

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**  
**CARRERA INGENIERÍA AGRONÓMICA**



**TESIS DE GRADO**

**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CULTIVO DE PAPA BAJO  
CONDICIONES DE RIEGO DEFICITARIO CON TRES LÁMINAS DE AGUA EN LA  
COMUNIDAD “BARCO BELÉN” MUNICIPIO DE ACHACACHI”**

**Presentado por:  
Iván Mamani Laura**

**La Paz – Bolivia  
2017**

**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CULTIVO DE PAPA BAJO  
CONDICIONES DE RIEGO DEFICITARIO CON TRES LÁMINAS DE AGUA EN LA  
COMUNIDAD “BARCO BELÉN” MUNICIPIO DE ACHACACHI”**

*Tesis de Grado presentado como requisito  
parcial para optar el título de  
Ingeniero Agrónomo*

**IVAN MAMANI LAURA**

**Asesores**

Ing. Ph. D. David Cruz Choque.....

Ing. Rolando Céspedes Paredes.....

**Revisores**

Ing. Ph. D. René Chipana Rivera.....

Ing. M. Sc. Paulino Ruiz Huanca.....

Ing. M. Sc. Genaro Serrano Coronel.....

**Aprobado**

Presidente tribunal revisor.....

## CONTENIDO GENERAL

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>II</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS.....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS .....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>XIV</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>XV</b>

## DEDICATORIA

*Al autor de la vida, al único amigo fiel e incondicional, al Dios de salvación, de justicia, amor y gloria eterna, que me dio aliento en los momentos difíciles.*

*A mis padres, Oscar Mamani M. y María Laura P.*

*por su apoyo, paciencia y amor, constantes.*

*A mi hermano José Luis por su apoyo fraternal.*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la fuente de vida, que hace posible todo, a Dios, que me ha regalado la oportunidad de formarme en la ciencia de la ingeniería agronómica, en este campo del saber que tiene una relación muy estrecha con la belleza de la naturaleza.

Agradecer a mis padres, que me brindaron su apoyo material como moral, y dieron todo de sí mismos, enseñándome e inculcándome valores y principios que me forjaron como persona, a mi hermano José Luis, a mi prima Lucy K. y mi familia en su conjunto, que me colaboraron durante mi formación académica para tener éxito y poder encarar un futuro mejor.

A la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés, por formarme en sus aulas. A todos los Docentes, por los conocimientos y experiencias impartidas en los años de mi formación. Al proyecto ASDI y FONTAGRO, por el apoyo logístico, económico y moral al haberme permitido realizar mi tesis de grado.

A mis asesores Ing. Rolando Céspedes P. e Ing. Ph. D. David Cruz Ch. por los consejos, apoyo y orientación. Al tribunal examinador Ing. Ph. D. René Chipana R., Ing. M. Sc. Genaro Serrano C. y el Ing. M. Sc. Paulino Ruiz H., por las correcciones y sugerencias realizadas en la elaboración de esta investigación.

Agradecer a la comunidad Barco Belén, del municipio de Achacachi, en especial a la familia del Sr. Luis Chávez y su Sra. esposa Lucia por concedernos el área experimental y por todo el apoyo prestado. A los Ingenieros: Ángela Palacios y Adrián Ramos por la orientación y colaboración, durante la investigación.

A mis amigos y compañeros de estudio: Ygor, Lucio, David, Roger, Betty, Teddy, Willy, Augusto, Cesar, Braulio, Franklin, y a todas y todos con quienes compartimos momentos inolvidables en la universidad, mil gracias.

*Iván Mamani Laura*

## ÍNDICE GENERAL

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
1.1.	Objetivo general .....	2
1.2.	Objetivos específicos.....	2
<b>2.</b>	<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1.	El cultivo de papa.....	3
2.1.1.	Importancia económica y social .....	3
2.1.2.	Origen y distribución geográfica.....	4
2.1.3.	Producción y Rendimiento del cultivo de papa en Bolivia .....	5
2.1.3.1.	Rendimiento nacional.....	6
2.1.3.2.	Rendimiento en el Departamento de La Paz .....	6
2.1.3.3.	Rendimiento en el altiplano norte .....	6
2.1.4.	Botánica y morfología de la papa.....	6
2.1.5.	Clasificación taxonómica de la papa.....	8
2.1.6.	Factores que afectan el desarrollo del cultivo .....	9
2.1.7.	Requerimientos climáticos para el cultivo de papa.....	9
2.1.7.1.	Fotoperiodo .....	9
2.1.7.2.	Temperatura .....	10
2.1.7.3.	Precipitación.....	10
2.1.8.	Requerimientos edáficos para el cultivo de papa.....	11
2.1.8.1.	Textura y profundidad.....	11
2.1.8.2.	Reacción (pH) del suelo .....	12
2.1.8.3.	Contenido de materia orgánica.....	12
2.1.9.	Fases fenológicas de la papa .....	12
2.1.9.1.	Brotación .....	12
2.1.9.2.	Emergencia.....	12
2.1.9.3.	Formación de estolones.....	13
2.1.9.4.	Inicio de la floración .....	13
2.1.9.5.	Inicio de la tuberización .....	13

2.1.9.6.	Final de la floración.....	13
2.1.9.7.	Final de la tuberización .....	13
2.1.9.8.	Madurez fisiológica.....	13
2.1.10.	Descripción de la Variedad de estudio, Waycha Paceña ( <i>Solanum tuberosum L. ssp. andígena</i> ) .....	14
2.1.11.	Manejo agronómico del cultivo de papa .....	15
2.1.12.	El cultivo de papa y el cambio climático .....	21
2.2.	Importancia del agua en la agricultura .....	23
2.3.	Necesidades de agua para el cultivo.....	23
2.4.	Necesidades hídricas de la papa .....	24
2.5.	Efecto de la deficiencia de agua sobre las plantas .....	25
2.6.	Efecto del estrés por sequía en el cultivo de papa.....	26
2.7.	Características físicas del suelo respecto al riego .....	27
2.7.1.	Profundidad efectiva .....	27
2.7.2.	Textura .....	28
2.7.3.	Estructura .....	28
2.8.	Efecto del déficit hídrico en distintas fases de desarrollo de la papa.....	29
2.9.	El riego .....	30
2.9.1.	Programación del riego .....	30
2.9.2.	Métodos de cálculo del requerimiento hídrico de la papa.....	31
2.9.2.1.	Método en base a parámetros climáticos.....	31
2.9.2.2.	Método en base a la humedad del suelo.....	31
2.9.2.3.	Método basado en el estado hídrico del cultivo .....	32
2.9.2.4.	Método de balance de agua en el suelo.....	32
2.9.2.5.	Precipitación efectiva (Pe) .....	33
2.10.	Contenido de agua en el suelo.....	33
2.10.1.	Punto de saturación (P.S.) .....	34
2.10.2.	Capacidad de campo (C.C.).....	34
2.10.2.1.	Agua Disponible Total (ADT) .....	35
2.10.2.2.	Agua Fácilmente Aprovechable (AFA) .....	35
2.10.3.	Punto de marchitez permanente (P.M.P.).....	36

2.10.4.	Suelo seco (S.S.).....	36
2.11.	Riego Deficitario Controlado (RDC) .....	36
2.12.	Riego suplementario.....	37
2.13.	Calidad de agua para riego .....	38
2.13.1.	Concentración de sales solubles .....	38
2.13.1.1.	Conductividad eléctrica.....	39
2.13.2.	Concentración relativa de sodio .....	40
2.13.2.1.	Relación de absorción de sodio.....	40
2.13.3.	Toxicidad.....	41
2.14.	Evapotranspiración (ET) .....	42
2.14.1.	Evaporación.....	42
2.14.2.	Transpiración.....	42
2.14.3.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>O</sub> ).....	42
2.14.4.	Evapotranspiración del cultivo (ET <sub>c</sub> ) .....	43
2.14.5.	Coefficiente de cultivo (K <sub>c</sub> ) .....	44
2.14.6.	Factores que afectan la evapotranspiración.....	45
2.14.6.1.	Factores climáticos.....	45
2.14.6.2.	Factores de cultivo .....	46
2.14.6.3.	Manejo y condiciones ambientales .....	46
2.14.7.	Unidades de medición de la evapotranspiración .....	47
2.14.8.	Infiltración de agua en el suelo .....	48
2.14.9.	Balance hídrico.....	48
2.15.	Productividad del agua.....	49
2.15.1.	Función de producción.....	50
2.15.1.1.	Etapas de función de producción simple.....	50
2.16.	Eficiencia de uso del agua.....	51
<b>3.</b>	<b>LOCALIZACIÓN</b> .....	<b>52</b>
3.1.	Ubicación geográfica.....	52
3.2.	Características fisiográficas.....	53
3.3.	Características de los Suelos .....	53
3.4.	Características climáticas .....	54



3.5.	Flora .....	54
3.6.	Fauna .....	55
3.7.	Recursos hídricos .....	55
3.8.	Superficie cultivada bajo riego y secano de la Comunidad Barco Belén.....	55
<b>4.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>56</b>
4.1.	Materiales y equipos.....	56
4.1.1.	Material biológico .....	56
4.1.2.	Material de campo.....	56
4.1.3.	Material de laboratorio .....	56
4.1.4.	Equipos.....	56
4.1.5.	Material de gabinete .....	57
4.2.	Metodología .....	57
4.2.1.	Diseño experimental.....	57
4.2.1.1.	Modelo Aditivo Lineal .....	57
4.2.2.	Factores de estudio .....	58
4.2.3.	Tratamientos.....	58
4.2.4.	Dimensiones de la parcela experimental .....	58
4.2.5.	Croquis del experimento .....	59
4.2.6.	Método de riego .....	59
4.2.6.1.	Calculo de las láminas de riego.....	60
4.2.7.	Trabajo de campo.....	62
4.2.7.1.	Muestreo del suelo .....	62
4.2.7.2.	Determinación de los horizontes del suelo.....	62
4.2.7.3.	Muestreo del agua para riego .....	63
4.2.7.4.	Determinación de la infiltración básica.....	63
4.2.7.5.	Preparación del suelo .....	65
4.2.7.6.	Siembra.....	65
4.2.7.7.	Puesta de letreros en la Parcela Experimental.....	65
4.2.7.8.	Riego .....	67
4.2.7.9.	Labores culturales .....	67
4.2.7.10.	Cosecha y poscosecha .....	67

4.2.8.	Trabajo de laboratorio .....	68
4.2.8.1.	Análisis del agua para riego .....	68
4.2.8.2.	Análisis del suelo .....	69
4.2.8.3.	Determinación de la densidad aparente del suelo .....	69
4.2.9.	Trabajo de gabinete .....	69
4.2.9.1.	Programación del riego .....	69
4.2.9.2.	Determinación del Balance hídrico .....	71
4.2.9.3.	Sistematización y análisis de datos en general .....	73
4.2.10.	Variables de respuesta .....	73
4.2.10.1.	Variables agronómicas .....	73
4.2.10.2.	Variables de riego.....	74
4.2.10.3.	Variables económicas.....	76
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>78</b>
5.1.	Descripción de las características climáticas de la zona de estudio .....	78
5.1.1.	Evolución de la temperatura durante el periodo vegetativo de la papa.....	79
5.1.2.	Evolución de las precipitaciones y la evapotranspiración de referencia durante el periodo vegetativo de la papa .....	80
5.1.3.	Evolución de la humedad relativa (HR) durante el periodo vegetativo de la papa .....	82
5.1.4.	Evolución de la velocidad del viento durante el periodo vegetativo de la papa .....	83
5.1.5.	Balance hídrico local.....	84
5.2.	Descripción de las características edáficas de la zona de estudio .....	87
5.2.1.	Descripción del perfil del suelo.....	87
5.3.	Descripción del análisis del agua para riego .....	90
5.4.	Variables de riego.....	91
5.4.1.	Agua total aplicado al cultivo, riego más la precipitación efectiva .....	91
5.4.2.	Agua total aplicada mediante riego.....	97
5.4.3.	Determinación de la velocidad de infiltración básica (VIB) .....	100
5.4.4.	Contenido de humedad del suelo .....	102
5.5.	Variables agronómicas .....	108
5.5.1.	Altura de planta .....	108
5.5.2.	Número de tallos por planta .....	110

5.5.3.	Número de tubérculos por planta .....	112
5.5.4.	Número de tubérculos respecto al diámetro .....	113
5.5.5.	Rendimiento .....	115
5.6.	Evaluación de la productividad del agua.....	117
5.6.1.	Productividad del agua por tratamiento .....	117
5.6.2.	Función de producción .....	119
5.6.3.	Productividad máxima (PT) .....	120
5.6.4.	Productividad media (PMe) .....	121
5.6.5.	Evaluación del índice de eficiencia de uso del agua (IEUA) .....	121
5.7.	Variables económicas.....	122
5.7.1.	Ajuste de los rendimiento.....	122
5.7.2.	Ingreso Bruto (IB) .....	122
5.7.3.	Ingreso neto (IN) .....	123
5.7.4.	Relación beneficio costo (B/C) .....	123
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>124</b>
<b>7.</b>	<b>SUGERENCIAS</b> .....	<b>127</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>129</b>

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Registros de las variables agronómicas .....	138
Anexo 2. Análisis de varianza para las variables agronómicas .....	139
Anexo 3. Análisis de varianza para la productividad del agua .....	141
Anexo 4. Análisis físico - químico de aguas .....	142
Anexo 5. Análisis físico de suelos .....	143
Anexo 6. Planilla de cálculo de la velocidad de infiltración básica (VIB) .....	144
Anexo 7. Láminas de riego (R) en base a ETo y Pe, y agua total (R+Pe), aplicados al cultivo de papa, (mm). .....	145
Anexo 8. Reporte fotográfico .....	147

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Diversidad de variedades y especies de papa en diferentes zonas agroecológicas de la región andina de Bolivia .....	4
Cuadro 2. Condiciones que determinan la profundidad.....	16
Cuadro 3. Métodos de riego, ventajas y desventajas. ....	17
Cuadro 4 Enfermedades del cultivo de papa .....	19
Cuadro 5 Enfermedades del cultivo de papa .....	20
Cuadro 6 Clasificación de la profundidad del suelo para uso agrícola .....	28
Cuadro 7 Clasificación de calidad del agua para riego según su CE. ....	40
Cuadro 8 Valores normales de análisis de agua para riego.....	41
Cuadro 9 Características de la parcela experimental .....	58
Cuadro 10 Clasificación de la velocidad de infiltración del agua en el suelo .....	65
Cuadro 11 Labores culturales.....	67
Cuadro 12 Clasificación de tubérculos de papa. ....	74
Cuadro 13 Registro de datos climáticos promedios mensuales durante el desarrollo vegetativo del cultivo de papa, en la comunidad Barco Belén, Gestión 2011 - 2012.....	78
Cuadro 14. Relación entre la precipitación y evapotranspiración de referencia .....	80
Cuadro 15 Balance hídrico del área experimental del periodo 2011-2012, en base a datos de la estación Barco Belén y Estación Belén. ....	85
Cuadro 16 Resultados del análisis físico del suelo .....	89
Cuadro 17 Densidad aparente del suelo.....	89
Cuadro 18 Resultados del análisis físico-químico del agua.....	90
Cuadro 19 Aporte total de agua al cultivo de papa, (Pe+R) en los tres tratamientos .....	92
Cuadro 20 Láminas de riego (R) aplicadas, en base a ETo y Pe.....	97
Cuadro 21. Planilla de cálculo de la Velocidad de infiltración .....	101
Cuadro 22. Contenido de humedad volumétrica, $\Theta$ (%) para los tres tratamientos.....	103
evaluados antes y después de aplicar riego.....	103
Cuadro 23. Comparación de medias con la prueba de Duncan para la altura de.....	108
planta por efecto de niveles de riego. ....	108
Cuadro 24. Comparación de medias con la prueba Duncan para el número de .....	110
tallos/planta por efecto de niveles de riego.....	110

Cuadro 25. Prueba de Duncan para el Número de Tubérculos/Planta .....	112
por efecto de niveles de riego.....	112
Cuadro 26. Prueba de Duncan al 5 %para el número de tubérculos respecto al .....	114
diámetro por efecto de niveles de riego.....	114
Cuadro 27. Prueba de Duncan para el Rendimiento por efecto de niveles de riego.....	115
Cuadro 28. Comparación de medias con la prueba de Duncan al 5%, para la .....	117
Productividad del Agua.....	117
Cuadro 29. Volúmenes de agua aplicada y producción total del cultivo .....	119
Cuadro 30. Índice de eficiencia del uso de agua para los tres tratamientos de riego.....	121
Cuadro 31. Análisis de costos de producción .....	123

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfología de la papa <i>Solanum tuberosum</i> L. (www.inta.gob.ar). .....	8
Figura 2. Fenología del cultivo de papa (www.centa.gob.sv/hortalizas/Guia Papa) .....	14
Figura 3. Las cuatro fases de agua o constantes hídricas en el suelo (Serrano, 2010). .....	34
Figura 4. Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ), Evapotranspiración del Cultivo bajo condiciones estándar (ET <sub>c</sub> ) y en condiciones no estándar (ET <sub>c aj</sub> ), (FAO 2006). .....	44
Figura 5. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET, (FAO 2006). .....	45
Figura 6. Ubicación parcela experimental .....	52
Figura 7. Croquis de la distribución de los tratamientos en la parcela Experimental .....	59
Figura 8. Equipo meteorológico Vantage Pro2 Plus en la comunidad de estudio .....	62
Figura 9. Medidas y partes de los cilindros infiltrómetros (Padilla, 2014). .....	64
Figura 10. Procedimiento para la siembra de papa, a) Roturado y rastrado; b) fertilización con estiércol; c) siembra; d) establecimiento y señalización de la parcela experimental. ....	66
Figura 11. Comportamiento de la temperatura máxima, mínima y ambiente (°C), registradas del periodo 2011 a 2012, en la comunidad Barco Belén .....	79
Figura 12. Comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ), y la precipitación pluvial (PP) en mm, registradas en el periodo 2011 - 2012, en la comunidad Barco Belén. ....	81
Figura 13. Comportamiento de la humedad relativa (HR) en %, registradas en la gestión 2011 a 2012, en la comunidad Barco Belén. ....	83
Figura 14. Comportamiento de la velocidad del viento en m/s, registradas en la gestión 2011 a 2012, en la comunidad Barco Belén. ....	84
Figura 15. Balance hídrico local de la zona de estudio. ....	85
Figura 16. Descripción del perfil del suelo en donde se diferencian 4 horizontes (H <sub>o</sub> ). ....	87
Figura 17. Volumen total de agua aplicado (Riego + Precipitación efectiva) .....	93
Figura 18. Volúmenes de agua aplicado (Riego+Pe) durante el ciclo vegetativo del cultivo de papa. ..	94
Figura 19. Volumen aproximado de agua (Riego + Pe), aplicado en las diferentes fases fenológicas del cultivo de papa. ....	95
Figura 20. Volumen de agua aproximado (Riego + Pe), aplicada por día .....	96
en las diferentes fases fenológicas del cultivo de papa. ....	96

Figura 21. Volumen total de agua aplicada mediante riego.....	98
Figura 22. Evolución del volumen de agua aplicada mediante riego desde la fase de estolonización hasta inicios de la madurez fisiológica .....	99
Figura 23. Volumen de riego aplicado en las diferentes fases fenológicas .....	100
Figura 24. Comportamiento de la velocidad de infiltración del agua en el suelo.....	101
Figura 25. Humedad volumétrica ( $\Theta$ ) del suelo, para el T1, evaluadas antes y después del riego, durante la fase de: estolonización (E.), floración y tuberización (F.T.) y madurez fisiológica (M.F.) .	104
Figura 26. Humedad volumétrica ( $\Theta$ ) del suelo, para el tratamiento 2, evaluadas antes y después del riego, durante la fase de: estolonización (E.), floración y .....	105
tuberización (F.T.) y madurez fisiológica (M.F.) .....	105
Figura 27. Humedad volumétrica ( $\Theta$ ) en el suelo, para el tratamiento 3, evaluadas antes y después de riego, durante la fase de estolonización (E.), floración y .....	107
tuberización (F.T.) y madurez fisiológica (M.F.) .....	107
Figura 28. Altura de planta de los tres tratamientos .....	109
Figura 29. Número de tallos principales por planta como efecto de los tratamientos de riego .....	111
Figura 30. Número de Tubérculos por planta como efecto de .....	112
los tratamientos de riego deficitario .....	112
Figura 31. Número de tubérculos según tamaño por efecto de .....	114
los tratamientos de riego .....	114
Figura 32. Rendimiento con relación a los niveles de riego .....	116
Figura 33. Productividad del agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), para los distintos tratamientos evaluados .....	118
Figura 34. Función de producción del cultivo de papa. ....	119



## RESUMEN

Con el fin de contribuir al desarrollo de estrategias de riego, que utilicen menores cantidades de agua, incrementando la productividad y la eficiencia del uso del agua de riego por las plantas. Con el apoyo del Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO), se realizó la presente investigación consistente en la aplicación de Riego Deficitario Controlado (RDC), en el cultivo de papa variedad Waycha Paceña (*Solanum tuberosum L. ssp. andígena*), para evaluar el rendimiento del cultivo, la productividad del agua y la rentabilidad, en la Comunidad Barco Belén, Municipio de Achacachi, Provincia Omasuyos del Departamento de La Paz, en la campaña agrícola 2011 – 2012.

La metodología empleada comprende, un diseño experimental de bloques al azar, con cuatro repeticiones y tres tratamientos, donde cada bloque está compuesto por tres unidades experimentales, teniéndose como único factor de estudio tres niveles de riego, un tratamiento control que recibió el 100% (T3) y dos tratamientos de restricción hídrica que recibieron el 75% (T2) y 50% (T1) de lámina de riego. Se evaluaron variables; climáticas, de riego, agronómicas, edáficas, y económicas, que interactuaron en la producción. Las fases críticas de restricción hídrica, de formación de estolones y floración-tuberización coincidieron con la aplicación de riego y parcialmente con la mayor incidencia de la PP favoreciendo al desarrollo del cultivo.

Los rendimientos obtenidos manifestaron diferencias significativas entre el T1 con 28,62 t/ha, con relación al T2 y T3, con 39,80 y 41,12 t/ha respectivamente, en cambio entre el T2 y T3 no se presentaron diferencias significativas. En el T2 se cumplió favorablemente el concepto del RDC de reducir los aportes hídricos sin afectar significativamente el rendimiento, y alcanzar una mayor productividad del agua, dando a concluir que el T2 se constituye en una óptima estrategia de riego para el cultivo de papa en la zona de estudio ya que permite obtener un rendimiento superior con una restricción moderada de riego.

El análisis económico reveló una rentabilidad superior para el T2 respecto al T1 y T3.

## SUMMARY

In order to contribute to the development of irrigation strategies, using smaller amounts of water, increasing the productivity and efficiency of irrigation water use by plants. With the support of the Regional Fund for Agricultural Technology (FONTAGRO), has been carried out this research that involves the application of regulated deficit irrigation (RDC), in the cultivation of potato variety Waycha (*Solanum tuberosum* L. Ssp. Andigena), to evaluate the performance of the crop water productivity and profitability in the Community Boat Bethlehem, town of Achacachi, Omasuyos Province in the Department of La Paz, in the agricultural season 2011 - 2012.

The methodology includes an experimental design of blocks at random, with four repetitions and three treatments, where each block is composed of three experimental units, taking as the sole factor of study three levels of irrigation, a control treatment that he received the 100% (T3) and two treatments of water restriction that received 75% (T2) and 50% (T1) of irrigation. Variables were evaluated; climate, irrigation, agronomic, edaphic, and economic, which interacted in the production. The critical phases of water restriction, training of stolons and flowering-tuber coincided with the implementation of irrigation and the higher incidence of the PP and thus to the development of the crop.

The yields obtained showed significant differences between the T1 with 28.62 t/ha, with regard to the T2 and T3, with 39.80 and 41.12 t/ha, respectively, on the other hand between T2 and T3 there were not significant differences. In the T2 was met favorably the concept of the DRC to reduce water inputs without significantly affecting performance, and achieve greater productivity of water, to conclude that the T2 is an optimal irrigation strategy for potato cultivation in the study area as yields were far lower than those achieved.

The economic analysis revealed a higher return for the T2 to T1 and T3.

## 1. INTRODUCCION

El agua es el elemento vital de nuestro planeta, ya que permite a las plantas, animales y otros seres vivos mantener su existencia, es así que en la agricultura tiene un papel muy importante para el desarrollo de las plantas o de los cultivos.

Lamentablemente la disponibilidad de agua en nuestro planeta va disminuyendo, tanto para consumo humano (agua potable) como para los cultivos (agua para riego), influyendo negativamente en la agricultura, provocando bajos rendimientos y hasta pérdidas totales de las cosechas, así como una disminución de la superficie bajo riego.

Por eso se han adoptado estrategias orientadas a mejorar la eficiencia de su uso. Uno de los cuales es el uso del riego deficitario controlado (RDC), esta estrategia consiste en disminuir o eliminar la cantidad de agua aplicada a la planta, en una etapa fenológica específica del mismo, sin afectar significativamente la producción.

El altiplano boliviano al ser una región fría, seca y de mucho viento, presenta bajas precipitaciones, la cual puede estar ligada también al cambio climático que se está atravesando hoy por hoy en todo el planeta, provocando de esta forma escasez de agua para el riego de los cultivos, con la consecuente reducción del rendimiento de estos.

La papa (*Solanum tuberosum*), es un cultivo que requiere riego para alcanzar altos rendimientos y constituye uno de los tubérculos andinos base de la alimentación de la población de esta ecorregión.

Su aporte nutricional se caracteriza por ser una fuente importante de proteína, almidón, ceniza y grasa, además de minerales y vitaminas. Su importancia se refleja por su amplio grado de adaptabilidad a un rango amplio de pisos ecológicos de nuestro país.

En nuestro país el manejo y uso del agua para riego es poco eficiente, a pesar de que el gobierno ha venido impulsando proyectos de riego en los cuales no se contempla debidamente lo que es la frecuencia, lámina y tiempos de riego, y mucho menos

técnicas y/o estrategias como es el riego deficitario controlado (RDC), que contribuyan a un uso adecuado y eficiente del recurso agua.

Entonces, no existen avances significativos en cuanto a la aplicación de la técnica del riego deficitario controlado (RDC), pero recientemente se está incursionando en investigaciones en la carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad Mayor de San Andrés relacionadas con riego deficitario en vid, tomate y papa, los resultados están en etapa de redacción.

Con la presente investigación se pretende formular estrategias y soluciones, para afrontar la escasez y uso inadecuado del agua de riego, bajos rendimientos y pérdidas en la producción, en el cultivo de papa. Entonces se busca elevar los rendimientos e incrementar el área de siembra de este cultivo, mediante la aplicación del riego deficitario controlado (RDC), llegando así a un uso eficiente del agua para riego en el cultivo de estudio, en el municipio de Achacachi.

### **1.1. Objetivo general**

- Evaluar el rendimiento del cultivo de papa y la productividad del agua bajo condiciones de riego deficitario controlado, en la comunidad de Barco Belén, Municipio de Achacachi, Provincia Omasuyos.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Determinar el efecto de tres láminas de agua en el rendimiento del cultivo de papa.
- Determinar la productividad del agua en el cultivo de papa.
- Establecer la eficiencia de uso del agua en el cultivo de papa.
- Evaluar los costos parciales de producción de la papa considerando la aplicación de riego deficitario.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. El cultivo de papa**

La papa es una planta herbácea anual que alcanza una altura de un metro y produce un tubérculo que es la papa misma. Pertenece a la familia de las solanáceas, del genero solanum. La papa cultivada es la *Solanum tuberosum L.* que se subdivide en dos especies apenas diferentes: la “andigena”, adaptada a condiciones de días breves, cultivada principalmente en los andes, y la “tuberosum”, que es la variedad que hoy se cultiva en todo el mundo.

Los pobladores andinos reconocen las papas en variedades amargas (luk'i) y variedades dulces (ch'uqi). Las variedades dulces son muy sensibles al frio y la helada en cambio las variedades amargas o luk'i son más resistentes a las heladas (CEPA 2008).

#### **2.1.1. Importancia económica y social**

Según la FAO (2010), las Naciones Unidas han declarado el 2008 como el Año Internacional de la Papa, además menciona que las papas son el tubérculo más importante del mundo siendo una aliada clave de la seguridad alimentaria así como en la lucha contra el hambre y la pobreza.

La papa es el cuarto cultivo alimenticio en orden de importancia a nivel mundial después del trigo, el arroz y el maíz. Entre los cultivos andinos, la papa es de lejos el más importante por su contribución económica, nutricional y de generación de empleo, contribuye a la economía con \$us. 150 millones al año, generando empleo y sobre todo, alimento relativamente barato para la población, (CEPA 2008).

De acuerdo con PROINPA, (1998). Es considerada una fuente de ingresos y de seguridad alimentaria, especialmente para el habitante andino, ya que puede ser transformado en chuño y tunta.

La papa es el producto principal en la dieta de la población que tiene recursos limitados para diversificar su canasta de consumo. Es importante porque se constituye la base de

alimentación de un 80 % de la población de la zona andina boliviana y son la mejor calidad culinaria en todo el mundo (MACA, 2005).

Según PROINPA (1992), citado por Calle (2009) menciona que el cultivo de papa constituye el 10 % de la superficie nacional cultivada (140.000,00 ha), teniendo un rendimiento promedio de 4,4 t/ha y una producción de 521.000,00 t, representando el 13 % del valor bruto agropecuario.

### 2.1.2. Origen y distribución geográfica

La papa (*Solanum tuberosum L.*) se originó hace unos 8 000 años, en las alturas de Los Andes, cerca del lago Titicaca, se estima que existen más de 5000 variedades nativas de papa en América Latina (FAO, 2010).

Según el CEPA (2008), la papa se cultiva papa en 7 de los 9 departamentos del país. En Bolivia hay zonas agro-ecológicas que son potenciales para el cultivo de papa, no siendo las únicas zonas, sino que son zonas agroecológicamente potenciales como se muestra en el cuadro 1.

**Cuadro 1. Diversidad de variedades y especies de papa en diferentes zonas agroecológicas de la región andina de Bolivia**

Microrregiones departamentos	Altitud m.s.n.m.	Número de variedades			Número de especies
		Nativas	Introducidas	Total	
Ayo Ayo (La Paz)	3700-4000	64	2	66	6
Acacio (Potosi)	3300-3800	65	3	68	4
Vacas (Cbba.)	3400-3770	20	4	24	4
Raq'aypampa (Cbba.)	3500-3800	8	6	14	2
Japo (Cbba.)	3900-4500	50	4	54	5
Aramasi (Cbba.)	2800-3900	7	3	10	2
Chulina (La Paz)	2500-4000	90	2	92	4
Candelaria (Cbba.)	3250-4200	31	5	36	4

**Fuente:** Saravia en base a Rea J. (1992), Torrico A. (1993), Salazar D. (1999)

Por otro lado Bolivia posee un banco de germoplasma de papa que conserva más de 1200 accesiones, entre las cuales se puede concentrar alrededor de 700 variedades diferentes provenientes de toda la zona andina del país. Las variedades de mayor consumo en la actualidad son la Waych'a, imilla blanca, desiree y holandesa.

### **2.1.3. Producción y Rendimiento del cultivo de papa en Bolivia**

En Bolivia la papa se cultiva en el altiplano, valles y llanos orientales. En el altiplano se producen variedades andígenas (nativas) como la Waycha, sani imilla, imilla negra, imilla blanca que son las de mayor importancia, los rendimientos son relativamente bajos entre 4 – 14 t/ha, por estar estas zonas expuestas a heladas, granizadas y sequías importantes. En los valles producen las mismas variedades andígenas y también tuberosas comúnmente llamadas holandesas, en estas zonas existe mayor disponibilidad de agua por lo que existe mayor número de épocas de siembra. En los llanos orientales tienen una siembra corta de marzo-abril, donde toda la producción es de variedades holandesas destinadas únicamente a consumo propio (UPS-SEPA 2007 citado por Choque 2015).

De acuerdo con SEPA, (2007) mencionado por Choque (2015). Se cultiva en siete departamentos del país menos Beni y Pando juega un rol socio cultural muy importante entre los productores, por lo que aún se conserva y cultiva una diversidad de variedades de papas nativas principalmente para el autoconsumo y trueque en las ferias comunales.

La tasa de crecimiento de la producción de papa en el mercado boliviano muestra un comportamiento estacionario con incremento productivo de 1 % anual, lo cual está por debajo de la tasa de crecimiento de la población. Esta situación hace que el consumo per cápita sea cada vez menor (Campero, 2008 citado por Choque 2015).

En Bolivia el cultivo de papa refleja diferentes valores en rendimientos, la zona del altiplano es la que tiene mayor producción y superficie cultivada pero contradictoriamente presenta los rendimientos más bajos del país, en el trópico existen valores con alguna significación y solo la zona de los valles tiene rendimientos elevados a comparación del resto del país (Zeballos et al. 2009).

### **2.1.3.1. Rendimiento nacional**

El rendimiento de papa promedio nacional es de 5,98 t/ha, poco ha variado en los últimos 40 años, tal como lo reporta el CIP, estando entre los más bajos en Latinoamérica y el mundo (Zeballos *et al.* 2009).

### **2.1.3.2. Rendimiento en el Departamento de La Paz**

De acuerdo con Zeballos *et. al.* (2009), el rendimiento del cultivo de papa a nivel del Departamento de La Paz alcanza un promedio de 5,8 t/ha.

### **2.1.3.3. Rendimiento en el altiplano norte**

Según Hijmans *et al.* (2003) citado por Mamani (2015), la papa es el cultivo más importante de la región en donde los rendimientos son bajos, aproximadamente 5,2 t/ha. El clima es limitante y anualmente variable por lo que el cultivo de papa es riesgoso debido a las sequías, granizos y heladas. La temperatura media anual es de 7,6 °C y la precipitación media aproximada es de 585 mm.

### **2.1.4. Botánica y morfología de la papa**

Huamán (2000), menciona que la papa es una dicotiledónea herbácea, tiene un hábito de crecimiento rastroso o erecto; los tubérculos son de tallos carnosos originándose del extremo del estolón con ojos y yemas, su follaje alcanza una altura aproximada de 0.60 a 1.50 m, las hojas son compuestas y pinnadas, el fruto es de tipo baya tiene forma redonda u ovalada de tamaño pequeño y carnoso que tiene semillas sexuales, posee un color verde amarillento o castaño rojizo.

Por su parte Conlago (2010) citado por Gomez (2013), menciona que la papa es una planta herbácea, suculenta que presenta tubérculos (tallos subterráneos), que se desarrollan al final de los estolones que nacen del tallo principal; los tallos aéreos son de sección angular, y entre las axilas de las hojas y los tallos se forman ramificaciones secundarias con tres a seis tallos por planta.



### **a) El sistema de tallos**

Según el INIA (2009), la papa consta de tallos, estolones y tubérculos. Las plantas provenientes de semilla verdadera tienen sólo un tallo, principal mientras que las provenientes de tubérculos-semilla pueden producir varios tallos. Los tallos laterales son ramas de los tallos principales.

### **b) Las hojas**

Son alternas de color verde claro, verde y verde oscuro, haz y envés poco pubescentes; presentando las primeras hojas simples, posteriormente presenta hojas compuestas, imparipinadas con tres a cuatro pares de hojuelas laterales y una hojuela terminal.

### **c) Las raíces**

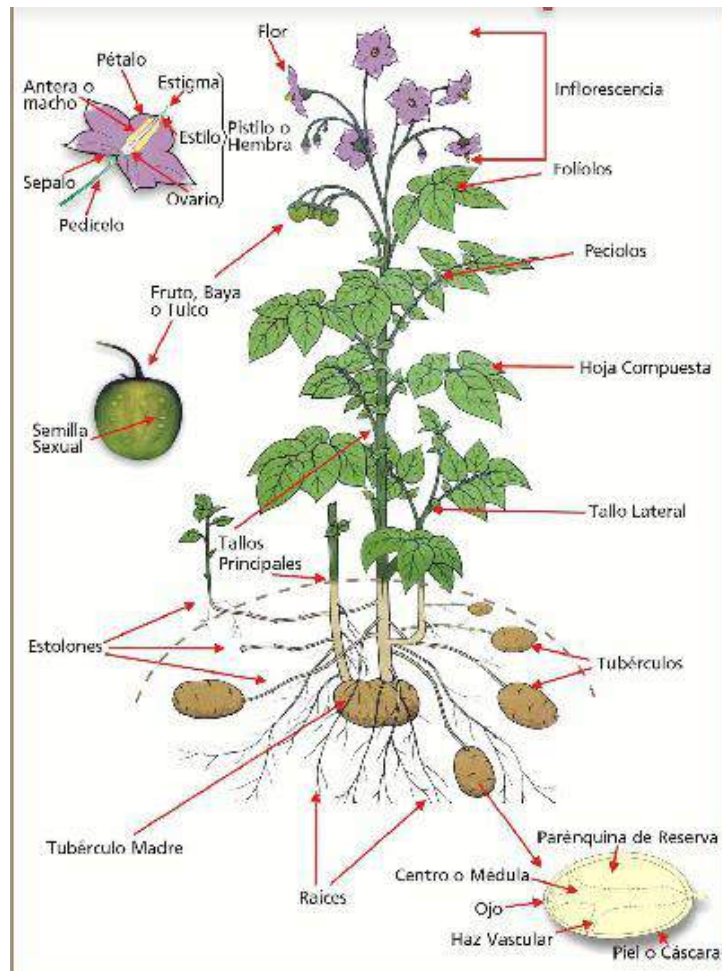
Presentan un desarrollo en verticilo en los nudos del tallo principal, su primer crecimiento es vertical dentro de la capa de suelo arable, posteriormente se presenta un crecimiento horizontal de 25 a 50 cm., la papa tiene un sistema radicular fibroso muy ramificado.

### **d) La inflorescencia**

Es cimosa presentando flores hermafroditas, tetracíclicas, pentámeras, con cáliz gamosépalo lobulado, con corola rotácea pentalobulada de color blanco a púrpura, con cinco estambres, cada estambre posee dos anteras de color amarillo pálido, amarillo fuerte o anaranjada, gineceo con ovario bilocular.

### **e) El fruto**

Es una baya bilocular de 15-30 mm de diámetro, el color es verde amarillento y cada fruto contiene 200 semillas aproximadamente. El tubérculo de la papa es un tallo subterráneo ensanchado con diferentes colores de acuerdo a la variedad. La papa tiene ojos superficiales, semi profundas y profundas con una dormancia de 120 días aproximado.



**Figura 1. Morfología de la papa *Solanum tuberosum* L. ([www.inta.gov.ar](http://www.inta.gov.ar)).**

### 2.1.5. Clasificación taxonómica de la papa

Según Rojas (2001), la papa tiene la siguiente clasificación taxonómica:

- Reino: Vegetal
- Subreino: Embryobionta (Cormofitas)
- Division: Magnoliophyta
- Clase: Magnoliopsida (Dicotiledoneas)
- Subclase: Asteridae
- Orden: Solanales
- Familia: Asteraceae
- Género: *Solanum*
- Especie: *S. tuberosum* L.

Subespecie (ssp.): *S. tuberosum* L.

Nombre vulgar: Papa, patata

#### **2.1.6. Factores que afectan el desarrollo del cultivo**

Según Sierra (2005), muchos factores afectan al desarrollo de los tubérculos y el productor tiene control sobre la mayoría de ellos, estos incluyen variedad, edad fisiológica de la semilla, humedad del suelo, nutrición y control de plagas. Entre los factores no controlables se encuentran la temperatura, duración de luz y precipitación pluvial.

#### **2.1.7. Requerimientos climáticos para el cultivo de papa**

El clima cumple un papel muy importante en la producción de papa, los extremos de altitud de cada zona determina grandes variaciones ecológicas y climáticas (Lindao, 1991 citado por Quispe 2013).

El área adecuada para el cultivo de papa es aquella cuya temperatura media anual está entre 6 y 14°C, con una disponibilidad de lluvia alrededor de 700 a 1000 mm por año. Se ha comprobado que el desarrollo de este cultivo es apropiado cuando la precipitación fluctúa alrededor de 700 mm (Tapia, 1990 citado por Quispe 2013).

##### **2.1.7.1. Fotoperiodo**

Según Sierra (2005), los días largos favorecen el desarrollo de la parte aérea (follaje), pero para la formación de tubérculos son adecuados los días cortos. La duración del día influye considerablemente sobre el crecimiento de la papa, bajo condiciones de días cortos las plantas presentan una tuberización precoz, los estolones son cortos y el follaje escaso en cambio con días largos el proceso de tuberización se retarda y reduce.

Cortez y Hurtado (2002) citado por Pinaya (2013), mencionan que la papa se comporta mejor con periodos de 8 a 12 horas luz. La luminosidad que reciben las plantas durante el día incide en la función de los cloroplastos favoreciendo al proceso de la fotosíntesis y consecuentemente la formación de los tuberculos.

La papa es un cultivo de día corto. El acortamiento de los días o fotoperiodo corto es un factor que estimula o acelera la entrada en tuberización de la mayoría de las variedades, pero no determina este proceso (Aldabe y Dogliotti 2006).

#### **2.1.7.2. Temperatura**

Según Formaggini (S.F.) citado por Pinaya (2013), señala que el tubérculo en estado de latencia, inicia su brotación y emergencia en forma lenta a 5 °C, y se maximiza entre los 14 – 16 °C. Durante el desarrollo del cultivo, la planta forma su área foliar profusamente a temperaturas de 20 – 25 °C.

La papa es considerada una planta termoperiódica, indicando que necesita una variación entre la temperatura máxima y mínima de al menos 10 °C. Si la diferencia es menor, el crecimiento y tuberización se ven afectados. Si esta situación se presenta con frecuencia a lo largo del ciclo vegetativo, el rendimiento y la calidad se ponen en riesgo, pues las temperaturas altas son ideales para el crecimiento de tallos y hojas, pero no para el desarrollo de los tubérculos, CENTA (2002) citado por Mamani (2015).

Con temperaturas máximas mayores a 25 °C, la respiración de la planta aumenta, aumentando a su vez el consumo de asimilados disponibles para el crecimiento de la planta (Aldabe y Dogliotti 2006).

Además Contreras (2009) citado por Mamani (2015), menciona que días cortos y temperaturas bajas estimulan la iniciación de tubérculos, bajo condiciones de días muy largos y altas temperaturas la formación de tubérculos puede verse disminuida (Contreras 2009).

#### **2.1.7.3. Precipitación**

Según Contreras (2001) citado por Choque (2015), el cultivo de papa requiere de 500 a 700 mm de agua para obtener altos rendimientos, y una precipitación de 40 mm cada 15 días será de gran beneficio al cultivo, el cual responderá con altos rendimientos.

La producción se reduce, si se agota más del 50 % del total del agua disponible en el suelo durante el período de crecimiento, la etapa más crítica que perjudica al cultivo es durante la formación de tubérculos FAO (2008) citado por Pinaya (2013).

Mucha o poca lluvia afecta el rendimiento del cultivo, ya que debido a la poca profundidad de las raíces de la papa la respuesta productiva a la irrigación frecuente es considerable (Jara 1999). Beniot y Grant (1985) concluyeron que no siempre es la falta de lluvias la limitante para obtener rendimientos óptimos sino el patrón de distribución irregular de las lluvias durante el año lo que provoca que el cultivo pase por períodos tanto de exceso como de escasez de agua.

## **2.1.8. Requerimientos edáficos para el cultivo de papa**

### **2.1.8.1. Textura y profundidad**

Según Pardave (2004) citado por Guerra (2012), la papa tiene un sistema radicular muy ramificado y con innumerables raicillas que fácilmente ocupan 45 cm de profundidad, por ello requiere de un suelo profundo, orgánico, mullido, con buena retención de humedad, es así que los mejores rendimientos se logran en suelos franco arenosos, en un ph de 5,5 a 8,0.

Pérez (1987) mencionado por Patty (2009), señala que el cultivo de papa debe contar con un suelo de textura liviana (franco arenoso) y profundo (40 a 50 cm), sin embargo se puede cultivar en cualquier tipo de suelo, excepto en suelo arcillosos, húmedos y sin drenaje.

Por otro lado según el CENTA (2002), los mejores suelos son los francos, franco-arenosos, franco-limosos y franco-arcillosos, de textura liviana, con buen drenaje y con una profundidad efectiva mayor de los 50 cm, y una densidad aparente (Dap) de 1,2 g/cm<sup>3</sup> que permitan el libre crecimiento de los estolones y tubérculos y faciliten la cosecha.

### **2.1.8.2. Reacción (pH) del suelo**

El cultivo de papa requiere de suelos oscuros y ricos en materia orgánica y ligeramente ácidos en un pH de 5,5 a 8,0 Según (Pardave (2004) citado por Guerra (2012)).

### **2.1.8.3. Contenido de materia orgánica**

La materia orgánica del suelo tienen muchas funciones importantes, ayuda a unir entre sí las partículas finas para formar unidades estructurales (agregados del suelo), mejora la aireación del suelo y la percolación y el movimiento descendente del agua, los ácidos orgánicos, que son productos de la descomposición de la materia orgánica del suelo, solubilizan el fósforo y otros nutrientes del suelo, y los hacen asimilable para los cultivos (FAO, 1986 mencionado por UNA, 2005).

### **2.1.9. Fases fenológicas de la papa**

Según Mamani (2009), el ciclo del cultivo de papa está comprendido por las siguientes fases fenológicas que son:

#### **2.1.9.1. Brotación**

La brotación ocurre cuando se almacena por un tiempo en oscuridad o a media luz, muchos casos de brotes cortos (0,2 - 0,5 cm) es bastante para el buen nacimiento. La semilla de papa del tubérculo es del tamaño de un huevo o que mide de 40 a 70 mm o que pesa 40 a 85 gramos. Cuando se siembra la papa en tiempo de calor excesivo es necesario una pre germinación de semilla, obteniendo los brotes mayores (1,5 - 2,5 cm).

#### **2.1.9.2. Emergencia**

Es la fase comprendida entre la siembra y la aparición de las plántulas a los 30 – 35 días después de la siembra, depende de la humedad y temperatura del suelo. Durante esta fase la plántula sobrevive de las reservas contenidas en el tubérculo madre.

### **2.1.9.3. Formación de estolones**

Ocurre a los 15 a 20 días después de la emergencia. Los primeros tubérculos en formarse son desarrollados en la parte basal de los estolones, y se convierten en dominantes sobre aquellos que se formen después.

### **2.1.9.4. Inicio de la floración**

Ocurre a los 20 a 25 días después de la emergencia. En las papas amargas ocurre a los 35 a 55 días.

### **2.1.9.5. Inicio de la tuberización**

Ocurre a los 35 a 40 días después de la emergencia. La planta se encuentra en su máximo desarrollo vegetativo (mayor índice de área foliar), y se produce la translocación de la mayoría de los carbohidratos a los órganos de reserva, de esa manera el crecimiento de los tubérculos presenta un carácter exponencial.

### **2.1.9.6. Final de la floración**

Se presenta a los 55 a 85 días de la emergencia, esta fase se inicia cuando la última flor de la planta inicia su marchitamiento y secado.

### **2.1.9.7. Final de la tuberización**

Acontece a los 100 a 115 días después de la emergencia, se presenta cuando el último estolón de la planta inicia su engrosamiento distal, esta fase es considerada importante ya que de esta depende la uniformidad del tamaño de los tubérculos y la precocidad de la planta.

### **2.1.9.8. Madurez fisiológica**

Sucede a los 135 a 140 días después de la emergencia, se caracteriza por el cambio de color de las hojas, la piel de los tubérculos se encuentra bien adherida y no se

desprende a una simple fricción de los dedos. Los tubérculos se encuentran maduros y ocurre la senescencia y abscisión de la parte aérea indicando así inicio de la cosecha.

En general el periodo vegetativo de las papas dulces es de 160 a 175 días mientras que en las papas amargas es de 170 a 180 días.

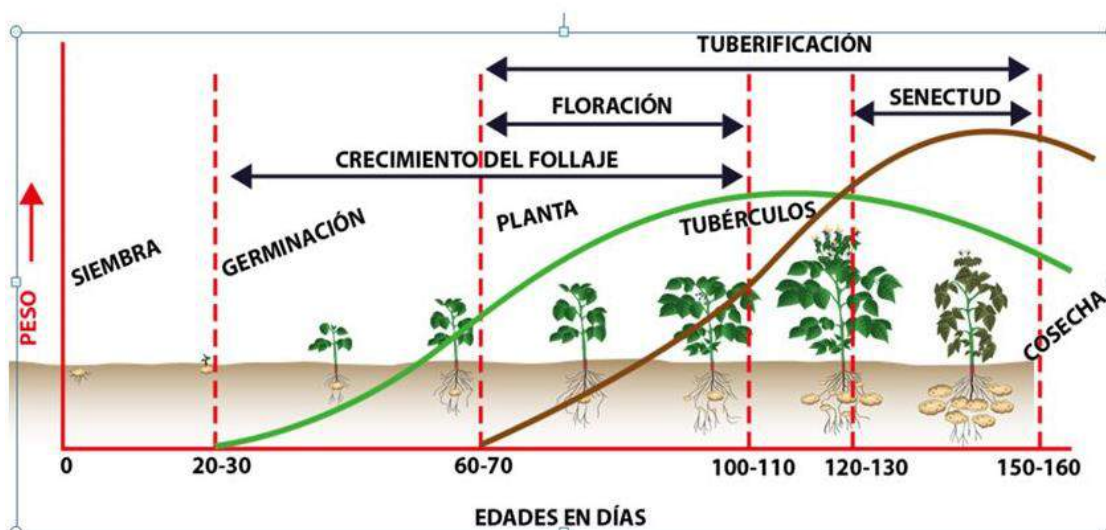


Figura 2. Fenología del cultivo de papa ([www.centa.gob.sv/hortalizas/Guia Papa](http://www.centa.gob.sv/hortalizas/Guia%20Papa))

#### 2.1.10. Descripción de la Variedad de estudio, Waycha Paceña (*Solanum tuberosum* L. ssp. andígena)

De acuerdo con Ugarte (1992) citado por Marino (2010), esta variedad se caracteriza porque tiene un hábito de crecimiento semi-erecto, tallo de color verde con poca pigmentación, color de flor lila con rojo morado, fruto baya globosa de color verde, tubérculo redondo con yemas profundas, la piel es roja con áreas amarillas alrededor de los ojos, madurez tardía de 150-180 días. Presenta un rendimiento medio de 15-25 t/ha.

La papa Waycha es una planta vigorosa, desde 40-120 cm de alto, ramosas, ramas abiertas algo extendidas. Tallos gruesos y carnosos de 8-20 mm de diámetro hacia la base, entrenudos alargados, más o menos rectos. Estolones carnosos o pigmentados; tubérculos variando enormemente de forma color y tamaño. Hojas ampliamente esparcidas, imparipinada, folíolos generalmente verdes o verdes oscuros y opacos por



encima, verdes pálidos por debajo; provistos con pelos pluricelulares mezclados con pelos unicelulares más cortos (Ochoa, 1990 citado por Marino, 2010).

### **2.1.11. Manejo agronómico del cultivo de papa**

De acuerdo con Gómez (2013), las labores culturales durante el ciclo del cultivo de papa es como sigue a continuación:

#### **a) Preparación del terreno**

La preparación de terreno es el proceso de acondicionar el terreno para recibir la semilla, pudiendo ser realizada de forma mecánica o manual, dependiendo del acceso y economía agricultor.

#### **b) Siembra**

La siembra se realiza en surcos enterrando los tubérculos semilla, con una profundidad de 10-15 cm. Para la siembra de papa, se puede incorporar fertilizante o abono orgánico durante la pre-siembra, el procedimiento es abrir el surco incluyendo fertilizante a una profundidad de 20 a 25 cm y seguidamente cubriendo con tierra después de sembrar, es imprescindible que la semilla sembrada halle un ambiente satisfactorio para su desarrollo.

#### **c) Profundidad de siembra**

La profundidad de siembra es importante, la profundidad es dos veces el diámetro de la semilla que varía entre 10 a 15 cm; la profundidad de siembra no tiene incidencia directa con el rendimiento según las investigaciones realizadas. En el cuadro 2, se muestran las condiciones que determinan la profundidad de siembra.

**Cuadro 2. Condiciones que determinan la profundidad**

Variable	Características	Profundidad de siembra	
		Menor (10 cm)	Mayor (15 cm)
Tamaño de la semilla	Semilla pequeña	X	
	Semilla grande		X
Edad de la semilla	Semilla óptima	X	
	Semilla "vieja"		X
Textura del suelo	Suelo arenoso	X	
	Suelo arcilloso		X
Clima	Clima caluroso	X	
	Clima frío		X
Pluviosidad	Localidad lluviosa	X	
	Localidad sin lluvia		X

**Fuente:** Copoulos et al., 2008

#### **d) Densidad de siembra**

La densidad de siembra está fijada por la distancia entre surcos y la distancia entre plantas o golpes, la distancia en promedio es de 0.80 m y entre plantas es de 0.35 m aproximadamente, con una variación de 0.60 a 85 m entre surcos y de 0.30 a 0.40 m entre plantas, logrando densidades que varían entre 35700 y 41600 plantas /ha aproximadamente.

La densidad de siembra es importante la pendiente del terreno donde se sembrará. En pendientes altas la distancia es de 0.9 - 1.0 m entre hileras y de 25 – 20 cm entre plantas con una densidad de 40 000 y 50 000 plantas/ha y empleando para una hectárea una cantidad entre 2 500 y 2 900 kg de semilla.

#### **e) Riego**

El riego está en función de la zona y época de siembra se requieren riegos para adelantar la siembra; es aconsejable efectuar los riegos complementarios antes del aporque y cuidar el manejo adecuado del agua evitando la erosión. La papa es muy susceptible al exceso de humedad (Tapia y Fries 2007 citado por Mamani 2015).

De acuerdo con el CENTA (2002), en época seca el cultivo demanda la aplicación de riegos frecuentes y ligeros, para tratar de mantener el suelo a capacidad de campo,

debido a que los niveles bajos de humedad afectan negativamente el rendimiento, tamaño y calidad de la papa.

Los cambios bruscos en el contenido de humedad en el suelo causan deformaciones en los tubérculos y mayor ataque de larvas de polillas de la papa. Los excesos de humedad favorecen la diseminación de bacterias (*Ralstonia solanacearum*), hongos (*Phytophthora infestans*), recomendándose mantener el agotamiento permisible entre el 30 al 35% del agua útil en el suelo.

La papa es relativamente sensible a los déficit de agua, por lo que ésta no debe agotarse más de un 30 a 35% del total disponible, especialmente durante la formación y crecimiento de los tubérculos. Se recomienda el uso de tensiómetros para determinar el momento que debe regarse; calibrando estos según el tipo de suelo y la localidad. En el cuadro 3, se muestra diferentes métodos de riego con sus ventajas y desventajas.

**Cuadro 3. Métodos de riego, ventajas y desventajas.**

Tipo de riego	Ventajas	Desventajas
Gravedad en surcos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo de operación.</li> <li>• Fácil de emplear</li> <li>• Ayuda a desalinizar el suelo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasto excesivo de agua (pérdidas)</li> <li>• Se usa solo en terrenos de poca pendiente</li> <li>• Puede tener mucha erosión si no hay buena nivelación del suelo</li> </ul>
Aspersión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduce la erosión.</li> <li>• Puede usarse en pendientes moderadas.</li> <li>• No hay que nivelar el suelo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere mucha mano de obra</li> <li>• Incrementa las enfermedades foliares</li> </ul>
Goteo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poco uso de agua (más eficiente)</li> <li>• No hay erosión</li> <li>• Reduce enfermedades foliares</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversión alta</li> <li>• Puede promover la salinidad del suelo si no es empleado adecuadamente</li> </ul>

**Fuente:** CENTA (2002)

## f) Aporque

El aporque es una labor agronómica que consiste en llevar tierra de la base del surco hasta el cuello de la planta.

Los aporques se pueden efectuar de uno a dos; el primero se realiza cuando se inicia la formación de estolones unos 20 días después del primer deshierbe, y otro complementario un mes después, sobre todo si el año es muy lluvioso.

No es bueno retrasar el aporque, puede causar daño mecánico favorecer a las enfermedades o plagas (Copoulos et al., 2008).

#### **g) Control de malezas**

Las malezas son enemigos de los cultivos, dentro de la parcela compiten por la luz, agua y nutrientes, asimismo son hospederas de plagas y enfermedades afectando al cultivo, razón por la cual es necesario desmalezar el campo de cultivo.

El deshierbe se efectúa después de unos 25 a 40 días de la emergencia, para evitar que las malezas compitan por nutrientes y humedad con las plantas, igualmente para dar una mayor aireación a las raíces.

#### **h) Abonos orgánicos.**

Rodríguez (2007) citado por Marino (2010), señala aunque la adición de nutrientes en la incorporación de estiércoles es baja, esta práctica es benéfica para terrenos con bajo contenido de materia orgánica, y cuando se quiere mejorar las condiciones físicas del suelo. Las cantidades requeridas son de 10 t/ha aproximadamente dependiendo del tipo y riqueza del estiércol.

#### **i) Fertilizantes químicos.**

El nitrógeno es un nutriente crítico porque tiene gran efecto sobre el rendimiento y la calidad del tubérculo. El mejor resultado de la aplicación de nitrógeno se logra cuando un 50-60 % se utiliza durante la siembra y el resto al inicio de la tuberización (Hollow Herat Sierra 2005 citado por Patty 2009).

Según Copoulos et al., (2008), la fertilización debe poseer un balance nutricional N: P, K: Ca: Mg que es de mucha importancia, evitando el antagonismo y controlar su desarrollo y su resistencia a factores ambientales o enfermedades.

Las aplicaciones foliares de nutrientes ayudan, pero la verdadera nutrición de una planta se realiza a través del sistema radicular. La papa se fertiliza de forma granulada dos veces, la primera durante la siembra y la segunda durante el aporque.

## j) Enfermedades

En el cuadro 4, se detallan las enfermedades que más se difunden en el altiplano.

**Cuadro 4 Enfermedades del cultivo de papa**

Nombre Común	Nombre Científico	Lugar de Ataque	Causas, síntomas y daños
Tizón Temprano	<i>Alternaria solani</i>	Hongo  Ataca a tallos, hojas y no a tubérculos.	Similar al tizón tardío pero no es tan serio, es un hongo oportunista, se presenta en la mitad del ciclo.  Síntomas: Lesiones redondo quemado en forma de círculo, frecuentemente rodeadas de un halo amarillo.
Tizón Tardío	<i>Phytophthora infestans</i>	Hongo  Ataca a tallos , hojas y no a tubérculos.	Enfermedad más seria en el mundo de papa, puede matar una plantacion en 7-10 días.  Síntomas: Comienza con lesiones circulares o irregulares, luego se agrandan; hay un bello blanco cuando hay humedad es café o negro indistinto, por las hojas o tallos con amarillo alrededor.
Rhizoctonia	<i>Rhizoctonia solani</i>	Hongo	Síntomas: Las lesiones son de color café por el tallo abajo la tierra; estrangulamiento del tallo; este es un hongo del suelo, su daño lo hace del cuello hacia abajo (tubérculos) provoca pérdidas.

**Fuente:** Gómez (2013)

## k) Plagas

Las plagas más importantes del cultivo de papa, según el cuadro 5 son:

**Cuadro 5 Enfermedades del cultivo de papa**

Nombre Común	Nombre Científico	Lugar de Ataque	Causas, síntomas y daños
Gorgojo de los Andes	<i>Premnotrypes spp.</i>	Forma galerías en tubérculos y en las hojas consumen la lámina en forma de media luna.	Puede causar mayores daños y baja la calidad del tubérculo.
Afidos	<i>Myzus persicae</i>  <i>Macrosiphum euphorbiae</i>	A las hojas trasmite virus se manifiesta por entollamiento de las hojas y otros mosaicos.	Sus síntomas son que no tiene la transmisión de virus, es el problema más frecuente en afidos.
Polilla de la papa o Minadores de la Hoja	<i>Phthorimaea operculella</i>	Forma galerías en los tubérculos, perforan la lamina de hoja y hacen envolturas pegando	Puede ser muy dañoso.  El frio no favorece a las polillas.  Se puede controlar con insecticidas de tipo sistémico.

**Fuente :** Gómez (2013)

## l) Defoliación

Mediante la defoliación o corte de follaje se puede controlar el tamaño del tubérculo y además se puede realizar un muestreo al azar para cosechar el momento adecuado; la defoliación se debe realizar con mucho cuidado para evitar

la transmisión de enfermedades fungosas ( *Phytophthora infestans*) y bacterias (*Erwinia sp.*). En los países de España, EE.UU., Canadá e Irlanda utilizan azadones

rotativos en forma comercial, para qué subericen se debe esperar de 10 a 15 días antes de cosechar.

La defoliación se procede cuando la planta ha alcanzado su madurez fisiológica, que consiste en cortar el follaje de la planta de forma manual, mecánica o utilizando herbicidas químicos.

Copoulos et al., (2008), indican que la defoliación tiene como fin, obtener piel sin desprendimiento del tubérculo con buena consistencia para la cosecha, este proceso es conocido como “tuberización”, la planta debe persistir defoliada de 15 a 21 días aproximadamente, dependiendo de la variedad y clima ( en seco fija más rápido que en húmedo); en este proceso los tubérculos aumentan de peso en un 10% por la translocación final de los nutrientes y se fija la cáscara.

#### **m) Cosecha**

Para la cosecha, antes se debe realizar muestreos de tuberización para ver si ha completado la madurez del tubérculo, frecuentemente se hace de forma manual; una vez realizada la cosecha, se deja un corto tiempo en el suelo para que seque, no dejar expuesta por mucho tiempo al sol, ya que pierde su valor comercial

#### **n) Clasificación**

Según SAG (s.a.) citado por Gomez (2013), la papa se clasifica según el calibre o diámetro ecuatorial de los tubérculos en: a) tubérculos de bajo calibre cuando miden < a 28 mm, tubérculos semilla entre 28 y 65 mm, y tubérculos de consumo cuando el diámetro es > 65 mm.

#### **2.1.12. El cultivo de papa y el cambio climático**

De acuerdo con Quiroga (2008), los impactos del cambio climático para el cultivo de papa se pueden mencionar como las escasas precipitaciones y bajas temperaturas. Los bajos rendimientos de producción en los países de México, Perú, Chile. La

disminución de la calidad y cantidad de papa va afectando tanto a las familias campesinas como las urbanas en Centro América.

En un periodo inicial, las variedades introducidas que logran un nivel de adaptación en las condiciones climáticas del altiplano, medianamente responden a las buenas costumbres y realidad socio cultural del altiplano, son difundidas por cuanto proyecto de desarrollo rural actúa en ella.

Para las variedades de papas dulces, como la imilla blanca, Waycha, sani imilla, colombianas, holandesas, etc., existen varias razones que afectan los rendimientos, pero la más básica se atribuye a las condiciones de clima menos drásticas y razones de mercado.

El Centro Regional Ayllu Majasa Mujlli y AGRUCO (2001), realizaron estrategias campesinas en la comunidad de Tapacari del Departamento de Cochabamba, en donde citan en su publicación, los problemas climáticos para el cultivo de papa de la región, son las siguientes:

**a. Helada**

Se presenta cuando las plantitas están empezando a crecer o en otro momento del desarrollo del cultivo, cuando hay buena humedad las plantas se recuperan.

**b. Granizada**

Se pueden presentar en el periodo de floración y también cerca de la madurez de la papa.

**c. Sequía**

Sucede en cualquier época de desarrollo de las plantas; a veces después de la siembra, en la brotación, entonces las plantas no crecen y aparecen algunas plagas.



#### **d. Nevada,**

Se presenta cerca de la cosecha, más o menos después de carnaval son perjudiciales para todos los cultivos; en el caso de la papa ayudan a que aparezcan más verrugas. Pero si se presentan entre julio y agosto son Buenos.

### **2.2. Importancia del agua en la agricultura**

Según la FAO (2008), en el siglo XXI la explotación del agua dulce duplicó con creces la tasa del crecimiento demográfico. Actualmente se extraen alrededor de 3839 km<sup>3</sup> de agua para consumo humano, de lo cual el sector agrícola se lleva la parte del león: un 70 %. Pero la sed de la agricultura no es sostenible a largo plazo. Ante la intensa competencia de los usuarios urbanos e industriales, y la realidad cada vez más evidente de que el consumo humano de agua está poniendo en peligro la eficacia de los ecosistemas de la tierra, el sector debe incrementar considerablemente el volumen de producción por unidad de agua utilizada.

El agua constituye un factor de producción esencial en la agricultura para los cultivos. El cambio climático tendrá un impacto significativo en la agricultura, en lo relativo a la cantidad y a la calidad del agua. Ello se pondrá de relevancia a través del aumento de la demanda mundial de alimentos, conforme aumenta la población y la renta real.

Las soluciones que permitan una mayor producción, empleando para ello menos agua, son una prioridad clave de cara al futuro. El acceso a un suministro de agua adecuado resulta esencial, si deseamos que la agricultura siga proporcionando beneficios sociales, medioambientales y económicos (Chungara, 2010).

### **2.3. Necesidades de agua para el cultivo**

Según Renaul (2003), la necesidad de agua de un cultivo se conoce como “evapotranspiración”, donde se suman la transpiración y la evaporación. Esta necesidad de agua se suele expresar en mm/día, mm/mes o mm/temporada.

Para los cultivos, el agua utilizada y la pérdida por evapotranspiración es esencial para lograr buenos cultivos de calidad. Este caudal de agua permite que el cultivo:

- Utilice la luz del sol para producir materia estructural a través de la fotosíntesis.
- Obtenga nutrientes importantes de la tierra
- Controle la temperatura de sus superficies

#### **2.4. Necesidades hídricas de la papa**

Para obtener altos rendimientos las necesidades de agua del cultivo, para una variedad de 120-150 días, son de 500-700 mm dependiendo del clima, la relación entre la evapotranspiración de referencia se da mediante el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) que es el siguiente: Durante la etapa inicial 0,4 - 0,5 durante los 20 - 30 días, en la etapa de desarrollo de 0,7 - 0,8 en los 30 - 40 días, en la etapa de la mitad de desarrollo de 1,0 - 1,2 de los 30 - 60 días, en la etapa final de desarrollo de 0,85 - 0,95 de 20 - 35 días y en la maduración 0,7 - 0,75 Doorenbos y Kassam (1979) citado por Patty (2009).

De acuerdo con Sánchez (2003) citado por Mamani (2015), el cultivo de papa requiere de 500 a 700 mm de agua durante su periodo vegetativo. La evapotranspiración (uso consuntivo), oscila desde los 400 a 800 mm. El uso diario varía desde los 0,2 mm/día durante etapas iniciales hasta 5 mm/día en etapas de máximo follaje, luego baja hasta 3 mm/día en los días antes de la maduración completa. La papa es relativamente sensible al déficit de agua, por lo que no debe agotarse más de un 30 a 35% del total de agua disponible, especialmente durante la formación y crecimiento de los tubérculos (Vásquez, citado por Pacheco y Pérez 2010).

Las variedades modernas de papa son sensibles a la falta de agua en el suelo y necesitan una irrigación frecuente y superficial. Un cultivo de papas de 120 a 150 días consume de 500 a 700 mm de agua, y la producción se reduce si se agota más del 50 % del total del agua disponible en el suelo durante el período de crecimiento. En general, la falta de agua durante la parte media y final del período de crecimiento, es decir, durante la estolonización y el inicio de la formación de los tubérculos y el

crecimiento de los mismos, tiende a reducir la producción, mientras que el cultivo sufre menos la falta de agua al inicio del crecimiento vegetativo (FAO, 2008).

## **2.5. Efecto de la deficiencia de agua sobre las plantas**

Los procesos de fotosíntesis y absorción de nutrientes son elementos en la fisiología de cualquier cultivo y estos procesos se realizan única y exclusivamente con agua; del 100 % de agua requerida, 98 % es usado en el proceso de transpiración y solo el 2 % es empleado en procesos metabólicos. El disponer de un buen abastecimiento de agua en los diversos estados de crecimientos es fundamental para lograr un buen rendimiento (Villafuerte, 2008 citado por Choque, 2015).

De acuerdo con Serrano (1979) citado por Villca (2013), el estrés hídrico puede afectar un amplio rango de procesos en la planta, debido a que el agua interviene entre otras funciones, en la expansión y crecimiento celular, la apertura estomática y la fotosíntesis. La expansión celular es el proceso que se afecta al presentarse un déficit hídrico, esto debido a la sensibilidad y pérdida de turgencia que causa el cambio del potencial de presión en la célula, manifestándose como una reducción del crecimiento del follaje. Por otro lado, se reduce la transpiración, hecho que produce un aumento de la temperatura del follaje por efecto termorregulador del agua, causando un alza en la respiración de la planta.

La tensión hídrica o déficit hídrico en las plantas, indica situaciones en que las células y tejidos no están plenamente turgentes. La tensión hídrica puede variar desde un pequeño descenso del potencial hídrico, Pasando por el marchitamiento transitorio a medio día, hasta el marchitamiento permanente y la muerte por desecación Kramer (1983) citado por Mamani (2015).

En términos más sencillos, el déficit hídrico o tensión hídrica se produce siempre que la pérdida por transpiración es mayor que el coeficiente de absorción. Lo caracteriza una reducción del contenido hídrico total, acompañados por la pérdida de turgencia, el cierre de los estomas y la reducción del crecimiento.

## **2.6. Efecto del estrés por sequía en el cultivo de papa**

De acuerdo con Mattos, (1997) citado por Quiroga (2008), el agua es un componente necesario para los procesos enzimáticos. Permite la disolución y translocación de sustancia las metabolizadas. Es el sustrato que permite la generación del O<sub>2</sub> durante la fotosíntesis.

Los diferentes órganos vegetales varían en el contenido de agua, en general las hortalizas contienen más agua, los tubérculos de las plantas tuberosas, en menor contenido de agua lo tienen los granos de las gramíneas. Por ejemplo los tubérculos de papa, oca, papaliza e izaño tienen entre 75 a 80% de contenido de agua.

Varas (1995) citado por Patty 2009), menciona que la falta de agua es el estrés más común a que se somete el cultivo, la disminución del contenido de humedad en el suelo restringe la transpiración y la fotosíntesis, lo que indirectamente reduce la evapotranspiración del cultivo, lo que se traduce finalmente en un aumento de la temperatura tanto del follaje como del suelo. La temperatura alta es desfavorable para la formación inicial de los tubérculos, además de contribuir a algunos defectos fisiológicos en el tubérculo.

En contraste, el mismo autor indica que por otro lado el exceso de humedad del suelo, que puede ser causado por lluvias intensas en el periodo de desarrollo del cultivo, lo que suele ocurrir en algunos años, riegos problemas de drenaje del suelo, altera la atmósfera de este limitando el abastecimiento de oxígeno para las raíces (problemas de respiración radicular) y facilita el ataque de hongos del suelo; los tubérculos semilla son especialmente sensibles al exceso de humedad y si esta situación se produce con los tubérculos ya formados estos son susceptibles a pudriciones.

Así mismo, una excesiva variación de la humedad del suelo puede afectar la calidad de la cosecha, ya que un riego luego de un periodo prolongado de sequía después que se han formado los tubérculos puede provocar un segundo crecimiento de estos, que suele ocurrir a expensas de las reservas acumuladas en los tubérculos ya

formados, lo que además de reducir su peso provocan deformaciones que reducen su valor comercial.

La papa es un cultivo sensible tanto en términos de rendimiento como de calidad a condiciones de suministro limitado de agua, el suelo debe mantenerse con un contenido de humedad relativamente alto. Los riegos deben efectuarse cuando se ha agotado el 25 % de la humedad aprovechable. El 70 % de la absorción total del agua se extrae de los primeros 30 cm de suelo y la totalidad del agua requerida entre los 40 y 60 cm.

Martínez y Huamán (1987) citado por Patty 2009), mencionan que en cuanto a la disponibilidad de agua, las plantas de papa, responden de la misma manera que otras plantas mesófitas, disminuyendo su crecimiento y rendimiento a medida que el estrés hídrico se incrementa. Los déficits hídricos en el suelo se traducen en déficits hídricos en la planta. Debido a la menor disponibilidad de agua en el suelo las plantas no pueden compensar el agua perdida por transpiración.

El déficit hídrico en la planta produce cierre de estomas, disminución del potencial de agua de hojas y disminución en la tasa fotosintética debido a la mayor resistencia estomática para el ingreso del CO<sub>2</sub>. Y que bajo estrés hídrico, algunos clones de papa podrían resistir a la sequía, mediante un ajuste osmótico incrementando su contenido de prolina en las hojas. La prolina actuando como osmoregulador, impediría que las hojas pierdan su turgencia a pesar de la disminución del potencial de agua de las mismas.

## **2.7. Características físicas del suelo respecto al riego**

### **2.7.1. Profundidad efectiva**

La profundidad y la distribución del sistema radicular del cultivo es de gran importancia para determinar la lámina de riego a aplicar de manera que al humedecer el suelo hasta profundidades inferiores trae problemas de déficit hídrico en la planta y al hacerlo hasta profundidades mayores constituyen un gasto innecesario de agua, Alvares (1985).

De acuerdo con la UNA (2005), la profundidad del suelo se refiere al espesor del material edáfico favorable para la penetración de las raíces de las plantas. La profundidad efectiva se refiere al espesor del suelo de la superficie hasta donde se desarrolla el sistema radicular de los cultivos.

Las profundidades de las raíces pueden estar limitadas por barreras físicas y químicas así como por niveles freáticos elevados. La profundidad del suelo puede medirse directamente en el perfil o a través de baremaciones.

**Cuadro 6 Clasificación de la profundidad del suelo para uso agrícola**

<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Clasificación</i>
<i>&gt;90</i>	<i>Optimo</i>
<i>60 a 90</i>	<i>Bueno</i>
<i>40 a 60</i>	<i>Moderado</i>
<i>30 a 40</i>	<i>Regular</i>
<i>&lt;30</i>	<i>Marginal</i>

*Fuente: UNA (2005)*

### **2.7.2. Textura**

Ortiz (1984), menciona que la textura se refiere a la proporción relativa de arena limo y arcilla en el suelo, define la cantidad de agua que puede almacenar un suelo, movimiento de agua al suelo, facilidad de abastecimiento de nutrientes, agua y de aire.

### **2.7.3. Estructura**

La estructura del suelo se define como: el tamaño, la forma y el arreglo de las partículas primarias que forman las partículas compuestas, y el tamaño, forma y arreglo de las partículas compuesta. Lo que se considera como buena estructura depende de la velocidad con que el aire y el agua se mueva a través del suelo. La capacidad estructural del suelo se define como su capacidad para formar terrones espontáneamente y que estos terrones se dividen en pedazos pequeños, queños granos, o agregados, sin la intervención del hombre (UNA 2005).

Los suelos con buena estructura presentan una mayor capacidad de retención del agua disponible, sobre todo en los valores de tensión más próxima a la capacidad de campo. En los valores más próximos al punto de marchitamiento, los suelos apelmazados

pueden contener mayor cantidad de agua disponible, debido a que la compactación provoca el cambio de tamaño de muchos poros, que pasan de macroporos a microporos (Fuentes 1998, citado por Patty 2009).

## **2.8. Efecto del déficit hídrico en distintas fases de desarrollo de la papa**

El déficit de humedad en el periodo de estolonización e iniciación de la formación de tubérculos como el periodo de crecimiento de estos son los que afectan en mayor proporción los rendimientos del cultivo. Los déficit de humedad durante los periodos de desarrollo e inicio de la tuberización hasta el periodo de cosecha, son los que provocan mayores disminuciones de los rendimientos. Varas (1995) citado por Patty (2009).

De acuerdo con Ekanayake (1994), el perjuicio que causa la sequía en la papa se ha descrito como consecuencia de: 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 período vegetativo o senectud precoz (bajo índice de área foliar).

Además el estrés por sequía en cualquier etapa de crecimiento puede reducir el rendimiento de tubérculos de papa. La emergencia, la iniciación y el desarrollo de tubérculos son las etapas de mayor vulnerabilidad. La disminución en el rendimiento se debe al escaso número de tubérculos bien logrados y la mala distribución de su tamaño.

Méndez e Inostroza (2009) citado por Mamani (2015), señalan que el cultivo de papa es sensible al déficit hídrico (períodos críticos) entre inicio de la estolonización y formación de tubérculos, a desarrollo de la cosecha; mientras que los períodos menos sensibles corresponden a aquéllos de maduración y a su fase inicial.

La sequía también afecta la calidad de los tubérculos, pues produce grietas durante el crecimiento, tubérculos alargados o ahusados, debido a la maduración alternada con recrecimiento de la cobertura foliar y a la expansión celular cíclica de los

tubérculos. Asimismo, una sequía transitoria causa mayor número de tubérculos deformes que una sequía continuada Ekanayake (1994).

## **2.9. El riego**

Conforme con Vergara (2001) citado por Patty (2009), el riego es la aplicación artificial de agua al suelo con el fin de suplir las necesidades de humedad necesaria para el desarrollo normal de las plantas. Ósea regar es proveer agua al suelo cuando esta es insuficiente, es decir el riego complementa parcial o totalmente la lluvia u otras formas de aporte natural de este recurso.

Señala además que el riego es el regulador más seguro en la producción, permite al agricultor evitar la alternancia de años de superabundancia en los que los precios caen y de otros de escasez que disminuyen sus ingresos. Así mismo la posibilidad de regar facilita la rotación de cultivos, escalonamiento de la producción, incremento en los rendimientos y dependiendo del tipo de riego disminuye los costos de producción.

Por su parte Chipana (2003), indica que el riego es una tentativa del hombre de alterar el ciclo hidrológico a nivel local y promover el incremento de la producción agrícola. En otras palabras el riego es el suministro oportuno de la cantidad de agua a los cultivos de tal manera que estos no sufran disminución en sus rendimientos y sin causar daño al medio ambiente.

### **2.9.1. Programación del riego**

La programación de riego es una metodología, que según Serrano (2010), tiene la finalidad de optimizar la producción de manera eficiente, considerando la oferta y demanda de agua, para determinar: cuándo regar y la cantidad de agua, para ello se toma en cuenta las necesidades de agua por parte de los cultivos y las características del suelo (capacidad para retener agua). Por otro lado para determinar el tiempo que se debe regar en cada riego debemos conocer la velocidad de infiltración de agua en el suelo.



Los métodos de programación según García (2008) citado por Padilla (2014), se basan en la combinación de parámetros de: el clima circundante, la planta y suelo, para una correcta programación del riego.

## **2.9.2. Métodos de cálculo del requerimiento hídrico de la papa**

### **2.9.2.1. Método en base a parámetros climáticos**

Conforme con Nortes (2008) citado por Padilla (2014), estos métodos estiman la necesidad hídrica de los cultivos en base al cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y el coeficiente del cultivo (K<sub>c</sub>).

El método de FAO Penman – Monteith se recomienda como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia, dicho método requiere de datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento (Allen et. al., 2006).

### **2.9.2.2. Método en base a la humedad del suelo**

Según Tarjuelo (2005) citado por Patty (2009), estos métodos se basan únicamente en el conocimiento del estado hídrico del suelo, es decir, los que se apoyan en el conocimiento del potencial hídrico (tensiómetros, resistencias), y en el contenido de agua mediante sonda de neutrones, muestreos gravimétricos o mediciones de la constante dieléctrica (TDR, FDR).

Cadahia (2005), citado por Padilla (2014), nos dice que la humedad del suelo puede determinarse empleando métodos directos e indirectos, los métodos indirectos son el uso de tensiómetros, bloques de yeso y sonda de neutrones, TDR (Reflectometría en el dominio del tiempo) y FDR (Reflectometría en el dominio de las frecuencias), entre los métodos directos tenemos los gravimétricos.

Para calibrar los métodos indirectos Villalobos (2009) citado por Padilla (2014), nos dice que se utiliza el método gravimétrico para cotejar y luego calibrar. Este método consiste en sacar muestras del suelo para pesarlas y secarlas en una mufla a 105 – 110 °C por 24 horas y posteriormente volverlas a pesar.

Santa Olalla Mañas y Valero (1993) citado por Patty (2009), mencionan que estos métodos proporcionan una información puntual sobre los niveles de agua en el suelo, a partir de la cual y si se han determinado previamente los niveles de agotamiento permisibles es posible programar el riego.

### **2.9.2.3. Método basado en el estado hídrico del cultivo**

Estos métodos están basados en el conocimiento del estado hídrico del cultivo, ya que este refleja el balance entre factores de oferta (profundidad y densidad radicular, contenido de agua en el suelo) y demanda de agua por las condiciones atmosféricas. Entre estos métodos, se incluyen los que miden el potencial hídrico de la hoja (con la bomba de presión), los que miden la temperatura de la cubierta vegetal (con sensores de radiación infrarroja), el empleo de sistemas visuales de estrés hídrico (color de las hojas, enrollamiento foliar, cambio de orientación de las hojas, etc.). Los que miden la resistencia estomática, etc. Tarjuelo (2005) citado por Patty (2009).

### **2.9.2.4. Método de balance de agua en el suelo**

Este método según Villalobos et. al. (2009) citado por Padilla (2014), se calcula mediante las variaciones de entradas y salidas de agua en el suelo. Por otra parte los componentes del balance hídrico son muy variados; Tarjuelo (1999) y Cadahia (2005) citado por Padilla (2014), aluden que las necesidades de riego se obtengan mediante la expresión que se muestra a continuación.

$$\mathbf{Nn = ETc - Pe - Ac - Pp \pm \Delta H} \quad (1)$$

#### **Dónde:**

Nn: Es la necesidad neta de riego (mm).

ETc: Es el agua evapotranspirada por el cultivo (mm).

Pe: Es la precipitación efectiva (mm).

Ac: Agua que penetra en el volumen radicular por ascenso capilar (mm).

Pp: Son las pérdidas por percolación profunda de la zona radicular (mm).

$\Delta H$ : Es la variación del contenido de humedad del suelo (mm).

Según Serrano (2010), en cuestiones de diseño y planificación, se desprecia los aportes por ascenso capilar (Ac), como del almacenamiento del agua eventual en el suelo por variación de humedad ( $\Delta H$ ), de la misma manera de la percolación profunda (Pp), en razón que se desea conocer la necesidad de riego para periodos largos; al respecto Chipana (2003) menciona, cuando la napa freática se encuentra a profundidades mayores de 1,5 m de la superficie del suelo, por consiguiente los aportes por ascensión capilar son despreciables y asumiendo que las pérdidas por percolación son iguales a cero, quedando la ecuación dos como:

$$Nn = ETc - Pe \quad (2)$$

**Donde:**

Nn : Necesidad neta de riego (mm).

ETc : Evapotranspiración del cultivo (mm).

Pe : Precipitación efectiva (mm).

#### **2.9.2.5. Precipitación efectiva (Pe)**

De acuerdo con Chipana (2003), del total de precipitación pluvial que ocurre en un determinado período de tiempo, solo una parte es aprovechada por la planta, mientras que el restante se pierde por escorrentía superficial, percolación profunda y por evaporación desde el suelo o follaje de las plantas; por tanto, la precipitación efectiva es aquella parte de la lluvia que tras llegar al suelo se almacena en la capa radicular.

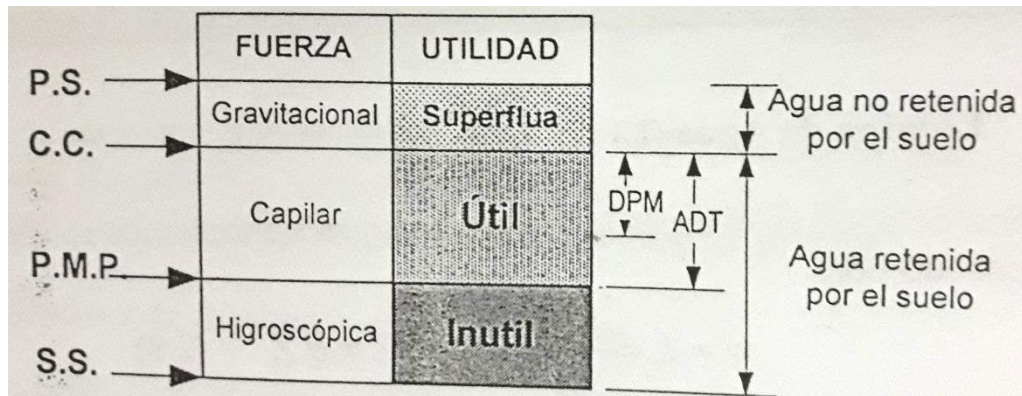
La magnitud de la precipitación efectiva dependerá de las características de:

- Terreno, Condiciones físicas de humedad, pendiente, cobertura y otros.
- Precipitación, Altura de agua caída, intensidad duración y frecuencia.

#### **2.10. Contenido de agua en el suelo**

Serrano (2010), menciona que es importante conocer la capacidad que tiene un suelo para almacenar agua, a efectos de reponer la cantidad para la evapotranspiración. Señala además que la cantidad de agua retenida en el suelo varía constantemente,

pudiendo ser para las plantas: agua superflua (por demás); agua útil (aprovechable); agua inútil (no aprovechable), ubicándose entre las cuatro constantes hídricas como se muestra en la figura 3.



**Figura 3. Las cuatro fases de agua o constantes hídricas en el suelo (Serrano, 2010).**

### 2.10.1. Punto de saturación (P.S.)

Según Serrano (2010), es una relación del peso de agua que existe entre el peso de agua que lo contiene. Se dice que el suelo está saturado cuando todos los poros del suelo están ocupados por el agua después de un riego abundante o una precipitación copiosa. El punto de saturación nos determina el agua que está en exceso.

### 2.10.2. Capacidad de campo (C.C.)

Conforme con Tarjuelo (1999), Fuentes (1999) y Cadahía (2005), citado por Padilla (2014), el concepto de capacidad de campo, es cuando el suelo está completamente humedecido o saturado, al cual, se deja drenar libremente durante dos o tres días, con la finalidad de eliminar por acción de la gravedad, el sobrante de agua, se dice entonces que el suelo se encuentra a la capacidad de campo.

Serrano (2010), menciona que para ser más precisos se suele recurrir a porcentajes de agua a un potencial determinado, tales como -0,33 y -0,10 bares para suelos pesados y livianos respectivamente.

### **2.10.2.1. Agua Disponible Total (ADT)**

La capacidad de almacenamiento de agua aprovechable o agua disponible total (ADT) de los suelos, estará determinado por la diferencia entre el contenido de humedad a CC y PMP (obtenido en laboratorio), que para ser expresado en lámina de agua dependerá de la profundidad efectiva del sistema radicular del cultivo (Pr) (Serrano, 2010).

De acuerdo con Fuentes (1999) citado por padilla (2014), el agua disponible, es el agua que puede ser absorbida por las plantas; esta misma corresponde a la porción comprendida entre la CC y el PMP.

Allen et al. (2006), mencionan que la disponibilidad de agua en el suelo se refiere a la capacidad de un suelo de retener el agua disponible para las plantas. Después de una lluvia importante o riego, el suelo comenzara a drenar agua hasta alcanzar la capacidad de campo. La capacidad de campo representa la cantidad de agua que un suelo bien drenado retiene en contra de las fuerzas gravitatorias, ósea la cantidad de agua remanente en el suelo cuando el drenaje descendente ha disminuido significativamente

### **2.10.2.2. Agua Fácilmente Aprovechable (AFA)**

Serrano (2010), menciona que el (AFA) o déficit permitido de manejo (DPM) es el grado de depleción de humedad del suelo que se debe permitir antes de cada riego, depende principalmente del tipo de cultivo y se lo puede calcular mediante la siguiente relación:

$$AFA = ADT * f \quad (3)$$

**Donde:**

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

F = Grado de absorción de agua de los cultivos, generalmente asume valores entre 0,4 (para cultivos sensibles al déficit hídrico) y 0,7 (para cultivos resistentes).

Tarjuelo (2005) mencionado por Patty (2009), menciona que la dificultad de la planta para aprovechar el agua disponible aumenta a medida que su contenido se aproxima al punto de marchitamiento permanente por lo que desde el punto de vista del manejo del agua con el riego, únicamente se dejará agotar una parte del intervalo de humedad disponible o reserva útil (generalmente entre el 30 % y 70 %) antes de volver a regar.

### **2.10.3. Punto de marchitez permanente (P.M.P.)**

Según Pizarro (1987) citado por Padilla (2014), el punto de marchitez permanente se caracteriza por que el contenido de humedad del suelo no está disponible para las plantas; a medida que va quedando menos agua, esta es retenida por el suelo con más fuerza, hasta que llega un momento en que la succión de las plantas no pueden vencer la fuerza de retención del agua, y las plantas se marchitan irreversiblemente, ahí es cuando se dice que ha alcanzado el punto de marchitez permanente. Este estado corresponde a un potencia mátrico comprendido entre -10 y -20 bares, con un valor medio aproximado de -15 bares.

### **2.10.4. Suelo seco (S.S.)**

A partir del punto de marchitamiento el suelo pierde agua por evaporación cuando se deja secar al aire; pero todavía queda cierta cantidad de agua que solamente se puede sacar sometiéndolo al suelo a un secado de varias horas en una estufa.

## **2.11. Riego Deficitario Controlado (RDC)**

El riego deficitario controlado (RDC), déficit hídrico regulado o riego deficitario planificado se basa en reducir los aportes hídricos sólo en determinados momentos del ciclo de cultivo, en los que dicha reducción no afecta sensiblemente a la producción ni a la calidad de la cosecha, y cubrir plenamente la demanda de la planta durante el resto del ciclo de cultivo, en particular durante los denominados “periodos críticos”, o estados fenológicos de mayor sensibilidad al déficit hídrico (Kirda *et al.*, citado por Huanca, 2008).

El Riego Deficitario Controlado de acuerdo con Cadahía (2005) citado por Padilla (2014), hace referencia el término “deficitario” que significa la aplicación de menores o mínimas cantidades totales de agua que teóricamente podría utilizar la planta, y el término “controlado” significa que las reducciones de agua se realizan teniendo en cuenta los periodos fenológicos del cultivo al estrés hídrico, aplicando el recorte en las épocas de menor sensibilidad al déficit.

Según la (FAO, 2002) el riego deficitario controlado (RDC), consiste en reducir la cantidad de agua aplicada por debajo del máximo utilizado por el cultivo, permitiendo un estrés moderado con mínimo impacto en los rendimientos.

Renaul (2003), indica que uno de los métodos usados en el campo para aumentar la productividad del agua es el riego deficitario en el cual se aplica deliberadamente menos agua que la necesaria para satisfacer totalmente la demanda de agua de los cultivos. El riego deficitario debería resultar en una pequeña reducción del rendimiento que es menor que la respectiva reducción de transpiración, esto causa por lo tanto, una ganancia de la productividad de agua por unidad de agua transpirada. Además, podría reducir los costos de producción si fuera posible eliminar uno o más riegos.

Para que el riego deficitario tenga éxito los agricultores necesitan conocer el déficit que se puede permitir en cada una de las etapas de crecimiento, el nivel de estrés de agua que existe en la zona radical y sobre todo tener un buen control del tiempo y cantidad de aplicación.

## **2.12. Riego suplementario**

Oweis y Hachum (2005), mencionan que el riego suplementario es la aplicación de riego cuando la lluvia no es suficiente para los requerimientos de la planta. La cantidad adicional aplicada por si solo, es insuficiente para la sobrevivencia del cultivo. Con relación a este concepto de acuerdo con Padilla (2014), el riego deficitario controlado es conocido también como irrigación suplementaria incompleta o como riego deficitario regulado.

## **2.13. Calidad de agua para riego**

Para completar lo que es el riego en términos cuantitativos es necesario tomar en cuenta su calidad. Es así que según Guevara (1996) citado por Padilla (2014), la calidad de agua es un factor de suma importancia, el uso que se le dé a este dependerá mucho de la condición y calidad en que se encuentre este recurso. La calidad de agua en definición está dada por los elementos que contenga bien sea en solución, en suspensión o en estado coloidal, los cuales le confieren características particulares que hacen que se diferencien un tipo de agua de otro.

La calidad de agua para irrigación, está determinado por la cantidad y por el tipo de sales que la constituyen, la presencia de sales en el agua de riego llega a alterar y modificar el desarrollo de la estructura del suelo, afectando también la disponibilidad de agua para el cultivo.

Para el empleo del agua para irrigación es necesario conocer sus características; generalmente se toman las características químicas, pero actualmente es relevante considerar sus características físicas y biológicas, cuando estas son empleadas en sistemas de riego por aspersión, por goteo o microaspersión así como también a la tolerancia de los cultivos a las sales, Pérez (2011) citado por Padilla (2014).

Las principales características que determinan la calidad del agua para irrigación son: Concentración de sales solubles, Concentración relativa de sodio, Contenidos de bicarbonatos y Elementos tóxicos.

### **2.13.1. Concentración de sales solubles**

La salinidad es una medida de la cantidad de sales disueltas en el agua de riego; para su evaluación según Velarde (2008) citado por Pérez (2011), son mediante los índices de conductividad eléctrica (CE), total de sales disueltas (TSD), salinidad efectiva y salinidad potencial.



### 2.13.1.1. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica se determina con un conductímetro, registrando la presencia de sólidos disueltos, mientras mayores contenidos de sólidos disueltos, más elevados es la CE.

Chilon (1996), Valverde (1998) y Vásquez et al. (2000) citado por Padilla (2014), describen la clasificación del agua para riego según su contenido de salinidad por clases.

**Clase C1:** Agua de baja contenido de salinidad. Se pueden utilizar para riego en la mayoría de los cultivos sin problemas y en cualquier tipo de suelo; si se requiere lavado de sales la misma agua de riego bastaría sin necesidad de agua adicional. La CE es menor a 750 micromhos/cm.

**Clase C2:** Agua con moderada salinidad, que pueden utilizarse siempre y cuando haya cierto grado de lavado. Las plantas moderadamente tolerantes a las sales pueden producir adecuadamente en casi todos los casos y sin necesidad de prácticas de control de salinidad.

**Clase C3:** Agua altamente salinas, que pueden utilizarse en el riego de cultivo tolerantes a las sales y en suelos con adecuado drenaje y en muchos casos se complementa con el empleo de prácticas de control de salinidad.

**Clase C4:** Agua altamente salinas, que pueden utilizarse para el riego bajo condiciones especiales: suelos permeables y de drenaje adecuado, aplicándose agua en exceso para mantener un equilibrio de sales en el perfil del suelo, bajo condiciones normales, no es apropiada para el riego. Los cultivos a usarse con este tipo de agua son altamente tolerantes a las sales.

Valverde (1998) citado por Padilla (2014), describe dos clases adicionales, las clases cinco y seis como se muestra a continuación.

**Clase C5:** Agua con salinidad muy elevada. La CE varía entre 4.000,0 a 6.000,0 micromhos/cm. No aptas para agricultura.

**Clase C6:** Agua con salinidad excesiva, con CE mayor a 6.000,0 micromhos/cm

**Cuadro 7 Clasificación de calidad del agua para riego según su CE.**

<b>Clasificación</b>	<b>CE en <math>\mu\text{S}/\text{cm}</math></b>	<b>Concentración de sal en g/L</b>
<i>C1. Baja salinidad</i>	<i>0 – 250</i>	<i>&lt; 0,2</i>
<i>C2. Salinidad media</i>	<i>250 – 750</i>	<i>0,2 – 0,5</i>
<i>C3. Altamente salina</i>	<i>750 – 2250</i>	<i>0,5 – 1,5</i>
<i>C4. Muy altamente salina</i>	<i>2250 - 5000</i>	<i>1,5 – 3,0</i>

**Fuente:** Pizarro, mencionado por Padilla (2014).

### 2.13.2. Concentración relativa de sodio

La acumulación de sodio en el suelo tiene dos efectos principales; si es absorbido como ión, al acumularse es tóxico para las plantas y si es absorbido por las arcillas sustituye al calcio y magnesio, provocando cambios en la estructura que afectan la permeabilidad del suelo (Valverde, 1998 citado por Padilla 2014).

#### 2.13.2.1. Relación de absorción de sodio

La relación de absorción de sodio se divide en las siguientes clases.

**Clase S1:** Agua baja en sodio, que puede utilizarse para el riego de la mayoría de los cultivos y en la mayoría de los suelos, con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable.

**Clase S2:** Agua media en sodio, que puede utilizarse en suelo de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad. En suelos con textura fina el sodio representa un peligro considerable, más aún, si dichos suelos poseen una baja capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, salvo que el suelo contenga yeso.

**Clase S3:** Agua alta en sodio, que normalmente puede producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos, por lo que estos requerirán prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica. Los

con abundante cantidad de yeso, pueden en muchos casos, no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiable cuando son regados con esta clase de agua. En otros casos, para sustituir al sodio intercambiable se utiliza mejoradores químicos que muchas veces no resultan económicos si se usa agua de alto contenido de sales.

**Clase S4:** Agua muy alta en sodio, inadecuada para el riego, salvo que su CE sea baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y/o la aplicación de yeso u otros mejoradores químicos no conviertan su utilización en antieconómica.

### 2.13.3. Toxicidad

La toxicidad se presenta cuando una sustancia o materia presenta el potencial de causar de modo significativo el aumento de la mortalidad y el incremento de enfermedades. Serrano (2010) citado por Padilla (2014), manifiesta que los problemas de toxicidad están referidos a los componentes (iones) en el suelo o agua de riego, estas mismas pueden ser acumuladas por las plantas.

**Cuadro 8 Valores normales de análisis de agua para riego**

<b>Clasificación</b>	<b>Valores normales aceptables</b>
<b>Salinidad</b>	
Conductividad eléctrica (CE)	0 – 3 dS/m
Total de sólidos disueltos (TSD)	0 – 2000 mg/L
Calcio (Ca <sup>++</sup> )	0 – 20 meq/L
Magnesio (Mg <sup>++</sup> )	0 – 5 meq/L
Sodio (Na <sup>+</sup> )	0 – 40 meq/L
Carbonatos (CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0 – 0,1 meq/L
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0 – 10 meq/L
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	0 – 30 meq/L
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	0 – 20 meq/L
<b>Nutrientes</b>	
Nitrógeno (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0 – 10 mg/L
Nitrógeno (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0 – 5 mg/L
Fósforo (Po <sub>4</sub> )	0 – 2 mg/L
Potasio (K <sup>++</sup> )	0 2 mg/L
<b>Varios</b>	
Boro (B)	0 – 2 mg/L
Hierro (Fe <sup>++</sup> )	0 – 0,5 mg/L
Dureza (° Hidrométrico francés)	0 – 40 F°
RAS	0 – 5
pH	6 – 8,5

**Fuente:** FAO

## **2.14. Evapotranspiración (ET)**

De acuerdo con Allen et al. (2006) la evapotranspiración está conformado por dos procesos separados por los cuales el agua se pierde a través de la superficie de suelo por evaporación y por otra la transpiración del cultivo.

Según FAO, (2006) la evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal.

### **2.14.1. Evaporación**

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada (Allen et al. 2006).

### **2.14.2. Transpiración**

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas (Allen et al. 2006).

### **2.14.3. Evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ )**

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características

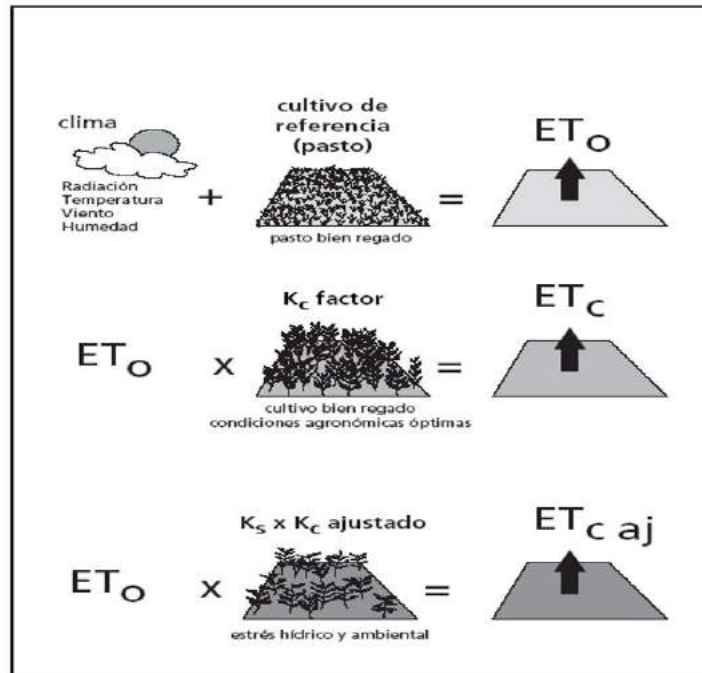
específicas. Los factores que afectan  $ET_0$  son los parámetros climáticos. Por lo tanto,  $ET_0$  es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos.  $ET_0$  expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo (FAO, 2006).

Allen et al. (2006), mencionan que la representación de la evapotranspiración de referencia es mediante el símbolo  $ET_0$ , y la evapotranspiración de la superficie de referencia o de la evapotranspiración del cultivo de referencia, se consideran términos equivalentes. La superficie de referencia es un cultivo hipotético de pasto, con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial fija de  $70 \text{ s m}^{-1}$  y con un albedo de 0,23. La superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde bien regada de altura uniforme, creciendo activamente, y dando sombra totalmente al suelo. La resistencia superficial de  $70 \text{ s m}^{-1}$  implica un suelo moderadamente seco que recibe riego cada semana aproximadamente.

La  $ET_0$  se puede calcular utilizando datos meteorológicos. Como resultado de una consulta de expertos realizada en mayo de 1990, el método de FAO Penman – Monteith se recomienda como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia, dicho método requiere de datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento.

#### **2.14.4. Evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ )**

De acuerdo con Serrano (2010), se refiere al uso potencial del agua por cultivos agrícolas, incluyendo la evaporación directa de la humedad del suelo y de las plantas húmedas. Viene a ser el producto de la Evapotranspiración de Referencia ( $ET_0$ ) por el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) como se muestra en la figura 4.



**Figura 4. Evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), Evapotranspiración del Cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) y en condiciones no estándar ( $ET_{c\ aj}$ ), (FAO 2006).**

De acuerdo con la FAO, (2006) la Evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) se refiere a la evapotranspiración de un cultivo que se desarrolla libre de enfermedades, con buena fertilización, que crece en un campo extenso bajo condiciones óptimas de humedad en el suelo y el cual alcanza su producción total bajo ciertas condiciones climáticas.

#### 2.14.5. Coeficiente de cultivo ( $K_c$ )

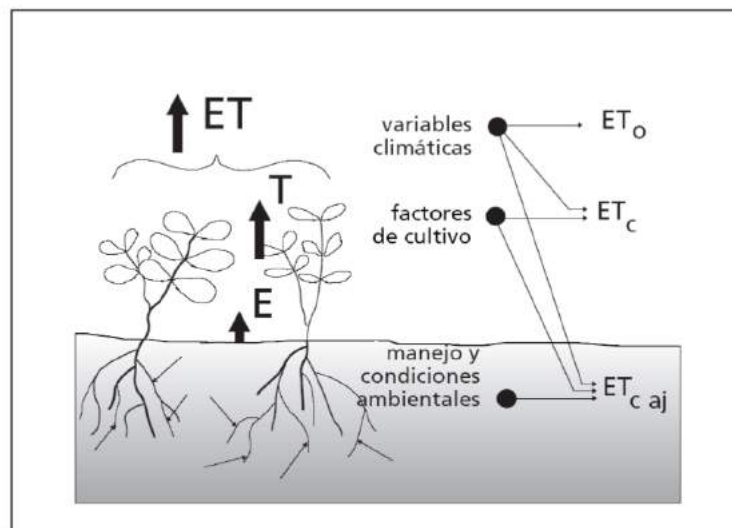
El coeficiente de cultivo representa la evapotranspiración de cultivo en condiciones óptimas y que produzca rendimientos óptimos. En la determinación de  $k_c$  influyen las características del cultivo, momento de la plantación o siembra, las fases del desarrollo del cultivo, además de las condiciones climáticas (Chipana, 2003).

Según Serrano (2010), el coeficiente de cultivo  $K_c$  representa un criterio de uso de agua por el cultivo desarrollado en condiciones óptimas, el cual surge de la relación directa existente entre dos parámetros de gran importancia ( $ET_c$  y  $ET_0$ ). Este coeficiente se crea por la necesidad de simplificar todo el proceso de balance, como también del proceso de desarrollo del cultivo. Es así que se cuenta con valores de  $K_c$  para cada una

de las etapas de importancia del cultivo y que irán describiendo las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo.

#### 2.14.6. Factores que afectan la evapotranspiración

FAO, (2006), menciona que el clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración. Los conceptos relacionados a la ET y presentados en la figura 5 se describen en la sección sobre conceptos de evapotranspiración.



**Figura 5. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET, (FAO 2006).**

##### 2.14.6.1. Factores climáticos

FAO, (2006), indica que los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ ). La evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ ) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar.

### **2.14.6.2. Factores de cultivo**

FAO, (2006), menciona que el tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas.

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>) se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas.

### **2.14.6.3. Manejo y condiciones ambientales**

Según la FAO, (2006), los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la ET son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo.

El efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración. Cuando se evalúa la tasa de ET, se debe considerar adicionalmente la gama de prácticas locales de manejo que actúan sobre los factores climáticos y de cultivo afectando el proceso de ET.

Las prácticas del cultivo y el método de riego pueden alterar el microclima, afectar las características del cultivo o afectar la capacidad de absorción de agua del suelo y la



superficie de cultivo. Una barrera rompe vientos reduce la velocidad del viento y disminuye la tasa de ET de la zona situada directamente después de la barrera. El efecto puede ser significativo especialmente en condiciones ventosas, calientes y secas aunque la evapotranspiración de los mismos árboles podría compensar cualquier reducción en el campo.

La evaporación del suelo de un huerto con árboles jóvenes, en donde los árboles están ampliamente espaciados, puede ser reducida usando un sistema de riego por goteo bien diseñado. Los goteros aplican el agua directamente al suelo cerca de los árboles, de modo en que dejan la mayor parte de la superficie del suelo seca, limitando las pérdidas por evaporación. El uso de coberturas, especialmente cuando el cultivo es pequeño, es otra manera de reducir substancialmente la evaporación del suelo.

Los anti transpirantes, tales como estimulantes del cierre de los estomas, o los materiales que favorecen el reflejo del suelo, reducen las pérdidas de agua del cultivo y por lo tanto la tasa de transpiración. Cuando las condiciones de campo difieran de las condiciones estándar, son necesarios factores de corrección para ajustar ETc (ETc aj). Estos factores de ajuste reflejan el efecto del ambiente y del manejo cultural de las condiciones de campo.

#### **2.14.7. Unidades de medición de la evapotranspiración**

Conforme con la FAO (2006), la evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un completo período de cultivo o un año.

Como una hectárea tiene una superficie de 10000 m<sup>2</sup> y 1 milímetro es igual a 0,001 m, una pérdida de 1 mm de agua corresponde a una pérdida de 10 cm<sup>3</sup> de agua por hectárea. Es decir 1 mm día<sup>-1</sup> es equivalente 10 cm<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>.

#### **2.14.8. Infiltración de agua en el suelo**

La infiltración es el factor más importante que afecta al riego, principalmente por superficie, ya que determina el tiempo de aplicación de agua al suelo, y a la vez es el parámetro de más difícil determinación (Chipana 2003).

Según Cisneros (2003) citado por Mamani (2015), la infiltración se refiere a la velocidad de entrada del agua en el suelo. La velocidad de infiltración es la relación entre la lámina de agua que se infiltra y el tiempo que tarda en hacerlo. La cantidad de agua que se infiltra en un suelo en una unidad de tiempo bajo condiciones de campo, es máxima al comenzar la aplicación del agua en el suelo y disminuye conforme aumenta la cantidad de agua que ya ha entrado en él.

La infiltración es el proceso a través del cual el riego o agua de lluvia, ingresa al suelo a través de la superficie, hacia sus capas inferiores, en forma vertical y horizontal, y esta varía según la textura del suelo, siendo más rápida en suelos arenosos y más lenta en los arcillosos (CITRA 2010 citado por Mamani 2015).

#### **2.14.9. Balance hídrico**

Según Vásquez et al. (2000) citado por Mamani (2015), el balance hídrico o estudio de abastecimiento de agua, principalmente con fines de riego y/o energéticos, implica fundamentalmente el estudio de la relación entre la entrada, salida y almacenamiento de agua.

El conocimiento de la evapotranspiración potencial de un lugar, del que se tiene registros de precipitación, permite establecer su balance hídrico anual. En esta forma es posible conocer la cantidad de agua que realmente se evapora desde el suelo y transpiran las plantas en ese lugar, la cantidad de agua almacenada por el suelo y la que se pierde por derrame superficial y profundo. Como la evapotranspiración y la precipitación son dos elementos climáticos independientes, su marcha anual difícilmente coincide en un mismo punto de la tierra, por lo que en algunos lugares existen períodos en los cuales la necesidad de agua está ampliamente satisfecha por las lluvias y otros en los que se carece de las cantidades de agua requerida. De esta

manera, habrá meses con agua suficiente y meses en que se registre exceso o deficiencia de agua en forma manifiesta. También pueden ocurrir casos extremos en que durante todo el año las precipitaciones sobrepasen las necesidades de agua o viceversa.

Thornthwaite y Mather (1957) citado por Mamani (2015), indican que el balance hídrico climático da una aproximación de las disponibilidades de agua en un lugar o región. Según la metodología de Thornthwaite, se construye a partir de la evapotranspiración potencial y la precipitación medias mensuales para un período de años. Este método de balance consiste en determinar la evapotranspiración real en función de las precipitaciones.

Thornthwaite en 1948, introdujo el término evapotranspiración potencial (ETP) para expresar “la cantidad de agua que perderá una superficie completamente cubierta de vegetación en crecimiento activo si en todo momento existe en el suelo humedad suficiente para su uso máximo por las plantas”.

## **2.15. Productividad del agua**

De acuerdo con Stewart et al., citado por González et al. (2010), la productividad del agua en los cultivos (WP) se define como “la cosecha producida por unidad de agua consumida en la producción ( $t/m^3$  o  $kg/m^3$ )”. El numerador puede ser expresado en términos de rendimiento del cultivo, mientras que en el denominador puede usarse la transpiración, la evapotranspiración, el agua aplicada o agua total entre otros. La mitigación de los impactos de la sequía y el incremento de la productividad del agua puede jugar un rol sustancial en regiones semiáridas.

La FAO (2003) define a la productividad del agua como la cantidad o el valor del producto sobre el volumen o valor del agua consumida o desviada. Se refiere a la cantidad de producto obtenido por unidad de agua “cultivo por gota”. El valor del producto podría ser expresado en diferentes términos: biomasa, grano, dinero.

Los principios básicos para mejorar la productividad del agua en el campo, a nivel de finca o de cuenca que se aplican a todos los cultivos, tanto bajo condiciones de secano

como de riego, son: i) incrementar los rendimientos comercializables de los cultivos por unidad de agua transpirada por este; ii) reducir todas las pérdidas (drenaje, filtrado y percolación) incluyendo las pérdidas por evaporación distintas de la transpiración estomática de las plantas; y iii) incrementar el uso efectivo del agua de lluvia, del agua almacenada y del agua marginal de menor calidad.

### 2.15.1. Función de producción

De acuerdo con Osorio (2011) mencionado por Mamani (2015), una función de producción es la relación existente entre la cantidad de recursos usados en el proceso productivo y la cantidad de producto obtenido en una unidad de tiempo

$$q = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4)$$

Donde “q” representa el número de unidades del bien que se produce y  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , el número de unidades de los diferentes factores (insumos) empleados.

De acuerdo con Palacios (2013), el agua que se pierde a través de evapotranspiración y no vuelve a estar disponible para su reutilización en otras aplicaciones, entonces se requiere la aplicación de agua ya sea por medio de la precipitación o bien por suministro de riego. En este ámbito se debe conocer cuál es la lámina óptima para que el cultivo genere el mayor rendimiento, para así realizar una utilización del recurso de la manera más productiva posible.

#### 2.15.1.1. Etapas de función de producción simple

**Etapa I, Rendimientos Crecientes:** Se inicia en el punto del Óptimo Técnico. Óptimo Técnico: Es aquella combinación de insumo variable e insumo fijo que hacen constante o fijo el producto medio.

**Etapa II, Rendimientos Decrecientes:** Se inicia en el Máximo Técnico: En esta etapa la curva de la Productividad media (PMe) es decreciente, pero no llega a ser cero. Esta es la etapa racional de producción.

**Etapa III, Rendimientos Negativos:** Comienza en el punto del Máximo Técnico y finaliza cuando la Productividad Total (PT) y la Productividad marginal (PMg) se hacen igual a cero.

## 2.16. Eficiencia de uso del agua

De acuerdo con Micucci y Álvarez (2003) a la eficiencia de uso del agua (EUA) en condiciones de secano, es el rendimiento o producción de biomasa por unidad de agua consumida, como se muestra en la ecuación 5. El agua consumida puede expresarse como transpiración, evapotranspiración o precipitación.

$$EUA = R Pp^{-1} \quad (\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}) \quad (5)$$

### Donde:

R = es el rendimiento del cultivo (kg/ha), en biomasa total o grano, según el objetivo de producción.

Pp = Son las precipitaciones ocurridas durante el barbecho y el ciclo del cultivo (mm).

Por su parte Medrano et al. (2007), indican que la eficiencia en el uso del agua de las plantas dependerá principalmente de dos tipos de factores: en primer lugar, de aquellas características propias de la especie y variedad que tengan relación con la capacidad de optimización de los procesos de asimilación de carbono y de evapotranspiración de agua; y en segundo lugar, de las características del ambiente en el que crece y se desarrolla la planta.

### 3. LOCALIZACIÓN

#### 3.1. Ubicación geográfica

La presente investigación se realizó en la comunidad “Barco Belén”, perteneciente a la primera sección municipal de Achacachi, ubicada en la provincia Omasuyos, al norte del departamento de La Paz, distante a 99 km de la ciudad de La Paz, que se ubica a 16° 01'25" Latitud sur, y 68°42'45" Longitud oeste, a una altitud de 3837 msnm. Alrededor del río keka, área influenciada por el lago Titicaca.

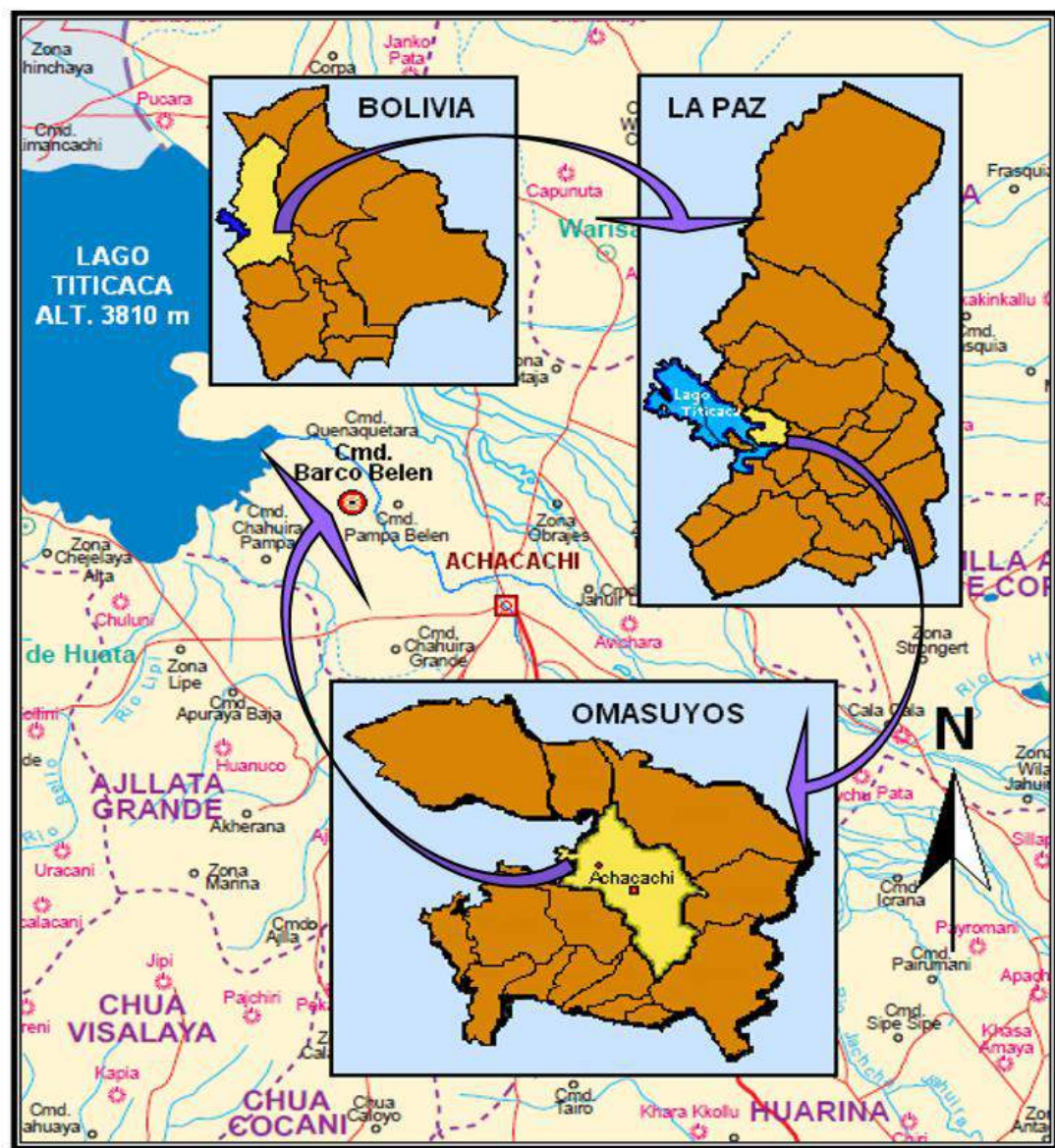


Figura 6. Ubicación parcela experimental

### **3.2. Características fisiográficas**

Achacachi por la presencia de la cordillera Real y el lago Titicaca, presenta formaciones fisiográficas tales como: montañas, colinas, laderas y planicies, principalmente. La diversidad fisiográfica es diversa con pendiente que van desde 40 a 60%, y con altitudes de 3823 a 5000 msnm. Dirección baja a media, pendientes bajas con erosión laminar, surcos, cárcava y erosión eólica (PDM Achacachi 2010).

### **3.3. Características de los Suelos**

En el área del municipio de Achacachi predominan tres clases de suelos: los suelos clasificados en la “clase 6”, mismos que no son aptos para una producción anual, por sus condiciones de textura y los problemas de erosión. Las principales características de este suelo son: capa arable superficial (0-20 cm); textura mediana mezclado con gravas y piedras principalmente en el horizonte profundo, poca capacidad de retención de humedad y excesivo drenaje. El contenido de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  varía entre bajo y moderado;  $\text{Na}^{+}$  de moderado a alta y  $\text{K}^{+}$  de baja a moderado. Estos suelos están recomendados para cultivos permanentes como la alfalfa.

Suelos clasificados en la “clase 4”, cuyas características generales son similares al anterior perfil, siendo superficial con baja capacidad de retención de humedad. Estos suelos pueden ser recomendados para cultivar alfalfa asociado con especies forrajeras. Los suelos en esta área requieren mucho cuidado en las prácticas de manejo de riego.

El tercer tipo de suelo “clase 3”, corresponde a una topografía plana; estos son moderadamente desarrollados y con una profundidad moderada, con una fina textura. Tiene muy buena retención de humedad y cuyas características químicas varían desde una reacción neutral hasta fuerte alcalino, muestra un pH de 6,7 en el perfil arable, y un pH 9,0 a una profundidad de 50-65 cm, contiene  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  entre bajo y moderado y  $\text{Na}^{+}$  alto especialmente en la parte profunda. Estos suelos son recomendables para cultivos anuales (PDM Achacachi 2010).

Los suelos del área de estudio, por sus características físicas corresponden a clases texturales Arcilloso-Franco Arcilloso, Franco limoso, con predominancia de texturas más

pesadas (arcillo-limosas), las mismas que permiten el drenaje interno y la infiltración. Tienen una profundidad moderada a buena, siendo aptos para el cultivo de alfalfa, papa, haba, cebolla, avena, cebada. El pH de los suelos en esta zona está en el rango de 7 a 7,4 (Laura 2013).

### **3.4. Características climáticas**

Achacachi presenta un clima meso térmico con inviernos seco frío (Montes de Oca 2005).

Según el Plan de Desarrollo Municipal de Achacachi (2010), es considerada una zona de alta radiación, vientos fuertes, que originan una intensa evaporación del lago Titicaca, presentando una precipitación promedio anual de 457 mm, con una humedad relativa promedio anual del 65,8%, con una promedio mínimo de 59% y un promedio máximo de 72%, la temperatura media anual de 7,1 °C, con un promedio de una máxima de 14,6 °C y una mínima media de - 4 °C. Sin embargo se puede encontrar máximas hasta de 18 °C principalmente en los alrededores del lago, y mínimas extremas de hasta -11 °C en la zona de la cordillera, en las zonas cercanas al lago Titicaca se presentan microclimas donde las temperaturas se elevan entre 2,5 a 3 °C de la temperatura promedio por la mayor presencia de humedad.

La presencia de heladas anuales es de 169 días, distribuidas en los meses de abril a agosto (JICA 1997 citado por Mamani 2015).

### **3.5. Flora**

Entre las principales especies nativas que se pueden encontrar en la región se destacan las siguientes: Cola de ratón, Diente de león, Alfilerillo, Cebadilla común, Garbancillo, Huaylla, Ichu, Layu layu, Muni muni, Sehuenca, Sillu sillu, Paja brava, k`oa y otros. Muchas áreas de terreno en la región se encuentran en producción de cultivos forrajeros como Avena, Alfalfa y otros con cultivos como la Papa, Quinoa, Haba o Cebolla. Las cuales se cultivan mediante prácticas tradicionales, que limitan la producción, afectada también por factores de clima como las heladas y granizos (PDM Achacachi 2010).



### **3.6. Fauna**

Las principales especies de animales que se observan en el Municipio son: Choka, Pato silvestre, Perdiz, Codorniz, Gaviota, Liqi liqi, Alqamari, Huallata, Kuru cutu, Paloma, Liebre, Ratón, Zorrino, Trucha, Mauri, Suche y otros (PDM Achacachi 2010).

### **3.7. Recursos hídricos**

Las fuentes de agua del municipio provienen de las precipitaciones pluviales, deshielos de la cordillera, el Lago Titicaca y aguas subterráneas como las vertientes y pozos. Las fuentes más impotentes en la zona son los siguientes ríos: Río Keka, Corpa, Tambo, Ventilla y Jacha Jahuira, siendo permanente el río Keka, cuyas aguas son utilizados para fines de riego, más de 30 sistemas de riego toman aguas de este río, sin embargo existen 3 sistemas que permanecen inalterables durante el año, los cuales están localizados en Coromata Alta, Pajchani Molino y en Putuni. Los caudales varían entre 0,23 cm<sup>3</sup>/s en el primer sistema; 0,10 cm<sup>3</sup>/s en el segundo y 0,35 cm<sup>3</sup>/s en el tercero, respectivamente (PDM Achacachi 2010).

### **3.8. Superficie cultivada bajo riego y seco de la Comunidad Barco Belén**

De acuerdo con Laura (2013) la superficie cultivada bajo riego es de 7,82 hectáreas que en términos porcentuales significa el 15% y 45,18 hectáreas a seco que representa el 85%, del total de la superficie cultivada, la misma que llega a 53 hectáreas.

## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1. Materiales y equipos**

#### **4.1.1. Material biológico**

Se utilizó semilla tubérculo de papa, variedad Waych'a (*Solanum tuberosum* L. ssp. andigena).

#### **4.1.2. Material de campo**

- Herramientas menores de labor agrícola
- Flexómetro y huincha métrica
- Estacas de madera
- Baldes graduado de 18 L
- Mochila aspersora.
- Cilindro infiltrómetro
- Cilindros para muestreo del suelo.
- Vernier
- Regla graduada
- Letreros
- Cuaderno de campo
- Bolsas y etiquetas

#### **4.1.3. Material de laboratorio**

- Balanza analítica
- Mufla

#### **4.1.4. Equipos**

- Estación climatológica digital
- GPS (Sistema de Posicionamiento Global)
- Balanza digital
- Cámara fotográfica
- Cronometro

#### 4.1.5. Material de gabinete

- Ordenador
- Calculadora
- Material de escritorio
- Software, The SAS System para Windows versión 6.11 y 9.1
- Software, WeatherLink 5.90

#### 4.2. Metodología

En la presente investigación se empleó el método descriptivo, mencionado por (Zorrilla, 1986), que consiste en recoger, organizar, resumir, presentar, analizar, generalizar, los resultados de las observaciones en campo. Este método implica la recopilación y presentación sistemática de datos para dar una idea clara de una determinada situación.

##### 4.2.1. Diseño experimental

El diseño estadístico empleado en la investigación es el de Bloques al Azar con cuatro repeticiones y tres tratamientos de riego, es decir que el estudio presenta cuatro bloques compuestos cada uno por tres Unidades Experimentales (UE).

##### 4.2.1.1. Modelo Aditivo Lineal

El modelo estadístico para este diseño es:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + E_{ij} \quad (6)$$

**Donde:**

$y_{ij}$  = Una observacion cualquiera

$\mu$  = Media general

$\tau_i$  = Efecto del  $i$  – ésimo tratamiento

$\beta_j$  = Efecto del  $j$  – ésimo bloque

$E_{ij}$  = Error experimental en la unidad  $j$  del tratamiento  $i$

#### 4.2.2. Factores de estudio

El único factor de estudio fue las diferentes láminas de riego aplicadas al cultivo de papa, considerando que los tubérculos semilla, la preparación del terreno, fertilización, labores culturales, control fitosanitario, etc., son todos uniformes para todo los tratamientos.

#### 4.2.3. Tratamientos

Los tratamientos de riego evaluados fueron los siguientes:

**T1:** Tratamiento uno, 50% de reposición de la lámina de riego (R).

**T2:** Tratamiento dos, 75% de reposición de la lámina de riego (R).

**T3:** Tratamiento tres, 100% de reposición de la lámina de riego (R).

#### 4.2.4. Dimensiones de la parcela experimental

Las dimensiones de la parcela experimental se detallan en el cuadro 9:

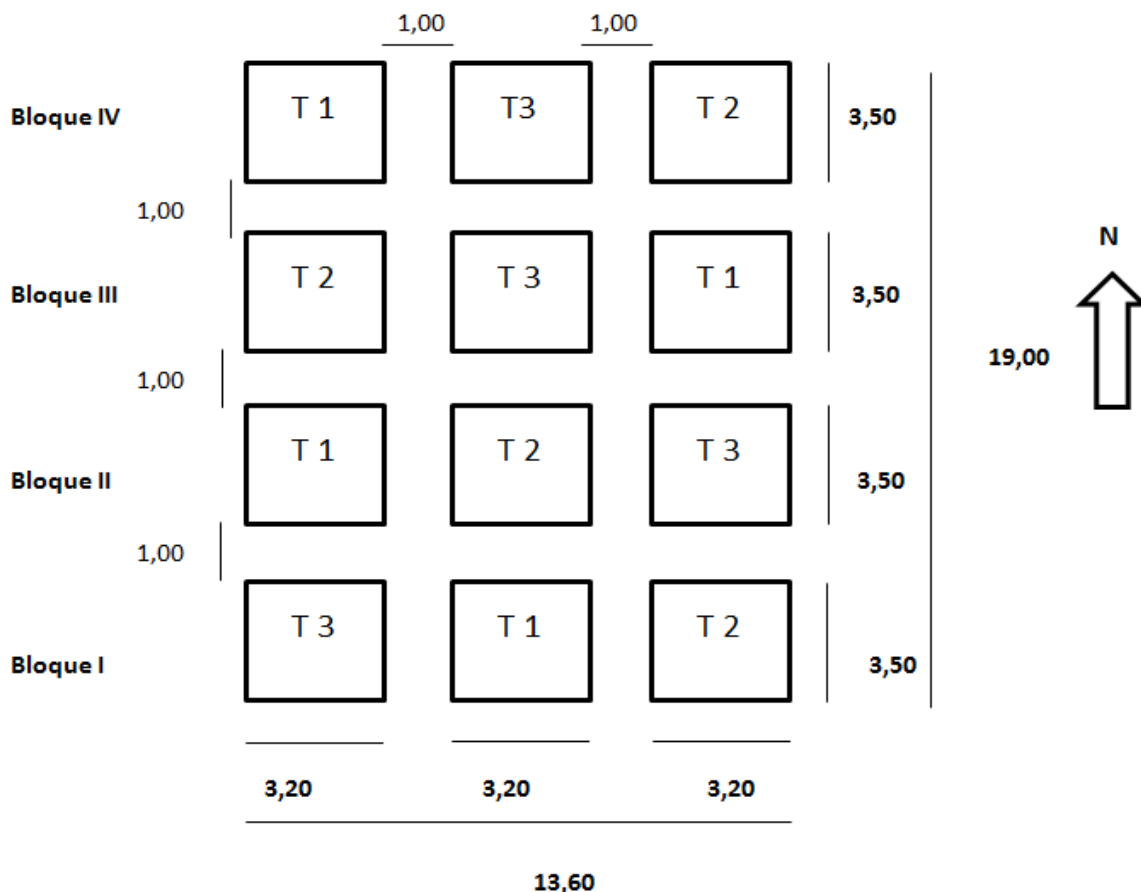
**Cuadro 9 Características de la parcela experimental**

<b>Característica</b>	<b>Detalle</b>
Área total del ensayo	258,40m <sup>2</sup>
Área de una unidad experimental	11,20m <sup>2</sup>
Número de unidades experimentales	12,00
Número de bloques	4,00
Número de surcos por unidad experimental	4,00
Número de plantas por surco	10,00
Número de plantas por unidad experimental	40,00
Distancia entre surcos	0,80m
Distancia entre plantas	0,35 m

**Fuente:** elaboración propia.

#### 4.2.5. Croquis del experimento

Los tratamientos fueron distribuidos en la parcela experimental, al azar tal como se muestra en la figura 7:



*Figura 7. Croquis de la distribución de los tratamientos en la parcela Experimental*

#### 4.2.6. Método de riego

La aplicación de las tres láminas de riego, se realizó mediante el método de riego localizado manual, considerando frecuencias de 4 a 6 días es decir 5 días en promedio con el fin de acercarse más a un riego en tiempo real. El suministro de riego sólo se hizo desde inicios fase de formación de estolones (estolonización), hasta el final de la fase de floración y tuberización. En la fase de emergencia y la fase de madurez fisiológica se restringió el riego, con la finalidad de evaluar el Riego Deficitario Controlado (RDC).

#### 4.2.6.1. Cálculo de las láminas de riego

Para calcular los volúmenes de agua para el riego, se consideró la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y los aportes de agua de la precipitación efectiva (Pe) al 90 %, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$R = ET_o - Pe \quad (7)$$

**Donde:**

R : Es el requerimiento de riego total, equivalente al 100 % (mm).

ET<sub>o</sub> : Es la evapotranspiración de referencia (mm).

Pe : Es la precipitación efectiva al 90 % (mm).

Se aplicó el riego de acuerdo a los tratamientos que se han propuesto. Para el cálculo de los volúmenes de agua requerida para el cultivo, se utilizó el, 50%, 75% y 100% de reposición respecto de la lámina de riego calculada (R).

La determinación de la Evapotranspiración de Referencia (ET<sub>o</sub>), fue calculada automáticamente, en base a la ecuación de Penman – Monteith (ecuación 8), donde las variables que requiere esta ecuación se registraron y procesaron automáticamente, gracias al equipo meteorológico automático DAVIS Vantage Pro2 Plus, establecido en la comunidad Barco Belén del Municipio de Achacachi, distante a 100 metros aproximadamente de la parcela experimental y la consola receptora de datos.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (8)$$

**Donde:**

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

R<sub>n</sub> = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)

G = flujo de calor del suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)

$T$  = temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $u_2$  = velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ )  
 $e_s$  = presión de vapor de saturación (kPa)  
 $e_a$  = presión real de vapor (kPa)  
 $e_s - e_a$  = déficit de presión de vapor (kPa)  
 $\Delta$  = pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ )  
 $\gamma$  = constante psicométrica ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

La precipitación efectiva ( $P_e$ ) se determinó a partir de la precipitación pluvial total que se obtuvo de la estación meteorológica instalada en el lugar de estudio para luego ser ajustada a la precipitación efectiva al 90% que se adecua a las condiciones del lugar de estudio. Para su cálculo se consideró el método del porcentaje fijo de precipitación, la ecuación 9 describe su cálculo.

$$P_e = a * P_T \quad (9)$$

**Dónde:**

$P_e$  : Precipitación efectiva (mm).  
 $a$  : Fracción fija (0 - 1), establecida arbitrariamente.  
 $P_T$  : Precipitación total (mm).

La estación meteorológica DAVIS Vantage Pro2 Plus (figura 8), cuenta con sensores de radiación UV y radiación solar, pluviómetro, sensores de temperatura, humedad, un anemómetro entre otros componentes y sensores que registran distintas variables climáticas las mismas que son transmitidas cada treinta minutos de manera inalámbrica hacia una consola receptora.



*Figura 8. Equipo meteorológico Vantage Pro2 Plus en la comunidad de estudio*

#### **4.2.7. Trabajo de campo**

##### **4.2.7.1. Muestreo del suelo**

Una vez identificado el área del experimento se realizó el muestreo del suelo de la capa arable por el método de zigzag. La toma de muestra de suelo se realizó antes del abonado del terreno, teniéndose tres muestras de distintos lugares de la parcela, a una profundidad de 30 cm, las tres muestras se mezclaron y luego se hizo un cuarteo para la muestra final, y luego se envió al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuaria de la Universidad Mayor de San Simón para el análisis físico.

##### **4.2.7.2. Determinación de los horizontes del suelo**

Se realizó una calicata en la parcela experimental, tomando muestras de cada horizonte, las dimensiones fueron de 1,0 m x 1,50 m y una profundidad de 1,20 m. La metodología adoptada fue de la FAO (1977b), mediante la guía para la descripción de perfiles de suelo, el orden en el que se evaluó fue primeramente, (I) Información acerca del sitio de la muestra, como segundo (II) información general acerca del suelo, como tercero (III) una breve descripción general del perfil, (IV) Descripción de los horizontes del suelo y por último (V) la interpretación de la descripción.



#### 4.2.7.3. Muestreo del agua para riego

El muestreo del agua se realizó en el río Keka el mismo fue la fuente de agua para riego, se encuentra ubicado a unos 10 m de la parcela experimental, con el fin de determinar la calidad del agua, mediante el análisis de las características físicas y químicas del mismo, el muestreo se realizó antes del periodo de lluvias con el fin de evitar acumulación de sedimentos, el procedimiento consistió en:

- Lavado del recipiente para la muestra, botella plástica de dos litros
- Muestreo del agua, de la parte más cercana al centro del curso del río
- Envío de la muestra al laboratorio del Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear (IBTEN), para su respectivo análisis.

#### 4.2.7.4. Determinación de la infiltración básica

La Velocidad de Infiltración Básica del suelo (VIB), se midió con fines de referencia, ya que determina el tiempo de aplicación de agua al suelo, la prueba de infiltración se realizó por el método del cilindro infiltrómetro, la infiltración instantánea se define según Kostiacov (1933), en la ecuación 10 de la siguiente manera:

$$L_i = K_i * (t)^n \quad (10)$$

#### Dónde:

$L_i$  : Lamina infiltrada (Velocidad de infiltración instantánea, en cm/hr.)

$K_i, n$  : Coeficientes empíricos de la función de infiltración ( $-1 < n < 0$ )

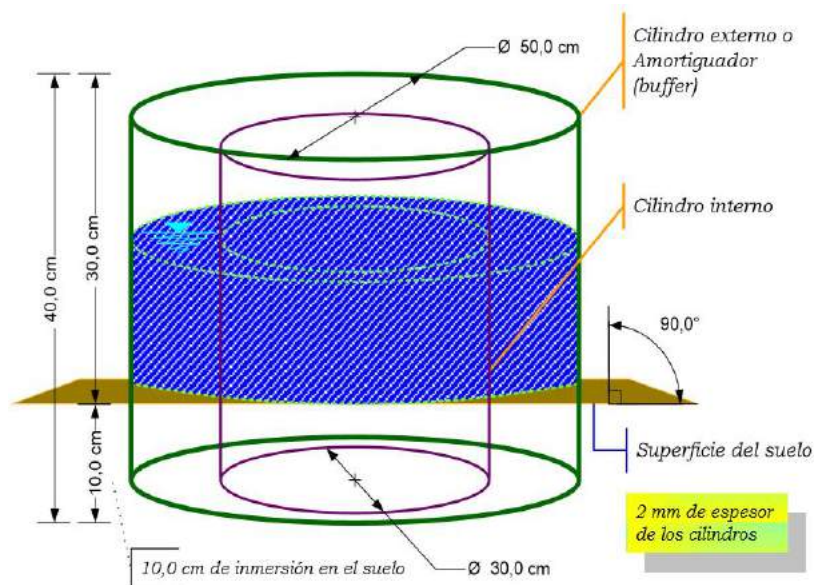
$t$  : Es el tiempo de oportunidad expresado en minutos.

Según Kostiacov (1932) citado por Gurovich, (1999), la velocidad de infiltración básica se define como la relación que existe en un momento dado entre la lámina o altura de agua infiltrada y el tiempo empleado. Se expresa comúnmente en (cm/hr). La velocidad de infiltración comienza generalmente con un valor relativamente alto y decrece con el tiempo.

Esta fórmula no tiene un fundamento físico, ni es dimensionalmente homogénea, pero se ajusta muy bien al fenómeno de infiltración, dentro de los límites agronómicos (Fernández et al., 1971).

La velocidad de infiltración depende de muchos factores, como ser el espesor de agua empleado para el riego o lluvia, la temperatura del agua y el suelo, la estructura y la compactación, textura, estratificación, contenido de humedad, agregación y actividades microbianas (Gavande et al., 1972), además los distintos manejos que se le imponen al suelo modifican a estos factores y por ende las labranzas modifican la velocidad de entrada de agua al perfil de suelo.

En la figura 9 se muestra los cilindros infiltrómetros, empleados para la determinación de la VIB.



**Figura 9. Medidas y partes de los cilindros infiltrómetros (Padilla, 2014).**

El método consistió en elegir un lugar representativo para el par de cilindros, en el que no exista ninguna alteración física del suelo. Luego se colocó el cilindro pequeño o interno en el lugar determinado uniformemente de manera que no exista una inclinación del cilindro. Se golpeó los cilindros haciendo penetrar 15 a 20 cm. Luego se realizó la misma operación con los cilindros grandes que cumplía la función de tampón, para que no exista movimiento lateral horizontal del agua dentro del suelo.

Luego, se puso agua al cilindro exterior, posteriormente al cilindro interior, en una misma altura de lámina, se midió el nivel de agua registrando la velocidad de infiltración para alturas de infiltración de 2 cm como valor constante y obteniéndose los tiempos de infiltración para cada lectura, hasta que la tasa de infiltración sea constante. Estos datos se registraron en la planilla y mediante ellos se obtuvo la evolución de la velocidad de infiltración y la VIB de dicho suelo.

Para la clasificación de la infiltración del agua en el suelo se consideró los límites descritos en el cuadro 10.

**Cuadro 10 Clasificación de la velocidad de infiltración del agua en el suelo**

<b>Clase</b>	<b>Velocidad de infiltración (cm/hr)</b>
<i>Muy lenta</i>	<0,1
<i>Lenta</i>	0,1 – 0,5
<i>Moderadamente lenta</i>	0,5 -2,0
<i>Moderada</i>	2,0 – 6,0
<i>Moderadamente rápida</i>	6,0 – 12,0
<i>Rápida</i>	12,0 – 25,0
<i>Muy rápida</i>	>25,0

**Fuente:** Adaptado de Serrano (2010)

#### **4.2.7.5. Preparación del suelo**

La preparación del suelo se realizó mediante un roturado profundo, seguido de un rastrado para el desterronado del mismo y posterior nivelado.

#### **4.2.7.6. Siembra**

En fecha 29 de octubre de 2011, se realizó la siembra de forma manual, utilizando semillas tubérculo de tamaño homogéneo de la variedad Waycha, a una profundidad de 0,15 a 0,20 m, un distanciamiento entre surcos de 0,80 m y 0,35 m entre plantas. Luego se realizó la incorporación de estiércol bovino, en los surcos a chorro continuo, a razón de 0,7 Kg/m<sup>2</sup>.

#### **4.2.7.7. Puesta de letreros en la Parcela Experimental**

La parcela de estudio fue estaqueada con la ayuda de un lienzo, cinta métrica y estacas en los vértices de las unidades experimentales.

	
<p>a) Roturado y nivelado</p>	<p>b) Incorporación de estiércol bovino</p>
	
<p>c) Siembra</p>	<p>d) Establecimiento de la parcela experimental</p>

**Figura 10. Procedimiento para la siembra de papa, a) Roturado y rastrado; b) fertilización con estiércol; c) siembra; d) establecimiento y señalización de la parcela experimental.**

#### 4.2.7.8. Riego

El inicio de la aplicación de riego al cultivo de papa se hizo en base al concepto del Riego Deficitario Controlado (RDC) de aplicar riego en las fases críticas del cultivo, por lo tanto se realizó un riego general a inicios de la fase de formación de estolones, para los tres tratamientos, para luego seguir los aportes de agua hasta finalizar la fase de floración y tuberización.

La aplicación de las tres láminas de riego, se realizó mediante el método de riego localizado manual, considerando frecuencias de 4 a 6 días. En la fase de emergencia y la fase de madurez fisiológica se restringió el riego, con la finalidad de evaluar el RDC, aplicándose el riego de acuerdo a los tratamientos que se han propuesto. Para el cálculo de los volúmenes de agua requerida para el cultivo, se utilizó el, 50%, 75% y 100% de reposición respecto de la lámina de riego calculada (R).

#### 4.2.7.9. Labores culturales

El control de plagas y enfermedades, deshierbe y aporques se lo realizó de forma constante y periódica como sigue en el cuadro 11.

**Cuadro 11 Labores culturales**

No	Actividad	Momento de realización
1	Deshierbe	Post emergencia
2	Deshierbe y escardado	Fase de formación de estolones
3	Fumigado contra gorgojo de los andes	Fase de formación de estolones
4	Aplicación de abono foliar	Al inicio de la floración
5	Fumigado contra gorgojo de los andes	Al inicio Fase de tuberización
6	Aporque	Al inicio de la floración

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.2.7.10. Cosecha y poscosecha

La cosecha se efectuó de forma manual el 18 de abril de 2012, una vez finalizado el ciclo vegetativo, y cuando los tubérculos alcanzaron la madurez fisiológica, la cual se da cuando no hay desprendimiento de la piel del tubérculo al pasar la yema del pulgar. Alcanzando 173 días de ciclo del cultivo desde de la siembra. La cosecha se realizó de la siguiente manera:

- Se cosecho cada tratamiento por separado, con la ayuda de picos y chontas.
- Se cuantificó el número de tubérculos por planta
- Se recogió la papa en yutes con sus etiquetas para cada unidad experimental y tratamiento.
- Se pesaron las cantidades de papa por cada unidad experimental y tratamiento.
- La poscosecha comprendió la selección y clasificación de los tubérculos para una buena conservación de estos.

#### 4.2.8. Trabajo de laboratorio

##### 4.2.8.1. Análisis del agua para riego

El análisis físico químico de calidad del agua fue realizado en el Instituto Boliviano de Ciencia y tecnología Nuclear (IBTEN), el resultado del análisis se muestra en el anexo 4. Los parámetros analizados fueron: pH., Conductividad eléctrica (CE), cationes como el sodio, potasio, calcio, magnesio y aniones como los cloruros, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, además de sólidos suspendidos, sólidos totales, sólidos disueltos y boro.

Para la determinación de la concentración de sodio en la muestra de agua para riego, se utilizó el indicador de Relación de Absorción de Sodio (RAS), como se muestra en la siguiente ecuación.

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++}+Mg^{++}}{2}}} \quad (11).$$

#### Dónde:

RAS : Relación de Absorción de Sodio.

Na : Concentración de Sodio (meq/L).

Ca : Concentración de Calcio (meq/L).

Mg : Concentración de Magnesio (meq/L).

#### **4.2.8.2. Análisis del suelo**

Se realizó un análisis físico de la muestra de suelo de la parcela experimental fue realizado por el Laboratorio de Aguas y Suelos, departamento de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuaria de la Universidad Mayor de San Simón en Cochabamba. El resultado del análisis se muestra en el anexo 5.

#### **4.2.8.3. Determinación de la densidad aparente del suelo**

En complementación al análisis físico también se ha determinado la densidad aparente del suelo ( $Dap$ ), para su determinación, se utilizó el método del cilindro, que consiste en extraer y pesar muestras no alteradas del suelo que será la masa de suelo húmedo (MSH), mediante un cilindro de acero de volumen conocido, para luego extraer la humedad llevando a la mufla a 105 °C por 48 hr, posteriormente se registró la masa del suelo seco (MSS). Se determinó mediante la siguiente ecuación.

$$Dap = \frac{MSS}{Vc} \quad (12)$$

**Dónde:**

$Dap$  : Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>), (g/cm<sup>3</sup>)

$MSS$  : Masa de Suelo Seco (kg), (g)

$Vc$  : Volumen del cilindro (m<sup>3</sup>), (cm<sup>3</sup>)

#### **4.2.9. Trabajo de gabinete**

##### **4.2.9.1. Programación del riego**

Para efectuar la programación del riego se consideró el método en base a parámetros climáticos, por un lado la demanda de agua del cultivo representada por la ETo y por otro los aportes de oferta de agua de la precipitación pluvial total (PP), expresada como precipitación efectiva (Pe) al 90 % de acuerdo con la recomendación logística del Proyecto FONTAGRO, el procedimiento fue el siguiente:

### **a) Registro datos climáticos**

Los datos climáticos fueron registrados automáticamente cada 30 minutos, por medio inalámbrico por un receptor y almacenador de datos climáticos, (consola inalámbrica) que está a 20 m aproximadamente de la estación meteorológica.

### **b) Descarga de los datos climáticos registrados**

La descarga de los datos climáticos registrados por la consola se realizó una vez por semana mediante el uso de un ordenador con la ayuda del software WaterLink 5.9. Sin embargo se hizo un seguimiento continuo de los fenómenos que ocurren con poca frecuencia, como ser lluvias de alta intensidad, en tales casos se realizó la toma de datos inmediatamente.

### **c) Sistematización de los datos climáticos**

Se realizó inmediatamente a la descarga empleando un ordenador.

### **d) Calculo de las láminas de riego**

Este cálculo se efectuó en base a parámetros climáticos, que fueron la ETo y Pe dando como resultado el requerimiento de lámina de riego (R), según la ecuación 13, y de este valor se calculó el 50%, 75% y 100% que fueron las tres láminas de riego correspondientes a los tratamientos T1, T2 y T3 respectivamente.

$$R = ETo - Pe \quad (13)$$

#### **Dónde:**

R : Requerimiento de lamina de riego (mm).

ETo : Evapotranspiración del referencia (mm).

Pe : Precipitación efectiva al 90 % (mm).



#### 4.2.9.2. Determinacion del Balance hídrico

El balance hídrico es una metodología para determinar la cantidad de agua que se evapora desde el suelo y transpiran las plantas en ese lugar, la cantidad de agua almacenada en el suelo y la que se pierde por derrame superficial y profundo. Se lo calcula conociendo la evapotranspiración potencial de un lugar determinado, y por otra parte la precipitación.

El balance hídrico para la zona de estudio, la Comunidad Barco Belén, se realizó por el método de Thornthwaite, que utiliza una ecuación empírica la cual puede ser usada para cualquier zona en la cual se registran la Temperatura máxima y Temperatura mínima diarias, la cual permitirá obtener la media. Dicha ecuación es la siguiente:

$$ETP = \left(\frac{10T}{I}\right)^a \quad (14)$$

**Dónde:**

*ETP = Evapotranspiracion potencial en mm.*

*I = Indice calorico anual, constante para la region dada*

*T = Temperatura media mensual (no normal) en °C*

*a = Exponente empirico, funcion de I*

$$a = 6,75 * 10^{-7} I^3 - 7,71 * 10^{-5} I^2 + 1,79 * 10^{-2} I + 0,49239$$

El cálculo del índice calórico es el siguiente:

$$I = \Sigma 12 \left(\frac{tm}{5}\right)^{1,514} \quad (15)$$

**Dónde:**

*I = Indice calorico anual*

*\Sigma 12 = Sumatoria del indice de calor mensual*

*tm = Temperatura media mensual (no normal) en °C*

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) de un mes determinado se debe ajustarlo (ETPaj) mediante un coeficiente que tenga en cuenta el número de días del mes y horas de luz de cada día, en función de la latitud. Para ello se introduce el índice de iluminación mensual en unidades de 12 horas, que deberá multiplicar a la ETP para obtener la ETP según Thornthwaite (mm/mes) final:

$$ETPm \text{ (corregida)} = ETP \times Li \text{ (mm/mes)} \quad (16)$$

**Dónde:**

*ETP = Evapotranspiración potencial mensual (mm)*

*Li = Factor de corrección del número de días del mes (Ndi) y la duración astronómica del día Ni (horas de sol).*

$$Li = \frac{Ndi}{30} \times \frac{Ni}{12} \quad (17)$$

Para el balance hídrico medio anual local, se consideró la evapotranspiración potencial ajustada (en base a la duración del mes y número de horas luz) y la precipitación. Los datos de precipitación y temperatura fueron obtenidos de la estación meteorológica ubicada en cercanías de la parcela experimental y del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI, estación Belén, (periodo 2011-2012).

Para el cálculo del balance, se inició introduciendo los datos de precipitación (P) y la ETPaj, luego excel calculó los valores de ETR, déficit, excedentes y almacenamiento, como se detalla en el cuadro....El balance hídrico se verificó aplicando la siguiente fórmula:

$$ETP + Ex = P + Def \quad (18)$$

Para el cálculo de la Evapotranspiración real para cada mes se pueden presentar los siguientes casos.

Si  $P \geq ETP$ , entonces  $ETR = ETP$

Si  $P < ETP$ , entonces  $ETR = P + |\Delta Alm. |$

### **4.2.9.3. Sistematización y análisis de datos en general**

Los resultados alcanzados en la etapa de campo y laboratorio se lo trabajo de la siguiente manera:

- Tabulación y sistematización de los datos registrados en campo
- Análisis e interpretación de la información
- Redacción de la información.

### **4.2.10. Variables de respuesta**

#### **4.2.10.1. Variables agronómicas**

##### **a) Altura de planta**

Esta variable de respuesta corresponde al máximo crecimiento alcanzado por la planta, que fue determinada mediante mediciones realizadas en la fase fenológica de floración y tuberización en la cual se produce el máximo desarrollo del follaje. Las mediciones se realizaron desde la base del tallo principal seleccionado aleatoriamente hasta la inserción de la última hoja apical. Para su efecto se midieron 6 plantas al azar por unidad experimental y se expresó en centímetros

##### **b) Número de tallos por planta**

El número de tallos por planta es el número de tallos principales que presentaron las plantas al final de la fase de floración, debido a que en esta etapa la cantidad de tallos es invariable. La medición se determinó mediante conteo directo de 6 plantas seleccionadas al azar, por unidad experimental.

##### **c) Número de tubérculos por planta**

Esta variable de respuesta es la cantidad de unidades de tubérculos por planta, determinada mediante conteo una vez realizada la cosecha. En cada unidad experimental se cosechó 4 plantas (muestras), de los diferentes tratamientos.

#### d) Número de tubérculos según el diámetro

Esta variable representa la cantidad de tubérculos por planta según su tamaño (4 tamaños) determinado por su diámetro, para lo cual se midió los tubérculos obtenidos en la cosecha con un vernier en mm, y se clasificó por el tamaño en cuatro grupos según el cuadro 12, tomando en cuenta de que los tubérculos se destinen al mercado como tubérculos para el consumo.

**Cuadro 12 Clasificación de tubérculos de papa.**

<b>Denominación</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Calibre (mm)</b>
<i>Gruesa</i>	<i>I</i>	<i>&gt; 75</i>
<i>Grande</i>	<i>II</i>	<i>60 a 75</i>
<i>Mediana</i>	<i>III</i>	<i>45 a 60</i>
<i>Pequeño</i>	<i>IV</i>	<i>&lt; 45</i>

**Fuente:** Mamani (2015).

#### e) Rendimiento

El rendimiento fue determinado luego de la cosecha, 173 días después de la siembra, tomando y pesando los tubérculos de 4 plantas (muestras) escogidas aleatoriamente de cada unidad experimental. El cultivo alcanzó la madurez fisiológica presentando tubérculos con la epidermis o cutícula firme.

#### 4.2.10.2. Variables de riego

##### a) Volumen de agua aplicado mediante el riego y Precipitación

La determinación de la cantidad total de agua aplicada, es una variable de tipo cuantitativa, el objetivo es evaluar la cantidad de agua aportada por el riego más la precipitación efectiva, (R+Pe).

##### b) Humedad del suelo

Esta variable es una variable de tipo cuantitativa. El objetivo, es evaluar el contenido y balance de humedad edáfica por tratamiento, mediante el método gravimétrico, la medición se realizó a una profundidad de 30 cm por debajo del suelo, con cilindros de

diámetro de 5 cm. El monitoreo se efectuó antes de realizar el riego y posterior al riego, para luego llevarlas a laboratorio y determinar la humedad gravimétrica y volumétrica.

Los muestreos de suelo se realizaron en cada riego, en los cuales se tomó muestras de suelos a una profundidad de 0,30m, estas se pesaron en el lugar y luego se llevaron a laboratorio donde se pesó y se pusieron a una mufla por 24 horas, a una temperatura de 105 °C, inmediatamente se pesó la muestra. El contenido de agua del suelo se determinó por el método gravimétrico y volumétrico en base a las ecuaciones 19 y 20 indicadas por Chipana (2003).

$$H_g = U = m_w/m_s \quad (19)$$

**Donde:**

$H_g = U$  = Humedad gravimétrica

$m_w$  = Masa de agua

$m_s$  = Masa de suelo seco

$$\Theta = G_e * H_g \quad (20)$$

**Donde:**

$\Theta$  = Humedad volumétrica

$G_e$  = Gravedad específica aparente

$G_e$  = Densidad aparente/Densidad del agua

### **c) Velocidad de infiltración básica (Vib)**

Está referida a la evaluación de la velocidad de infiltración, utilizando el método de cilindros infiltrómetros, con dos repeticiones en el área de investigación.

### **d) Productividad del agua**

La productividad del agua en los cultivos (WP) se define como “la cosecha producida por unidad de agua consumida en la producción ( $t\ m^3$  o  $kg\ m^3$ ). Esta variable se efectuó

una vez realizada la cosecha y cuantificado el rendimiento, para relacionarla con la cantidad de agua aplicada empleando la siguiente relación:

$$WP = \text{Rendimiento en kg} / \text{volumen total de agua aplicada en m}^3 \quad (21)$$

#### **e) Eficiencia de uso del agua**

Esta variable fue determinada sobre la base del rendimiento obtenida por unidad de superficie, en relación a la lámina de agua aplicada durante el ciclo del cultivo, de acuerdo a la ecuación (22), Micucci y Álvarez (2003).

$$EUA = Rd/VAU \quad (22)$$

**Donde:**

EUA = Eficiencia de uso del agua (g/cm<sup>3</sup>)

Rd = Rendimiento del cultivo (kg/ha)

VAU = Volumen de agua aplicado (cm<sup>3</sup>/ha)

#### **4.2.10.3. Variables económicas**

El análisis de costos parciales de producción del ensayo se estableció en base a evaluación económica de la producción del cultivo de papa. El análisis económico se realizó con el propósito de identificar los tratamientos que más beneficios pueden brindar a los agricultores locales de la comunidad Barco Belén y de esta región en términos económicos. Todos los datos de costos de producción (mano de obra, siembra, riego, labores culturales, etc.), fueron calculados para una superficie de 10.000 m<sup>2</sup>, con los rendimientos obtenidos por cada uno de los tratamientos de estudio.

#### **a) Ingreso bruto**

El ingreso bruto es el resultado del rendimiento del cultivo de papa por el precio del mismo en el mercado, por unidad de superficie.

$$IB = R \times P \quad (23)$$

**Donde:**

IB = Ingreso bruto

R = Rendimiento

P = Precio en el mercado

### **b) Ingreso neto**

El ingreso neto es el resultado del ingreso bruto menos los costos de producción.

$$\mathbf{IN = IB - CP} \quad (24)$$

**Donde:**

IN = Ingreso neto

CP = Costos de producción del cultivo

### **c) Relación beneficio/costo**

La relación Beneficio/Costo es una relación de los ingresos brutos sobre los costos de producción, el cual indica rentabilidad de una actividad.

$$\mathbf{B/C = IB/CP} \quad (25)$$

**Donde:**

B/C = Relación beneficio costo

IB = Ingreso bruto

CP = Costos de producción

La relación beneficio/costo (B/C) se determina de la siguiente manera:

**La relación B/C >1:** Los ingresos económicos son mayores a los costos de producción por lo tanto el cultivo con cierto sistema de producción es rentable, el agricultor tiene ingresos.

**La relación B/C = 1:** Los ingresos económicos son iguales a los costos de producción, el cultivo con cierto sistema de producción no es rentable, solo cubre los gastos de producción, el agricultor no gana ni pierde.

**La relación B/C < 1:** Los ingresos económicos son menores a los costos de producción, no existe beneficios económicos, por lo tanto el cultivo con cierto sistema de producción no es rentable, el agricultor pierde.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación de acuerdo con la metodología empleada son los siguientes.

### 5.1. Descripción de las características climáticas de la zona de estudio

En el cuadro 13 se detalla los parámetros climáticos registrados por la estación meteorológica instalada en el lugar de estudio, durante el ciclo del cultivo. Los cuales influyeron en la evapotranspiración de referencia ETo y esta a su vez fue la base en el cálculo de las láminas de riego aplicadas al cultivo.

**Cuadro 13 Registro de datos climáticos promedios mensuales durante el desarrollo vegetativo del cultivo de papa, en la comunidad Barco Belén, Gestión 2011 - 2012.**

Mes	T Med (°C)	T Max (°C)	T Min (°C)	Humedad Relativa (%)	Punto de Rocío (°C)	Velocidad del Viento (km/h)	Viento frio (°C)	Bar (bar)	Precipitación (mm)	Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	ETo (mm)
Nov	9,6	20,4	-0,1	72,2	4,3	12,1	8,0	1005,4	3,4	300,1	147,5
Dic	9,3	19,1	-0,6	78,7	5,5	11,4	7,6	1005,6	22,6	270,1	127,0
Ene	8,8	16,8	1,8	82,7	5,9	9,2	7,5	1006,6	21,0	268,9	113,0
Feb	8,4	15,7	0,9	85,6	6,0	7,0	7,5	1006,2	78,4	230,6	87,2
Mar	8,3	16,4	0,6	84,3	5,6	6,8	7,3	1008,5	41,2	252,1	75,9
Abr	8,2	15,7	0,2	83,4	5,3	6,7	7,3	1009,1	17,0	235,7	55,7
<b>Total</b>									<b>183,6</b>		<b>606,3</b>

*Fuente: Elaboración propia en base a registro de datos climáticos.*

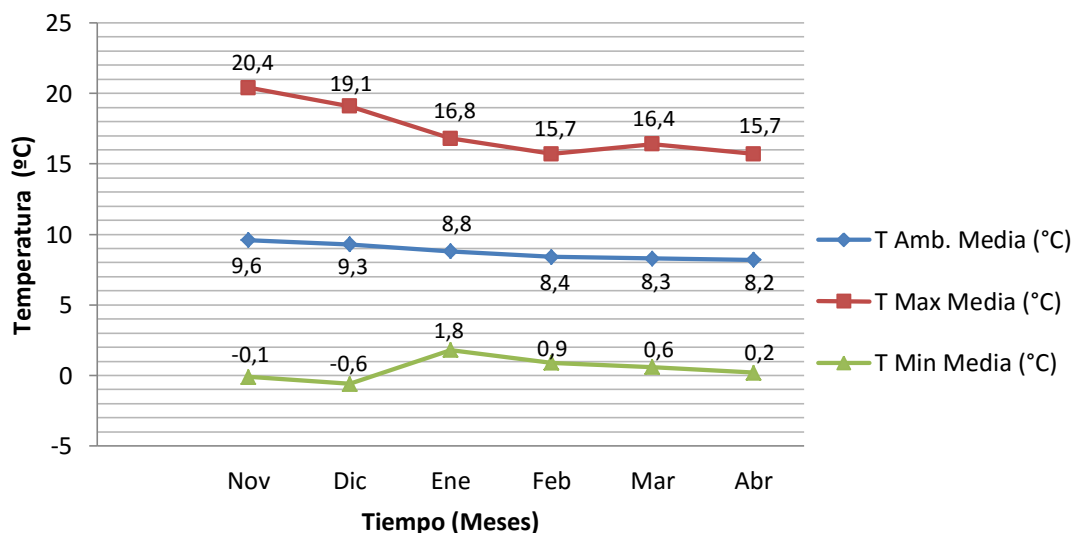
Como se observa en el cuadro 13, las primeras lluvias registradas en la zona, durante el ciclo vegetativo de la papa, se presentaron en el mes de noviembre de 2011. Las temperaturas más elevadas fueron registradas durante el mes de noviembre del mismo



año. Así mismo se muestra las variables de temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y evapotranspiración, entre otros, de los meses de octubre de 2011 a abril de 2012.

### 5.1.1. Evolución de la temperatura durante el periodo vegetativo de la papa

En la figura 11 se describe las temperaturas máxima, mínima y ambiente media durante el ciclo vegetativo del cultivo.



**Figura 11. Comportamiento de la temperatura máxima, mínima y ambiente (°C), registradas del periodo 2011 a 2012, en la comunidad Barco Belén**

Como se observa en la figura 11, las temperaturas registradas en la Estación meteorológica fueron variables oscilando entre -0,6 °C como mínima en el mes de diciembre, y una máxima de 20,4 °C en el mes de noviembre y con medias ambiente desde 8,2 °C en abril hasta 9,6 °C en noviembre. Según Tapia (1990) citado por Quispe (2013), la temperatura adecuada para el cultivo de papa es aquella cuya media anual está entre 6 y 14 °C, siendo así en la presente investigación se tuvo temperaturas media ambiente favorables en virtud que se encuentran en el intervalo mencionado.

### 5.1.2. Evolución de las precipitaciones y la evapotranspiración de referencia durante el periodo vegetativo de la papa

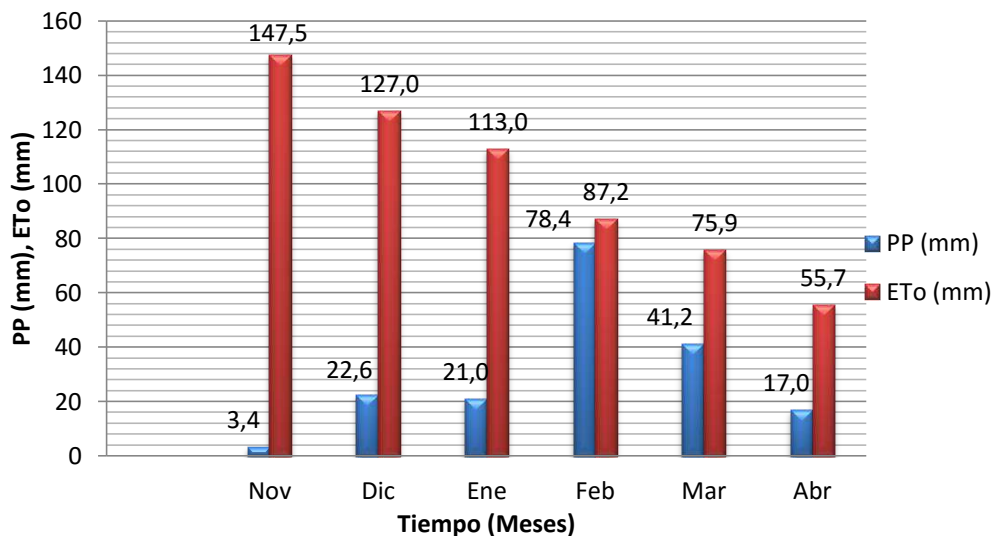
A continuación en el cuadro 14, se detalla la precipitación pluvial y la evapotranspiración de referencia promedio mensuales, registrada por la estación instalada en el lugar, durante el ciclo del cultivo.

**Cuadro 14. Relación entre la precipitación y evapotranspiración de referencia**

<b>Mes</b>	<b>PP (mm)</b>	<b>ETo (mm)</b>	<b>PP/ETo</b>
<i>Noviembre</i>	3,4	147,5	0,02
<i>Diciembre</i>	22,6	127	0,18
<i>Enero</i>	21	113	0,19
<i>Febrero</i>	78,4	87,2	0,90
<i>Marzo</i>	41,2	75,9	0,54
<i>Abril</i>	17	55,7	0,31
<b>Total</b>	<b>183,6</b>	<b>606,3</b>	<b>0,30</b>

**Fuente:** elaboración propia en base datos meteorológicos estación Barco Belén 2011-2012.

Como se observa en el cuadro 14, el promedio mensual registrado de la evapotranspiración fue siempre mayor a la precipitación. En noviembre la relación precipitación / evapotranspiración fue de 0,02 aumentando en diciembre que fue de 0,18, en enero fue de 0,19. Este valor aumento bruscamente en el mes de febrero a 0,90 siendo este el mayor pico, para luego disminuir en marzo a 0,54 y finalmente en el mes de abril a 0,31. Se aprecia que en el mes de febrero hubo mayor precipitación pluvial, en cambio noviembre fue el mes con menor presencia de lluvia.



**Figura 12. Comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ETo), y la precipitación pluvial (PP) en mm, registradas en el periodo 2011 - 2012, en la comunidad Barco Belén.**

En la figura 12, se observa que los niveles de la ETo, con valores que van desde 55,7 mm en abril hasta 147,5 mm en noviembre, fueron superiores a los aportes de la PP, que van de 3,4 mm en noviembre hasta 78,4 en febrero, y que solo en febrero hubo una PP cercano a la ETo siendo el mes con mayor incidencia de lluvias lo cual favoreció al cultivo, pues este atravesaba la fase de floración y tuberización, que es una fase crítica de requerimiento hídrico, empero no fue suficiente así que se tuvo que aplicar riego.

Durante el mes de noviembre y principios de diciembre el cultivo estaba en la fase de emergencia, en la cual no es crítico el requerimiento hídrico, sin embargo la escasa presencia de la PP no favoreció adecuadamente al cultivo. Continuando con diciembre hasta principios de enero se da la formación de estolones, que es una fase crítica pero la demanda de agua de la ETo sobrepasó de lejos a los aportes de la PP, por lo cual el cultivo se vio en riesgo de sufrir un una marchites severa, entonces desde esta fase se suministró el riego.

Durante el mes de enero la PP no fue suficiente para equilibrar la demanda de la ETo, por lo que se tuvo que aplicar los aportes de riego, ya en febrero se incrementaron las precipitaciones, que cubrirían el requerimiento de agua de la ETo, empero estas precipitaciones fueron insuficientes por lo que se realizaron los riegos de reposición, sin

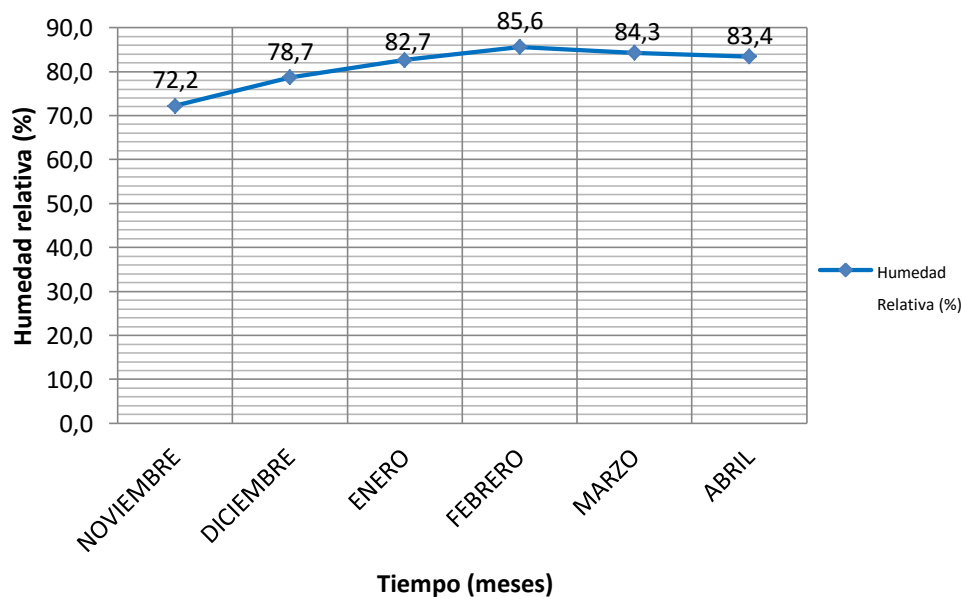
embargo cabe mencionar que la mayor ocurrencia de lluvias en febrero favoreció de manera general a los tres tratamientos del cultivo.

En marzo hasta mediados de abril las precipitaciones disminuyeron y se dio lugar nuevamente a que la ETo sobrepasó a la PP, manifestándose la necesidad de aplicar riego, sin embargo el cultivo se encuentra en la fase de madurez fisiológica en la cual no es crítico el requerimiento hídrico y donde el cultivo es susceptible a la excesiva humedad, por lo que no se aplicó.

Según Contreras (2001) citado por Choque (2015), el cultivo de papa requiere de 500 a 700 mm de agua para obtener altos rendimientos, es así que en el cuadro 14 la demanda hídrica total es de 606,3 mm para el ciclo vegetativo de la papa, sin embargo el aporte total de la PP fue solo de 183,6 mm, dejando en claro que durante el ciclo vegetativo del cultivo de papa, las precipitaciones no cubrieron la demanda hídrica.

### **5.1.3. Evolución de la humedad relativa (HR) durante el periodo vegetativo de la papa**

La humedad relativa del se ha registrado durante el ciclo del cultivo de papa, presentando valores que van desde 72,2 % para noviembre a 85,6 % en febrero, con un promedio de 81,2 % y mostrando un comportamiento particular durante los meses del cultivo, como se muestra a continuación en la figura 13.

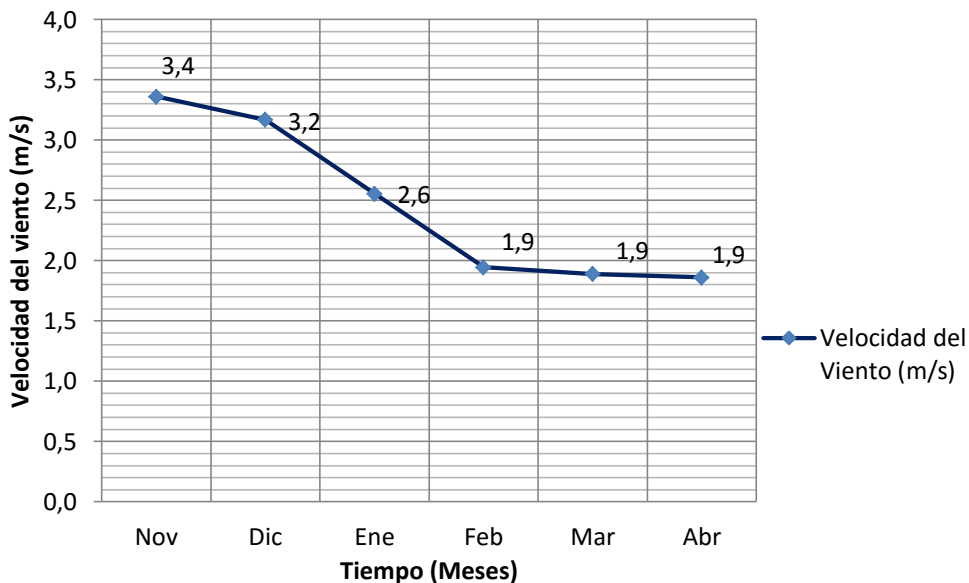


**Figura 13. Comportamiento de la humedad relativa (HR) en %, registradas en la gestión 2011 a 2012, en la comunidad Barco Belén.**

De acuerdo con Sánchez (2003) citado por Mamani (2015), la humedad relativa moderada es un factor muy importante para el éxito del cultivo de la papa. La humedad excesiva en el momento de la germinación del tubérculo y el periodo desde la aparición de las flores hasta la maduración del tubérculo resulta nociva, además de favorecer el ataque de algunas enfermedades como el mildiu, o el tizón tardío, que podrían provocar pérdidas en el rendimiento del cultivo.

#### **5.1.4. Evolución de la velocidad del viento durante el periodo vegetativo de la papa**

Durante el trabajo de campo se observó que la zona de estudio presenta vientos frecuentes que van en dirección sur oeste generalmente, provenientes de la cordillera real al norte, en la cual se ubica el nevado del Illampu. En la figura 14 se puede observar la distribución de la velocidad del viento durante el ciclo vegetativo de la papa.



**Figura 14. Comportamiento de la velocidad del viento en m/s, registradas en la gestión 2011 a 2012, en la comunidad Barco Belén.**

La velocidad del viento alcanzó una media de 2,5 m/s. La velocidad máxima del viento ocurrió en el mes de noviembre llegando a 3,4 m/s, mientras que las mínimas se presentaron en los meses de febrero marzo y abril con un valor de 1,9 m/s. Según Román y Hurtado (2002) citado por Mamani (2015), los vientos para el cultivo de papa deben ser moderados, ya que las plantas no resisten vientos con velocidades mayores a 5,6 m/s, sin que estos causen daños o influyan en los rendimientos. Por lo tanto la velocidad del viento no afectó negativamente al cultivo de papa.

### 5.1.5. Balance hídrico local

En el cuadro 15 y figura 15 se detalla el balance hídrico del área experimental, a partir de los datos de precipitación y temperaturas mensuales (cálculo de la ETP), cuyas mediciones se han obtenido de la estación climática instalada en cercanía a la parcela y la Estación Belén (SENAMHI 2013), que está a menos de 2 Km de nuestra parcela experimental, por lo que sus datos son aplicables. El cálculo de la evaporación potencial (ETP) se lo realizó mediante el método de Thornthwaite.

**Cuadro 15 Balance hídrico del área experimental del periodo 2011-2012, en base a datos de la estación Barco Belén y Estación Belén.**

Mes	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Total
P	0,1	21,2	3,4	22,6	21,0	78,4	41,2	17,0	2,6	2,2	15,4	0,0	225,1
ETPaj	42,6	60,7	61,8	62,6	59,7	50,2	53,2	48,9	33,7	25,1	23,1	33,7	555,4
ETR	0,1	21,2	3,4	22,6	21,0	50,2	53,2	33,2	2,6	2,2	15,4	0,0	225,1
Δ	-42,5	-39,5	-58,4	-40,0	-38,7	28,2	-12,0	-31,9	-31,1	-22,9	-7,7	-33,7	330,3
Alm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,2	16,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44,4
Def	-42,5	-39,5	-58,4	-40,0	-38,7	0,0	0,0	-15,6	-31,1	-22,9	-7,7	-33,7	330,3
Ex	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Δ Alm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,2	-12,0	-16,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Valores en mm. P=precipitación, ETPaj=evapotranspiración potencial ajustada, ETR=evapotranspiración real, Δ=diferencia entre precipitación y evapotranspiración, Alm=almacenaje de agua útil, Def.=déficit, Ex =excedentes, Δ Alm = variación de almacenaje de agua útil.

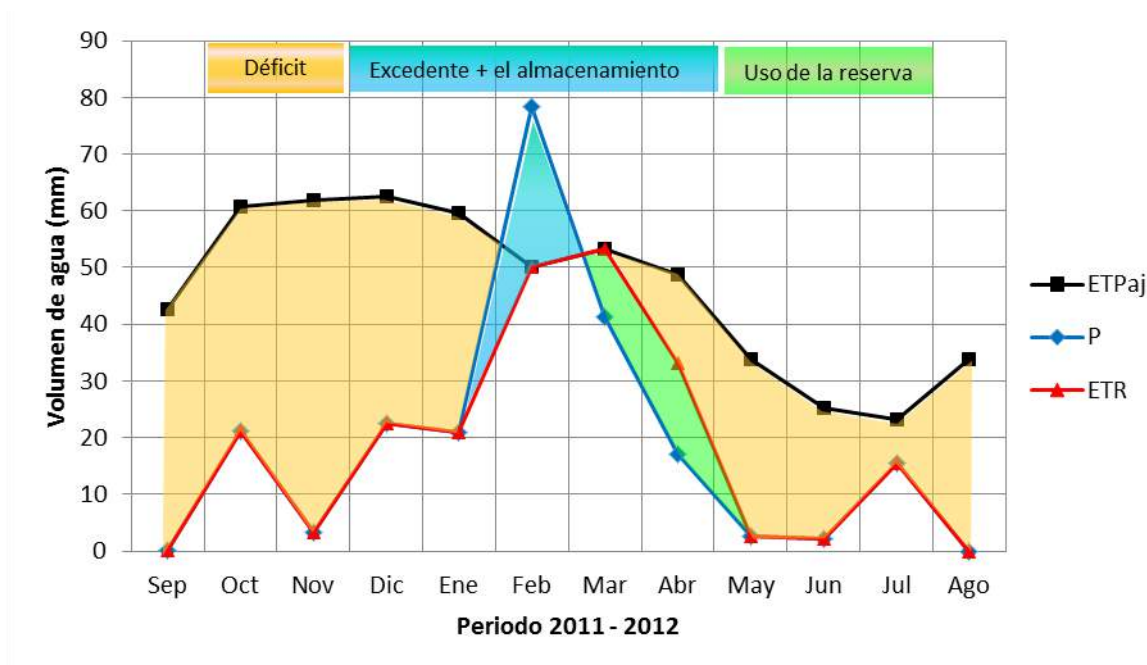
Para el balance hídrico se verificó mediante la siguiente igualdad, ecuación (26):

$$ETPaj + Ex. = P + Def. \quad (26)$$

$$555,4 \text{ mm} + 0,0 \text{ mm} = 225,1 \text{ mm} + 330,3 \text{ mm}$$

$$555,4 \text{ mm} = 555,4 \text{ mm}$$

La ecuación (26) nos muestra valores de balance de 555,4 mm para ambos componentes del balance, por lo cual se asume el balance como correcto.



**Figura 15. Balance hídrico local de la zona de estudio.**

En la figura 15, de acuerdo al balance hídrico, del periodo 2011 – 2012, para el cultivo de papa que inició al principio de noviembre (emergencia), hasta mediados de abril (cosecha), se tiene los siguientes resultados:

En base al ciclo vegetativo de la papa, desde noviembre hasta mediados de enero se observa un déficit por la escasa precipitación (P), por lo que correspondería el riego. En noviembre hasta principios de diciembre el cultivo se encuentra en la fase de emergencia y en base al concepto de RDC no se aplicó riego porque no es una fase fenológica crítica en requerimiento hídrico, continuando con diciembre hasta principios de enero se da la formación de estolones, que es una fase crítica entonces se suministró riego.

Desde mediados de enero hasta principios de marzo, se incrementaron las precipitaciones permitiendo un excedente y/o almacenamiento, que aparentemente cubriría el requerimiento de agua. Estas precipitaciones fueron insuficientes y tardías por lo que se realizaron los riegos de reposición, hasta principios de febrero, debido a que el cultivo se encuentra en la fase de floración y tuberización, de requerimiento hídrico crítico, continuando con febrero hasta principios de marzo no fue necesario la aplicación de riego por que las precipitaciones fueron superiores a la evapotranspiración potencial ajustada (ETPaj), cubriéndose de esta manera el requerimiento hídrico del cultivo.

Continuando con marzo hasta mediados de abril las precipitaciones disminuyeron, sin embargo se tenía un cierto almacenamiento, por lo cual se dio lugar a un uso de la reserva de agua, y por otro lado se inicia el segundo déficit del balance. En este último periodo, hasta culminar con la cosecha el 18 de abril, el uso de la reserva de agua y también un déficit, manifiestan la necesidad de aplicar riego, sin embargo el cultivo se encuentra en la fase de madurez fisiológica en la cual no es crítico el requerimiento hídrico, es más el cultivo es susceptible a la excesiva humedad, por lo que no se aplicó riego.




## 5.2. Descripción de las características edáficas de la zona de estudio

### 5.2.1. Descripción del perfil del suelo

La descripción del perfil del suelo fue realizada mediante la excavación de una calicata en la parcela experimental, procediendo según la FAO (1977b) de la siguiente manera: el sitio se ubica a los 16° 01'25" Latitud sur y 68°42'45" Longitud oeste, a una altitud de 3837 m.s.n.m., a 25 m del río Keka, la forma y relieve del terreno es plana y la posición fisiográfica corresponde a una llanura aluvial con una pendiente de 0 – 2%.

En la parcela se observó rastros de un cultivo anterior, presenta vegetación como ser paja brava y chilliwa. No se observó la presencia de material parental, el drenaje aparentemente de clase 3 (Moderadamente bien drenado), humedad del suelo visible a partir de los 10 cm de profundidad, la profundidad de la napa freática no visible, ausencia de piedras y afloramientos de roca, sin evidencia de erosión hídrica, evidencia de erosión eólica visible, presencia de afloramiento salino ausente y con presencia de influencia humana.

	<i>Ho: A1</i> <i>Prof.: 0 – 21 cm</i> <i>Textura: Franco Arcilloso</i>
	<i>Ho: A2</i> <i>Prof.: 21 – 37 cm</i> <i>Textura: Franco Arcilloso</i>
	<i>Ho: C1</i> <i>Prof.: 37 – 54 cm</i> <i>Textura: Arcilloso arenoso</i>
	<i>Ho: C2</i> <i>Prof.: &gt; 54 cm</i> <i>Textura: Arena</i>

**Figura 16. Descripción del perfil del suelo en donde se diferencian 4 horizontes (Ho).**

En la figura 16, se observan cuatro horizontes claramente diferenciados, los cuales se describen a continuación.

**Ho: A1 (0 – 21 cm)**

Textura: Franco arcilloso; estructura de tipo granular de grado moderado y clase media; de consistencia en mojado adherente y plástico, firme en húmedo y duro en seco; porosidad fina; raíces finas y límite gradual plano.

**Ho: A2 (21 – 37 cm)**

Textura: Franco arcilloso; estructura de tipo granular moderado y clase media; de consistencia en mojado adherente y plástico, firme en húmedo y duro en seco; porosidad fina; presencia de raíces muy finas y límite del horizonte neto.

**Ho: C1 (37 - 54 cm)**

Textura: Arcilloso arenosa; estructura de tipo granular débil y clase fina; consistencia ligeramente adherente y ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo y blando en seco; abundantes poros con diámetro medio; raíces muy finas y pocas; el límite de este horizonte es brusco.

**Ho: C2 (> 54 cm)**

Textura: Arenosa; sin estructura; consistencia no adherente y no plástico, suelto en húmedo y suelto en seco; abundantes poros gruesos; sin presencia de raíces y sin límite visible del horizonte.

Se hizo el análisis físico de la capa arable del suelo con el fin de obtener una descripción más precisa de la zona radicular de la papa. Dicha labor fue realizada por el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuaria de la Universidad Mayor de San Simón tal como se muestra en el cuadro 16.

**Cuadro 16 Resultados del análisis físico del suelo**

<b>Identificación</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Textura</b>	<b>Arcilla (%)</b>	<b>Limo (%)</b>	<b>Arena (%)</b>
Muestra de suelo (M1) Com. Barco Belén	0-30	FY	29	44	27

**Fuente:** Elaboración propia en base al Análisis de Laboratorio (UMSS).

Como se observa en el cuadro 16, la capa arable del suelo presentó una textura franco arcillosa (FY), y en la figura 16, la descripción del perfil del suelo muestra que los horizontes superficiales A1 y A2, que alcanzan una profundidad de 37 cm son de textura franco arcillosa, al respecto Pardave (2004) citado por Guerra (2012), menciona que el desarrollo radicular de la papa (45 cm de profundidad) es más óptimo en suelos franco arenosos, y según el CENTA (2002) los mejores suelos son los francos, franco arenosos, franco limosos y franco arcillosos, con una profundidad efectiva de 50 cm y una Dap de 1,20 g/cm<sup>3</sup> aproximadamente.

En la presente investigación se evidencio que el crecimiento y desarrollo radicular de la papa cuenta con buenas condiciones, en un suelo franco arcilloso (FY), y una profundidad efectiva de 50 cm aproximadamente, tal como lo señala el CENTA (2002), esto se refleja en los rendimientos alcanzados que son superiores al rendimiento local.

En complementación, la densidad aparente fue determinada por el método del cilindro muestreador descrito en el acápite de metodología, para ello se tomaron 8 muestras de suelo para luego calcular el promedio, como se muestra en el cuadro 17.

**Cuadro 17 Densidad aparente del suelo**

<b>Muestra</b>	<b>Masa de suelo seco ms (g)</b>	<b>Volumen del cilindro (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1	134,04	98,18	1,37
2	134,39	98,18	1,37
3	133,65	98,18	1,36
4	132,10	98,18	1,35
5	126,16	98,18	1,29
6	127,00	98,18	1,29
7	129,20	98,18	1,32
8	135,15	98,18	1,38
Promedio	131,46	98,18	1,34

**Fuente:** Elaboración propia

La densidad aparente (Dap) presentó un valor de 1,34 g/cm<sup>3</sup>, al respecto el CENTA (2002) menciona el requerimiento del cultivo de papa, de la Dap de 1,20 g/cm<sup>3</sup> aproximadamente. En el presente trabajo de investigación la Dap del suelo no presentó efectos negativos en el comportamiento del cultivo.

### 5.3. Descripción del análisis del agua para riego

La calidad Físico – química del agua de riego, se determinó mediante la consideración de dos parámetros principales que son la conductividad eléctrica (C.E) y la Relación de Absorción de Sodio (RAS), en base en los análisis obtenidos en laboratorio, como se muestra en el cuadro 18.

**Cuadro 18 Resultados del análisis físico-químico del agua**

Nº	Parámetro	Resultado	Unidades
1	pH	7,53	-
2	Conductividad eléctrica (C.E.)	108,70	µS/cm
3	Sodio (Na)	4,92	mg/L
4	Potasio (K)	1,53	mg/L
5	Calcio (Ca)	5,87	mg/L
6	Magnesio (Mg)	2,69	mg/L
7	Cloruros (CL)	2,76	mg/L
8	Carbonatos (C)	0,00	mg/L
9	Bicarbonatos (BC)	30,25	mg/L
10	Sulfatos (S)	13,05	mg/L
11	Sólidos suspendidos (SS)	9,00	mg/L
12	Sólidos totales (ST)	75,41	mg/L
13	Sólidos disueltos (SD)	66,41	mg/L
14	Boro (B)	0,72	mg/L

**Fuente:** Análisis físico químico de aguas (IBTEN).

El valor de la C.E. según el cuadro 18, es de 108,70 µS/cm, lo cual nos indica, que se encuentra dentro de los límites permisibles que son de 0 – 250 µS/cm establecidos según Pizarro, mencionado por Padilla (2014) perteneciendo a la Clase 1 (C1), que se pueden utilizar para riego en la mayoría de los cultivos sin problemas y en cualquier tipo de suelo.

La RAS calculada alcanzó un valor de 0,41 este parámetro según la FAO (1977a), manifiesta un rango óptimo encontrándose de 0 a 15, de concentración relativa y absoluta de cationes en el agua, bajo este referente, la muestra pertenece a la clasificación S1, agua con poco sodio.

La clasificación del agua para riego proveniente del río Keka, de la comunidad Barco Belén, corresponde a la Clase C1 – S1, la misma que se caracteriza por ser agua de buena calidad, apta para el riego en la mayoría de los cultivos, con poca presencia de sales y en sodio.

#### **5.4. Variables de riego**

##### **5.4.1. Agua total aplicado al cultivo, riego más la precipitación efectiva**

El volumen total de agua que fue aplicada al cultivo de papa corresponde a la suma de la precipitación efectiva (Pe) más el riego (R), (R+Pe), de esta manera el volumen total de agua recibido por el cultivo durante su ciclo vegetativo de 173 días desde la siembra hasta la cosecha se muestra en el cuadro 19.

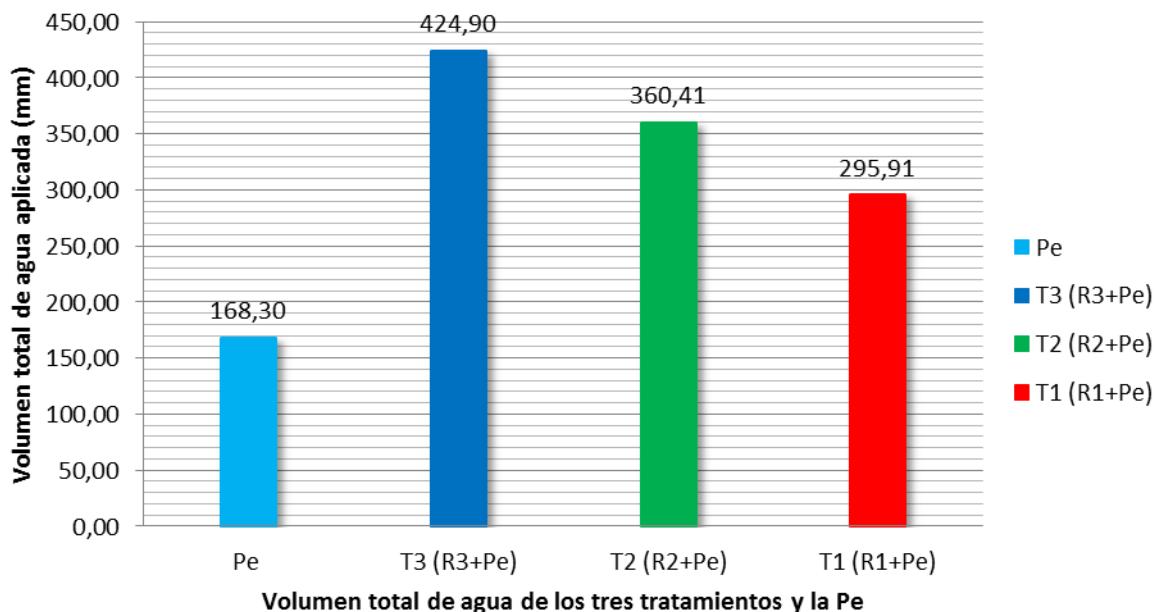
De acuerdo con el cuadro 19, el volumen total de agua aplicada (R+Pe), para el tratamiento T3 (100% de la lámina de riego calculada), fue de 4.249,0 m<sup>3</sup>/ha, el T2 (75 % de la lámina de riego) alcanzó un valor de 3.604,0 m<sup>3</sup>/ha, y del T1 (50 % de lámina de riego) fue de 2.959,0 m<sup>3</sup>/ha. El volumen de aporte de agua por la Pe, fue por igual para los tres tratamientos con un valor de 1.683,0 m<sup>3</sup>/ha, en consecuencia el agua total aplicada en términos porcentuales respecto al T3 que es el 100% de lámina de agua recibido por el cultivo, sufrió un cambio en niveles de aporte de agua, para el T2 con 85 % y para el T1 de 70 %, no así para el T3 manteniendo una reposición de agua total del 100 %.

**Cuadro 19 Aporte total de agua al cultivo de papa, (Pe+R) en los tres tratamientos**

Nº de Evaluación	T1			T2			T3		
	Pe (mm)	R1 (mm)	R1+Pe (mm)	Pe (mm)	R2 (mm)	R2+Pe (mm)	Pe (mm)	R3 (mm)	R3+Pe (mm)
Emergencia	3,06	0,00	3,06	3,06	0,00	3,06	3,06	0,00	3,06
1	2,88	17,52	20,40	2,88	17,52	20,40	2,88	17,52	20,40
2	0,18	10,19	10,37	0,18	15,28	15,46	0,18	20,37	20,55
3	5,40	9,00	14,40	5,40	13,50	18,90	5,40	18,00	23,40
4	1,80	12,91	14,71	1,80	19,37	21,17	1,80	25,82	27,62
5	7,38	2,99	10,37	7,38	4,48	11,86	7,38	5,97	13,35
6	2,34	8,28	10,62	2,34	12,41	14,75	2,34	16,55	18,89
7	1,80	7,02	8,82	1,80	10,52	12,32	1,80	14,03	15,83
8	1,08	11,87	12,95	1,08	17,81	18,89	1,08	23,74	24,82
9	0,72	10,71	11,43	0,72	16,06	16,78	0,72	21,41	22,13
10	0,36	9,28	9,64	0,36	13,91	14,27	0,36	18,55	18,91
11	0,36	6,60	6,96	0,36	9,89	10,25	0,36	13,19	13,55
12	14,94	2,81	17,75	14,94	4,22	19,16	14,94	5,62	20,56
13	6,30	1,87	8,17	6,30	2,81	9,11	6,30	3,74	10,04
14	1,98	6,79	8,77	1,98	10,18	12,16	1,98	13,57	15,55
15*	15,48	0,00	15,48	15,48	0,00	15,48	15,48	0,00	15,48
16*	28,80	0,00	28,80	28,80	0,00	28,80	28,80	0,00	28,80
17*	10,44	0,00	10,44	10,44	0,00	10,44	10,44	0,00	10,44
18*	7,20	0,00	7,20	7,20	0,00	7,20	7,20	0,00	7,20
19*	8,82	0,00	8,82	8,82	0,00	8,82	8,82	5,82	14,64
20*	19,26	0,00	19,26	19,26	0,00	19,26	19,26	0,00	19,26
21	0,36	0,66	1,02	0,36	10,45	10,81	0,36	14,41	14,77
22	7,02	3,41	10,43	7,02	5,12	12,14	7,02	6,82	13,84
23	1,98	5,74	7,72	1,98	8,60	10,58	1,98	11,47	13,45
Cosecha	18,36	0,00	18,36	18,36	0,00	18,36	18,36	0,00	18,36
<b>Total L/m2</b>	<b>168,30</b>	<b>127,61</b>	<b>295,91</b>	<b>168,30</b>	<b>192,10</b>	<b>360,40</b>	<b>168,30</b>	<b>256,60</b>	<b>424,90</b>
<b>Total m³/ha</b>	<b>1.683,0</b>	<b>1.276,0</b>	<b>2.959,0</b>	<b>1.683,0</b>	<b>1.921,0</b>	<b>3.604,0</b>	<b>1.683,0</b>	<b>2.566,0</b>	<b>4.249,0</b>
<b>Agua aplicada respecto al total del T3 (%)</b>	<b>70</b>			<b>85</b>			<b>100</b>		
<b>Disminución de agua respecto al T3 (%)</b>	<b>30</b>			<b>15</b>			<b>0</b>		

**Fuente:** Elaboración propia. (\*Son láminas de riego cubiertas por la Pe, cuando la Pe>ETo y no se aplicaron los riegos o disminuyeron por la compensación del agua de almacenamiento).

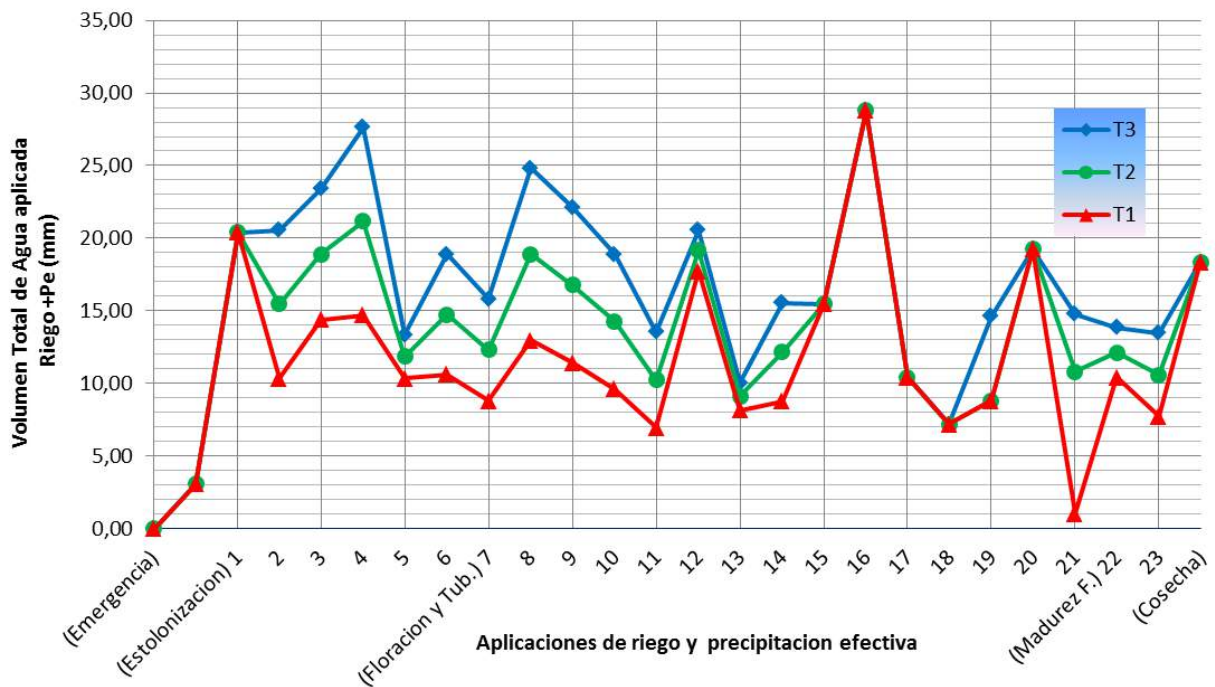
A continuación se ilustra el agua total aplicada al cultivo, en la figura 17.



**Figura 17. Volumen total de agua aplicado (Riego + Precipitación efectiva)**

El volumen de agua aplicada durante el ciclo vegetativo del cultivo, según la figura 17, es de 424,90 mm para el T3, 360,41 mm del T2 y 295,91 mm el T1, al respecto (Vásquez, citado por Pacheco y Pérez 2010), menciona un rango para el cultivo de papa de 400 a 800 mm, y Sánchez (2003) citado por Mamani (2015), que señala un rango de 500 a 700 mm. Entonces los volúmenes totales aplicados en el presente ensayo están por debajo del intervalo indicado a excepción del T3, pero considerando que el riego se aplicó desde la fase de estolonización hasta inicios de la madurez fisiológica y no durante la emergencia y gran parte de la madurez fisiológica, el agua aplicada en los tres tratamientos responde al concepto del RDC, que contempla un concepto de déficit hídrico en las fases menos susceptibles.

Los volúmenes de agua aplicada al cultivo fueron diferentes durante las distintas fases fenológicas del ciclo vegetativo, tal como se muestra a continuación.

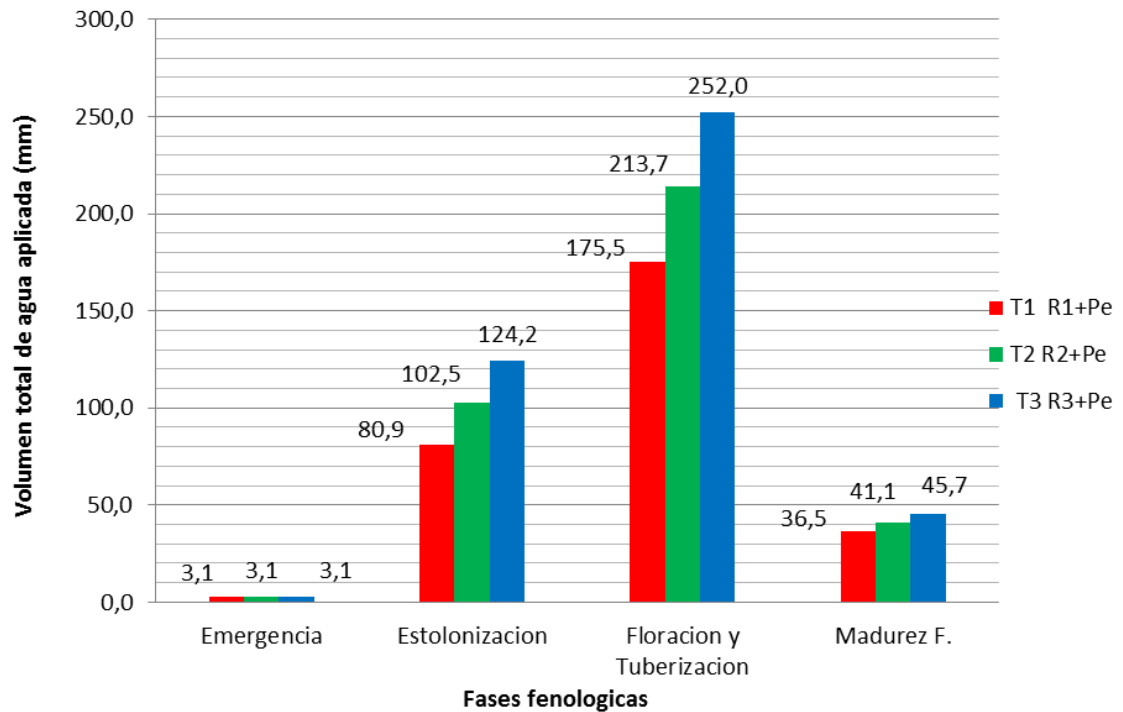


**Figura 18. Volúmenes de agua aplicado (Riego+Pe) durante el ciclo vegetativo del cultivo de papa.**

Según el cuadro 19 y la figura 18, se describe la evolución del agua aplicada de los tres tratamientos, mostrando que no hubo riego durante la fase de emergencia pero si un aporte de agua por la Pe, en cambio en las fases de formación de estolones, floración y tuberización, hasta inicios de la madurez fisiológica el cultivo recibió agua tanto del riego como por la Pe, y durante la mayor parte de la madurez fisiológica hasta la cosecha solo hubo el aporte de agua de la Pe. Nótese que el mayor volumen de agua (29 mm), y número de aplicaciones con 15 veces (7 al 21) corresponden a la fase de floración y tuberización.

Por otro lado, el volumen aproximado de agua aplicada en las diferentes fases fenológicas del cultivo, se muestran a continuación.

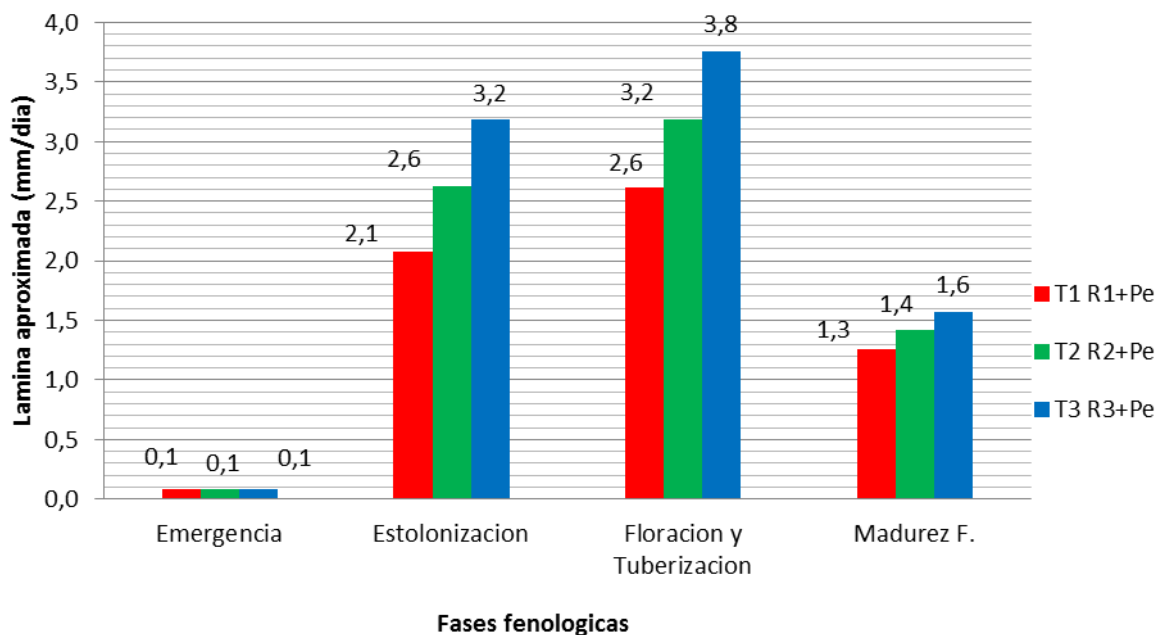




**Figura 19. Volumen aproximado de agua (Riego + Pe), aplicado en las diferentes fases fenológicas del cultivo de papa.**

En la figura 19, para los volúmenes aproximados de agua, aplicados en las diferentes fases fenológicas, se destacan la estolonización con 80,9 el T1, 102,5 el T2 y 124,2 en el T3, y la fase de floración y tuberización con 175,5 el T1, 213,7 el T2 y 252,0 mm el T3, esta última fase se distingue por mostrar mayores volúmenes de agua aplicadas. Al respecto de acuerdo con la FAO (2008), la falta de agua durante la estolonización, el inicio de la formación de los tubérculos y el crecimiento de los mismos reduce los rendimientos, mientras que el cultivo sufre menos la falta de agua al inicio del crecimiento vegetativo, entonces el agua aplicada se encuentra conforme a los requerimientos hídricos del cultivo que es crítico en su fase de floración y tuberización y estolonización.

Por otro lado el volumen aproximado, aplicado por día se muestra a continuación.



**Figura 20. Volumen de agua aproximado (Riego + Pe), aplicada por día en las diferentes fases fenológicas del cultivo de papa.**

En la figura 20, se presenta las diferentes láminas de agua aplicadas (R+Pe), por tratamiento y por fase fenológica, donde las más bajas están en la fase de emergencia con 0,1 mm/día y las más altas en la fases de floración y tuberización con 2,6 mm/día el T1, 3,2 mm/día el T2 y 3,8 mm/día el T3; seguido por la fase de estolonización, donde se encuentran láminas de 2,1 mm/día el T1, 2,6 mm/día el T2 y 3,2 mm/día el T3; finalmente la fase de madurez fisiológica presenta láminas en mm/día de, 1,3 el T1, 1,4 el T2 y 1,6 el T3.

Con relación al requerimiento hídrico diario Vásquez, citado por Pacheco y Pérez (2010), mencionan que el uso diario varía desde los 0,2 mm/día durante etapas iniciales hasta 5 mm/día en etapas de máximo follaje, luego baja hasta 3 mm/día en los días antes de la maduración completa. En el presente ensayo las láminas de agua aplicadas se encuentran dentro del rango de uso diario del cultivo, en las fases críticas de floración y tuberización seguido por la fase de formación de estolones como se describe en la figura 20.

## 5.4.2. Agua total aplicada mediante riego

El riego fue la aplicación de agua adicional a las PP que no cubrieron la demanda de la ETo. Desde la formación de estolones hasta la floración y tuberización, restringiendo el riego en las demás fases según el concepto del RDC, detallándose en el cuadro 20.

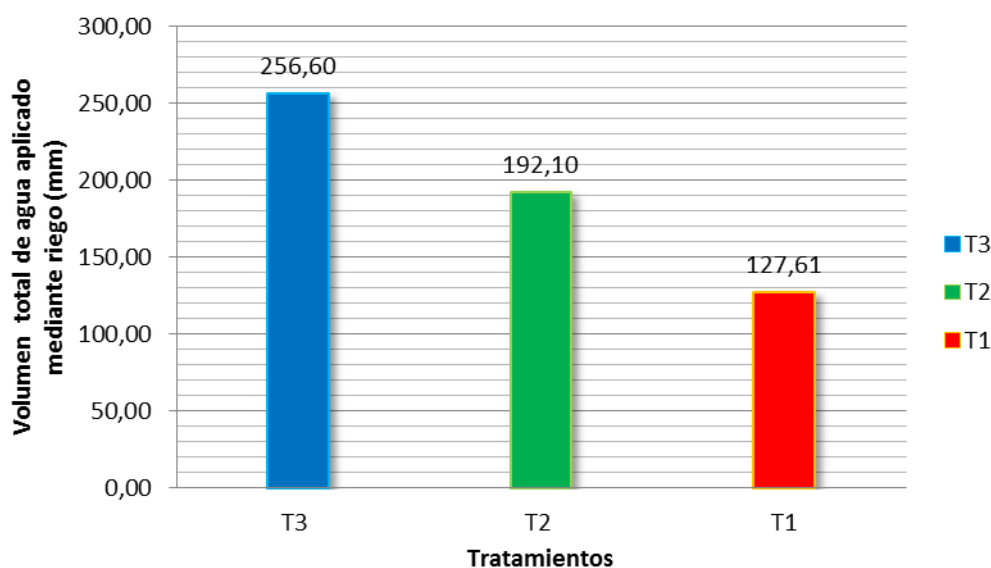
**Cuadro 20 Láminas de riego (R) aplicadas, en base a ETo y Pe.**

<b>Fase Fenológica</b>	<b>Nº de Riego</b>	<b>ETo (mm)</b>	<b>Pe (mm)</b>	<b>Lamina de Riego (R) ETo – Pe (mm)</b>	<b>R3 T3 100%, (mm)</b>	<b>R2 T2 75%, (mm)</b>	<b>R1 T1 50%, (mm)</b>
<b>Emergencia</b>		147,50	3,06	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Formación de Estolones</b>	1	20,40	2,88	17,52	17,52	17,52	17,52
	2	20,55	0,18	20,37	20,37	15,28	10,19
	3	23,40	5,40	18,00	18,00	13,50	9,00
	4	27,62	1,80	25,82	25,82	19,37	12,91
	5	13,35	7,38	5,97	5,97	4,47	2,99
	6	18,89	2,34	16,55	16,55	12,41	8,28
<b>Floración y Tuberización</b>	7	15,83	1,80	14,03	14,03	10,52	7,02
	8	24,82	1,08	23,74	23,74	17,81	11,87
	9	22,13	0,72	21,41	21,41	16,06	10,71
	10	18,91	0,36	18,55	18,55	13,91	9,28
	11	13,55	0,36	13,19	13,19	9,89	6,60
	12	20,56	14,94	5,62	5,62	4,22	2,81
	13	10,04	6,30	3,74	3,74	2,81	1,87
	14	15,55	1,98	13,57	13,57	10,18	6,79
	15*	14,40	15,48	0,00	0,00	0,00	0,00
	16*	10,97	28,80	0,00	0,00	0,00	0,00
	17*	15,37	10,44	0,00	0,00	0,00	0,00
	18*	18,70	7,20	0,00	0,00	0,00	0,00
	19*	17,12	8,82	5,82	5,82	0,00	0,00
	20*	13,79	19,26	0,00	0,00	0,00	0,00
	21	20,24	0,36	14,41	14,41	10,45	0,66
<b>Madurez Fisiológica</b>	22	13,84	7,02	6,82	6,82	5,12	3,41
	23	13,45	1,98	11,47	11,47	8,60	5,74
<b>Cosecha</b>		65,39	18,36	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Total L/m2</b>		<b>616,37</b>	<b>168,30</b>	<b>256,60</b>	<b>256,60</b>	<b>192,10</b>	<b>127,61</b>
<b>Total m<sup>3</sup>/ha</b>		<b>6.163,70</b>	<b>1.683,00</b>	<b>2.566,00</b>	<b>2.566,00</b>	<b>1.921,03</b>	<b>1.276,05</b>
<b>Agua aplicada respecto a la lámina de riego calculada R, (%)</b>					<b>100</b>	<b>75</b>	<b>50</b>
<b>Disminución de agua respecto a la lámina de Riego calculada R, (%)</b>					<b>0</b>	<b>25</b>	<b>50</b>
<b>Aporte de agua del riego respecto al agua total (R+Pe), (%)</b>					<b>60</b>	<b>55</b>	<b>46</b>

**Fuente:** Elaboración propia. (\* Son laminas que fueron cubiertas por la Pe, cuando Pe>ETo).

En el cuadro 20, se observa que se aplicaron tres láminas diferentes (R1, R2 y R3), correspondientes a los tres tratamientos de estudio, mediante 23 aplicaciones programadas que por las precipitaciones que sobrepasaron la ETo se redujeron a 18 riegos, y cinco fechas en los que no se aplicó riego.

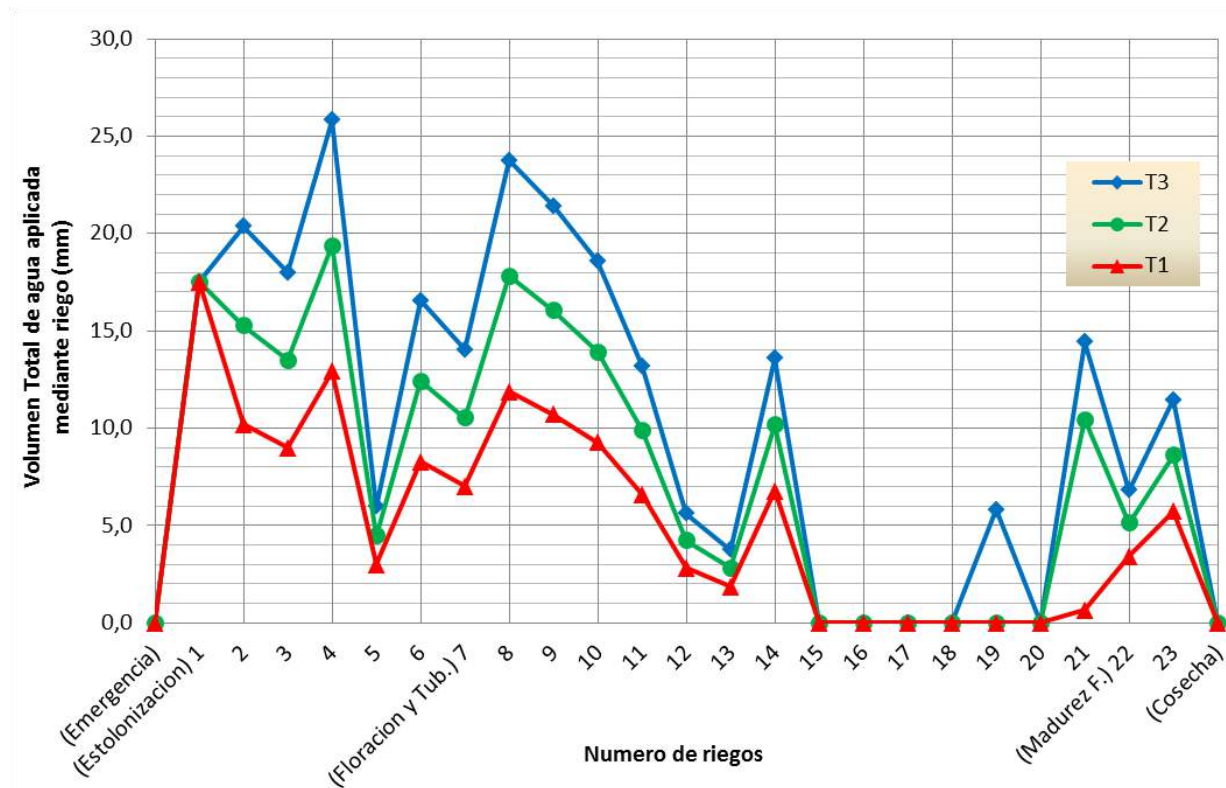
Para el T1, la cantidad de agua aplicada mediante riego fue de 127,61 mm, equivalente a 1.276,05 m<sup>3</sup>/ha, la misma representa el 46 % del total de agua aplicada (R1+Pe); para el T2, el riego fue de 192,10 mm equivalente a 1.921,03 m<sup>3</sup>/ha representado el 55 % del total de agua aplicada (R2+Pe); y en el T3, el riego fue de 256,60 mm equivalente a 2.560,0 m<sup>3</sup>/ha la misma representa el 60 % del total de agua aplicada (R3+Pe). La ETo alcanzó 616,37 mm, la Pe 168,3 mm y la lámina de riego calculada (R) fue de 256,60 mm. Se revela que los volúmenes de aporte de riego en proporción al agua total aplicada (R+Pe) corresponden en promedio, al 53,6 % del agua total recibida por el cultivo.



**Figura 21. Volumen total de agua aplicada mediante riego.**

En la figura 21, se ilustra las diferentes láminas de riego aplicadas, correspondientes a los tratamientos T1, T2 y T3, mostrándose las proporciones de restricción de agua respecto a la lámina de riego calculada (R), que son: del 50 % de restricción hídrica en el T1, un 25 % de restricción del recurso hídrico en el T2 y un 0 % de restricción de agua para el T3, correspondiendo este último al 100 % de la reposición de riego.

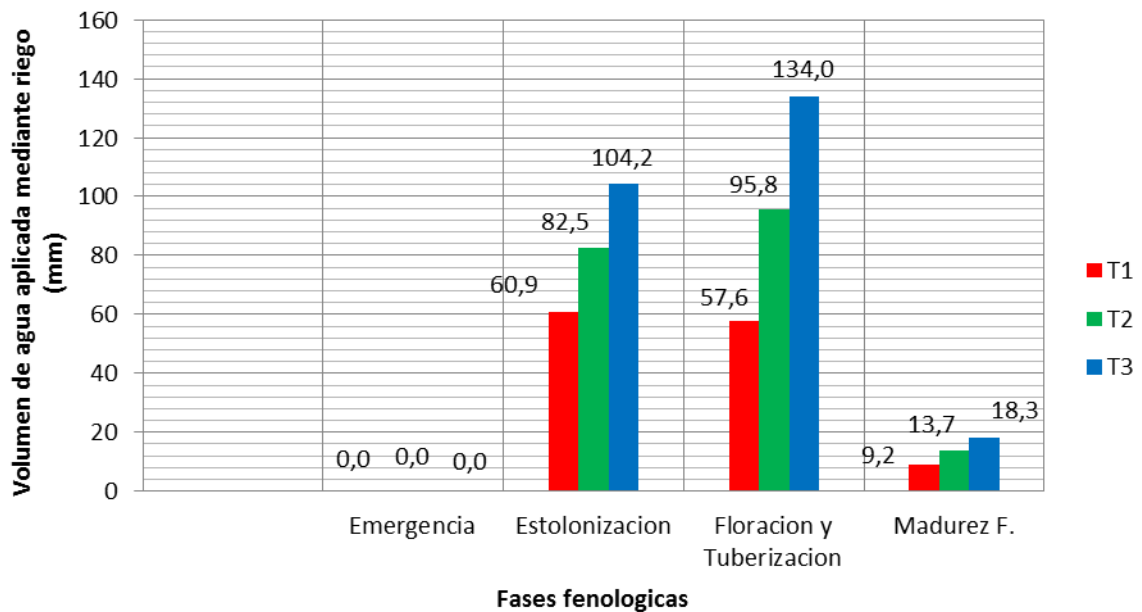
La distribución de riego durante el ciclo vegetativo del cultivo correspondientes a las diferentes fases fenológicas se muestran a continuación en la figura 22.



**Figura 22. Evolución del volumen de agua aplicada mediante riego desde la fase de estolonización hasta inicios de la madurez fisiológica**

Según la figura 22, el riego fue realizado desde la fase de estolonización (riego N° 1) hasta inicios de la madurez fisiológica (riego N° 23), no se aplicó riego en la fase de emergencia y la mayor parte de la madurez fisiológica, debido al concepto del RDC de restringir el agua en las fases menos críticas de menor requerimiento hídrico, aparte de que en la madurez fisiológica el cultivo es sensible al exceso de humedad. Entonces durante las fases de emergencia y casi toda la fase de madurez fisiológica se consideró a la Pe como el único aporte de agua para todos los tratamientos.

Por otro lado se aprecia que el mayor número de aplicaciones de riego con 15 veces (riegos 7 al 21) corresponden a la fase de floración y tuberización, seguido por la fase de estolonización con 6 riegos, y los mayores volúmenes también corresponden a las citadas fases fenológicas tal como se muestran en la siguiente figura 23.



**Figura 23. Volumen de riego aplicado en las diferentes fases fenológicas**

En la figura 23, se muestran los volúmenes de agua aproximados aplicados en las diferentes fases fenológicas, destacándose la estolonización con 60,9 mm en el T1, 82,5 mm en el T2 y 104,2 mm en el T3, del mismo modo en la fase de floración y tuberización con 57,6 mm en el T1, 95,8 mm para el T2 y 134,0 mm en el T3. Esta última fase se distingue por mostrar mayores volúmenes de agua aplicadas al cultivo. Al respecto de acuerdo con Vásquez, citado por Pacheco y Pérez (2010), la papa es relativamente sensible al déficit de agua, por lo que no debe agotarse la reserva de humedad, especialmente durante la formación y crecimiento de los tubérculos (fase de floración y tuberización).

#### **5.4.3. Determinación de la velocidad de infiltración básica (VIB)**

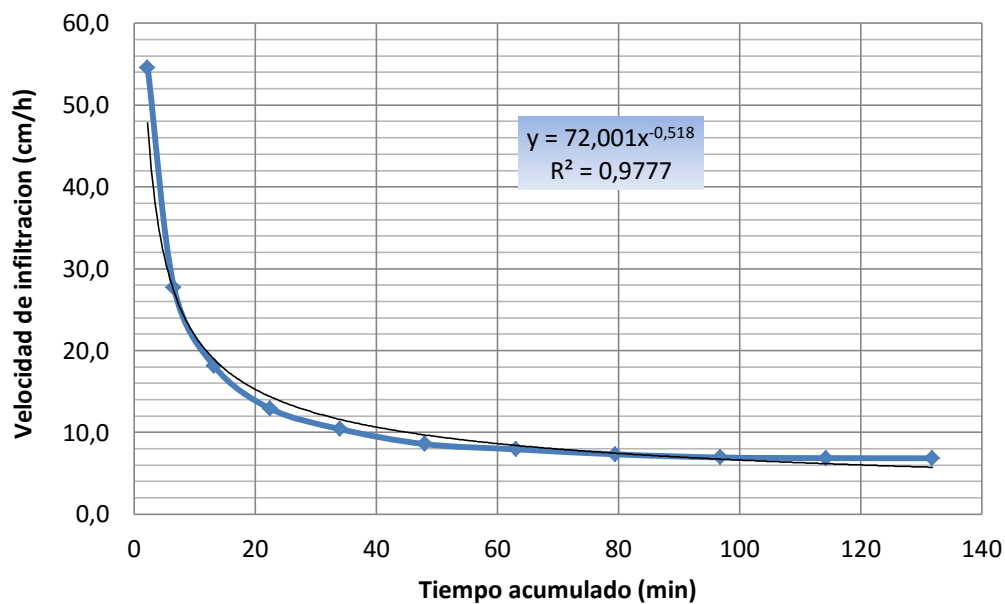
El comportamiento de la infiltración del agua en el suelo se determinó con un fin referencial, mediante el método del cilindro infiltrómetro de doble anillo en la parcela experimental, teniendo como resultados la velocidad o tasa de infiltración ( $V_i$ ), la velocidad de infiltración básica (VIB) y la infiltración o lamina acumulada (I AC), como se muestra a continuación en el cuadro 21 y la figura 24.

**Cuadro 21. Planilla de cálculo de la Velocidad de infiltración**

Nº de lectura	Tiempo acumulado TAC (min)	Infiltración acumulada I AC (cm)	Velocidad de infiltración Vi (cm/h)
1	2	2	54,5
2	7	4	27,7
3	13	6	18,1
4	22	8	12,9
5	34	10	10,4
6	48	12	8,6
7	63	14	7,9
8	80	16	7,3
9	97	18	6,9
10	114	20	6,9
11	132	22	6,8

**Fuente:** Elaboración propia en base a prueba de infiltración en campo.

En el cuadro 21, se observa que la velocidad de infiltración básica (VIB) se alcanza en la lectura Nº 9 con un valor de 6,9 cm/h en un tiempo de 97 minutos, notándose también que la velocidad de infiltración en cada lectura es diferente al pasar el tiempo tal como se muestra en la figura 24.



**Figura 24. Comportamiento de la velocidad de infiltración del agua en el suelo**

En la figura 24, se muestra la curva de infiltración, en la cual se observa en primer lugar la velocidad de infiltración (Vi) que inicia en 54 cm/h y va disminuyendo hasta llegar a

un valor casi constante de 6,9 cm/h (VIB) al cabo de 97 minutos, en ese tiempo se ha acumulado una lámina de agua de 18 cm equivalente a 180 mm (Cuadro 21). Según Cuenca (1989) citado por Serrano (2010) la VIB determinada está en el rango de 13 a 76 mm/hora o 1,3 a 7,6 cm/h, dando a conocer que se trata de un suelo franco arenoso.

La VIB descrita en el ensayo, según Serrano (2010) se clasifica como moderadamente rápida (6 a 12 cm/h), la cual permite un menor tiempo de aplicación del riego, es decir que se puede aplicar un mayor volumen de agua por unidad de tiempo.

En la calicata realizada se observó la presencia de horizontes de textura arenosa, lo que confirma la VIB determinada, cabe mencionar que la parcela experimental se encuentra a 25 m del río KeKa que presenta suelo arenoso.

#### **5.4.4. Contenido de humedad del suelo**

La descripción del contenido de humedad del suelo de la parcela experimental, antes y después de cada riego fue realizada en base a la determinación de la humedad gravimétrica (Hg o U), para lo cual se hizo la toma de muestras inalteradas de suelo (mediante cilindro de muestreo), a una profundidad promedio de 30 cm, cada 5 días en promedio, para luego calcular la humedad volumétrica ( $\Theta$ ), en los tres tratamientos sometidos a riego. A continuación en el cuadro 22, se muestra los resultados obtenidos de humedad volumétrica.

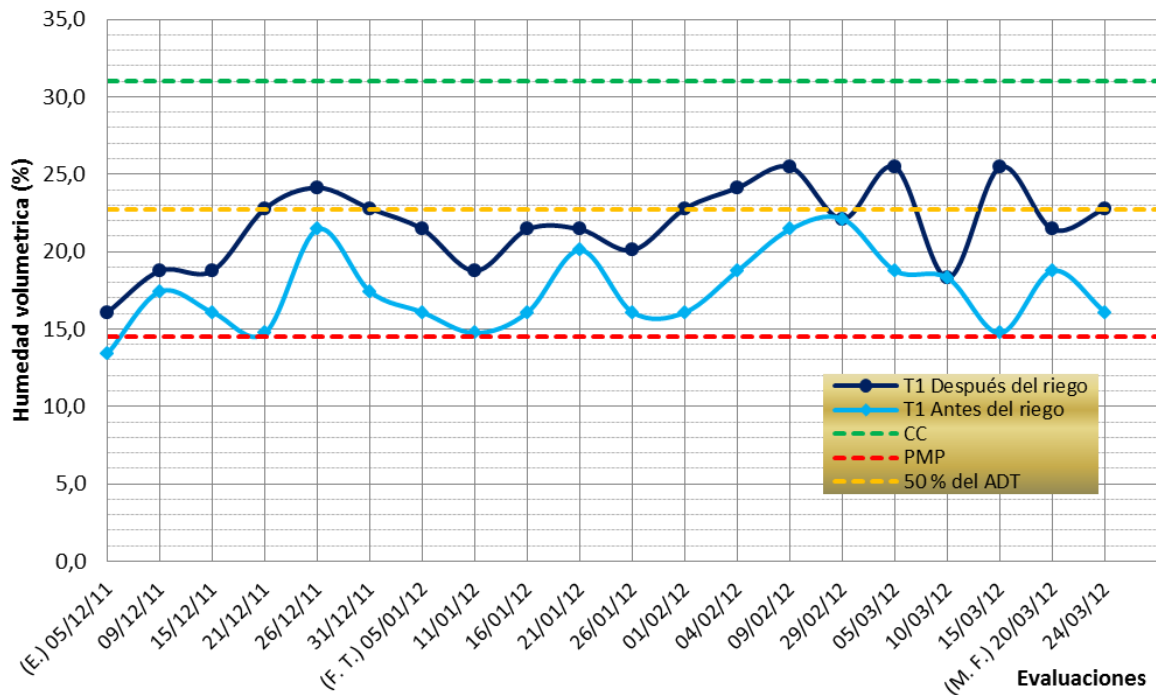


**Cuadro 22. Contenido de humedad volumétrica,  $\Theta$  (%) para los tres tratamientos evaluados antes y después de aplicar riego**

Nº de evaluación	T1		T2		T3	
	Antes del riego	Después del riego	Antes del riego	Después del riego	Antes del riego	Después del riego
1	13,4	16,1	14,7	17,4	14,7	18,8
2	17,4	18,8	16,1	20,1	16,1	24,1
3	16,1	18,8	16,1	20,1	18,8	24,1
4	14,7	22,8	16,1	26,8	20,1	30,8
5	21,4	24,1	26,8	30,8	26,8	32,2
6	17,4	22,8	22,8	26,8	28,1	32,2
7	16,1	21,4	21,4	25,5	25,5	28,1
8	14,7	18,8	22,8	25,5	22,8	26,8
9	16,1	21,4	21,4	26,8	22,8	28,1
10	20,1	21,4	22,8	28,1	25,5	28,1
11	16,1	20,1	24,1	26,8	26,8	30,8
12	16,1	22,8	22,8	26,8	29,5	32,2
13	18,8	24,1	22,8	28,1	29,5	33,5
14	21,4	25,5	25,5	32,2	26,8	33,5
15	22,1	22,1	24,1	24,1	25,9	25,9
16	18,8	25,5	28,1	29,5	22,8	29,5
17	18,3	18,3	22,8	22,8	24,1	24,1
18	14,7	25,5	20,1	28,1	20,1	30,8
19	18,8	21,4	20,1	30,8	21,4	26,8
20	16,1	22,8	24,1	32,2	22,8	30,8

**Fuente.** Elaboración propia.

En el cuadro 22, se muestran los resultados de humedad volumétrica del suelo ( $\Theta$ ) en porcentaje que fueron obtenidos a partir de la humedad gravimétrica (U), y la densidad aparente (Dap) determinadas en campo y laboratorio, ilustrándose estos resultados en las figuras 25, 26 y 27, donde se describen la evolución de la humedad volumétrica ( $\Theta$ ), de los tratamientos T1, T2 y T3, durante las fases de estolonización, floración y tuberización, hasta inicios de la madurez fisiológica, periodos correspondientes a las aplicaciones de riego.



**Figura 25. Humedad volumétrica ( $\Theta$ ) del suelo, para el T1, evaluadas antes y después del riego, durante la fase de: estolonización (E.), floración y tuberización (F.T.) y madurez fisiológica (M.F.)**

En la figura 25, se exponen los resultados de humedad volumétrica del suelo ( $\Theta$ ) para el T1, a capacidad de campo (C.C.) con un valor de 31 % y el punto de marchitez permanente (P.M.P.) mostrando un valor de 14,5 %, en complementación también se traza la línea correspondiente al 50 % del agua disponible total (ADT) que presenta un valor del 22,75 % de la  $\Theta$ , estos parámetros tienen el mismo valor para los 3 tratamientos porque los resultados de laboratorio corresponden de una sola muestra representativa del suelo.

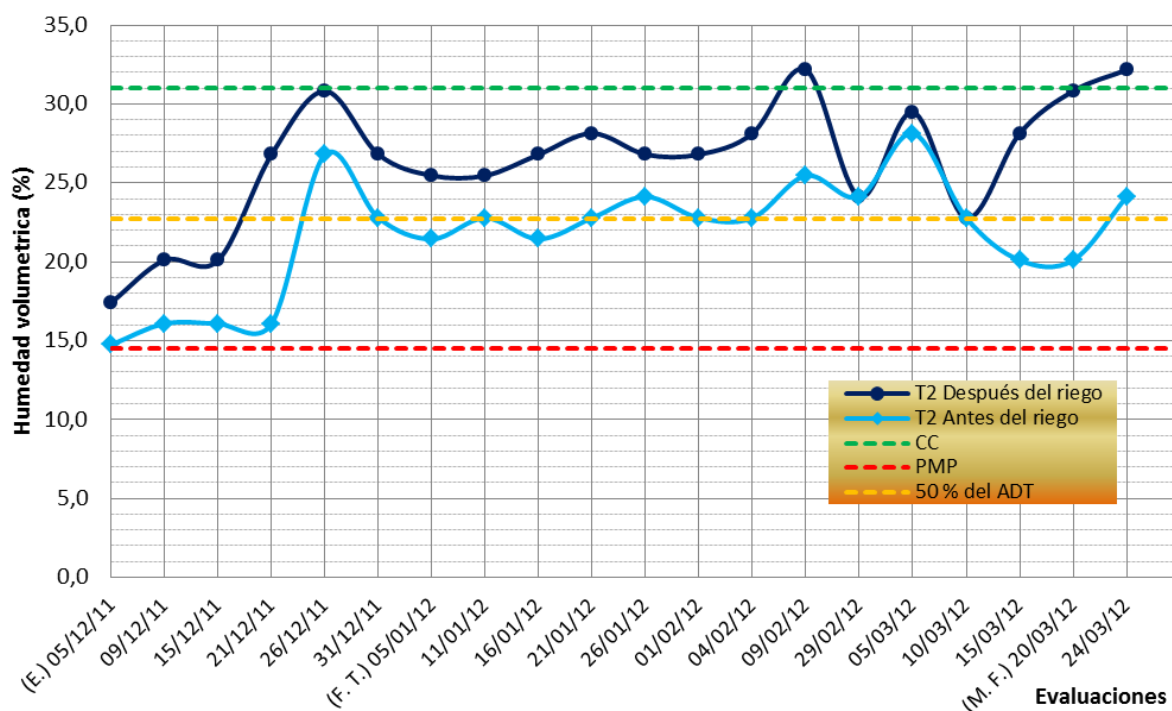
En el tratamiento 1 antes del riego, los niveles de  $\Theta$  se encontraban: en la fase de estolonización entre 14,7 % y 21,4 %, en la floración y tuberización en el intervalo del 14,7 % al 22,1 % y a inicios de la madurez fisiológica se tienen solo dos valores del 16,1 % y 18,8 %. Estos niveles de humedad se encuentran entre el P.M.P. y el nivel del 50 % del ADT.

Después de los riegos la  $\Theta$  presenta niveles que se encuentran alrededor del 50 % del ADT; en la fase de estolonización el intervalo fue del 18,8 al 24,1 %, en la floración y

tuberización fue del 18,3 al 25,5 % y a inicios de la madurez fisiológica la  $\Theta$  se encontraba con valores del 21,4 % y 22,8 %.

En relación a los valores de  $\Theta$  descritos para el T1, Tarjuelo (2005) mencionado por Patty (2009), indica que desde el punto de vista del manejo del agua con el riego, se dejará agotar una parte del intervalo de humedad disponible o reserva útil (ADT), generalmente entre el 30 % y 70 % antes de volver a regar, sin embargo la humedad antes del riego estuvo entre el 50 % y 100 % de agotamiento (en el día de la evaluación) y después de los riegos la humedad se encontró alrededor del 50 %. Se puede afirmar que los niveles de  $\Theta$  mostraron un déficit hídrico momentáneo para la planta.

En cuanto a la  $\Theta$  para el T2 se alcanzó niveles diferentes al T1 tal como se muestra a continuación en la figura 26.



**Figura 26. Humedad volumétrica ( $\Theta$ ) del suelo, para el tratamiento 2, evaluadas antes y después del riego, durante la fase de: estolonización (E.), floración y tuberización (F.T.) y madurez fisiológica (M.F.)**

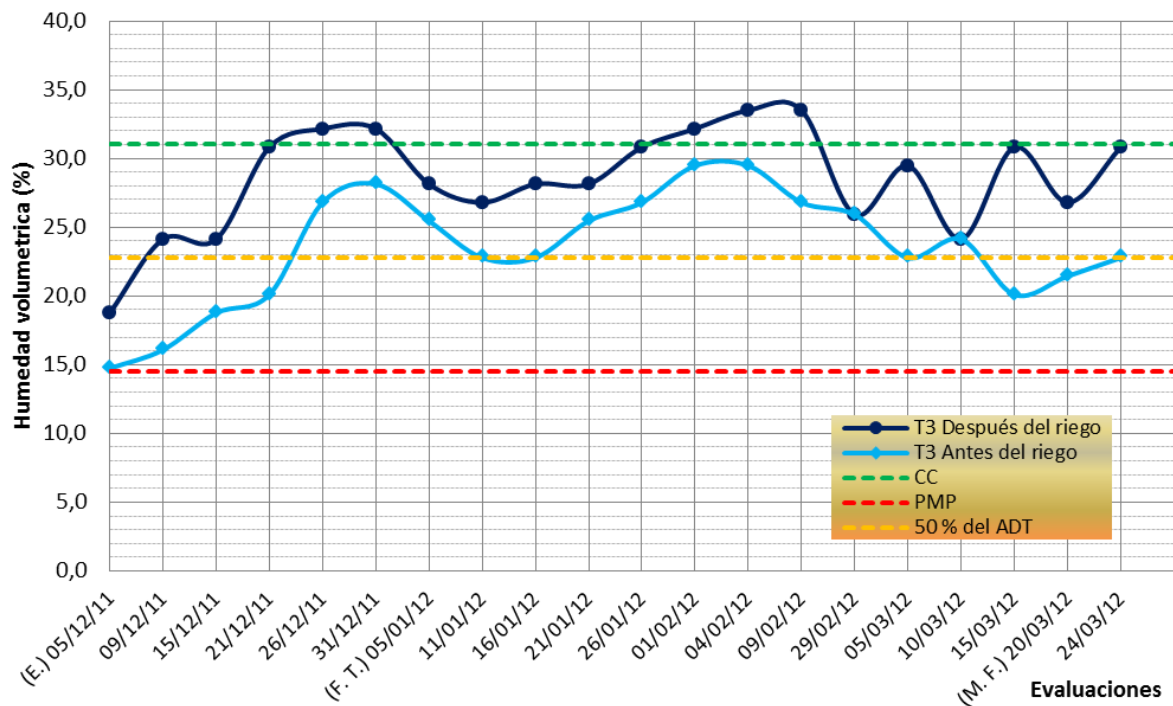
Según la figura 26, los niveles de  $\Theta$  para el T2, antes del riego presentan los siguientes valores: en la fase de estolonización el intervalo de humedad es del 16,1 % al 26,8 %, en la floración y tuberización es del 21,4 al 28,1 % y al principio de la madurez fisiológica se tienen dos valores del 20,1 % al 24,1 %. Estos niveles de humedad se encuentran inicialmente para la primera mitad de la fase de estolonización, entre el P.M.P. y el 50 % del ADT, luego entrando a la floración y tuberización, y a principios de la madurez fisiológica la  $\Theta$  se mantiene alrededor del 50 % del ADT.

La  $\Theta$  después de los riegos, en la fase de estolonización fue del 17,4 % al 30,8 %, en la floración y tuberización se tiene valores del 25,5 % al 32,2 % y a inicios de la madurez fisiológica fue del 30,8 % y 32,2 %. Estos niveles de humedad se sitúan; cerca al 50 % del ADT para la primera mitad de la fase de estolonización, durante la floración y tuberización mayormente alrededor del 25 % de agotamiento del ADT, y a inicios de la madurez fisiológica a nivel de C.C.

Respecto a los niveles de  $\Theta$  para el T2, Tarjuelo (2005) mencionado por Patty (2009), indica que, se dejará agotar una parte del intervalo de humedad disponible o reserva útil (ADT), generalmente entre el 30 % y 70 % antes de volver a regar. En el presente ensayo los niveles de humedad antes del riego, estuvieron dentro de los límites mencionados de agotamiento de agua a excepción del inicio de los riegos en el que estuvieron cercanos al P.M.P.

Después del riego los niveles de humedad estuvieron dentro de los límites de disminución de agua citados, pero también se tuvo algunos valores de  $\Theta$  cercanos y a nivel de C.C.

Por su lado la  $\Theta$  para el T3 alcanzó niveles como se muestran a continuación en la figura 27.



**Figura 27. Humedad volumétrica ( $\Theta$ ) en el suelo, para el tratamiento 3, evaluadas antes y después de riego, durante la fase de estolonización (E.), floración y tuberización (F.T.) y madurez fisiológica (M.F.)**

En la figura 27, los niveles de  $\Theta$  para el T3 antes del riego presentan los siguientes valores: en la fase de estolonización entre el 14,7 % al 28,1 %, en la floración y tuberización es del 20,1 % al 29,5 % y a principios de la madurez fisiológica dos valores del 21,4 % y 22,8 %. Estos niveles de humedad se encuentran para la primera mitad de la fase de estolonización, entre el P.M.P. y el 50 % del ADT, luego entrando a la floración y tuberización en el intervalo entre la C.C. y la mitad del ADT, y a comienzos de la madurez fisiológica la  $\Theta$  se mantiene alrededor del 50 % del ADT.

La  $\Theta$  después de los riegos, en la estolonización fue del 18,8 % al 32,2 %, en la floración y tuberización del 26,8 % al 33,5 % y a inicios de la madurez fisiológica fue del 26,8 % y 30,8 %. Estos niveles de humedad están alrededor del 50 % del ADT en la primera mitad de la estolonización y en la segunda a nivel y por encima de la C.C., durante la floración y tuberización están entre la C.C. y 50 % del ADT así como a nivel y por encima de la C.C., y a inicios de la madurez fisiológica cercano y a nivel de la C.C.

Considerando los límites de agotamiento de la humedad disponible de Tarjuelo (2005) mencionado por Patty (2009), ya descritos. Los niveles de humedad del T3 antes del riego, estuvieron dentro de los límites de agotamiento de agua a excepción del inicio de los riegos en el que estuvieron cercanos al P.M.P.

Después del riego los niveles de humedad del T3 se mantuvieron cercanos a nivel y por encima de la C.C., a excepción de los inicios del riego en el que estuvieron alrededor del 50 % del ADT.

En los tres tratamientos de estudio los niveles de humedad del antes del riego, en el inicio de los riegos estuvieron cercanos al P.M.P. debido a que la reserva de humedad del suelo era baja por ausencia de riegos y PP anteriores, y se incrementó a medida que se aplicaron los riegos.

## 5.5. Variables agronómicas

### 5.5.1. Altura de planta

La altura de planta corresponde al máximo crecimiento alcanzado por la planta determinada mediante mediciones realizadas en la fase fenológica de floración y tuberización en la cual se produce el máximo desarrollo del follaje. A continuación en el cuadro 23, se presenta la comparación de medias para altura de planta en relación con los niveles de riego aplicados en los 3 tratamientos.

**Cuadro 23. Comparación de medias con la prueba de Duncan para la altura de planta por efecto de niveles de riego.**

Tratamiento	Niveles de Riego	Volúmenes de riego (L/m <sup>2</sup> )	Altura de Planta (Cm)	Duncan (0,05)
T1	50%	127,61	51,61	A
T2	75%	192,10	56,77	B
T3	100%	256,60	59,07	B

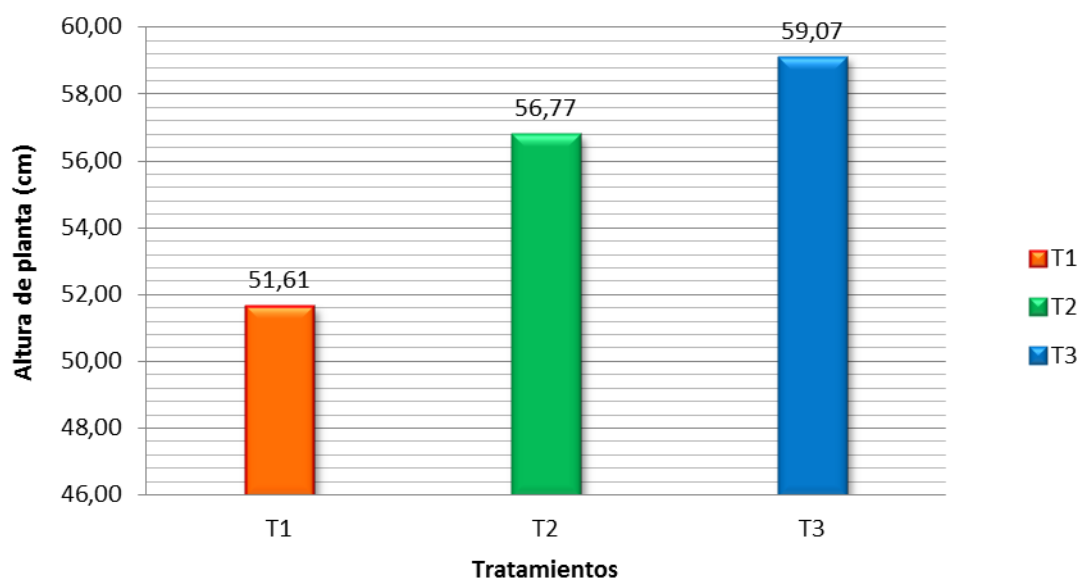
**Fuente:** Elaboración propia.

Según el cuadro 23, la prueba de Duncan a un nivel del 5% revela que existen diferencias significativas entre el tratamiento T1 en comparación con los tratamientos T2 y T3. Es así que el T1 obtuvo la altura más baja con 51,61 cm, por otro lado el T2 y T3 alcanzaron 56,77 y 59,07 cm respectivamente. Estos dos últimos no presentan

diferencias significativas. El coeficiente de variación fue de 7,5 % demostrando una alta representatividad de los datos.

En correspondencia, Ekanayake (1994), menciona los efectos de un déficit hídrico en la papa que son: reducción del follaje productivo (escasa emergencia, escasa expansión foliar); reducción de la tasa de fotosíntesis por unidad de área foliar; y reducción del período vegetativo o senectud precoz (bajo índice de área foliar). Por lo tanto se puede afirmar que el T1 presentó menor crecimiento debido a que presentó un efecto negativo en sus procesos fisiológicos, en cambio el T2 y T3 desarrollaron óptimamente sus procesos fisiológicos como efecto de una mayor dosis de riego.

A continuación se describe la altura de planta alcanzada por los 3 tratamientos estudiados.



**Figura 28. Altura de planta de los tres tratamientos**

La figura 28, muestra las alturas de planta alcanzadas por los tratamientos T1, T2 y T3, los que recibieron el 50 %, 75 % y 100 % de la lámina de riego calculada respectivamente, el T3 con una altura de 59,07 cm, el T2 con 56,77 cm y el T1 de menor altura que presenta 51,61 cm.

Según Chipana (2010), esto se debe a que los incrementos de la cantidad de agua de riego hacen que la altura de la planta de papa aumente, debido a que un buen contenido de agua en el suelo favorece una absorción regular de nutrientes, que repercutirán en el crecimiento y desarrollo de la planta.

Allen et al. (2006), señalan que estos valores se encuentran dentro del parámetro normal para esta variable, quienes consideran como alturas medias máximas de 60 cm para el cultivo de papa. Por lo indicado anteriormente, se puede afirmar que el desarrollo de la planta tuvo respuestas favorables a la aplicación de riego.

### 5.5.2. Número de tallos por planta

El número de tallos principales por planta se determinó al final de la fase de floración, mediante conteo de los mismos. Los resultados alcanzados y la comparación de medias mediante la prueba de Duncan para esta variable con relación al único factor niveles de riego aplicados, se muestran en el cuadro 24.

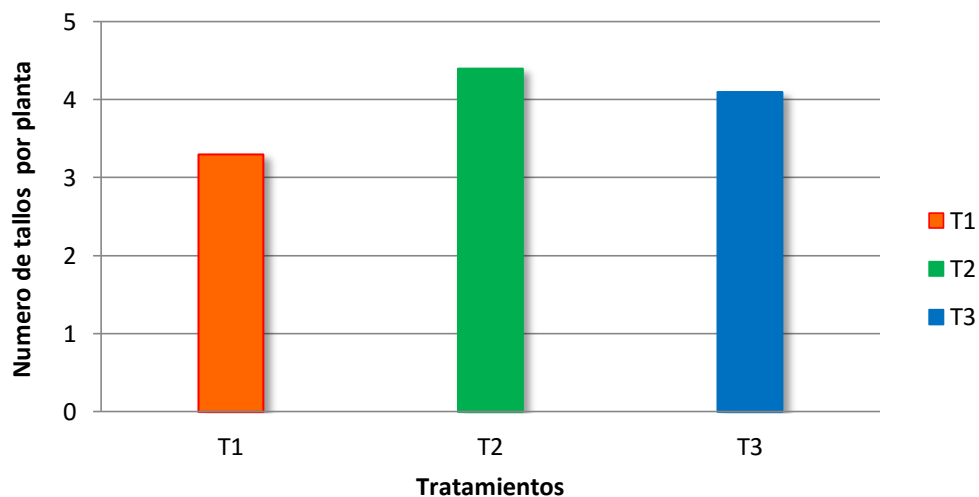
**Cuadro 24. Comparación de medias con la prueba Duncan para el número de tallos/planta por efecto de niveles de riego.**

Tratamiento	Niveles de Riego	Volúmenes de riego (L/m <sup>2</sup> )	Número de tallos	Duncan (0,05)
T1	50%	127,6	3,3	A
T2	75%	192,1	4,4	B
T3	100%	256,6	4,1	B

**Fuente:** Elaboración propia

En el cuadro 24, se expone la prueba de Duncan a un nivel del 5% que indica que existen diferencias significativas entre el T1 que presentó 3,3 tallos por planta con un nivel de riego del 50 % de la lámina calculada, en comparación con los tratamientos T2 y T3 con 4,4 y 4,1 tallos por planta y niveles de riego de 75 y 100 % respectivamente. El coeficiente de variación fue de 13,7 % manifestando una alta representatividad.





**Figura 29. Número de tallos principales por planta como efecto de los tratamientos de riego**

En la figura 29, anterior se describe que el número de tallos principales promedio por planta, en términos prácticos, fue mayor en el T2 con 4 tallos, y el T3 con 4 tallos en cambio el T1 con 3 tallos, lo que significa que el T2 y T3 tuvieron mayor cantidad de tallos por planta con relación al T1.

Investigaciones realizadas en la variedad Waych'a en el altiplano norte de La Paz, demuestran que: Mamani (2015) obtuvo entre 2,5 y 3,2 tallos por planta en un estudio de riego deficitario, y Condori (2003) citado por Patty (2009), obtuvo 3,63 y 3,31 tallos por planta bajo riego por aspersión más fertilización orgánica y mineral.

Al respecto Huamán (1986) citado por Patty (2009), menciona que las plantas provenientes de semilla verdadera tienen un solo tallo principal mientras que las provenientes de tubérculos semilla pueden producir varios tallos misma que está definida por número de ojos en los tubérculos semillas de cada variedad.

Wiersema (1992), señala que el rendimiento en la producción está ligado directamente con el número de tallos y que una densidad de tallos alta conduce a un incremento en el rendimiento hasta cierto punto y a una reducción en el tamaño del tubérculo. Esto se refleja en una mayor proporción de tubérculos pequeños.

### 5.5.3. Número de tubérculos por planta

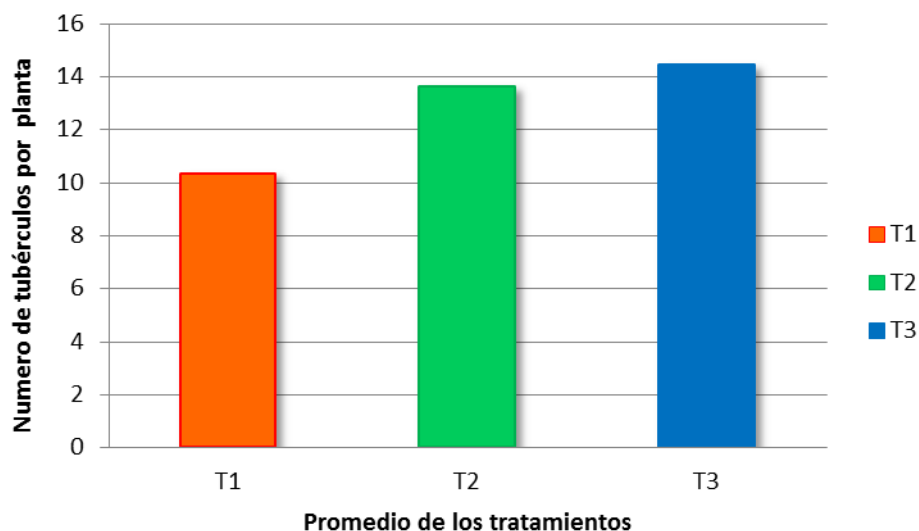
El número de tubérculos por planta se determinó al momento de la cosecha correspondientes a los 3 tratamientos como efecto de los niveles de riego aplicados como se observa en el cuadro 25.

**Cuadro 25. Prueba de Duncan para el Número de Tubérculos/Planta por efecto de niveles de riego.**

Tratamiento	Niveles de Riego	Volúmenes de Riego (L/m <sup>2</sup> )	Promedio Número de Tubérculos/Planta	Duncan (0,05)
T1	50%	127,6	10,3	A
T2	75%	192,1	13,6	B
T3	100%	256,6	14,4	B

**Fuente:** Elaboración propia

En el cuadro 25, la prueba de Duncan a un nivel del 5%, para número de tubérculos por planta como efecto de niveles de riego, revela que existen diferencias significativas entre el T1, que tiene una media de 10,3 tubérculos por planta, con relación al T2 y T3 con 13,6 y 14,4 tubérculos por planta respectivamente, entre el T2 y T3 no se presentaron diferencias significativas. El coeficiente de variación fue de 15,4 % demostrando una representatividad de los datos aceptable.



**Figura 30. Número de Tubérculos por planta como efecto de los tratamientos de riego deficitario**

La figura 30, describe los resultados de Duncan que indica que existen diferencias significativas entre el T1 con una media de 10 tubérculos por planta (en términos prácticos), con relación al T2 y T3 con medias 14 tubérculos por planta prácticamente, para ambos respectivamente, en cambio entre el T2 y T3 no se presentan diferencias significativas. De esta manera los niveles de riego deficitario influyeron en el T1 para obtener un menor número de tubérculos por cada planta, con respecto al T2 y T3.

Montalvo (1984), citado por Patty (2009), señala que el número de tubérculos por planta depende de los factores de crecimiento como: agua, luz, nutrimentos, suelo y temperatura. Por otra parte Wiersema (1987) mencionado por Patty (2009), señala que el número de tubérculos por planta está afectado por la densidad de tallos, dependiendo a su vez de la competencia entre los tallos por los factores de crecimiento como ser los nutrientes, el agua, la luz, indicando también que el número de tubérculos depende entre otros factores de la variedad de la papa.

Yuan et al. (2003) citado por Mamani (2015), manifiestan que el incremento de riego aumenta el número y peso medio de los tubérculos. Esta afirmación se reveló en el T2 con 75 % de riego y el T3 con 100 % de riego que presentaron más tubérculos por planta que el T1 como resultado de un 50 % de reposición de riego.

Los resultados para número de tubérculos por planta de la presente investigación son similares a los obtenidos por Mamani (2015), en su tesis realizada en la variedad Waych'a en la misma comunidad del presente estudio y tratamientos de riego deficitario controlado, con valores de 10,6 y 13,3 tubérculos por planta, a excepción de uno de sus tratamientos que obtuvo 17,87, debido probablemente a las diferencias del suelo entre ambas parcelas experimentales.

#### **5.5.4. Número de tubérculos respecto al diámetro**

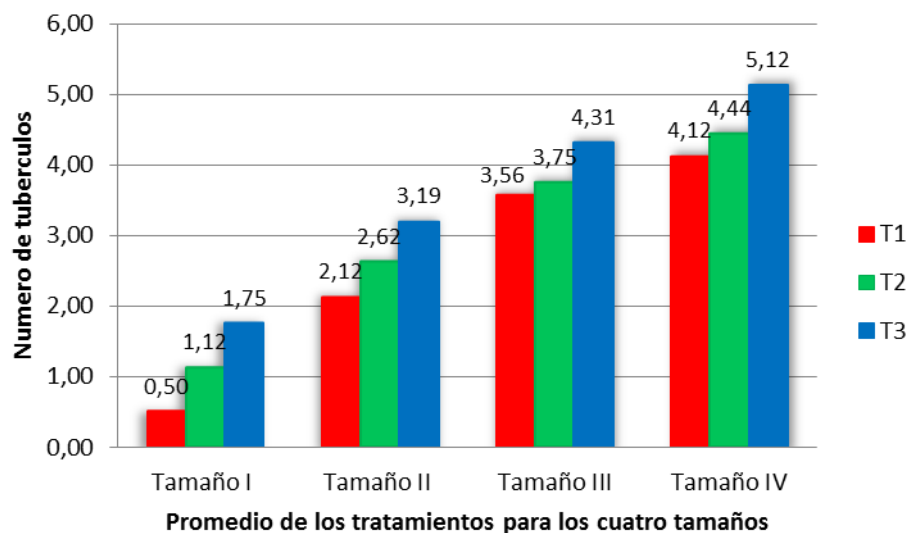
El número de tubérculos por planta respecto al tamaño de los tubérculos determinado por su diámetro fue sometido a la prueba de Duncan. Los resultados obtenidos se exponen en el cuadro 26.

**Cuadro 26. Prueba de Duncan al 5 % para el número de tubérculos respecto al diámetro por efecto de niveles de riego.**

Tratamiento	Número de tubérculos/planta promedio, respecto al tamaño			
	Tamaño I (>75 mm)	Tamaño II (60-75 mm)	Tamaño III (45-60 mm)	Tamaño IV (< 45 mm)
T1	0,50 A	2,12 A	3,56 A	4,12 A
T2	1,12 A B	2,62 A	3,75 A	4,44 A
T3	1,75 B	3,19 A	4,31 A	5,12 A

**Fuente:** Elaboración propia

En el cuadro 26, se muestra: que para el tamaño I (tamaño gruesa) el T1 alcanzó un promedio de 0,5 el T2 alcanzó 1,12 y el T3 1,75 tubérculos por planta, revelándose mediante la prueba de Duncan al 5 % que; entre el T1 y T2, así como entre el T2 y T3 no existen diferencias significativas, y entre el T1 y T3 si existen diferencias significativas. Para el tamaño II (grandes), tamaño III (medianos) y tamaño IV (pequeños); el T1, T2 y T3 presentaron promedios estadísticamente similares, como se describe en la figura 31.



**Figura 31. Número de tubérculos según tamaño por efecto de los tratamientos de riego**

En la figura 31, se observa que el tamaño I tiene un menor número de tubérculos con 0,50 el T1, 1,12 el T2 y 1,75 el T3, en el cual el T2 y T3 tienen un mayor número de tubérculos con diferencias significativas. El tamaño II y III y finalmente el tamaño IV posee un mayor número de tubérculos que no presentan diferencias significativas.

Al respecto Peralta (2008) citado por Mamani (2015), menciona que la distribución de calibres de cosecha mejora en la medida que el cultivo se riega adecuadamente, obteniéndose a la cosecha mayores porcentajes de papa de tipo comercial con aplicación de riego que en seco, en consecuencia el T1 con un nivel de riego del 50 % presentó menor cantidad de tubérculos grandes en cambio el T2 y T3 mostraron un mayor número de tubérculos grandes.

### 5.5.5. Rendimiento

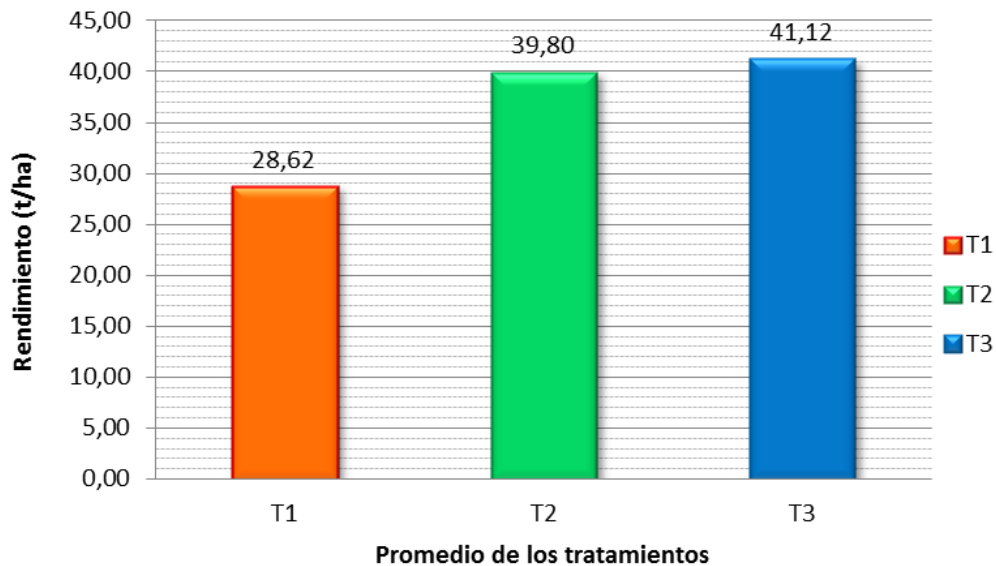
Los resultados de los rendimientos obtenidos se exponen en el cuadro 27, mostrando la prueba de Duncan de comparación de medias para el rendimiento con relación al único factor, niveles de riego aplicados en los tres tratamientos.

**Cuadro 27. Prueba de Duncan para el Rendimiento por efecto de niveles de riego.**

Tratamiento	Niveles de Riego	Volúmenes de Riego (L/m <sup>2</sup> )	Promedio de Rendimiento (t/ha)	Duncan (0,05)
T1	50%	127,61	28,62	A
T2	75%	192,10	39,80	B
T3	100%	256,60	41,12	B

**Fuente:** Elaboración propia

Según el cuadro 27, la prueba de rango de Duncan a un nivel del 5% indica que existen diferencias significativas entre el T1 con un rendimiento de 28,62 t/ha y una de reposición de riego del 50%, en comparación con los tratamientos T2 con 39,80 t/ha y T3, con 41,12 t/ha, con niveles de riego del 75 % y 100 % respectivamente, y no se revelan diferencias significativas entre los tratamientos T2 y T3. El coeficiente de variación fue de 17,7 % manifestando una representatividad aceptable de los resultados experimentales.



**Figura 32. Rendimiento con relación a los niveles de riego**

Los resultados presentados en la figura 32, revelan las diferencias significativas entre el T1 comparado con el T2 y T3, y la similitud del T2 con el T3 que no manifiestan diferencias estadísticamente significativas.

Según Hijmans et al. (2003) citado por Mamani (2015), el rendimiento de la zona de estudio es de 5,2 t/ha (a secano), por lo tanto los rendimientos obtenidos en los 3 tratamientos evaluados son de lejos superiores al rendimiento local. Debido a que la producción local no incluye el riego y se expone con mayor vulnerabilidad a las bajas precipitaciones o sequias, granizos y heladas que disminuyen los rendimientos.

Los rendimientos obtenidos en la presente investigación son inferiores a los obtenidos por Mamani (2015), en su tesis realizada en la variedad Waych'a en la misma comunidad del presente estudio y tratamientos similares de riego deficitario controlado, con rendimientos de 37,57 a 57,90 t/ha. Esta diferencia probablemente se debe a las diferentes texturas del suelo entre las parcelas experimentales, donde: en el presente estudio se presentó una textura franco arcillosa hacia arenosa donde a partir de los 50 cm de profundidad el suelo es totalmente arenoso (con baja capacidad de retención de humedad), comparado con la parcela de Mamani (2015); donde se tiene textura arcillosa (con mayor capacidad de retención de humedad).

Otro factor que pudo haber influido es la distinta distribución y volúmenes de las precipitaciones, que fueron tardías y bajas durante la campaña agrícola 2011 – 2012 del presente estudio, en comparación con la de Mamani (2015) que tuvo lluvias tempranas y de mayores volúmenes, permitiendo un almacenamiento de humedad óptimo durante las primeras fases de emergencia, estolonización y floración – tuberización, que son las fases de mayor requerimiento hídrico del ciclo vegetativo de la papa.

Cabe manifestar que el total de agua recibido por el cultivo (Riego + Pe) presentó volúmenes mayores y más cercanos al requerimiento hídrico total del cultivo, como son: 305,36 mm para el T1, 365,13 el T2 y 424,90 mm para el T3, en correspondencia la FAO (2008), señala que el cultivo de papa consume de 500 a 700 mm de agua durante su ciclo vegetativo. Por consiguiente en el presente caso los volúmenes de agua para los tratamientos T1, T2 y T3 son inferiores a los indicados tratándose de evaluaciones de riego deficitario controlado.

## 5.6. Evaluación de la productividad del agua

### 5.6.1. Productividad del agua por tratamiento

En el cuadro 28, se muestra las medias correspondientes a la productividad del agua en el rendimiento del cultivo de papa, las cuales se sometieron a la prueba de Duncan.

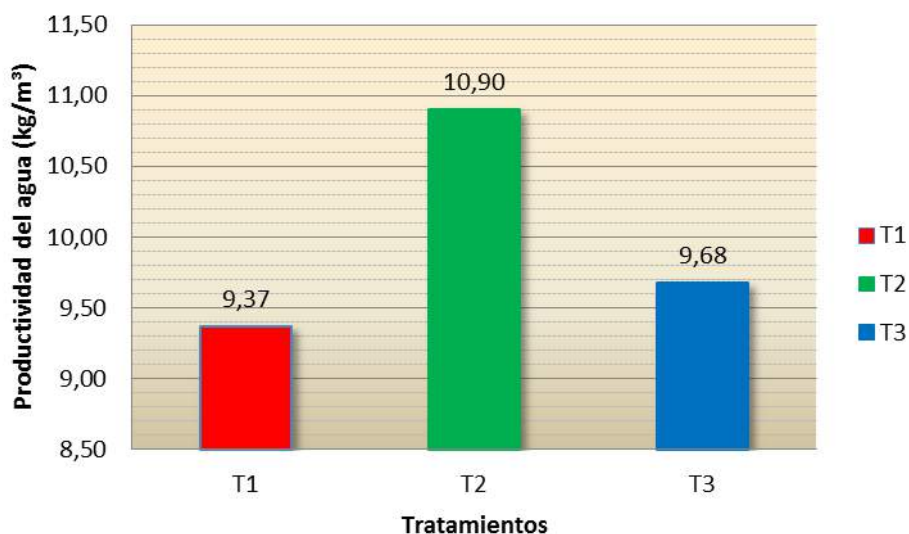
**Cuadro 28. Comparación de medias con la prueba de Duncan al 5%, para la Productividad del Agua.**

Tratamiento	Medias (kg/m <sup>3</sup> )	Duncan (0,05)
T1	9,37	A
T2	10,90	A
T3	9,67	A

**Fuente:** Elaboración propia.

En el cuadro 28, la prueba de Duncan para la productividad del agua revela que no existen diferencias significativas a un nivel del 5 %, con relación a los tratamientos aplicados, sin embargo el T2 manifestó un mejor aprovechamiento del agua aplicada logrando obtener 10,90 kg de papa por cada m<sup>3</sup> de agua aplicada. El coeficiente de variación manifestó un valor de 17,4 % que indica una aceptable representatividad de los datos experimentales.

A continuación se describe la productividad del agua para los tres tratamientos de estudio.



**Figura 33. Productividad del agua (kg/m³), para los distintos tratamientos evaluados**

En la figura 33, se observa los valores referente a la productividad del agua, donde el mejor tratamiento fue el T2 logrando producir 10,90 kg de papa empleando un metro cúbico de agua, seguido por el T3 obteniendo 9,68 kg/m³, y en el T1 se obtuvo 9,37 kg/m³, por consiguiente, el tratamiento dos fue el que mejor aprovechó el agua total (Riego + Pe), para generar una mayor peso del producto cosechado por unidad de agua.

Los resultados alcanzados por los tres tratamientos se encuentran dentro del rango de 4 a 11 kg/m³, indicado por la FAO (2002), para tubérculos frescos que contengan cerca de 75% de humedad. Por otra parte, Oweis (2012) menciona que la productividad del agua para el cultivo de papa, superiores a 7 kg/m³, ya representa una buena productividad. Se puede afirmar que la productividad del agua alcanzada es óptima y que es atribuible al agua aplicada en las fases críticas del cultivo.

En correspondencia, Mamani (2015) obtuvo para la variedad Waycha una productividad del agua que oscila entre 10,9 a 13,7 kg/m³, para tratamientos similares, los cuales son relativamente superiores a los resultados obtenidos en el presente caso, probablemente



debido a las diferencias en cuanto al comportamiento de la PP, que fueron en dos campañas agrícolas diferentes y a las diferentes características del suelo entre las parcelas experimentales de cada caso.

### 5.6.2. Función de producción

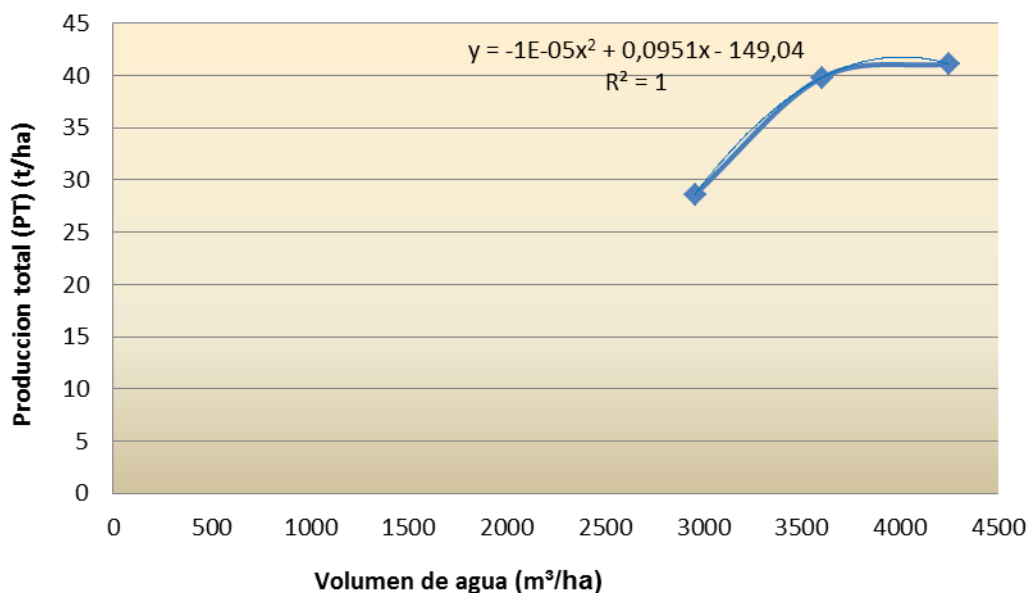
La función de producción corresponde a las relaciones establecidas entre los parámetros de cosecha y el total de agua aplicada por tratamiento (Riego+Pe), para lo cual se utilizó los datos obtenidos en el experimento, según el cuadro 29.

**Cuadro 29. Volúmenes de agua aplicada y producción total del cultivo**

Tratamiento	Niveles de riego	Volumen Total de Agua (m <sup>3</sup> /ha)	Producción (t/ha)
T1	50%	2.959,0	28,62
T2	75%	3.604,0	39,80
T3	100%	4.249,0	41,12

*Fuente. Elaboración propia.*

En base a los resultados del cuadro 29, a continuación se muestra la curva de respuesta productiva del cultivo de papa en función al agua aplicada (figura 34).



**Figura 34. Función de producción del cultivo de papa.**

Mediante el análisis de regresión se han buscado funciones que relacionen el agua de riego o agua total (Riego+Pe) recibida por el cultivo, variable independiente, con el valor de rendimiento del cultivo, variable dependiente. La función de producción seleccionada para el cultivo de papa en la localidad de estudio (figura 34), corresponde a una curva polinómica de segundo grado que muestra un valor de coeficiente de determinación  $R^2$  igual a 1, está basada en el volumen de agua total aplicado (insumo utilizado), como la producción obtenida, esta expresada con la ecuación (27):

$$PT = -1^{-5} x^2 + 0,0951 x - 149,04 \quad (27)$$

Donde PT, es la producción total y "x" es el volumen total de agua aplicada (volumen de agua de riego en  $m^3/ha$  más la precipitación efectiva). Reemplazando el valor de "x" con distintos valores de volúmenes de agua se puede estimar la producción de la papa para una cierta cantidad de agua aplicada.

Por lo tanto, existe un momento en que se obtiene la mayor producción por metro cubico de agua aplicado, para ello, se reemplaza datos en la ecuación (27), con la cual se calculó teóricamente los valores máximos de productividad total (máxima) y productividad media.

### **5.6.3. Productividad máxima (PT)**

A nivel de campo, el productor busca obtener una producción máxima con la mínima cantidad de insumos, en este caso agua. Para encontrar el máximo de productividad o producción total por hectárea (máxima producción total), se considera el punto en el que la productividad marginal ( $P^0$ ) sea nula ( $P^0 = 0$ ). La productividad máxima (PT) se obtuvo calculando la primera derivada de la ecuación (27), e igualando a cero. Efectuado los cálculos de acuerdo a los resultados obtenidos, se obtiene que la cantidad mínima de insumo (agua) necesaria para alcanzar la producción máxima de la papa, es de 4.755,0  $m^3/ha$  de agua, para obtener una producción de 37,3 t/ha.

La productividad total calculada (PT), revela que en una zona de características climáticas y de suelos similares a las de la zona del experimento, y particularmente para

la variedad Waycha, aplicaciones de agua más allá de 4.755,0 m<sup>3</sup>/ha, no aumentarían la producción de papa. Por tanto, toda agua adicional será un gasto extra en el que estará incurriendo el productor, que no le reportaran beneficios sustanciales.

#### 5.6.4. Productividad media (PMe)

La productividad media (PMe) se obtuvo dividiendo la producción total (PT) que fue de 37,3 t/ha equivalente a 37.300,0 kg/ha, entre la cantidad del insumo utilizado es decir el agua aplica (x) con un valor de 4.755,0 m<sup>3</sup>/ha, obteniéndose 7,8 kg/m<sup>3</sup>, lo que significa que para la variedad Waycha, cada metro cúbico de agua, sirvió para producir 7,8 kg de tubérculos frescos de papa. Este resultado se encuentra dentro del rango de 4 a 11 kg/m<sup>3</sup>, indicado por la FAO (2002), y por encima de 7 kg/m<sup>3</sup>, indicado por Oweis (2012) como una buena productividad.

La productividad alcanzada es atribuible a un suministro oportuno de agua en las fases fenológicas críticas del cultivo, tanto por el riego como por la Pe sumado al adecuado manejo en las labores culturales, a lo largo del ciclo vegetativo del cultivo.

#### 5.6.5. Evaluación del índice de eficiencia de uso del agua (IEUA)

El Índice de Eficiencia de Uso del Agua (IEUA), se ha determinado en base al rendimiento y el agua total aplicada (Pe+Riego), como se muestra en el cuadro 30.

**Cuadro 30. Índice de eficiencia del uso de agua para los tres tratamientos de riego**

Tratamiento	Rendimiento (kg/m <sup>2</sup> )	Agua total aplicada (L/m <sup>2</sup> )	IEUA	
			Medias (kg/L)	Volumen de Agua/kg papa (L/kg)
T1	2,86	305,36	0,009	111,11
T2	3,98	365,13	0,011	90,91
T3	4,11	424,90	0,010	100,00

**Fuente:** Elaboración propia

En el cuadro 30, se observa que el IEUA en el T1 es de 0,009 kg/L, lo que significa que para producir 1 kg de papa (tubérculo fresco) es necesario la aplicación de 111,11 L de agua, en el T2 el IEUA es de 0,011 kg/L, indicando que para la producción de 1 kg de papa es necesario utilizar 90,91 L de agua y para el T3 el IEUA es de 0,010 kg/L, es

decir que para producir 1 kg de papa, se requiere 100,00 L de agua. En consecuencia el T2 presenta un mayor IEUA, revelando una mayor eficiencia de uso del recurso agua provenientes del riego más la precipitación efectiva (Riego+Pe), de modo que representa un ahorro de agua mayor por unidad de papa producida en peso, en comparación con el T1 y T3.

En correspondencia, Mamani (2015) obtuvo los siguientes resultados: 73,0 L/kg, 91,7 L/kg y 92,6 L/kg para tratamientos similares de riego deficitario, dándonos a conocer que en el presente caso los índices IEUA logrados son menores respecto a los resultados de Mamani (2015), este comportamiento se puede atribuir a las diferencias en: las características físicas del suelo, las precipitaciones pluviales y ETo, que fueron diferentes entre ambas investigaciones.

## **5.7. Variables económicas**

### **5.7.1. Ajuste de los rendimientos**

El ajuste del rendimiento según Perrin (1988), es el ejercicio que se realiza para que exista una aproximación a lo que el agricultor pueda obtener con su propia tecnología productiva en una parcela grande, el intervalo de reducción del ajuste del rendimiento se encuentra entre el 5 % a 30 %. En la presente investigación se adoptó un valor de 20 % de pérdidas como referente al ajuste del rendimiento, debido a las mismas condiciones de cultivo del agricultor local, exceptuando el aporte de agua que se tuvo en la presente investigación. En el cuadro 31, se presentan los rendimientos ajustados para cada tratamiento.

### **5.7.2. Ingreso Bruto (IB)**

En el cuadro 31, se muestra el análisis realizado para los tres tratamientos en función al rendimiento y el precio en el mercado que es de 35 Bs la arroba, el mayor ingreso bruto corresponde al T3 con 101.530,86 Bs/ha, seguido por el T2 que alcanzó un beneficio bruto de 98.271,60 Bs/ha, y en último lugar el T1 presentó 70.666,67 Bs/ha. El mayor beneficio bruto obtenido del T3 se atribuye al mayor rendimiento que obtuvo en comparación al T1 y T2 con menores rendimientos.

### 5.7.3. Ingreso neto (IN)

En el cuadro 31, se muestra que el mayor ingreso neto obtenido se registra para el T3 con un valor de 78.768,64 Bs/ha, seguido por el T2 con un valor de 76.409,38 Bs/ha, y para el T1 el ingreso neto fue de 49.704,44 Bs/ha . Los tratamientos T3 y T2 obtuvieron mayores ingresos neto, ambos lograron rendimiento estadísticamente similares y recibieron riego en un 100% y 75% de la lámina calculada en base a la ETo, con respecto al T1 que obtuvo el rendimiento más bajo y fue el más deficitario con tan solo 50% de la lámina calculada.

### 5.7.4. Relación beneficio costo (B/C)

En el cuadro 31, la relación beneficio/costo (B/C), nos indica que el T2 es más rentable económicamente con un valor de 4,50 es decir que por cada boliviano (Bs 1) invertido, se recupera ese boliviano y se tiene una ganancia de Bs 3,50 de la mismas forma se observa que el T3 con un valor de 4,46 presenta una rentabilidad positiva y finalmente el T1 con 3,37 es de igual forma rentable presentando una relación beneficio mayor a uno.

Los resultados obtenidos del indicador beneficio/costo, nos demuestran que al aplicar riego existe una mayor rentabilidad, debido a un incremento en el rendimiento de tubérculos y a un buen manejo del cultivo en condiciones experimentales.

**Cuadro 31. Análisis de costos de producción**

<b>Indicadores económicos</b>	<b>Tratamientos</b>		
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>
<i>Rendimiento (t/ha)</i>	28,62	39,80	41,12
<i>Rendimiento ajustado (t/ha)</i>	22,90	31,84	32,90
<i>Rendimiento ajustado (@/ha)</i>	2.019,05	2.807,76	2.900,88
<i>Precio por @ (Bs)</i>	35,00	35,00	35,00
<i>Costo de producción (Bs/ha)</i>	20.962,22	21.862,22	22.762,22
<i>Beneficio bruto (Bs/ha)</i>	70.666,67	98.271,60	101.530,86
<i>Beneficio neto (Bs/ha)</i>	49.704,44	76.409,38	78.768,64
<i>Beneficio/costo</i>	3,37	4,50	4,46

**Fuente:** Elaboración Propia

## 6. CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados y los resultados obtenidos, en las evaluaciones de: rendimiento, productividad del agua, eficiencia de uso del agua y costos de producción del cultivo de papa, en función al Riego Deficitario Controlado, se tiene las siguientes conclusiones:

El *rendimiento* obtenido del cultivo de papa, en los tres tratamientos evaluados en función de tres niveles de RDC, realizado el análisis estadístico, presentó diferencias significativas entre el T1 y el T2, presentando este último un rendimiento mayor, por otra parte entre el T1 y el T3 se revelaron diferencias significativas ya que en el T3 se obtuvo un promedio mucho mayor, y entre el T2 y T3 no se presentaron diferencias significativas. Los rendimientos mayores fueron, del T3 con un 100 % de reposición de riego, y del T2 con un 75 % de riego y el rendimiento más bajo fue del T1 con un 50 % de riego, equivalente a un 50 % de restricción hídrica, notándose que entre el T2 y T3 se cumple el concepto del RDC de minimizar los aportes hídricos sin que se afecte significativamente el rendimiento, dando a concluir que el T2 se constituye en una óptima opción para el RDC.

Los rendimientos alcanzados por los tratamientos T2 y T3 respecto al T1, son atribuibles al número de tallos y número de tubérculos por planta que fueron significativamente superiores en el T2 y T3 con relación al T1. De manera general para los tres tratamientos, los rendimientos alcanzados fueron superiores en comparación con el rendimiento local, departamental y nacional.

En la evaluación de la *productividad del agua*, de los tres tratamientos de RDC evaluados, realizado el análisis estadístico, no se revelaron diferencias significativas entre tratamientos, sin embargo el T2 alcanzó una productividad del agua superior con un valor de 10,90 kg/m<sup>3</sup>, seguido por el T3 y finalmente el T1, encontrándose estos en niveles óptimos de productividad, pese a las restricciones hídricas en el T1 y en el T2, y no así en el T3. En el T2 y T1 el concepto de la productividad del agua de maximizar el rendimiento por unidad de agua aplicada, es favorable dando a comprender que el T2 y T1 se constituyen en una buena opción para una mayor productividad del recurso agua.

Según la función de producción para el cultivo de papa, la productividad máxima (PT) y producción media (PMe), la producción alcanzada en términos generales para los tres tratamientos, en base a tres tratamientos de RDC, refleja niveles superiores y óptimos, de modo que manifiesta una mayor productividad del agua en la producción de papa.

Realizada la evaluación del *índice de eficiencia de uso del agua (IEUA)*, de los tres tratamientos de RDC, el T2 con un 25 % de restricción hídrica, alcanzó un IEUA superior con 0,011 kg/L (10,90 kg/m<sup>3</sup>), o de otra forma 90,91 L/kg, respecto al T3 y al T1 con eficiencias más bajas, de modo que el T2 requiere un volumen menor de agua por unidad de papa producida en peso. Entonces el T2 responde óptimamente al fin del RDC que es de reducir los volúmenes de agua sin afectar significativamente el rendimiento, incrementando la eficiencia de uso del recurso hídrico y por consiguiente un ahorro de este insumo de producción, que repercutirá en una mayor rentabilidad del cultivo. Entonces los valores alcanzados del IEUA, se encuentran en niveles óptimos de eficiencia, pese a que los rendimientos alcanzados no fueron iguales en los tres tratamientos.

La evaluación de los *costos de producción del cultivo de papa* bajo el efecto de tres niveles de aplicación de RDC, manifiesta una rentabilidad positiva y óptima para los tres tratamientos, donde los indicadores ingreso bruto y neto revelaron mayores beneficios para el T3 en comparación al T2 y T1, presentando una diferencia más marcada con respecto al T1 y no así con el T2, y donde el indicador Beneficio/Costo fue superior para el T2 con un valor de 4,50 seguido por el T3 con 4,46 y finalmente el T1 con un valor de 3,37. Los valores que adopten estos indicadores económicos están en función del rendimiento y costos de producción del cultivo, y estas variables están en función del RDC, entonces el agricultor podrá asumir estrategias para alcanzar una mayor rentabilidad.

El riego Deficitario Controlado (RDC), es una buena estrategia para alcanzar un rendimiento óptimo, una mayor eficiencia y productividad del agua, y una rentabilidad superior, del cultivo de papa, en zonas donde la disponibilidad de agua es limitada y más aún si este recurso tiene un costo.

Como conclusiones complementarias de acuerdo con los resultados obtenidos, se presentan las siguientes:

En cuanto a la relación de la precipitación (PP) y la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), la demanda de agua fue superior a los aportes de las lluvias, durante todos los meses del ciclo vegetativo de la papa, dejando en claro la necesidad y la importancia del riego para cubrir la demanda hídrica del cultivo. Notándose que en el mes de febrero se presentó la mayor incidencia de lluvias coincidiendo con la fase crítica de floración y tuberización.

El agua para riego proveniente del río Keka, de la comunidad Barco Belén, se caracterizó por ser agua de buena calidad, apta para el riego en la mayoría de los cultivos, con poca presencia de sales y sodio. La disponibilidad del agua para riego fue a libre demanda, al tratarse de un río de flujo continuo a lo largo del año, y un caudal considerable.

Los mayores volúmenes de agua total aplicada mediante el riego más la precipitación efectiva (R+Pe), coincidieron con las fases más críticas del cultivo de papa, que son la fase de floración y tuberización seguido por la fase de formación de estolones. Para el riego, ya se tenía preestablecido estas fases fenológicas a regar, y por otra parte la incidencia de láminas mayores de Pe coincidieron con las fases más críticas del cultivo, debido a una fecha de siembra oportuna, realizada en base a las fechas más practicadas en la zona de estudio, (siembra temprana, media o tardía), que fue entre siembra media y tardía en el presente estudio.

Los volúmenes de aporte del riego en proporción al agua total aplicada (R+Pe), corresponden en promedio a la mitad del agua total recibida por el cultivo, entonces cabe señalar que el RDC fue determinante para cubrir la demanda de agua del cultivo.



## 7. SUGERENCIAS

De acuerdo con las conclusiones de la presente investigación experimental se tiene las siguientes sugerencias.

Con relación al *rendimiento*, en base al concepto del RDC, se sugiere aplicar un riego con un estrés moderado como se tuvo en el T2 y no severo como del T1, para no reducir significativamente el rendimiento. En otro caso si se tiene una mayor disponibilidad de agua, se puede aplicar el riego sin restricciones, tanto en las fases fenológicas críticas que son la formación de estolones hasta la floración y tuberización, como también a lo largo de las demás fases fenológicas del cultivo de papa, para alcanzar rendimientos superiores.

En cuanto a la *productividad del agua y la eficiencia de uso del agua*, para alcanzar niveles superiores, se debe considerar las condiciones locales: primero la disponibilidad de agua para riego, el comportamiento de las precipitaciones en la campaña agrícola, las características del suelo y las fases fenológicas de requerimiento hídrico críticas del cultivo, principalmente, de modo que se debe buscar la mejor alternativa para el cultivo. Entonces se sugiere aplicar riego con un estrés hídrico moderado como lo fue en el T2, durante las fases de formación de estolones hasta finalizar la floración y tuberización, porque un estrés hídrico más severo como el del T1 disminuye significativamente el rendimiento, en condiciones de menor disponibilidad de agua para riego.

Se sugiere aumentar los aportes de riego solo hasta llegar al límite de productividad máxima o total (PT), con el fin de no realizar gastos extras en cuanto a la aplicación del riego, que no favorecerán a incrementar los rendimientos. Entonces aplicar mayores volúmenes de riego, como fue el caso del T3, en zonas donde existe mayor disponibilidad de agua, para cubrir también el requerimiento hídrico en las fases menos críticas de emergencia y madurez fisiológica, en las cuales no se aplicó riego en la presente investigación.

Aplicar riego deficitario controlado RDC para obtener *una rentabilidad superior del cultivo de papa*, ya que permite el ahorro del recurso hídrico y un uso más eficiente, de acuerdo con el nivel de restricción del riego en las fases críticas del cultivo.

Realizar más estudios e investigaciones de RDC en el cultivo de papa, para mejorar o corroborar los resultados obtenidos, e incluir métodos de riego más eficientes como es el caso de riego por goteo. De esta manera se podrá contribuir al uso racional y eficiente de este recurso hídrico que está siendo cada vez más afectada por el cambio climático.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

ALDABE, Y DOGLIOTTI, S. 2006. Bases fisiológicas del crecimiento y desarrollo del cultivo de papa. Revista Latinoamericana de la Papa. (1995). 7/8:86-93

ALLEN, GR; PEREIRA, L; RAES, D; Y SMIT, M. 1998. Crop evapotranspiration. guidelines for computing crop water requirements. irrigation and drainage paper FAO. Roma – Italia. n. 56.89-114pp.

ALLEN, GR; PEREIRA, L; RAES, D; Y SMIT, M. 2006. Evapotranspiración del Cultivo – Guía para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos. FAO. Roma – Italia. 298p.

ALVAREZ, J. R. 1985. Curso de Riego y Drenaje ed. MACA-IICA. Oruro-Bolivia. p 5 - 11.

BENIOT, G. y GRANT, W. 1985. Excess and deficient water stress effect on 30 years of Aroostook country potatoes yields. American Potato Journal. 62 (2): 49-55.

CALLE, N.; 2009. Análisis de la dinámica poblacional de la polilla de la papa (*Phthorimaea operculella*) en tres comunidades del municipio de Ancoraimes. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía.

CENTA, 2002. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. Guía Técnica Cultivo de Papa. (En Línea). Consultado 24 de Junio 2017. Disponible En: [www.centa.gob.sv/hortalizas/Guia Papa](http://www.centa.gob.sv/hortalizas/Guia%20Papa)

CEPA (Centro de Ecología y Pueblos Andinos), 2008. La Papa Aporte de los Andes a la Alimentación Mundial, Oruro – Bolivia. 223 p.

CHIPANA, R. 1996. Principios de Riego y Drenaje. IRTEC. Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Agronomía. La Paz, Bolivia. 55-88 pp.

CHIPANA, R. 2003. Principios de Riego y Drenaje. IRTEC. Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Agronomía. La Paz.

CHIPANA, R. 2010. Riego de hortalizas. UMSA. La Paz, Bolivia. p. 26-30

CHOQUE, R. 2015. Evaluación del Riego por Superficie Utilizando el Método por Kanis y Surcos Corrugados en Zigzag en el Cultivo de Papa (*Solanum Tuberosum*) en La Estación Experimental de Choquenaira. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 83 p.

CHUNGARA, V. 2010. Calculo II 40-45 pp

Copoulos, T.M. Arias, S. y Ávila, H. 2008. Manual de Producción de la papa. MCA- Honduras, EDA, La Lima-Perú (Oficinas de la FHIA). 8p.

COSTA, J.M., ORTUN ~ O, M.F., CHAVES, M.M. DE 2007. El riego deficitario como una estrategia para ahorrar agua: la fisiología y la eventual aplicación a la horticultura. Diario de Integrativa Biología de la planta 49, 1421-1434.

EKANAYAKE, IJ. 1994. El Estrés por Sequía y las Necesidades de Riego de la Papa. Centro Internacional de la Papa, Lima, Perú. 38 p.

FAO.; 1977a. Calidad del agua para la agricultura. Estudios FAO: Riego y Drenaje 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FAO.; 1977b. Guía para la descripción de perfiles de suelo. 2da. Edición. Roma – Italia. FAO. 64p.

FAO.; 1979. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma – Italia. Departamento económico y Social. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación. Documento 33 Serie Riego y Drenaje.

FAO.; 2002. Deficit irrigation practices. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Water reports nº 22. 102 p.

FAO.; 2003. Descubrir el potencial del agua para la agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. p. 23-26

FAO.; 2006. Evapotranspiración del cultivo. Roma - Italia. Departamento económico y Social. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación. Documento 56 Serie Riego y Drenaje.

FAO.; 2006. Estudio FAO Riego y Drenaje 56, Evapotranspiración del Cultivo, Guías Para la Determinación de Los Requerimientos de Agua de los Cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma - Italia. 298 p.

FAO.; 2008. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. La papa y los recursos hídricos. (en línea). Roma – Italia. Consultado 10 ago. 2016. Disponible en: <http://www.potato2008.org/pdf/IYP-10es>

FAO.; 2010. Evapotranspiración de los Cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma – Italia. 181 p

GOMEZ, P. 2013. Evaluación de Tres Variedades Nativas de Papa (*Solanum Tuberosum L. ssp. Andigena*) Para la Obtención de Papa “Gourmet” Mediante Reproducción Sexual y Asexual en Quipaquipani, Provincia Ingavi La Paz. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 90 p.

GONZÁLEZ, F; HERRERA, J; LÓPEZ, T. 2010. Productividad del agua en maíz, soya y sorgo en suelo Ferralítico Rojo del sur da la Habana. Ciencias técnicas agropecuarias, 19(1): p. 65-72

GUERRA, R. 2012. Acumulación de Nitrógeno en el Cultivo de Papa (*Solanum Tuberosum*) en Asociación con Tarwi (*Lupinus Mutabilis*) en La Comunidad de Patarani Provincia - Aroma. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 122 p.

GRASSI, C. y DULA, J. 1987. Riegos y Drenajes. Fundamentos de Riego. Centro interamericano de desarrollo integral de aguas y Tierras CIDÍAT. Mendoza, Argentina. 601 p.

HUAMÁN, Z.; 2000. Botánica Sistemática y Morfología de la papa. CIP, Lima Perú,

Boletín de Información, Técnica Nro. 6. 22 p.

HUANCA, R.; 2008. Evaluación de referentes niveles de abonamiento orgánico y riego deficitario sobre el desarrollo y rendimiento de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en el Altiplano central. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 150 p

INIA, 2009. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Manual de Papa Para la Araucanía: Manejo y Plantación. Boletín N° 193 . (En Línea). Consultado 24 de Junio 2017. Disponible En: [www2.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR36470.pdf](http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR36470.pdf)

INTA, 2017. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Cultivo de Papa. (En Línea). Consultado 24 de Junio 2017. Disponible En: [www.inta.gov.ar/sites/default/files/script/papa](http://www.inta.gov.ar/sites/default/files/script/papa)

JARA, J. 1999. Relaciones Agua, Planta, Produccion. En: Jornadas de Extension Agrícola. Universidad Catolica de Temuco. Chile. p. 30-34

KRAMER, P. J. 1983. Relaciones Hídricas del suelo y planta. Una síntesis moderna, traducida de inglés por Leonar Tejada. Edutex S. A. México. 539 p.

LAURA, P. 2013. Evaluación del sistema de riego de la comunidad de barco belén del municipio de Achacachi. Trabajo dirigido. Facultad de agronomía. UMSA. La Paz, Bolivia. p. 33

MACA, 2005. Dirección general de desarrollo productivo y Financiamiento. Estadísticas agrícolas Campañas 2003-2005. Chuquisaca- Bolivia.

MAMANI, W.; 2015. Riego Deficitario en el Cultivo de Papa (*Solanum tuberosum* L.), en el Municipio de Achacachi – La Paz. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 81 p.

MAMANI, M.; 2009. Caracterización y Evaluación de la Diversidad de Papas Nativas en el Municipio de Umala del Departamento de La Paz. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 137 p.

MARINO, E.; 2010. Efecto de Biofertilizantes Caseros y Elaborados, Aplicados al Cultivo de La Papa (*Solanum Tuberosum* L.) en la Comunidad de Cañacota Cochabamba. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 75 p.

MEDRANO, H; BOTA, J; CIFRE, J; FLEXAS, J; RIBAS-CARBÓ, M; GULÍAS, J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas (en línea). Investigaciones geográficas no. 43: p. 63-84. Consultado 18 oct. 2012. Disponible en <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045pdf>.

MICUCCI, F; ÁLVAREZ, C. 2003. El agua en los cultivos extensivos III: Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua. Archivo agronómico. 8. INPOFOS Cono Sur, Argentina.

MONTES DE OCA, I. 2005. Enciclopedia geográfica de Bolivia. Atenas S.R.L. La Paz – Bolivia. 871 p.

ORTIZ, V. B.; ORTIZ, S. C. 1984. Edafología. 4<sup>ta</sup> ed. México. 374 p.

OWEIS, T. and HACHUN, A. 2005. Agricultural Water Management. p. 80, 57-73.

OWEIS, T. 2012. Improving agricultural water management: from efficiency to productivity. Presentación. Facultad de Agronomía. UMSA. La Paz, Bolivia.

PACHECO, J; PÉREZ A. 2010. Evaluación del Manejo del Riego de La Papa en La Empresa de Cultivos Varios “Valle del Yabú”. Santa Clara, Cuba. Ciencias técnicas agropecuarias 19(3): 47-52.

PADILLA, D. 2014. Evaluación de Diferentes Tratamientos Hidricos, en el Cultivo de la Vid (variedad moscatel de Alejandria), a Travez de la Programacion de Riego Deficitario

Controlado, en el Municipio de Luribay. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 109 p.

PALACIOS, A. 2013. Evaluación de la Productividad del Agua, en el Cultivo de Vid, en el Municipio de Luribay. Tesis Maestría Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 150 p.

PATTY, S. 2009. Determinación del Nivel Crítico del Agua del Suelo Para el Desarrollo del Cultivo de Papa (*Solanum Tuberosum L.*) Mediante el Uso de Técnicas Nucleares. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 111 p.

PERRIN, R; WINKELMANN, D; MOSCARDI, E y ANDERSON, J.1988. La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos. Manual de metodología de evaluación agronómica. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. CIMMYT. 3 ed. México D.F. 90 p.

PINAYA, W. 2013. Producción de Semilla Pre-Básica de Tres Variedades de Papa Con la Aplicación de Dos Niveles de Fertilización Bajo Ambiente Atemperado en El Centro Experimental Quipaquipani, Viacha. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 91 p.

PLAN DE DESARROLLO MUNICIPAL (PDM) Achacachi, 2010. Elaborado por el PNUD. 133 p.

PROINPA, 1998. Promoción Investigación de Productos Andinos. Programa de Investigación de la Papa, Informe Compendio del Programa de Investigación de la Papa. Documento de Trabajo 9/95. Cochabamba - Bolivia.

QUIROGA, J.; 2008. Efecto de Tres Épocas de Siembra y Uso de Variedades de Papas Como Opciones de Adaptación al Cambio Climático en la Comunidad de Viluyo, Provincia Manco Kapac, Dpto. de La Paz. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 92 p.



QUISPE, M. 2013. Efecto de Bioinsumos Agrícolas en el Cultivo de Papa (*Solanum tuberosum*) y en las Propiedades del Suelo en la Estación Experimental de Quipaquipani, Provincia Ingavi - La Paz . Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 101 p.

ROJAS, F. 2001. Catálogo de plantas. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. 78 p.

RENAUL. 2003. Incremento de la productividad del agua a nivel de campo. Organización de las Naciones Unidas Para la agricultura y la alimentación.

SÁNCHEZ-BLANCO, M. J. TORRECILLAS, A., 1995. Aspectos relacionados con la utilización de estrategias de Riego Deficitario Controlado en cultivos leñosos.

SENAHMI. 2010. Datos meteorológicos e hidrológicos (planillas de registro mensual e histórico).

SERRANO, G. 2010. Ingeniería del Riego y Drenaje. La Paz, Bolivia. 246 p.

SIERRA, C. 2005. Fertilización de la papa. (En línea) Chile. Consultado 15 de noviembre de 2016. Disponible en [www.elsitioagricola.com/articulos/sierra\\_fertilizacion](http://www.elsitioagricola.com/articulos/sierra_fertilizacion).

SOLÓRZANO, GR de; LACRUZ, C.; GARCÍA, AM.; BECERRA, F. 1993. El riego en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) y su efecto sobre el ataque de polilla a nivel de tubérculo (en línea). Mérida, Venezuela. Consultado 7 mar. 2013. Disponible en [http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas\\_tec/FonaiapDivulga/fd44/texto/riego.htm](http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_tec/FonaiapDivulga/fd44/texto/riego.htm)

UNA, 2005. Universidad Nacional Agraria. Selección y Calibración de Indicadores Locales y Técnico para Evaluar la Degradación de los Suelos Laderas, en la Microcuenca Cuscamá El Tuma - La Dalia Matagalpa, 2005. Managua Nicaragua. (En Línea). Consultado 24 de Junio 2017. Disponible En: [www.repositorio.una.edu.ni](http://www.repositorio.una.edu.ni)

VILLCA, L. 2013. Riego Deficitario en el Cultivo de Tomate (*Lycopersicon Esculentum Mill*), en el Municipio de Luribay-La Paz. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 97 p.

ZEBALLOS H., BALDERRAMA F., CONDORI B. Y BLAJOS J. 2009. Economía de la papa en Bolivia (1998-2007). Ed. Live Graphics. Fundación PROINPA. Cochabamba, Bolivia.

ZORRILLA, S. 1986. Introducción a la metodología de la investigación. Ed. León y Cal. México. p. 25

**ANEXOS**

## Anexo 1. Registros de las variables agronómicas

### a. Altura de planta

<i>Bloques</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>
<i>I</i>	52,65	60,77	62,07
<i>II</i>	54,63	57,72	57,88
<i>III</i>	50,57	56,48	60,05
<i>IV</i>	48,58	52,10	56,28
<i>Promedio</i>	51,61	56,77	59,07

### b. Numero de tallos por planta

<i>Bloques</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>
<i>I</i>	3,33	4,33	4,33
<i>II</i>	3,33	4,33	4,50
<i>III</i>	3,33	4,50	4,17
<i>IV</i>	3,17	4,33	3,50
<i>Promedio</i>	3,29	4,38	4,13

### c. Numero de tubérculos por planta

<i>Bloques</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>
<i>I</i>	10,25	14,00	13,50
<i>II</i>	10,75	14,00	15,25
<i>III</i>	10,25	13,75	15,50
<i>IV</i>	10,00	12,75	13,50
<i>Promedio</i>	10,31	13,63	14,44

### d. Rendimiento del cultivo de papa por unidad experimental

<i>Bloques</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>
<i>I</i>	33,20	46,00	43,30
<i>II</i>	29,90	47,00	49,80
<i>III</i>	34,00	46,50	49,10
<i>IV</i>	31,10	38,70	42,00
<i>Promedio (kg/U.E.)</i>	32,05	44,55	46,05
<i>Rendimiento (kg/ha)</i>	28.616,07	39.776,79	41.116,07
<i>Rendimiento (t/ha)</i>	28,62	39,80	41,12

## Anexo 2. Análisis de varianza para las variables agronómicas

### a. Análisis de varianza para altura de planta

<i>FV</i>	<i>GL</i>	<i>SC</i>	<i>CM</i>	<i>Fc</i>	<i>P( 0,05)</i>	<i>Significancia</i>
<i>Bloques</i>	3	60,844	20,281	6,923	0,022	*
<i>Tratamientos</i>	2	116,821	58,411	19,939	0,002	*
<i>Error</i>	6	17,576	2,929			
<i>total</i>	11	195,242				

CV 7,5 %

Probabilidad del 5% de significancia

### b. Análisis de varianza para número de tallos por planta

<i>FV</i>	<i>GL</i>	<i>SC</i>	<i>CM</i>	<i>Fc</i>	<i>P( 0,05)</i>	<i>Significancia</i>
<i>Bloques</i>	3	0,282	0,094	1,684	0,268	ns
<i>Tratamientos</i>	2	2,574	1,287	23,084	0,002	*
<i>Error</i>	6	0,334	0,056			
<i>total</i>	11	3,190				

CV 13,7 %

Probabilidad del 5% de significancia

### c. Análisis de varianza para número de tubérculos por planta

<i>FV</i>	<i>GL</i>	<i>SC</i>	<i>CM</i>	<i>Fc</i>	<i>P( 0,05)</i>	<i>Significancia</i>
<i>Bloques</i>	3	2,938	0,979	2,984	0,118	ns
<i>Tratamientos</i>	2	38,198	19,099	58,206	0,000	*
<i>Error</i>	6	1,969	0,328			
<i>total</i>	11	43,104				

CV 15,4 %

Probabilidad del 5% de significancia

### d. Análisis de varianza para rendimiento

<i>FV</i>	<i>GL</i>	<i>SC</i>	<i>CM</i>	<i>Fc</i>	<i>P( 0,05)</i>	<i>Significancia</i>
<i>Bloques</i>	3	60,817	20,272	2,810	0,130	ns
<i>Tratamientos</i>	2	472,667	236,333	32,753	0,001	*
<i>Error</i>	6	43,293	7,216			
<i>total</i>	11	576,777				

CV 17,7 %

Probabilidad del 5% de significancia

### e. Análisis de varianza para número de tubérculos según diámetro tamaño I

<i>FV</i>	<i>GL</i>	<i>SC</i>	<i>CM</i>	<i>Fc</i>	<i>P( 0,05)</i>	<i>Significancia</i>
<i>Bloques</i>	3	1,104	0,368	1,656	0,274	ns
<i>Tratamientos</i>	2	3,125	1,562	7,031	0,027	*
<i>Error</i>	6	1,333	0,222			
<i>total</i>	11	5,563				

Probabilidad del 5% de significancia

**f. Análisis de varianza para número de tubérculos según diámetro tamaño II**

<i>FV</i>	<i>GL</i>	<i>SC</i>	<i>CM</i>	<i>Fc</i>	<i>P( 0,05)</i>	<i>Significancia</i>
<i>Bloques</i>	3	0,307	0,102	0,057	0,981	<i>ns</i>
<i>Tratamientos</i>	2	2,260	1,130	0,624	0,567	<i>ns</i>
<i>Error</i>	6	10,865	1,811			
<i>total</i>	11	13,432				

Probabilidad del 5% de significancia

**g. Análisis de varianza para número de tubérculos según diámetro, tamaño III**

<i>FV</i>	<i>GL</i>	<i>SC</i>	<i>CM</i>	<i>Fc</i>	<i>P( 0,05)</i>	<i>Significancia</i>
<i>Bloques</i>	3	2,438	0,813	0,401	0,758	<i>ns</i>
<i>Tratamientos</i>	2	1,219	0,609	0,301	0,751	<i>ns</i>
<i>Error</i>	6	12,156	2,026			
<i>total</i>	11	15,813				

Probabilidad del 5% de significancia

**h. Análisis de varianza para número de tubérculos según diámetro, tamaño IV**

<i>FV</i>	<i>GL</i>	<i>SC</i>	<i>CM</i>	<i>Fc</i>	<i>P( 0,05)</i>	<i>Significancia</i>
<i>Bloques</i>	3	21,141	7,047	14,548	0,004	*
<i>Tratamientos</i>	2	2,094	1,047	2,161	0,196	<i>ns</i>
<i>Error</i>	6	2,906	0,484			
<i>total</i>	11	26,141				

Probabilidad del 5% de significancia

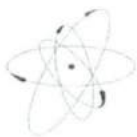
### Anexo 3. Análisis de varianza para la productividad del agua

<i>FV</i>	<i>GL</i>	<i>SC</i>	<i>CM</i>	<i>Fc</i>	<i>P( 0,05)</i>	<i>Significancia</i>
<i>Bloques</i>	3	10,831	3,610	1,273	0,365	<i>ns</i>
<i>Tratamientos</i>	2	5,246	2,623	0,925	0,447	<i>ns</i>
<i>Error</i>	6	17,017	2,836			
<i>total</i>	11	33,094				

CV 17,4 %

Probabilidad del 5% de significancia

## Anexo 4. Análisis físico - químico de aguas



IBTEN

### MINISTERIO DE EDUCACION

INSTITUTO BOLIVIANO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA NUCLEAR

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES

UNIDAD DE ANÁLISIS Y CALIDAD AMBIENTAL

## ANALISIS FISICO QUIMICO DE AGUAS

INTERESADO : *PROYECTO FONTAGRO*  
PROCEDENCIA : *Departamento LA PAZ, Prov. OMASUYOS,*  
*Municipio ACHA CACHI, Com. BARCO BELÉN.*

Nº SOLICITUD: *113C / 2012*  
FECHA DE RECEPCION : *24 / Mayo / 2012*  
FECHA DE ENTREGA : *11 / Junio / 2012*  
Nº Factura : *5455 / 2012*

*FACULTAD DE AGRONOMÍA - UMSA*

DESCRIPCIÓN : *Muestra de agua - Código M - R.I. - Río Keka.*

Nº Lab.	PARAMETRO	Resultado	Unidades	Método
303-01 /2012	pH	7,53	-	Potenciometría
303-02 /2012	Conductividad eléctrica	108,70	µS/cm	Potenciometría
303-03 /2012	Sodio	4,92	mg / L	Flamometría
303-04 /2012	Potasio	1,53	mg / L	Flamometría
303-05 /2012	Calcio	5,87	mg / L	Absorción atómica
303-06 /2012	Magnesio	2,69	mg / L	Absorción atómica
303-07 /2012	Cloruros	2,76	mg / L	Método argentométrico
303-08 /2012	Carbonatos	0,00	mg / L	Volumetría
303-09 /2012	Bicarbonatos	30,25	mg / L	Volumetría
303-10 /2012	Sulfatos	13,05	mg / L	Espectrofotometría UV-Visible
303-11 /2012	Sólidos Suspendidos	9,00	mg / L	Gravimétrico
303-12 /2012	Sólidos Totales	75,41	mg / L	Gravimétrico
303-13 /2012	Sólidos Disueltos	66,41	mg / L	Gravimétrico
303-14 /2012	Boro	0,72	mg / L	Espectrofotometría UV-Visible

OBSERVACIONES.-



RESPONSABLE DE LABORATORIO

JORGE CHUNGARA C.



## Anexo 5. Análisis físico de suelos

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMON  
FAC. CIENCIAS AGRICOLAS Y PECUARIA  
"Martín Cárdenas"  
Dpto. Ingeniería Agrícola

LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS



### ANALISIS FISICO DE SUELOS

Interesado: UMSA

Proyecto: FONTAGRO

Procedencia: Municipio Achacachi, Prov. Omasuyos - La Paz

Responsable Estudio: Ing. Roger Chipana V.

No. LAB	537	538		
Identificación	Muestra 1	Muestra 2		
Comunidad	Barco Belèn	Barco Belèn		
Profundidad cm	0-30	0-30		
Humedad (W) (%)				
TEXTURA	FY	Y		
ARCILLA (Y) %	29	56		
LIMO (L) %	44	34		
ARENA (A) %	27	10		
Densidad Aparente (Da) gr/cc				
Densidad Real (Dr) gr/cc				
% Capacidad de Campo (0,33 Bar)	23,16	33,77		
% Equivalente de humedad (1 Bar)	16,37	31,41		
% Punto de Ruptura Capilar (5 Bar)	12,70	26,03		
% Pto. Marchitez Reversible (10 Bar)	10,85	21,64		
% Pto. de Marchitez Permanente (15 bar)	10,82	21,49		
% Agua disponible				
Conductividad Hidráulica (K) cm/hora *				

\* = Método Bower (carga constante)

FY = Franco arcilloso

Y = Arcilloso

Fecha: Cbba., Junio de 2012.

Dir. Av. Petrolera Km 5- Tel. 4237596-FAX: 4762385.  
E-mail: lab.suelos@agr.umss.edu.bo

### Anexo 6. Planilla de cálculo de la velocidad de infiltración básica (VIB)

Nº	Tiempo		Lamina			Vi		F	X	Y	X * Y	X <sup>2</sup>	N
	TAC	d T	I AC		d l	L/m <sup>2</sup> /min	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /min		log TAC	log F			
	min	min	mm	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	mm								
1	2,2	2,2	20	0,02	20	9,09	0,0091	0,017	0,342	-1,757	-0,602	0,117	1
2	6,5	4,3	40	0,04	20	4,62	0,0046	0,033	0,815	-1,487	-1,212	0,664	1
3	13,2	6,6	60	0,06	20	3,02	0,0030	0,045	1,119	-1,347	-1,507	1,252	1
4	22,5	9,3	80	0,08	20	2,15	0,0022	0,054	1,351	-1,264	-1,708	1,826	1
5	34,0	11,5	100	0,10	20	1,73	0,0017	0,061	1,531	-1,213	-1,857	2,345	1
6	48,0	14,0	120	0,12	20	1,43	0,0014	0,065	1,681	-1,185	-1,992	2,826	1
7	63,1	15,1	140	0,14	20	1,32	0,0013	0,068	1,800	-1,167	-2,101	3,240	1
8	79,5	16,4	160	0,16	20	1,22	0,0012	0,069	1,900	-1,159	-2,202	3,612	1
9	96,8	17,3	180	0,18	20	1,16	<b>0,0012</b>	0,070	1,986	-1,157	-2,298	3,944	<b>1</b>
10	114,3	17,5	200	0,20	20	1,14	0,0011	0,070	2,058	-1,157	-2,381	4,236	1
11	131,9	17,6	220	0,22	20	1,14	0,0011	0,070	2,120	-1,157	-2,453	4,495	1
<b>Σ</b>									16,704	-11,737	-15,480	28,556	9

La velocidad de infiltración básica (VIB), obtenida en el ensayo fue:

$$VIB = 0,0012 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{min} = 6,94 \text{ cm/hr}$$

**Anexo 7. Láminas de riego (R) en base a ETo y Pe, y agua total (R+Pe), aplicados al cultivo de papa, (mm).**

Nº de Aplicación	Fecha de evaluación	Frecuencia (días)	PP (mm)	ETo (mm)	Pe (mm)	Lamina de riego R=ETo-Pe (mm)	T3 100%	T2 75%	T1 50%	T3	T2	T1
							R3 (mm)	R2 (mm)	R1 (mm)	R3+Pe (mm)	R2+Pe (mm)	R1+Pe (mm)
Emergencia			3,40	147,50	3,06	0,00	0,00	0,00	0,00	3,06	3,06	3,06
1	05/12/2011	5	3,20	20,40	2,88	17,52	17,52	17,52	17,52	20,40	20,40	20,40
2	09/12/2011	4	0,20	20,55	0,18	20,37	20,37	15,28	10,19	20,55	15,46	10,37
3	15/12/2011	6	6,00	23,40	5,40	18,00	18,00	13,50	9,00	23,40	18,90	14,40
4	21/12/2011	6	2,00	27,62	1,80	25,82	25,82	19,37	12,91	27,62	21,17	14,71
5	26/12/2011	5	8,20	13,35	7,38	5,97	5,97	4,48	2,99	13,35	11,86	10,37
6	31/12/2011	5	2,60	18,89	2,34	16,55	16,55	12,41	8,28	18,89	14,75	10,62
7	05/01/2012	5	2,00	15,83	1,80	14,03	14,03	10,52	7,02	15,83	12,32	8,82
8	11/01/2012	6	1,20	24,82	1,08	23,74	23,74	17,81	11,87	24,82	18,89	12,95
9	16/01/2012	5	0,80	22,13	0,72	21,41	21,41	16,06	10,71	22,13	16,78	11,43
10	21/01/2012	5	0,40	18,91	0,36	18,55	18,55	13,91	9,28	18,91	14,27	9,64
11	26/01/2012	5	0,40	13,55	0,36	13,19	13,19	9,89	6,60	13,55	10,25	6,96
12	01/02/2012	6	16,60	20,56	14,94	5,62	5,62	4,22	2,81	20,56	19,16	17,75
13	04/02/2012	4	7,00	10,04	6,30	3,74	3,74	2,81	1,87	10,04	9,11	8,17
14	09/02/2012	5	2,20	15,55	1,98	13,57	13,57	10,18	6,79	15,55	12,16	8,77
15*	14/02/2012	5	17,20	14,40	15,48	-1,08	-1,08	-1,08	-1,08	14,40	14,40	14,40
16*	19/02/2012	5	32,00	10,97	28,80	-17,83	-17,83	-17,83	-17,83	10,97	10,97	10,97
17**	24/02/2012	5	11,60	15,37	10,44	4,93	4,93	3,70	2,47	15,37	14,14	12,91
18**	29/02/2012	5	8,00	18,70	7,20	11,50	11,50	8,63	5,75	18,70	15,83	12,95
19**	05/03/2012	5	9,80	17,12	8,82	8,30	8,30	6,23	4,15	17,12	15,05	12,97
20*	10/03/2012	5	21,40	13,79	19,26	-5,47	-5,47	-5,47	-5,47	13,79	13,79	13,79
21**	15/03/2012	5	0,40	20,24	0,36	19,88	19,88	14,91	9,94	20,24	15,27	10,30
22	20/03/2012	5	7,80	13,84	7,02	6,82	6,82	5,12	3,41	13,84	12,14	10,43
23	24/03/2012	4	2,20	13,45	1,98	11,47	11,47	8,60	5,74	13,45	10,58	7,72
Madurez F.			20,40	65,39	18,36	0,00	0,00	0,00	0,00	18,36	18,36	18,36
<b>Total</b>			187,00	616,37	168,30	256,60	256,60	192,12	127,65	424,90	360,40	295,91

**NOTA.** \* En esas evaluaciones la precipitación (PP) fue mayor a la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), por lo cual de la resta ET<sub>o</sub> – PP resulta con signo (-), y que además se genera un excedente y/o almacenamiento del agua de lluvia en el suelo. Para fines de balance total lleva el signo negativo.

\*\* Significa que la PP fue menor a la ET<sub>o</sub>, debiendo aplicarse los riegos en base a la lámina (R), sin embargo para el cálculo de la láminas de riego final R1, R2 y R3 se tomó en cuenta el almacenamiento de agua de la PP de la evaluación anterior, por lo cual la lámina final resulta menor o cero ya que es compensada, es así que las láminas finales se detallan en el cuadro 20.

**Anexo 8. Reporte fotográfico**



**Estación meteorológica automática DAVIS Vantage Pro 2, que provee datos de forma inalámbrica.**



**Consola de registro inalámbrico y Laptop para descargado de los datos climáticos**



**Prueba de infiltración del agua**



**Lecturas y registro de infiltración**



**Identificación y medición de los horizontes del suelo**



**Calicata con los horizontes del suelo**



**Roturado y mullido**



**Surcado y abonado**



**Trabajo conjunto con el coordinador del proyecto Fontagro Ing. Rolando Cespedes y colaboradores de la comunidad Barco Belen**



**Establecimiento de la parcela experimental**



**Río Keka fuente del agua para riego, cerca a la parcela experimental**



**Riego a inicios de la fase de estolonización**



**Muestreo del suelo para determinar la humedad**



**Pesado de la muestra de suelo**



**Mayor incidencia de lluvias en plena floración y tuberización**



**Riego en la fase de floración y tuberización (Cuando  $P_e < E_{To}$ )**



**Fumigado del cultivo**



**Deshierbe y aporque**



**Medición de altura de planta**



**Madurez fisiológica**



**Cosecha por unidad experimental**



**Colaboracion de compañeros del Proyecto Fontagro**



**Cosecha concluida de cada unidad experimental**



**Conteo de cantidad de tuberculos por planta**





**Vista general de los tubérculos producidos antes de la clasificación según su diámetro**



**Clasificación de los tubérculos según su diámetro**



**Medición del diámetro de un tubérculo**



**Tubérculo de clase I**