

Estimación de la huella hídrica azul, verde y gris según elementos climáticos asociados al cultivo de camote en zonas áridas

Estimation of the blue, green and grey water footprint according to climatic elements associated with sweet potato cultivation in arid zones

Angel Dario Canllahui Aquisé^{1,*}

¹ Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto, Moquegua, Perú, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0773-4061>, CORREO: angdar05@gmail.com

Resumen

El estudio se desarrolló en Moquegua por ser una zona árida con baja precipitación efectiva y alta demanda evaporativa, condiciones que incrementan el uso de agua en la agricultura. Se analizaron variables climáticas como temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, además de la evapotranspiración de referencia y los componentes azul, verde y gris de la huella hídrica del cultivo de camote. El objetivo fue estimar la huella hídrica total del cultivo en función de los elementos climáticos predominantes. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental y nivel descriptivo-analítico. Los registros meteorológicos de las estaciones Moquegua y Algarrobal-Ilo fueron procesados mediante el software CROPWAT 8.0 y el método Penman-Monteith. Los resultados mostraron valores promedio de evapotranspiración de 3,48 mm/día para Moquegua y 3,53 mm/día para Algarrobal-Ilo, sin diferencias estadísticas significativas. Asimismo, la huella hídrica total alcanzó 612,95 m³/t y 611,97 m³/t, respectivamente, con predominio del componente azul debido a la limitada precipitación efectiva. El estudio aporta información técnica relevante para mejorar la gestión eficiente del recurso hídrico en el cultivo de camote bajo condiciones áridas.

Palabras clave: CROPWAT 8.0, demanda hídrica, eficiencia hídrica, evapotranspiración, Penman-Monteith, riego agrícola.

Abstract

The study was conducted in Moquegua because it is an arid zone characterized by low effective precipitation and high evaporative demand, conditions that increase agricultural water use. Climatic variables such as temperature, relative humidity, solar radiation, and wind speed were analyzed, together with reference evapotranspiration and the blue, green, and grey components of the water footprint of sweet potato cultivation. The objective was to estimate the total water footprint of the crop based on the predominant climatic elements. The research followed a quantitative approach with a non-experimental and descriptive-analytical design. Meteorological records from the Moquegua and Algarrobal-Ilo stations were processed using CROPWAT 8.0 software and the Penman-Monteith method. The results showed average evapotranspiration values of 3.48 mm/day for Moquegua and 3.53 mm/day for Algarrobal-Ilo, without statistically significant differences. Likewise, the total water footprint reached 612.95 m³/t and 611.97 m³/t, respectively, with predominance of the blue component due to limited effective precipitation. The study provides relevant technical information to improve efficient water resource management in sweet potato cultivation under arid conditions.

Keywords: CROPWAT 8.0, evapotranspiration, hydraulic efficiency, irrigation management, Penman-Monteith, water demand.

Recibido: 17/12/2025

Aceptado: 09/03/2026

Publicado: 31/03/2026

*Autor para correspondencia: angdar05@gmail.com

Cómo citar: Canllahui Aquisé, A. D. (2026). Estimación de la huella hídrica azul, verde y gris según elementos climáticos asociados al cultivo de camote en zonas áridas. *Revista De Investigaciones*, 15(1), 17-26. <https://doi.org/10.26788/ri.v15i1.7474>

Introducción

El camote (*Ipomoea batatas* L.) es un cultivo de gran relevancia a nivel mundial, cultivado en más de cien países y considerado el quinto alimento más importante en los países en desarrollo (Cusumano y Zamudio, 2013). Su versatilidad y valor nutricional lo posicionan como una alternativa viable para fortalecer la seguridad alimentaria, especialmente en comunidades rurales con limitaciones de recursos (Basurto et al., 2015; Figueroa, 2015; Huaman, 1992). Entre sus variedades, el camote de pulpa anaranjada (OFSP) ha adquirido especial importancia por su contribución en la mitigación de la deficiencia de vitamina A mediante procesos de biofortificación (Low et al., 2007).

De acuerdo con la Organización de las Naciones para la Alimentación y la Agricultura (FAOSTAT), la superficie cultivada de camote en el mundo alcanzó aproximadamente 9,2 millones de hectáreas, con una producción total de 112,8 millones de toneladas. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2017), la población mundial superará los 9 mil millones de habitantes hacia el año 2050, lo que demandará un incremento significativo de la producción de alimentos para garantizar la seguridad alimentaria global. Frente a este escenario, el desafío agrícola radica en identificar cultivos resilientes y productivos que contribuyan a sostener la seguridad alimentaria bajo condiciones de cambio climático y limitación hídrica.

En el Perú, la diversidad agroecológica se expresa en la coexistencia de múltiples climas, suelos y pisos altitudinales, que determinan distintos sistemas de producción agrícola (Maletta, 2017; Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2015). En la costa peruana, los valles irrigados por ríos que descienden desde la vertiente occidental de los Andes han permitido desarrollar sistemas agrícolas de mediana y alta tecnología. Un ejemplo destacado es el valle de Cañete, en el departamento de Lima, con más de 20 000 ha agrícolas, de las cuales entre 5 000 y 7 000 ha corresponden anualmente al cultivo de camote, mayoritariamente conducido por pequeños productores, que representan alrededor del 75

% del total de agricultores del valle (Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI] y Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2012).

El cultivo de camote se extiende desde los valles costeros hasta los interandinos y zonas bajas de la selva, entre los 500 y 2 000 m s. n. m. (Villagomez, 2015). En regiones costeras, como Cañete, su expansión ha sido notable: en las últimas tres décadas la superficie cultivada aumentó en 24 %, los rendimientos en 37 % y la producción total en 61 %. Este crecimiento se asocia con la factibilidad técnica de su producción durante todo el año y la adaptabilidad del cultivo a diversas condiciones climáticas (Fonseca et al., 2002).

Sin embargo, los modelos agrícolas tradicionales, orientados principalmente a la maximización de la productividad, suelen limitar la sostenibilidad y la resiliencia de los agroecosistemas. Alcanzar una agricultura sostenible requiere un enfoque integral que incorpore los componentes sociales, económicos, ecológicos y tecnológicos propios de cada territorio.

En el contexto peruano, la estructura agraria está dominada por la pequeña agricultura familiar: alrededor del 89 % de los productores poseen unidades menores a 5 ha, clasificadas como minifundios. Los productores medianos representan cerca del 10 %, mientras que los grandes productores apenas alcanzan el 0,1 % del total (Vásquez, 2017). A nivel nacional, existen aproximadamente 2,13 millones de unidades agropecuarias consideradas como pequeñas explotaciones familiares, en contraste con unas 61 000 unidades que operan bajo sistemas de producción empresarial (Maletta, 2017).

A pesar de la importancia agrícola y nutricional del camote, en regiones del sur del Perú como Moquegua aún existen limitadas investigaciones relacionadas con el comportamiento agronómico y productivo del camote de pulpa anaranjada bajo condiciones locales de clima, disponibilidad hídrica y manejo agrícola. Los estudios desarrollados en el país se han concentrado principalmente en zonas costeras tradicionales, sin considerar suficientemente las características edafoclimáticas y productivas propias de Moquegua. Está limitada evidencia técnica dificulta la generación de

estrategias adaptadas que permitan mejorar la productividad, sostenibilidad y calidad nutricional del cultivo en la región, evidenciando un vacío de investigación que justifica el desarrollo del presente estudio.

En ese contexto, tiene como objetivo estimar la huella hídrica azul, verde y gris del cultivo de camote en el valle de Moquegua, en función de los elementos climáticos predominantes, mediante la aplicación del método FAO Penman-Monteith y el software CROPWAT 8.0, a fin de generar información técnica que contribuya a la sostenibilidad de la producción agrícola, la optimización del uso del agua y el fortalecimiento de la seguridad alimentaria en la región.

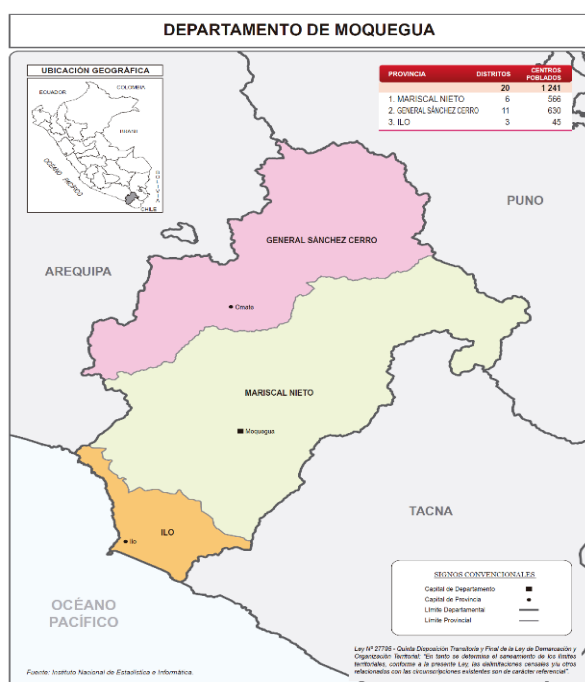
Métodos

Ámbito o lugar de estudio

El departamento de Moquegua, ubicado en la zona sur del Perú, se encuentra comprendido entre los 15°17' y 17°23' de latitud sur. Limita al norte con Arequipa y Puno, al este con Puno y Tacna, al sur con Tacna, y al oeste con el océano Pacífico y parte de Arequipa.

Figura 1

Mapa de ubicación de la región de Moquegua



Nota: Obtenido del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).

Descripción de métodos

La investigación se desarrolló en el valle de Moquegua durante el período 2014 – 2023, bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y analítico, con nivel descriptivo-comparativo y diseño no experimental. La información climática fue obtenida de los registros oficiales de las estaciones meteorológicas Moquegua y Algarrobal-Ilo del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Se analizaron las variables climáticas temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y precipitación efectiva para estimar la evapotranspiración de referencia mediante el método FAO Penman-Monteith. El procesamiento de la información se realizó utilizando los programas CROPWAT 8.0 y CLIMWAT 2.0. Para el análisis estadístico comparativo se emplearon 12 registros mensuales por estación (enero–diciembre), correspondientes al período de estudio. Cuanto más detallada sea la información recopilada, más precisa será la estimación de la huella hídrica del cultivo (ANA, 2009).

Determinación de la ETP por el método de Penman-Monteith (OE1)

En mayo de 1990, la FAO, en colaboración con la Comisión Internacional de Riego y Drenaje y la Organización Meteorológica Mundial, organizó un grupo de expertos e investigadores en riego para revisar los métodos de riego propuestos previamente por la FAO, las estimaciones de las necesidades de agua de los cultivos y desarrollar cuestiones relacionadas. revisiones y recomendaciones para la actualización de procedimientos al respecto. A partir de las recomendaciones emitidas por el panel de expertos convocado por la FAO, la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el método FAO Penman-Monteith fue adoptado como el procedimiento estándar para la estimación de la evapotranspiración de referencia.

El método Penman-Monte de la FAO requiere datos meteorológicos como radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento, así como datos de ubicación geográfica de estaciones como latitud, longitud y altitud. La

ecuación de Penman-Monteith FAO se deriva de la ecuación de Penman-Monteith original y de las ecuaciones aerodinámicas y de arrastre de cultivos de la siguiente manera:

Para la determinación de la evapotranspiración de referencia se utilizó la ecuación de FAO Penman-Monteith paquete CROPWAT 8.0:

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

Donde:

ET_o = evapotranspiración de referencia (mm/día⁻¹)

R_n = radiación neta en la superficie del cultivo (MJm⁻²día⁻¹)

G = flujo del calor de suelo (MJm⁻²día⁻¹)

T = temperatura media del aire a 2 metros de altura (°C)

u₂ = velocidad del viento a 2 metros de altura (ms⁻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)

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa°C⁻¹)

γ = constante psicométrico (kPa°C⁻¹)

Determinación de las huellas hídricas en el cultivo de camote Moquegua (OE2)

Cuantificación huella hídrica azul

La huella hídrica azul (HH Proc, azul [m³/ton]), Ecuación 4, corresponde al cociente entre el agua aprovechada por el cultivo proveniente de riego (CWU_{riego}), y (Y) el rendimiento del cultivo (Ton/m) (Hoekstra et al., 2011).

Para la determinación de la huella hídrica azul del cultivo de camote se empleó información climática correspondiente al período 2014 – 2023, obtenida de las estaciones meteorológicas Moquegua y Algarrobal-Ilo del SENAMHI. El análisis comprendió diez años de registros climáticos históricos utilizados para la estimación de la evapotranspiración del cultivo y de los requerimientos de riego mediante el software CROPWAT 8.0. Asimismo, para la comparación estadística entre estaciones se consideraron 12 registros mensuales por estación, correspondientes a los valores promedio de enero a diciembre.

La cantidad de agua que aprovecha el cultivo proveniente del riego corresponde a la diferencia entre los requerimientos hídricos y la precipitación efectiva. Siendo el valor de requerimiento de riego del cultivo el que se divide por el rendimiento del mismo, entendiéndose este último como la cantidad de producto final cosechado, dividido por el área en que fue producido.

Cálculo huella hídrica azul mediante la ecuación siguiente:

$$HHProc, azul = \frac{CWU_{riego}}{Y}$$

Dónde:

- CWU_{riego} = requerimientos de riego de los cultivos (m)
- Y = Rendimiento del cultivo (Ton/ha)

Para estimar las necesidades hídricas del cultivo, se empleó el software CROPWAT 8.0, el cual permitió calcular los requerimientos de riego a partir de la evaporación potencial y de las características específicas del suelo y del cultivo.

Cuantificación huella hídrica verde

De acuerdo a lo mencionado anteriormente la huella hídrica verde corresponde al cociente entre el agua utilizada por el cultivo proveniente de precipitación y el rendimiento del cultivo (Hoekstra et al., 2011). La cantidad de agua que es aprovechada por el cultivo proveniente de precipitación es equivalente a la precipitación efectiva, por lo cual la huella hídrica verde puede entenderse como la razón entre la precipitación efectiva del lugar donde se ubica el cultivo de camote R12 con el rendimiento del mismo.

Cálculo huella hídrica verde

$$HHproc, verde = \frac{P_{pef}}{Y}$$

Dónde:

- HH proc, verde = Huella Hídrica Verde [m³/ton]
- P_{pef} = Precipitación Efectiva en metros [m]
- Y = Rendimiento [ton/m²]

Cuantificación huella hídrica gris

La huella hídrica gris se interpreta como el volumen de agua necesario para asimilar los contaminantes generados por la actividad agrícola, aunque se evita llamarla “requerimiento” de dilución para no confundirla con la simple necesidad de dispersar contaminantes. Este indicador refleja el nivel de contaminación: cuanto menor es su valor, menor es el impacto ambiental. En el caso del cultivo de camote, los fertilizantes más comunes contienen nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), aplicados en diversas proporciones durante su ciclo productivo.

$$HH_{GRIS} = \frac{L}{Y * (C_{max} - C_{nat})} = \frac{a * appl}{Y * (C_{max} - C_{nat})} \left(\frac{m^3}{t} \right)$$

Dónde:

- a = Factor de lixiviación.
- $appl$ = aplicación del producto.
- C_{max} = Concentración máxima.

Estimación de la huella hídrica Total

Para determinar el consumo de huella hídrica azul (irrigación), verde (precipitación) y Gris (Contaminada) en la fase agrícola del área de estudio, se empleó el modelo CROPWAT, desarrollado por la FAO para calcular los requerimientos de agua del cultivo y en últimas apoyar el diseño y optimización de los sistemas de irrigación.

Teniendo en cuenta el manual de evaluación de la huella hídrica desarrollado por Hoekstra et al. (2011) la estimación la huella hídrica total del proceso del cultivo de camote R12 (WF_{proc}) es la suma de los componentes verde, azul y gris.

La huella hídrica es una medida del consumo y la contaminación del agua dulce, incluidas dimensiones directas e indirectas, y se aplica a un individuo, producto, proceso, región o país.

$$HH_{TOTAL} = HH_{AZUL} + HH_{VERDE} + HH_{GRIS} \left(\frac{volumen}{masa} \right)$$

Donde:

- HH_{AZUL} : Huella hídrica azul (m^3 / t)
- HH_{VERDE} : Huella hídrica verde (m^3 / t)
- HH_{GRIS} : Huella hídrica gris (m^3 / t)
- HH_{TOTAL} : Huella hídrica total (m^3 / t)

Aplicación del análisis de variancia

Con el propósito de evaluar la existencia de diferencias estadísticas entre las estaciones meteorológicas Moquegua y Algarrobal-Ilo respecto a las variables climáticas y los componentes de la huella hídrica del cultivo de camote, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor. El factor evaluado correspondió a la estación meteorológica, mientras que las variables de respuesta fueron la evapotranspiración de referencia (ET_0), la precipitación efectiva y las huellas hídricas azul, verde y gris.

Para el análisis estadístico se emplearon los promedios mensuales multianuales obtenidos a partir de los registros climáticos correspondientes al período 2014 – 2023. En consecuencia, se consideraron doce observaciones por estación, representadas por los valores promedio de los meses de enero a diciembre. No se utilizaron los registros individuales de cada año, sino los promedios mensuales calculados para toda la serie histórica de estudio.

El análisis se realizó con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. La hipótesis nula (H_0) planteó que no existen diferencias significativas entre las medias de las estaciones evaluadas, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) estableció que existe al menos una diferencia significativa entre dichas medias.

El modelo lineal aditivo utilizado en el análisis de varianza se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

- Y_{ij} = representa datos de la estación meteorológica j del grupo i .
- μ = media general de todas las observaciones
- α_i = el efecto del grupo i (la diferencia entre la media del grupo i y la media general).
- ε_{ij} = error aleatorio (Flores et al., 2019).

Resultados y discusión

Determinación de la etp y necesidad de agua

La evapotranspiración, es la pérdida de agua por evaporación del suelo y transpiración

de las plantas, es mayor en épocas de calor intenso (verano) y menor en épocas más frías. La necesidad de riego está en función de las variaciones de la temperatura, humedad relativa, radiación solar y viento, la demanda hídrica en la región de Moquegua está de acuerdo al su clima árido y semiárido, con alta radiación solar, lo que incrementa la necesidad de riego. sistema de riego; para el presente trabajo de investigación se ha procedido utilizando los modelos de cropwat y Climwat; que a continuación se detalla los resultados por los procedimientos seguidos.

Determinación ETP por el método de Penman-Monteith

El método de Penman-Monteith es un método sofisticado y físicamente basado que proporciona una estimación robusta de la evapotranspiración de referencia. Su complejidad requiere el uso de herramientas computacionales, pero su precisión lo convierte en el método preferido por muchos profesionales en agricultura e hidrología. Una vez obtenida la ETo , se multiplica por el coeficiente de cultivo (Kc) para obtener la evapotranspiración del cultivo específico (ETc) (Allen et al., 2006).

La evapotranspiración (ETP) tiene varios significados y es un parámetro clave en diversos campos del balance energético del sistema suelo-atmósfera, la estimación del estrés hídrico de las plantas, la predicción del rendimiento, el cálculo del balance hídrico y la caracterización del clima, por nombrar algunos aspectos. Como tal, ha atraído el interés de varias disciplinas. Sin embargo, dada la complejidad del proceso y la variedad de factores de los que depende, es difícil determinar el alcance y la intensidad del fenómeno. Prueba de ello es la riqueza y variedad de métodos o modelos que se han desarrollado y cuyos métodos o modelos finales todavía se están desarrollando en la actualidad (Allen et al., 2006).

Se presenta los valores mensuales de evapotranspiración de referencia (ETo) calculados mediante el método FAO Penman-Monteith para la estación meteorológica Moquegua. Los resultados muestran que la ETo varía entre 2,3 mm/día y 4,5 mm/día a lo largo del año, registrándose el valor mínimo en junio y el máximo en noviembre. Asimismo, se obtuvo una evapotranspiración de referencia promedio anual de 3,48 mm/día (Tabla 1).

Tabla 1

Evapotranspiración de referencia (ETo) calculada mediante el método FAO Penman-Monteith para la estación meteorológica Moquegua

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	H R %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m ² /día	ETo mm/día
Enero	13,2	26,7	67	2	7,3	22,0	4,0
Febrero	13,7	26,8	68	2	6,8	20,8	3,8
Marzo	13,4	27,1	66	3	7,9	21,3	3,8
Abril	11,9	26,5	63	2	9,2	20,9	3,4
Mayo	10,6	26,4	58	2	9,5	18,8	2,7
Junio	9,8	26,0	55	2	9,5	17,5	2,3
Julio	9,5	26,0	52	2	9,5	18,1	2,4
Agosto	10,0	26,6	49	2	9,6	20,3	2,9
Septiembre	10,2	27,0	51	2	9,6	22,8	3,6
Octubre	10,9	27,3	50	2	10,0	25,3	4,2
Noviembre	11,4	27,1	55	2	10,1	26,2	4,5
Diciembre	12,4	27,0	60	2	8,8	24,4	4,3
Promedio	11,4	26,7	58	2	9,0	21,5	3,48

Nota: Balance climático mensual con temperaturas, humedad, viento, radiación solar e indicadores de evapotranspiración, útil para comprender la dinámica ambiental y planificar actividades agrícolas o de gestión de recursos naturales.

Los mayores valores de ETo se presentan entre octubre y diciembre, asociados a una mayor radiación solar, mayor temperatura del aire y mayor

número de horas de insolación. Por el contrario, durante los meses de mayo a agosto se observan los valores más bajos de ETo debido a la disminución

de la radiación solar y de las temperaturas mínimas. Estos resultados evidencian la influencia de los elementos climáticos sobre la demanda atmosférica de agua y constituyen la base para la estimación de los requerimientos hídricos del cultivo de camote en el valle de Moquegua.

La evapotranspiración de referencia (ET_r) sirve como un indicador estándar de la demanda atmosférica de agua para la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. No se refiere a una planta o tipo de suelo específico, sino que representa una superficie de referencia, generalmente un

cultivo de hierba corta y bien regada. La ET_r es una herramienta crucial para la gestión eficiente del agua en la agricultura y la planificación de recursos hídricos, proporcionando una medida estandarizada de la demanda atmosférica de agua.

Se muestra el resultado de la evapotranspiración de referencia de mayor valor que corresponden al periodo de verano es decir en los meses de octubre hasta el mes de febrero con valores máximos de 4,43 mm/día (noviembre) y el de menor valor fue de 4,03 mm/día (febrero) y los de más meses de marzo a setiembre con valores inferiores (Tabla 2).

Tabla 2

Cálculo de ETo para el cultivo de Camote en la estación Algarrobal - Ilo

Mes	T. Min °C	T. Max °C	HR %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m ² /día	ETo mm/día
Enero	18,5	29,8	77	2	7,3	22,0	4,16
Febrero	18,9	30,9	76	2	6,8	20,8	4,03
Marzo	17,9	30,0	77	2	7,9	21,2	3,97
Abril	15,7	27,6	79	2	9,2	20,8	3,53
Mayo	14,1	24,8	81	2	9,5	18,7	2,81
Junio	13,0	22,4	82	1	9,5	17,4	2,36
Julio	12,5	21,2	82	2	9,5	18,0	2,39
Agosto	12,6	20,9	82	2	9,6	20,2	2,83
Septiembre	13,3	21,7	82	2	9,6	22,8	3,43
Octubre	14,3	23,6	79	2	10,0	25,3	4,05
Noviembre	15,5	25,6	77	2	10,1	26,2	4,43
Diciembre	17,1	27,8	77	2	8,8	24,4	4,37
Promedio	15,3	25,5	79	2	9,0	21,5	3,53

Nota: Condiciones climáticas varían a lo largo del año, destacando la relación entre temperatura, radiación solar y evapotranspiración, factores esenciales para la gestión agrícola y ambiental

Monteith se ha aplicado la estadística descriptiva cuyas medias se obtuvieron valores muy similares 3,530 mm/día para la estación algarrobal-Ilo y

3,477 mm/día para la estación meteorológica de Moquegua. y las desviaciones son 0,725 mm/día para la estación meteorológica de algarrobal-Ilo y 0,741 mm/día para de Moquegua (Tabla 3).

Tabla 3

Promedio de ETP por estaciones meteorológicas de Moquegua y Algarrobal - Ilo

Estación	N	Media(mm/día)	StDev (mm/día)	95 % CI
Moquegua	12	3,477	0,741	(3,039; 3,914)
Algarrobal-Ilo	12	3,530	0,725	(3,109; 3,951)

Nota: Proceso de evapotranspiración de referencia ETo estimado por el método de Penman

Discusión

Los resultados obtenidos muestran que la evapotranspiración de referencia (ET_o) en el valle de Moquegua presentó una variación estacional importante, alcanzando un valor promedio de 3,48 mm/día en la estación meteorológica Moquegua. Estos resultados son consistentes con las características climáticas de las zonas áridas y semiáridas de la costa sur peruana, donde la elevada radiación solar, las altas temperaturas y la baja humedad relativa incrementan la demanda atmosférica de agua. En este sentido, Allen et al. (2006), señalan que la radiación solar, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento constituyen las principales variables que controlan la evapotranspiración estimada mediante el método FAO Penman-Monteith.

La comparación entre las estaciones meteorológicas Moquegua y Algarrobal-Ilo evidenció diferencias asociadas a sus condiciones microclimáticas. La estación Algarrobal-Ilo presenta influencia marítima que contribuye a moderar la temperatura y la demanda evaporativa, mientras que la estación Moquegua registra condiciones más continentales que favorecen mayores requerimientos hídricos del cultivo. Estos resultados coinciden con lo reportado por Flores et al. (2019), quienes destacan que la disponibilidad y calidad de la información meteorológica constituyen factores determinantes para la estimación adecuada de la evapotranspiración de referencia en regiones áridas.

Respecto a la huella hídrica del cultivo de camote, se obtuvo una huella hídrica total promedio de 612,46 m³/t, calculada a partir de los valores estimados para ambas estaciones meteorológicas. Esta estuvo conformada por una huella hídrica azul de 582,68 m³/t, una huella verde de 5,61 m³/t y una huella gris de 24,17 m³/t. Los resultados evidencian un claro predominio del componente azul, que representa más del 95 % de la huella hídrica total. Este comportamiento se explica por las condiciones climáticas propias del valle de Moquegua, caracterizadas por precipitaciones escasas e irregulares, lo que genera una elevada dependencia del agua de riego para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo.

Los resultados obtenidos difieren de los reportados por Mekonnen y Hoekstra (2011), quienes encontraron que en numerosos cultivos agrícolas a nivel mundial la huella hídrica verde representa la mayor proporción de la huella total. Esta diferencia puede atribuirse a que gran parte de los estudios globales consideran regiones con mayor disponibilidad de precipitación efectiva, mientras que el valle de Moquegua se ubica en una zona árida donde la contribución del agua de lluvia es limitada durante gran parte del ciclo productivo. En consecuencia, la producción agrícola depende principalmente del suministro de agua proveniente de sistemas de riego.

La reducida participación de la huella hídrica verde observada en esta investigación confirma la escasa contribución de la precipitación efectiva al desarrollo del cultivo de camote en el valle de Moquegua. Este resultado coincide con las características climáticas descritas para la costa sur peruana, donde la agricultura depende principalmente de recursos hídricos regulados y de infraestructura de riego para garantizar la producción agrícola.

Por otra parte, la huella hídrica gris promedio obtenida fue de 24,17 m³/ton, valor asociado al uso de fertilizantes y al volumen de agua requerido para asimilar la carga contaminante generada por las actividades agrícolas. Aunque su contribución a la huella total fue significativamente menor que la componente azul, su importancia radica en los posibles impactos sobre la calidad de los recursos hídricos. De acuerdo con Hoekstra et al. (2011), la huella hídrica gris constituye un indicador del volumen de agua necesario para cumplir los estándares de calidad ambiental frente a la contaminación derivada de las actividades productivas.

Los resultados también evidencian que la eficiencia en el uso del agua constituye un aspecto clave para la sostenibilidad de la producción de camote en condiciones áridas. Alam et al. (2023), demostraron que la implementación de estrategias de manejo eficiente del riego permite reducir el consumo hídrico sin afectar significativamente el rendimiento agrícola. En consecuencia, la adopción de tecnologías de riego tecnificado y prácticas de manejo agronómico adecuadas podrían contribuir

a disminuir la huella hídrica azul del cultivo en el valle de Moquegua.

A nivel nacional, los resultados obtenidos confirman la tendencia reportada por la Autoridad Nacional del Agua [ANA] (2015), que identifica a la agricultura como el principal sector consumidor de agua en el Perú y resalta la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos. Asimismo, los resultados muestran que la disponibilidad de agua constituye un factor estratégico para la sostenibilidad de la producción agrícola en regiones áridas y semiáridas del país.

Finalmente, los resultados obtenidos demuestran que los elementos climáticos influyen directamente sobre la evapotranspiración y, por consiguiente, sobre la huella hídrica del cultivo de camote. La elevada dependencia del agua de riego observada en el valle de Moquegua pone de manifiesto la necesidad de fortalecer la gestión integrada de los recursos hídricos, promoviendo estrategias de adaptación que permitan incrementar la eficiencia del uso del agua frente a escenarios futuros de variabilidad y cambio climático.

Conclusiones

La evapotranspiración de referencia estimada mediante el método FAO Penman–Monteith fue de 3,48 mm/día en la estación Moquegua y 3,53 mm/día en Algarrobal–Ilo, sin diferencias estadísticas significativas entre ambas estaciones ($p > 0,05$), lo que evidencia condiciones climáticas similares respecto a la demanda hídrica atmosférica.

La huella hídrica total del cultivo de camote alcanzó un valor promedio de 612,46 m³/ton, con predominio de la componente azul (582,68 m³/ton), lo que demuestra una alta dependencia del agua de riego debido a las condiciones áridas y a la escasa precipitación efectiva en el valle de Moquegua.

Los elementos climáticos, especialmente la temperatura, la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento, influyen directamente en la evapotranspiración y en la magnitud de la huella hídrica del cultivo.

El estudio constituye una línea base técnica para la evaluación de la sostenibilidad hídrica del

cultivo de camote en la región de Moquegua y aporta información útil para la planificación del riego y la gestión eficiente de los recursos hídricos en zonas áridas.

Referencias

- Alam, J., Mahmud, A. Al, Gaber, A., & Hossain, A. (2023). Energy efficiency and water use indices for sweet potato production in Bangladesh. *Journal of Water and Climate Change*, 14(2), 576–588. <https://iwaponline.com/jwcc/article/14/2/576/93281>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (N°56)*. FAO.
- Autoridad Nacional del Agua. (2009). *Huella hídrica en el Perú: Sector agropecuario*. Autoridad Nacional del Agua. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Huella hídrica del sector agropecuario del Perú*. Autoridad Nacional del Agua. <https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files>
- Basurto, F., Martínez, D., Rodríguez, T., Mendoza, M., Evangelista, V., Castro, D., & Vailón, V. (2015). Conocimiento actual del cultivo de camote (*Ipomoea batatas* Lam.) en México. *Agroproductividad*, 8(1), 30–34. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/635>
- Cusumano, C., & Zamudio, N. (2013). *Manual técnico para el cultivo de batata (camote o boniato) en la provincia de Tucumán (Argentina)*. Ediciones INTA. <https://es.scribd.com/document/383555145/script-tmp-manual-batata>
- Doorenbos, J., Kassam, A. H., & Bentvelsen, C. L. M. (1979). *Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <https://www.researchgate.net/publication>

- Figueroa, S. (2015). *Evaluación de dos sistemas de producción de semilla prebásica de camote (Ipomoea batatas L.)* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2084>
- Flores, E., Silva, C., & Flores, E. (2019). Modelación de la evapotranspiración potencial en el Altiplano de Puno. *Ciencia y Desarrollo*, 20, 83–90.
- Fonseca, C., Zuger, R., Walker, T., & Molina, J. (2002). *Estudio de impacto de la adopción de las nuevas variedades de camote liberadas por el INIA en la costa central del Perú: Caso Valle de Cañete*. Centro Internacional de la Papa (CIP). <https://acortar.link/CPbHzN>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Earthscan. <https://waterfootprint.org/en/resources/publications/>
- Huamán, Z. (1992). *Botánica sistemática y morfología de la planta de batata o camote*. Centro Internacional de la Papa (CIP). <https://books.google.com.pe>
- Low, J., Arimond, M., Osman, N., Cunguara, B., Zano, F., & Tschirley, D. (2007). A food-based approach introducing orange-fleshed sweet potatoes increased vitamin A intake and serum retinol concentrations in young children in rural Mozambique. *The Journal of Nutrition*, 137(5), 1320–1327. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17449599/>
- Maletta, H. (2017). *La pequeña agricultura familiar en el Perú: Una tipología microrregionalizada*. Consorcio de Investigación Económica y Social (CIES) y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <https://cies.org.pe/publicaciones/la-pequena-agricultura-familiar-en-el-peru>
- 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://www.waterfootprint.org/resources>
- Ministerio de Agricultura y Riego, & Autoridad Nacional del Agua. (2012). *Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú*. Ministerio de Agricultura y Riego y Autoridad Nacional del Agua. <https://www.ana.gob.pe/portal>
- Tabari, H., Kisi, O., Ezani, A., & Hosseinzadeh Talaei, P. (2012). SVM, ANFIS, regression and climate-based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment. *Journal of Hydrology*, 444–445, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.007>
- UNESCO. (2015). *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas*. Ediciones WWDR, UNESCO-IHE. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000231823>
- Valverde, N. C. (2023). *Sostenibilidad del cultivo de camote (Ipomoea batatas L.) en el valle de Cañete, Perú* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5610>
- Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C., & Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de la ingeniería de riegos*. Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://es.scribd.com/document/743912857>
- Villagómez, M. (2015). *El cultivo de camote*. Departamento de Fitotecnia, Programa de Raíces y Tuberosas, Universidad Nacional Agraria La Molina.

