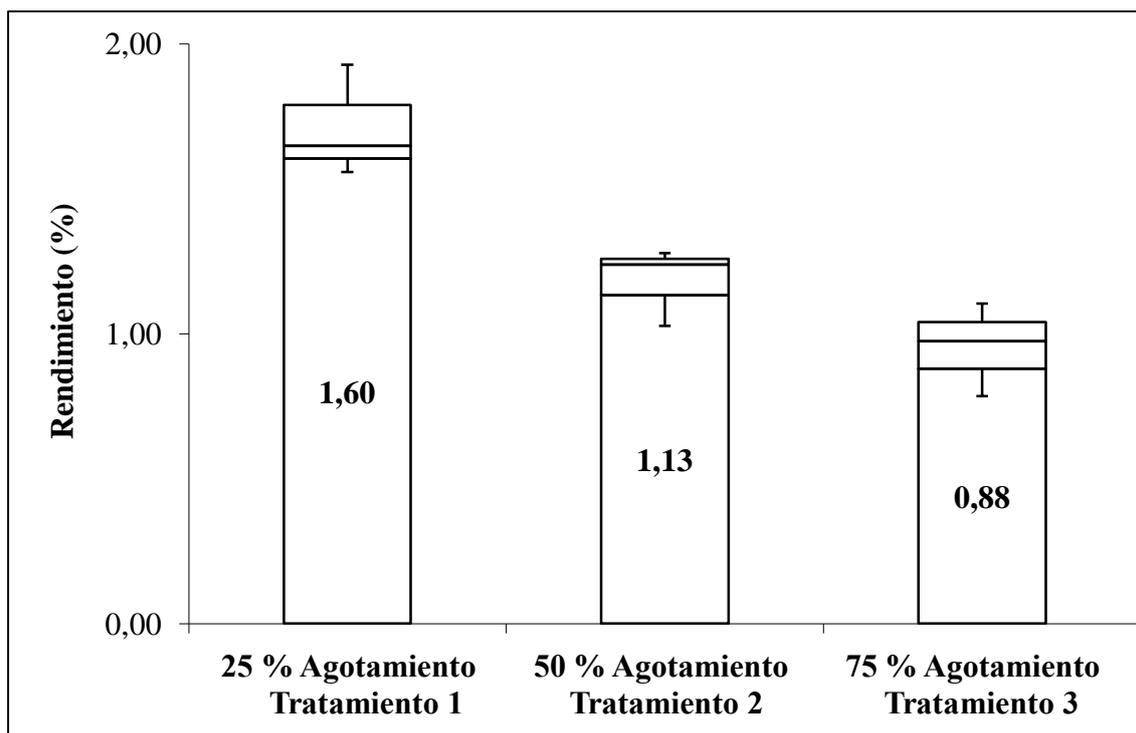


Figura 4.27: Promedios de rendimiento por planta (kg/planta) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

4.6.4. Rendimiento por categorías

El análisis de varianza para el rendimiento categoría comercial (Cuadro 4.25), señala diferencias significativas entre tratamientos. El promedio general fue 16.33 t y el coeficiente de variación 10.64 %.

Para el rendimiento categoría semilla, señala diferencias significativas entre tratamientos. El promedio general fue 9.33 t y el coeficiente de variación 13.50 %.

Para el rendimiento categoría no comercial, señala diferencias significativas entre tratamientos. El promedio general fue 6.09 t y el coeficiente de variación 13.99 %.

Cuadro 4.25: Análisis de la varianza para rendimiento por tamaño del tubérculo (t/ha) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios		
		Comercial	Semilla	No Comercial
Total	8			
Repeticiones	2	3.54 ns	0.32 ns	1.96 ns
Tratamientos	2	24.31 *	12.75 *	9.13 *
Error	4	3.02	1.59	0.73
Promedio (t/ ha)		16.33	9.33	6.9
CV (%)		10.64	13.50	13.99

∴ns = (p>0.05), * = (p<0.05)

FUENTE: Elaboración propia.

Según la prueba se Scheffé (5%) para el rendimiento de papa en categoría “comercial” (Cuadro 4.26), el tratamiento 1 presenta el mayor rendimiento con 18.89 t/ha, ubicándose en el rango “a” y el de menor rendimiento es el tratamiento 3 con 13.27 t/ha, en el rango “c” (Figura 4.28), con una diferencia del 5.62 t/ha, destacar que la escasez de agua reduce el

tamaño de los tubérculos en “calidad”, es decir pérdidas en el potencial de rendimiento (Schafleitner, 2007 y Charkowski, 2012). Además de una malformación de tubérculos en forma de mancuerna o puntiagudos (MacKerron & Jefferies, 1988) y según el avance el ciclo ocasiona defectos del tubérculo, como la mancha marrón interna, especialmente cuando el follaje está muerto y el suelo expuesto al sol (Haverkort, 1982).

En referencia al rendimiento de papa en categoría “semilla”, en la prueba de Scheffé el tratamiento 1 en el rango “a” presenta el mayor rendimiento y el tratamiento 3 en el rango “b” presenta el menor rendimiento (Figura 4.28), en tal sentido al no satisfacer con el requerimiento hídrico del cultivo, estos darán como resultados tubérculos de mala calidad, compaginado con lo señalado por Jensen *et al.* (2000), indican que el déficit hídrico puede causar desórdenes en el crecimiento del tubérculo, brotación secundaria, tubérculos de tamaño más pequeño debido a la maduración alternada con recrecimiento de la cobertura foliar y la expansión celular cíclica de los tubérculos.

Lo que respecta al rendimiento de papa categoría “no comercial”, la prueba de Scheffé categoriza en el rango “a” al tratamiento 3 y el rango “b” al tratamiento 1 (Figura 4.28), notando claramente que la calidad es preponderante, lo que concuerda con Sermet *et al.* (2005), que el suministro adecuado de agua es determinante desde el inicio de la tuberización hasta que la planta alcance la madurez fisiológica para obtener altos rendimientos de “excelente calidad”. Por lo tanto, al cumplir con el requerimiento hídrico del cultivo los resultados se verán reflejos en su rendimiento es decir la obtención tubérculos de calidad.

Cuadro 4.26: Prueba de Scheffé (5%) para rendimiento por tamaño del tubérculo.

Tratamientos	Medias (t)		
	Comercial	Semilla	No Comercial
T1	18.89 a	11.39 a	4.44 b
T2	16.85 ab	9.35 ab	5.92 ab
T3	13.27 b	7.27 b	7.92 a

FUENTE: Elaboración propia.

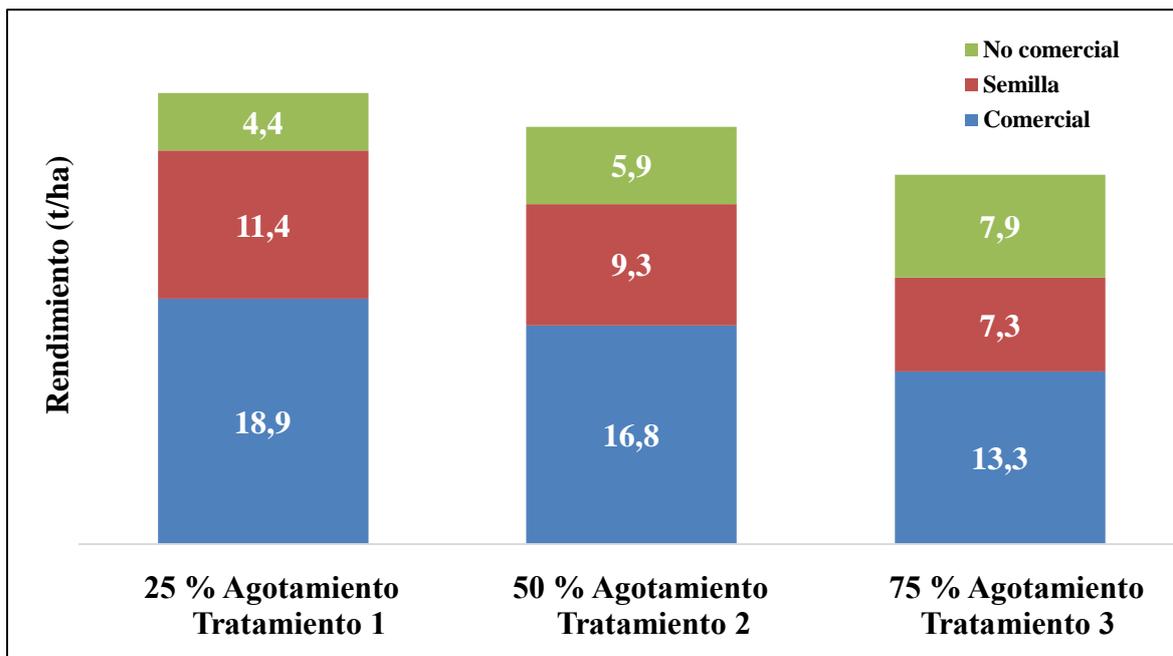


Figura 4.28: Promedios de rendimiento por tamaño del tubérculo (t/ha) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018. **FUENTE:** Elaboración propia.

4.6.5. Rendimiento total

El análisis de varianza para el rendimiento total (Cuadro 4.27), señala diferencias no significativas. El promedio general fue 31.76 t/ha y el coeficiente de variación 6.95 %.

Cuadro 4.27: Análisis de la varianza para rendimiento total (t/ha) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum* spp) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Total	8	
Repeticiones	2	11.41 ns
Tratamientos	2	29.73 ns
Error	4	4.86
Promedio (t/ha)		31.76
CV (%)		6.95

∴ns = (p>0.05)

FUENTE: Elaboración propia.

En este aspecto de análisis, no hubo significancia estadística para los diferentes niveles de humedad esto debido a que las categorías de papas representaban un solo peso (Figura 4.29), por su parte King & Stark (2000), señala que el contenido de humedad del suelo no debe presentar un umbral menor al 50% es decir mantener el suelo a capacidad de campo, donde el agua esté disponible para el cultivo sobre todo en etapas críticas, por el contrario se ve afectado el rendimiento del tubérculo directamente al restringir la transpiración y la fotosíntesis e indirectamente al reducir la evaporación del suelo y las hojas, aumentando la temperatura del suelo y de la planta (Haverkort 1982 y Weisz *et al.*, 1994).

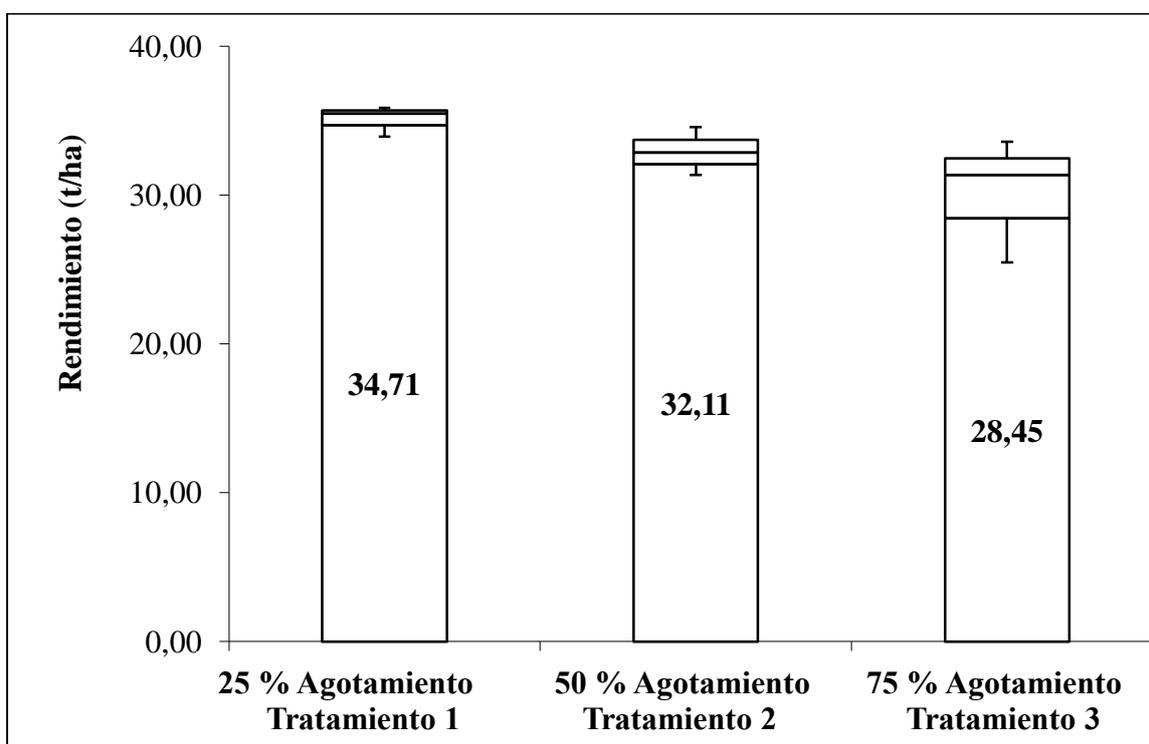


Figura 4.29: Promedios de rendimiento total (t/ha) a niveles de humedad del suelo en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

4.7. Relación de agua utilizada y producción

4.7.1. Volumen de agua utilizada por kilogramo de producción

En el Cuadro 4.28 se presenta el consumo de agua en metros cúbicos por cada kilogramo de producción, donde el tratamiento 1 necesitó de 0.14 m³, el tratamiento 2 necesitó 0.142m³ y

para el tratamiento 3 de 0.156 m³, destacar la importancia del manejo de riego, sobretodo en etapas críticas de la papa como son la emergencia y la tuberización viéndose repercutido en el rendimiento y calidad del tubérculo.

Cuadro 4.28: Agua utilizada por kilogramo de producción en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

Tratamientos	Rendimiento (t/ha)	Volumen (m ³ /ha)	Volumen de agua utilizada (m ³ /kg)
T1	34.71	4859.4	0.14
T2	32.11	4559.62	0.142
T3	28.45	4284.57	0.1506

FUENTE: Elaboración propia.

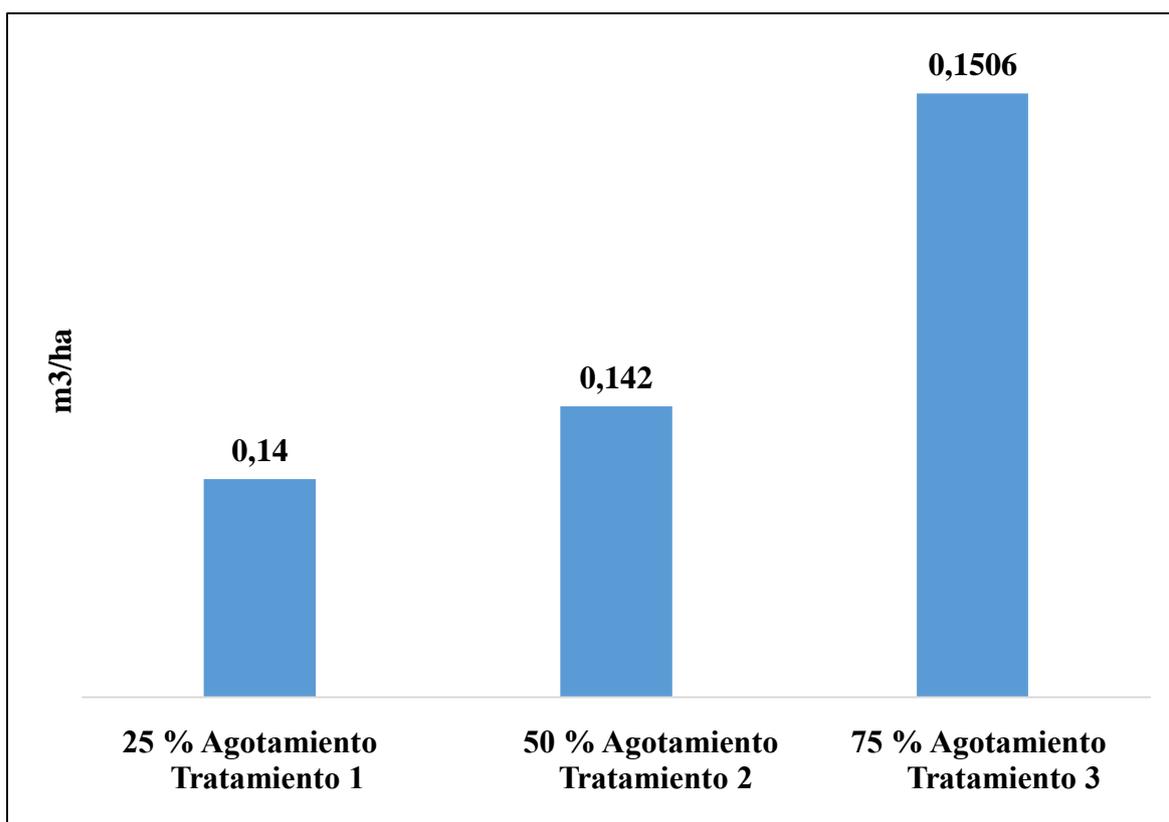


Figura 4.30: Agua utilizada (m³) por kilogramo de producción en la papa (*Solanum spp*) variedad victoria en Riobamba, Ecuador, 2018.

FUENTE: Elaboración propia.

V. CONCLUSIONES

1. El riego parcial bajo niveles de humedad en el suelo, ha permitido determinar que para producir un kilogramo de papa es necesario 0.14 m^3 para el tratamiento 1 (25% agotamiento), 142 m^3 para el tratamiento 2 (50% agotamiento), 150.6 m^3 para el tratamiento 3 (75% agotamiento), demostrándose así que el manejo de los niveles de humedad en el suelo es de suma importancia en la eficiencia de uso de agua, incidiendo así en el comportamiento de los parámetros biofísicos.
2. La altura alcanzada durante el ciclo del cultivo fue de 78.58cm para el tratamiento 1 (25% agotamiento), 75.04 para el tratamiento 2 (50% agotamiento) y 71.68cm para el tratamiento 3 (75% agotamiento).
3. Se determinó que el mayor desarrollo radicular alcanzó el tratamiento 3 (75% agotamiento) con una profundidad de 0.78 m; seguido del tratamiento 2 (50% agotamiento) con 0.67m y el tratamiento 1 (25% agotamiento) con 0.60m, además destacar que en promedio la mayor concentración de raíces se localizó a los 0.35m con un 63%.
4. El coeficiente de cultivo (K_c) ajustado bajo “estrés hídrico” para la etapa inicial, desarrollo, intermedia y final para el tratamiento 1 (25% agotamiento) fue 0.35, 0.76, 0.95, 0.58; para el tratamiento 2 (50% agotamiento) fue 0.36, 0.80, 0.98, 59; para el tratamiento 3 (75% agotamiento) 0.41, 0.87, 1.02, 0.63.
5. La disponibilidad de agua es directamente proporcional a la duración del ciclo de cultivo destacando para el tratamiento 1 (25% agotamiento) una duración de 132 días, para el tratamiento 2 (50% agotamiento) de 126 días y para el tratamiento 3 (75% agotamiento) de 121 días, lo que se concluye que la falta de agua ocasiona que

la planta acelere su ciclo fenológico, como una medida de tolerancia ante el estrés hídrico.

6. La cantidad de agua necesaria a aplicar en el cultivo de papa (*Solanum* spp) variedad victoria estuvieron en el orden 4886 m³/ha para el tratamiento 1 (25% agotamiento), 4552,8 m³/ha para el tratamiento 2 (50% agotamiento), de 4284.3 m³/ha para el tratamiento 3 (75% agotamiento).
7. El rendimiento en categoría “comercial” para el tratamiento 1 (25% agotamiento) fue de 18.9 t/ha, siendo mayor al tratamiento 2 (50% agotamiento) con 16.8 t/ha y al tratamiento 3 (75% agotamiento) con 13.3 t/ha.
8. El rendimiento total fue de 34.71 t/ha para el tratamiento 1 (25% agotamiento), de 32.11 t/ha para el tratamiento 2 (50% agotamiento) y 28.45 t/ha para el tratamiento 3 (75% agotamiento)

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda en investigaciones de déficit hídrico de la papa, la evaluación del comportamiento del sistema radicular y foliar al igual que el rendimiento por categorías, como indicadores claves del grado de tolerancia que tiene el cultivo a la falta de agua.
2. Se recomienda la utilización del lisímetro para estimar en forma precisa los requerimientos hídricos reales del cultivo.
3. Se recomienda utilizar la información obtenida en la investigación con diferentes variedades de papa (*Solanum* spp) tolerantes al déficit hídrico y en distintas condiciones edafoclimáticas,
4. Se recomienda realizar una comparación de los resultados obtenidos con un tratamiento al 100 % de agua suministrada al cultivo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERSON, R. 1997. Water relations and physiological activity of potatoes. *Journal of The American Society of Horticultural Science*. p. 572-575.
- AHMADI, S.; ANDERSEN, M.; PLAUBORG, F.; POULSEN, R.; JENSEN, C.; SEPASKHAH A.; HANSEN, S. 2010. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Yield and water productivity. *Agricultural water management*. Elsevier B.V.
- ALLEN, R.; PEREIRA, R.; RAEZ, D.; SMITH, M. 2006. Evapotranspiración de cultivo. *Boletín FAO 56*. Roma – Italia. 161 p.
- ALONSO, F. 1996. *El cultivo de la patata*. Madrid. España. Mundi-Prensa 272 p.
- ALVA, A.; MOORE, A.; COLLINS, H. 2012. Impact of deficit irrigation on tuber yield and quality of potato cultivars. *J. Crop Improv.* 26. p. 211–227. <http://dx.doi.org/10.1080/15427528.2011.626891>.
- ANTOLÍN, M.; AYARI, M.; SANCHEZ. 2006. Efectos de la zona radicular en el rendimiento de secado, maduración y ABA bayas en vides. *Australians Journals of Grape and Wine Investigación*. p. 12-13.
- ASFARY, A.; WILD, A.; HARRIS, P. 1983. Growth, mineral nutrition and water use by potato crops. *Journal of Agricultural Science* 100. p. 87–101.

- ATKINSON, D. 2000. Root characteristics: why and what to measure. In: Smit, A.L., Bengough, A.G., Engels, C., van Noordwijk, M., Pellerin, S., van de Geijn, S.C. (Eds.), *Root Methods: A Handbook*. Springer. 587 p.
- BABÉ, A.; LAVIGNE, T.; SEVERIN, J.; NAGEL, K.; WATLTER, A.; CHAUMONT, P.; BATOKO, H.; BEECKMA, T.; DRAYE, X. 2012. Repression of early lateral root initiation events by transient water deficit in barley and maize. *Philosophical Transactions of the Royal Society B367*. p. 1534-1541.
- BAILEY, R. 2000. Practical use of soil water measurement in potato production. *In: Haverkort A.J. & MacKerron D.K.L 2000. Management of Nitrogen and Water in Potato Production*. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Pers. p. 206–218,
- BELLINI, C.; PACURAR, D.; PERRONE, I. 2014. Adventitious roots and lateral roots: similarities and differences. *Annu Rev Plant Biol* (65):639-666.
- BELTRI, E. 2008. Medida del balance hídrico y estimación del coeficiente Kc en fincas de la Vega Baja de Segura para la mejora de la programación de riegos utilizando. p. 78 – 84.
- BENJAMIN, J.; NIELSEN, D. 2006. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. *Field Crops Res*. 97. p. 248–253.
- BENGOUGH, A.; MULLINS, C. 1990. The resistance experienced by roots growing in a pressurised cell-a reappraisal. *Plant Soil* 123 p. 73–82.
- BEUKEMA, H.; VAN DER ZAAG, D. 1979. *Potato Improvement. Some factors and facts*. International Agricultural Center. IAC. Wageningen. The Netherlands. 224 p.
- BERNIER, P.; ROBITAILLE, G. 2004. A plane intersect method for estimating fine root productivity of trees from minirhizotron images. *Plant and Soil* (0):1-9 p.

- BONIERBALE, M.; DE HAAN, S.; FORBES, A. 2010. Procedures for standard evaluation trials of advanced potato clones. An International Cooperators' Guide. International Potato Center (CIP), Lima – Perú.
- 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. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Tesis Ing. Ecuador.
- BRAVDO, B. 2005. Los mecanismos fisiológicos involucrados en la producción de señales de raíz no hidráulicas por secado parcial de la zona de raíces - una revisión. En ISHS Acta Horticultrae. Volumen 689: VII Simposio Internacional de Fisiología y Biotecnología de la vid, 21-25 de junio de 2004. Ed. LEWilliams. California: Davis. p. 267–276.
- BUSTAN, A.; SAGI, M.; DE MALACH, Y.; PASTERNAK, D. 2004. Effects of saline irrigation wáter and heat waves on potato production in an arid environment, Field Crops Res.90. p. 275–285.
- CALLEJAS, M. 2002. Descubriendo la Ciencia por medio de la relación Suelo – Agua – Planta. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/51617656/imp-riego-1>.
- CAMPOSEO, S.; RUBINO, P. 2003. Effect of irrigation frequency on root water uptake in sugar beet. Plant and Soil 253. p. 301–309.
- CARLI, C.; YULDASHEV, D.; KHALIKOV, B.; CONDORI, V.; MARES, P.; MONNEVEUS. 2014. Effect of different irrigation regimes on yield, water use efficiency and quality of potato (*Solanum tuberosum L.*) in the lowlands of Tashkent, Uzbekistan: A field and modeling perspective. Firds Crops Reserchs. Elsevier.

- CASIERRA, F.; AGUILAR, E. 2008. Respuestas fisiológicas y morfológicas de plantas de mora (*Rubus sp.*) sometidas a estrés por viento inducido. Rev. Colomb. Cienc. Hortic. 2(1):43-53.
- CELY, G. 2010. Determinación de parámetros de riego para el cultivo cebolla de bulbo en el distrito de riego alto Chicamocha. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- CHARKOWSKI, A. 2012. Cultivos de hortalizas. Consultado el 15 de febrero de 2018. Wisconsin-Madison. Disponible en <http://www.plantpath.wisc.edu>.
- CHAVARRI, E. 2008. Evaporación y Evapotranspiración, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima Perú.
- CHIMENTIC. 2005. Déficit hídrico. Relación agua, suelo, planta, atmósfera. Disponible en <http://www.agro.uba.ar/carreras/jardineria/materias/fisio/deficit.pdf>
- CIP. 2010. Focus on Partnerships: Enriching the Science, Expanding the Reach, Enhancing the Impact. International Potato Center Annual Report 2009. International Potato Center, Lima, Perú. 113 p.
- COELHO, E.; OR, D. 1999. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. Plant and Soil 206. p. 123–136.
- COLEMAN, W. 1988. Tuber age as a contributory factor in the water relations of potato (*Solanum tuberosum* L.), Am. J. Potato Res. 65 p. 109–118.
- CUESTA, X. 2008. Guía para el manejo y toma de datos de ensayos de mejoramiento de papa. INIAP – PNRT – papa. Quito, Ecuador.
- CUESTA, X. 2011. Recursos genéticos de papa y fitomejoramiento. INIAP. Quito, Ecuador.

- DARWISH, T.M.; ATALLAH, T.W.; HAJHASAN, S.; HAIDAR, A. 2006. Nitrogen and water use efficiency of fertigated processing potato. *Agricultural Water Management* (85):95–104.
- DAVIES, W.; KUDOYAROVA, G.; HARTUNG, W. 2005. Señalización de larga distancia de ABA y su relación con otras vías de señalización en la detección de secado del suelo y la mediación de la respuesta de la planta a la sequía. *Diario del Reglamento crecimiento de las plantas*, 24, 285–295 pp.
- DAVIES, W.; WILKINSON, S.; LOVEYS, B. 2002. Stomatal control by chemical signaling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytol.* 153, 449–460 pp.
- DAVIES, W.; ZHANG, J. 1991. Roots signals and the regulation of growth and development of plant in drying soil. *Ann. Rev. Plant Physiol. and Plant Mol. Biol.* 42, 76 p.
- DAVIS, J.; HAINES, B.; COLEMAN, D.; HENDRICK, R. 2004. Fine root dynamics along an elevational gradient in the southern Appalachian Mountains, USA. *Forest Ecology and Management* 187:19-34 p.
- DE LA FUENTE, A. 2006. Programación de riego con tensiómetros. Disponible en: <http://www.tensiometrosuelo/agua.html>. Culiacan México. p. 22–28.
- DEBLONDE, P.; LEDENT, J. 2001. Effects of moderate drought conditions on green leaf number, stem height, leaf length and tuber yield of potato cultivars. Belgium. Elsevier. 11 p.
- DECHASSA, N.; SCHENK, M.; CLAASSEN, N.; STEINGROBE, B. 2003. Phosphorus Efficiency of Cabbage (*Brassica oleraceae* L. var. capitata), Carrot (*Daucus carota* L.), and Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant and Soil* 250: 215-224 pp.

- DEXTER, A. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201–214 pp.
- DUNNE, T.; LEOPOLD, Y. 1978. El agua en Planificación ambiental. WH Freeman and Company Nueva York.
- EGÚSQUIZA, B. 2000. La Papa. Producción, Transformación y Comercialización. Primera edición. Lima, Perú. 192 p.
- EGÚSQUIZA, B. 2014. La papa en el Perú. Segunda edición. Universidad Nacional Agraria La Molina Lima, Perú. p. 94–107.
- EIASU, B.; SOUNDY, P.; HAMMES, P. 2007. Response of potato (*Solanum tuberosum*) tuber yield components to gelpolymer soil amendments and irrigation regimes, N. Z. J. Crop Hort. p. 25–31.
- ENCISO, J. 2005. Sensores de humedad del riego para la eficiencia del riego. Cooperativa de Texas. p. 2–6.
- EKANAYAKE, I. 1994. CIP Research 30, studying drought stress and irrigation requirements of potatoes. Lima, Perú.
- FAO. 2008. El cambio climático y la producción de alimentos. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/i0112s/i0112S03.pdf>.
- FAO. 2008. El mundo de la papa. Disponible en: <http://www.potato2008.org>
- FAO. 2009. New light on a hidden treasure, FAO, Rome, 136 p.

- FAO. 2016. Statistical databases FAOSTAT. Disponible en <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>
- FAO. 2015. El cultivo de papa y los factores ambientales. Disponible en <http://www.potato2015.org>.
- FAROOQ, M. 2008. Función fisiológica de forma exógena aplicada glycinebetaine en la mejora de tolerancia a la sequía de la aromática de grano finoarroz (*Oryza sativa* L.). J. Agron. Crop Sci., 194:325-333.
- FERNANDEZ, A. 2012. El agua: un recurso esencial. Química viva. Buenos Aires, Argentina. 11(3):147-170.
- FERNÁNDEZ, D.; MARTINEZ, M.; TAVAREZ, C.; CASTILLO, R.; SALAS, R. 2010. SAGARPA. Estimación de las Demandas de consumo de Agua. Disponible en <http://www.sagarpa.gob.mx>.
- FERREIRA, C.; ZOTARELLI, L.; TORMENA, C.; RENS, L.; ROWLAND, D. 2017. Effects of water table management on least limiting water range and potato root growth. Agricultural water management. Elsevier. Florida. USA. 11 p.
- GARAY, O. 2009. Manual de uso consuntivo del agua para los principales cultivos de los Andes Centrales Peruanos. p. 3-19.
- GARCIA, L.; LARA, A. 1998. Diseño Estadístico de Experimentos. Análisis de la Varianza. Grupo Editorial Universitario.
- GARCÍA, M.; PUPPO, L.; HAYASHI, R.; MORALES, P. 2015. Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo. EMPRISA.

- GARCÍA, Y. 2002. Determinación del requerimiento Hídrico de la cebolla (*Allium cepa* L.) en condiciones edafoclimáticas del valle de Quibor, Edo. Lara. Universidad de los Andes, Merida, Venezuela.
- GIL, E.; ARANDA, I.; PEGUERO, J.; VILAGROSA, A. 2005. El continuo suelo-planta-atmósfera como un modelo integrador de la ecofisiología forestal. Unidad de Recursos forestales. CITA de Aragón, Zaragoza, España.
- GU, S.; DU, G.; ZOLDOSKE, D.; HAKIM, A.; COCHRAN, R.; FUGELSANG, K.; JORGENSEN, G., 2004. Effects of irrigation amount on water relations, vegetative growth, yield and fruit composition of Sauvignon blanc grapevines under partial rootzone drying and conventional irrigation in the San Joaquin Valley of California, USA. *J. Hort. Sci. Biotechnol.* 79(1):26–33.
- HALE, M.; ORCUTT, D. 1987. *The physiology of plants under stress*. John Willey y Sons.
- HARGREAVES, G.; MERKLEY, G. 2000. *Fundamentos del riego*. Water resources publications, llc. Centro internacional de riego. Utha EUA.
- HAVERKORT, A. 1982. *Water Management in Potato Production*. Technical Information Bulletin No. 15. International Potato Center (CIP), Lima, Peru, 22 p.
- HAVERKORT, A.; MACKERRON, D. 2004. *Management of Nitrogen and Water in Potato Production*. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Pers. 353 p.
- HIDALGO, D. 2008. *Diseño, evaluación e instalación de un sistema de riego*. Lima – Perú. p. 15–21.
- HIJMANS, R. 2003. The effect of climate change on global potato production. *Am. J. Potato Res.* 80(4):271–279.

- HURTADO, L. 2002. Fundamentos del riego: documento electrónico. Disponible en http://agricola-unl.com/pdf/Fundamentos_Riego.pdf.
- INIA. 2013. La importancia del agua en el cultivo de papa. Disponible en <http://innovagro.wordpress.com>.
- IWAMA, K. 2008. Physiology of the potato: new insights into root system and repercussions for crop management. *Potato Res.* 51, 333–353 pp.
- JALEEL, C. 2008. Estrés hídrico déficit efectos sobre el metabolismo de oxígeno reactivo en *Catharanthus roseus*; impactos sobre la acumulación de ajmalicine. *Coloides Surf. B: Biointerfaces*, 62:105-111 pp.
- JARAMILLO, D. 2012. Evaluación y selección de dieciséis genotipos de papa (*solanum* spp.) con tolerancia al déficit hídrico en dos localidades de la provincia de Chimborazo. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Tesis Ing. Ecuador.
- JENSEN, C.; JACOBSEN, S.; ANDERSEN, M.; NUNEZ, N.; ANDERSEN, S.; RASMUSSEN, L.; MOGENSEN, V. 2000. Leaf gas exchange and water relation characteristics of field quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during soil drying. *Eur J Agron.*
- JONES, A. 1983. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, 1208–1211 pp.
- JONES, H. 1992. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plantphysiology*, 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- JOSHI, M.; FOGELMAN, E.; BELAUSOV, E.; GINZBERG, I. 2016. Potato root system development and factors that determine its architecture. Agricultural Research Organization. Israel.

- KANG, S.; LIANG Z.; HU W.; ZHANG J. 1998. Water use efficiency of controlled alternate irrigation on root-divided maize plant. *Agricult Water Manag*, 38:69-76 pp.
- KANG, S.; ZHANG, J. 2004. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency *J. Exp. Bot* 55: 2437-2446 pp.
- KING B.; STARK J. 2000. Potato irrigation management: document electronic, fuente internet. University of idaho, cooperative extension system, collages of Agriculture. <http://info.ag.uidaho.edu/resources/PDFs>
- KIM, S.; SONG, W.; KIM, Y.; KWON, S.; LEE, H.; LEE, I.; KWAK, S. 2009. Characterization of full-length enriched expressed sequence tags of dehydration-treated white fibrous roots of sweet potato. *BMB Rep.* 42, 271–276 pp.
- KLEINKOPF, WESTERMANN & DWELLE. 1981. Dry matter production and nitrogen utilization by six potato cultigens. *Agron. J.* 73:799 – 802 pp.
- KRIEDEMANN, PE.; GOODWIN, I. 2004. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. An information package on two irrigation methods for high-input horticulture. *Irrigation Insights No. 4. Land and Water. Australia Pub.* 102 p.
- KUMAR, D.; MINHAS & SINGH. 2003. *Abiotic Stress and Potato Production*. Mehta Publishers. New Delhi.
- KUNDZEWICZ, Z.W.; MATA, L.J.; ARNELL, N.W.; DÖLL, P.; KABAT, P.; JIMÉNEZ, B.; MILLER, K.A.; OKI, T.; SEN, Z.; SHIKLOMANOV, I.A. 2007. Freshwater resources and their management. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), *Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of*

- the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK. p. 173–210.
- LAHLOU O.; OUATTAR, S. 2003. The effect of drought and cultivar on growth parameters, yield and yield components of potato.
- LAHLOU, F.; LEDENT, 2005. Root mass and depth, stolons and roots formed on stolons in four cultivars of potato under water stress, Eur. J. Agron. 22:159–173 pp.
- LARA, A. 2000. Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Temas Relacionados: Tratamiento Informático mediante SPSS” Proyecto Sur de Ediciones.
- LENDENT, J. 2003. Déficit hídrico y crecimiento de las plantas: respuesta al déficit hídrico. Comportamiento morfofisiológico. CIP, papa andina, fundación proimpa.
- LEÓN, J. 2012. Riegos y drenajes. Primera Edición. Editorial E – COPYCENTER. Riobamba Ecuador. p. 13–57.
- LEÓN, J. 2016. Modelación matemática para estimar los requerimientos hídricos del cultivo de papa (*solanum* spp.) en Riobamba – Ecuador.
- LESCZYNSKI, D.; TANNER, C. 1976. Seasonal variation of root distribution of irrigated, field-grown Russet Burbank potato. Am. Potato J. 53, 69–78 pp.
- LEWTHWAITE, S.L.; TRIGGS, C.M. 2012. Sweet potato cultivar response to prolonged drought. Agron. New Zealand 42, 1–10 pp.
- LIAO, X.; SU, Z.; LIU, G.; ZOTARELLI, L.; CUI, Y.; SNODGRASS, C. 2016. Impact of soil moisture and temperature on potato production using seepage and center pivot irrigation. Agric. Water Manag. 165, 230–236. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.023>.

- LOVEYS, B.; STOLL, M.; DRY, P.R.; McCARTHY, M. 2000. Partial rootzone drying stimulates stress responses in grapevine to improve water use efficiency while maintaining crop yield and quality. *The Australian Grapegrower and Winemaker*. p. 108-113.
- MACKERRON, D.; JEFFERIES, R. 1988. The distributions of tuber sizes in drought and irrigated crops of potato I. Observations on the effect of water stress graded yields from different cultivars. *Potato Research* 31, 269–278.
- MARTIN, E. 2010. Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego. Tucson Arizona.
- MARTIN, D.; STEGMAN, E.; FERERES, E. 1990. Irrigation scheduling principles. In: Hoffman, G.J., Howell, T.A., Solomon, K.H. (Eds.), *Management of Farm Irrigation Systems*. ASAE Monograph no. 9. American Society of Agricultural Engineers, p. 1020.
- MARTÍNEZ, A. 2004. Necesidades hídricas en cultivos hortícolas. Disponible en http://www.horticom.com/revistasonline/horticultura/rh177/034_041.pdf
- MARTÍNEZ, C.; MORENO, U. 1992. Expresiones fisiológicas de resistencia a sequía en dos variedades de papa sometidas a estrés hídrico, *Rev. Brasil. de Fisiol. Veget.* p. 33–38.
- MAY, MILTHORPE, F. 1962. Drought resistance of crop plants. *Fiel crop abstract* 15. p. 171- 177.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. 1982. Principles of plant nutrition. International potash institute Bern. Switzerland. 655 p.

- MINGO, D.; THEOBALD, J.; BACON, M.; DAVIES, W.; DODD, I.; 2004. Biomass allocation in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown under partial rootzone drying: enhancement of root growth. *Functional Plant Biology* 31, 971–978 pp.
- MIRANDA, O. 2004. Producción de raíces de trigo, papas, y arveja creciendo bajo distintos niveles de fosforo. Valdivia, Chile.
- MUÑOZ, F.; MYLAVARAPU, R.; HUTCHINSON, C.; PORTIER, K.; 2006. Root Distribution under seepage-irrigated potatoes in northeast Florida. *Amer. J. Potato Res.* 83, 463–472.
- NAYLOR, R. 2009. Managing food production systems for resilience. In: Chapin III, S., Kofinas, G.P., Folke, C. (Eds.), *Principles of Ecosystems Stewardship*.
- OJALA, J.; STARK, J.; KLEINKOPF, G. 1990. Influence of irrigation and nitrogen management on potato yield and quality, *Am. Potato J.* 67. 29–43 pp.
- O'MEARA, L. 2012. La importancia del agua para las plantas Consultado el 7 de junio de 2013. Disponible en <http://www.ehowenespanol.com>
- ONDER, S.; CALISKAN, M.; ONDER, D.; CALISKAN, S. 2005. Different irrigation methods And water stress effects on potato yield and yield components. *Agric. Water Manag.* 73, 73–86 pp.
- OPENA, G.; PORTER, G. 1999. Soil management and supplemental irrigation effects on potato: II. Root growth. *Agron. J.* 91, 426–431 pp.
- PEÑA, R. 2014. Evaluación de seis genotipos de papa con tolerancia al déficit hídrico Chimborazo Ecuador.

- PERRY, DE CJ.; STEDUTO, P.; ALLEN, RG.; BURT, CM. 2009. El aumento de la productividad en la agricultura de riego: Limitaciones agronómicas y realidades hidrológicas *Agricultural Water Management* 96, 1517-1524 pp.
- RAGASSI, C.; FAVARIN, J.; SHIRAISHI, F.; MOITA, A.; HENRY, S.; DE MELO, P. 2009. Efeito da descompactação profunda de solo na produção da cultura da batata 27, 484–489 pp.
- ROJAS, G.; POSADAS, A.; QUIROZ, R.; HOLLE, M.; MÁLAGA, M. 2007. Secado Parcial de Raíces: Una Promisoria Técnica de Riego en Papa (*Solanum tuberosum*). Universidad Nacional Agraria la Molina. Perú.
- ROMERO, J. 2005. Riego por goteo. Centro de estudios y prevención de desastres. Perú.
- SALGADO, E. 2001. Relación suelo agua planta. Ediciones universitarias de Valparaíso de la Universidad Católica de Valparaíso. Chile.
- SALTER, P.; GOODE, J. 1967. Crop responses to water at different stages of growth. Farnham Royal, The United Kingdom, Commonwealth Agricultural Bureau.
- SANTOS, T.; LOPES, C.; RODRIGUES, M.; SOUZA, C.; MAROCO, J.; PEREIRA, J.; SILVA, JR.; CHAVES, MM. 2003. Secado parcial de la zona radicular; efectos sobre el crecimiento y la calidad del fruto de la vid cultivadas en el campo. *Biología vegetal funciona*. p. 663 – 671.
- SANTOS, T.; LOPES, C.; RODRIGUES, M.; DE SOUZA, C.; RICARDO-DA-SILVA, J.; MAROCO, J.; PEREIRA, J.; CHAVES, M. 2007. Effects of deficit irrigation strategies on cluster microclimate for improving fruit composition of Moscatel field-grown grapevines. *Sci. Hortic.* 112, 321–330 pp.

- SCHAFLEITNER, R. 2007. Field screening for variation of drought tolerance in *Solanum tuberosum* L. by agronomical, physiological and genetic analysis, Potato Res. p. 71–85.
- SEGERER, C.; VILLODAS, R. 2006. Hidrología “Las precipitaciones” Mendoza Argentina.
- SERMET, CALISKAN, CALISKA. 2005. Different irrigation methods and water stress effects on potato yield and yield components. Agric. Water Manage. 73, 73-86.
- SIMPFENDOFER, 2000. Efecto del Riego en el cultivo de papa. Especial del riego y drenaje. INIA (34):35–38.
- SOOD, M.; SINGH, N. 2003. Water Management. En: Khurana, S.M. Paul; J.S. Minhas; S.K. Pandey (eds). The Potato: Production and Utilization in Sub-Tropics. Mehta Publishers. New Delhi.
- SONGSRI, P.; JOGLOY, S.; VORASOOT, N.; AKKASAENG, C.; PATANOTHAI, A.; HOLBROOK, C. 2008. Root distribution of drought-resistant peanut genotypes in response to drought. Journal of Agronomy and Crop Science 194, 92–103 pp.
- STALHAM, M.; ALLEN, E. 2001. Effect of variety, irrigation regime and planting date on depth, rate, duration and density of root growth in the potato (*Solanum tuberosum*) crop. J. Agric. Sci. 137, 251–270 pp.
- STALHAM, M.; ALLEN, E. 2004. Water uptake in the potato (*Solanum tuberosum*) crop. Journal of Agricultural Science 142, 373–393 pp.
- STOLL, M.; LOVEYS, B.; DRY, P. 2000. Hormonal changes induced by partial root-zone drying of irrigated grapevine. J. Exp. Bot. 51, 1627–1634 pp.

- STRECK N.; MATIELO DE PAULA, BIGOGNIN, HELDWEIN Y DELLAI. 2006. Simulating the development of field growth potato. *Agricultural and Forest Meteorology* 142:1–10 pp.
- TAYLOR, H.; RATLIFF, L. 1969. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Sci.* 108, 113–119 pp.
- THIELE, G.; THEISEN, K.; BONIERBALE, M.; WALKER, T. 2010. Targeting the poor and hungry with potato science. *Potato Journal* 37, 75–86 pp.
- THOMPSON, A.; ANDREWS, J.; MULHOLLAND, B.; MCKEE, J.; HILTON, H.; HORRIDGE, J.; FARQUHAR, G.; SMEETON, R.; SMILLIE, I.; BLACK, C.; TAYLOR, I., 2007. Overproduction of Abscisic acid in tomato increases transpiration efficiency and root hydraulic conductivity and influences leaf expansion. *Plant Physiology* 143, 1905–1917 pp.
- TOURNEUX, C.; DEVAUX, A.; CAMACHO, M.; MAMANI, P.; LEDENT, J. 2003. Effects of water shortage on six potato genotypes in the highlands of Bolivia (II): water relations, physiological parameters. *Agronomie* 32, 181–190 pp.
- 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.
- VASCONCELOS, A.; CASAGRANDE, D.; PERECIN, L.; JORGE, E.; LANDELL. 2003. Evaluación del sistema radicular de la caña de azúcar por diferentes métodos. Brasil.
- VÁSQUEZ, A.; VÁSQUEZ, I.; VÁSQUEZ, C.; CAÑAMERO, M. 2017. Fundamentos de la ingeniería de riegos. Universidad Nacional Agraria la Molina. Perú.

- VÁSQUEZ, V.; IGLESIAS, L. 2000. Pautas para una programación del riego. Boletín técnico ICIA 7, 69-77 pp.
- VILLEGAS, F. 2010. Cenica. Sistema radical de la caña de azúcar. El sistema radical de las plantas y la absorción de nutrimentos. Revista Técnica 25: 25-29 pp.
- VREUGDENHIL, BRADSHAW, GEBHARDT, GOVERSMACKERRON, TAYLOR Y HEATHER. 2007. Potato biology and biotechnology: Advances and perspectives. Elsevier, Amsterdam.
- WANG, F.; KANG, Y.; LIU, S. 2006. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in North China Plain. Agric. Water Manage. 79, 248–264 pp.
- WANG, F.; KANG, Y.; LIU, S.; HOU, X.-Y. 2007. Effects of soil matric potential on Potato growth under drip irrigation in the North China Plain. Agric. Water Manag. 88, 34–42 pp. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2006.08.006>.
- WEISZ, R.; KAMINSKI, J.; SMILOWITZ, Z. 1994. Water deficit effects on potato leaf growth and transpiration: Utilizing fraction extractable soil water for comparison with other crops. American Potato Journal 71, 829–840 pp.
- XIE, K.; WANG, X.; ZHANG, R.; GONG, X.; ZHANG S.; MARES, V.; GAVILÁN, C.; POSADAS, A.; QUIROZ, R. 2012. Partial root-zone drying irrigation and water utilization efficiency by the potato crop in semi-arid regions in China. Scientia Horticulturae. Elsevier. China. 6 p.
- YACTAYO, W.; RAMÍREZ, D.; GUTIÉRREZ, R.; MARES, V.; POSADAS, A.; QUIROZ, R. 2013. Effect of partial root-zone drying irrigation timing on potato tuber yield and water use efficiency. Agric. Water Manag. 123, 65–70 pp.

ZHANG, J.; TARDIEU, F. 1996. Relative contribution of apices and mature tissues to ABA synthesis in droughted maize root system. *Plant Cell Physiol.* 37:598-605 pp.

ZHANG, J.; DAVIES, W. 1989. Abscisic acid produced in dehydrating roots may enable the plant to measure water status of the soil. *Plant, Cell and Environment* 12, 73–81 pp.

ZHOU, Z.; PLAUBORG, F.; PARSON, D.; NEUMANN, M. 2018. Potato canopy growth, yield and soil water dynamics under different irrigation systems. *Agricultural water management*. Denmark. 10 p.

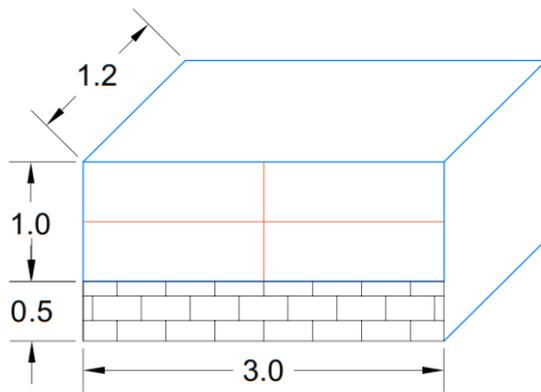
VIII. ANEXO

ANEXO 1: Coeficientes del tanque clase A para diversas localidades y ambientes de los tanques y varios valores de velocidad media de viento y de humedad relativa.

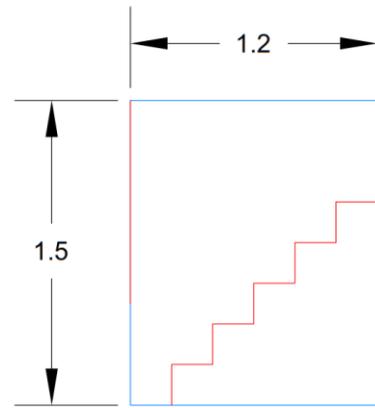
Tanque Clase A	Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada				Caso B: Tanque situado en suelo desnudo			
		Baja < 40	Media 40 – 70	Alta > 70		Baja < 40	Media 40 – 70	Alta > 70
HR media								
Velocidad viento (m/s)	Distancia del cultivo a barlovento (m)				Distancia del cultivo a barlovento (m)			
Baja <2	1	0.55	0.65	0.75	1	0.7	0.8	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	10	0.6	0.7	0.8
	100	0.7	0.8	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1000	0.75	0.85	0.85	1000	0.5	0.6	0.7
Moderada 2 – 5	1	0.5	0.6	0.65	1	0.65	0.75	0.8
	10	0.6	0.7	0.75	10	0.55	0.65	0.7
	100	0.65	0.75	0.8	100	0.5	0.6	0.65
	1000	0.7	0.8	0.8	1000	0.45	0.55	0.6
Alta 5 – 8	1	0.45	0.5	0.6	1	0.6	0.65	0.7
	10	0.55	0.6	0.65	10	0.5	0.55	0.65
	100	0.6	0.65	0.7	100	0.45	0.5	0.6
	1000	0.65	0.7	0.75	1000	0.4	0.45	0.55
Muy alta >8	1	0.4	0.45	0.5	1	0.5	0.6	0.65
	10	0.45	0.55	0.6	10	0.45	0.5	0.55
	100	0.5	0.6	0.65	100	0.4	0.45	0.5
	1000	0.55	0.6	0.65	1000	0.35	0.4	0.45

FUENTE: FAO (2008).

ANEXO 2: Diseño del rizotrón



Vista frontal



Vista lateral

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 3: Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado bajo “estrés hídrico” al 25 % de agotamiento.

Días	Eto (mm)	Etc (mm)	K_c
5	3.41	0.20	0.06
10	5.12	0.51	0.1
15	3.71	0.96	0.26
20	4.24	1.53	0.36
25	1.89	0.91	0.48
30	5.12	2.25	0.44
35	3.28	1.87	0.57
40	0.38	0.21	0.55
45	4.23	2.24	0.53
50	3.62	2.14	0.59
55	5.86	4.39	0.75
60	5.04	4.18	0.83
65	1.18	1.04	0.88
70	3.19	3.12	0.98
75	3.45	3.42	0.99
80	0.91	0.83	0.91
85	2.80	2.49	0.89
90	7.58	6.52	0.86
95	4.01	3.01	0.75
100	3.25	2.41	0.74
105	6.74	4.65	0.69
110	1.67	1.12	0.67
115	4.81	2.65	0.55
120	3.73	1.57	0.42
125	2.65	0.64	0.24
132	2.40	0.29	0.12

FUENTE: Elaboración propia.

ANEXO 4: Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado bajo “estrés hídrico” al 50 % de agotamiento.

Días	Eto (mm)	Etc (mm)	K_c
5	3.41	0.34	0.1
10	5.12	1.43	0.28
15	3.71	1.15	0.31
20	4.24	1.40	0.33
25	1.89	0.70	0.37
30	5.12	2.97	0.58
35	3.28	1.74	0.53
40	0.38	0.25	0.66
45	4.23	2.71	0.64
50	3.62	2.79	0.77
55	5.86	4.92	0.84
60	5.04	4.69	0.93
65	1.18	1.12	0.95
70	3.19	3.41	1.07
75	3.45	3.07	0.89
80	0.91	0.79	0.87
85	2.80	2.41	0.86
90	7.58	6.37	0.84
95	4.01	3.21	0.8
100	3.25	2.37	0.73
105	6.74	3.57	0.53
110	1.67	0.93	0.56
115	4.81	1.54	0.32
120	3.73	0.86	0.23
126	8.24	1.15	0.14

FUENTE: Elaboración propia.

ANEXO 5: Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado bajo “estrés hídrico” al 75 % de agotamiento.

Días	Eto (mm)	Etc (mm)	K_c
5	3.41	0.78	0.23
10	5.12	1.79	0.35
15	3.71	1.37	0.37
20	4.24	1.82	0.43
25	1.89	1.08	0.57
30	5.12	2.61	0.51
35	3.28	2.36	0.72
40	0.38	0.30	0.77
45	4.23	4.15	0.98
50	3.62	3.00	0.83
55	5.86	5.62	0.96
60	5.04	4.69	0.93
65	1.18	1.33	1.13
70	3.19	2.87	0.9
75	3.45	3.00	0.87
80	0.91	0.76	0.83
85	2.80	2.13	0.76
90	7.58	4.78	0.63
95	4.01	3.09	0.77
100	3.25	2.21	0.68
105	6.74	3.64	0.54
110	1.67	0.97	0.58
115	4.81	1.78	0.37
120	3.73	1.19	0.32
121	3.53	0.99	0.28

FUENTE: Elaboración propia.