

EFFECTO DEL SOLAPAMIENTO EN RIEGO POR ASPERSIÓN PARA PRODUCCIÓN DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd.) EN EL MUNICIPIO DE PATACAMAYA, ALTIPLANO CENTRAL

Effect of overlap in sprinkler irrigation for quinoa production (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the municipality of Patacamaya, Central Highlands

Daniel Paredes Alvarado¹; Fanny B. Arragan Tancara²

RESUMEN

En Bolivia, el 97% de las actividades de riego se realiza a través de sistemas tradicionales por sus bajos costos de implementación, la necesidad de altos volúmenes es el principal problema, sumado a la baja eficiencia y uniformidad, el riego por aspersión es una alternativa que permite una reposición oportuna y eficiente de agua a los cultivos; no obstante, para condiciones climáticas típicas del Altiplano, aún es necesario mayor información referida a la uniformidad de distribución del riego. Uno de los cultivos de mayor importancia en la región del Altiplano es la quinua, especie estratégica que contribuye a la seguridad y soberanía alimentaria. El objetivo del trabajo fue analizar el efecto de tres porcentajes de solapamiento entre aspersores con la aplicación de riego por aspersión fijo para la producción de quinua de la variedad Jacha Grano en la Estación Experimental Patacamaya, los porcentajes de solapamiento fueron 70%-T1, 85%-T2 y 100%-T3, los indicadores evaluados fueron el Coeficiente de Uniformidad, Uniformidad de Distribución en el cuarto inferior, Coeficiente de Variación y Eficiencia de Aplicación. Entre los resultados se destaca que el uso de valores altos de fracción de superficie adecuadamente regada, implica coeficientes de uniformidad aceptables o excelentes, de otra forma el requerimiento de agua para un riego adecuado se incrementa, asimismo, las pérdidas por viento son un factor importante en la distribución del riego sobre la parcela. Los tratamientos T3 y T2 presentaron los mayores rendimientos de quinua con 1.96 y 1.93 t ha⁻¹. Los tratamientos bajo riego presentan un comportamiento similar respecto al crecimiento del cultivo de quinua, los tratamientos 3 (solapamiento de 100%) y 2 (solapamiento de 85%), presentaron plantas con mayor altura, longitud de panoja, porcentaje de granos grandes y rendimiento.

Palabras clave: Riego por aspersión, solapamiento entre aspersores, *Chenopodium quinoa* Willd.

ABSTRACT

In Bolivia, 97% of irrigation activities are carried out through traditional systems because of their low implementation costs, the need for high volumes is the main problem, added to the low efficiency and uniformity, sprinkler irrigation is an alternative that allows a timely and efficient replenishment of water to crops; nevertheless, for typical climatic conditions of the highlands, it is still necessary more information referring to the uniformity of irrigation distribution. Quinoa, a strategic species that contributes to food security and sovereignty, is one of the most important crops in the highland region. The objective of the work was to analyze the effect of three percentages of overlap between sprinklers with the application of fixed sprinkler irrigation for the production of quinoa of the variety "Jacha Grano" in the Experimental Station of Patacamaya, the percentages of overlap were 70%-T1, 85%-T2 and 100%-T3, the indicators evaluated were the Coefficient of Uniformity, Uniformity of Distribution in the lower quarter, Coefficient of Variation and Efficiency of Application. Among the results it is emphasized that the use of high values of surface fraction properly irrigated, implies acceptable or excellent uniformity coefficients, otherwise the requirement of water for an adequate irrigation is increased, also, the losses by wind are an important factor in the distribution of irrigation on the plot. The treatments T3 and T2 presented the highest quinoa yields with 1.96 and 1.93 t ha⁻¹. The treatments under irrigation show a similar behavior with respect to the growth of the quinoa crop, the treatments 3 (overlap of 100%) and 2 (overlap of 85%), presented plants with greater height, length of panicle, percentage of large grains and yield.

Keywords: Sprinkler irrigation, overlap among sprinklers, *Chenopodium quinoa* Willd.

¹ Técnico, Instituto del Seguro Agrario, Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras, Bolivia. dan.par.alv@gmail.com

² Docente, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia.

INTRODUCCIÓN

En Bolivia, el 97% de las actividades de riego se realiza a través de sistemas tradicionales por sus bajos costos de implementación, no obstante, la necesidad de altos volúmenes de agua se convierte en el principal problema, sumado a la baja eficiencia y uniformidad de éstos en la mayoría de los casos (MMAyA-VRHR, 2013), lo cual se traduce en el desaprovechamiento de un recurso limitado como es el agua. Ante este panorama han surgido alternativas como el riego por aspersión, pero su implementación y adopción por los agricultores requiere de mayor información técnica, apoyada en experimentación de campo, considerando un escenario complejo de interacciones económicas, ambientales y sociales en el área rural (Vallejos et al., 2011).

La tecnificación del riego es una alternativa que permite una reposición oportuna y eficiente del agua lo que se traduce en un buen rendimiento de los cultivos (Holzapfel et al., 2007); para las condiciones climáticas típicas de lugares como el Altiplano, aún se hace necesaria mayor información referida a la uniformidad de distribución (UD) del riego sobre el terreno, mismo que depende del solapamiento entre aspersores contiguos, en términos generales, si la UD es “pobre”, algunas plantas estarán sub irrigadas y otras sobre irrigadas, lo cual incidirá negativamente en el desarrollo del cultivo (Dudek y Fernández, s.f. mencionados por Tarjuelo, 2005).

Uno de los cultivos de mayor importancia en la región del Altiplano es la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), especie estratégica que contribuye a la seguridad y soberanía alimentaria (Del Castillo et al., 2007), debido a su calidad nutritiva, bajo costo de producción y amplia variabilidad genética que le permite presentar adaptabilidad y plasticidad bajo diversas condiciones agronómicas extremas, pero este nivel de resistencia se traduce en rendimientos bajos, siendo 0.553 t ha^{-1} el promedio nacional de la última década (INE, 2015).

La investigación presenta datos e información referida al uso y evaluación técnica del método de riego por aspersión para la toma de decisiones en los

productores, considerando que esta transición tecnológica requiere de una importante inversión y entrenamiento para su buen uso, a objeto de lograr una sostenibilidad económica y ambiental en el tiempo.

Señalados los fundamentos de la importancia del trabajo, el objetivo del mismo fue analizar el efecto del solapamiento en la aplicación de riego por aspersión fijo para la producción de quinua, además de analizar la interacción entre la productividad del cultivo y los porcentajes de solapamiento propuestos para la investigación; evaluar las propiedades hidrofísicas del suelo bajo riego y comparar parámetros agronómicos que determinan la producción de quinua bajo riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio

El trabajo fue realizado en la Estación Experimental Patacamaya, dependiente de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés, ubicada en la provincia Aroma del departamento de La Paz. Geográficamente se sitúa en las coordenadas $17^{\circ} 55'$ de latitud sur y $67^{\circ} 57'$ de longitud oeste, a una altitud de 3787 m s.n.m.

Metodología

Para el registro de parámetros climáticos durante la investigación se utilizó una estación meteorológica 6152 Vantage Pro2TM.

Se utilizó aspersores a impacto de cobertura total metálico 233 B rosca hembra de $\frac{3}{4}$ ". La instalación del sistema de riego se realizó de acuerdo al esquema de la Figura 1, utilizando un espacio entre laterales y aspersores de 15.6 m para un solapamiento de 70%; 13.8 m para 85% y 12.0 m para 100%. Para la evaluación del sistema se utilizó pluviómetros cilíndricos ($\varnothing = 0.18 \text{ m}$; $h = 0.22 \text{ m}$), manómetros y probetas; la humedad del suelo en los tratamientos bajo riego fue medida a través de sensores de matriz granular (Watermark®) y el sistema portátil de medición de humedad volumétrica DIVINER 2000.

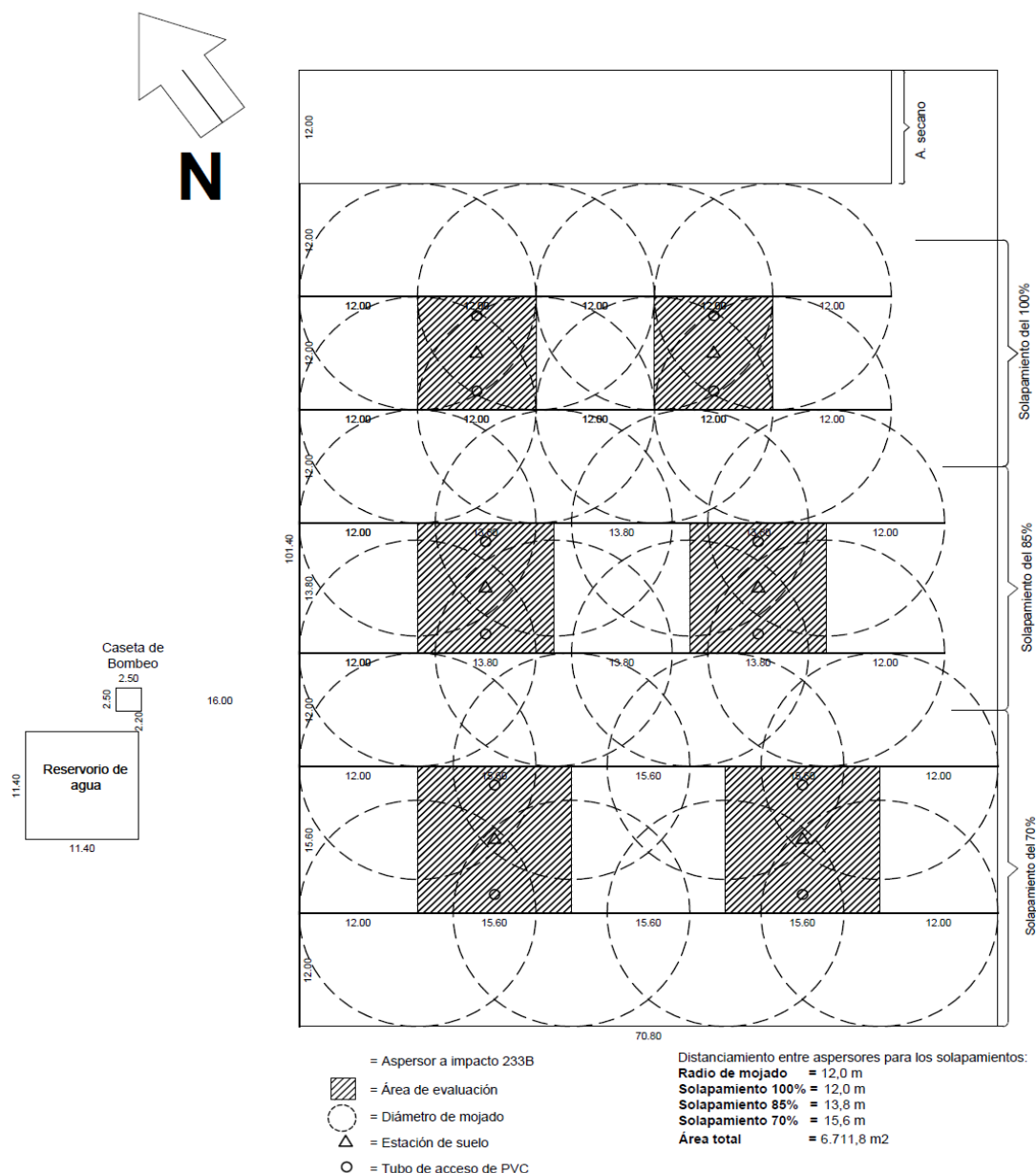


Figura 1. Esquema del sistema de riego.

El material genético utilizado fue quinua variedad “Jacha Grano” procedente de la Estación Experimental Patacamaya, la densidad de siembra fue de 6 kg ha⁻¹, realizando las distintas labores culturales que implican el cuidado del cultivo.

Se empleó el Diseño de Bloques Completos al Azar, cuyo Modelo Lineal Aditivo se muestra en la Ecuación 1 (Calzada, 1982 citado por Ochoa, 2009).

$$Y_{ij} = \mu + \beta_j + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Dónde: Y_{ij} = observación cualquiera; μ = media poblacional; β_j = efecto del j-ésimo bloque; α_i = efecto del i-ésimo tratamiento; ε_{ij} = error experimental.

Los tratamientos propuestos fueron: Tratamiento 1 (T1): riego con solapamiento de 70%; Tratamiento 2 (T2): riego con solapamiento de 85%; Tratamiento 3 (T3): riego con solapamiento de 100% y Tratamiento 4 (T4): producción a secano (testigo). La comparación múltiple de medias fue evaluada mediante la prueba de Tukey, usando un nivel de significancia de $p \leq 0.05$, para determinar la relación entre las propiedades del suelo se efectuó un análisis de estadística descriptiva.

El agua para riego pertenecía a la Clase C2-S1, con un pH neutro de 7.7. La evaluación del sistema se realizó mediante el análisis de cuatro eventos de riego, bajo el siguiente procedimiento:

Durante la fase preliminar de la investigación, se obtuvo la presión en aspersores y ramales de las áreas de evaluación, como también, se midió la humedad del suelo, antes y después del riego, utilizando el sensor FDR Diviner 2000 hasta 0.50 m del perfil del suelo. Armado de la red pluviométrica (1.5 m x 1.5 m).

En la fase de evaluación, previo al funcionamiento del sistema, se calibró el chorro de los aspersores para dirigirlos hacia los pluviómetros, registrando la hora de inicio y fin de la prueba. La medición de dirección y velocidad del viento fue realizada con el anemómetro de la estación Vantage Pro2TM.

En la fase post evaluación se midió el diámetro de mojado al final de la evaluación y la red pluviométrica fue recogida midiendo los volúmenes recolectados, utilizando una probeta. Además, se controló las pérdidas por evaporación y el caudal de los aspersores mediante un tubo de pitot.

Los indicadores evaluados fueron:

Coefficiente de Uniformidad (CU) (Tarjuelo, 2005):

$$CU = 100 \cdot \left(1.0 - \frac{\sum(H_i - H)}{H_i} \right) \quad (2)$$

Dónde: CU = Coeficiente Uniformidad (%); H_i = altura de riego aplicada (mm); H = lámina media (mm).

Uniformidad de Distribución en el cuarto inferior (UD_{ci}) esta dada por la Ecuación 3 (Serrano, 2014):

$$UD_{ci} = \frac{\text{Lamina de agua promedio infiltrada (ó recibida) en el cuarto inferior}}{\text{Lámina de agua promedio infiltrada (ó recibida)}} \cdot 100 \quad (3)$$

Coefficiente de Variación (CV) (Tarjuelo, 2005):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (CI - M)^2}{n-1}} \quad \text{con} \quad M = \frac{\sum_{i=1}^n CI}{n} \quad (4)$$

Dónde: σ = desviación típica; CI = cantidad recogida por el pluviómetro i (con i variando entre 1 y n) (mm); M = valor medio del agua recogida en los pluviómetros (mm); n = número de pluviómetros.

Eficiencia de Aplicación (E_a) (Tarjuelo, 2005):

$$E_a = ED_a \cdot P_e \cdot P_d \quad (5)$$

Dónde: ED_a = eficiencia de distribución; P_e = proporción efectiva de agua emitida por los aspersores que llega a la superficie del suelo, como decimal; P_d = pérdidas por fugas en conducciones, como decimal (0.99). La P_e es hallada con la Ecuación 6.

$$P_e = 0.976 + 0.005 \cdot ETo - 0.00017 \cdot ETo^2 + 0.0012 \cdot Vv - IG(0.00043 \cdot ETo + 0.00018Vv + 0.000016 \cdot ETo \cdot Vv) \quad (6)$$

Dónde: ETo = evapotranspiración de referencia (mm d^{-1}); Vv = velocidad del viento (km h^{-1}); IG = índice de grosor de gota.

$$f = \frac{2 \cdot R_m}{S_a + S_l} \geq 0.8 \quad (7)$$

Dónde: f = fracción adecuadamente regada (%); R_m = radio de mojado (m).

Fracción de superficie adecuadamente regada (f) (Serrano, 2014) (Ecuación 7):

Eficiencia de Distribución (ED_a) (Serrano, 2014) (Ecuación 8):

$$ED_a = 100 + (606 - 24.9f + 0.349f^2 - 0.00186f^3) \cdot \left(1 - \frac{CU}{100} \right) \quad (8)$$

Dónde: f = fracción de suelo adecuadamente regada; CU = coeficiente de uniformidad.

$$E_v = 1.68 \cdot e^{(0.29 \cdot Vv)} \quad Ar_v = 0.25 \cdot Vv^{2.15} \quad (9)$$

Pérdidas por evaporación y arrastre de viento (Tarjuelo, 2005) (Ecuación 9):

Dónde: E_v = pérdidas por evaporación (%); e = base de logaritmo neperiano; Vv = velocidad viento (m s^{-1}); Ar_v = pérdidas por arrastre del viento (%).

Para la evaluación de las propiedades hidrofísicas del suelo se obtuvo muestras de calicatas por tratamiento. El análisis físico fue de la textura (método del Hidrómetro); densidad aparente (método del Cilindro) y densidad real (método del Picnómetro) a diferentes profundidades, realizado en el Laboratorio de Manejo y Conservación del Suelo de la Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés.

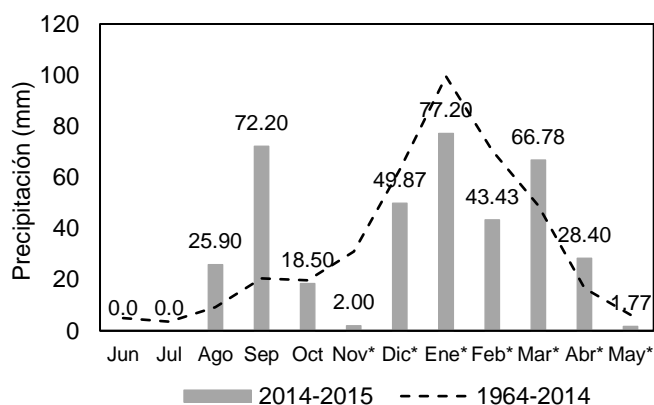
El análisis químico del pH y Conductividad Eléctrica (CE) fue en el laboratorio mencionado, mientras que los cationes de cambio, materia orgánica (MO), nitrógeno total, fósforo asimilable y carbonato total; fueron obtenidos en el laboratorio del Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear (IBTEN).

Los valores de las propiedades hidráulicas capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y conductividad hidráulica saturada (k_s) fueron obtenidos mediante el software Soil-Plant-Air-Water (SPAW) Field & Pond Hydrology. Además, la velocidad de infiltración fue determinada mediante el infiltrómetro de doble anillo.

Para la evaluación de variables agronómicas se identificaron 10 plantas por tratamiento de las cuales se hizo su seguimiento para obtener datos de: altura de planta (cm), diámetro de tallo (cm), longitud y diámetro de panoja (cm). El rendimiento ($t\ ha^{-1}$) fue obtenido por área de evaluación, realizando estimaciones para una hectárea.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La precipitación alcanzó a 386.1 mm, la Figura 2 muestra la comparación para el sector de Patacamaya, de la precipitación registrada entre los años 2014 a 2015 (periodo de investigación) y un promedio histórico con los datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de los años 1964 a 2014. Este muestra una distribución irregular en el mes de marzo, que incidió en la cosecha del cultivo.



(*) Datos Estación Meteorológica Vantage Pro2TM (Estación Experimental Patacamaya).

Figura 2. Comparación de la distribución de precipitación en el sector de Patacamaya entre los años 2014 a 2015 y 1964 a 2014.

El comportamiento de temperatura máxima, mínima y media (Figura 3) presenta valores promedio de 17.6°C, 4.5°C y 11.5°C, respectivamente. La temperatura media durante las etapas de floración y llenado de grano fue entre 10 a 15°C, que incidió sobre una adecuada velocidad de crecimiento y desarrollo del cultivo, sin embargo, también se observan valores bajos debido a las precipitaciones registradas en el mes de marzo.

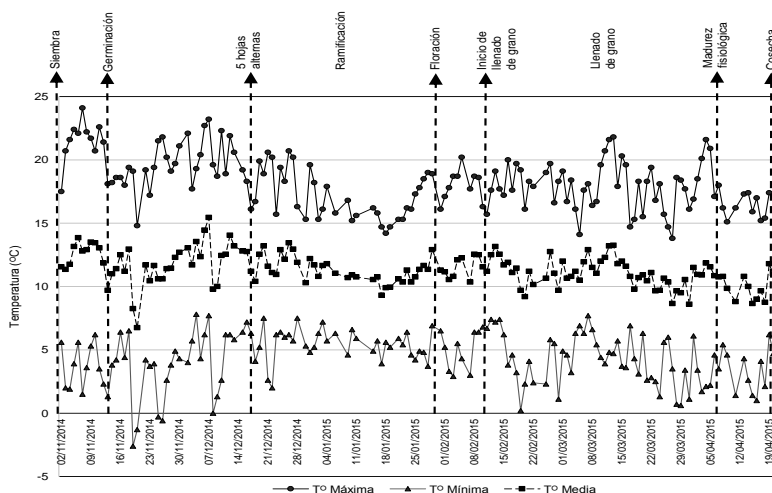


Figura 3. Comportamiento de la temperatura máxima, media y mínima (°C) durante el ciclo del cultivo.

La evapotranspiración (ETc) total del cultivo fue 607.6 mm (Figura 4), siendo 4.91 mm d⁻¹ el valor máximo (floración) y el mínimo 0.59 mm d⁻¹ (germinación). La ETc promedio fue 2.61 mm d⁻¹. A excepción del mes

de marzo y parte de abril, durante el desarrollo del cultivo la precipitación no llegó a cubrir totalmente las necesidades hídricas del mismo.

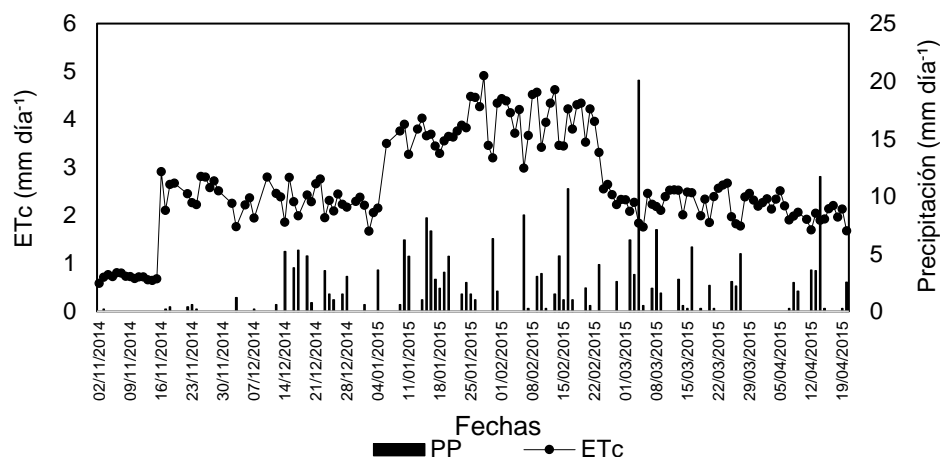


Figura 4. Comportamiento de la evapotranspiración (mm) durante el desarrollo del cultivo.

Otro factor considerado para la aplicación del riego por aspersión fue el viento, la Tabla 1 muestra los valores promedio y máximo de velocidad y dirección del viento registrado durante el estudio. La velocidad promedio presentó valores entre 1.6 a 2.6 m s⁻¹, del sur hacia el norte; mientras que la velocidad máxima registró valores entre 7.6 y 10.3 m s⁻¹ del sur, en todos los casos la uniformidad de aplicación del riego fue afectada negativamente por este factor.

Tabla 1. Velocidad y dirección promedio y máximo del viento (m s⁻¹).

Mes	Gestión 2014		Gestión 2015			
	Noviem bre	Diciem bre	Enero	Febrero	Marzo	Abril
V _v promedio	2.4 SE	2.6 S	2.4 S	1.6 S	1.7 SE	2.4 S
V _v máxima	9.8 SE	10.3 S	7.6 SE	8.0 SE	7.6 S	7.6 S

V_v = velocidad del viento (m s⁻¹); S = dirección sur; SE = dirección sureste.

Evaluación del riego con solapamiento entre aspersores

Tratamiento 1 (70% de solapamiento)

El análisis de regresión lineal entre los valores de CU y UDci obtenidos en las evaluaciones, establece una alta relación ($R^2 = 0.962$), se presentan valores promedio de CU = 78.4% y UDci = 74.9; de acuerdo a Tarjuelo (2005) el valor de UDci pertenece a un sistema para cultivos de profundidad radicular media

en suelos de textura media, sin embargo el CU obtenido es "bajo". Considerando el CU y $f = 77\%$, la EDa es 80.3%; autores como Gonzales (s.f.) citado por Serrano (2014) indican que el valor de f debe ser mayor o igual a 80%, por lo cual se establece que la ecuación utilizada para su cálculo no se ajusta totalmente a los espaciamientos propuestos para el T1, pero es cercana. Utilizando una $f = 80\%$ la EDa disminuye a 77.4%; en ambos casos se deja aproximadamente un 20% del área infra regada y el 80% adecuadamente o sobregado, requiriéndose una lámina bruta aplicada (Hba) = 1.25 mm ($f = 77\%$) y 1.29 mm ($f = 80\%$) para aplicar una altura neta (Hr) de 1.0 mm.

Tratamiento 2 (85% de solapamiento)

La regresión lineal entre el CU y UDci, establece una alta relación ($R^2 = 0.974$), se presentan valores promedio de CU = 72.2% y UDci = 60.8. El valor de UDci es similar al de T1 con un CU "bajo". Considerando el CU y $f = 87\%$, la EDa es 60.0% en este caso se deja aproximadamente un 10% del área infraregada y 90% adecuadamente regado, requiriéndose una Hba = 1.66 mm para aplicar una Hr de 1 mm. Utilizando $f = 80\%$ la EDa aumenta a 70.9%; se requiere de una Hba = 1.41 mm para aplicar una Hr de 1 mm. Valores altos de f implican CU aceptables, de otra forma el requerimiento de agua para realizar un riego adecuado se incrementa de forma significativa.

Tratamiento 3 (100% de solapamiento)

La regresión lineal entre CU y UDci establece una alta relación ($R^2 = 0.989$), se presentan valores promedio de CU = 75.9% y UDci = 63.3%. Las evaluaciones mostraron dos valores de CU, uno alrededor de 65% y otro por encima de 80%, considerando un CU promedio de 66.2% y $f = 100\%$, la EDa es 14.1%; dejando un 85% del área infraregada, requiriéndose una $H_{ba} = 7.07$ mm para aplicar una H_r de 1 mm. El valor de EDa fue muy por debajo de lo aceptable, confirmando que valores altos de f implican CU “aceptables o excelentes”, de otra forma el requerimiento de agua para un riego adecuado se incrementa en demasía.

Por otra parte, para un CU = 85.6%, la EDa aumenta a 63.4% en este caso se deja un 35% del área infraregada, requiriéndose una $H_{ba} = 1.58$ mm. Para el valor de f utilizado, CU excelentes (mayores a 90%) permiten obtener un EDa mayor a 80%, debiendo este aspecto ser considerado para la planificación e instalación de sistemas con el método de riego por aspersión.

Variación de la humedad en el suelo

La variación de humedad del suelo expresada en centibares (cbar) registrada para T1 (Figura 5a), muestra que la fluctuación de humedad fue en función al riego y precipitaciones, la Ea fue aceptable y el almacenamiento de agua presentó valores por encima de 100 cbar, donde el suelo comenzó a secar. Esta pérdida de humedad fue influenciada por las características de la textura del suelo (Franco arenoso), de acuerdo con Rucks et al. (2004) y Borda (2011), así como por la presencia de un horizonte C1 con un elevado contenido de grava.

Para T2 (Figura 5b) la humedad fue influenciada de igual manera por el riego y las precipitaciones, sin embargo, la humedad fue retenida al no presentarse valores por encima de 100 cbar. La Figura 5c muestra la variación de humedad para T3, el comportamiento fue similar que los tratamientos anteriores, mejores eficiencias de aplicación permitieron un mejor almacenamiento de agua en el perfil del suelo, aspecto que tuvo una incidencia directa sobre el desarrollo del cultivo.

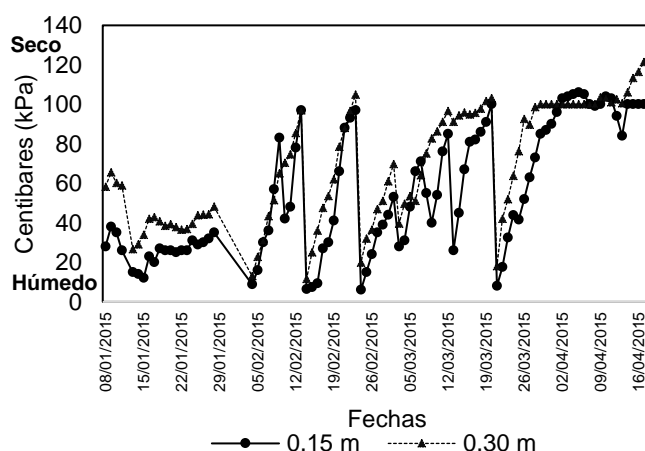


Figura 5a. Variación de humedad-Tratamiento 1.

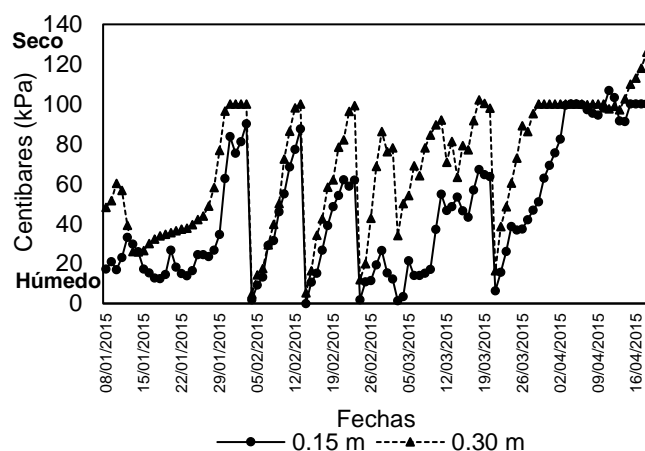


Figura 5b. Variación de humedad-Tratamiento 2.

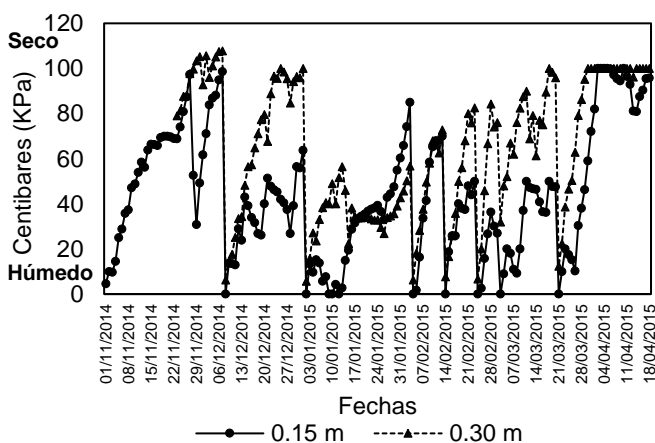


Figura 5c. Variación de humedad-Tratamiento 3.

Como se observa en las figuras de variación de humedad del suelo, durante el último mes del cultivo (abril), se presenta valores por encima de 100 cbar, esto fue realizado para acelerar la maduración del grano (García, 2003). Los espaciamientos entre

aspersores y laterales por solape son consecuentes con los volúmenes de riego aplicados, siendo $3.446 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para T3; $2.929 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para T2 y $2.412 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para T1.

Propiedades hidrofísicas del suelo

La parcela experimental se encontraba en una planicie con pendiente no mayor a 2%, siendo su material de origen depósitos aluviales del cuaternario, drenaje de Clase 2, libre de exceso de sales o álcalis, con evidencia de erosión hídrica laminar y eólica. Se identificaron tres horizontes en su perfil: Ap (0-0.20 m), C1 (0.20-0.50 m) y C2 (>0.50 m).

Propiedades físicas

En cuanto a la textura, predomina arena (A) entre 62.8 ± 5.2 a $72.0 \pm 2.0\%$, seguida de arcilla (Y) entre 18.1 ± 0.7 a $21.4 \pm 1.4\%$ y limo (L) entre 8.2 ± 1.0 a $17.0 \pm 3.0\%$, presentando una textura Franco Arenoso (FA), propia del lugar (Vargas, 2014). Además, el contenido de grava aumenta hasta 40% a los 0.40 m de profundidad. La textura es ideal para quinua (García et al., s.f.), pero el incremento con la profundidad de arcilla y grava genera alta compactación, impidiendo el desarrollo radicular y el intercambio de humedad al interferir en el drenaje interno.

En el horizonte superficial (0-0.30 m) se presentan valores menores de la densidad aparente (Dap) entre 1.20 ± 0.12 a $1.39 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$, mientras que en el horizonte inferior (0.30 – 0.50 m) el comportamiento de es contrario, de 1.39 ± 0.02 a $1.59 \pm 0.05 \text{ g cm}^{-3}$.

Densidad real (Dr), presenta datos entre 2.15 ± 0.1 a $2.35 \pm 0.1 \text{ g cm}^{-3}$, valor en el rango que corresponde a minerales de arcilla (Porta et al., 2003).

Características hidráulicas

Con respecto a la capacidad de retención del agua, los valores de CC y PMP fueron de 21.3 ± 1.1 y $12.7 \pm 0.7\%$, respectivamente, mismos que se encuentran dentro el rango para la textura FA de acuerdo con Cuenca (1989) citado por Serrano (2010). El porcentaje de saturación de 41.5% y la cantidad de agua disponible de 8.6 cm cm^{-1} son propios de este tipo de suelos, aspecto corroborado por Rucks et al. (2004).

La conductividad hidráulica saturada (Ks), muestra mayores valores en el horizonte superficial (0-0.30 m)

esto relacionado con un mayor porcentaje de A, con valores entre 11.75 a 18.29 cm h^{-1} . Esto indica un movimiento del agua mejor en comparación a horizontes inferiores (> 0.30 m), donde la Ks disminuye por la presencia de arcilla. De acuerdo a la Soil Survey Staff citado por Copa (2014), el suelo es clasificado en general como suelo de permeabilidad moderada.

La velocidad de infiltración (VIB) se ve influenciada por el contenido de A, los resultados varían entre $31.1 \pm 2.1 \text{ mm h}^{-1}$ (T4) y $26.1 \pm 6.9 \text{ mm h}^{-1}$ (T1). Según la clasificación por magnitud de infiltración (Porta et al., 2003), el suelo presenta una infiltración “moderada”.

Características químicas

El valor promedio del pH se sitúa entre 7.2 ± 0.27 a 7.7 ± 0.29 , clasificado como suelo neutro (pH 6.6-7.3) y suelo ligeramente alcalino (7.4-7.8) (Del Castillo et al., 2013). Estos valores indican la presencia de carbonato cálcico, característico de suelos de zonas semiáridas y áridas corroborado por Copa (2014). Los resultados se sitúan en el rango de pH óptimo para quinua (6.5 a 8.0) según Borda (2011), aunque este cultivo tolera suelos alcalinos como ácidos, no obstante, esta resistencia se caracteriza por una marcada defoliación y menor rendimiento (Geerts et al., 2008).

Conductividad eléctrica (C.E.), la C.E. estandarizada a 25°C en solución 1:5 y corregida en términos de extracto de saturación (CEes) muestra un valor entre 0.052 ± 0.008 a $0.094 \pm 0.014 \text{ dS m}^{-1}$. Según esto no existe una presencia significativa de sales siendo clasificado como suelo no salino (Copa, 2014), sin ningún efecto adverso para el cultivo.

Los cationes de cambio fueron evaluados a una profundidad de 0-0.30 m por tratamiento, según Villarroel (1988) y Rucks et al. (2004), el contenido de K^+ es catalogado como “moderado” para T3, “alto” para T1 y T4 y “muy alto” para T2; Ca^{++} “Bajo” para T1, T3 y T4, y “moderado” para T2. Finalmente, Mg^{++} “bajo” y Na^+ “muy bajo” para todos los tratamientos. El Porcentaje de Sodio Intercambiable (P.S.I.) entre 4.6 a 5.7%, clasifica al suelo como “normal” a “ligeramente salino” con un porcentaje de saturación de bases de “medio” a “alto” (Piwa, 1992 citado por García et al., s.f.), siendo del tipo “bajo” según su Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C.); ambos indican un suelo sin problemas de salinidad ni sodicidad de acuerdo a criterios de la USSS Staff (Porta et al., 2003).

Cultivo de quinua

A pesar de tener condiciones adecuadas de humedad para la germinación, este fue de solo 73.3%, debido a una afectación por plagas (aves y roedores), además de excesiva radiación solar y efectos del viento. La siembra mecanizada generó que algunas semillas fueran cubiertas con un espesor de suelo mayor a 2.5 cm, no viabilizando su germinación.

La Figura 6 muestra las curvas de evolución de altura de planta por tratamiento, las cuatro curvas son similares en su forma, pero el T3 y T2 son superiores, mostrando diferencias significativas en las diferentes etapas fenológicas del cultivo.

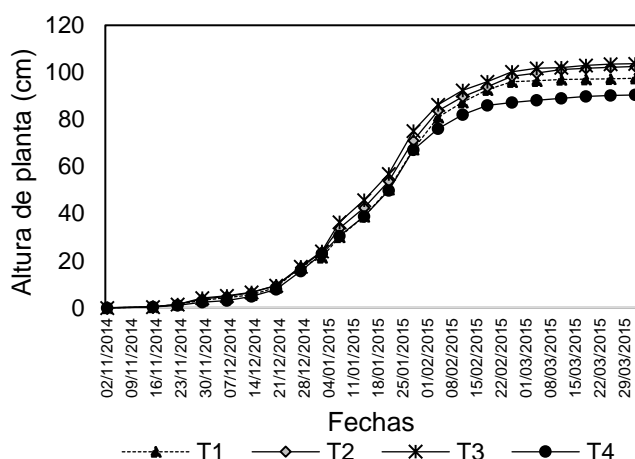


Figura 6. Curva de crecimiento del cultivo por tratamiento experimental.

El T3 presentó el mayor diámetro de tallo con 1.94 cm a diferencia de T4 con 1.56 cm, el ANVA no indica diferencias entre tratamientos, siendo esto explicado por Mendoza (2008) debido a que la diferencia alcanzada con relación al engrosamiento de tallo es producto del desarrollo de los tejidos en función a sus características genéticas, así como de factores climáticos (Condori, 2008).

La longitud de panoja fue mayor para el T3 con 29.9 cm siendo los tratamientos bajo riego estadísticamente iguales. Todos los tratamientos presentaron valores por encima del reportado por Bonifacio et al. (2003), quienes indican una longitud de 20.2 cm; esto puede explicarse por las condiciones de suelo experimental. Condori (2008) indica que a mayor cantidad de nitrógeno disponible para la quinua, mejor el desarrollo de la longitud de panoja, siendo importante señalar que es erróneo considerar que la quinua deba desarrollarse en terrenos pobres, sino en aquellos relativamente

ricos en M.O. para un mejor desarrollo morfológico principalmente de la panoja.

Siendo la longitud de panoja parte de la altura de planta, ambas variables se encuentran en una estrecha relación, donde el grado de asociabilidad fue significativo con valores de $r = 0.93$ (T1 y T4), $r = 0.94$ (T2) y $r = 0.90$ (T3).

Se observan diferencias significativas entre tratamientos, en el diámetro de panoja, los T3 y T2 fueron estadísticamente iguales y superiores a los tratamientos T1 y T4. De acuerdo con Mendoza (2008) y Condori (2008) el diámetro y la longitud de panoja presentan un elevado grado de asociabilidad, los análisis de correlación señalan valores de $r = 0.99$ para T1, T2 y T4, y $r = 0.98$ para T3.

La Figura 7 presenta la distribución porcentual en función al diámetro de grano por tratamiento, se observa una distribución porcentual similar entre T3 y T2, el mayor porcentaje se encuentra entre 1.7-2 mm para granos grandes, mostrando valores de 65 y 62%, respectivamente. Por otra parte, el T4 tiene el 69% del tamaño de grano entre 1.7 y 1.4 mm, estos granos son medianos de segunda clase.

Los porcentajes encontrados de grano de primera clase se encuentran por debajo por lo reportado por Bonifacio et al. (2003) para la variedad. La aplicación de riego durante la etapa de grano lechoso tuvo un efecto sobre el porcentaje de granos grandes, aspecto mencionado por Mamani (2007), el mismo autor señala que los mejores tamaños de grano se obtienen cuando se presenta déficit hídrico durante las fases iniciales. Este aspecto no se presentó, debido a que los riegos iniciales tuvieron como objetivo brindar la humedad necesaria para asegurar la germinación.

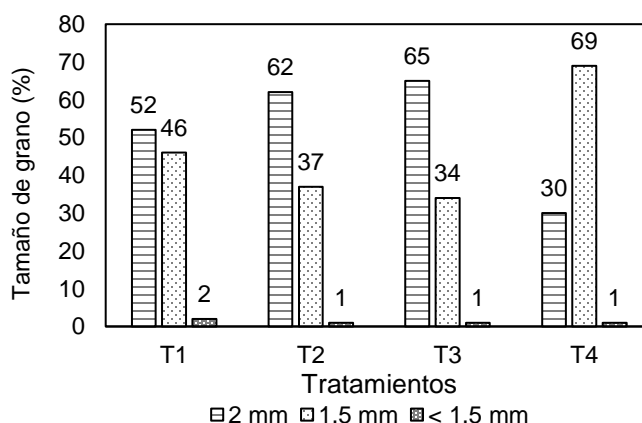


Figura 7. Distribución porcentual por tamaño de grano por tratamiento experimental.

La Figura 8 presenta los rendimientos obtenidos, el T3 y T2 tuvieron mayores valores con 1.96 y 1.93 t ha⁻¹, respectivamente, seguidos por T1 con 1.43 t ha⁻¹, y 0.94 t ha⁻¹ para T4. Los rendimientos se encuentran dentro de lo esperado para un rendimiento experimental según Bonifacio et al. (2003).

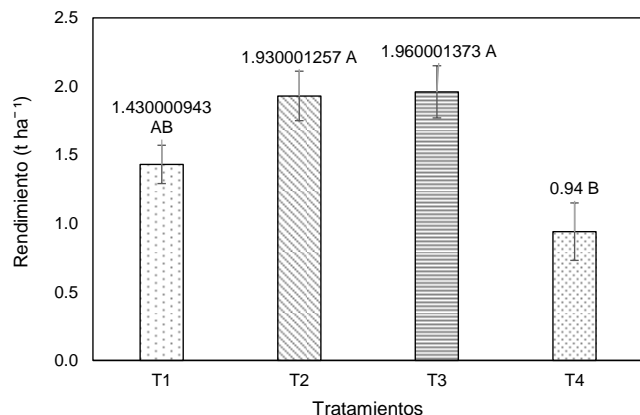


Figura 8. Rendimiento experimental de quinua (t ha⁻¹) por tratamiento experimental.

CONCLUSIONES

El uso de valores altos de Fracción de Superficie Adecuadamente Regada (f), implican CU aceptables o excelentes, de otra forma el requerimiento de agua para lograr regar adecuadamente una parcela se incrementa de forma significativa.

Mejores eficiencias de aplicación permitieron mejor almacenamiento de agua en el perfil del suelo, aspecto que tuvo incidencia directa sobre el desarrollo del cultivo. A pesar de presentarse condiciones favorables en horizontes superficiales, la presencia de grava y elevado contenido de Y, limitan el crecimiento radicular y la dinámica de humedad en el lugar de estudio.

Las pérdidas por evaporación y arrastre de viento son importantes en la implementación de este método de riego, ya que influyen directamente en la distribución del agua.

En las propiedades hidrofísicas del suelo, se tiene una textura FA y una Dap de 1.39 g cm⁻³, este último con tendencia a aumentar con la profundidad al igual que el contenido de Y y grava. En cuanto a sus características hidráulicas, los valores promedio de CC y PMP son propios de la textura identificada; mientras que la ks presentó valores relacionados con la velocidad de infiltración, disminuyendo en horizontes profundos al igual que el movimiento del agua.

Las características químicas indican un pH neutro, que aumenta con la profundidad llegando a ser ligeramente alcalino; según la CE1:5 y la CE es el suelo es no salino; aspecto corroborado por los valores de PSI y C.I.C. sin problemas de salinidad ni sodicidad.

Los tratamientos bajo riego presentaron un comportamiento similar respecto al crecimiento del cultivo de quinua, el T3 (solapamiento de 100%) y T2 (solapamiento de 85%) presentaron plantas con mayor altura, longitud de panoja, porcentaje de granos grandes y rendimiento.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue financiada por el Programa de Maestría en Ingeniería de Riego (2da Versión), gracias a la colaboración científica entre la Cooperación Interuniversitaria Flamenca (VLIR-KU Leuven) y la Universidad Mayor de San Andrés a través de la Facultad de Agronomía.

BIBLIOGRAFÍA

- Bonifacio, A., Vargas, A., y Aroni, G. 2003. Ficha técnica N° 6, Variedad "Quinua Jacha Grano". Fundación PROINPA. La Paz, Bolivia.
- Borda, A., 2011. Análisis de productividad y componentes del rendimiento de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en la comunidad Callapa-Altiplano Central. Tesis de Licenciatura. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 154 p.
- Condori, O. 2008. Evaluación participativa del riego deficitario y fertilización orgánica sobre el desarrollo y rendimiento de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el Altiplano Sur. Tesis de licenciatura. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 151 p.
- Copa, R. 2014. Propiedades hidrofísicas del suelo para implementar sistemas de riego en medio semiárido (Centro Rivera-Altiplano Central boliviano). Tesis de maestría. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 102 p.
- Del Castillo, C., Winkel, T., Mahy, G. y Bizoux, J.P., 2007. Genetic structure of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) from the Bolivian altiplano as revealed by RAPD markers. Genet Resour Crop Evol. 54: 897-905.

Del Castillo, C., Bosque, H. y Bonifacio, A., (Coord. Ed.). 2013. Manual técnico producción de la quinua en el Altiplano Boliviano. Documento técnico final en conmemoración al Año Internacional de la Quinua. Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. pp. 15-31.

García, M. 2003. Agroclimatic study and drought resistance analysis of quinoa for an irrigation strategy in the Bolivian Altiplano. Dissertations of Agriculture, Faculty of Applied Biological Sciences, K.U. Leuven, Belgium 556, 184 p.

García, M., Miranda, R. y Fajardo, H. s.f. Manual de manejo de la fertilidad de suelo bajo riego deficitario para el cultivo de la quinua en el Altiplano Boliviano. SUMAMAD – QUNIAGUA. La Paz, Bolivia. 123 p.

Geerts, S., García, M., Cusicanqui, J., Taboada, C., Miranda, R., Yucra, E., Raes, D. 2008. Revisión bibliográfica de los últimos avances en el conocimiento de la Quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). Proyecto QUINAGUA – VLIR-KULeuven – UMSA. Ediciones Alfa. 30 p.

Holzapfel, E., Pardo, X., Paz, V., Rodríguez, A., Orrego, X. y López, M., 2007. Análisis técnico-económico para selección de aspersores. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Agriambi). 11 (6): 557-563.

INE (Instituto Nacional de Estadística). 2015. Cuentas nacionales y estadísticas económicas. La Paz, Bolivia. Disponible en: <http://www.ine.gob.bo>. Consultado el 5 mayo 2015.

Mamani, A. 2007. Evaluación participativa y socioeconómica de la aplicación de riego en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en tres comunidades del municipio de Patacamaya. Tesis de licenciatura. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 108 p.

Mendoza, J. 2008. Estrategias de riego en tres épocas de siembra para el desarrollo de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el Altiplano Central. Tesis de licenciatura. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 109 p.

MMAyA-VRHR (Ministerio de Medio Ambiente y Agua-Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego). 2013. Inventario Nacional de Sistemas de Riego 2012. 1 ed. VRHR. Cochabamba, Bolivia. 38 p.

Ochoa, R. 2009. Diseños experimentales. La Paz, Bolivia. 299 p.

Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª Edición. Mundi-Prensa. 929 p.

Serrano, G. 2010. Ingeniería del riego tecnificado. Servicio de Ingeniería Múltiple de Agua y Riego Tecnificado (SIMART). La Paz, Bolivia.

Serrano, G., 2014. Ingeniería del riego tecnificado. 1 ed. UPEA – DICyT – IINEA. Artes Gráficas: Márquez Marca. La Paz, Bolivia.

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., Hill, M. 2004. Propiedades físicas del suelo. Universidad de La República, Fac.Agronomía-Dpto. Suelos y Aguas. Montevideo, Uruguay. 68 p.

Tarjuelo, M. 2005. El riego por aspersión y su tecnología. 3 ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España, 581 p.

Vallejos, P., Ayaviri, D. y Navarro, Z., 2011. Medio ambiente y producción de quinua-estrategias de adaptación a los impactos del cambio climático. PROSAMA – DANIDA-PIEB. La Paz, Bolivia. 241 p.

Vargas, M. 2014. Control de bajas temperaturas mediante el riego por aspersión fijo en el Altiplano Central de Bolivia. Tesis de maestría. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 124 p.

Villarroel, J. 1988. Manual práctico para la interpretación de análisis de suelos de laboratorio. AGRUCO Serie Técnica No. 10. UMSS. 33 p.

Artículo recibido en: 20 de marzo 2018

Aceptado en: 9 de junio 2018