

Determinación de la huella hídrica del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), mediante métodos indirectos, Cuenca del Río Ramis

Determination of the water footprint of quinoa cultivation (*Chenopodium quinoa* Willd) using indirect methods, Ramis River Basin

Víctor Manuel Espinoza Pinedo^{1,*}  , Víctor Andrés Gonzales Gonzales²  ,
Gina Paola Espinoza Alarcon³  y Jaime Espinoza Alarcon⁴ 

¹ Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, Correo: vespinoza1945@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2111-7561>

² Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, Correo: victorgonzales@unap.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9230-3153>

³ Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, Correo: gespinoza@unap.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7646-6750>

⁴ Colegio de Ingenieros del Perú, Puno, Perú, Correo: jaespa2007@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7310-544X>

Resumen

En el ámbito de la cuenca del río Ramis, la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) es un alimento primordial por su alto contenido proteico y aminoácidos esenciales, su cultivo es bajo secano, los objetivos del estudio fueron: determinar la huella hídrica del cultivo de quinua, determinar la evapotranspiración real y determinar la variación de la huella hídrica, durante el periodo 2001 a 2018. La metodología para el cálculo de la evapotranspiración real se utilizó el método de Penman-Monteith y el software CROPWAT 8,0; y para la determinación de la huella hídrica y su variación se aplicó el manual propuesto por Hoekstra en 2011. Los resultados de la investigación fueron: la evapotranspiración promedio del cultivo de quinua para un periodo vegetativo de 150 días es de 427,4 mm, considerando una evapotranspiración potencial de 1264,0 mm y un coeficiente de cultivo de 0,81; y la huella hídrica del cultivo de quinua durante las campañas 2001/02 a 2017/18 varía entre 3527,5 y 4734,6 m³/ha, con un rendimiento de 1,041 tn/ha y un uso total de agua de 4279,0 m³/ha. Se concluyó que la huella hídrica de la quinua fue de 4163,4 m³/ha, de los cuales 3933,1 m³/ha corresponde a la huella hídrica verde (94,5 %) y 230,4 m³/ha a la huella hídrica azul (5,5 %)

Palabras clave: Cultivo, evapotranspiración, huella hídrica, quinua, rendimiento.

Abstract

In the context of the Ramis River basin, quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) is a staple food due to its high protein content and essential amino acids. Its cultivation is under rainfed conditions. The objectives of the study were: to determine the water footprint of quinoa cultivation, to determine the actual evapotranspiration, and to assess the variation of the water footprint during the period from 2001 to 2018. The methodology used for calculating actual evapotranspiration was the Penman-Monteith method and the CROPWAT 8.0 software. For determining the water footprint and its variation, the manual proposed by Hoekstra in 2011 was applied. The research results were as follows: the average evapotranspiration of quinoa cultivation for a 150-day growing season is 427.4 mm, considering a potential evapotranspiration of 1264.0 mm and a crop coefficient of 0.81. The water footprint of quinoa cultivation during the 2001/02 to 2017/18 seasons ranged between 3527.5 and 4734.6 m³/ha, with a yield of 1.041 tons/ha and a total water usage of 4279.0 m³/ha. It was concluded that the water footprint of quinoa was 4163.4 m³/ha, of which 3933.1 m³/ha corresponds to the green water footprint (94.5%) and 230.4 m³/ha to the blue water footprint (5.5%).

Keywords: Crop, evapotranspiration, quinoa, water footprint, yield.

Recibido: 28/04/2025

Aceptado: 02/12/2025

Publicado: 30/12/2025

*Autor para correspondencia: vespinoza1945@gmail.com

Cómo citar: Espinoza Pinedo, V. M., Gonzales Gonzales, V. A. , Espinoza Alarcon, G. P., & Espinoza Alarcon, J. . (2025). Determinación de la huella hídrica del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), mediante métodos indirectos, Cuenca del Río Ramis. *Revista De Investigaciones*, 14(4), 201-212. <https://doi.org/10.26788/ri.v14i4.6844>

Introducción

La quinua, domesticada en Perú hace más de cinco mil años, tiene su origen principal en la cuenca del lago Titicaca, clave para su conservación. (Ministerio de Agricultura, 2012). Según La FAO (2012), destaca que la quinua, elogiada por la OMS por su valor nutricional, puede sustituir proteínas animales por su balance ideal de nutrientes. Además, la FAO (2016), destaca la quinua por sus semillas comestibles y su valor nutricional, cultivada en los Andes por más de 7000 años y ganando popularidad global, en la actualidad. El calendario de siembras y cosechas de los cultivos en el departamento de Puno se realiza de acuerdo con su comportamiento y de acuerdo con las características ecológicas y agroclimáticas. En el sector agrario, se ha establecido que la campaña agrícola es desde agosto de un año hasta julio del año siguiente, debido a factores relacionados con el desarrollo vegetativo y la disponibilidad de recursos hídricos (Condori et al., 2010).

La FAO destaca que la agricultura utiliza más del 65 % del agua disponible a nivel mundial, enfrentando un déficit debido al aumento de la demanda y la limitada disponibilidad de agua dulce. Se han desarrollado tecnologías para mejorar la eficiencia en el uso del agua y promover su sostenibilidad, siendo necesario el cálculo de la huella hídrica de los cultivos a fin de propender al uso y manejo eficiente del recurso hídrico.

Para la determinación de la huella hídrica es de vital importancia el conocimiento y análisis de las variables climáticas de precipitación temperatura humedad relativa velocidad del viento y radiación solar, el ciclo hidrológico incluye todos los cambios que el agua experimenta en la naturaleza, abarcando sus tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso, tanto para el agua superficial como subterránea. (Pérez, 2015), así mismo, el ciclo hidrológico es la circulación natural del agua en sus tres estados físicos mediante procesos como evaporación y precipitación al respecto (Gamez, 2010).

La evaporación es el cambio del agua de líquido a vapor, influenciado por varios factores como el viento, temperatura y humedad (Vásquez et al., 2016), es el proceso por el cual el agua pasa de líquido a vapor directamente desde una superficie

húmeda, influenciada por la radiación solar y el viento (Gamez, 2010), la precipitación ocurre cuando las gotas de agua en las nubes se enfrián, condensan y se fusionan, cayendo a la tierra como lluvia, granizo, nieve, niebla o rocío, y son fuentes principales de agua (Gamez, 2010). La precipitación es esencial en el ciclo hidrológico, deposita agua fresca cuando las nubes se saturan, puede inducirse con siembra de nubes y químicos (Gamez, 2010). Según Villón (2002), varía en diferentes lugares y es esencial medirla con pluviómetros para resolver problemas hidrológicos, conociendo la precipitación media diaria, mensual o anual, siendo la infiltración es el paso del agua de la superficie del suelo al interior, debido a las fuerzas gravitacionales y capilares (Pérez, 2015), en este proceso el agua penetra en el suelo, avanzando hacia capas más profundas y almacenándose en acuíferos (Vásquez et al., 2016) el escurrimiento del agua de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre, se desplaza hasta la salida de la cuenca (Pérez, 2015), constituyendo el flujo superficial del agua que se desplaza sin cauce definido hacia los cauces, influenciado por las propiedades del suelo (Gamez W. 2010)

La evapotranspiración es el agua usada por las plantas y la que se evapora del suelo (Gamez W., 2010), en la explotación agrícola es esencial medir la evapotranspiración para cálculos de irrigación, utilizándose lisímetros y ecuaciones basadas en factores climáticos (Fattorelli y Fernández, 2011), la evaporación y transpiración ocurren simultáneamente, influenciadas por la radiación solar, inicialmente predomina la evaporación del suelo, luego la transpiración se vuelve principal (Allen et al., 2006), la radiación solar y el calor de la tierra aumentan la temperatura del aire, elevando la evapotranspiración. En días soleados, la pérdida de agua es mayor que en días nublados (Allen et al., 2006), la temperatura mide el movimiento de las moléculas del aire y se registra en abrigos meteorológicos. Las temperaturas máximas se registran después del mediodía y las mínimas, durante la madrugada (Breña y Jacobo, 2006),

la humedad relativa mide la proporción entre la densidad del vapor de agua en el aire y su densidad en condiciones de saturación (Breña y Jacobo, 2006), aunque la humedad es una pequeña fracción de la atmósfera, es crucial para las condiciones

meteorológicas y la evaporación local es la remoción de vapor (Guevara, 2004), la remoción de vapor depende del viento y la turbulencia del aire, que transfieren aire hacia la superficie evaporante (Allen et al., 2006), el viento se origina por diferencias de temperatura o presión entre áreas cercanas, causando variaciones rápidas, las montañas se enfrian más rápido y provocan vientos ascendentes por la noche y la mañana (Breña y Jacobo, 2006), la radiación solar es crucial para la evapotranspiración, convirtiendo agua en vapor y variando según ubicación y época del año. No toda la energía se usa para evaporar agua; parte calienta la atmósfera y el suelo (Allen et al., 2006)

La evapotranspiración potencial (ET₀) es la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia sin restricciones de agua, influenciada solo por parámetros climáticos, calculada con el método Penman-Monteith o un tanque evaporímetro (Allen et al., 2006) el método de lisímetro mide directamente la evapotranspiración potencial utilizando un lisímetro con cultivo de referencia. Es preciso, pero se usa más en investigaciones que en proyectos de riego (Vásquez et al., 2016), la evapotranspiración se mide mediante el balance hídrico de los lisímetros, que pueden usar una balanza en el fondo o un sistema de drenaje para calcular el agua evapotranspirada (Guevara, 2004), la evaporación de superficies de agua refleja factores climáticos en la evapotranspiración. Aunque hay diferencias con superficies cultivadas, los tanques son útiles para estimar la ET₀ usando coeficientes empíricos (Allen et al., 2006).

Las fórmulas empíricas son ecuaciones basadas en variables meteorológicas específicas para regiones. Las más conocidas son Hargreaves, Penman Montheit, Blaney, Criddle, Jensen-Haise y Christiansen Vásquez et al., 2016), el método Penman-Monteith fue estandarizado por la FAO para uniformizar el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET₀), utilizando datos climáticos como radiación solar, temperatura, humedad y viento, medidos a 2 metros de altura sobre pasto verde sin limitaciones de agua (Allen et al., 2006), el coeficiente de cultivo (K_c) refleja el desarrollo del cultivo y la cobertura del suelo, integrando la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo. los valores del K_c están tabulados en la publicación FAO N° 56

(Allen et al., 2006), el coeficiente de cultivo (K_c) como un factor biológico que incluye la altura, el comportamiento estomático, el área foliar y el sistema de conducción, se calcula dividiendo la evapotranspiración del cultivo por la de referencia (Requena, 2010), La ET_c es la pérdida de agua en cultivos en condiciones óptimas, las necesidades hídricas del cultivo equilibran esta pérdida, y factores como la anatomía de las hojas hacen que la ET_c difiera de la evapotranspiración de referencia (Allen et al., 2006), la precipitación efectiva agrícola con un 80 % de probabilidad de excedencia, caracterizando un año deficitario de cada cinco. La metodología de la FAO, usada globalmente, la estima en climas áridos y subhúmedos (Vásquez et al., 2016), la disponibilidad de agua en el suelo es crucial en condiciones semiáridas mediterráneas, el estrés hídrico afecta el crecimiento de las plantas y puede causar la muerte de las hojas en casos severos (Martin et al., 2005).

La huella hídrica es un indicador del uso total de agua dulce, directa e indirecta, para un bien o servicio, crucial para la seguridad y el uso sostenible del agua (Castillo, 2016), el concepto de huella hídrica fue introducido por Arjen et al. (2021) como un indicador alternativo del uso de agua (WWF, 2013), la huella hídrica mide la sostenibilidad de los recursos hídricos y el agua consumida en una región, además de los flujos de agua virtual (Becerra, 2013), la huella hídrica es el volumen de agua dulce utilizado en la producción de un bien o servicio (Thaler et al., 2012); y Arjen et al. (2021), definen la huella hídrica como el uso global de agua dulce en productos y actividades. Para Hoekstra et al. (2009), indican que la huella hídrica del cultivo se evalúa sumando sus componentes verde, azul y gris.

La huella hídrica verde se refiere al agua de lluvia almacenada en el suelo, utilizado por los cultivos y la vegetación (Lovarelli et al., 2016), además, según Pellicer (2014) y Lovarelli et al. (2016), afirman que la huella hídrica azul es el agua de riego que no regresa a la cuenca.

En el Ecuador se evaluó el impacto ambiental del cultivo de quinua en términos de huella hídrica y huella de carbono en las comunidades de Pucará y Mijipamba, la huella hídrica fue estimada en 356,49 m³/tn en Pucará y 98,49 m³/

tn en Mijipamba (Ramírez et al., 2017). Por su parte, Geerts et al. (2009), analizaron la quinua del altiplano boliviano y, basándose en su tolerancia al estrés hídrico y su rendimiento relacionado con el consumo de agua, obtuvieron valores significativamente mayores de 3333 y 6666 m³/tn. Así mismo, Mekonnen y Hoekstra (2011), investigaron en Ecuador la huella hídrica de los cultivos, para el cultivo de quinua determinaron valores de HH verde igual a 5545 m³/ha.

La demanda hídrica y el coeficiente Kc del cultivo de quinua QLM01, que este cultivo requiere un total de 2623 m³/ha por ciclo la distribución del agua por etapas es: 377 m³/ha en inicio, 588 m³/ha en desarrollo, 957 m³/ha en mediados de temporada y 699 m³/ha en etapa final. Los coeficientes Kc correspondientes a cada etapa fueron de 0,554, 0,98, 1,271 y 0,904, respectivamente (García et al., 2017).

El informe del WWF (2013), evaluó la huella hídrica promedio nacional de la quinua entre 2001 y 2012, estimada en 3841,47 m³/tn, con un rendimiento medio de 1,19 t/ha. Esta huella se divide en: verde (3067 m³/tn, 80 %), gris (535 m³/tn, 14 %) y azul (211 m³/tn, 6 %). Además, el cultivo de quinua, localizado entre los 2500 y 4100 metros sobre el nivel del mar, depende principalmente del agua de lluvia almacenada en el suelo, lo que lo hace vulnerable a las variaciones en las precipitaciones.

Geerts et al. (2008), mencionan que, en el altiplano, la fecha de siembra varía desde principios de septiembre hasta finales de noviembre, dependiendo de la duración del ciclo de cultivo de las diferentes variedades y del clima local, cuando el suelo tiene la humedad adecuada para la germinación.

El periodo vegetativo del cultivo de cultivo de quinua blanca se ha considerado un periodo de 150 días tal como mencionan en (Tapia, 2007); (FAO, 2016); (Ministerio de Agricultura, 2013); (FAO, 2002); (Condori et al., 2010) y (Mujica, 2015).

Según el Ministerio de agricultura y riego (2015), de los cultivos producidos actualmente en el Perú, teniendo en cuenta los volúmenes de producción y su ubicación; los cinco cultivos con mayor huella hídrica son el arroz, el café, la papa, la alfalfa y la caña de azúcar. El cultivo de quinua tiene una

HH verde de 3665 l/kg, una HH azul de 601 l/kg y una HH total de 4265 l/kg. Así mismo, Bazile y Santivañez (2013), reportaron que el rendimiento del cultivo de quinua en el año 2012 en el Perú es de 1,149 tn/ha, en Bolivia 0,68 tn/ha y en Chile 0,60 tn/ha.

De acuerdo con los datos del MINAG-OEEE (2013), los departamentos con los mayores rendimientos son Arequipa (2,034 kg/ha), Junín (1,216 kg/ha), Puno (1,198 kg/ha), Apurímac (1,153 kg/ha) y La Libertad (1,080 kg/ha). En 2012, el rendimiento promedio nacional fue de aproximadamente 1,148 kg/ha, mostrando una disminución del 1,1 % en comparación con el mismo periodo de 2011. Destaca especialmente el rendimiento de Arequipa, con alrededor de 2,834 kg/ha, siendo el más alto del país. Otros departamentos con rendimientos superiores al promedio nacional son Apurímac, Tacna, Junín, La Libertad, Ayacucho y Puno, como principal productor, mantiene un rendimiento de 1,100 kg/ha (MINAG-OEEE, 2013)

La producción de quinua fue variable entre 1994 y 2012, y mostró una tendencia ascendente (Fairlie, 2016). Según datos MINAG, Puno lideró la producción nacional entre 2008 y 2011, con aproximadamente el 60 % del total, y aumentó su participación al 68 % en 2012. Además, el rendimiento promedio anual en Puno mejoró significativamente, de 762 kg/ha en 1993 a 1,096 kg/ha en 2012.

La huella hídrica verde en el cultivo de quinua en la provincia de Puno, considera que la evapotranspiración de referencia anual promedio es de 1378,42 mm, mientras que la evapotranspiración real del cultivo es de 614,66 mm. el requerimiento hídrico promedio global del cultivo es de 5530,20 m³/ha, con un rendimiento promedio de 1157,73 kg/ha. la huella hídrica verde del cultivo de quinua en la provincia se calcula en 4822,96 m³/tn. (Cauna (2019), así mismo, la huella hídrica agrícola en la cuenca del río Ilave, cuyo objetivo fue determinar la huella hídrica del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa Willd*), nos muestran que la evapotranspiración promedio durante un periodo vegetativo de 150 días es de 419,22 mm, y la huella hídrica del cultivo es de 3861,5 m³/ha. (Mamani, 2018), de igual manera la variación de la evapotranspiración en los cultivos de papa, quinua

y alfalfa en la cuenca del lago Titicaca peruano durante su periodo vegetativo, los valores de evapotranspiración de referencia (ET₀) mediante el método Penman-Monteith fluctuaron entre 87,10 mm y 126,02 mm mensualmente, de enero a diciembre. Para la quinua, la evapotranspiración en un ciclo vegetativo de 150 días osciló entre 311,0 y 547,6 mm con Penman-Monteith y entre 242,5 y 501,1 mm con el método del tanque clase A (Charaja, 2017).

El objetivo de la investigación es calcular la huella hídrica del cultivo de quinua en la cuenca del río Ramis mediante métodos indirectos, así mismo, determinar la evapotranspiración real del cultivo y analizar la variación de la huella hídrica del cultivo durante el período 2001–2018.

Métodos

Lugar de estudio

Se realizó en la cuenca del río Ramis, abarcando sus características geográficas, políticas e hidrográficas, y ubicadas en las siguientes coordenadas UTM (WGS84):

Este: 454,221.0 a 272,732.8.

Norte: 8 445,867.4 a 8 289,725.2.

Altitud: 3,800 a 5,334 msnm.

Provincias de Azángaro, Carabaya, Lampa, Melgar, San Antonio de Putina y Huancané.

Periodo de estudio

El estudio ha utilizado información de parámetros climáticos de la cuenca del río Ramis que data del período 2001–2018, proporcionado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI – Puno).

Materiales utilizados

Los materiales utilizados fueron: La información de series históricas de parámetros climáticos de la cuenca del río Ramis que data del período 2001 – 2018, proporcionado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI – Puno), e información de rendimientos del cultivo de quinua proporcionado por el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI-Puno).

VARIABLES ANALIZADAS

Las variables analizadas incluyeron las variables dependientes: evapotranspiración real, precipitación efectiva y huella hídrica; así como las variables independientes: precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y el rendimiento del cultivo de quinua. Estas variables fueron fundamentales para cumplir los objetivos planteados, así como para el análisis y procesamiento de los datos mediante los programas CROPWAT 8,0 y Excel, con el fin de obtener los resultados requeridos en la investigación.

Descripción de métodos

Para la determinación de la huella hídrica del cultivo de la quinua (*Chenopodium quinua* Willd) se ha utilizado los siguientes parámetros de acuerdo con los objetivos del presente estudio:

El estudio analiza variables como precipitación, temperaturas máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, con datos proporcionados por el SENAMHI Puno.

Según Allen et al. (2006), la evapotranspiración de referencia se calcula mediante el método indirecto de Penman-Monteith. Para esta estimación, es necesaria información meteorológica mensual sobre la temperatura mínima, la temperatura máxima, la humedad relativa, la velocidad del viento y las horas de sol. La ecuación de Penman-Monteith es la siguiente:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n + G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Donde:

ET_0 : Evapotranspiración de referencia (mm dia-1)

R_n : Radiación neta en la superficie del cultivo. (MJ m-2 dia-1)

G : Flujo del calor de suelo (MJ m-2 dia-1)

T : Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u_2 : Velocidad del viento a 2 m de altura (m s-1)

e_s : Presión de vapor de saturación (kPa)

e_a : Presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$: Déficit de presión de vapor (kPa)

γ : Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C-1)

Δ : Constante psicrométrica (kPa °C-1).

Para determinar la evapotranspiración de referencia utilizando el método de Penman-Monteith, se emplea el software CROPWAT 8,0, un programa informático proporcionado por la FAO, que es de libre acceso.

Según Allen et al. (2006), el procedimiento para determinar el coeficiente de cultivo o factor Kc del cultivo es el siguiente:

Dividir el periodo de crecimiento en las cuatro etapas generales que describen la fenología o desarrollo del cultivo (inicial, desarrollo del cultivo, mediados de temporada y final)

Determinar las duraciones de las cuatro etapas de crecimiento e identificar los tres valores de Kc que corresponden a Kc inicial, Kc mediados y Kc final (FAO Manual 56)

Construir una curva uniendo segmentos de línea recta a lo largo de cada etapa de crecimiento. Se debe trazar una línea horizontal a través del Kc inicial en la etapa inicial, luego una línea diagonal desde el final del Kc inicial hasta el inicio del Kc en la etapa de desarrollo del cultivo. Posteriormente, trazar una línea horizontal a través del Kc en la etapa de mitad de temporada y, finalmente, una línea diagonal desde el final del Kc de mitad de temporada hasta el Kc final en la etapa final.

Trazar la curva del coeficiente de cultivo suavizada y representativa, que formará la curva Kc del cultivo en análisis.

Para calcular la evapotranspiración real del cultivo se utiliza la ecuación propuesta por (Allen et al., 2006):

$$ET_c = K_c \cdot ET_o$$

ET_c = La evapotranspiración del cultivo (mm/mes)

K_c = El coeficiente de cultivo (adimensional).

ET_o = La evapotranspiración de referencia (mm/mes).

Según Allen et al. (2006), la precipitación efectiva se determina mediante el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USDA S.C.), utilizando las siguientes ecuaciones:

$$P_{ef} = \frac{P_{mensual} * (125 - 0,2 * P_{mensual})}{125}$$

si $P_{mensual} \leq 250 \text{ mm}$

$$P_{ef} = 1,25 * P_{mensual}$$

si $P_{mensual} > 250 \text{ mm}$

Donde:

P_{ef} = precipitación efectiva, en mm.

$P_{mensual}$ = precipitación mensual, en mm.

Para calcular la precipitación efectiva con el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, se utiliza el software CROPWAT 8,0.

El rendimiento del cultivo se determina empleando la ecuación que se muestra a continuación.

$$Y = \frac{\text{Prod.}}{A}$$

Donde:

Prod. = Producción del cultivo, en tn.

A = Área cosechada, en has.

La producción y área cosechada del cultivo de quinua la información del ámbito de la cuenca del río Ramis se obtiene de la oficina de información agraria de la Dirección Regional de Agricultura de Puno.

Según Hoekstra et al. (2011), el uso del agua del cultivo verde (UAC verde) se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$UAC_{verde} = 10 * 62hg6t \sum_{i=1}^n ET_{verde}$$

Donde:

UAC : Consumo de agua en el cultivo verde, en m³/ha.

ET_{verde} : Evapotranspiración verde del cultivo, en mm.

n : número de meses del ciclo del cultivo.

El uso del agua del cultivo azul (UAC azul) se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$UAC_{azul} = 10 * \sum_{i=1}^n ET_{azul}$$

Donde:

UAC_{azul} = Consumo de agua del cultivo azul, en m³/ha

ET_{azul} = Evapotranspiración azul del cultivo, medida en milímetros (mm).

n = número de meses del ciclo del cultivo.

De acuerdo con Arjen et al. (2021), para calcular la huella hídrica de un cultivo, es esencial estimar la huella hídrica de sus componentes, a partir de la siguiente ecuación:

$$HH_{\text{producto}} = HH_{\text{verde}} + HH_{\text{azul}} + HH_{\text{gris}}$$

Donde:

HH_{producto} = Huella hídrica del producto (m^3/tn)

HH_{verde} = Huella hídrica verde (m^3/tn)

HH_{azul} = Huella hídrica azul (m^3/tn)

HH_{gris} = Huella hídrica gris (m^3/tn)

En la investigación, únicamente se considerarán la huella hídrica verde y la huella hídrica azul, excluyendo la huella hídrica gris, ya que el proceso productivo del cultivo de quinua en la cuenca del río Ramis es orgánico.

En consecuencia, para calcular la HH total del cultivo de quinua, se utiliza la siguiente ecuación:

$$HH_{\text{producto}} = HH_{\text{verde}} + HH_{\text{azul}}$$

La HH verde, es el volumen de agua utilizado por las plantas durante el proceso de producción derivado de la precipitación, este componente se determina a partir de la siguiente ecuación: (Arjen et al., 2011)

$$HH_{\text{verde}} = \frac{UAC_{\text{verde}}}{Y}$$

Donde:

HH_{verde} = Huella hídrica verde (m^3/tn).

UAC_{verde} = uso del agua verde del cultivo (m^3/ha)

Y = Rendimiento del cultivo (tn/ha).

La huella hídrica azul se refiere al volumen de agua consumida por las plantas durante el proceso de producción a través del riego. Este componente se determina a partir de la siguiente ecuación: (Arjen et al., 2021).

$$HH_{\text{azul}} = \frac{UAC_{\text{azul}}}{Y}$$

Donde:

HH_{azul} = Huella hídrica azul (m^3/tn).

UAC = Consumo de agua azul del cultivo (m^3/ha)

Y = Rendimiento del cultivo (tn/ha).

Resultados y discusión

El análisis climatológico se fundamentó con la información meteorológica disponible, proveniente de 8 observatorios meteorológicos ubicados dentro de la cuenca del río Ramis. La información pluviométrica, temperatura máxima, temperatura mínima y humedad relativa corresponde a los 8 observatorios meteorológicos, para el parámetro velocidad del viento está disponible en 6 observatorios meteorológicos y para las horas de sol, solamente en 4 observatorios meteorológicos.

Se presenta un resumen de la evapotranspiración de referencia (ET₀) en la cuenca Ramis, considerando los datos de las estaciones meteorológicas de Azángaro, Chuquibambilla, Crucero, Llalli, Progreso, Pucará, Santa Rosa y Taraco. Observándose que el promedio mensual de la evapotranspiración de referencia varía entre 95,1 mm en abril y 124,3 mm en octubre, mientras que el promedio anual fue 1264,0 mm (Tabla 1).

Tabla 1

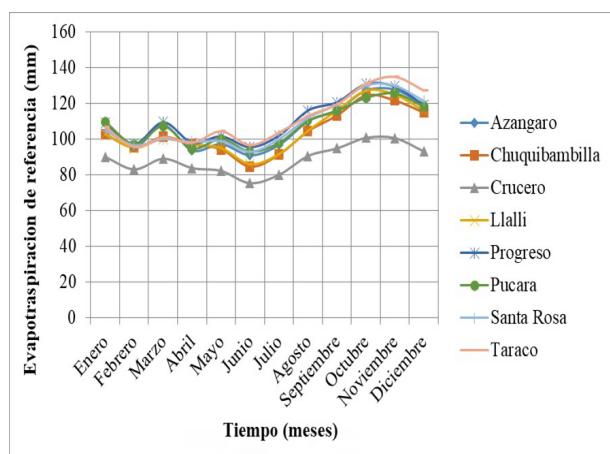
Evapotranspiración de referencia (mm) en la cuenca Ramis.

Mes	Azáng	Chuquí	Cruc	Llalli	Prog	Puca	Santa	Tara	Prom
Ene.	109,1	102,6	90,1	102,7	108,9	109,7	104,8	106,9	104,3
Feb.	95,6	95,3	83,1	95,0	97,4	97,0	96,6	95,6	94,5
Mar.	107,7	101,2	89,0	100,2	109,4	107,3	100,1	101,0	102,0
Abr.	93,5	97,1	83,8	97,1	97,9	94,7	98,5	98,0	95,1
May.	97,1	94,3	82,2	94,9	101,5	100,0	98,9	104,4	96,7
Jun.	90,8	84,5	75,3	85,9	95,6	93,0	93,0	96,7	89,3
Jul.	96,7	91,4	80,1	91,6	102,0	97,9	100,1	103,8	95,4
Ago.	110,0	104,5	90,6	104,6	116,0	110,4	112,0	113,0	107,6
Sep.	116,2	113,3	94,9	116,0	120,6	115,9	119,5	119,5	114,5
Oct.	127,2	124,5	100,8	127,0	130,7	123,3	130,1	131,0	124,3
Nov.	127,7	121,6	100,6	124,8	129,3	125,6	129,8	134,7	124,3
Dic.	119,0	114,9	93,1	115,7	118,9	118,2	121,3	127,2	116,0
Total	1290,5	1245,0	1063,4	1255,4	1328,1	1293,2	1304,6	1331,8	1264,0

Se muestra la variación mensual de la evapotranspiración de referencia (ET₀) en las estaciones meteorológicas de Azángaro, Chuquibambilla, Crucero, Llalli, Progreso, Pucará, Santa Rosa y Taraco. Se observa que el comportamiento mensual de la evapotranspiración de referencia es similar en todas las estaciones a lo largo del año, destacándose la estación de Crucero por registrar los valores más bajos en comparación con las demás (Figura 1).

Figura 1

Evapotranspiración de referencia en la cuenca del río Ramis



Se muestra los coeficientes de cultivo (Kc) de la quinua, estimados según la metodología de la FAO. Los valores mensuales de Kc para un periodo vegetativo de 150 días son: 0,32 en noviembre, 0,78 en diciembre, 1,15 en enero, 1,12 en febrero y 0,75 en marzo. El valor promedio de Kc para el cultivo de quinua es 0,81 (Tabla 2).

Tabla 2

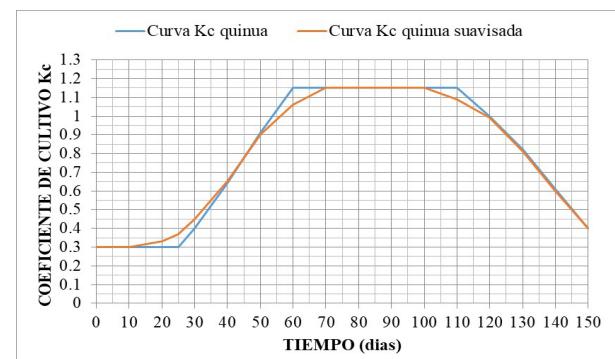
Coeficiente Kc del cultivo de quinua.

Cultivo	Periodo vegetativo (días)	Meses										
		Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.
Quinua	150				0,32	0,78	1,15	1,12	0,70			
Promedio												0,81

Se muestra la variación mensual del coeficiente Kc del cultivo de quinua, durante todo su periodo vegetativo de 150 días, las lecturas de Kc para cada mes se obtienen a mediados de cada una de ellas (Figura 2).

Figura 2

Curvas del coeficiente Kc del cultivo de quinua



Se presenta los valores mensuales de la evapotranspiración real del cultivo de quinua. Se observa que en la cuenca del río Ramis, la evapotranspiración real para un periodo vegetativo de 150 días, la estación meteorológica Crucero presenta un menor valor de 363,7 mm, y en la estación meteorológica Progreso el mayor valor de 445,0 mm, definidos por la altitud. El promedio de la evapotranspiración real para la cuenca del río Ramis, es de 427,4 mm (Tabla 3).

Tabla 3

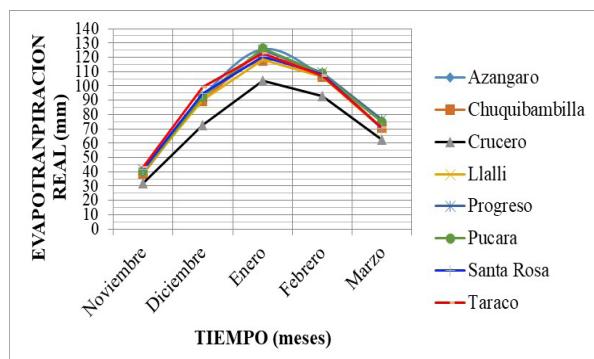
Evapotranspiración real del cultivo de quinua (mm).

	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Total
Azángaro	40,9	92,8	125,5	107,1	75,4	441,6
Chuqui	38,9	89,6	117,9	106,7	70,8	424,0
Crucero	32,2	72,6	103,6	93,0	62,3	363,7
Llalli	39,9	90,3	118,1	106,4	70,1	424,8
Progreso	41,4	92,7	125,3	109,1	76,6	445,0
Pucara	40,2	92,2	126,2	108,7	75,1	442,4
Santa Rosa	41,5	94,6	120,5	108,2	70,0	434,9
Taraco	43,1	99,2	122,9	107,1	70,7	443,0
Promedio						427,4

Se muestra la variación mensual de la evapotranspiración real del cultivo (ETc) de quinua, estimada para las estaciones meteorológicas de Azángaro, Chuquibambilla, Crucero, Llalli, Progreso, Pucará, Santa Rosa y Taraco. Se observa que el comportamiento mensual de la evapotranspiración real del cultivo (ETc) es similar en todas las estaciones a lo largo del año. Durante el período vegetativo, la estación de Azángaro registra los valores más altos, mientras que la estación de Crucero presenta los más bajos en comparación con las demás (Figura 3).

Figura 3

Evapotranspiración real del cultivo de quinua

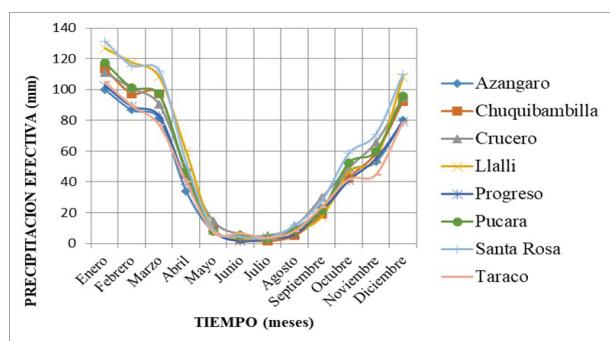


Se muestra los resultados de la precipitación efectiva mensual de los observatorios meteorológicos Azángaro, Chuquibambilla, Crucero, Llalli, Progreso, Pucara, Santa Rosa y Taraco estimados mediante la metodología del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, en ella se puede apreciar que la variación de la precipitación efectiva promedio mensual es de 3,4 a 113,4 mm, que pertenecen a los meses de julio y enero, respectivamente; y la precipitación efectiva anual promedio para toda la cuenca del río Ramis es de 598,4 mm (Tabla 4).

Tabla 4*Precipitación efectiva mensual (mm) de la cuenca del río Ramis*

Mes	Azáng	Chuqui	Crucero	Llalli	Prog	Pucara	Santa Rosa	Taraco	Prom
Enero	100,1	113,3	111,1	126,8	102,7	117,6	131,1	104,8	113,4
Febrero	86,8	97,3	100,8	117,6	89,1	101,4	115,3	89,3	99,7
Marzo	81,6	97,0	90,4	108,5	83,0	97,0	112,2	76,9	93,3
Abril	34,1	45,7	48,3	59,6	40,6	47,0	52,5	40,0	46,0
Mayo	7,8	9,5	14,7	9,0	8,6	8,1	9,0	7,1	9,2
Junio	2,8	2,9	6,3	2,9	1,8	5,3	4,5	6,5	4,1
Julio	2,8	1,6	5,3	3,9	3,3	2,8	3,6	3,6	3,4
Agosto	9,6	5,2	11,3	7,8	6,2	8,8	11,9	8,1	8,6
Septiembre	23,0	19,0	29,9	17,3	21,3	21,6	27,6	23,7	22,9
Octubre	47,2	42,4	49,3	46,7	41,1	52,5	58,4	41,7	47,4
Noviembre	53,1	58,9	65,9	54,7	55,1	60,1	70,9	44,7	57,9
Diciembre	80,1	92,4	94,8	108,2	79,3	95,7	109,7	78,9	92,4
Total	529,0	585,2	628,1	663,0	532,1	617,9	706,7	525,3	598,4

Se presenta en forma gráfica la variación mensual de la precipitación efectiva en las estaciones meteorológicas de Chuquibambilla, Crucero, Llalli, Progreso, Pucará, Santa Rosa y Taraco. Se observa que el comportamiento mensual de la precipitación efectiva es similar en las ocho estaciones a lo largo del año, con excepción del período de noviembre a abril, cuando se presentan diferencias en la cantidad de precipitación debido a la temporada de lluvias (Figura 4).

Figura 4*Variación mensual de la precipitación efectiva en la cuenca Ramis*

Se muestra un resumen de la huella hídrica (HH) verde, azul y total en los distritos de Antauta, Santa Rosa, Llalli, Ayaviri, Asillo, Azángaro, Pucará y Taraco (Tabla 5).

Tabla 5*Resumen de la huella hídrica verde, azul y total – cuenca Ramis.*

Distrito	Unidad	HH verde	HH azul	HH total
Azángaro	m3/ha	3501,5	532,9	4034,4
	%	86,8	13,2	100,0
Ayaviri	m3/ha	3978,6	136,4	4115,0
	%	96,7	3,3	100,0
Antauta	m3/ha	3816,9	0,0	3816,9
	%	100,0	0,0	100,0
Llalli	m3/ha	4263,8	0,0	4263,8
	%	100,0	0,0	100,0
Asillo	m3/ha	3600,0	517,7	4117,7
	%	87,4	12,6	100,0
Pucara	m3/ha	4201,3	156,4	4357,7
	%	96,4	3,6	100,0
Santa Rosa	m3/ha	4658,9	0,0	4658,9
	%	100,0	0,0	100,0
Taraco	m3/ha	3443,5	499,7	3943,2
	%	87,3	12,7	100,0
Promedio	m3/ha	3933,1	230,4	4163,5
	%	94,5	5,5	100,0

Conclusiones

La evapotranspiración del cultivo de quinua para un período vegetativo de 150 días en promedio es de 427,4 mm para el ámbito de la cuenca del río Ramis, considerando una evapotranspiración potencial de 1264,0 mm y un coeficiente de cultivo de 0,81. La huella hídrica del cultivo de quinua en la cuenca del río Ramis durante las campañas 2001/02 al 2017/2018, varía de 3527,5 a 4734,6 m³/ha, considerando un rendimiento de 1,041 tn/ha. y 4,279.0 m³/ha. de uso de agua total. Para la cuenca del río Ramis, la huella hídrica del cultivo de quinua es de 4163,4 m³/ha, de los cuales 3933,1 m³/ha corresponde a la huella hídrica verde, que representa el 94,5 %, mientras que 230,4 m³/ha corresponde a la huella hídrica azul, que representa el 5,5 %

Agradecimiento

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología por brindarme la información meteorológica.

Contribución de autores

Conceptualización, V. M. Espinoza P. (60%), V. A. Gonzales G. (20%), G. P. Espinoza A. (10%), J. Espinoza A. (10%); *Curación de datos*, V. M. Espinoza P. (60%), V. A. Gonzales G. (20%), G. P. Espinoza A. (10%), J. Espinoza A. (10%); *Ánalisis formal*, V. M. Espinoza P. (60%), V. A. Gonzales G. (20%), G. P. Espinoza A. (10%), J. Espinoza A. (10%); *Adquisición de fondos*, V. M. Espinoza P. (70%), V. A. Gonzales G. (10%), G. P. Espinoza A. (10%), J. Espinoza A. (10%); *Investigación*, V. M. Espinoza P. (60%), V. A. Gonzales G. (20%), G. P. Espinoza A. (10%), J. Espinoza A. (10%); *Metodología*, V. M. Espinoza P. (70%), V. A. Gonzales G. (10%), G. P. Espinoza A. (10%), J. Espinoza A. (10%); *Administración del proyecto*, V. M. Espinoza P. (60%), V. A. Gonzales G. (20%), G. P. Espinoza A. (10%), J. Espinoza A. (10%); *Recursos*, V. M. Espinoza P. (80%), V. A. Gonzales G. (10%), G. P. Espinoza A. (5%), J. Espinoza A. (5%); *Software*, V. M. Espinoza P. (60%), V. A. Gonzales G. (10%), G. P. Espinoza A. (10%), J. Espinoza A. (20%); *Supervisión*, V. M. Espinoza P. (70%), V. A. Gonzales G. (20%), G. P. Espinoza A. (5%), J. Espinoza A. (5%); *Validación*, V. M. Espinoza P. (80%), V. A. Gonzales G. (10%), G. P. Espinoza A. (5%), J. Espinoza A. (5%); *Visualización*, V. M. Espinoza P. (60%), V. A. Gonzales G. (10%), G. P. Espinoza A. (10%), J. Espinoza A. (20%); *Redacción – borrador original*, V. M. Espinoza P. (60%), V. A. Gonzales G. (10%), G. P. Espinoza A. (10%), J. Espinoza A. (20%); *Redacción – revisión y edición*, V. M. Espinoza P. (60%), V. A. Gonzales G. (10%), G. P. Espinoza A. (10%), J. Espinoza A. (20%). *El aporte total normalizado de los autores fue de: V. M. Espinoza P. (65.00%), V. A. Gonzales G. (14.29%), J. Espinoza A. (11.79%) y G. P. Espinoza A. (8.93%)*.

Referencias

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar: Introducción a la evapotranspiración del cultivo (ETc)*. En *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2021). *Manual de evaluación de la huella hídrica*. AENOR.
- Bazile, D., & Santivañez, T. (2013). Introducción al estado del arte de la quinua en el mundo. En *Congreso Científico de la Quinua (Memoria)*
- Becerra, A., Bravo, X., & Membrive, V. (2013). Huella hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. *Revista de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 14(1), 56–86. https://doi.org/10.5209/rev_MARE.2013.v14.n1.42123
- Breña Puyol, A. F., & Jacobo Villa, M. A. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. Universidad Autónoma Metropolitana
- Castillo, M. (2016). *Huella hídrica del campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú en el 2014* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Cauna, D. (2019). *Huella hídrica verde para producción de la papa y quinua para el periodo 2008–2017 en la Provincia de Puno* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano Puno]. Repositorio Institucional UNAP. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/16821>
- Charaja, A. (2017). *Evapotranspiración de los cultivos papa, quinua y alfalfa mediante métodos empíricos aplicados a la cuenca del lago Titicaca del lado peruano* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano Puno]. Repositorio Institucional UNAP. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/16820>
- Condori, Bruno, Robert J. Hijmans, Roberto Quiroz, y Jean François Ledent. 2010. “Quantifying the expression of potato genetic diversity in the high Andes through growth analysis and modeling”. *Field Crops Research* 119 (1). <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.003>.
- Fairlie Reinoso, A. (2016). *La quinua en el Perú: Cadena exportadora y políticas de gestión ambiental* (Vol. 1). INTE-PUCP.
- FAO. (2002). *Quinua (*Chenopodium quinoa*), ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro* (S.

- Jacobsen, J. Izquierdo & J. P. Marathee, Eds.; A. Mujica, Trad.). FAO.
- FAO. (2012). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2010–2011*. FAO.
- FAO. (2016). *Guía del cultivo de quinua*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Fattorelli, S., & Fernandez, P. C. (2011). *Diseño hidrológico*. Wasa-GN.
- Gamez, W. (2010). *Texto básico de hidrología*. Universidad Nacional Agraria.
- García Villanueva, J., Huahuachampi, J., & Soto, L. (2017). Determinación de la demanda hídrica del cultivo de quinua QML01 (*Chenopodium quinoa* Willd) en La Molina. *Anales Científicos*, 78(2), 187–196. <https://doi.org/10.21704/ac.v78i2.1057>
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Mendoza, J., & Huanca, R. (2008). Crop water use indicators to quantify the flexible phenology of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to drought stress. *Field Crops Research*, 108(2), 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.04.008>
- Guevara, E., & Cartaya, H. (2004). *Hidrología ambiental*. Universidad de Carabobo.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2009). *Water footprint manual: State of the art 2009*. Water Footprint Network. <http://www.waterfootprint.org/>
- Lovarelli, D., Bacenetti, J., & Fiala, M. (2016). Water footprint of crop productions: A review. *Science of the Total Environment*, 548–549, 236–251. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.022>
- Mamani, (2018). *Determinación de la huella hídrica de los cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.) y quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), mediante métodos indirectos, en la cuenca del río Ilave* [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Altiplano Puno]. Repositorio Institucional UNAP. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/16819>
- Martin de Santa Olalla, F., Lopez, F., Prudencio, & Calera, A. (2005). *Agua y agronomía* (Vol. 8). Ayarq.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577–1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- MINAG-OEEE. (2013). *Valor bruto de la producción agropecuaria*. Lima, Perú.
- Ministerio de Agricultura. (2012). Quinua: Perú campo fértil para sus inversiones y desarrollo de sus exportaciones. Dirección General de Competitividad Agraria.
- Ministerio de Agricultura. (2013). *Quinua: Principales aspectos de la cadena productiva*. Dirección General de Competitividad Agraria.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2015). *Huella hídrica del Perú*. Lima, Perú.
- Mujica, A. (2015). Capítulo II: Agronomía del cultivo de la quinua. En *Libro 3*.
- Pellicer Martínez, F. (2014). *Huella hídrica y planificación hidrológica: Aplicación en la demarcación hidrográfica del Segura*
- Pérez, G. (2015). *Manual de hidrología aplicada*. Lima, Perú.
- Ramírez-Cando, L. J., Vilches Moreno, R. J., Lizano Acevedo, R. X., Pinzón Colmenares, I. E., & Sandoval Mena, E. L. (2017). Estimación de la huella hídrica y de carbono en los cultivos comunitarios de quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd) correspondientes a la zona central de los Andes ecuatorianos. *Anales Científicos*, 78(2). <https://doi.org/10.21704/ac.v78i2.1054>
- Requena, A., Nordenström, G., & Castillo, E. (2010). Coeficientes de cultivo de manzano en período de formación, obtenidos en lisímetros

- de drenaje. *EEA INTA Alto Valle*, 1, 1–7. <https://hdl.handle.net/20.500.12123/21791>
- Tapia, M., & Fries, A. (2007). *Guía de campo de los cultivos andinos*. Lima, Perú: FAO y ANPE.
- Thaler, S., Zessner, M., Bertran De Lis, F., Kreuzinger, N., & Fehringer, R. (2012). Considerations on methodological challenges for water footprint calculations. *Water Science and Technology*, 65(7). <https://doi.org/10.2166/wst.2012.006>
- Vásquez, A., Mejía, A., Faustino, J., Terán, R., & Vásquez, I. (2016). *Manejo y gestión de cuencas hidrográficas*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Villón, M. (2002). *Hidrología general*. Lima, Perú: Editorial Villón.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY) International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>