

EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS CON FINES DE RIEGO EN LA MICROCUENCA KERAYA, MUNICIPIO DE CAIROMA

Evaluation of water resources for irrigation purposes in the Keraya micro-basin, municipality of Cairoma

Ronald Freddy Peralta Laura¹; Braulio H. Calle M.²

RESUMEN

El balance hídrico tiene como fin realizar una evaluación cuantitativa espacial y temporal a nivel medio de los recursos hídricos. Así también, la calidad del agua de riego está determinada por la composición y concentración de los diferentes elementos que pueda tener, ello determina el tipo de cultivo a sembrar y el tipo de manejo que debe darse al suelo. Los objetivos fueron determinar los parámetros físicos, realizar el balance hidrológico y analizar la calidad del agua de riego. La evaluación fue de la microcuenca Keraya, municipio de Cairoma del departamento de La Paz. La metodología consistió en la evaluación de las características físicas y topográficas, balance hídrico, análisis de la calidad de agua y su evaluación estadística. La densidad de drenaje es 0.8 cauces km⁻² en la microcuenca, el tiempo de concentración es 1.99 horas, la precipitación efectiva para el 2014 fue de 753.00 mm y para el 2015 de 451.69 mm con probabilidades de 72.73% y 81.82%, los meses con mayor cantidad de agua en la microcuenca y en sus redes de drenaje, son de septiembre a marzo y los meses con menor oferta son entre mayo y agosto, con presencia de heladas. El río Keraya proviene del deshielo de los glaciares de la cordillera Oriental y las precipitaciones mensuales de la cabecera de la cuenca, en total se oferta un volumen anual de 2473.14 m³. Los meses con almacenamiento de agua en el suelo son febrero y marzo, teniendo un déficit de humedad en los meses restantes. Los cultivos tienen una evapotranspiración de referencia mayor durante el mes de noviembre coincidiendo con el ciclo de desarrollo más alto de los cultivos. El agua de la microcuenca es apta para riego debido a que pertenece a la clase C1S1, el pH es ligeramente ácido en las cabeceras de la cuenca y ligeramente básica durante su trayecto aguas abajo.

Palabras clave: Recursos hídricos, balance hídrico, calidad del agua para riego.

ABSTRACT

The water balance aims to perform a spatial and temporal quantitative assessment of water resources. Likewise, the quality of irrigation water is determined by the composition and concentration of the different elements that may have, this determines the type of crop to be planted and the type of management that must be given to the soil. The objectives were to determine the physical parameters, perform the hydrological balance and analyze the quality of the irrigation water. The evaluation was of the Keraya micro-basin, municipality of Cairoma, Department of La Paz. The methodology consisted of the evaluation of the physical and topographic characteristics, water balance, water quality analysis and its statistical evaluation. The density of drainage is 0.8 km⁻² channels in the micro-basin, the concentration time is 1.99 hours, the effective precipitation for 2014 was 753.00 mm and for 2015 451.69 mm with probabilities of 72.73% and 81.82%, the months with more water in the microbasin and in its drainage networks, are from September to March and the months with the lowest supply are between May and August, with the presence of frost. The Keraya River comes from the melting of the glaciers of the Eastern mountain range and the monthly precipitations of the head of the basin, in total an annual volume of 2473.14 m³ is offered. The months with storage of water in the soil are February and March, having a deficit of humidity in the remaining months. The crops have a higher reference evapotranspiration during the month of November, coinciding with the highest development cycle of the crops. The water in the microbasin is suitable for irrigation because it belongs to the C1S1 class, the pH is slightly acidic in the headwaters of the basin and slightly basic during its downstream journey.

Keywords: Water resources, water balance, water quality for irrigation.

¹ Gerente General, Institución de Riegos en Municipios Productivos, Bolivia. ronit.fpl@gmail.com

² Técnico, Colegio de Ingenieros Agrónomos La Paz, Bolivia.

INTRODUCCIÓN

Bolivia pertenece a tres grandes cuencas hidrográficas: la cuenca del Amazonas, la cuenca del río de La Plata y la cuenca Endorreica o Cerrada del Altiplano (Ven, 2002). Para Londoño (2001), considerando la constancia de la escorrentía, los cursos de agua se pueden clasificar en:

- Perennes, que son corrientes permanentes, el nivel de agua subterránea mantiene una alimentación continua y no desciende debajo del lecho del río.
- Intermitentes, que son corrientes que escurren en estaciones de lluvia y se secan durante el verano, el nivel de agua subterránea se conserva por encima del lecho del río sólo en la estación lluviosa. En verano el escurrimiento cesa, ocurre solamente durante o inmediatamente después de las lluvias.
- Efímeros, existen apenas durante o inmediatamente después de los períodos de precipitación, sólo transportan escurrimiento superficial. El nivel de agua subterránea se encuentra siempre debajo del nivel inferior del lecho de la corriente; no hay, posibilidad de escurrimiento subterráneo.

Según Londoño (2001), es de interés analizar las características de las formas de la cuenca para relacionarlas con la susceptibilidad de tener mayor o menor peligro torrencial. El análisis de los rasgos de la superficie se puede realizar mediante morfometría, para hallar la cuantificación de diferentes rasgos entre superficies. El objetivo principal del balance hídrico es realizar una evaluación cuantitativa espacial y temporal a nivel medio de los recursos hídricos. Van Damme (2002) indica que en una cuenca hidrográfica la oferta de agua, compuesta por las precipitaciones y el escurrimiento aguas arriba, es en parte evaporada y evapotranspirada, el remanente escurre aguas abajo.

Mediante la lluvia, riego y ascenso capilar del agua subterránea en dirección a la zona radicular se aporta agua y se disminuye el agotamiento de la humedad en esta zona. Los procesos de evaporación, transpiración del cultivo y las pérdidas por percolación remueven el agua de la zona radicular, aumentando el agotamiento de la humedad del suelo (Allen et al. 2006).

Serrano (2010), menciona que la mayor parte de las aguas varían en su calidad, debido a la influencia de sustancias extrañas procedentes de las formaciones geológicas o como efecto de la aplicación de

fertilizantes y plaguicidas en la agricultura. Según Vásquez (2004), la calidad del agua de riego está determinada por la composición y concentración de los diferentes elementos que pueda tener, ya sea en solución o en suspensión. La calidad del agua de riego determina el tipo de cultivo a sembrar y el tipo de manejo que debe dárse al suelo.

Por tanto los objetivos de la investigación en la microcuenca Keraya fueron a) determinar los parámetros físicos, b) realizar el balance hidrológico y c) analizar la calidad del agua de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio

El estudio se realizó en la microcuenca Keraya, municipio de Cairoma, quinta sección municipal de la provincia Loayza del departamento de La Paz, se encuentra a una distancia de 266 km de la ciudad de La Paz. Geográficamente se encuentra a 67° 42' y 67° 26' de longitud oeste y entre los 16° 38' y 17° 20' de latitud sur, a una altitud media de 3500 m s.n.m. (PDM Cairoma, 2010).

Metodología

Características físicas y topográficas

Se calculó el coeficiente de compacidad, orden de los cursos de agua, elevación media de la microcuenca, rectángulo equivalente, pendiente media de la microcuenca, pendiente media del cauce, densidad de corrientes y tiempo de concentración. Se utilizó el modelo digital de elevación (DEM), mediante el software Arc GIS, se hizo un corte del área de estudio mediante la toma de los puntos de control tomados con el GPS.

Se delimitó la microcuenca mediante la identificación de los afluentes que pasan por el área de estudio, así también, se halló las curvas de nivel, área, perímetro y la longitud de los afluentes.

Para determinar los parámetros físicos, se utilizaron las Ecuaciones propuestas por Londoño (2001) que se muestran a continuación:

El parámetro físico de relieve fue determinado mediante la elevación media (Ecuación 1), pendiente media de la cuenca (Ecuación 2) y pendiente media del cauce

(Ecuación 3 y 4).

$$Elevación\ media = \frac{Cota\ mayor(m) + Cota\ menor(m)}{2} \quad (1)$$

$$Sc = \left(\frac{\sum li \cdot eq}{A} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Dónde: Sc = pendiente media de la cuenca (%); $\sum li$ = suma de todas las longitudes de las curvas de nivel (km); eq = equidistancia entre curvas (km); A = área de la cuenca (km²).

$$Pm = \frac{\sum DV}{DH} \cdot 100 \quad (3)$$

$$Pm = \frac{\sum \Delta hi}{\Delta li} \cdot 100 \quad (4)$$

Dónde: Pm = pendiente media del cauce (%); $\sum DV$ = suma de ladistancia vertical (m); DH = distancia horizontal (m); $\sum \Delta hi$ = desnivel (m); Δli = desnivel horizontal (m).

Los parámetros físicos de forma, fueron hallados calculando el rectángulo equivalente (Ecuación 5 y 6) y coeficiente de compacidad (Ecuación 7).

$$L_r = \frac{K_{co} \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_{co}} \right)^2} \right] \quad (5)$$

Dónde: L_r = largo del rectángulo (km); K_{co} = coeficiente de compacidad; A = área de la cuenca (km²).

$$a = \frac{K_{co} \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_{co}} \right)^2} \right] \quad (6)$$

Dónde: a = ancho del rectángulo (km).

$$K_{co} = 0.282 \cdot \frac{P}{\sqrt{(A)}} \quad (7)$$

Dónde: P = perímetro de la cuenca (km).

Los parámetros físicos de drenaje son determinados con el orden de los cursos de agua y el tiempo de concentración (Ecuación 8). El orden de los cursos de agua considera un cauce de primer orden como el que no tiene ningún tributario, el cauce de segundo orden como el que posee únicamente ramificaciones de primer orden, el cauce de tercer orden como el que tiene ramificaciones de primer y segundo orden, originado por la unión de dos cauces de orden dos.

$$Tc = \left(\frac{0.870 \cdot L^2}{H} \right)^{0.385} \quad (8)$$

Dónde: Tc = tiempo de concentración (h); L = longitud del cauce principal (km); H = diferencia de altura (m).

Balance hídrico

Se utilizó el programa ABRO 02 ver 3.1 para el análisis de los datos de precipitación total, para establecer el área bajo riego óptimo, se utilizaron las siguientes ecuaciones mencionadas por DGIAR (2015).

$$Efc = \frac{Q_{fp} + \sum Q_d}{Q_{ep}} \cdot 100 \quad (9)$$

Dónde: Efc = eficiencia de conducción (%); Q_{fp} = caudal que llega al final del canal principal; $\sum Q_d$ = suma de los caudales de distribución; Q_{ep} = caudal que entra al canal principal.

$$Efd = \frac{Q_{fd} + \sum Q_l}{Q_{el}} \cdot 100 \quad (10)$$

Dónde: Efd = eficiencia de distribución (%); Q_{fd} = caudal que llega al final del canal principal; $\sum Q_l$ = suma de caudales de los laterales; Q_{el} = caudal de agua que entra al canal lateral.

$$Efa = \frac{A1 \cdot Er1 + A2 \cdot Er2 + \dots + An \cdot Ern}{A1 + A2 + A3 \dots + An} \quad (11)$$

Dónde: Efa = eficiencia de aplicación (%); An = área de la parcela (m); Ern = eficiencia de riego en la parcela (%).

Debido a los elevados caudales de los principales canales del sistema de riego, el aforo fue por el método indicado por Vásquez (2004) utilizando la Ecuación 12.

$$Q = V \cdot Ac \quad (12)$$

Dónde: Q = caudal (m³ s⁻¹); V = velocidad media (m s⁻¹); Ac = área de la sección transversal del cauce (m²).

Las láminas de riego y evapotranspiración, comprenden a la evapotranspiración (Ecuación 13), lámina neta (ecuación 14) y bruta (Ecuación 15) de riego (Serrano, 2010).

$$ETc = Kc \cdot ET_o \quad (13)$$

Dónde: ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm día^{-1}); K_c = coeficiente del cultivo (adimensional); ET_o = evapotranspiración del cultivo de referencia (mm día^{-1}).

$$Z_n = UCC - PMP \cdot \frac{\varphi_{ap}}{\varphi_w} \cdot Pr \cdot f \quad (14)$$

Dónde: Z_n = lámina neta (mm), UCC = humedad a capacidad de campo (adimensional); PMP = humedad a punto de marchitez permanente (adimensional); φ_{ap} = densidad aparente (gr cm^{-3}); φ_w = densidad del agua (gr cm^{-3}); Pr = profundidad radicular (cm); f = factor de deflexión (adimensional).

Análisis de la calidad de aguas

Para el análisis de la calidad, se tomaron dos muestras, una del río Keraya, de la red principal de la cuenca del mismo nombre y de la represa de Choquecota, ubicada en la cumbre del municipio, cuyas aguas son utilizadas para el riego y el consumo humano.

La cantidad de sodio fue obtenida utilizando el indicador de la concentración relativa que es la relación de absorción de sodio (RAS), expresada y calculada con la Ecuación 15, propuesta por Gapón citado por Richards (1973).

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{(Ca-Mg)/2}} \quad (15)$$

Dónde: Na = sodio (meq L^{-1}); Ca = calcio (meq L^{-1}); Mg = magnesio (meq L^{-1}).

Análisis estadístico de la calidad de aguas

Fue para determinar la diferencia de las características del agua en el río Keraya y la represa Choquecota, el

análisis fue con el software INFOSTAT, en base al análisis de correlación, regresión lineal y análisis de varianza.

Para el análisis de correlación, fueron considerados los parámetros de la calidad de aguas, indicadores de riego agrícola y los problemas que tiene la microcuenca Keraya, se analizó si existe correlación perfecta negativa (-1) o positiva (1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características físicas y topográficas

Parámetros físicos de relieve

Se delimito un área de 104.92 km^2 que ocupa la microcuenca Keraya, el perímetro es 61.39 km , la cota más alta se encuentra al extremo sur este con una altitud de 4600 m s.n.m. y la cota más baja se ubica en el punto de aforo del río principal al extremo nor este con una elevación de 2000 m s.n.m.

El cauce principal de la cuenca tiene una longitud de 26.17 km con una pendiente de 10.61% , que difiere de la pendiente media de la cuenca, que es 55.0% con una elevación media de 3300 m s.n.m.

Parámetros físicos de forma

En el rectángulo equivalente, el área del polígono rectangular es 104917085.37 m^2 , con un ancho de 3880 m y largo de 27029 m . El resultado del coeficiente de compacidad es 1.69 , que según las categorías descritas para la clasificación, corresponde a la forma oval oblonga (Graveolius citado por Lodoño, 2001), este tipo de microcuencas tienen menor torrencialidad pues llega a tener buen drenaje por sus características y pendiente media que es muy escarpada (Figura 1).

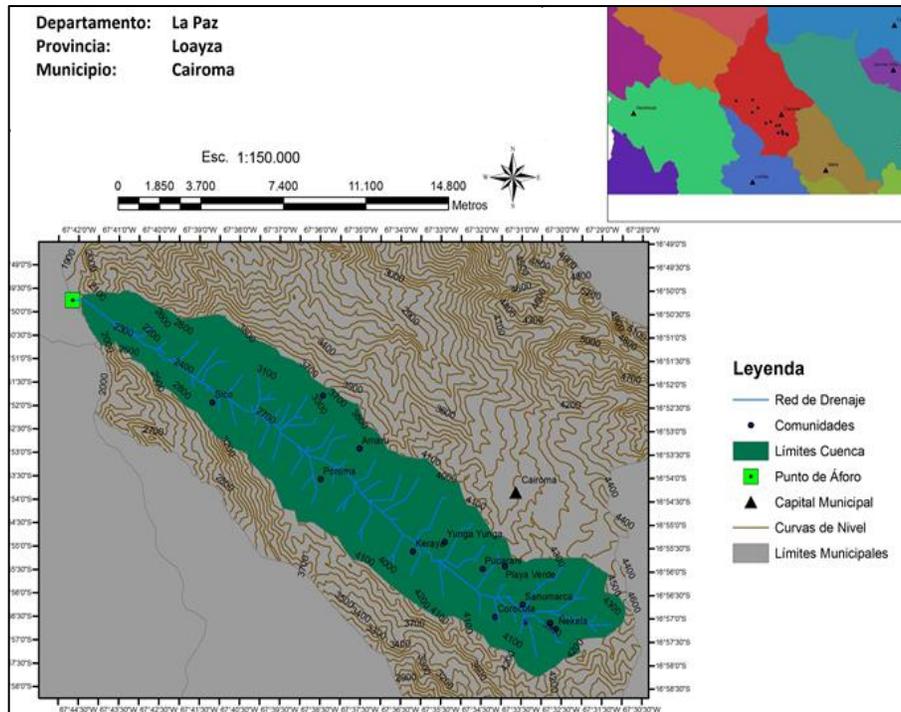


Figura 1. Delimitación de la microcuenca hidrológica.

Parámetros físicos de drenaje

El orden de la red de drenaje de la microcuenca es tres, lo que indica que es una microcuenca bien drenada, sin estancamiento de aguas, el orden de la red de drenaje uno tiene mayor número de ríos intermitentes, al igual que los de orden dos, es decir que solo están con cauce de agua al momento y poco tiempo después de las precipitaciones. Los cauces de orden tres están compuestos mayormente por el río principal, situados en las cotas más bajas y con los mayores caudales (Figura 2).

Con respecto a la densidad de drenaje, existe 0.8 cauces km⁻² en la microcuenca, exponiendo este resultado el excelente drenaje que tiene. El tiempo de concentración es de 1.99 horas, indicando que las gotas de agua que cae de las precipitaciones en la cuenca, tardan este tiempo en llegar desde el inicio del cauce principal hasta el final del río y por tanto de la cuenca hidrológica.

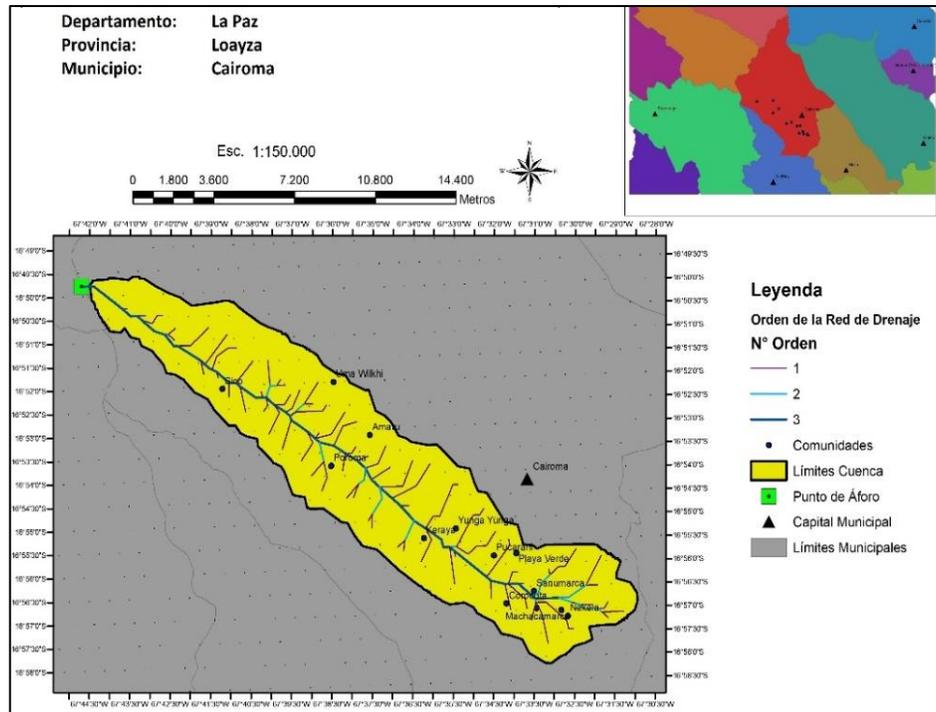


Figura 2. Orden de la red de drenaje de la microcuenca Keraya.

Balance hídrico de la cuenca hidrográfica

Oferta de agua

La precipitación efectiva para el año 2014 es de 753.00 mm y para el 2015 de 451.69 mm con probabilidades de 72.73% y 81.82%, se puede entender que se trata de una zona medianamente lluviosa, con agua que escurre de manera permanente a sus redes de drenaje (Tabla 1).

Tabla 1. Probabilidad de precipitación en la microcuenca Keraya.

Año	Precipitación (mm)	Probabilidad de precipitación (%)
2007	662.80	9.09
2008	1063.20	18.18
2009	772.90	27.27
2010	651.80	36.36
2011	650.40	45.45
2012	490.10	54.55
2013	570.20	63.64
2014	753.00	72.73
2015	451.69	81.82
2016	761.94	90.91

Fuente: Estación meteorológica de Luribay, Palca y Quime (SENAMHI, 2017).

En el mes de febrero se tiene la oferta de mayor volumen con 517.63 m³ equivalente a un caudal de 0.21 L s⁻¹ en su río principal, el mes de menor oferta es junio con 34.07 m³ equivalente al caudal de 0.01 L s⁻¹. Los meses con mayor cantidad de agua en la microcuenca y en sus redes de drenaje, son de septiembre a marzo y los meses con menor oferta son entre mayo y agosto, con presencia de heladas. El río Keraya, proviene de la cabecera de la cuenca, debido al deshielo de los glaciares de la cordillera Oriental y las precipitaciones, en total se oferta un volumen de 2473.14 m³ equivalente a 0.94 L s⁻¹ (Tabla 2).

Tabla 2. Oferta de agua en la microcuenca.

Mes	Oferta total (m ³)	Oferta real L s ⁻¹
Enero	509.07	0.19
Febrero	517.63	0.21
Marzo	266.74	0.10
Abril	90.52	0.03
Mayo	47.25	0.02
Junio	34.07	0.01
Julio	48.52	0.02
Agosto	52.88	0.02
Septiembre	122.14	0.05
Octubre	171.98	0.06
Noviembre	229.28	0.09
Diciembre	383.04	0.14
Oferta total	2473.14	0.94

Demanda de agua

Se tomó como el área regable a todas las superficies que se encuentran entre 0% y 50% de pendiente, representando una superficie total de 6778 ha, la superficie restante tiene pendientes muy altas, con

manejo agrícola más complicado y con riesgos para la conservación de suelos. Los cultivos principales en la región son papa (*Solanum tuberosum*), haba (*Vicia faba*), maíz choclo (*Zea mays*), en total son 120 ha en total de estos tres cultivos (Tabla 3).

Tabla 3. Área y eficiencias del sistema de riego en la microcuenca Keraya.

Cultivo	Mes de siembra	Área (ha)	Área total (ha)
Kc (haba verde)	Abril	30.00	120.00
Kc (papa, primera siembra)	Julio	40.00	
Kc (papa, segunda siembra)	Septiembre	40.00	
Kc (maíz choclo)	Octubre	10.00	
Eficiencia de captación (%)	75		
Eficiencia de conducción (%)	75		
Eficiencia de distribución (%)	75		
Eficiencia de aplicación (%)	60		

La demanda total varía acorde al ciclo de producción de 0.01 a 0.02 L s⁻¹, con un valor anual de 0.15 L s⁻¹, equivalencia a la que se debe llegar para cubrir con los

requerimientos de los cultivos de papa, haba y maíz. El caudal unitario debe ser durante todo el ciclo de 0.33 a 1.77 L s⁻¹ por ha y no se tiene área deficitaria (Tabla 4).

Tabla 4. Demanda de agua en la microcuenca Keraya.

Variables	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Anual
Zn (mm)	194.71	352.83	459.41	241.44	352.30	302.62	283.63	549.37	266.86	88.04	271.01	0.00	3272.23
Demanda total (L s ⁻¹)	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.15
Caudal unitario L s ⁻¹ por ha	0.75	1.32	1.77	0.90	1.32	1.17	1.06	1.77	1.00	0.33	1.12	0.00	12.50

La lámina requerida anual para el cultivo de haba es 363.69 mm, así también el Kc del cultivo para el mes de junio es 1.14 con una lámina requerida de

116.29 mm, siendo importante que se disponga de óptimas cantidades de agua (Tabla 5).

Tabla 5. Demanda de agua para el cultivo de haba verde.

Variables	Abr	May	Jun	Jul	Anual
Kc	0.43	0.79	1.14	1.03	
Eto (mm día ⁻¹)	50.46	89.31	116.29	108.80	364.86
Lámina requerida (mm)	49.29	89.31	116.29	108.80	363.69
Volúmen requerido (m ³)	3.67	6.64	8.65	8.09	27.05

El Kc para el cultivo de papa en la primera siembra fue 1.02 en septiembre, con una lámina requerida de 125.85 mm y un volumen requerido de 12.48 m³ (Tabla 6). Para la segunda siembra, para el mes de

noviembre, el Kc fue de 1.02, la lámina requerida fue 134.85 mm y el volumen requerido fue 13.37 m³ (Tabla 7).

Tabla 6. Demanda de agua del cultivo de papa en la primera siembra.

Variables	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Anual
Kc	0.24	0.74	1.02	0.75	0.48	
Eto (mm día ⁻¹)	25.35	89.17	128.79	106.46	73.07	422.84
Lámina requerida (mm)	25.35	89.17	125.85	97.50	52.64	390.51
Volúmen requerido (m ³)	2.51	8.84	12.48	9.67	5.22	38.72

Tabla 7. Demanda de agua del cultivo de papa en la segunda siembra.

Variables	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Anual
Kc	0.24	0.74	1.02	0.75	0.48	
Eto (mm día ⁻¹)	30.30	105.04	155.28	109.17	66.59	466.38
Lámina requerida (mm)	27.36	96.08	134.85	66.09	5.64	330.02
Volúmen requerido (m ³)	2.71	9.53	13.37	6.56	0.56	32.73

Para el cultivo de maíz, debido a que la siembra comienza en octubre, después de la segunda siembra de papa, el mayor Kc fue en enero con 1.08, la lámina

requerida fue de 88.87 y el volumen requerido fue de 2.20 m³ (Tabla 8).

Tabla 8. Demanda de agua del cultivo de maíz.

Variables	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Anual
Kc	0.24	0.41	0.80	1.08	1.03	
Eto (mm día ⁻¹)	34.07	62.42	116.44	149.82	123.66	486.41
Lámina requerida (mm)	25.11	41.99	73.37	88.87	68.60	297.94
Volúmen requerido (m ³)	0.62	1.04	1.82	2.20	1.70	7.38

Balace hídrico

En la Tabla 9 se muestra que los meses con almacenamiento de agua en el suelo son febrero y marzo, teniendo un déficit de humedad en los meses restantes. La evapotranspiración del cultivo es de 155.28 mm mes⁻¹ para noviembre coincidiendo con el ciclo de desarrollo más alto de los cultivos. La

evapotranspiración de referencia de los cultivos es mayor que la precipitación, a excepción de los meses de febrero y marzo, que es la época de verano con mayor cantidad de lluvias, asimismo, el exceso fue de 0.00 mm durante los meses evaluados.

Tabla 9. Balance hídrico de la microcuenca.

Mes	Precipitación (mm)	ETo (mm mes ⁻¹)	Déficit (mm)	Almacenamiento (mm)	ETc (mm mes ⁻¹)
Jul	7.27	105.63	98.36	0.00	0.00
Ago	2.13	120.51	118.38	0.00	0.00
Sep	13.34	126.27	112.93	0.00	30.30
Oct	26.05	141.94	115.89	0.00	105.04
Nov	51.87	152.24	100.37	0.00	155.28
Dic	122.17	145.55	23.38	0.00	109.17
Ene	103.56	138.72	35.16	0.00	66.59
Feb	169.80	120.06	0.00	49.74	0.00
Mar	134.09	131.01	0.00	3.08	0.00
Abr	50.39	117.36	13.21	0.00	0.00
May	31.13	113.05	81.92	0.00	0.00
Jun	8.04	102.01	93.97	0.00	0.00

Análisis de la calidad de aguas

El análisis de aguas del río Keraya, muestra que el pH es ligeramente básico de 7.92, esto debido principalmente a los sedimentos que recoge en su recorrido, provocando que el nivel de sales ascienda, la conductividad eléctrica es de 489.00 uS cm⁻¹, indicando que la salinidad es baja con una categoría C1 (Tabla 10).

Con respecto a la dureza, mostrada por el contenido de carbonatos, el agua es blanda, ideal para el riego. La relación de absorción de sodio, obtenido mediante los parámetros de sodio, calcio y magnesio, es 3.755 por debajo de 10, por lo tanto la cantidad de sales solubles para el agua es bajo, correspondiendo a la categoría de S1 (Tabla 10).

Tabla 10. Resultados del análisis de aguas del río Keraya.

Parámetros	Resultados	Conversión
pH	7.92	
Conductividad eléctrica	489.00 uS cm ⁻¹	0.489 dS m ⁻¹
Sodio	23.00 mg L ⁻¹	1.00 meq L ⁻¹
Potasio	3.90 mg L ⁻¹	
Calcio	37.19 mg L ⁻¹	1.86 meq L ⁻¹
Magnesio	20.87 mg L ⁻¹	1.72 meq L ⁻¹
Cloruros	5.32 mg L ⁻¹	
Carbonatos	0.00 mg L ⁻¹	
Bicarbonatos	245.99 mg L ⁻¹	
Sulfatos	14.93 mg L ⁻¹	
Sólidos suspendidos	4.20 mg L ⁻¹	
Sólidos totales	362.78 mg L ⁻¹	
Sólidos disueltos	358.25 mg L ⁻¹	
Boro	0.12 mg L ⁻¹	
Relación de absorción de Sodio (RAS)		3.755

El resultado del análisis de agua de la represa Choquecota (Tabla 11), indica que el pH es ligeramente ácido con 6.48 esto debido a que primero recoge sólidos de la parte alta, donde el suelo es ácido, por ser reservorio natural de agua, haciendo que el nivel de sales baje debido a un lavado constante de los mismos, esto también es indicado por la conductividad eléctrica que muestra un resultado de 78.40 uS cm⁻¹, esto muestra que la salinidad es muy baja ingresando a la categoría C1.

Con relación a la dureza, expuesta por el contenido de carbonatos, muestra visiblemente que el agua es muy

blanda, ideal para el riego. La relación de absorción de sodio es 0.088, por debajo de 10, indicando que pertenece a la categoría de S1 (Tabla 11).

Tabla 11. Resultados del análisis de aguas de la represa Choquecota.

Parámetros	Resultados	Conversión
pH	6.48	
Conductividad eléctrica	78.40 uS cm ⁻¹	0.0784 dS m ⁻¹
Sodio	0.90 mg L ⁻¹	0.0391 meq L ⁻¹
Potasio	0.60 mg L ⁻¹	
Calcio	9.75 mg L ⁻¹	0.4875 meq L ⁻¹
Magnesio	1.13 mg L ⁻¹	0.093 meq L ⁻¹
Cloruros	0.48 mg L ⁻¹	
Carbonatos	0.00 mg L ⁻¹	
Bicarbonatos	13.31 mg L ⁻¹	
Sulfatos	17.78 mg L ⁻¹	
Sólidos suspendidos	2.40 mg L ⁻¹	
Sólidos totales	50.17 mg L ⁻¹	
Sólidos disueltos	47.77 mg L ⁻¹	
Boro	0.23 mg L ⁻¹	
Relación de Absorción de Sodio (RAS)		0.088

Análisis estadístico de la calidad de aguas

Existe correlación positiva entre los parámetros de la calidad de aguas, a excepción de los sulfatos y el boro, que indica la influencia en la contaminación del agua, también presenta baja correlación con la cantidad de carbonatos, provocando baja influencia con la dureza del agua de riego.

Existe alta correlación entre los sulfatos y el boro, en el agua de la represa Choquecota y la cuenca Keraya, concentran estos compuestos desde sus cabeceras, mostrando que el material edáfico lo contiene en buenas cantidades.

Otro grupo hallado en la correlación, son los sólidos suspendidos, disueltos y totales con las variables de la conductividad eléctrica, sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruros, carbonatos y bicarbonatos, indicando que la mayoría de los parámetros que hacen al suelo apto para riego, se encuentren presentes en los sedimentos de la zona, por lo tanto es importante la implementación de un manejo integrado de cuencas, con la finalidad de evitar la pérdida de suelos, que por su alta pendiente hacen que los sedimentos se acumulen en los reservorios naturales de agua.

El principal elemento que se debe evitar en las fuentes de agua para riego es el sodio, que junto al calcio y magnesio hacen que la adsorción del suelo y agua aumente significativamente, reduciendo la humedad a en las zonas cultivables de la microcuenca.

La Tabla 12 muestra diferencias altamente significativas para la represa Choquecota, mostrando la valides del método utilizado para la predicción.

Tabla 12. Análisis de varianza para la represa Choquecota.

FV	GL	SC	CM	Fc	Prob > 0.05	Signif.
Modelo	1	354988.07	354988.07	111.30	<0.0001	**
Represa Choquecota	1	354988.07	354988.07	111.30	<0.0001	**
Error	13	41462.37	3189.41			
Total	14	396450.44				

FV = fuentes de variación; GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = cuadrados medios; Fc = F calculado; Prob. = probabilidad; Signif = significancia; ** = altamente significativo.

CONCLUSIONES

La principal fuente de agua para la microcuenca Keraya es la represa Choquecota, cuyo cauce principal es permanente durante todo el año, las vertientes son estacionales y tienen mayor importancia para los agricultores en época de lluvias con mayor caudal que en época seca.

El balance hídrico de los cultivos, suelos y precipitaciones ocurridas dio a conocer que en los meses de febrero y marzo se cubre las necesidades hídricas de los cultivos, con exceso de agua en el suelo, en los meses restantes existe un déficit de humedad en el suelo que es cubierto por el riego agrícola. El agua de la microcuenca es apta para riego debido a que pertenece a la clase C1S1, el pH es ligeramente ácido en las cabeceras de la cuenca y ligeramente básica durante su trayecto aguas abajo.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudios FAO: Riegos y Drenaje 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. pp 1-18.

Dirección General de Infraestructura Agraria y Riego (DGIAR). (2015). Manual de eficiencia para sistemas de riego. Ministerio de Agricultura y Riego. Lima, Perú. 54 p. de riego. Ministerio de Agricultura y Riego. Lima, Perú. 54 p.

Londoño, Carlos. 2001. Cuencas hidrográficas, bases conceptuales, caracterización, planificación y administración. Universidad de Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal, Departamento de Ingeniería. Ibagué, Colombia. 359 p.

PDM Cairoma. 2010. Plan de desarrollo municipal del gobierno autónomo municipal de Cairoma. La Paz, Bolivia. 546 p.

Richards, L. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual 60. Limusa. México, D. F.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). 2017. Datos climáticos de la estación Luribay, Palca y Quime. La Paz, Bolivia.

Serrano, G. 2010. Ingeniería del riego y drenaje. La Paz, Bolivia. 246 p.

Van Damme, P. 2002. Disponibilidad, uso y calidad de los recursos hídricos en Bolivia. Cumbre Mundial sobre el Desarrollo sostenible, Johannesburgo.

Vásquez, V. 2004. Manejo de cuenca Alto andinas. Universidad Nacional Agraria la Molina. Perú.

Ven, C. 2002. Hidrología aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia. 350 p.

Artículo recibido en: 29 de agosto 2017

Aceptado en: 20 de septiembre 2017