



Eficiencias en el sistema de riego Tumbaco, Ecuador

Efficiencies in the Tumbaco irrigation system, Ecuador

Randon Ortiz Calle^{1*}, Jaime Pazmiño Mayorga¹, Maritza Chile Asimbaya¹

¹Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador, Quito 17052, Ecuador. Teléfono: 0989962633.

*Correspondencia: rsortiz@uce.edu.ec

Rec.: 29.09.2020 Acept.: 22.02.2021

Publicado el 30 de junio de 2021

Resumen

Altas eficiencias en sistemas de riego son muy importantes para optimizar el uso del agua y mejorar la producción agrícola. Esta investigación se realizó en el sistema de riego Tumbaco, ubicado en la provincia de Pichincha, Ecuador, y tuvo como objetivo determinar las eficiencias de: conducción, distribución, aplicación, sistema y global. Los resultados muestran que: i) la eficiencia de conducción en la red de canales es del 78.82% (regular); ii) la eficiencia de distribución del 37.95% (pobre); iii) la eficiencia de aplicación del 60.72% (buena); iv) la eficiencia del sistema de riego del 47.86% (regular), y v) la eficiencia global del 18.17% (pobre). En conclusión, la eficiencia del sistema fue regular y la eficiencia global del sistema pobre, debido a que los tiempos de riego asignados por la junta de regantes no se ajustan a los caudales reales que se entregan a los usuarios y a las necesidades hídricas de los cultivos, creando inequidad en la distribución del agua, conflictos entre usuarios, así como, sobre y sub irrigación.

Palabras clave: Eficiencia de conducción, eficiencia de distribución, red de canales, unidad terciaria, entrega de agua.

Abstract

Higher efficiencies in irrigation systems are very important to optimize the usage of water to enhance the agricultural production. This research was carried out in the Tumbaco irrigation system, located in the province of Pichincha, Ecuador, and the objective was to determine the following efficiencies: conveyance, distribution, application, system and global. The results showed: i) the conveyance efficiency in the canal irrigation network is 78.82% (regular); ii) the distribution efficiency is 37.95% (poor), iii) the application efficiency is 60.72% (good); iv) the efficiency of the irrigation system is 47.86% (regular) and v) the global efficiency is about 18.17% (poor). In conclusion, the efficiency of the system is regular and the global efficiency poor, affected by the timing of the water delivery assigned by the water user association, which does not take into account the real discharge delivered to the users and the crop water requirements, creating inequity, conflicts between users as well as over and under irrigation.

Keywords: Conveyance efficiency, distribution efficiency, canal irrigation network, tertiary unit, turnouts.

Introducción

Uno de los objetivos principales de la agricultura sostenible es la optimización del uso del agua en la producción de cultivos, considerando que la agricultura bajo riego es el mayor consumidor de agua dulce. En este contexto, los esfuerzos se concentran en mejorar las eficiencias de conducción, distribución y aplicación (Pretty *et al.*, 2018). La eficiencia de un sistema de riego es el resultado de la operación de la infraestructura hidráulica bajo normas definidas por la junta de regantes, y por el aporte de los usuarios en el manejo del agua a nivel de parcela (Hamdy, 2007). La eficiencia del sistema está integrada por las eficiencias de conducción y aplicación, y la eficiencia del proyecto, por las eficiencias del sistema y de distribución (Bos & Nugreten, 1990).

La eficiencia de conducción se basa en la pérdida de agua en los canales primarios, secundarios y terciarios, las cuales se deben a la evaporación directa desde el espejo del agua, filtraciones naturales en el cauce, filtraciones por crecimiento de raíces, fugas a través de compuertas en mal estado, desbordamientos, tomas clandestinas, falta de operación de los canales. La eficiencia de distribución permite conocer la forma de distribución o regulación de los caudales desde los canales principales a los secundarios y desde los secundarios hasta las unidades terciarias, es un índice que interrelaciona el grado de servicio de la junta de regantes y la operación de la infraestructura hidráulica. La eficiencia de aplicación consiste en determinar el volumen de agua que debe entregarse al agricultor para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos con el volumen de agua real entregado, dependiendo estas variables de la distribución de caudales y de los tiempos de entrega asignados por la junta de regantes (Hamdy, 2007; Irmak *et al.*, 2011). Otros factores como tipo de suelos, clima, diseño del sistema y capacidad institucional afectan a la eficiencia global del sistema (Mirjat *et al.*, 2017).

Una baja eficiencia de distribución en la unidad terciaria genera inequidad en el reparto del agua (pérdida de los derechos de los usuarios), disputas entre usuarios, robo del agua, presencia de sobre o sub irrigación en la parcela, rendimientos bajos de los cultivos, así como falta de colaboración y compromiso por parte de los usuarios para cumplir tareas asignadas por la junta de regantes (Hofwegen, 2002; Hamdy, 2007; Boelens, 2008). La sobre irrigación produce lixiviación de nutrientes, saturación del suelo y pérdida de agua por infiltraciones más allá de la profundidad radicular, reduciendo el rendimiento de los cultivos, y la sub irrigación, al no cubrir la demanda de agua de los cultivos causa un estrés hídrico en las plantas,

afectando al rendimiento y calidad de los frutos (Burt *et al.*, 1997; Irmak *et al.*, 2011).

A partir del año 2000, en Ecuador se inició el proceso de transferencia de los sistemas de riego desde el estado hacia las juntas de regantes (usuarios), conceptualizadas para operar compuertas y cobro de tarifas, faltando en su estructura departamentos de ingeniería civil, agrícola, agronomía, jurídico, comercio, investigación para asegurar un buen servicio y operación del sistema (Ankum, 2002; Hofwegen, 2002; Hamdy, 2007). La junta de regantes del sistema de riego Tumbaco es la encargada de asignar los turnos de riego, operar las compuertas de entrada a los canales secundarios, y mantener los canales principales y secundarios, mientras que los usuarios son los responsables de la operación y mantenimiento de la infraestructura hidráulica en las unidades terciarias (Chile, 2020).

El sistema de riego Tumbaco cuenta con una historia muy interesante en su proceso de construcción. En 1909, los agricultores de la zona empezaron a construir el canal en base a mingas y con conocimientos ancestrales, construyeron canales y túneles. En 1944, el estado a través de la Caja Nacional de Riego continuó con la construcción que habían empezado los agricultores y en 1990, el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos concluyó con su construcción, para irrigar aproximadamente 2300 hectáreas, con un caudal asignado de $1.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para dar servicio a 1 300 agricultores (tamaño promedio de la parcela de 1.0 ha). El caudal de entrega en parcela en consenso con los usuarios se definió en 10.0 l s^{-1} . Las estructuras hidráulicas no permiten regular los caudales del canal principal a los secundarios y desde éstos hasta las unidades terciarias, y la vida útil de la infraestructura ha terminado su ciclo de vida útil. En el año 2017, el área agrícola fue de 961.57 hectáreas (tamaño promedio de la parcela de 0.32 ha), reducida por el crecimiento urbano. Hoy en día, el canal secundario Chichipata mantiene la mayor área agrícola del sistema y las tierras son cultivadas por indígenas como los “Quitus Caras” y los “Aucas”.

En el sistema de riego Tumbaco, se determinó una eficiencia de conducción del 70.4% en el canal secundario “La Viña” (Lizano & Calvache, 2005); a nivel nacional, en varios proyectos se han reportado eficiencias de conducción entre 30 y 60% en canales no revestidos y entre 70 y 90% en canales revestidos (Calvache, 2009); alrededor del mundo, en un estudio realizado en 91 proyectos de riego, se reportaron eficiencias de conducción desde el 56.7% al 88.8%, eficiencias de distribución del 65.0% al 88.6%, eficiencias de aplicación del 40.2% al 66.1%, eficiencias del sistema del 38.5% al 75.6%,

y eficiencias del proyecto del 20.2 al 38.8% (Bos & Nugreten, 1990); en el mediterráneo, se encontraron eficiencias del proyecto entre el 30 y 65%, eficiencias de conducción y distribución del 60% para canales operados manualmente y eficiencias de aplicación del 50% (Hamdy, 2007).

Con estos antecedentes, el objetivo del estudio consistió en determinar las eficiencias de conducción, distribución, aplicación, sistema y global en el sistema de riego Tumbaco para conocer el rol de la junta de regantes y de los usuarios en la operación de la infraestructura hidráulica, y determinar la presencia de sobre o sub irrigación a nivel de parcela del agricultor.

Materiales y métodos

Ubicación del estudio

La presente investigación se desarrolló en el sistema de riego Tumbaco, ubicado en el Valle interandino de Tumbaco (cuenca alta del río Esmeraldas), provincia de Pichincha (Ecuador), a una altura promedio de 2400 msnm, a 0°13'46"S y 78° 22'0"O (Figura 1). El Valle de Tumbaco se caracteriza por tener dos estaciones

climáticas bien diferenciadas, la lluviosa de octubre a mayo y seca de junio a septiembre; la humedad relativa máxima mensual se registra en el mes de abril con el 79.20% (mes más lluvioso) y la mínima en el mes de agosto con el 65.70% (mes más seco); la temperatura máxima varía entre 25.4 °C y 26.6 °C; la temperatura mínima varía entre 4.7 °C y 7.2 °C; la velocidad del viento (V) máxima se registra en el mes de agosto con 1.70 m s⁻¹ y la mínima en el mes de abril con 0.70 m s⁻¹; el mes con el máximo número de horas de luz es agosto con 7.40 h d⁻¹ y el mes con el menor número de horas de luz es abril con 4.3 h d⁻¹ (Ortiz & Chile, 2020).

El canal principal tiene una longitud de 21.76 km; el canal secundario, 88.41 km; el canal terciario, 178.69 km; área agrícola, 1055.6 ha; unidades terciarias, 132; usuarios, 2500 (Cuadro 1).

Los canales están compuestos por secciones no revestidas (40.13 km), revestidas (19.46 km), revestidas y embauladas (43.80 km), tramos con tuberías (16.34 km), y túneles (8.12 km, Cuadro 2).

Los datos de tiempo de riego asignados a los usuarios fueron proporcionados por la junta de regantes y se realizaron algunas encuestas a los usuarios.

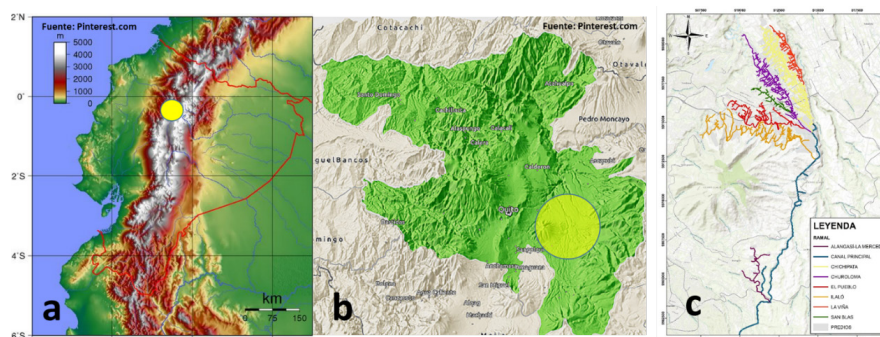


Figura 1. Ubicación del sistema de riego Tumbaco: Ecuador (a), provincia de Pichincha (b), Red de canales del sistema de riego Tumbaco (c).

Cuadro 1. Información del sistema de riego Tumbaco

Ramal	Superficie regada (ha)	N. Usuarios	No. Unidades Terciarias	Secundario (km)	Terciario (km)
Alangasí – La Merced	10.87	36	2	9.49	13.15
Ilaló	231.70	464	18	13.9	33.90
Churolooma	153.98	450	30	6.95	32.64
El Pueblo	145.06	198	13	8.11	18.45
La Viña	88.38	246	13	4.36	8.76
San Blas	31.16	109	13	3.10	6.66
Chichipata	300.42	997	43	8.63	65.13
Total	1055.6	2 500.0	132	88.41	178.69

Fuente: Montufar (2017)

Cuadro 2. Composición hidráulica de los canales secundarios

Ramal	No revestido (m)	Revestido (m)	Embaulado (m)	Tubería (m)	Túnel (m)
Alangasí – La Merced	4063.10	2283.61	412.73	2149.88	582.28
Ilaló	20453.53	8603.14	608.29	10734.90	7429.88
Churolooma	3202.10	2736.14	560.92	456.67	-
El Pueblo	4867.19	1363.00	523.43	1294.09	112.34
La Viña	963.61	1749.85	976.73	673.23	-
San Blas	589.50	1314.02	467.67	623.27	-
Chichipata	5988.09	1409.92	830.45	404.32	-
Total (m)	40127.12	19459.68	4380.22	16336.36	8124.50

Fuente: Montufar (2017)

Metodología

Eficiencia de conducción

La eficiencia de conducción se determinó en función de caudales medidos en secciones donde no existe derivación o ingreso de caudales. En el canal principal el caudal se midió al inicio y al final del tramo principal; en los canales secundarios, en tres tramos (inicio, mitad y final), y en canales terciarios, en el tramo existente entre dos tomas consecutivas de entrega a los usuarios. La medición de caudales se realizó con el medidor Parshall en canales principales y secundarios, y con un vertedero de cresta delgada en los canales terciarios. Un tramo es una longitud de canal, en el cual no existen derivaciones ni ingreso de caudal. La medición de los caudales se realizó en las estaciones de riego de los periodos 2018 – 2019.

$$Efc_{cp} = \frac{Qf}{Qi} \times 100 \quad (1)$$

Dónde: Efc_{cp} , es la eficiencia de conducción en el canal principal (%); Qf , es el caudal medido al final del tramo ($l\ s^{-1}$); Qi , es el caudal medido al inicio del tramo ($l\ s^{-1}$).

$$Efc = \frac{Efc_{cp} \times L_{cp} + Efc_{cs} \times L_{cs} + Efc_{ct} \times L_{ct}}{L_{cp} + L_{cs} + L_{ct}} \quad (2)$$

Dónde: Efc , es la eficiencia de conducción en la red de canales del sistema de riego (%); Efc_{cp} , eficiencia de conducción en el canal principal (%); Efc_{cs} , eficiencia de conducción en el canal secundario (%); Efc_{ct} , eficiencia de conducción en el canal terciario (%); L_{cp} , longitud del canal principal (m); L_{cs} , longitud del canal secundario (m), y L_{ct} , longitud del canal terciario (m).

Eficiencia de distribución

La eficiencia de distribución se midió en una

unidad terciaria de cada canal secundario, cada unidad se escogió en mutuo acuerdo con la junta de regantes, y se determinó con base en la metodología desarrollada por Christiansen (Burt *et al.*, 1997; Irmak *et al.*, 2011), la cual se determina en función del cociente entre el promedio del 25% de los valores de lámina más bajas y el promedio de las láminas aplicadas.

$$Efd' = \frac{La_{25\%}}{Lap} \times 100 \quad (3)$$

Dónde: Efd' , es la eficiencia de distribución (%); $La_{25\%}$, es la lámina promedio del 25% de los valores más bajos (mm); Lap , es el promedio de las láminas de agua entregadas a los usuarios en una unidad terciaria (mm).

La lámina de agua entregada a los usuarios se determinó en función del caudal medido a la entrada de cada parcela y del tiempo de riego asignado por la junta de regantes.

$$La = \frac{3600 \times Qp \times T}{S} \quad (4)$$

Dónde: La , es la lámina de agua entregada al usuario (mm); Qp , es el caudal medido a la entrada de la parcela del agricultor ($l\ s^{-1}$); T , es el tiempo de entrega del agua asignado por la junta (horas), y S , es el área de la parcela cultivada (m^2).

$$Efd = \frac{Efd'_1 \times Sc_1 + Efd'_2 \times Sc_2 + \dots + Efd'_n \times Sc_n}{Sp} \quad (5)$$

Dónde: Efd , es la eficiencia de distribución ponderada (%); Sc_1 ; es el área de comando secundaria correspondiente al área servida por cada canal secundario (ha); Sp , es la superficie total del proyecto (ha).

Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación se estimó con base en la metodología propuesta por Bos & Nugteren (1990), considerando la lámina de agua entregada en la unidad terciaria y la lámina correspondiente a las necesidades hídricas de los cultivos.

$$Efa' = \frac{LT}{La} \times 100 \quad (6)$$

Dónde: Efa', es la eficiencia de aplicación (%); LT, es la lámina total según las necesidades hídricas de los cultivos (mm).

Las necesidades de agua de los cultivos se determinaron en forma diaria, para esto se utilizó la serie climática de datos (30 años) para la estación climática La Tola. La evapotranspiración de referencia se determinó por el método del tanque evaporímetro y el coeficiente del tanque fue 0.72 (Ortiz *et al.*, 2018). La precipitación efectiva se determinó por el método de la FAO (Dastane, 1974).

$$Efa = \frac{Efa'_1 \times Sc_1 + Efa'_2 \times Sc_2 + \dots + Efa'_n \times Sc_n}{Sp} \quad (7)$$

Donde: Efa, es la eficiencia de aplicación en el sistema de riego (%).

Eficiencia en el sistema de riego

La eficiencia en el sistema se determinó en función de la eficiencia de conducción y de aplicación (Bos & Nugteren, 1990).

$$Efs = \frac{Efc \times Efa}{100} \quad (8)$$

Dónde: Efs, es la eficiencia del sistema de riego (%).

Eficiencia global incluyendo la operación del sistema

La eficiencia global (Cuadro 3) se determinó en función de la eficiencia del sistema y de distribución (Bos & Nugteren, 1990; Irmak *et al.*, 2011).

$$Efp = \frac{Efc \times Efd \times Efa}{10000} \quad (9)$$

Dónde: Efp, es la eficiencia global en el sistema de riego (%).

Sobre o sub irrigación

Sobre irrigación (SI) se definió para láminas de agua aplicadas mayores a 1.05*LT y sub irrigación (SUI) para láminas de agua aplicadas menores a 0.95*LT. La lámina de agua para cubrir las necesidades de agua (NHC) varían entre 0.95*LT y 1.05*LT, 10% de variación, además, para los datos de las láminas totales entregadas a los usuarios se determinó el coeficiente de variación (Burt *et al.*, 1997).

Resultados

La máxima necesidad hídrica diaria se presentó en el mes de agosto, con un valor de 4.28 mm día⁻¹ (Figura 2). Para una frecuencia de riego de siete días y una eficiencia de aplicación del 50%, la lámina total semanal (LT) a aplicarse en el período de máxima demanda fue de 60 mm, equivalente a 600 m³ h⁻¹ (Ortiz & Chile, 2020).

El caudal medido a la salida del desarenador de la captación en el río Guangal fue de 1550.0 l s⁻¹; Alangasí, 74.97 l s⁻¹; Ilaló, 624.05 l s⁻¹; Churolooma, 258.25 l s⁻¹; El Pueblo, 322.0 l s⁻¹; San Blas, 50.52 l s⁻¹; La Viña, 240.0 l s⁻¹, y canal Chichipata, 237.62 l s⁻¹. El caudal de ingreso a los diferentes canales fue de 1447.41 l s⁻¹. La diferencia de caudales entre el de entrada al sistema y los distribuidos a los ramales 102.59 l s⁻¹.

Asumiendo una dotación de riego de 1.0 l s⁻¹ ha⁻¹, la distribución de caudales según el área de riego (Qr) para el canal secundario Alangasí debería ser de 10.87 l s⁻¹, siendo el caudal medido de (Qa) 74.97 l s⁻¹, con un exceso de 589.7% (Figura 3). Ilaló: Qr, 231.7 l s⁻¹; Qa, 264.05 l s⁻¹ (+14.0%). Churolooma: Qr, 153.98 l s⁻¹; Qa, 258.25 l s⁻¹ (+67.7%). El Pueblo: Qr, 145.06 l s⁻¹; Qa, 322.0 l s⁻¹ (+122.0%). San Blas: Qr, 31.16 l s⁻¹; Qa,

Cuadro 3. Clasificación de las eficiencias en un sistema de riego

Efp (%)	Efs (%)	Efc (%)	Efd (%)	Efa (%)	Clasificación
> 38.8	> 75.6	> 88.8	> 88.6	> 66.1	Muy buena
29.6 – 38.7	57.1 – 75.5	79.1 – 88.7	80.1 – 88.5	52.1 – 66.0	Buena
20.3 – 29.5	38.6 – 57.0	56.8 – 79.0	65.1 – 80.0	40.3 – 52.0	Regular
< 20.2	< 38.5	< 56.7	< 65.0	< 40.2	Pobre

Efp, eficiencia del proyecto; Efs, eficiencia del sistema de riego; Efc, eficiencia de conducción en canales; Efd, eficiencia de distribución; Efa, eficiencia de aplicación.

Fuente: Bos & Nugteren (1990)

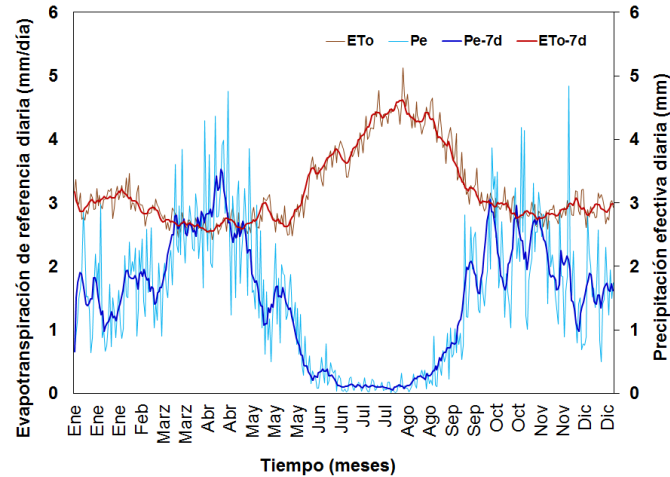


Figura 2. Evapotranspiración de referencia y precipitación para la estación La Tola. Pe-7d y ETo-7d: precipitación y evapotranspiración promedio de 7 días consecutivos.

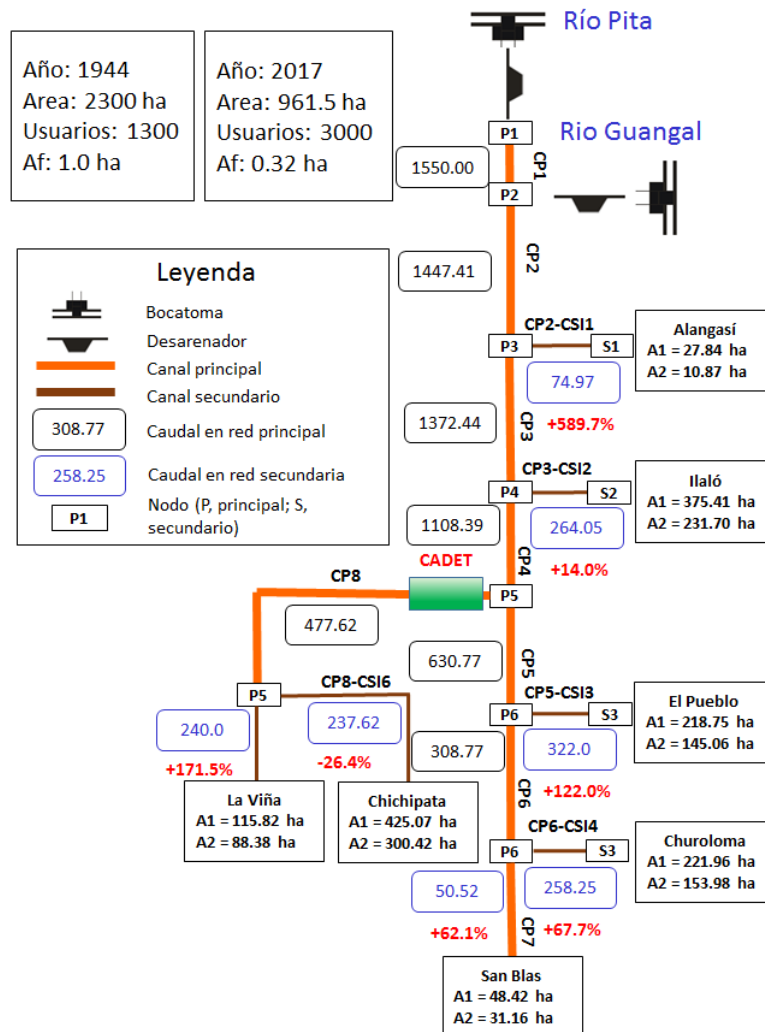


Figura 3. Diagrama unifilar del sistema de riego Tumbaco

50.52 l s⁻¹ (+62.1%). La Viña: Qr, 88.38 l s⁻¹; Qa, 240.0 l s⁻¹ (+171.5%). Chichipata: Qr, 300.42 l s⁻¹; Qa, 237.67 l s⁻¹ (-26.4%). Con base al área irrigada actualmente, el caudal de 962.0 l s⁻¹ (0.96 m³ s⁻¹) debería regularse en la captación del río Guangal.

En la unidad terciaria del canal Alangasí, la pérdida de caudal entre el óvalo (toma de entrada) y el agricultor más alejado fue de 4.67 l s⁻¹ (82.70%); Ilaló, 4.25 l s⁻¹ (46.35%); Churolooma, 6.9 l s⁻¹ (75.82%); El Pueblo, 1.11 l s⁻¹ (29.29%); San Blas, 2.16 l s⁻¹ (42.11%); La Viña, 6.9 l s⁻¹ (58.97%), y Chichipata, 2.13 l s⁻¹ (63.58%, Tabla 4).

La eficiencia de conducción en el canal principal fue muy buena. En los canales secundarios: Alangasí, muy buena; Ilaló, buena; Churolooma, muy buena; El Pueblo, muy buena; San Blas, buena; La Viña, buena, y en el canal Chichipata, muy buena. La eficiencia de conducción ponderada en los canales secundarios fue muy buena. La eficiencia de conducción en los canales terciarios fue: Alangasí, regular; Ilaló, regular; Churolooma, regular; El Pueblo, muy buena; San Blas, regular; La Viña, regular, y en el canal Chichipata regular. La eficiencia de conducción ponderada en los canales terciarios fue regular (Tabla 4).

La eficiencia de distribución del agua de riego en las unidades terciarias fue: Alangasí: pobre, con una diferencia entre las láminas aplicadas (DI) de 96 mm, y un coeficiente de variación (CV) del 62.41%. Ilaló: regular, DI de 154.4 mm y CV del 51.41%. Churolooma: pobre, DI de 149.5 mm y CV del 53.15%. El Pueblo: pobre, DI, 168.8 mm y CV del 66.37%. San Blas: pobre, DI, 127.6 mm y CV del 80.13%. La Viña: pobre por, DI, 383.3 mm y CV del 86.55%. Chichipata: pobre DI, 64.2 mm y CV del 35.13%. La eficiencia de distribución ponderada fue del 37.95% (pobre, Tabla 4).

La eficiencia de aplicación en las unidades terciarias fue: Alangasí, muy buena; Ilaló, regular; Churolooma, buena; El Pueblo, muy buena; San Blas, muy buena; La Viña, regular, y Chichipata, muy buena. La eficiencia de aplicación ponderada fue del 60.72% (buena, Tabla 4).

En resumen, la eficiencia de conducción en el sistema de riego Tumbaco fue del 78.82% (regular); la eficiencia de aplicación del 60.72% (buena); la eficiencia de distribución del 37.95% (pobre); la eficiencia del sistema de riego del 47.86% (regular) y la eficiencia del proyecto del 18.17% (pobre). Los resultados encontrados son similares con los reportados por Lizano & Calvache (2005) en el ramal La Viña del sistema de riego Tumbaco; Calvache (2009), en varias regiones de los andes ecuatorianos; Hamdy (2007), en regiones del mediterráneo, y Bos & Nugreten (1990), en varios proyectos de riego ubicados en diversas

latitudes del planeta.

Considerando una lámina total de 60 mm (rango entre 57 y 63 mm, 10% de variación), en el canal secundario Alangasí, el 7.1% de agricultores recibieron la cantidad requerida (NHC); Ilaló, 10%; Churolooma, El Pueblo, San Blas y La Viña, 0%; Chichipata, 22.2% (Tabla 4). A nivel del proyecto, 587.63 ha (61.1%) presentaron sobre irrigación, 283.27 ha (29.4%) sub irrigación y tan solo 90.6 ha (9.5%) recibieron la cantidad de agua necesaria para cubrir la demanda de agua de los cultivos.

Discusión

El sistema de riego carece de control y regulación de los caudales desde el canal principal a los canales secundarios debido a que las compuertas no fueron diseñadas para cumplir con este propósito, es por ello que por seis ramales (Alangasí, Ilaló, El Pueblo, Churolooma, San Blas y La Viña) fluye un caudal mayor al requerido, mientras que por el ramal Chichipata fluye un caudal menor al que se necesita para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos. En relación con el caudal asignado de 1.7 m³ s⁻¹, es mucho mayor que el caudal requerido de 0.96 m³ s⁻¹ considerando la reducción del área irrigable de 2300.0 ha a 961.57 ha. El exceso de caudal produce sobre irrigación y desbordamientos en las partes bajas o planas del proyecto de riego.

La eficiencia de conducción en el canal principal y en los canales secundarios fue muy buena, y en los canales terciarios regular. La red de canales principales, secundarios y terciarios cuentan con un mantenimiento pobre y se encontraron los siguientes problemas: crecimiento de malezas y árboles en las márgenes de los canales, basura acumulada (la cual causa desbordamientos), canales sin sección, filtraciones, y uno de los problemas más complicados y difíciles de resolver, canales de hormigón o sifones construidos sin diseño hidráulico por las urbanizaciones en el área de riego. Tanto la junta de regantes, como el municipio, constructores y usuarios, por falta de conocimiento de la ley, construyeron casas, vías y urbanizaciones sin conocer que a 3 metros del lado del canal, no se puede hacer ningún tipo de construcción, debido a que son caminos construidos para el paso de maquinaria cuando se realice el mantenimiento de la infraestructura hidráulica de la red de canales. A pesar de que el mantenimiento es pobre, se determinó una eficiencia de conducción muy buena, debido a que el cauce de los canales no revestidos es Cangahua (roca) y el hormigón de los canales revestidos es nuevo.

La eficiencia de distribución fue pobre y genera

Tabla 4. Eficiencias de conducción, distribución y aplicación en el sistema de riego Tumbaco

Eficiencia	Red	Variable	Alangasí		Ilaló		Churolooma		El Pueblo		San Blas		La Viña		Chichipata	
			Qi*	Qf*	Qi*	Qf*	Qi*	Qf*	Qi*	Qf*	Qi*	Qf*	Qi*	Qf*	Qi*	Qf*
Conducción		T1	74.97	73.32	264.05	223.53	258.25	250.67	322.0	307.1	50.52	49.62	240.0	207.3	237.62	218.83
		T2	66.97	56.64	178.37	178.37	177.59	166.05	213.3	204.2	46.51	40.10	126.7	118.9	107.34	105.78
		T3	48.12	46.25	165.92	120.61	138.86	134.15	172.3	171.6	35.19	24.31	58.7	46.2	40.47	39.91
	Canales secundarios	Efc – T1	97.80		84.0		97.06		95.37		98.22		86.37		92.09	
		Efc – T2	84.57		100.0		93.50		95.73		86.21		93.84		98.55	
		Efc – T3	96.11		73.0		95.92		99.59		69.08		78.70		98.62	
		Efc (%)	92.83		85.67		95.49		96.90		84.50		86.30		96.42	
	Canales terciarios	Qi (l s ⁻¹)	6.01*		9.17*		9.1*		3.79*		5.13*		11.7*		3.35*	
		Qf (l s ⁻¹)	1.04*		4.92*		2.2*		2.68*		2.97*		4.8*		1.22*	
		L (m)	654.8*		686.1*		828.47*		904.39*		335.4*		656.19*		486.3*	
		Efc max (%)	97.56		94.37		98.24		99.70		95.92		94.87		99.34	
		Efc min (%)	17.30		53.65		24.20		71.24		57.94		41.02		36.42	
		Efc (%)	57.43		63.05		75.31		93.70		76.88		67.99		74.67	
		Unidades terciarias	La max (mm)	107.3		184.4		183.4		180.2		149.6		425.6		93.1
	La min (mm)		11.3		30.0		33.9		11.4		22.0		42.3		28.9	
La media (mm)	45.3			93.9		90.0		62.9		69.2		140.7		64.4		
CV (%)	62.41			51.41		53.15		66.37		80.13		86.55		35.13		
LT (mm)	60.0			60.0		60.0		60.0		60.0		60.0		60.0		
Efd (%)	34.05			44.47		38.44		38.94		33.29		36.38		45.56		
Unidades terciarias	Qp (m ³ h ⁻¹)		21.60		33.0		32.76		13.64		17.71		42.12		120.6	
	V (m ³)	4997.9		26360		3079.44		4789.04		2090.02		3706.56		2134.62		
	S (m ²)	68700.0*		26360.0*		32600.0*		54615.0*		34750.0*		25210.0*		23900.0*		
	La (mm)	72.7		127.7		94.5		87.7		60.1		147.0		89.3		
	LT (mm)	60.0		60.0		60.0		60.0		60.0		60.0		60.0		
	Efa (%)	82.5		47.0		63.5		68.4		99.8		40.8		67.2		
	Sobre y sub irrigación	SI (%)	21.4		70.0		72.7		40.0		44.4		81.8		55.6	
SUI (%)		71.4		20.0		27.3		60.0		55.6		18.2		22.2		

T1: tramos superior. T2: tramo medio. T3: tramo bajo. V: volumen de agua entregado (m³).

*. Ipiales (2019), Pupiales (2019), Yungan (2019), Vela (2019), Inca (2020), Nastacuas (2020), Tipantiza (2020)

inequidad en la distribución del agua. La causa principal de la distribución pobre, fueron los tiempos de riego asignados por la junta de regantes, los cuales no se ajustan a los caudales reales de entrega a los usuarios, ni a las necesidades hídricas de los cultivos. El caudal de entrega fue definido por los usuarios en el año de 1944 en 10 l s^{-1} , con tomas de entrega de igual diámetro para todos (Chile, 2020), no obstante, para el manejo del agua de riego por surcos o inundación se requieren caudales que varían entre 25 y 40 l s^{-1} , es decir, desde un inicio, la entrega del agua a los usuarios no cumplía con los requisitos mínimos para manejar el agua de riego a través de métodos de aplicación gravitacionales (Ankun, 2002; Dahmen, 2002; Depeweg, 2002).

La falta de mantenimiento en los canales terciarios por parte de los usuarios ha producido la colmatación de los cauces, incidiendo en la velocidad y calado del agua, afectando directamente al caudal de ingreso a la unidad terciaria. Por otro lado, el caudal de entrega a los agricultores disminuye conforme la longitud del canal se incrementa, dado que en su recorrido se producen pérdidas por evaporación directa del agua desde el espejo de agua, filtración a través de compuertas metálicas sin mantenimiento, tomas no autorizadas, percolación en el cauce del canal y robo del agua. Normalmente, las necesidades hídricas de los cultivos deben actualizarse en forma permanente considerando la dinámica del cambio del tamaño de la propiedad y de las fechas de siembra de los cultivos, lo cual no se aplica en el sistema de riego.

Si los usuarios mantienen el canal terciario y la junta ajusta los tiempos de riego de acuerdo con el caudal real de ingreso a las parcelas y en función de las necesidades hídricas (60 mm en forma semanal), la eficiencia de la unidad terciaria sería de 65.82% (muy buena), la eficiencia del sistema del 70.94% (muy buena) y la eficiencia del proyecto 63.85% (muy buena). El ajuste de los tiempos de riego no tiene costo alguno y se resolverían los siguientes problemas: disputas entre usuarios por el agua, robo del agua, inequidad en la distribución del agua, bajos rendimientos y disputas sociales entre líderes y usuarios (Hamdy, 2007).

La eficiencia de aplicación fue buena, sin embargo, los bajos caudales de ingreso a la parcela del agricultor afectan a éste parámetro. Aquellos agricultores que presentaron sobre irrigación cambiaron el patrón de cultivos, de cultivos de ciclo corto a cultivos anuales por efecto de la presencia de enfermedades fungosas y otro tipo de plagas que destruyeron los cultivos, siendo los frutales los que mejor se adaptaron a este fenómeno, mientras que aquellos usuarios que presentaron sub irrigación, manifestaron que el agua no alcanza para regar sus cultivos y mostraron su disconformidad con la entrega del agua.

Conclusiones

La falta de regulación de los caudales hacia los canales secundarios y desde los canales secundarios a la red terciaria, afecta a la distribución de caudales a nivel de la red de canales. Para resolver este problema, se recomienda modernizar las estructuras hidráulicas de división de caudales: i) desde los canales principales a los secundarios, construir compuertas con vertederos de pared ancha para la medición y regulación, y ii) desde los canales secundarios a las tomas de las unidades terciarias u óvalos, construir vertederos de cresta larga con orificios laterales controlados con compuertas.

La eficiencia de distribución en el sistema de riego fue pobre, considerando que la distribución de los caudales y los tiempos de riego asignados por la junta de regantes, no se ajustan con los caudales reales entregados a los agricultores, tampoco con las necesidades hídricas de los cultivos y tamaño de las parcelas, creando inequidad en la distribución o reparto del agua. Para corregir este problema se recomienda ajustar los tiempos de entrega a los usuarios en función del caudal de ingreso y de las necesidades hídricas de los cultivos (60 mm semanales).

La eficiencia de conducción en la red de canales principales y secundarios fue muy buena, porque el cauce de los canales no revestidos es roca y los tramos revestidos son de hormigón nuevo. La eficiencia de conducción en los canales terciarios fue regular, por falta de mantenimiento de los canales, existiendo colmatación en los cauces por la basura acumulada, y por las pérdidas de caudal a través de las compuertas (mal estado) de entrega a los agricultores, recomendándose un plan anual riguroso de mantenimiento de toda la red de canales, especialmente de los canales terciarios.

La eficiencia de aplicación en todo el sistema fue buena, no obstante, la distribución del agua generó sobre y sub irrigación. La eficiencia del sistema fue regular, de cada 100 litros derivados desde el río, 47.86 litros llegan hasta la parcela del agricultor. La eficiencia global del proyecto de riego fue pobre, afectada por la distribución del agua. Para optimizar el manejo del agua en todo el sistema de riego, se recomienda capacitar a los usuarios en la gestión social y técnica del agua.

Agradecimientos

A todos aquellos quienes fueron parte de la investigación: Abigail Yungán, Alexandra Inca, Boris Vela, Iván Pupiales, Jorge Nastacuas, Luis Tipantiza y Oscar Ipiates.

Literatura citada

- Ankum, P. 2002. Flow Control in Irrigation Systems. Lecture Notes of the Master of Science program in Land and Water Development. IHE, Delft.
- Boelens, R. 2008. Water rights arenas in the Andes: upscaling networks to strengthen local water control. *Water Alternatives*, 1(1):48-65.
- Bos, M., & Nugteren, J. 1990. On irrigation efficiencies. International Institute for Land Reclamation and Improvement – ILRI. Wageningen.
- Burt, C., Clemmens, A., Strelhoff, T., Solomon, K., Bliesner, R., Hardy, L., Howell, T., Eisenhauer, D. 1997. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage*, 136(6):423-442.
- Calvache, M. 2009. Manejo del agua de riego en zonas de ladera. *Revista científica de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo*, 2:32-39.
- Chile, M. 2020. Dinámica de la distribución del agua en el sistema de riego Tumbaco. Tesis de Máster en Ciencias en Gestión Integrada de Recursos Hídricos y Riego. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Dastane, N. 1974. Effective Rainfall in Irrigated Agriculture. F.A.O. Irrigation and Drainage paper No. 25. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Dahmen, E. 2002. Canal design. Lecture Notes of the Master of Science program in Land and Water Development. IHE, Delft.
- Depeweg, H. 2002. Irrigation Topics: Manual Fieldwork Arnhem. Lecture Notes of the Master of Science program in Land and Water Development. IHE, Delft.
- Hamdy, A. 2007. Water use efficiency in irrigated agriculture: an analytical review. *Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches*, 57:9-19.
- Hofwegen, P. 2002. Irrigation and drainage system management. Lecture Notes of the Master of Science program in Land and Water Development. IHE, Delft.
- Inca, A. 2020. Determinación hidráulica y social de la eficiencia de conducción y distribución en el ramal “La Viña” del sistema de riego Tumbaco. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Ipiates, O. 2019. Caracterización de la eficiencia de conducción y distribución en el ramal “Ilaló” del sistema de riego Tumbaco. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Irmak, Suat; Odhiambo, Lameck O.; Kranz, William L.; and Eisenhauer, Dean E. 2011. Irrigation Efficiency and Uniformity, and Crop Water Use Efficiency. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*, 451. University of Nebraska – Lincoln.
- Mirjat, M., Talpur, M., Mangrio, Tagar, A. 2017. Water delivery performance of secondary canals in terms of adequacy and water use efficiency in Sindh Pakistan. *Pak. J. Agri., Agril. Engg., Vet. Sci.*, 33(1):74-84.
- Montufar, C. 2017. Catastro del Sistema de riego Tumbaco. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Nastacuas, J. 2020. Caracterización de la eficiencia de conducción y distribución en el ramal “San Blas” del sistema de riego Tumbaco. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Pretty, J., Benton, T., Bharucha, Z., Dicks, L., Flora, B., Godfray, H., Goulson, D., Hartley, S., Lampkin, N., Morris, C., Pierzynski, G., Prasad, P., Reganold, J., Rockström, J., Smith, P., Thorne, P., Wratten, S. 2018. Global assessment of Agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature sustainability Journal*, 1:441-446.
- Ortiz, R. Tamayo, Ch. Chile, M. & Méndez, A. 2018. Coeficiente del tanque evaporimetro Clase A para estimar la evapotranspiración de referencia para el valle de Tumbaco. *Revista Siembra*, 5(1):16-25.
- Ortiz, R., Chile, M. 2020. Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Revista Siembra*, 7(1):070-079.
- Pupiales, I. 2019. Determinación de la eficiencia de conducción y distribución en el ramal “El Pueblo” del sistema de riego Tumbaco. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Lizano, R., & Calvache, M. 2005. Estudio de distribución técnica del agua para 251 usuarios del ramal La Vina del sistema de riego. Tumbaco-Pichincha. *Revista Rumipamba*, 21(1):1-9.
- Tipantiza, L. 2020. Determinación de la eficiencia de conducción y distribución en el ramal “La Merced” del sistema de riego Tumbaco. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Yungan, A. 2019. Determinación de la eficiencia de conducción y distribución en el ramal “Churoloma” del sistema de riego Tumbaco. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad Central del Ecuador, Quito.