



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE RIEGO POR
ASPERSIÓN DEL SISTEMA PIVOTE CENTRAL DEL GRUPO DE
GESTIÓN EMPRESARIAL PROGRESO, MAÑAZO”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. ELARD DANTE YAMPASI KANA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2020



DEDICATORIA

A mis queridos padres Alfredo y Mercedes que con su amor incondicional apoyaron en mi formación como persona de bien con humildad y perseverancia.

A mis hermanas y hermanos que siempre me apoyaron moralmente en los momentos difíciles de mi carrera.

A mis amigos y amigas compañeros de aula con quienes compartimos muchas vivencias en la etapa de estudiante en la Universidad.

YAMPASI KANA, Elard D.



AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme salud y bienestar para cumplir mis objetivos en la vida.

A mi familia por brindarme total apoyo incondicional y en especial a mis padres que siempre me inculcaron amor y valores.

A la Universidad Nacional del Altiplano por haberme acogido en sus aulas durante cinco años de estudios y formado como profesional.

A mis docentes de la Facultad de Ingeniería Agrícola, quienes me brindaron las enseñanzas para mi ejercicio como profesional Ingeniero Agrícola en la sociedad.

A mi asesor de tesis por apoyar y brindarme conocimientos que hicieron realidad el presente trabajo.

YAMPASI KANA, Elard D.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 13

ABSTRACT..... 14

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES 15

1.2. PROBLEMA 16

1.3. JUSTIFICACIÓN 18

1.4. OBJETIVOS 18

1.4.1. Objetivo general 18

1.4.2. Objetivos específicos 19

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES 20

2.2. BASES TEÓRICAS 23

2.2.1. Sistemas de riego por aspersión 23

2.2.1.1. Sistemas fijos..... 23

2.2.1.2. Sistemas semifijos 24

2.2.1.3. Sistemas móviles 24



2.2.2. Máquina de regar pivote central	24
2.2.3. Componentes principales del sistema de riego por pivot central.....	26
2.2.3.1. Pivote.....	26
2.2.3.2. Tramos y torres de conducción	27
2.2.3.3. Aspersores múltiples	28
2.2.3.4. Caja de control de torre y cable del tramo	28
2.2.3.5. Anillo colector y tubo “J”.....	29
2.2.3.6. Panel de control.....	29
2.2.3.7. Temporizador	30
2.2.3.8. Unidades motrices	31
2.2.3.9. Sistemas de control de la máquina	32
2.2.3.10. Emisores o aspersores	33
2.2.3.11. Tuberías	35
2.2.3.12. Equipos y accesorios hidráulicos	36
2.2.3.13. Sistema de bombeo.....	37
2.2.3.14. Unidad de almacenamiento	38
2.2.4. Características de riego con pivote	38
2.2.4.1. Variación del caudal emitido y la pluviosidad en el lateral	38
2.2.4.2. Uniformidad de riego con pivote central.....	39
2.2.5. Evaluación de equipo pivote	41
2.2.5.1. Datos recogidos	41
2.2.5.2. Metodología en campo	42
2.2.5.3. Cálculo de los parámetros de evaluación	45
2.2.6. Conceptos agronómicos de riego	46
2.2.6.1. Propiedades del suelo	46



2.2.6.2.	Almacenamiento de agua en el suelo	48
2.2.6.3.	Disponibilidad de agua.....	50
2.2.6.4.	Movimiento del agua en el suelo.....	51
2.2.6.5.	Lamina de riego en aspersión.....	52
2.2.6.6.	Requerimiento de riego	53
2.2.7.	Eficiencia de riego	54
2.2.7.1.	Eficiencia de almacenamiento.....	55
2.2.7.2.	Eficiencia de conducción	56
2.2.7.3.	Eficiencia de aplicación	57
2.2.8.	El cultivo de quinua	58
2.2.8.1.	Variedad INIA 431-Altiplano	59

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO	60
3.1.1.	Ubicación política y geográfica	60
3.1.2.	Clima.....	60
3.1.3.	Sistema de riego.....	61
3.1.4.	Cultivo.....	64
3.2.	CARACTERIZACIÓN FÍSICO-HÍDRICAS DEL SUELO.....	65
3.2.1.	Determinación de la textura de suelo.....	65
3.2.2.	Determinación de la densidad aparente del suelo	66
3.2.3.	Obtención de capacidad de campo.....	67
3.2.4.	Determinación del punto de marchites permanente.....	68
3.2.5.	Obtención de la velocidad de infiltración	69
3.2.5.1.	Método de procedimiento en campo:	69



3.2.5.2. Procedimiento en gabinete:	70
3.2.6. Determinación de la Infiltración básica	72
3.2.7. Lamina de riego neta y bruta	73
3.3. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL SISTEMA DE RIEGO PIVOTE CENTRAL	74
3.3.1. Radio irrigado (m).....	74
3.3.2. Radio hasta la última torre (m)	74
3.3.3. Velocidad de desplazamiento (m/h).....	74
3.3.4. Tiempo de revolución (h).....	75
3.3.5. Área (ha)	76
3.3.6. Caudal del sistema (m ³ /h)	76
3.3.7. Lámina aplicada (mm)	76
3.3.8. Presión de operación del sistema (m.c.a).....	77
3.4. DETERMINACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO	77
3.4.1. Cálculo de la lámina media aplicada por el pivote central	79
3.4.2. Determinación del coeficiente de uniformidad Heermann y Hein	79
3.5. DETERMINACIÓN LOS FACTORES DE LA EFICIENCIA DE RIEGO. 80	
3.5.1. Determinación de la eficiencia de almacenamiento.....	81
3.5.2. Determinación de la eficiencia de conducción	81
3.5.3. Determinación de la eficiencia de aplicación	81
3.5.4. Determinación de la eficiencia de riego.....	82

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADO DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICO-HÍDRICAS DEL SUELO	83
---	-----------



4.1.1. Textura de suelo	83
4.1.2. Resultados de la densidad aparente del suelo	84
4.1.3. Resultados de capacidad de campo y punto de marchites permanente.....	86
4.1.4. Resultados de velocidad de infiltración	86
4.1.5. Resultado de infiltración básica	88
4.1.6. Resultado de lámina de riego neta y bruta	88
4.2. RESULTADO DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL SISTEMA DE RIEGO	88
4.3. RESULTADO DE LA DETERMINACIÓN DE UNIFORMIDAD DE RIEGO	89
4.3.1. Lámina media precipitada por el pivote central.....	89
4.3.2. Resultados del coeficiente de uniformidad Heermann y Hein (CU_h)	91
4.4. RESULTADO DE LOS FACTORES DE LA EFICIENCIA DE RIEGO.....	92
4.4.1. Eficiencia de almacenamiento	92
4.4.2. Eficiencia de conducción	93
4.4.3. Eficiencia de aplicación	93
4.4.4. Resultados de eficiencia de riego.....	94
V. CONCLUSIONES	95
VI. RECOMENDACIONES	96
VII. REFERENCIAS	97
ANEXOS.....	100
Anexo.1: Información meteorológica estación: CO. Mañazo	100
Anexo.2: Prueba de infiltración (método del cilindro infiltró metro)	101
Anexo.3: Función de la infiltración acumulada (Método de mínimos cuadrados).....	102
Anexo.4: Ecuación de velocidad de infiltración e infiltración básica	103
Anexo 5: Red hidrométrica– sistema de riego Cabana-Mañazo	104



Anexo 6: Análisis caracterización de suelo LAQ&S E.I.R.L.	105
Anexo 7: Análisis de caracterización de suelo (Laboratorio INIA)	106
Anexo 8: Panel fotográfico.....	107

Área : Recursos Hídricos

Línea : Riego por aspersión

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 15 de enero del 2020



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fotografía de pivote instalada en campo.....	27
Figura 2: Fotografía de tramos y torres de conducción	28
Figura 3: Caja de control de torre	29
Figura 4: Panel de control del sistema	30
Figura 5: Unidad motriz.....	32
Figura 6: Tablero de control del sistema	33
Figura 7: Triángulo de texturas según clasificación USDA	47
Figura 8: Ubicación del área de estudio.....	60
Figura 9: Sistema riego por pivote central en funcionamiento	62
Figura 10: Esquema hidráulico del sistema de riego pivote central.	64
Figura 11: Puntos de muestreo en campo	66
Figura 12: Obtención y pesaje la muestra en campo	67
Figura 13: Cilindros infiltrómetros	69
Figura 14: Disposición de pluviómetros en campo	78
Figura 15: Curva de infiltración acumulada	87
Figura 16: Lámina precipitada colectadas a lo largo del radio irrigado	90



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características físico-hídricos de suelo	84
Tabla 2: Densidad aparente a profundidad de 0 a 20 cm.....	85
Tabla 3: Densidad aparente a profundidad de 20 a 40 cm.....	85
Tabla 4: Capacidad de campo y punto de marchites permanente según textura	86
Tabla 5: Parámetros hidráulicos evaluados en el sistema del riego.....	89
Tabla 6: Lámina colectada por pluviómetro y coeficiente de uniformidad.....	91
Tabla 7: Eficiencia de aplicación.....	94



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ANA	: Autoridad nacional del agua
PSI	: Programa Sub sectorial de Irrigaciones
NBR	: Normas Brasileñas
USDA	: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América
RPRG	: Rociadores de Placa de Rociado Giratorio
MINAGRI	: Ministerio de Agricultura y Riego
RPRF	: Rociadores de Placa de Rociado Fijo
INIA	: Instituto Nacional de Innovación Agraria



RESUMEN

En el presente trabajo el objetivo fue determinar la eficiencia de riego por aspersión del sistema pivote central para el cultivo de quinua del grupo de gestión empresarial progreso en el distrito de Mañazo - Puno. Para ello, en primer momento se realizó la caracterización de las propiedades físico-hídricas del suelo a partir de muestras analizadas en laboratorio; se continuó con la determinación de los parámetros hidráulicos del sistema de riego pivote central RKD abastecida por un canal lateral de la irrigación Cabana-Mañazo; también se determinó el Coeficiente de Uniformidad (CU_h) de la pluviometría de los aspersores con el método de Heermann y Hein (1968), y finalmente se prosiguió con la determinación de las eficiencias de almacenamiento, conducción y aplicación, en base a la metodología recomendada por Peña, (2012). Los resultados obtenidos de la caracterización del suelo mostraron un suelo franco arenoso, con pH de 5.44, densidad aparente (Dap) 1.48 g/cm^3 , capacidad de campo (CC) 15.67%, punto de marchitez (PMP) de 8.22%. Los parámetros hidráulicos obtenidos en el sistema de riego pivote central, fue: velocidad de desplazamiento de 103.45 m/h operado al 60% de marcha para regar 8.55 ha, tiempo de riego 8.67 h, caudal de $52.64 \text{ m}^3/\text{h}$ y presión de trabajo de 11.22 m.c.a. El CU_h resulto de 84.87%. Las eficiencias de almacenamiento, conducción y aplicación resultaron de 99%, 100% y 76% respectivamente, por consiguiente, la eficacia de riego fue del 75%. De los resultados se concluye que la eficiencia de riego es aceptable, por otro lado, el valor del CU_h indica que el pivote central brinda una adecuada pluviometría. Sin embargo, el 75% de eficiencia de riego obtenido para este sistema de riego es bajo que fue consecuencia de mala operación del sistema de riego.

Palabras clave: Eficiencia de riego, riego tecnificado, pivote de riego, eficiencia de aplicación, uniformidad de riego.



ABSTRACT

In the present work the objective was to determine the sprinkler irrigation efficiency of the central pivot system for the cultivation of quinoa of the progress business management group in the district of Mañazo - Puno. To do this, in the first moment the characterization of the physical-hydric properties of the soil was carried out from samples analyzed in the laboratory; The determination of the hydraulic parameters of the central pivot irrigation system RKD, supplied by a lateral channel of the Cabana-Mañazo irrigation, continued; The Uniformity Coefficient (CUh) of the sprinkler rainfall was also determined with the method of Heermann and Hein (1968), and finally the determination of the storage, conduction and application efficiencies was continued, based on the recommended methodology. by Peña, (2012). The results obtained from the characterization of the soil showed a sandy loam soil, with pH of 5.44, apparent density (Dap) 1.48 g/cm^3 , field capacity (CC) 15.67%, wilting point (PMP) of 8.22%. The hydraulic parameters obtained in the central pivot irrigation system were: displacement speed of 103.45 m/h operated at 60% speed to irrigate 8.55 ha, irrigation time 8.67 h, flow of $52.64 \text{ m}^3/\text{h}$ and working pressure of 11.22 mca The CUh was 84.87%. Storage, conduction and application efficiencies were 99%, 100% and 76% respectively, therefore, the irrigation efficiency was 75%. From the results it is concluded that the irrigation efficiency is acceptable, on the other hand, the value of the CUh indicates that the central pivot provides adequate rainfall. However, the 75% irrigation efficiency obtained for this irrigation system is low, which was a consequence of poor operation of the irrigation system.

Keywords: Irrigation efficiency, technical irrigation, irrigation pivot, application efficiency, irrigation uniformity.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

Los sistemas de riego por aspersión más antiguos datan de los principios de siglo XX, donde fueron utilizados en el riego de los céspedes ornamentales. En la década de los años 1930, con el desarrollo de los aspersores de impacto y de las tuberías en acero ligero con uniones rápidas, el riego por aspersión comenzó a extenderse y ser utilizado en una gama amplia de cultivos por todo el Mundo. En los años 1950, surgieron nuevos aspersores, se incorporaron las tuberías de aluminio y se diseñaron sistemas de bombeo más eficientes, lo que favoreció la reducción de costes. Más recientemente, en la década del 1960, surgen los equipos pivote, con costos relativamente bajos, riegos de alta frecuencia, automatización del riego y grandes reducciones de mano de obra (Santos, Arturo, Picornell, & Tarjuelo, 2010).

Las principales ventajas del sistema de riego por pivote es que la toma de agua y energía en un mismo lugar, fácil automatización, facilidad de operación y mantenimiento, posibilidad de regar grandes áreas, elevada uniformidad de aplicación del agua, posibilidad de aplicación de fertilizantes y químicos con el agua de riego. Entre las desventajas se tiene que se deja sin regar 21% de la superficie en comparación a parcelas cuadradas, se tiene intensidad de aplicación alta en el extremo del lateral, es necesario mano de obra especializada para operación y mantenimiento del sistema, se requiere mayor presión de trabajo en relación al lateral de avance frontal (Riego por pivots, n.d.).



En el Perú la empresa Agrolmos S.A. del Grupo Gloria instaló los sistemas mecanizados por aspersión tipo pivote para producir 18000 ha de cultivo de caña de azúcar en la irrigación Olmos. La magnitud del proyecto requería de tecnología acorde a las necesidades del cultivo, por ello se planteó la implementación del sistema de riego mecanizado por aspersión tipo pivote, como una solución de los problemas que se presentaban otros sistemas de riego. La máquina de riego tipo pivote central es un equipo potencialmente competitivo con otros sistemas de riego por la alta uniformidad que brinda, menor vulnerabilidad al viento y por ser económicamente más rentable (León, 2017).

En el ámbito de la junta de usuarios Juliaca región Puno, distrito de Mañazo, el Programa Subsectorial de Irrigaciones (PSI) del Ministerio de Agricultura, instaló tecnologías de riego, una de ellas corresponde a un sistema de riego por pivote central, gracias a los incentivos financieros no reembolsables que otorga para cubrir parte de la inversión de los agricultores en sistemas de riego, con el objeto de mejorar la eficiencia de aplicación del agua de riego a nivel parcelario, para alcanzar un uso más racional de los recursos agua y suelo.

1.2. PROBLEMA

En el Perú uno de los problemas de la agricultura bajo riego es el manejo deficiente del agua de riego. Sin embargo, existen proyectos relevantes como es la irrigación Olmos en Lambayeque, en la que la empresa Agrolmos S.A. del grupo Gloria implementó los sistemas mecanizados por aspersión tipo pivote con el fin de regar el cultivo de caña de azúcar y optimizar en agua de riego. El pivote central es un método de riego, en el que el agua se dispersa a través de un brazo largo y cubre un área circular (Arafa & Shalabi,



2016). Con los pivotes centrales se pueden obtener un rendimiento relativamente alto del riego (Lecina, Hill, & Barker, 2016). El coeficiente de uniformidad (CU) potencial de estos sistemas es de aproximadamente 90%. Sin embargo, en la práctica, la uniformidad real no siempre alcanza este valor potencial, las evaluaciones de uniformidad de campo realizadas en diferentes áreas muestran resultados variables (Lecina et al., 2016).

La tecnificación de los sistemas de riego en el altiplano en los últimos años se está tomando con mayor interés en su implementación a consecuencia de la mala eficiencia que brinda los sistemas de riego por gravedad y escases de los recursos hídricos. La implementación del sistema de riego por pivote central en la localidad de Mañazo se realizó buscando la eficiencia de gestión de los recursos hídricos, a través del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). Sin embargo, en la parcela en donde se implementó el sistema de riego pivote central se observó un inadecuado manejo y/u operación de esta, lo que traería como consecuencia la ineficiencia de riego, por lo tanto, des uniformidad de crecimiento del cultivo de quinua.

Al respecto, en el sistema de riego por aspersión pivote central instalada en la parcela del grupo de gestión empresarial PROGRESO, para el cultivo de quinua en el distrito de Mañazo, se tiene la incertidumbre en cuanto a la eficiencia de riego (Belizario, 2014) y la uniformidad de riego, teniendo en cuenta las condiciones climáticas del altiplano (Belizario, Hiuaquisto, & Chirinos, 2013), también se observó el mal manejo en la operación por la falta de capacitación. Por lo tanto, la determinación de la uniformidad y eficiencia de aplicación hará visibles los ajustes necesarios faltantes para que el sistema trabaje minimizando las pérdidas e incrementando la eficiencia de este, también incrementar la productividad y rentabilidad que es el fin de la implementación de una tecnología de riego.



1.3. JUSTIFICACIÓN

El sistema de riego de tipo pivote central instalado en el distrito de Mañazo, es una tecnología que no cuenta con información respecto a la eficiencia de aplicación y la uniformidad de riego en condiciones de clima del altiplano que son indicadores de la eficiencia de riego, por lo que es necesario realizar la determinación de la eficiencia de riego y la uniformidad de riego para poder afirmar si el sistema pivote central es eficiente y brinda una óptima calidad de riego, en consecuencia obtener altos rendimientos. La operación y manejo del sistema puede ser uno de los factores que influya en la eficiencia.

Los resultados permitirán hacer un análisis y realizar las recomendaciones para los ajustes necesarios en el sistema de riego por aspersión pivote central, también se proporcionará información útil para apoyar los procesos de toma de decisiones de los agricultores, asociaciones de usuario de agua, gestores de proyectos similares, en consecuencia, plantear estrategias adecuadas de trabajo orientadas al diseño, operación y mantenimiento del sistemas de riego del mismo tipo que puedan ser implementados en nuestra región Puno. Para el presente trabajo se plantean los siguientes objetivos:

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Determinar la eficiencia de riego por aspersión del sistema pivote central para el cultivo de quinua del grupo de Gestión Empresarial Progreso, distrito de Mañazo región Puno.



1.4.2. Objetivos específicos

- a. Caracterizar las propiedades físico-hídricas del suelo de la parcela del cultivo de quinua.
- b. Determinar los parámetros hidráulicos del sistema de riego pivote central y el coeficiente de uniformidad del sistema de riego por aspersión pivote central
- c. Determinar eficiencia de riego por aspersión del sistema pivote central para el cultivo de quinua



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

En el trabajo de investigación realizada por Epifânio (2009), quien evaluó el desempeño de los sistemas de pivote central y la administración de propiedades en cuatro regiones de Minas Gerais: Triangulo, Alto Paranaíba, Norte de Minas y Zona Central Mineira. Los parámetros estudiados fueron: la uniformidad de aplicación de agua (coeficiente de uniformidad de Christiansen - CUC y coeficiente de uniformidad de distribución - CUD), eficiencia de riego, porcentaje de área adecuadamente irrigada y manejo del riego. Los pivotes centrales probados generalmente presentaron niveles aceptables de uniformidad en la aplicación de agua. Los CUCs y CUDs, el 81.81% de los sistemas evaluados presentaron valores superiores al 80% y 70%, respectivamente. Y la eficiencia de la aplicación de agua también presentó valores dentro de lo permisible y normal, que está cerca del 90%, obteniendo un promedio de 91.30% de eficiencia, siendo considerada también como una buena eficiencia de aplicación de agua.

Por otro lado, se analizó el efecto de la uniformidad de la aplicación de agua (CU) en la uniformidad del contenido de agua del suelo (CU_s) y la uniformidad del rendimiento del cultivo (CU_{producción}) de un sistema de riego de pivote central que funciona en condiciones de campo, comparando dos rociadores diferentes. Los rociadores de placa de rociado giratorio (RPRG) y los rociadores de placa de rociado fijo (RPRF) se colocaron a 2.5 y 1 m sobre el suelo. Para eventos de riego individuales, el RPRG tuvo valores más altos de CU (90 - 95%) que el RPRF (80 - 85%). El valor de CU correspondiente a la serie de profundidades de riego acumuladas (CU_a) se correlacionó más estrechamente con



el rendimiento final del cultivo que los valores para eventos de riego individuales (CU). Esto fue mucho más importante con RPRF debido al método utilizado para aplicar el agua. En el riego por aspersión, un valor de CU de alrededor del 80% para eventos de riego individuales puede ser suficiente para proporcionar una buena uniformidad del rendimiento del cultivo, ya que las CU_s correspondientes pueden superar fácilmente el 90%, ya que los valores de CU > 90% en eventos de riego individuales no aumentan significativamente la uniformidad del agua en la tierra. El rendimiento final de la remolacha azucarera se vio más afectado por la cantidad de agua disponible en el suelo que por las ligeras diferencias en la uniformidad del agua del suelo obtenida con los pivotes centrales. Este comportamiento se considera típico para este tipo de rociadores (Ortíz, de Juan, & Tarjuelo, 2010).

Mientras que (Barcellos, 2006), con el objetivo de evaluar el manejo del riego adoptado por los productores de papaya (*Carica papaya L.*) y café (*Coffea canephora L.*), en el municipio de Pinheiros - ES, norte de Espírito Santo, utilizando riego por pivote central. Seleccionó ocho pivotes cultivados de papaya y seis pivotes cultivados de café. Los parámetros estudiados fueron: uniformidad en la aplicación de agua, eficiencia de riego, pérdida de percolación, área adecuadamente irrigada y manejo del riego. Durante un período de seis meses, el riego practicado fue monitoreado para análisis de manejo. Para los pivotes cultivados de papaya y café, los resultados mostraron que: 1) Los valores del coeficiente de uniformidad de Christiansen oscilaron entre 81.09 y 88.61% y 71.52 a 87.52% respectivamente. Según NBR 14244 (1998), se clasificaron entre regulares y buenos; 2) Para el cultivo de papaya tres pivotes fueron impulsados proporcionando láminas excesivas, causando pérdidas de percolación entre 78.38 y 90.76% y cinco pivotes fueron impulsados proporcionando láminas deficitarias, con un coeficiente de



déficit entre 19.38 y 78.20%, y para el cultivo de café la prueba de uniformidad fueron deficientes en todos los pivotes, donde el coeficiente de déficit varió de 1.44 a 84.99%; 3) El valor promedio de eficiencia de riego para el área de riego adecuada del proyecto fue del 83.20% para el cultivo de papaya, y para el café la eficiencia fue en promedio del 76.76%; 4) El análisis de manejo mostró que las láminas promedio aplicadas durante el período fueron más bajas que las láminas requeridas, con humedad del suelo por debajo del nivel crítico para el cultivo de papaya y para el café.

En el trabajo llevado a cabo en la Unidad de Desarrollo Científico y Técnico en Pulido, Alquízar en una máquina de pivote central de la firma Otech-Irrimec (Jiménez, Domínguez, Pérez, Montero, & Cun, 2010), con cuatro ensayos de diferentes variantes para emisores del tipo: Spray Nelson D3000K y Boquilla Difusora IIRD. La metodología para la evaluación fue la propuesta en la norma cubana NC ISO 11545:2005. Determinaron los parámetros coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (CU_h), coeficiente de uniformidad de variación de Bremond y Molle (CU_v) y uniformidad de distribución ($UD_{25\%}$) y su relación gráfica con el área regada adecuadamente (ARA). Los resultados que obtuvieron es que la mejor variante fue: “boquilla difusora IIRD a 1m de altura, sin regulador de presión y con contrapesos” donde se obtienen los mayores valores CU_h , CU_v , $UD_{25\%}$ y ARA con 82.33%, 77.51 %, 68.08% y 56% respectivamente. También se establecieron la clasificación de la calidad de riego utilizando el porcentaje de área regada adecuadamente, a partir de la obtención del CU_h y de los criterios de Tarjuelo.



2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Sistemas de riego por aspersión

El riego por aspersión es un método mediante el cual el agua se aplica sobre la totalidad de la superficie del suelo en forma de lluvia, utilizando para ello una red de riego que permite conducir el agua con la presión adecuada hasta los elementos encargados de aplicarla, los aspersores (Fernández et al., 2010).

Los sistemas de riego por aspersión se pueden, genéricamente, dividir en sistemas estacionarios y móviles o autopropulsados. En los sistemas estacionarios, los aspersores permanecen en una posición fija mientras dura la aplicación del agua. En las instalaciones móviles, con desplazamiento continuo, los aspersores funcionan mientras se mueven, de forma independiente o junto con las tuberías donde van montados, siguiendo una trayectoria lineal o circular. Dentro de los sistemas estacionarios, se incluyen los que se desplazan de una posición de riego a otra, ya sea a mano, tirados por tubería flexible o de forma mecanizada, como es el caso de las tuberías con ruedas, que se denominan sistemas de desplazamiento discontinuo. Los sistemas estacionarios incluyen también las instalaciones fijas, de cobertura total. Los principales sistemas móviles, con desplazamiento continuo, son los sistemas pivote, los laterales de avance frontal y los cañones tirados por una tubería con enrollador o tirados por cable (Santos et al., 2010, p. 165).

2.2.1.1. Sistemas fijos

Todos los elementos de este sistema son fijos, salvo algunos casos en donde los aspersores van ocupando sucesivas posiciones a lo largo de las líneas



de riego. La colocación de la red puede ser permanente (permanece enterrada a una profundidad de 0.6 - 1 metro durante toda la vida útil) o temporal (se coloca al principio de la temporada de riego y se retira al final de la misma). Un sistema en donde todas las tuberías y aspersores son fijos se llaman de cobertura total (Fuentes & Garcia, 2010).

2.2.1.2. Sistemas semifijos

En este sistema son fijos el grupo motobomba y la red de tuberías principales, que suelen ir enterrada. De ella derivan los hidrantes en donde se conectan los ramales de alimentación (fijos o móviles), en donde, a su vez se conectan las líneas de riego, que son móviles. Estas últimas llevan acoplados los aspersores, bien directamente o a través de unas mangueras y montado sobre patines, con el fin de permitir el riego en varias posiciones sin necesidad de cambiar la tubería (Fuentes & Garcia, 2010).

2.2.1.3. Sistemas móviles

Todos los elementos de la instalación son móviles, incluso puede serlo el grupo motobomba cuando se hace una toma de agua distinta en cada posición de riego. Este sistema se utiliza sólo en pequeñas superficies o para dar riego complementario (Fuentes & Garcia, 2010).

2.2.2. Máquina de regar pivote central

La mecanización del riego por aspersion comprende dos sistemas: desplazamiento de un aspersor de gran tamaño y desplazamiento de línea de riego. El primer caso corresponde a los coñones de riego, en sus modalidades de caños



viajero y enrollador. El desplazamiento automático de la línea de riego corresponde al pivote (con desplazamiento circular) y al lateral de riego (con desplazamiento frontal). En estos equipos los aspersores riegan a la vez que se desplazan, con lo cual la pluviometría no está determinada únicamente por el caudal instantáneo, sino que es preciso considerar también la velocidad de avance (Fuentes & Garcia, 2010).

El pivote, máquina de riego es una tubería regante con aspersores o microaspersores, que se mueve en círculo alrededor de un punto fijo o pivote, donde tiene la entrada del agua. La tubería es soportada por torres metálicas, movidas con dos ruedas instaladas en su base y autopropulsadas mediante un motor eléctrico (o hidráulico). La línea regante se alinea por medio de un sistema de control que regula el avance de cada torre. Si la alineación falla, debido al atascamiento u obstrucción de una rueda, el sistema suspende su funcionamiento. La tubería regante del pivote central generalmente tiene aspersores con gasto y diámetro de mojado diferentes a lo largo de la tubería, con la finalidad de compensar la velocidad tangencial de cada punto de la tubería regante. Entre mayor es el radio que corresponde a la posición de un aspersor, mayor es el área que riega; por lo tanto, se requiere mayor gasto para igualar las láminas de riego (Peña, 2012).

Este sistema consiste en una tubería lateral, de acero galvanizado, que gira en torno a un punto fijo en el centro de la parcela regada; de ahí, su denominación de “pívot”, semejante a su denominación inglesa de “Center Pívot Laterals”. Los sistemas ,siempre, están constituidos por: el “centro pivote”, donde está el eje de rotación, que se corresponde con un tubo vertical que abastece de agua al lateral de riego; por las “torres”, que son estructuras metálicas motorizadas, donde se apoya la estructura del sistema, y que son las responsables del movimiento del lateral; los



“tramos o arcos”, que son estructuras trianguladas, que integran la propia tubería de transporte del agua, para vencer los vanos entre torres; y por la tubería propiamente dicha, donde se montan los aspersores y difusores a los que abastece de agua. Los sistemas pivote de riego pueden tener dimensiones muy variables, pudiendo regar círculos o sectores circulares (Santos et al., 2010, p. 205).

2.2.3. Componentes principales del sistema de riego por pivót central

Los pivotes pueden ser de avance circular; Están formados por una tubería porta emisores que va sustentada sobre torres automotrices, dotadas normalmente de un motor eléctrico y dos ruedas neumáticas. La tubería, que normalmente es de acero galvanizado, sirve de elemento resistente para vencer el vano entre torres juntamente con barras o cables, formando una viga en celosía, dejando un vano hasta el suelo de unos 3 m. Cada tramo va unido a una torre soporte y articulado con el tramo anterior. La unión debe ser estanca y sólida ya que tiene que transmitir esfuerzos importantes, especialmente en equipos trasladables (Moreno, 2013).

Las partes básicas o los componentes que conforma el pivote central se describen a continuación:

2.2.3.1.Pivote

Es la estructura central de la cual gira todo el sistema, normalmente tiene cuatro patas que están fijadas a unos cimientos de cemento. El punto de entrada de agua se encuentra en la base del pivote al principio de la tubería de elevación. El agua fluye a través de esta tubería y el codo. Este último gira dentro del tubo de elevación (Fong, 2010) (Figura 1).



Figura 1: Fotografía de pivote instalada en campo

2.2.3.2. Tramos y torres de conducción

El agua que sale del codo es transportada a través del campo por un acueducto. Este acueducto está hecho de una serie de tramos conectados. Cada tramo tiene una “unidad de conducción” que mueve el acueducto alrededor del campo. El acueducto, que tiene forma de arco, está sujetado por una “cuerda de arco” que va unida al acueducto por una serie de estructuras en forma de “V”, que pueden llegar a ser hasta ocho entre cada unidad de conducción. Los tubos del acueducto entre tramos se conectan mediante una manguera corta que se llama “bota flexible”, la cual está unida en sus extremos con unos empalmes de aluminio (Figura 2).



Figura 2: Fotografía de tramos y torres de conducción

2.2.3.3. Aspersores múltiples

La característica más importante del pivote Central es su capacidad para aplicar el agua uniformemente. Esto se consigue por medio de unos aspersores que están soldados al acueducto. Los tamaños de las boquillas de los aspersores varían en diámetro de acuerdo con la distancia que hay al centro del sistema. Los aspersores más alejados del centro tienen mayor diámetro ya que deben regar una superficie superior (Fong, 2010).

2.2.3.4. Caja de control de torre y cable del tramo

Una caja de control se encuentra en cada torre de conducción, unos cables de código de color entran y salen de cada caja. Por lo tanto, el cable recorre toda la longitud del sistema. El cable lleva dos tipos de carga eléctrica. 120 voltios para un sistema de control, y 480 voltios para mover los motores de las torres de conducción (Fong, 2010) (Figura 3).



Figura 3: Caja de control de torre

2.2.3.5. Anillo colector y tubo “J”

El cable del tramo debe poder girar en el pivote ya que de otro modo se enrollaría alrededor del mismo. El aparato que sirve para que no se quede enrollado se llama “anillo colector”. El anillo colector está compuesto de unos anillos de latón apilados y aislados unos de otros. Estos están fijos, unas brochas giran alrededor manteniendo un flujo constante de electricidad, sin forzar el cable mientras el sistema está dando vueltas alrededor del campo. El cable colector se alimenta desde el anillo colector a través de una tubería en forma de “J” saliendo de la tubería de elevación cerca de la parte superior. El cable de control sale hacia abajo por la pata del pivote hasta el panel de control (Fong, 2010).

2.2.3.6. Panel de control

El panel de control permite controlar el sistema. En la mayoría de los casos, el panel de control se encuentra en el pivote. Algunas de las funciones que se pueden controlar son:

- Arranque / parada.
- Adelante / atrás.
- Velocidad del sistema que controla la cantidad de agua aplicada.

El panel de control se alimenta con una corriente de 480 voltios AC. Este voltaje puede venir desde las líneas públicas, generadores mecánicos o convertidores de fase. Un transformador de voltaje 480 - 120 provee la corriente de 120 voltios necesaria para el funcionamiento del circuito de control. La corriente de 480 voltios va por medio del cable de control, desde el panel de control hasta cada uno de los contactos de los motores de conducción. Cuando se enciende el contacto en la torre de conducción, la corriente pasa al motor y el sistema se mueve tal como se muestra en la Figura 4 (Fong, 2010).



Figura 4: Panel de control del sistema

2.2.3.7. Temporizador

El panel de control también le permite cambiar la velocidad del sistema mediante un aparato llamado Temporizador o Porcentaje de velocidad. Si el porcentaje de velocidad está al 100 por ciento, la última torre de conducción estará en continuo movimiento (el 100 % del tiempo). A este porcentaje, el sistema está a su máxima velocidad y aplicando la menor cantidad de agua. Para



incrementar el riego, el sistema debe disminuir su velocidad. Por ejemplo, si el porcentaje de velocidad está a 50 %, entonces la última torre estará en funcionamiento durante 30 segundos por cada minuto que pase (es decir, el 50 % del tiempo). En este caso se dobla la cantidad de agua aplicada (Fong, 2010).

2.2.3.8.Unidades motrices

Es importante controlar la velocidad de la última torre, ya que controla las otras: las demás se mueven para mantenerse “en línea”. Como la velocidad de cada motor de conducción es constante, cada motor deberá ir a una velocidad proporcionalmente inferior para poder mantener el alineamiento entre las distintas torres. En cada una de las torres intermedias, se encuentra una barra de control ligada a la base de la caja de control de la torre y al tramo siguiente. Al moverse tanto la última torre como su tramo, la barra de control de la penúltima unidad de conducción va girando. La barra de control está ligada a un eje en la parte inferior de la caja de control. El eje va unido a una placa. Al girar la barra de control, gira la placa que a su vez controla la clavija de ejecución. Al encender y apagar la micro clavija de ejecución, envía una corriente de 480 voltios AC al motor de la torre haciendo que se mueva hasta que esté “en línea” con la siguiente torre (Fong, 2010).



Figura 5: Unidad motriz

2.2.3.9. Sistemas de control de la máquina

El tablero de control es un circuito electrónico en la que se encuentran todas las funciones que debe cumplir el sistema, en la figura 6 se perciben los interruptores de control que están identificados en forma numérica, tiene las siguientes funciones:

- (1) Interruptor de encendido y apagado del sistema.
- (2) Marcador de voltímetro que llega desde la fuente de energía.
- (3) Cuenta horas, en la que se puede ver las horas de funcionamiento del sistema de riego.
- (4) Mediante este interruptor se controla la marcha a la izquierda o derecha del sistema.
- (5) Interruptor de control de parada y rebote.
- (6) Interruptor que permite controlar el paro y marcha del sistema de pivote central.
- (7) Interruptor que permite controlar el funcionamiento del sistema con agua y sin agua.

- (8) Tornillo de control de temporizador cíclico que indica el porcentaje de marcha o velocidad de funcionamiento del sistema de riego.



Figura 6: Tablero de control del sistema

2.2.3.10. Emisores o aspersores

El sistema de riego debe su nombre al emisor que provoca la característica de una llovizna, este emisor es el aspersor (De la cruz, 2015). Los aspersores son los elementos de la instalación de riego por aspersión encargados de distribuir el agua en forma de lluvia sobre la superficie del suelo. Son elementos provistos de una o más boquillas montadas sobre un cuerpo central, por las que sale el agua a presión. El movimiento giratorio del aspersor es provocado por la presión del agua que, al salir, se dispersa en forma de gotas mojando una superficie más o menos circular, cuyo alcance depende de la presión del agua y del tipo de aspersor (Fernández et al., 2010).

La intensidad y uniformidad de lluvia que proporciona el lateral depende de: el tipo de emisor, su espaciamiento en la tubería, la presión en las boquillas y el tamaño de estas. La disposición de emisores más ventajosa para alcanzar un



equilibrio entre las pérdidas de evaporación y arrastre y uniformidad de riego parece ser situar los emisores a unos 2 m sobre el suelo (aunque esto no puede hacerse con los aspersores de impacto), con una anchura mojada en torno a los 12-15 m, lo que requiere una presión de trabajo de 1.50 a 2 bar, o algo menor si no hay problemas de escorrentía. En estas condiciones pueden utilizarse separaciones entre emisores de 2.5 a 3 m, no debiendo superar en general los 5-7 m con los emisores de mayor alcance como los Rotator (Tarjuelo, 2005, p. 235).

a. Tipo de aspersor utilizado en la máquina pivote central

El aspersor utilizado en el sistema es la de marca SENNINGER modelo i-Wob2, este emisor combina su exclusiva acción rotativa con la acción oscilante de su deflector ranurado para proporcionar gotas de tamaño consistente y excelente uniformidad.

Sus características principales de acuerdo a su ficha técnica son: de baja presión operativa de 0.69 a 1.03 bar, el tamaño de boquilla es de aproximadamente de 2.38 mm que puede brindar un caudal de 182 a 4168 L/h, el diámetro de alcance es de 9.50 a 16.20 m, espaciamiento máximo recomendado es de 6.10 m y la presión máxima a la que trabaja la boquilla es de 1.03 bar. Todos los emisores tienen reguladores de presión RDK que mantienen una presión predeterminada y constante en la salida que puede adaptarse al diseño del sistema, independientemente de las variaciones en la presión de entrada. Esto ayuda a mantener la integridad y el rendimiento del patrón de aspersión, el modelo del regulador de presión es PSR-2 que emite un caudal de



114 a 3407 L/h y su presión de salida es de 0.41 a 3.45 bar de acuerdo al catálogo de fabricante.

2.2.3.11. Tuberías

a. Tubería de conducción y distribución

La red de conducción y de distribución constituye el conjunto de tuberías que llevan el agua desde la fuente de abastecimiento o unidad de bombeo, hasta la entrada de los laterales. En el caso de los sistemas de movimiento continuo como pivote, cañón o avance frontal, la tubería de conducción generalmente es fija y termina hasta el lugar donde se encuentra el pivote, o bien, la tubería de alimentación se instala dónde están los hidrantes para conectar la motobomba o manguera en el caso del cañón viajero o avance frontal (Peña, 2012).

b. Tuberías regantes

Las tuberías regantes son aquellas que tienen integrados los emisores o aspersores para riego y suministran el agua a los cultivos. Se clasifican hidráulicamente como tuberías con salidas múltiples (Peña, 2012).

La tubería regante del pivote comprende la longitud total del brazo soportadas por torres de estructuras triangulares de acero galvanizado, la tubería es de fierro galvanizado, el sistema de riego por pivote en estudio está compuesto de una estructura de 162 m con torres de tres cuerpos de 47.60 m, y un voladizo de 18.60 m en la que se ubican los emisores.



2.2.3.12. Equipos y accesorios hidráulicos

a. Válvula de alivio de presión

Las válvulas de alivio de presión son indispensables en los sistemas de riego a la salida de la bomba, ya que permiten disipar el exceso de presión debido al golpe de ariete que se genera al cerrar la válvula de retención ocasionado, entre otras causas, por el apagado repentino del equipo de bombeo o el cierre de válvulas durante la operación normal del equipo de bombeo. Las válvulas de alivio permiten la fuga de agua o aire cuando aumenta la presión sobre un límite preestablecido en la tubería. Esto sucede porque se vence un resorte calibrado a la presión de abertura de la válvula (Peña, 2012).

b. Válvula de control

Las válvulas de control sirven para cerrar o abrir conductos, de manera parcial o total. Con las válvulas de control puede regularse el gasto o la presión en una tubería. Cerrándolas se reduce el gasto y abriéndolas se incrementa la descarga hidráulica (Peña, 2012).

c. Válvula de aire

El sistema de riego debe contener válvulas de admisión y expulsión de aire ubicadas en el cabezal de control y a lo largo de la red de conducción y de distribución (Peña, 2012). Las válvulas de aire son utilizadas para controlar la cantidad de aire que podría estar presente dentro de las tuberías que transportan fluidos.



d. Medidor de gasto hidráulico

Los medidores de gasto son dispositivos que relacionan la velocidad del agua y su área de paso. Se calibran de manera tal que indican el gasto hidráulico que pasa por ella. Pueden basarse en la velocidad, en la carga de velocidad o en la velocidad de partículas que fluyen con el agua. Pueden ser de placa de orificio, de tubo Venturi, de tubo Pitot, de propela o turbina, electromagnético y ultrasónico, este último de efecto Doppler o de tiempo en tránsito (Peña, 2012).

e. Medidor de presión

Los manómetros son dispositivos que sirven para medir la presión en diferentes puntos del sistema de riego. Tienen sensores que indican las presiones de operación y generalmente son mecánicos con carátula. No generan pérdidas de carga en las tuberías. Los sistemas de riego por aspersión se pueden supervisar en el cabezal de control, leyendo la presión de operación del sistema en el momento de la inspección, debido a que para cada gasto del sistema corresponde una presión de operación (Peña, 2012).

2.2.3.13. Sistema de bombeo

a. Unidad de bombeo

El equipo de bombeo consiste en una bomba hidráulica y su motor, que proporciona la energía necesaria para mover el agua desde el cárcamo hasta su aplicación en los emisores de la parcela. El motor puede ser eléctrico o de combustión interna. En las plantas de bombeo, para los sistemas de riego, se emplean los siguientes tipos de bombas: de eje horizontal, llamadas simplemente



centrifugas; las de eje vertical, conocidas como bomba turbina vertical, y las sumergibles (Peña, 2012).

2.2.3.14. Unidad de almacenamiento

a. Obra de toma

En general, la obra permite derivar el agua de la fuente de abastecimiento para luego conducirla hasta el reservorio o lugar de almacenamiento, de la cual se realiza el bombeo. Las partes de la obra de toma son: la estructura de entrada, las rejillas de prefiltrado o malla de filtrado, el mecanismo de control o compuerta y el conducto que transporta el agua.

b. Reservorio

Los reservorios son elementos fundamentales que permiten almacenar y abastecer agua para sistemas de riego, en consecuencia, el uso posterior de forma suficiente de acuerdo con los requerimientos del cultivo.

2.2.4. Características de riego con pivote

2.2.4.1. Variación del caudal emitido y la pluviosidad en el lateral

La pluviosidad crece desde el centro hasta el extremo ya que cada metro de lateral tiene que regar mayor superficie en el mismo tiempo, de tal forma que se debe repartir el mismo caudal en la misma área de los extremos. También puede explicarse el crecimiento progresivo de la pluviosidad desde el centro al extremo del lateral porque el tiempo de aplicación de agua a un punto de terreno



va siendo cada vez menor a medida que nos alejamos del punto de pivote, y todos los puntos tienen que recibir la misma cantidad de agua (Tarjuelo, 2005, p. 239).

La pluviosidad descargada por el equipo en cada punto de la tubería viene determinada por: el tamaño de la boquilla, la presión en la misma, el espaciamiento entre emisores, la distancia al origen y el tipo de emisor empleado. Una vez fijado estos parámetros, la pluviosidad en cada punto a lo largo del ramal es fija y no cambia al variar la velocidad de rotación. Cuando se modifica ésta sólo cambia la duración de la aplicación de agua sobre un punto del terreno, y por lo tanto la cantidad de agua aplicada (dosis de riego) (Tarjuelo, 2005, p. 241).

2.2.4.2. Uniformidad de riego con pivote central

En un sistema de riego es muy importante conocer si el agua se está aplicando de manera uniforme. Una baja uniformidad implica la existencia de zonas del suelo con exceso de agua y otras con escasez, o bien la necesidad de aplicar agua en exceso para que las zonas que reciben menos cantidad estén suficientemente abastecidas. Lo anterior supondrá que en determinadas zonas del campo no se conseguirán producciones satisfactorias (Fernández et al., 2010).

Según Fuentes & Garcia, (2010) la uniformidad de distribución del agua en la superficie del suelo depende, fundamentalmente, de los siguientes factores:



- Del modelo de reparto del agua por el aspersor, que depende, a su vez: del diseño del aspersor, de la presión de trabajo, del número y tipo de boquillas.
- De la disposición de los aspersores
- De la intensidad del viento dominante durante la aplicación del agua. El tamaño de las gotas juega un papel fundamental en las pérdidas causadas por la evaporación, mientras que la longitud y altura de la trayectoria del chorro influye en el arrastre del agua por el viento.

En riego por aspersión suelen manejarse unos coeficientes de uniformidad de Christiansen (CU) del siguiente orden:

Descripción	CU (%)
Cultivo de alta rentabilidad con sistema radicular superficial	88
Cultivos extensivos con sistema radicular de profundidad media	82-88
Frutales y forraje con sistema radicular de profundidad media	70-82

Fuente: Clasificación realizado por Tarjuelo, (2005)

Sin embargo, los ensayos de campo realizados a pivotes dan valores generalmente altos del CU, (del 80 al 90%), con velocidades de viento inferior a 7.50 m/s. Keller (1990) indica valores de CU entre el 90 y 94% para sistemas bien diseñados si se tienen en cuenta los riegos sucesivos al utilizar alta frecuencia. Cuando el viento sopla hacia el centro pivote, en la dirección del lateral, el área regada disminuye alrededor de un 17%, mientras que cuando sopla hacia el externo, el área crece cerca de un 19% (Tarjuelo, 2005, p. 249).



Los laterales autopropulsados, ya sean pivote o avance frontal, tienen ciertas ventajas sobre los sistemas estacionarios en cuanto a los efectos distorsionadores del viento, ya que: El lateral ocupa infinitas posiciones en su recorrido, compensándose en parte las distorsiones entre riegos sucesivos, el espaciamiento de emisores en el lateral es bastante pequeño, con un gran solapamiento entre ellos (Tarjuelo, 2005, p. 249).

Se considera que una parcela está bien regada cuando se consigue un coeficiente de uniformidad de Herermann Hein (CU_h) entre el 85 y 90%. Con valores mayores al 90% la parcela está muy bien regada. En cambio con un valor de CU_h menores al 85% se considera que el pivote no riega adecuadamente (Tarjuelo, 2005, p. 329).

2.2.5. Evaluación de equipo pivote

Según Tarjuelo, (2005) los ensayos del equipo se realizan en condiciones normales de trabajo, aprovechando los primeros estados de desarrollo del cultivo para no interceptar la recogida de agua en los pluviómetros. La evaluación en los sistemas de pivote se sigue la metodología propuesta en las normas internacionales: ANSI/ASAE ESTÁNDAR S436 1995 e ISO-11545 (1994).

2.2.5.1. Datos recogidos

Los datos recogidos fueron: datos generales como; la marca y longitud del equipo así como el radio efectivamente regado, tipos y características de los emisores, diámetro de la tubería de distribución, tipo de bomba impulsora, condiciones de clima, caudal de entrada al equipo, distribución de presiones,



velocidad de desplazamiento de la unidad conductora exterior y tiempo empleado en dar una revolución, anchura de la franja tomada en el extremo móvil y tiempo de aplicación de agua en un punto de esa zona, volumen de agua recogida en los pluviómetros y número de posición ocupada por cada uno de ellos, diferencia de elevación aproximada (de más o menos 1.50 m) entre el punto de pivote y los puntos altos y bajos en el campo, así como a lo largo de la línea de posición de la prueba, que se localizará en un esquema respecto al note geográfico (Tarjuelo, 2005, p. 325).

2.2.5.2. Metodología en campo

Tarjuelo, (2005) describió la metodología que se sigue en campo para la toma de datos. Esta metodología se adoptará para el presente trabajo.

- En primer lugar, se elige la zona de la evaluación: en parcelas donde el cultivo tenga porte bajo se procura ensayar el equipo en una posición con el mínimo de diferencia de cotas. En parcelas de topografía ondulada se hará alguna repetición en la zona con mayores diferencias de cota. Cuando el cultivo tenga porte alto, el ensayo se realizará en el camino de acceso al centro del pivote.
- A continuación, se mide la separación entre torres a través de sus huellas en el terreno, conociendo así cual es la longitud del pivote hasta la última torre y la longitud del alero, y por tanto calcular la superficie regada. También se comprobará si el alero lleva un cañón final para aumentar la superficie mojada.



- Se disponen los pluviómetros siguiendo la dirección del radio, dispuestos a tresbolillo y comenzando desde el centro pivote. La separación entre los pluviómetros en cada radio no debe ser mayor de 5 m cuando los emisores son aspersores, y de 3 m cuando los emisores son difusores de baja presión. De esta manera se obtiene un nivel de precisión aceptable no siendo necesario que los pluviómetros sigan una línea recta, debiendo colocarse por delante del frente mojado.
- Se prescindirá de los primeros pluviómetros adyacentes al centro pivote (máximo 20% de la longitud del pivote), sin que por ello se produzcan efectos adversos en la evaluación, pues este 20% interior representa un 4% de la superficie regada.
- Se asignará un número de orden a la localización de cada pluviómetro comenzando desde el centro del pivote.
- Se fijará en la cabeza del pivote la velocidad de este y su sentido de giro.
- Los pluviómetros se colocarán lo suficientemente lejos del equipo de riego con el fin de que cuando el frente de majado llegue a los pluviómetros, el pivote esté funcionando en su régimen normal y en plena carga. Los pluviómetros deben de estar alejados de las ruedas de la torre.
- Medir la velocidad media de desplazamiento de la última torre. Si el equipo no funciona al 100% de su velocidad se debe medir el tiempo que recorra una distancia determinada, esta distancia no debe ser menor de 10 m.



- Se comprueba visualmente si a lo largo del equipo hay posibles fugas, el modelo de los emisores, si llevan una o varias boquillas, si los difusores llevan reguladores de presión, los posibles emisores que estén obstruidos, y cualquier otra anomalía que pueda comprobarse.
- Se mide la anchura de la franja mojada en la zona del extremo.
- Durante el tiempo que el equipo pasa sobre el área de prueba se colocarán, aparte, dos pluviómetros con la misma cantidad de agua que se supone recogerán los pluviómetros del ensayo para hacer la estimación de las pérdidas por evaporación durante el proceso de riego y de lectura. Eso es menos preciso por las diferentes condiciones ambientales de unos y otros pluviómetros.
- Se mide la presión en diferentes sitios: en el grupo de bombeo, en la cabecera del pivote si lleva manómetro, en los emisores próximos a la primera y última torre accediendo a ellos a través de ésta y comprobando sus características.
- Medir el caudal de entrada al pivote por cualquiera de los métodos posible.
- Medir el volumen de agua recogido en los pluviómetros tan pronto como sea posible, comenzando por los situados junto al borde de la parcela, que serán por los que primero pase el equipo. Medir uno de los pluviómetros de evaporación cuando llegue hacia la mitad de la longitud del equipo y el otro cuando se termine la recogida de agua de los pluviómetros.



- En la ficha de ensayo se localizará la posición de la torre, sirviendo de comprobación para la ordenación de pluviómetros pretendida.
- El radio correctamente regado coincidirá normalmente con la longitud del equipo si tiene pistola o cañón final. El conocer exactamente este radio puede ser difícil pues el viento lo incrementa y reduce fácilmente. Un criterio razonable podría ser llegara hasta el pluviómetro que recoja un valor próximo a la media cuando no haya viento.
- Durante todo el tiempo de evaluación, se tendrá un control de las condiciones climáticas, midiendo en intervalos de 15 minutos la temperatura, la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento. También se anotará las posibles variaciones de dirección del viento.
- Durante el ensayo se hace todo tipo de observaciones que son de interés, como el tipo de terreno, la posible escorrentía o encharcamiento, el cultivo, el efecto del goteo continuo por las juntas de unión de la tubería o por la parte baja de los tirantes, etc.

2.2.5.3. Cálculo de los parámetros de evaluación

A partir de los datos obtenidos en el ensayo se deduce el valor de la Uniformidad de Distribución (UD), el Coeficiente de Uniformidad de Herermann Hein (CU_h), el Coeficiente de Uniformidad de variación (CU_v), la altura bruta media descargada (AMD), la altura media ponderada recogida (M_c), la eficiencia de descarga (Ed) y la pluviometría media (P_M) en el extremo del pivote (Tarjuelo, 2005, p. 328).



Los valores de uniformidad, eficiencia y porcentaje de área bien regada se refieren en general a ensayos concretos, correspondientes a riegos realizados bajo una condición determinadas, y no a lo que ocurre en el conjunto de riegos realizados durante toda la campaña. Algunos factores que distorsionan la uniformidad de reparto de agua pueden compensarse en los sucesivos riegos, mientras que otros pueden acentuarse aún más. Tanto como una buena uniformidad como otra no tan buena se puede alcanzar altas producciones (Tarjuelo, 2005, p. 328).

2.2.6. Conceptos agronómicos de riego

2.2.6.1. Propiedades del suelo

a. Textura

La proporción en que las partículas de arena, limo y arcilla que se encuentran en el suelo definen la textura del mismo, la cual se determina según el triángulo textural (Figura 7). Las partículas mayores de 2 mm no son tomadas en cuenta para la determinación de la textura (Carrazón, 2007).

Según Fuentes & Garcia, (2010) la proporción mineral del suelo está formada por partículas que, según su tamaño, se clasifican en: arena (de 2 a 0.05 mm), limo (de 0.05 a 0.002 mm) y arcilla (inferior a 0.002 mm).

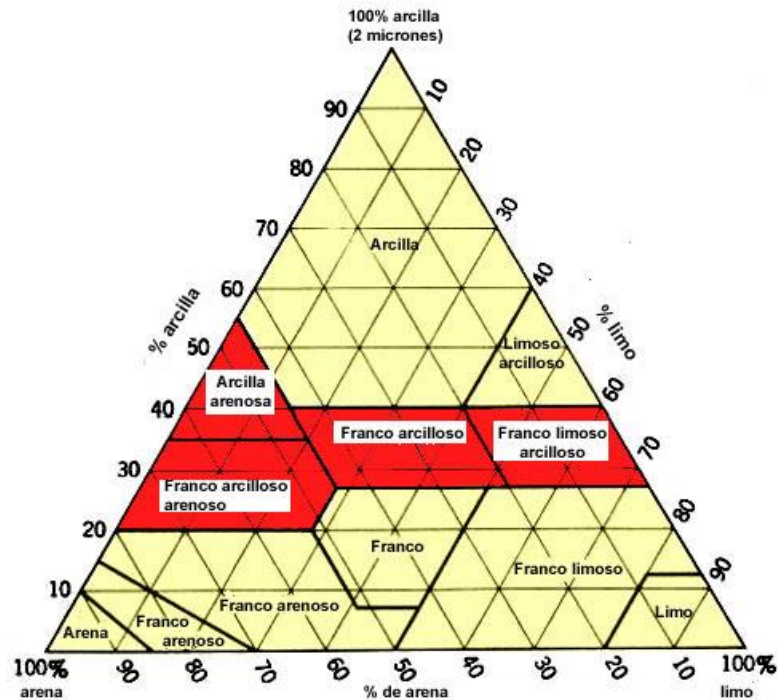


Figura 7: Triángulo de texturas según clasificación USDA

Fuente: (FAO, 2011)

Al estudiar los mecanismos de la retención de agua se ha visto que se trata de un fenómeno de superficie. Para un mismo peso de suelo, las arcillas presentan una superficie mucho mayor que las demás partículas minerales: 1 gramo de arena gruesa puede tener una superficie de 1.00 cm^2 mientras que el mismo peso de arcilla puede alcanzar los 800 m^2 . Por tanto, la textura, es decir, la cantidad relativa de arena, limo y arcilla influye de forma muy importante en la capacidad de retención de agua de los suelos. Otra causa de que los suelos arcillosos retengan más agua es que las micelas de arcilla presentan cargas negativas, debido a la sustitución de iones de aluminio y sílice por otros cationes de menor valencia. Esas cargas negativas se unen al polo positivo de las moléculas de agua, estableciendo un puente de hidrógeno (Pizarro, 1996).



b. Densidad aparente del suelo

La densidad aparente (también llamada peso específico aparente) es una medida de la porosidad de un suelo. Se determina dividiendo el peso de suelo seco entre el volumen total, de modo que un mayor valor de densidad aparente significará menor porosidad. Se representa como d_a y se mide en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3) o en toneladas por metro cúbico (t/m^3) (Carrazón, 2007),

$$D_a = \frac{P_s}{V_t} \quad (1)$$

Donde:

D_a : Densidad aparente

P_s : Peso de la muestra seca

V_t : Volumen total

2.2.6.2. Almacenamiento de agua en el suelo

a. Capacidad de campo

Un suelo con buen drenaje interno, después de un riego pesado o de una lluvia intensa y de gran magnitud, se satura temporalmente en su capa superficial y al pasar el tiempo (cuatro horas en arenas y hasta más de 72 horas en suelos arcillosos), se drena por acción de la gravedad. Cuando deja de drenar, queda con un contenido de humedad en los poros capilares retenido contra la acción de la gravedad. A este contenido de humedad en el suelo se le llama capacidad de



campo (CC). Para fines de estandarización, se ha considerado que la fuerza de retención del agua a capacidad de campo corresponde a 0.30 atmósferas de tensión (Peña, 2012).

A capacidad de campo, se considera que el contenido de humedad del suelo es el ideal para el crecimiento de los cultivos. Se expresa en porcentaje de volumen de agua (Carrazón, 2007).

b. Punto de marchites permanente

Los cultivos consumen agua del suelo. Una parte se evapora de la superficie y otra es extraída del suelo por las raíces de las plantas; conforme la consumen, disminuyen el contenido de humedad del suelo en la zona de las raíces y también se concentra la solución del suelo. Al reducirse el contenido de humedad y concentrarse la solución del suelo, el agua es retenida con mayor fuerza por la acción de fuerzas capilares que actúan en los poros que forman las partículas del suelo y también actúa mayor presión osmótica. El proceso sigue hasta un nivel en el que las plantas no pueden absorber fácilmente. En estas condiciones, las plantas empiezan a realizar un esfuerzo grande para extraer el agua, hasta que absorben menos que la transpirada y sus células empiezan a perder turgencia o, en términos prácticos, a secarse (Peña, 2012).

Cuando la planta presenta marchitez, si se le agrega agua y se recupera, la marchitez fue temporal; si no se recupera, la marchitez es permanente. En estas condiciones, en el suelo aún queda agua retenida con gran fuerza (15 atmósferas). A ese contenido de agua del suelo se le llama “contenido de humedad a marchitamiento permanente”; también se le denomina “porcentaje de



humedad a marchitamiento permanente” o, para simplificar, se le llama “punto de marchitamiento permanente” (PMP) (Peña, 2012).

2.2.6.3. Disponibilidad de agua

Para obtener mejores resultados en las cosechas de los cultivos, se requiere que el agua y los nutrimentos del suelo estén en condiciones de ser fácilmente absorbidos por la raíz de las plantas. La energía total que puede aprovechar una planta usa una parte para absorber el agua con los nutrimentos del suelo; y la restante la utilizan para desarrollar sus funciones fisiológicas, como crecer, formar sus tejidos y sus frutos (Peña, 2012).

a. Humedad fácilmente aprovechable

Al volumen de agua que las plantas extraen del suelo después de un riego, sin hacer un esfuerzo grande, se le llama “humedad fácilmente aprovechable”. En cultivos bajo riego, el volumen de agua o porcentaje de humedad aprovechable que se debe permitir extraer entre riegos es la humedad fácilmente aprovechable. El porcentaje de humedad fácilmente aprovechable corresponde al factor de extracción o abatimiento del agua del suelo (Peña, 2012).

El agua disponible para las plantas (Humedad Aprovechable) se encuentra entre el agua gravitacional y el agua no disponible y está retenida por fuerzas capilares. Los límites para la humedad aprovechable son los contenidos de humedad a Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP) y se expresan en contenido gravimétrico (a menos que se indique lo contrario) (Silva, Silva, Garrido, & Acevedo, 2015).



2.2.6.4. Movimiento del agua en el suelo

a. Infiltración

La infiltración es el movimiento de agua desde la superficie del suelo hacia abajo, que tiene lugar después de una lluvia o de un riego. La facultad de un suelo para permitir el paso del agua a través de su perfil recibe el nombre de permeabilidad, que depende del número de poros, así como de su tamaño y de su continuidad. Un gran número de poros y unos poros grandes y continuos favorecen la permeabilidad (Fuentes & Garcia, 2010).

Las características de infiltración de un suelo constituyen un elemento básico para poder efectuar un adecuado diseño del sistema de riego, y determinar, así, el tiempo de riego apropiado (Vásquez, Vásquez, Vásquez, & Cañamero, 2017).

b. Velocidad de infiltración

Según Vásquez et al., (2017), Puede ser definida como la velocidad de entrada vertical del agua en el perfil del suelo cuando la superficie del terreno se cubre con una lámina delgada de agua. La función que describe la velocidad de infiltración en un punto cualquiera corresponde a un modelo exponencial de la forma:

$$i = a T_0^b \quad (2)$$



Donde:

- I : Velocidad de Infiltración (L.T-1), expresada en mm/hora, cm/hora u otras unidades;
- To : Tiempo de oportunidad (tiempo de contacto del agua con el suelo) expresado en minutos u horas;
- a : Coeficiente que representa la velocidad de infiltración para $T_0=1$ min;
- b : Exponente que varía entre 0 y -1.

El éxito del riego por aspersión depende, en primer lugar, de que la velocidad potencial de infiltración del agua en el suelo sea mayor que la intensidad de precipitación para que no existan escurrimientos, encharcamientos, ni suelo saturado y, en segundo lugar, depende de que se apliquen las cantidades requeridas de agua. Generalmente, en riego por aspersión estándar el agua cae al suelo en forma de lluvia, de manera intermitente y varía la superficie mojada en cada movimiento del aspersor; sin embargo, en el suelo, mediante la capilaridad se distribuye la humedad en el área dominada por la lluvia del aspersor, mejorando la uniformidad de humedecimiento del suelo (Peña, 2012).

2.2.6.5. Lamina de riego en aspersión

En la producción de los cultivos con los sistemas de riego, se acostumbra manejar láminas de riego en lugar de volúmenes de agua debido a la facilidad de hacer operaciones con menos cifras y facilitar comparaciones de cantidades de agua aplicadas a parcelas con superficies diferentes (Peña, 2012).



Para saber cuál es la cantidad de agua que debe aplicarse durante el riego de un cultivo, con un sistema de aspersión, es necesario considerar cuánta agua puede almacenar el suelo y cuánta le falta para llenar el almacén aprovechable; además, se requiere tomar en cuenta las pérdidas por arrastre y evaporación, y también la lámina de agua percolada. No deben planearse pérdidas por escurrimiento (Peña, 2012).

a. Lámina de riego neta y bruta

La lámina de riego neta de proyecto se define como la altura de agua necesaria para satisfacer el requerimiento de riego del cultivo, y la lámina de riego bruta de proyecto se define como la altura de agua necesaria para almacenar, conducir y aplicar el agua al nivel de parcela. Esta cantidad incluye la lámina de evapotranspiración del cultivo, la lámina de control de sales y las láminas correspondientes a las pérdidas de arrastre y evaporación, percolación, conducción, almacenamiento y escurrimiento; también toma en cuenta las aportaciones de lluvia, manto freático y rocío (Peña, 2012).

2.2.6.6. Requerimiento de riego

Un aspecto fundamental en la ingeniería de riego es lo referente a la cuantificación del consumo de agua o necesidades de agua de los cultivos. Éste es un elemento básico que se utiliza para dimensionar las obras de infraestructura de riego, así como planificar y programar el riego de los cultivos a nivel parcelario. Entonces, la determinación del consumo de agua de los cultivos llamada evapotranspiración real se efectúa mediante la utilización de diferentes métodos. La mayoría de ellos utiliza variables climáticas como: evaporación de

tanque clase “A”, temperatura, humedad relativa, radiación solar, entre otros (Vásquez et al., 2017).

2.2.7. Eficiencia de riego

La eficiencia de riego (E_r) se suele entender como el porcentaje de agua bruta aplicada que es aprovechada para satisfacer las necesidades del cultivo y las de lavado de sales (Peña, 2012).

La eficiencia de riego (E_r) está dada por la relación entre el volumen de agua evapotranspirada por las plantas y evaporada del suelo (E_{To}) más la cantidad de agua necesaria para mantener una concentración adecuada de sales en el perfil enraizado del suelo (L_{sa}), menos la precipitación efectiva caída (P_e), menos la ascensión capilar producida desde la napa freática (L_{ac}); por un lado; y, por el otro lado, al volumen de agua derivado o extraído de la fuente de abastecimiento, que puede ser un río, reservorio, un pozo tubular o un manantial para ser usado en el riego (V_{ex}) (Vásquez et al., 2017).

$$Er(\%) = \frac{Va}{Vex} * 100 \quad (3)$$

$$Va = (E_{To} + L_{sa} - L_{ac} - P_e) * \text{Área} \quad (4)$$

En el libro *Irrigation of Agricultural Lands* se incluyó un capítulo de mejoramiento del riego, en el que se usó el término de eficiencia de riego para expresar el desempeño de un sistema de riego completo o de los componentes del sistema, de acuerdo con las necesidades de la evaluación. Eficiencia global de riego (E_g). Es el producto de las eficiencias de los componentes individuales de un



sistema de riego expresados como cocientes. Los términos que definen la uniformidad y la aceptación de un riego no deberían ser etiquetados como términos de eficiencia, si el producto de todos los considerados no da la eficiencia global. Propusieron que la eficiencia global (E_g) debe ser el producto de las eficiencias de almacenamiento (E_{alm}), de conducción (E_c) y aplicación (E_a) (Peña, 2012).

Según MEF, (2003) citado por MINAGRI, (2015), las eficiencias de riego , indica cuan eficientemente se está aprovechando el agua. Los valores varían entre las diferentes modalidades de riego y los valores promedios son de la siguiente manera:

- Eficiencia de riego por gravedad = 40 %
- Eficiencia de riego por aspersión = 70 %
- Eficiencia de riego por goteo = 90 %

2.2.7.1.Eficiencia de almacenamiento

La eficiencia de almacenamiento es el cociente de dividir el volumen extraído para riego, entre el volumen que entró al almacenamiento durante el mismo periodo de tiempo. En las presas de almacenamiento debe considerarse el volumen ecológico, el de usos urbanos y otros usos, para repartir las pérdidas por evaporación proporcionales a todos los usos (Peña, 2012).

El balance de agua en un reservorio es igual al volumen de agua que ingresa al reservorio, menos el volumen de sedimentos colmatados en el vaso, el volumen de agua descargado por el aliviadero, el volumen de agua evaporado y el volumen de agua percolado (Vásquez et al., 2017).



La eficiencia de almacenamiento (Es) se calcula mediante la expresión:

$$E_{alm}(\%) = \frac{V_{ext}}{V_{talm}} * 100 \quad (5)$$

Donde:

V_{ext} : Cantidad de agua extraída de la fuente de suministro

V_{talm} : Cantidad de agua almacenada en el reservorio

2.2.7.2.Eficiencia de conducción

La eficiencia de conducción es el cociente de dividir el volumen de agua entregado para riego en las parcelas, entre el volumen que entró a la red de conducción durante el mismo periodo de tiempo o que se extrajo de la fuente de suministro (Peña, 2012).

$$EC = \frac{V_{ent}}{V_{ext}} = \frac{G_{ent}}{G_{ext}} \quad (6)$$

Donde:

EC : Eficiencia de conducción (decimal).

V_{ent} : Volumen entregado en la parcela (Mm^3).

V_{ext} : Volumen extraído de la fuente de suministro (Mm^3).

G_{ent} : Gasto entregado en la parcela (m^3/s).

G_{ext} : Gasto extraído (m^3/s).



2.2.7.3. Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación de riego es la cantidad de agua útil para el cultivo que queda en el suelo después de un riego, en relación al total del agua que se aplicó. Generalmente se mide en porcentaje o litros de agua útil en el suelo por cada 100 litros aplicados (MINAGRI, 2015).

Es el cociente de dividir el volumen de agua de riego usado en evapotranspiración en un área específica de riego, más el volumen necesario para mantener un contenido favorable de sales en la solución del suelo, menos el volumen de la lluvia aprovechable en esa área de riego, entre el volumen de agua suministrado o entregado a esa área (V_{ent}). Para simplificar, al numerador se le llama volumen de requerimiento de riego (V_{rr}) (Peña, 2012).

$$E_{apl} = \frac{V_{rr}}{V_{ent}} = \frac{L_{rr}}{L_{ent}} \quad (7)$$

Donde:

E_{apl} : Eficiencia de aplicación (decimal).

V_{rr} : Volumen requerido de riego (Mm^3).

V_{ent} : Volumen entregado en la parcela (Mm^3).

L_{rr} : Lámina requerida de riego (Mm^3).

L_{ent} : Lámina entregada en la parcela (Mm^3).



2.2.8. El cultivo de quinua

Según investigaciones científicas el origen de la quinua se sitúa en las inmediaciones del lago Titicaca y desde allí el cultivo se expandió a todos los países andinos. Durante 7 000 años, los pueblos indígenas han mantenido, controlado, protegido y preservado las diversas variedades la quinua en diferentes zonas ecológicas en bancos de germoplasma naturales. Debido a su alto valor nutritivo para la alimentación, los pueblos indígenas y los investigadores lo denominan “el grano de oro de los Andes” (Apaza, Cáceres, Estrada, & Pinedo, 2013).

Los aspectos descritos junto a criterios agronómicos y de calidad del grano, fueron determinantes para realizar trabajos de investigación y mejoramiento genético de la quinua. Las variedades mejoradas de quinua obtenidas por el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), mediante el Programa Nacional de Innovación Agraria en Cultivos Andinos son: Salcedo INIA, Illpa INIA, INIA 415-Pasankalla, INIA 420-Negra Collana, INIA 427-Amarilla Sacaca e INIA 431-Altiplano. A estas variedades se suman Blanca de Junín, Amarilla Maranganí, Blanca de Juli, Kankolla, Hulhuas, Rosada de Junín, Huacariz, Ayacuchana INIA, Mantaro, Rosada de Yanamango, Cheweca y Rosada Taraco, variedades generadas por Universidades (UNSAAC, UNCP, UNALM, UNA), ampliamente utilizadas por los agricultores y con alta demanda en el mercado local, nacional e internacional (Apaza et al., 2013).



2.2.8.1. Variedad INIA 431-Altiplano

INIA 431-Altiplano fue la variedad de quinua cultivada durante la campaña en la que realizó la evaluación de la eficiencia de riego de sistema pivote central.

Esta variedad se adapta en zonas agroecológicas circunlacustre y suni del altiplano puneño entre los 3800 y 3950 msnm, con clima semi seco frio, precipitación pluvial de 400 a 560 mm, con temperaturas de 6 a 17 °C, en suelos de textura franco y franco arenoso con pH de 5.50 a 7.80, el ciclo vegetativo para el altiplano es de 150 días, tipo de crecimiento herbáceo llegando la altura de planta a 1.50 m con profundidad de raíz que alcanza hasta 18 cm bastante ramificadas y fibrosas (Apaza et al., 2013).

Los periodos fenológicos de la variedad INIA 431-Altiplano son de la siguiente manera: días hasta la emergencia de plántulas a la superficie de suelo es de 7 días, hasta el inicio de la panoja 80 días, hasta la floración 97 días, hasta la madurez fisiológica 150 días (Apaza et al., 2013).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. Ubicación política y geográfica

El estudio se realizó en la parcela del grupo de Gestión Empresarial Progreso, distrito de Mañazo, provincia y región Puno, ubicada en las siguientes coordenadas UTM de 8 255 750 a 8 255 500 norte y 357 250 a 357 000 este, a una altitud de 3913 m.s.n.m.

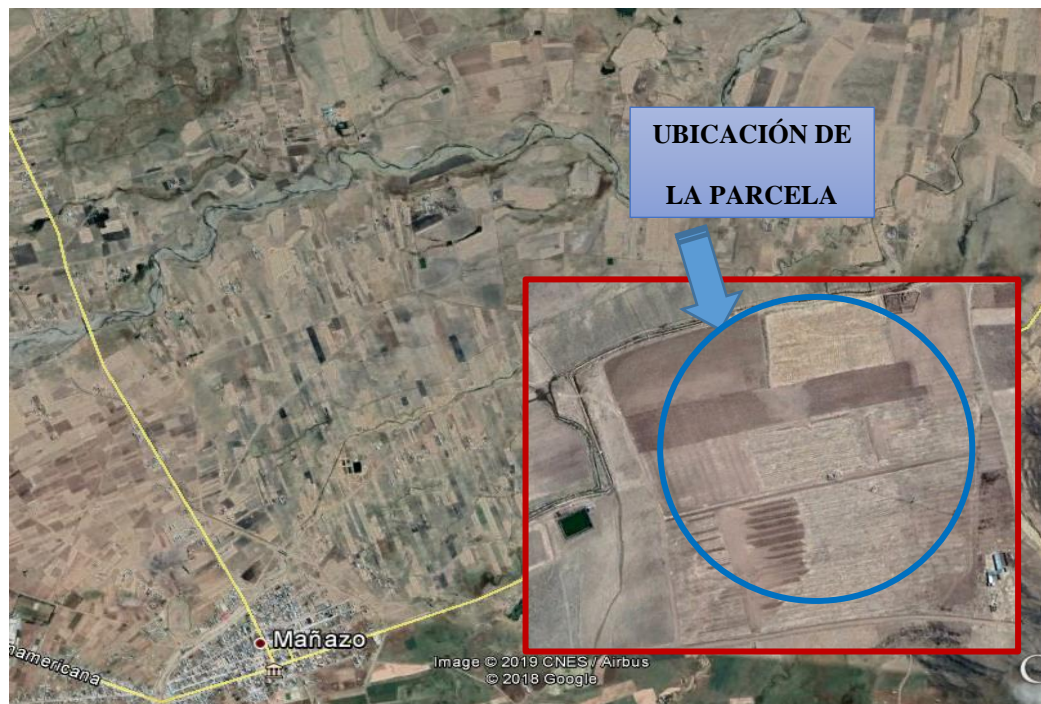


Figura 8: Ubicación del área de estudio

Fuente: Google Earth

3.1.2. Clima

Las características climáticas de la zona de estudio son típicas que corresponden a la parte altoandina del altiplano, con un clima seco y templado,



temperatura promedio de 8.90 °C. La temperatura máxima promedio es de 16.60 °C y una mínima promedio de 1.20 °C, en el invierno (junio - julio) desciende a los -2.70 y -2.80 °C presentándose fuertes heladas (ver Anexo 1).

La precipitación en la zona se presenta eventualmente en temporadas de lluvia. La temporada de lluvias está bien definida entre los meses de diciembre a marzo, cuya precipitación anual fluctúa entre 101.40 mm a 141.40 mm (ver Anexo 1). La temporada de estiaje se presentan entre los meses de junio a agosto. La velocidad de viento promedio fluctúa de 1.39 a 2.08 m/s en todo el año que son considerados como vientos leves.

3.1.3. Sistema de riego

El sistema de riego por pivote central fue implementado e inaugurado a finales del 2017 por el PSI, cuya fuente de agua proviene del río Cabanillas a través de un canal principal trapezoidal que transporta 1.58 m³/s en promedio, la conducción del agua tiene un total de 30.64 km de canal revestido hasta entregar el agua a un reservorio de 1083.24 m³ de capacidad con una eficiencia de 87.95%, se realizaron ahorros en diferentes puntos en toda la red de conducción principalmente en el bocatoma, antes y después de los laterales, teniendo como último punto a la toma para reservorio, los puntos en la que realizó el control de caudales se muestra en el Anexo 5 (Red hidrométrica irrigación Cabana-Mañazo).

El sistema de pivote central riega un área de 8.55 ha, diseñada con una frecuencia de riego diaria, está compuesto de una estructura de 162 m de radio, con torre de tres cuerpos de 47.60 m (1er, 2do y 3er cuerpo), y un voladizo de 18.60 m en donde se ubican los emisores con un total de 45 unidades a lo largo del brazo

giratorio o lateral de riego (Figura 9), las que están dispuestos a una altura de 1 m promedio desde el suelo, cuenta con un cabezal de riego en la que se encuentra la motobomba centrífuga de combustión interna que genera una energía de 30 m.c.a.

La máquina de riego pivote central instalada es de marca RDK de procedencia española modelo 450, la estructura piramidal ubicada en el centro está formada por perfiles angulares de acero galvanizado y anclada mediante pernos sobre la plataforma cuadrada de hormigón armado, se abastece de agua a través de un tubo de subida y un codo, ambos de acero galvanizado, el diámetro de tubo de subida de agua y los laterales es de 114.30 mm, el voladizo tiene una tubería de 88.90 mm de diámetro. La altura de la torre del pivote es de 4.22 m, la altura de luz entre el suelo y la estructura de la viga celosía es de 3.33 m, la máxima altura al lomo de la tubería medida desde el suelo es de 5.30 m, las torres de soporte miden 4.06 m y en cuanto al final del voladizo la altura es de 4.50 m. La totalidad de la máquina regante es de acero galvanizado.



Figura 9: Sistema riego por pivote central en funcionamiento



Los emisores de marca SENNINGER modelo i-Wob2 están dispuestos a lo largo del lateral a un metro de altura medida desde el suelo aproximadamente, cuelgan de una manguera de diámetro de una pulgada (1 pulg.), las distribuciones de éstas son de la siguiente manera:

En el primer cuerpo la separación de emisores está a 6 m, la cantidad de emisores en total son de 8 aspersores, en el segundo cuerpo están ubicados un total 16 unidades de aspersores, la misma cantidad en el tercero, y en el voladizo se encuentra 5 unidades de aspersores, la separación de emisores en el segundo, tercer cuerpo, así como en el voladizo se encuentran a 3 m, cada una cuenta con un regulador de presión modelo PSR-2 de marca RDK.

El sistema de riego pivote central consta de las siguientes componentes; un reservorio de 1083.24 m^3 , un sistema de bombeo ubicada cerca al reservorio, la tubería de conducción es de 279 m de longitud cuyo diámetro es de PVC 140 mm y el equipo de riego antes descrito, así como se muestran en el esquema hidráulico (Figura 10).

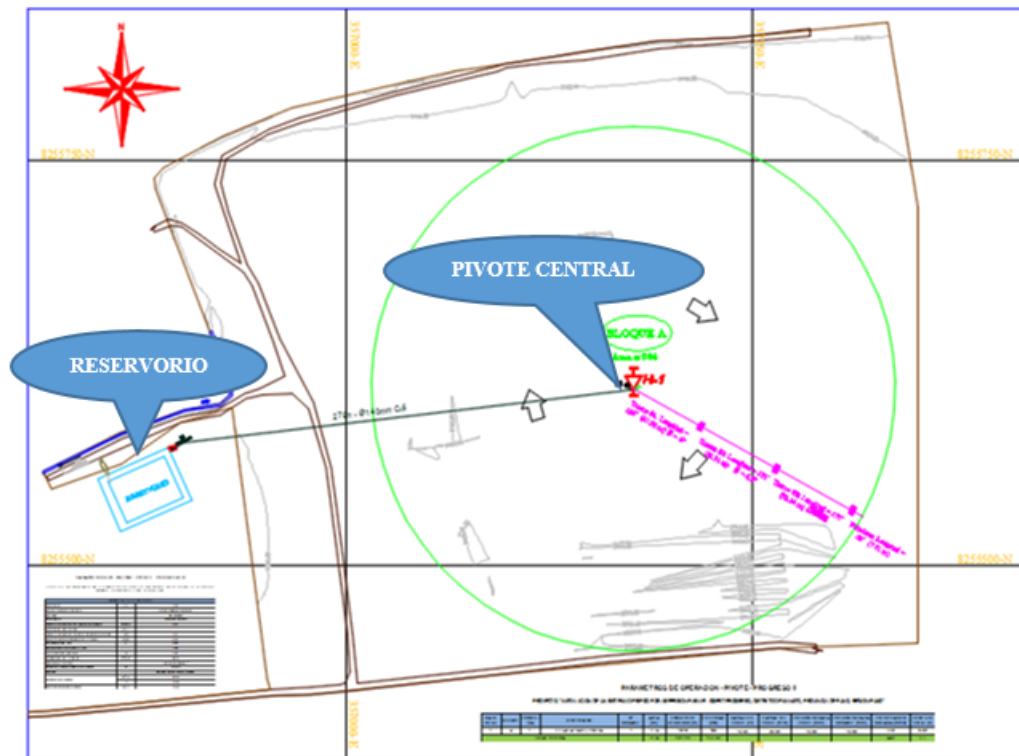


Figura 10: Esquema hidráulico del sistema de riego pivote central.

3.1.4. Cultivo

La evaluación de la eficiencia de riego se realizó para el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa Willdenow*), la quinua se cultivó por dos años consecutivos en las campañas agrícolas del 2017 y 2018, la variedad en producción fue la quinua blanca variedad INIA 431- Altiplano, sin embargo, la determinación de la eficiencia de riego para la quinua se realizó en la campaña agrícola del año 2018-2019.

La siembra se realizó a inicios del mes de octubre del año 2018, siembra realizada al voleo, y la cosecha se realizó en el mes de marzo del 2019. La producción promedio anual por campaña en el año fue de 1300 kg/ha, por otro lado, según la Dirección Regional Agraria Puno a través de la Dirección de Estadística Agraria e Informática Puno indican que el rendimiento promedio en los años 2017 y 2018 es de 1280 kg/ha.



La densidad de planta en promedio fue de 47 plantas por metro cuadrado, la altura de las plantas promedio llegó a 1.40 metros. Cabe mencionar que la aplicación del agua por el sistema de riego fue en forma complementaria a la precipitación pluvial que permitió tener plantas con densidad y altura uniforme.

3.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-HÍDRICAS DEL SUELO

Para determinar las características físico-hídricas del suelo en primer momento se realizó el muestreo de suelo en el campo de riego, recogándose éstas a profundidad de 0.40 m donde se encuentra la capa arable, cuyas muestras recogidas se llevaron al laboratorio de suelos para su análisis de caracterización respectivo.

3.2.1. Determinación de la textura de suelo

La textura se determinó mediante un análisis en laboratorio, para lo cual se utilizaron muestras obtenidas del área de riego, se tomaron 04 muestras que correspondieron a 2 ha cada una (Figura 11), estas muestras fueron llevadas para su análisis al laboratorio del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) en la estación experimental Illpa-Puno. Sin embargo, 01 muestra fue analizada anteriormente por el Laboratorios de Análisis Químico & Servicios (LAQ&S) E.I.R.L. dicha muestra de suelo fue obtenida de la totalidad de la parcela, cabe resaltar que el campo donde se ubica la parcela es homogéneo y de topografía llana que tiene un total de 8.50 ha. El trabajo en laboratorio correspondió al análisis de caracterización que incluyó el físico químico, la distribución del tamaño de las partículas o el análisis mecánico se realizó por el método del hidrómetro de Bouyocus.

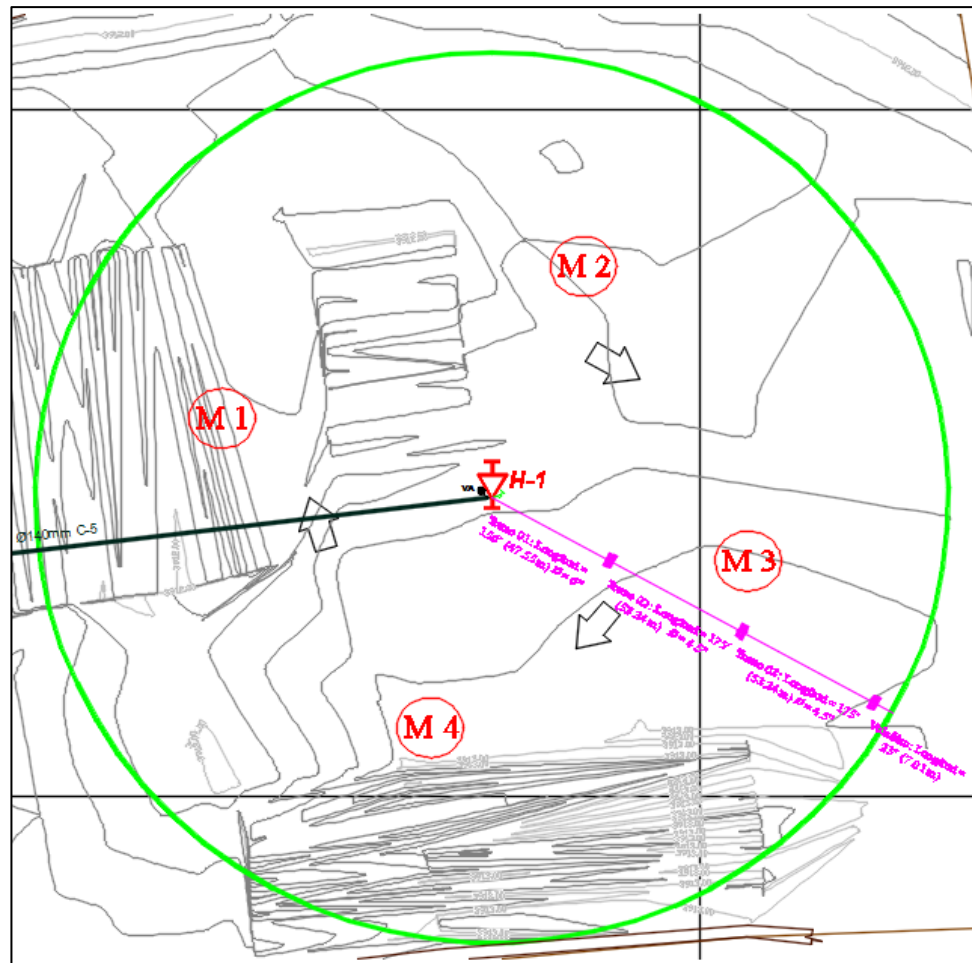


Figura 11: Puntos de muestreo en campo

3.2.2. Determinación de la densidad aparente del suelo

La densidad aparente se determinó por el método del cilindro metálico, que consistió en tomar un volumen fijo de suelo introduciendo un cilindro biselado de volumen conocido para obtener una muestra sin perturbar, este procedimiento fue trabajado en una calicata de profundidad de 0.50 m, obtenido la muestra se procedió a pesaje con una balanza digital, seguidamente las muestras fueron secadas para pesarlo nuevamente una vez seco, para obtener el peso seco se realizó el secado con la ayuda de una estufa a 105 °C durante 24 horas. Los cálculos para los

resultados se realizaron con la ecuación 1 que relaciona el peso seco y el volumen total.



Figura 12: Obtención y pesaje la muestra en campo

3.2.3. Obtención de capacidad de campo

Para determinar la capacidad de campo (CC) se realizó por el método indirecto para lo cual se adoptó la formular de Peele publicada por (Fuentes & Garcia, 2010) en su texto técnicas de riego, los datos que fueron necesario para utilizar la ecuación 8 es la composición textural de suelo, la que se obtuvo del análisis de suelo realizado en laboratorio.

$$CC = 0.48Ac + 0.162L + 0.023Ar + 2.62 \quad (8)$$

Donde:

CC : Humedad a la capacidad de campo, expresada como humedad gravimétrica en tanto por ciento.



Ac : Contenido de arcilla, expresado en %

L : Contenido de limo, expresado en %

Ar : Contenido de arena, expresado en %

3.2.4. Determinación del punto de marchites permanente

El punto de marchites permanente (PMP) se determinó por un método indirecto, para lo cual se utilizó la fórmula de Briggs publicada por (Fuentes & Garcia, 2010) en su texto técnicas de riego, en la que recomienda la siguiente ecuación (ecuación 9) que relaciona la cantidad en porcentajes de arcilla, limo y arena.

$$PMP = 0.302Ac + 0.102L + 0.0147Ar \quad (9)$$

Donde:

PMP : Humedad en el punto de marchitamiento Permanente, expresada como humedad gravimétrica, en tanto por ciento.

Ac : Contenido de arcilla, expresado en %

L : Contenido de limo, expresado en %

Ar : Contenido de arena, expresado en %

Los datos para utilizar la ecuación 9 se tomaron de los resultados del análisis de suelo obtenidos en laboratorio.

3.2.5. Obtención de la velocidad de infiltración

Para determinar la velocidad de infiltración se realizó por el método de los cilindros infiltró-metros, que consiste en utilizar dos anillas cilíndricas sin fondo de metal las que se disponen en el terreno enterrando una de las bases a profundidad de 10 cm mínimamente. El anillo interior fue de 30 cm de diámetro y el anillo exterior de 60 cm, las dos con una altura de 40 cm como se muestran en la siguiente imagen.

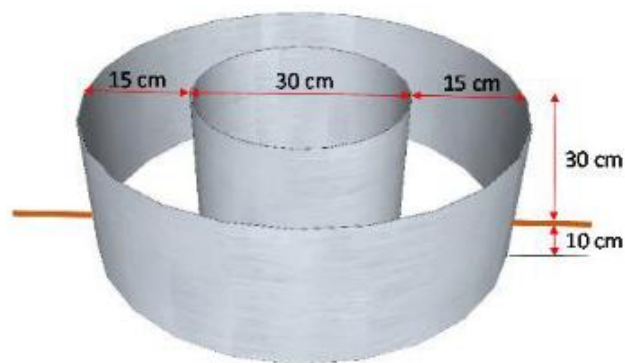


Figura 13: Cilindros infiltrómetros

Fuente: (Delgadillo & Pérez, 2016)

3.2.5.1. Método de procedimiento en campo:

- Los anillos se hincaron en el suelo en forma concéntrica con la ayuda de una madera y una comba de 10 libras, asegurándose que haya sido introducido a una profundidad mínima de 10 cm. Se Realizó la nivelación del anillo central, colocándose una wincha o una la regla de 30 cm al interior del anillo pegada a la pared de esta, con la cual se realizará las lecturas del descenso del agua.



- Introducidos los anillos se comenzaron a llenar cuidadosamente de agua ambos anillos, empezando por el exterior. Fue conveniente “tapizar” el suelo del anillo central con un plástico. De esta forma se evitó que el impacto directo del agua sobre el suelo desnudo provoque la desagregación de las partículas y el sellado de los poros.
- Las lecturas fueron sencillas, solamente se anotaron la altura de agua mientras ésta desciende mediante la regla o wincha colocada en el interior del anillo, a ciertos intervalos de tiempo definidos previamente. Las lecturas se realizaron hasta que la infiltración fue casi constante.

3.2.5.2.Procedimiento en gabinete:

- **Paso 1.** Se realizó el cálculo del tiempo acumulado, la lámina infiltrada acumulada según cada intervalo de tiempo y la lámina registrada.

El cálculo del tiempo acumulado se realizó sumando el tiempo de la lectura siguiente al valor del tiempo acumulado correspondiente a la anterior lectura. Cuando se trata de la primera lectura, el tiempo acumulado de la anterior lectura es cero.

La lámina infiltrada se calculó de la diferencia entre cada valor de lectura del nivel de agua con la anterior, anotando el resultado en valor absoluto (sin signo negativo). Cuando existió datos de nivel de recuperación del agua, éste se ha considerado el nivel de agua anterior.

Para el cálculo de la lámina acumulada, se sumó cada valor de lámina infiltrada al valor anterior de lámina acumulada, de forma análoga

al cálculo de tiempo acumulado. Cuando se trató del primer dato, la lámina acumulada de la anterior lectura se tomó como cero.

- **Paso 2.** Para calcular los coeficientes fue necesario determinar la ecuación de la infiltración acumulada, la que se realizó por el método de los mínimos cuadrados utilizando la hoja de cálculo de Microsoft Excel.

El método de los mínimos cuadrados permitió obtener los coeficientes necesarios para definir una curva representativa de la infiltración acumulada utilizando los datos obtenidos en campo. Es decir, la curva que más se aproxima a los puntos obtenidos en la prueba cuando se grafican en un plano de coordenadas.

Kostiakov (1932) propuso un modelo exponencial, el cual desarrolló de manera empírica, como se muestra en la siguiente ecuación (Alvarado Batres & Barahona-Palomo, 2017):

$$I_{cum} = AT^B \quad (10)$$

Donde linealizando la ecuación resulta:

$$\log I_{cum} = \log A + B \log T \quad (11)$$

$$Y = N + BX; \quad Y = \log I_{cum}; \quad N = \log A; \quad X = \log T$$

Donde:

$$B = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (12)$$

$$N = \frac{\sum Y - B \sum X}{n} \quad (13)$$

$$A = \text{Ant log}(N) \quad (14)$$

El porcentaje de confiabilidad se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$r^2 = \frac{\left[\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{n} \right]^2}{\left[\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n} \right] \left[\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n} \right]} \times 100 \quad (15)$$

- **Paso 3.** Se definió la ecuación de la velocidad de infiltración acumulada, cuya ecuación se obtuvo al resolver las ecuaciones (10), (11), (12), (13) y (14) mostradas en el paso 2. Sin embargo, la ecuación de infiltración se determinó haciendo la derivada de la infiltración acumulada.

3.2.6. Determinación de la Infiltración básica

Para calcular el tiempo en que alcanzar la velocidad de infiltración básica se determinó según el Servicio de Conservación de Suelo (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, quienes establecen que: “La velocidad de infiltración básica es el valor instantáneo que corresponde al tiempo en que la pendiente de la curva de la velocidad de infiltración en función del tiempo es igual a -10% de su valor”, en consecuencia, se calculó con las siguientes ecuaciones.

$$I_b = a(-10 * b)^b; (\text{horas}) \quad (16)$$

$$I_b = a(-600 * b)^b; (\text{minutos}) \quad (17)$$



3.2.7. Lámina de riego neta y bruta

La lámina neta (L_n) se determinó utilizando la ecuación 18 descrita por varios autores en la literatura, para la cual es necesario los datos de: capacidad de campo, punto de marchites, densidad aparente y la profundidad de raíces.

$$L_n = \frac{CC\% - PMP\%}{100} * Da * Prof. \quad (18)$$

Donde:

L_n : Lámina neta

CC : Capacidad de Campo

PMP : Punto de marchites permanente

Da : Densidad aparente

$Prof$: Profundidad radicular

La lámina bruta se calculará por la ecuación 19:

$$L_b = \frac{L_n}{Efa} \quad (19)$$

Donde:

L_b : Lámina bruta

L_n : Lámina neta

Efa : Eficiencia



3.3. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL SISTEMA DE RIEGO PIVOTE CENTRAL

Se realizó la verificación y medición de los parámetros hidráulicos del sistema de riego pivote central que fueron necesaria como:

3.3.1. Radio irrigado (m)

Se realizó la medición con una cinta métrica, la longitud del radio que alcanza a mojar el pivote, que corresponde de la línea lateral hasta la última torre y del radio final.

3.3.2. Radio hasta la última torre (m)

Para determinar el radio de la última torre haciendo la medición con una cinta métrica de 50 m, esto corresponde a la longitud de la línea lateral hasta la última torre o par de ruedas.

3.3.3. Velocidad de desplazamiento (m/h)

La velocidad se calculó midiendo el tiempo que demora en desplazarse la última rueda para recorrer una distancia de 50 m, para lo cual se utilizó un cronometro que nos indicó el periodo que tardó en llegar de un punto al otro que fue marcado e identificado, una cinta métrica permitió determinar la distancia de 50 m, para determinar la velocidad se utilizó la ecuación 20 que es utilizado en las ciencias físicas en el tema de movimiento rectilíneo uniforme, puesto que la máquina del pivote se mueve a una velocidad constante que es controlada por el tablero de control.



$$V_d = \frac{D}{T} \quad (20)$$

Donde:

V_d : Velocidad de desplazamiento (m/s).

D : Distancia del recorrido de la última torre de 50 metros (m)

T : Tiempo que demora en recorrer la distancia de 50 metros (h)

3.3.4. Tiempo de revolución (h)

Con la ayuda de un cronometro se controló el tiempo que tardó la línea lateral del pivote en completar una vuelta completa, lo que corresponde al tiempo de riego, este trabajo se realizó con el porcentaje de trabajo o marcha del 60%. Para determinar el tiempo de revolución se utilizó la ecuación 21.

$$T_r = \frac{2 \times \pi \times R_{u.t}}{V_d} \quad (21)$$

Donde:

T_r : Tiempo de revolución (h)

$R_{u.t}$: Radio de la última torre (m)

V_d : Velocidad de desplazamiento (m/s)

π : su valor es 3. 141592654



3.3.5. Área (ha)

El área irrigada por el pivote centra se calculó a través de la ecuación 22, tomando en cuenta que el área regada por la máquina describe una circunferencia.

$$A = \frac{\pi \times R_i^2}{1000} \quad (22)$$

Donde:

A : área total irrigada (ha)

Ri : distancia total irrigada (m)

π : Su valor es 3.141592654

3.3.6. Caudal del sistema (m³/h)

La medición del caudal de operación del sistema de riego se realizó mediante un flujómetro que está instalado y ubicado en el cabezal de riego, este flujómetro facilitó conocer el caudal que es impulsado con la motobomba.

3.3.7. Lámina aplicada (mm)

La lámina aplicada se obtuvo utilizando la ecuación 23. Los datos necesarios para determinar la lámina aplicación se obtuvieron con mediciones directas al tener el sistema en funcionamiento.

$$Lm = \frac{Q_s \times T_r}{A \times 10} \quad (23)$$



Donde:

L_m : Agua total aplicada por el equipo (mm)

Q_s : Caudal del sistema o medida (m^3/h)

T_r : Tiempo gastado para dar una vuelta (h)

A : Área total irrigada (ha)

3.3.8. Presión de operación del sistema (m.c.a)

La presión de operación se obtuvo mediante un manómetro de Bourdon conectado a la tubería de ascenso de la torre central. La presión medida es muy importante porque garantiza tener un adecuado riego por el pivote central.

3.4. DETERMINACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO

Para determinar la uniformidad de riego se realizó la prueba de pluviometría. Para este propósito se tomaron en cuenta las indicaciones dadas por las norma internacionales ISO 11545, 2009 que lo describe Tarjuelo, (2005). Para los trabajos en campo se realizó siguiendo una secuencia: en primer momento se eligió la zona de evaluación en la parcela, la que estuvo orientado en dirección este, en seguida se dispuso vasos de plásticos que sirvieron como pluviómetros que tenían medidas de 117 mm de diámetro y 120 mm de altura, espaciados a 5 m, ubicados en la dirección del radio del pivote, los pluviómetros se colocaron al nivel del suelo, constituyéndose de dos líneas de radio de colectores con un ángulo de abertura de 3° a partir del centro del pivote central (Figura 14), los pluviómetros se ubicaron a una distancia considerable antes del de la posición del lateral de riego para que la lluvia de riego alcance de forma uniforme a los pluviómetros.

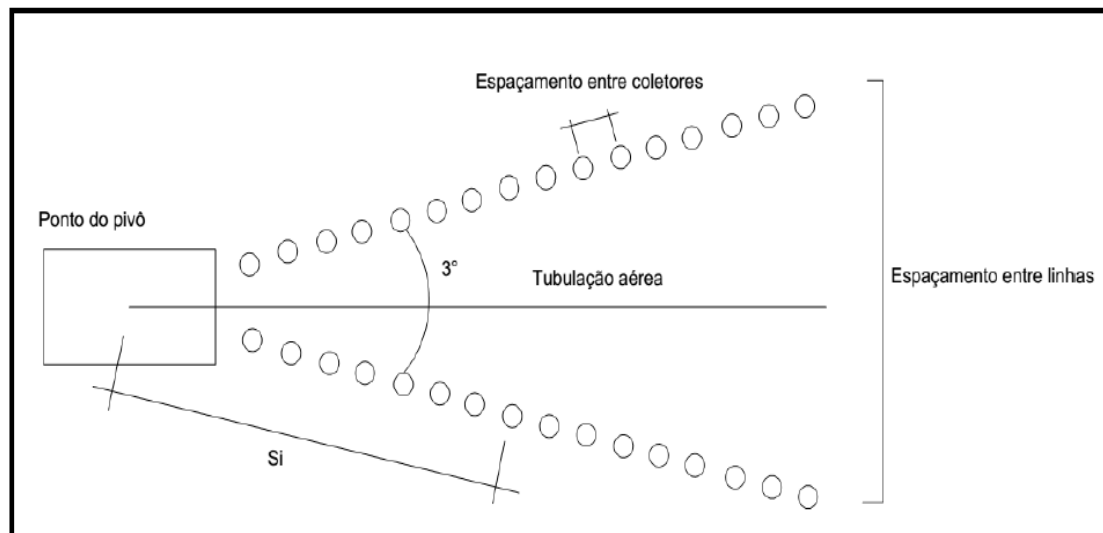


Figura 14: Disposición de pluviómetros en campo

Fuente: SCHONS, 2006 citado por Hohenberger, (2016).

Las láminas colectadas por los vasos plásticos fueron medidas con la ayuda de una probeta de vidrio 250 ml de capacidad, las mediciones se realizaron inmediatamente después concluido el riego en este sector, lo que evito realizar las posibles correcciones por evaporación.

La etapa en la se realizó las evaluaciones de la uniformidad del riego en el equipo de pivote fue antes del labrado de suelo, en la que el riego realizado fue por machaco regándose por dos días consecutivos, repitiendo la prueba después de la siembra cuando fue la aplicación del agua necesaria, en esta ocasión las plantas tenían 15 días de emergencia, las plántulas en esta etapa llegaron a un tamaño de 5 cm promedio. La variedad de quinua cultivada fue INIA 431-Altiplano. Sin embargo, cabe mencionar que la siembra coincidió con las primeras precipitaciones pluviales y el riego se utilizó como complementario en periodos de veranillos.

Con los datos recogidos en el campo, con el pivote central en funcionamiento se calculó los parámetros de evaluación del riego, que son los siguientes:



3.4.1. Cálculo de la lámina media aplicada por el pivote central

Para el cálculo de la lámina media se utilizó la ecuación 24 utilizada en su investigación por Epifânio, (2009)

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (24)$$

Donde:

\bar{L} : Lámina media, en mm

L_i : Lámina colectada en i-ésimo colector, en mm

S_i : Distancia del centro de pivote al punto i, en m

3.4.2. Determinación del coeficiente de uniformidad Heermann y Hein

Para obtener el coeficiente de uniformidad se utilizó la fórmula dada por Heermann y Hein, (1968) (ecuación 25) descrito por Tarjuelo, (2005), utilizado en su investigación por (Ortíz et al., 2010). En cuanto a los datos necesarios para la aplicación de fórmula antes mencionada, corresponden a la lámina precipitada y colectado por los pluviómetros al realizar el riego.

Los datos necesarios para la obtención del coeficiente de uniformidad fueron de una sola prueba, sin embargo, las pruebas realizados para la obtención de datos se realizó en dos ocasiones, antes del inicio de labrado del suelo y después de la siembra cuando las plantas tenían 15 días después de la siembra. En la etapa fenológico de desarrollo, floración y maduras el riego no fue necesario aplicar.



El sistema pivote está dispuesto con aspersor de marca SENNINGER modelo i-Wob2, emisor de baja presión operativa. el tamaño de boquilla es de 2.38 mm, la presión máxima a la que trabaja la boquilla es de 1.03 bar de acuerdo con su ficha técnica. Todos los emisores tienen reguladores de presión RDK que mantienen una presión predeterminada y constante de salida que puede adaptarse al diseño del sistema, independientemente de las variaciones en la presión de entrada. Esto ayuda a mantener la integridad y el rendimiento del patrón de aspersión, el modelo regulador de presión es PSR-2, su presión de salida es de 0.41 a 3.45 bar. Los aspersores están colocadas a una altura de 1.00 m medidos desde el nivel del suelo.

$$CU_h = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_i \left| L_i - \frac{\sum_{i=1}^n L_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \right|}{\sum_{i=1}^n L_i S_i} \right] \quad (25)$$

Donde:

CU_h : Coeficiente de uniformidad, en mm;

S_i : Distancia del centro del pivote al punto i, en m;

L_i : Lámina colectada al punto i, en mm;

n : Número total de puntos colectados.

3.5. DETERMINACIÓN LOS FACTORES DE LA EFICIENCIA DE RIEGO

Para determinar la eficiencia de riego fueron necesarias obtener las eficiencias almacenamiento, conducción y aplicación, puesto que con el producto de ellos se tendrá el valor de la eficiencia de riego.



3.5.1. Determinación de la eficiencia de almacenamiento

Para determinar la eficiencia de almacenamiento del reservorio se tomó las medidas del reservorio y calculó el volumen real neto de almacenamiento del reservorio, también el caudal de ingreso al reservorio que se determinó mediante un aforo al ingreso del reservorio que resultó de 25 L/s, las horas por turno de riego de acuerdo a licencia es de 12 h, teniendo el caudal de ingreso al reservorio y las horas disponibles para tomar el agua, se calculó la cantidad de agua disponible para realizar el riego para las 8.50 hectáreas o el volumen extraído de la fuente de agua, de esta manera se tuvo el balance hídrico del reservorio y luego se determinó la eficiencia de la misma.

3.5.2. Determinación de la eficiencia de conducción

Para determinar la eficiencia de conducción (E_{fc}) se realizó una inspección del sistema, verificando las fugas de agua que pudiera existir, el tramo en inspección correspondió a la tubería que va de la admisión o succión del agua en el reservorio hasta la tubería ascendente ubicada en la torre pivote central. Se tomó la calificación de acuerdo al criterio de la siguiente manera:

- 100% óptimo (sin pérdidas o fugas),
- 80% bueno (con pocas fugas) y
- 60% malo (muchas fugas).

3.5.3. Determinación de la eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación se calculó por la ecuación 27, utilizado en su investigación por Carvalho, (2012). En donde la lámina aplicada se calculó

dividiendo el producto caudal del sistema por el tiempo que tarda en dar una vuelta el pivote, entre área total regada expresado en lámina, y la lámina media corresponde a la lámina promedio colectada en los pluviómetros.

$$Ea = 100 \times \frac{\bar{L}}{L_{apl}} \quad (26)$$

Donde:

\bar{L} : Lamina media de agua colectada, mm

L_{apl} : Lamina aplicada, mm

3.5.4. Determinación de la eficiencia de riego

La eficiencia de riego (E_r) se determinó multiplicando los resulta de la eficiencia almacenamiento, eficiencia de conducción y la eficiencia de aplicación (ecuación 27), tal como fue descrita por Peña, (2012), sin embargo, cabe mencionar que la eficiencia de un sistema de riego es la relación entre la cantidad de agua efectiva utilizada por las plantas y la cantidad de agua suministrada desde la fuente de agua.

$$E_r = E_s \times E_c \times E_a \quad (27)$$

Donde:

E_s : Eficiencias almacenamiento

E_c : Eficiencia de conducción

E_a : Eficiencia de aplicación



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADO DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICO-HÍDRICAS DEL SUELO

4.1.1. Textura de suelo

Los resultados obtenidos por Laboratorios de Análisis Químico & Servicios (LAQ&S) E.I.R.L. muestra que el suelo es de clase textural franco arenoso, con 58%, 20%, 22% de arena, arcilla y limo respectivamente. El pH del suelo de 5.44 que corresponde a un suelo fuertemente ácido, no salino, contiene material orgánico, nitrógeno y potasio en niveles bajos, en cuanto al fósforo se encuentra en niveles normales (ver Anexo 6). Por otro lado, el laboratorio del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) estación experimental Illpa-Puno, de las 4 muestras de suelo que analizó, los resultados mostraron que la textura es franco arenoso. Los porcentajes de arena, arcilla y limo están entre valores de 56%, 10% y 34% respectivamente. El contenido de material orgánico estuvo en un promedio de 1.94%, pH promedio del suelo de 6 que significa que el suelo es fuertemente ácido, la conductividad eléctrica (C.E.) promedio de 0.25 mmhos/cm³, teniéndose un suelo no salino, el fósforo (P) en 10 ppm (ver Anexo 7). Todo lo anterior también se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Características físico-hídricas de suelo

Laboratorio	Características físico hídricas de suelo						
	% Arena	% Arcilla	% Limo	Textura	pH	Salini- dad	
Análisis Químico & Servicios (LAQ&S) E.I.R.L.	58	20	22	Franco arenoso	5.44	Fuertemente ácido	no salino
Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)	56	10	34	Franco arenoso	6.00	Fuertemente ácido	no salino
PROMEDIO	57	15	28	Franco arenoso	5.72	Fuertemente ácido	no salino

Fuente: Elaboración propia

Entonces los resultados obtenidos por los laboratorios de INIA y LAQ&S EIRL son similares, por consiguiente, el resultado final se tiene un suelo de clase textural franco arenoso con porcentajes como promedio de arena, arcilla y limo con valores de 57%, 15% y 28% respectivamente (ver tabla 1).

4.1.2. Resultados de la densidad aparente del suelo

Los resultados de la densidad aparente del suelo obtenidos se muestran en la Tabla 2, en el cual se percibe que la densidad aparente calculada para cada calicata no difiere considerablemente, éstas oscilan en 1.19 a 1.54 g/cm³. Por lo tanto, la densidad aparente (Dap) promedio a una profundidad de 0 a 20 cm es de 1.43 g/cm³.

Tabla 2: Densidad aparente a profundidad de 0 a 20 cm

Calicata	Lado	Prof. (cm)	Psh+PC (g)	PC (g)	Psh (g)	Pss (g)	Pa (g)	Vol. Cil. (cm ³)	Dap (g/cm ³)
C-1	L1	(00-20)	120.0	46.0	74.0	67.0	7.0	44.23	1.51
	L2	(00-20)	114.0	46.0	68.0	62.0	6.0	44.23	1.40
C-2	L3	(00-20)	106.0	46.0	60.0	53.0	7.0	44.23	1.19
	L4	(00-20)	112.0	46.0	66.0	60.0	6.0	44.23	1.35
C-3	L5	(00-20)	113.0	46.0	67.0	61.0	6.0	44.23	1.37
	L6	(00-20)	120.0	46.0	74.0	68.0	6.0	44.23	1.54
C-4	L7	(00-20)	121.0	46.0	75.0	67.0	8.0	44.23	1.52
	L8	(00-20)	121.0	46.0	75.0	68.0	7.0	44.23	1.54
Densidad aparente promedio; g/cm³									1.43

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3 se muestran la densidad aparente del suelo que se encuentra a una profundidad de 20 a 40 cm hasta donde se encuentra la capa arable, en la cual la densidad aparente oscila en 1.18 a 1.65 g/cm³, estos valores son relativamente mayores a los valores encontrados a una profundidad de 0 a 20 cm. Por lo tanto, la Dap promedio es de 1.54 g/cm³.

Tabla 3: Densidad aparente a profundidad de 20 a 40 cm

Calicata	Lado	Prof. (cm)	Psh+PC (g)	PC (g)	Psh (g)	Pss (g)	Psa (g)	Vol. Cil. (cm ³)	Dap (g/cm ³)
C-1	L1	(20-40)	133.0	46.0	87.0	73.0	14.0	44.23	1.65
	L2	(20-40)	131.0	46.0	85.0	72.0	13.0	44.23	1.63
C-2	L3	(20-40)	117.0	46.0	71.0	52.0	19.0	44.23	1.18
	L4	(20-40)	114.0	46.0	68.0	59.0	9.0	44.23	1.33
C-3	L5	(20-40)	134.0	46.0	88.0	72.0	16.0	44.23	1.63
	L6	(20-40)	135.0	46.0	89.0	72.0	17.0	44.23	1.63
C-4	L7	(20-40)	133.0	46.0	87.0	71.0	16.0	44.23	1.60
	L8	(20-40)	134.0	46.0	88.0	73.0	15.0	44.23	1.65
Densidad aparente promedio; g/cm³									1.54

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos indican que nos encontramos con un suelo de características adecuadas en cuanto a la porosidad, buena aireación y buen drenaje en el que el cultivo se desarrollará adecuadamente.



Entonces el promedio de la Dap. de la capa arable es de 1.48 g/cm^3 . Verificando el resultado obtenidos, con tablas descritas por varios autores como Fuentes & Garcia, (2010) entre otros, indica que en un suelo franco arenoso la densidad aparente varía entre 1.40 y 1.60 g/cm^3 , por lo tanto, el valor obtenido se encuentran en ese rango, que indican una suelo adecuado para los cultivos.

4.1.3. Resultados de capacidad de campo y punto de marchites permanente

De acuerdo con las ecuaciones (8) y (9) que están en función a los porcentajes de arena, arcilla y limo, el punto de CC y PMP resultó de 15.67% y 8.24% respectivamente, cuyos resultados se muestran en la tabla 4. Estos resultados indican que la humedad porcentual en la que las planta se desarrollará adecuadamente está en el rango de 15 y 8% de contenido de humedad. Comparando el resultado con valores encontrados en la literatura son coincidentes como la tabla proporcionado por Israelsen y Hansen, (1979), las que son utilizadas como valores teóricos.

Tabla 4: Capacidad de campo y punto de marchites permanente según textura

DESCRIPCIÓN	Arcila	Limo	Arena	%
Capacidad de campo (CC)	15	28	57	15.67
Punto de marchites permanente (PMP)	15	28	57	8.22

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Resultados de velocidad de infiltración

Los resultados obtenidos de la prueba en campo y el procesamiento de estas se muestran en el Anexo 2, la prueba se realizó en un tiempo total de 119 minutos, tomándose intervalos de tiempo de $1, 2, 4, 5, 10$ y 15 minutos.

En el Anexo 3 se muestra el cálculo de la función de la infiltración acumulada por el método de los mínimos cuadrados, de donde resulta la ecuación de la infiltración acumulada que corresponde a la siguiente expresión:

$$I_{cum} = 1.5643t^{0.5869}; \text{ cuando } t = \text{min}$$

La confiabilidad de la función obtenida fue de 99.79%, este resultado se puede observar en la figura 15.

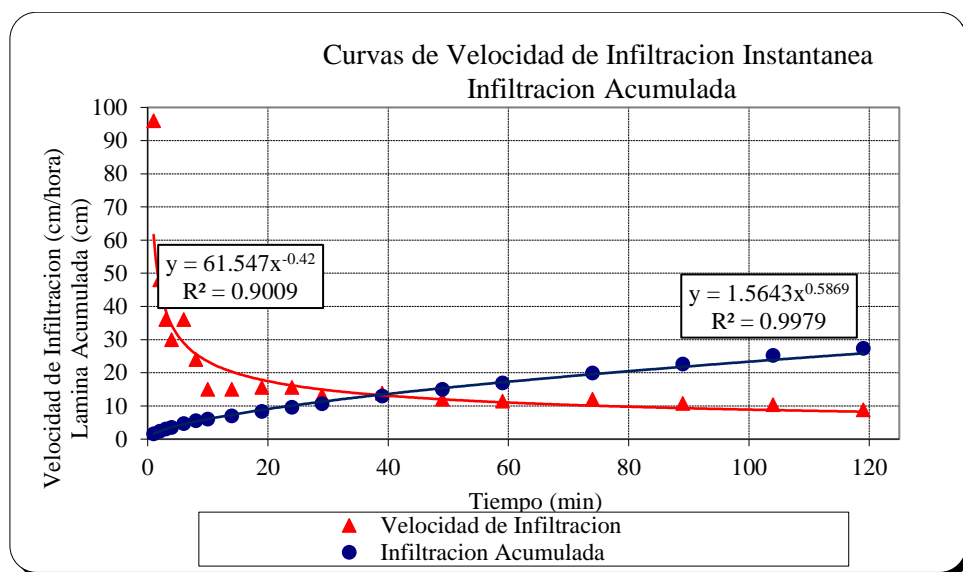


Figura 15: Curva de infiltración acumulada

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 15 se puede observar las curvas de velocidad de infiltración instantánea e infiltración acumulada, también se muestra que existe una correlación adecuada entre los datos obtenidos en campo $R^2 = 0.90$ y $R^2 = 0.99$ respectivamente.

Como resultado, la ecuación de la velocidad infiltración resultó de la siguiente manera (en el Anexo 3 se muestran el proceso de obtención del resultado):

$$I = 0.9182t^{-0.4131}; \text{ (cm/min)}$$



4.1.5. Resultado de infiltración básica

El resultado del tiempo básico en minutos es de 247.84 min = 4.13 h, por consiguiente, la velocidad de infiltración básica (I_b) dio como resultado de 0.09 cm/min (ver Anexo 4). Este resultado indica que la pluviometría de los aspersores del pivote central no debe de superar los 0.09 cm/min puesto que se ocasionaría una escorrentía superficial que causaría la erosión del suelo.

4.1.6. Resultado de lámina de riego neta y bruta

Con los datos de: $CC = 15.67\%$, $PMP = 8.22\%$, $D_a = 1.48 \text{ g/cm}^3$ y una profundidad promedio de raíces de 20 cm, la lámina neta, aplicando la ecuación 18 resultó de 22.05 mm, y la lámina bruta calculada con la ecuación 19 resultó de 28.10 mm, para lo cual se asumió una eficiencia de riego 75% de acuerdo a las recomendaciones hechas en la literatura por varios autores como Keller (1990).

4.2. RESULTADO DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL SISTEMA DE RIEGO

Los parámetros del sistema de riego por pivote central que se evaluaron se muestran en la tabla 5, las más resaltantes son: el radio irrigados que alcanza los 165 m, el radio hasta la última torre tiene un total de 142.80 m, la velocidad de desplazamiento que alcanzó el sistema fue de 103.45 m/h, esta velocidad se tomó al 60% de trabajo del sistema de pivote, ocupando un tiempo de revolución ó tiempo que demoró en dar una vuelta fue de 8.67 h, el área total que se alcanzó a regar son de 8.55 ha con un caudal de sistema de 52.64 m³/h, la lámina aplicada en un riego fue de 5.34 mm. La presión de trabajo con el que se realizó el riego fue de 11.22 m.c.a en la entrada de la torre.

Tabla 5: Parámetros hidráulicos evaluados en el sistema del riego

PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL SISTEMA DE RIEGO PIVOTE CENTRAL	
Radio irrigado (m)	165.00
Radio de la última torre (m)	142.80
Velocidad de desplazamiento (m/h)	103.45
Tiempo de revolución (h)	8.67
Área (ha)	8.55
Caudal del sistema (m ³ /h)	52.64
Lámina aplicada (mm)	5.34
Presión de operación del sistema (m.c.a)	11.22

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros hidráulicos de riego encontrados pueden diferir en un riego siempre en cuanto la presión y la velocidad de trabajo varíen, excepto el área regada. Si la presión de trabajo se incrementa la pluviometría será mayor o viceversa, en otro caso si la velocidad es lenta también la pluviometría será mayor o viceversa, entonces, un adecuado riego se realizará teniendo una presión y una velocidad de trabajo prudente.

Epifânio (2009), determinó los datos de características hidráulicas de un sistema pivote central con velocidad de desplazamiento al 100%, radio de 348 m, con caudal de 130.10 m³/h, de la cual obtuvo una lámina precipitada de 2.38 mm de agua. Sin embargo, comparando con los resultados de lámina colectada que se encontró en el sistema pivote central estudiado es menor, con lo que se afirma que la velocidad de desplazamiento del pivote influye en la lámina precipitada.

4.3. RESULTADO DE LA DETERMINACIÓN DE UNIFORMIDAD DE RIEGO

4.3.1. Lámina media precipitada por el pivote central

De acuerdo a la precipitación colectadas durante el riego con un total de 33 vasos colectores por línea de pluviómetros, y el proceso de análisis de datos se

obtuvo un resultado de lámina promedio de 4.04 mm. La representación de lámina promedio se muestra en la figura 16. Por otro lado, en la figura 16 se puede percibir que la lámina recolectada en los extremos es baja en comparación a la mitad del brazo regante, que varía desde 3 a 5 mm que significa que la distribución del agua es relativamente uniforme.

Jiménez et al., (2010) manifiesta que, “si existe una mala distribución de agua en los tramos cercanos al pivote, la afectación del área regada adecuadamente es menor, pero si los problemas de distribución están alejados del pivote, ocurre lo contrario, es decir la afectación del área regada adecuadamente es mayor. Esto se debe a que los tramos cercanos al centro de rotación de la máquina no son representativos con respecto al área total de riego de la máquina, sin embargo, los tramos lejanos sí”.

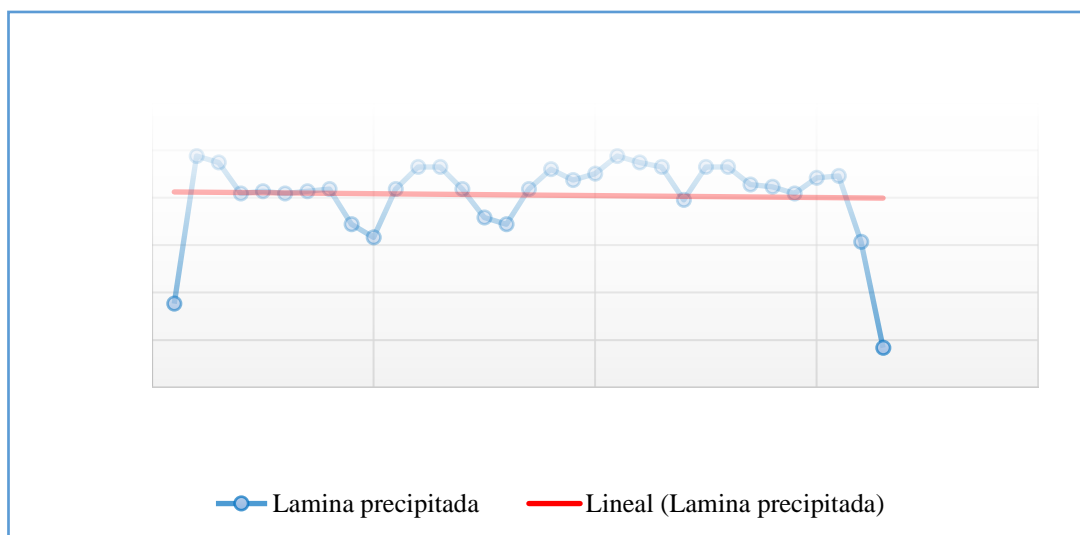


Figura 16: Lámina precipitada colectadas a lo largo del radio irrigado

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2. Resultados del coeficiente de uniformidad Heermann y Hein (CU_h)

Tabla 6: Lámina colectada por pluviómetro y coeficiente de uniformidad

Distancia desde el centro (Si); (m)	LÁMINA COLECTADA EN PLUVIÓMETROS				DATOS PROCESADOS			
	Línea 1 (cm ³)	Línea 2 (cm ³)	Promedio (cm ³)	Lámina (Li); (mm)	Si*Li	Li- (Li*Si/Si)	Li- (Li*Si/Si)	SI* Li- (Li*Si/Si)
5	20	18	19.0	1.78	8.84	-2.27	2.27	11.35
10	52	53	52.5	4.88	48.83	0.85	0.85	8.46
15	52	50	51.0	4.74	71.15	0.71	0.71	10.59
20	42	46	44.0	4.09	81.85	0.06	0.06	1.11
25	44	45	44.5	4.14	103.48	0.10	0.10	2.55
30	42	46	44.0	4.09	122.78	0.06	0.06	1.66
35	42	47	44.5	4.14	144.87	0.10	0.10	3.57
40	40	50	45.0	4.19	167.42	0.15	0.15	5.94
45	34	40	37.0	3.44	154.87	-0.59	0.59	26.81
50	38	30	34.0	3.16	158.12	-0.88	0.88	43.74
55	50	40	45.0	4.17	230.20	0.15	0.15	8.16
60	48	52	50.0	4.65	279.04	0.61	0.61	36.81
65	50	50	50.0	4.65	302.29	0.61	0.61	39.87
70	36	54	45.0	4.19	292.99	0.15	0.15	10.39
75	36	41	38.5	3.58	268.57	-0.46	0.46	34.21
80	38	36	37.0	3.44	275.32	-0.59	0.59	47.66
85	46	44	45.0	4.19	355.77	0.15	0.15	12.61
90	51	48	49.5	4.60	414.37	0.57	0.57	51.03
95	44	50	47.0	4.37	415.29	0.33	0.33	31.77
100	48	49	48.5	4.51	451.11	0.47	0.47	47.39
105	55	50	52.5	4.88	512.73	0.85	0.85	88.83
110	52	50	51.0	4.74	521.79	0.71	0.71	77.71
115	52	48	50.0	4.65	534.82	0.61	0.61	70.55
120	43	42	42.5	3.95	474.36	-0.08	0.08	10.09
125	52	48	50.0	4.65	581.32	0.61	0.61	76.68
130	50	50	50.0	4.65	604.58	0.61	0.61	79.75
135	50	42	46.0	4.28	577.60	0.24	0.24	32.59
140	48	43	45.5	4.23	592.49	0.19	0.19	27.29
145	44	44	44.0	4.09	593.42	0.06	0.06	8.03
150	53	42	47.5	4.42	662.71	0.38	0.38	57.14
155	52	44	48.0	4.47	692.01	0.43	0.43	66.25
160	34	32	33.0	3.07	491.10	-0.97	0.97	154.84
165	10	8	9.0	0.84	138.12	-3.20	3.20	528.01
SUMATORIA								
2805					11324.196			1713.42
					LÁMINA PROMEDIO (L^-); (mm)		4.04	
					COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (CU_h); (%)		84.87	

Fuente: Elaboración propia

Del análisis de los datos que se muestra en la Tabla 6, después del procedimiento de cálculo el CU_h resultó del 84.87% valor que fue resultado



aplicando la ecuación 25, sin embargo, según Tarjuelo, (2005) considera que una parcela está bien regada es cuando se consigue un CU_h entre el 85 y 90%, por lo tanto, el valor obtenido indicado anteriormente se considera como aceptable, que significa que tenemos el área bien regada.

Por otro lado, Tarjuelo, (2005) también indica que en los ensayos de campo realizados a pivotes dan valores generalmente altos del CU, (del 80 al 90%), con velocidades de viento inferior a 7.50 m/s. Cuando el viento sopla hacia el centro pivote, en la dirección del lateral, el área regada disminuye alrededor de un 17%, mientras que cuando sopla hacia el externo, el área crece cerca de un 19 %.

Autores como Epifânio, (2009) quien evaluó el desempeño de los sistemas de riego pivote central halló un valor de CU de 80 %, valor que consideró como aceptable según las norma Brasileña. Por otro lado Ortíz et al., (2010) quien analizó el efecto la uniformidad de aplicación de agua de un sistema de riego por pivote central probando varios emisores, obtuvo valores entre 80 - 95 % de CU y concluye que valores alrededor al 80 % son suficiente para brindar una adecuada uniformidad de riego.

4.4. RESULTADO DE LOS FACTORES DE LA EFICIENCIA DE RIEGO

4.4.1. Eficiencia de almacenamiento

Para el sistema de riego pivote central se tiene una dotación por turno de riego de 25 L/s por 12 h, con este caudal el volumen de agua disponible total es de 1080 m³, sin embargo, al volumen de agua disponible total se agrega las pérdidas por evaporación.



Teniendo la velocidad de evaporación promedio de 4.28 mm/día de acuerdo con los datos de la estación meteorológica de Mañazo, y el área de la superficie del agua en el reservorio de 722.16 m², se calculó la evaporación de agua que resultó de 3.10 m³/día, esta pérdida se restó al agua disponible total. Entonces, el agua extraíble total resulta de 1076.90 m³. Por otro lado, el volumen total de capacidad neta de almacenamiento en el reservorio es de 1083.24 m³. Por lo tanto, usando la ecuación 5 se obtuvo como resultado una eficiencia de almacenamiento del 99.4 ≈ 99 %. Estos valores de pérdida por evaporación se hace cada vez mayor por el incremento de la temperatura por efectos del cambio climático (Belizario, 2014, 2015; Belizario, Huaquisto, & Chirinos, 2013).

4.4.2. Eficiencia de conducción

Al realizar la inspección de la tubería de conducción no se encontró indicios de la existencia de fugas, por consiguiente, el caudal bombeado es igual al caudal entregado en el pivote, por lo tanto, el resultado de la eficiencia de conducción se consideró óptimo sin pérdidas o fugas para lo cual corresponde una valoración de 100% de eficiencia.

4.4.3. Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación es uno de los parámetros determinante que interviene en la eficiencia de riego, este valor resultó del 75.63%, se calculó utilizando la ecuación 26. En la Tabla 7 se puede ver los valores de lámina promedio colectada y la lámina aplicada, las cuales se utilizaron para calcular la eficiencia aplicación.

Tabla 7: Eficiencia de aplicación de riego en la parcela de estudio

EFICIENCIA DE APLICACIÓN	
Lámina promedio colectada, (mm)	4.04
Lámina aplicada, (mm)	5.34
Eficiencia de aplicación, (%)	75.63

Fuente: Elaboración propia

4.4.4. Resultados de eficiencia de riego

La eficiencia de riego del sistema pivote central que resultó del producto de la eficiencia de almacenamiento, la eficiencia de conducción y la eficiencia de aplicación, cuyos valores resultaron de 99%, 100% y 75.63% respectivamente, la eficiencia de riego resultó del $74.87 \approx 75\%$ valor que indica que la eficiencia del sistema de riego por pivote central es adecuada. Sin embargo, desde un punto de vista comparativo con el sistema de riego por gravedad con que contaba la parcela en estudio la eficiencia de riego ha sido mejorada en un 100%, por otro lado, los factores influyentes en el resultado de la eficiencia de riego fueron la operación inadecuada y el desconocimiento técnico en manejo del riego por el agricultor u operador de este sistema de riego pivote central.

Barcellos, (2006) en su investigación evaluó el manejo de riego con sistemas de riego con pivotes centrales en agricultura extensiva, obtuvo valores de eficiencia de riego entre 83.20 y 76.60% que brinda un área de riego adecuado, por lo tanto, se consideró como una eficiencia adecuada.



V. CONCLUSIONES

- a. El análisis de las características físico-hídricas principales del suelo como la clase textural, la densidad aparente (D_a) de 1.48 g/cm^3 , el punto de capacidad de campo (CC), el punto de marchites permanente (PMP), indica que se puede almacenar de 15.68% de humedad como máximo y 8.22% como mínimo, rango en el cual el cultivo se desarrollara sin dificultades.
- b. El coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein del 84.87% indica que los emisores utilizados, el espaciamiento de estos son adecuados y trabajan correctamente en las condiciones de clima del altiplano, por consiguiente, se tiene un adecuado riego.
- c. La eficiencia de riego que brinda el pivote central con emisores dispuestos a una altura de 1 m desde el suelo llegó al 75% que indican que la eficiencia de riego es aceptable, sin embargo, siendo una eficiencia baja con respecto a la potencialidad de eficiencia que brinda estos sistemas, lo que es causado por un inadecuado manejo por falta de capacitación del operador o agricultor con respecto a la operación se sistema de riego pivote central.



VI. RECOMENDACIONES

- La cantidad de agua a reponer en el suelo está condicionada por las características físico-hídricas del suelo como almacén de agua para las plantas, por lo que se recomienda realizar un estudio minucioso aplicando tecnologías existentes que determinan con exactitud el porcentaje de agua a capacidad de campo y punto de marchites como la olla de Richards.
- El uso eficiente de agua es uno de los temas que en la actualidad es de interés primordial para los profesionales por el cambio climático que se presenta a nivel mundial, en consecuencia, los sistemas de riego como pivote central con su alto porcentaje de uniformidad de distribución de agua ayudan en este propósito, por otro lado, el costo energético es un tema incógnito por lo que se recomienda realizar una evaluación minuciosa en el tema de gasto energético.
- La eficiencia de riego evidencia que se pueden incrementar la producción del cultivo de quinua que es uno de los granos de alto contenido proteínico, considerado como el grano de oro del altiplano. Por lo tanto, recomiendo realizar el análisis de costo beneficio para determinar la rentabilidad del sistema de riego pivote central con los rendimientos que se obtengan operando dicho sistema.



VII. REFERENCIAS

- Alvarado Batres, C., & Barahona-Palomo, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Cuadernos de Investigación UNED*, 9(1), 23–33.
- Apaza, V., Cáceres, G., Estrada, R., & Pinedo, R. (2013). Variedades comerciales de Quinua en el Perú. In *Catálogo de variedades comerciales de Quinua en el Perú* (Vol. 1st, pp. 21–74).
- Arafa, Y. E., & Shalabi, K. A. (2016). A Developed Simple Spreadsheet for Center Pivot Irrigation System Design. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 5(05), 17–23.
- Barcellos, M. (2006). *Avaliação da irrigação por pivô central na cultura do café (Coffea canephora L.) e na cultura do mamoeiro (Carica papaya L.) no município de Pinheiros – ES*. Universidade de São Paulo.
- Belizario, G. (2014). *Impactos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú* (Universidad Nacional del Altiplano). Retrieved from <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/256>
- Belizario, G. (2015). Efectos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú. *Rev. Investig. Altoandin.*, 17(1), 47–52. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18271/ria.2015.77>
- Belizario, G., Hiuaquisto, E., & Chirinos, T. (2013). Influencia del cambio climático en los elementos climáticos de la cuenca del río Coata-Puno. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 15(1), 35–54. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5607224>
- Belizario, G., Huaquisto, E., & Chirinos, T. (2013). Efectos del cambio climático en la temperatura y precipitación - Capachica, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 15(4), 15–24.
- Carrazón, J. (2007). Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego. In *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)* (octubre de). Honduras.
- Carvalho, V. A. (2012). *Uniformidade de distribuição de água de um pivô central no município de Goiânia-go*. Universidade Estadual de Goiás.
- De la cruz, M. (2015). *Evaluación del coeficiente de uniformidad y eficiencia de aplicación en el sistema de riego por aspersión Pacuri- Socos - Ayacucho*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- Delgadillo, O., & Pérez, L. (2016). Medición de infiltración del agua en el suelo: Método



- de doble anilla. In *Texto de apoyo para capacitación en riego*. Cochabamba, Bolivia.
- Epifânio, C. (2009). *Avaliação do desempenho e manejo de sistemas de irrigação por pivô central*. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.
- FAO. (2011). *Textura Del Suelo*. (C), 1–17.
- Fernández, R., Oyonarte, N., García, J., Yruela, M., Milla, M., Ávila, R., & Gavilán, P. (2010). Riego por Aspersión. In *Secretaría General Técnica Servicio de Publicaciones y Divulgación* (Signatura). Sevilla.
- Fong, P. D. (2010). *Determinación del coeficiente de uniformidad en los sistemas de riego por pivotes en caña de azúcar (saccharum officinarum) y servicios prestados en la finca Bolivia del Ingenio Santa Ana, Escuintla*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Fuentes, J. L., & Garcia, G. (2010). *Técnicas de Riego - Sistemas de riego en la agricultura* (MUNDI-PREN). México: Mundi-Prensa México, S.A. de C.V.
- Hohenberger, L. (2016). *Avaliação de uniformidade de distribuição de água em um pivô central no município de alegrete-rs avaliação de uniformidade de distribuição de água em um pivô central no Município de Alegrete-RS*.
- ISO 11545. (2009). *Agricultural irrigation equipment -- Centre-pivot and moving lateral irrigation machines with sprayer or sprinkler nozzles -- Determination of uniformity of water distribution*.
- Jiménez, E. R., Domínguez, M., Pérez, R., Montero, L., & Cun, R. (2010). Estudio de la uniformidad de riego, en una máquina de pivote central. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(1), 73–78.
- Lecina, S., Hill, R. W., & Barker, J. B. (2016). Irrigation uniformity under different socio-economic conditions: evaluation of centre pivots in Aragon (Spain) and Utah (USA). *Irrigation and Drainage*, 65(4), 549–558. <https://doi.org/10.1002/ird.2031>
- León, D. L. (2017). *Evaluación del sistema de riego por aspersión tipo pivots en caña de azúcar (saccharum officinarum) en irrigación Olmos*. Universidad Nacional de Trujillo.
- MINAGRI. (2015). *Manual Para El Cálculo De Eficiencia Para Sistemas De Riego*.
- Moreno, G. (2013). *Evaluación hidráulica del riego mecanizado tipo pivote central*. Universidad Autónoma Agraria “ Antonio Narro .”
- Ortíz, J. N., de Juan, J. A., & Tarjuelo, J. M. (2010). Analysis of water application uniformity from a centre pivot irrigator and its effect on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield. *Biosystems Engineering*, 105(3), 367–379. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.12.007>



- Peña, E. (2012). *El riego por aspersión Enfoques agronómico, estadístico, hidráulico y económico* (primera ed). México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pizarro, F. (1996). *Riego Localizados de Alta Frecuencia (RLAF)* (Mundi-Pren). Madrid, Barcelona, México.
- Riego por pivots*. (n.d.).
- Santos, L., Arturo, J., Picornell, M. R., & Tarjuelo, J. M. (2010). *El riego y sus tecnologías* (Editora Eu).
- Silva, P., Silva, H., Garrido, M., & Acevedo, E. (2015). Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos. In *Journal of Structural Engineering* (Vol. 141). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001200](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001200)
- Tarjuelo, J. M. (2005). *El riego por aspersión y su tecnología* (3ra ed.). México: Mundi-Prensa.
- Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C., & Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de la Ingeniería de Riego*. Lima, Perú.

ANEXOS

Anexo.1: Información meteorológica estación: CO. Mañazo

DEPARTAMENTO	PUNO	LATITUD	: 14°48'00.2"	CODIGO	:115051								
PROVINCIA	: PUNO	LONGITUD	: 70°03'59.7"	RECORD	: 10/1993 - 2010								
DISTRITO	: MAÑAZO	ALTITUD	: 3920 m.s.n.m.	PRECIPITACION	: 1958 - 2010								
PARAMETROS	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
T. Máxima (°C)	5.99	15.44	15.52	16.09	16.27	15.64	15.59	16.56	17.55	18.21	18.39	17.43	198.70
T. Mínima (°C)	4.34	4.32	3.62	1.71	-0.86	-2.70	-2.82	-1.76	0.01	1.86	2.78	3.78	14.27
T. Media (°C)	10.14	9.88	9.56	8.90	7.70	6.45	6.37	7.39	8.76	10.04	10.58	10.59	106.38
Precipitación Total (mm)	141.40	138.75	109.42	36.35	7.76	2.18	1.55	7.49	16.24	28.74	53.26	101.41	644.54
N° de días de Precipitación	19	19	17	8	2	1	1	2	5	7	9	16	105.00
Prec. Max., en 24 horas/día	53.00	57.40	51.50	32.60	21.40	17.70	7.80	19.00	20.90	30.10	70.00	39.90	421.30
H. Rel. (07-13-19) %	63.67	66.44	68.12	58.72	42.06	40.76	39.67	40.88	40.94	38.16	43.00	54.63	597.05
Evap. Total (mm) "A"	114.99	95.51	102.00	104.29	118.40	107.15	122.69	141.68	158.61	172.43	177.32	155.16	1570.23
Evap. Promedio diario	3.70	3.37	3.28	3.47	3.82	3.55	3.95	4.55	5.30	5.49	5.90	5.03	51.41
Nubosidad (Octavos)	6.78	6.67	6.11	4.61	2.78	2.22	2.11	2.65	3.65	4.18	5.00	6.18	52.92
Velocidad de Viento m/s	1.43	1.53	1.39	1.53	1.83	1.57	1.84	1.85	1.97	2.08	1.98	1.73	20.74
Velocidad Max. de viento m/s	8.00	10.00	8.00	10.00	8.00	14.00	14.00	20.00	20.00	12.00	10.00	8.00	142.00
Velocidad Prom. de viento m/s	4.72	5.77	4.69	5.77	4.92	7.78	7.92	10.93	10.98	7.04	5.99	4.87	81.37
Dirección Predominante V.	NE	SW	SW	NE	SW	SW	SW	SW	SW	NE	SW	SW	SW

Fuente: Servicio nacional de meteorología e hidrología - SENAMHI - Puno



Anexo.2: Prueba de infiltración (método del cilindro infiltró metro)

Hora			Tiempo			Datos de campo		Lamina Infiltrada		Velocidad Infiltración	
Muestreo			Hor	Parci	Acumula	Lectur	Repuest	Parci	Acumula	Instantán	Promedi
hor	min	seg	min	min	min	cm	cm	cm	cm	cm/hora	cm/hora
1	51	0	111	0	0	9.6		0.0	0.0		
1	52	0	112	1	1	11.2		1.6	1.6	96.0	96.0
1	53	0	113	1	2	12.0		0.8	2.4	48.0	72.0
1	54	0	114	1	3	12.6		0.6	3.0	36.0	60.0
1	55	0	115	1	4	13.1		0.5	3.5	30.0	52.5
1	57	0	117	2	6	14.3	10.4	1.2	4.7	36.0	47.0
1	59	0	119	2	8	11.2		0.8	5.5	24.0	41.3
2	1	0	121	2	10	11.7		0.5	6.0	15.0	36.0
2	5	0	125	4	14	12.7		1.0	7.0	15.0	30.0
2	10	0	130	5	19	14.0	9.7	1.3	8.3	15.6	26.2
2	15	0	135	5	24	11.0		1.3	9.6	15.6	24.0
2	20	0	140	5	29	12.1		1.1	10.7	13.2	22.1
2	30	0	150	10	39	14.4		2.3	13.0	13.8	20.0
2	40	0	160	10	49	16.4		2.0	15.0	12.0	18.4
2	50	0	170	10	59	18.3	9.5	1.9	16.9	11.4	17.2
3	5	0	185	15	74	12.5		3.0	19.9	12.0	16.1
3	20	0	200	15	89	15.2		2.7	22.6	10.8	15.2
3	35	0	215	15	104	17.8		2.6	25.2	10.4	14.5
3	50	0	230	15	119	20.0		2.2	27.4	8.8	13.8

Fuente: Elaboración propia

Anexo.3: Función de la infiltración acumulada (Método de mínimos cuadrados)

CALCULO DE LA FUNCION DE LA INFILTRACION ACUMULADA
(Método de Mínimos Cuadrados)

$I_{cum} = AT^B$ $Log I_{cum} = Log A + B Log T$

Función de Infiltración Acumulada: $Y = N + BX$ $Y = Log Ia$ $N = Log A$ $X = Log T$

n	Tiempo Acumulado min	Lamina Infiltrada Acumulado cm	X Log To	Y Log Ia	X * Y	X2	y2
1	1	1.6	0.000	0.204	0.000	0.000	0.042
2	2	2.4	0.301	0.380	0.114	0.091	0.145
3	3	3.0	0.477	0.477	0.228	0.228	0.228
4	4	3.5	0.602	0.544	0.328	0.362	0.296
5	6	4.7	0.778	0.672	0.523	0.606	0.452
6	8	5.5	0.903	0.740	0.669	0.816	0.548
7	10	6.0	1.000	0.778	0.778	1.000	0.606
8	14	7.0	1.146	0.845	0.969	1.314	0.714
9	19	8.3	1.279	0.919	1.175	1.635	0.845
10	24	9.6	1.380	0.982	1.356	1.905	0.965
11	29	10.7	1.462	1.029	1.505	2.139	1.060
12	39	13.0	1.591	1.114	1.772	2.531	1.241
13	49	15.0	1.690	1.176	1.988	2.857	1.383
14	59	16.9	1.771	1.228	2.174	3.136	1.508
15	74	19.9	1.869	1.299	2.428	3.494	1.687
16	89	22.6	1.949	1.354	2.640	3.800	1.834
17	104	25.2	2.017	1.401	2.827	4.068	1.964
18	119	27.4	2.076	1.438	2.984	4.308	2.067
SUMATORIA			22.292	16.582	24.457	34.289	17.582

n =	18.000
S XY =	24.457
SX SY =	369.650
S X2 =	34.289
(S X)2 =	496.945

S Y =	16.582
S X =	22.292

$$B = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

B = 0.587

$$N = \frac{\sum Y - B \sum X}{n}$$

N = 0.194

$$A = AntLog(N)$$

A = 1.564

Infiltración Acumulada:

I acum = 1.5643 T^{0.5869} cm; t=min

Porcentaje de confiabilidad:

$$r^2 = \frac{\left[\sum YX - \frac{\sum Y \sum X}{n} \right]^2}{\left[\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n} \right] \left[\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n} \right]} \times 100$$

S Y2 =	17.582
(S Y)2 =	274.963

La función tiene una confiabilidad del r2 = 99.79 %

Fuente: Elaboración propia



Anexo.4: Ecuación de velocidad de infiltración e infiltración básica

CALCULO DE LA ECUACION DE LA VELOCIDAD DE INFILTRACION

Según Kostiakov

$$I = at^b \qquad I_{cum} = \frac{a}{b+1} t^{b+1} \qquad I_{cum} = At^B$$

A = a/B	B = b+1	b = B-1	a = A*B
1.5643	0.5869	-0.4131	0.9182

Ecuación de velocidad de infiltración

$$I = 0.9182 t^{-0.4131} \text{ cm/min}$$

TIEMPO BÁSICO EN QUE ALCANZA LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

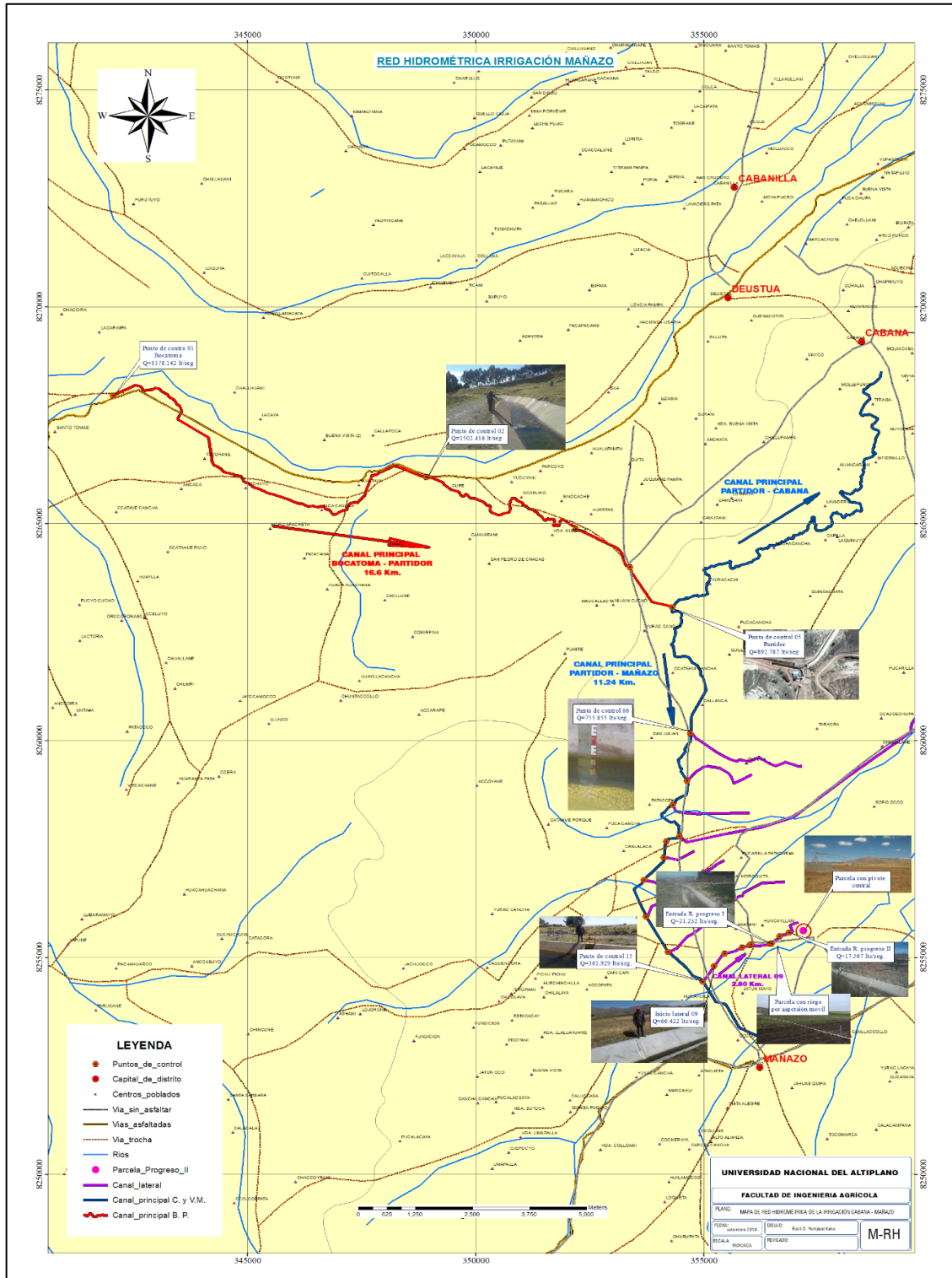
tb = -10*b	4.131	h
tb = -600*b	247.841	min

VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN BASICA

Ib=	5.651	cm/h
Ib=	0.094	cm/min

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5: Red hidrométrica– sistema de riego Cabana-Mañazo



Fuente: Elaboración propia

Anexo 6: Análisis caracterización de suelo LAQ&S E.I.R.L.



LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICOS & SERVICIOS E.I.R.L.

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD: ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN DE SUELOS;
ANÁLISIS DE AGUAS: POTABLE, SUPERFICIALES, CALDEROS, EFLUENTES INDUSTRIALES, RIEGO
ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE ALIMENTOS, PLANTAS, ANÁLISIS DE FERTILIZANTES Y ABONOS

INFORME DE ENSAYO Nº 063 - 09 - SUE - 2017

ANÁLISIS DE SUELO

I. INFORMACION PRELIMINAR

SOLICITANTE : CÉSAR ALVAREZ (GERT RT-PROGRESO)
TIPO DE MUESTRA : SUELO
SERVICIO SOLICITADO : ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN DE SUELO
CODIGO REGISTR. LABORATORIO : M-1 = 266
LUGAR DE MUESTREO : MAÑAZO (PUNO)
CULTIVO : Morrón
FECHA DE MUESTREO : 16 de Setiembre del 2017
PRESENTACION : 01 bolsa de plástico con 1.0 Kg. de muestra aprox.
FECHA DE RECEPCION : 25 de Setiembre del 2017
FECHA ENTREGA RESULTADO : 29 de Setiembre del 2017

II-RESULTADO ANALISIS DE CARACTERIZACION EN SUELOS

Cod. Lab.	ANÁLISIS MECANICO				ANÁLISIS QUIMICO					ELEMENTOS DISPONIBLES	
	Arena %	Arcilla %	Limo %	Clase Textural	CO ₂ Ca %	pH	C.E. mS/cm	Mat. Org. %	Nitróg. % N.	Fósforo ppm P	Potasio ppm K
M-1 266	58.0	20.0	22.0	Franco Arenoso	0.0	5.44	0.08	1.91	0.10	10.9	102

Abreviaturas:
C.E.= Conductividad Eléctrica mS/cm=milisiemens por cm=mmho por cm %=Porcentaje ppm=partes por millón
pH y C.E.= extracto/ suelo 1 : 2.5 CO₂Ca = Carbonato de Calcio

Cod. Lab.	CAPACIDAD DE INTERCAMBIO DE CATIONES CAMBIABLES					CIC Capacidad de Intercambio Catiónico meq/100gs	PSI Porcentaje de Sodio Intercambiable %	Saturación de Bases %
	Ca ⁺⁺ meq/100 gs	Mg ⁺⁺ meq/100gs	K ⁺ meq/100gs	Na ⁺ meq/100gs	Acidez Cambiable H ⁺ -Al ⁺⁺⁺			
M-1 266	7.13	1.43	1.07	0.09	1.98	11.7	0.77	83.08

Abreviaturas
CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico meq/100gs= miliequivalentes x 100gs de suelo
PSI=Porcentaje de Sodio Intercambiable

III. INTERPRETACION DE LOS ANALISIS DE CARACTERIZACION

Cod. Lab.	CO ₂ Ca	pH	C.E.	MAT. ORG.	NITROG.	FOSFORO	POTASIO
M-1 266	Deficiente	Fuertemente Ácido	No Salino	Bajo	Bajo	Normal	Bajo

Cod. Lab.	CAPACIDAD DE INTERCAMBIO BASES CAMBIABLES				CIC	PSI
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺		
M-1 266	Medio	Medio	Muy Alto	Muy Bajo	Bajo	No Sódico

Victoria Frisancho Motta
Lic. Quím. Victoria Frisancho Motta
C.Q.P. 270



PROHIBIDA DE REPRODUCCION PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME
VALIDO SOLO PARA LA MUESTRA ANALIZADA

Pág. 1 de 3



Anexo 7: Análisis de caracterización de suelo (Laboratorio INIA)



MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
SERVICIO NACIONAL DE LABORATORIOS
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
ANEXO SALCEDO
Of. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima



ANALISIS DE CARACTERIZACION

Nombre: Elard Dante Yampasi Kana.

Proyecto:

Fecha de Recepción: 13 de Septiembre del 2018.

Fecha de Certificación: 21 de Septiembre del 2018.

Caracterización de propiedades relativamente permanente del suelo.

N°	Cod. Lab.	MARCAS	ANALISIS		MECANICO		CO ₂ Ca %	Yeso me/100g	Mat. Org. %	N. TOTAL %
			Arena	Arcilla	Limo	Textura				
			%	%	%					
1	306L4	M04 Zona 4 Progreso I Mañazo	53	12	35	FA	0,00		1,84	0,07
2	306L5	M02 Zona24 Progreso I Mañazo	57	8	35	FA	0,00		1,96	0,07
3	306LL1	M04 Zona 4 Progreso I Mañazo	59	10	31	FA	0,00		1,98	0,07
4	306LL2	M04 Zona 4 Progreso I Mañazo	55	10	35	FA	0,00		1,97	0,07
5										

Caracterización del Estado de fertilidad y condiciones alterables del suelo.

N°	Suelo: Agua 1:2,5		NUTRIENTES DISPONIBLES				Boro Soluble (ppm)	CATIONES CAMBIABLES					CIC me/100g	Suma Cationes
	pH	C.E. mmhos/cm	P (ppm)	K (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)		Al me/100g	Ca me/100g	Mg me/100g	Na me/100g	K me/100g		
	1	6,02	0,347	10,93	606,01				0,00	2,94	0,62	1,60		
2	5,97	0,200	10,00	645,11			T	4,48	2,74	1,30	1,00	9,00	9,52	
3	6,00	0,204	9,56	606,01			0,00	4,46	1,72	1,10	1,10	8,00	8,38	
4	6,00	0,263	9,88	390,98			0,00	6,88	3,12	1,60	0,90	10,80	12,50	
5														

Referencias:

Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, Division of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimpresión, Octubre 1988. 195p.

Conclusiones:

La muestra analizada de SUELO CUMPLE con los requisitos de documentos referenciales. (El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo).

Nota:

Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento.



INIA
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
Ing° JORGE CANHUA ROJAS
Jefe Laboratorio Análisis
SALCEDO

Los resultados son aplicables a estas muestras.

www.inia.gob.pe

Rinconada de Salcedo s/n
Puno. Puno. Perú
T: (051) 363-812

Anexo 8: Panel fotográfico



Calicatas de profundidad de 40cm para obtención de densidad aparente



Prueba de infiltración por el método de cilindros infiltrómetros



Cabezal de riego y reservorio de geomembrana del sistema de riego



Prueba de pluviometría-colecta de lámina precipitada



Uniformidad de crecimiento del cultivo de quinua



Etapas de madures fisiológico del cultivo de quinua