

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DEL CULTIVO DE LA PAPA (*Solanum tuberosum*) EN LA REGIÓN PUNO, 2019 - 2020

PRESENTADO POR:

MIRIAM GIANELLA HERRERA LOZANO

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL**

**PUNO – PERÚ
2021**

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

**EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DEL CULTIVO DE LA PAPA
(*Solanum tuberosum*) EN LA REGIÓN PUNO, 2019 - 2020**

PRESENTADO POR:

MIRIAM GIANELLA HERRERA LOZANO

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL**


APROBADO POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE:



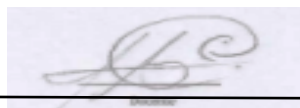
Mg. JULIO WILFREDO CANO OJEDA

PRIMER MIEMBRO:



Mg. ELVIRA ANANI DURAND GOZQUETA

SEGUNDO MIEMBRO:



MSc. JOSE ELADIO NUÑEZ QUIROGA

ASESOR DE TESIS:



Ing. KATIA ELIZABETH ANDRADE LINAREZ

Área: Ciencias naturales

Sub área: Ciencias de la Tierra y Medioambientales

Disciplina: Oceanografía, Hidrología y Recursos del Agua

Especialidad: Evaluaciones y Monitoreos Ambientales, Ecosistemas Acuáticos.

Puno, 17 de febrero de 2021

DEDICATORIA

Quiero iniciar dedicando este trabajo a Nuestro Padre Creador, que con su infinita bondad nos dio la vida, para seguir su ejemplo y hacer de nuestra vida un servicio a nuestros prójimos, siempre en mi vida he tratado de seguir su ejemplo aun con mis imperfecciones.

Miriam Gianella.

AGRADECIMIENTOS

- ❖ A la Universidad Privada San Carlos de Puno, por brindarme la oportunidad de formarme como profesional dentro de su seno.
- ❖ A la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, en cuyas aulas obtuve los conocimientos y prácticas necesarias para consolidarme como profesional.
- ❖ A los docentes de la Universidad Privada San Carlos, tanto de los niveles básicos como de especialidad, quienes me transmitieron sus conocimientos y su experiencia.
- ❖ A todas aquellas personas que de forma directa e indirecta, colaboraron con la realización de este estudio y que culminan con el presente informe.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|-------------------|------|
| DEDICATORIA | i |
| AGRADECIMIENTOS | ii |
| ÍNDICE GENERAL | iii |
| ÍNDICE DE TABLAS | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS | vi |
| RESUMEN | vii |
| ABSTRACT | viii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |

CAPÍTULO I**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA OBJETO DE ESTUDIO O SOLUCIÓN**

| | |
|---------------------------------|----|
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 3 |
| 1.2. ANTECEDENTES | 5 |
| 1.2.1. A nivel internacional. | 5 |
| 1.2.2. A nivel nacional. | 8 |
| 1.2.3. A nivel local. | 10 |
| 1.3. OBJETIVOS | 12 |
| 1.3.1. Objetivo general | 12 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 12 |

CAPÍTULO II**MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

| | |
|------------------------------------------------|----|
| 2.1. MARCO TEÓRICO | 13 |
| 2.1.1. El agua (azul, verde, gris) | 13 |
| 2.1.2. Huella hídrica | 14 |
| 2.1.3. Motivos para calcular la huella hídrica | 16 |
| 2.1.4. Reducción de la huella hídrica | 16 |
| 2.1.5. Formas de medir la huella hídrica | 17 |
| 2.1.6. El cultivo de la papa | 18 |

| | | |
|--------|-----------------------|----|
| 2.2. | MARCO CONCEPTUAL | 19 |
| 2.3. | HIPÓTESIS | 20 |
| 2.3.1. | Hipótesis general | 20 |
| 2.3.2. | Hipótesis específicas | 20 |

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

| | | |
|--------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. | ZONA DE ESTUDIO | 22 |
| 3.2. | POBLACIÓN Y MUESTRA | 23 |
| 3.3. | TIPO DE INVESTIGACIÓN | 23 |
| 3.4. | METODOLOGÍA | 23 |
| 3.4.1. | Para analizar las variables climáticas relacionadas con la huella hídrica | 23 |
| 3.4.2. | Para determinar la huella hídrica del cultivo de la papa | 24 |
| 3.5. | Operacionalización de variables | 27 |
| 3.6. | Análisis estadístico | 27 |

CAPÍTULO IV

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

| | | |
|------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1. | Variables climáticas relacionadas. | 28 |
| 4.2. | Huella hídrica del cultivo de la papa (<i>Solanum tuberosum</i>). | 33 |
| 4.3. | Pruebas de hipótesis | 36 |
| | CONCLUSIONES | 39 |
| | RECOMENDACIONES | 40 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 41 |
| | ANEXOS | 44 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 01. Variables climáticas relacionadas con la huella hídrica de la papa. | 28 |
| Tabla 02. Precipitación pluvial real y efectiva relacionada con la huella hídrica de la papa. | 30 |
| Tabla 03. Radiación solar y evapotranspiración potencial relacionada con la huella hídrica de la papa. | 31 |
| Tabla 04. Parámetros del cultivo de la papa | 33 |
| Tabla 05. Evapotranspiración verde del cultivo de la papa | 34 |
| Tabla 06. Huella hídrica verde del cultivo de la papa | 35 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Mapa de ubicación del ámbito de estudio | 22 |
| Figura 2. Climograma de la región Puno | 29 |
| Figura 3. Relación entre la precipitación pluvial y la evapotranspiración | 32 |
| Figura 4. Módulo de clima en el software Cropwat 8.0 | 45 |
| Figura 5. Módulo de precipitación pluvial real y efectiva en el software Cropwat 8.0 | 45 |
| Figura 6. Módulo del cultivo en el software Cropwat 8.0 | 46 |
| Figura 7. Módulo del suelo en el software Cropwat 8.0 | 46 |
| Figura 8. Resultados de requerimiento de agua del cultivo (RAC) en el software Cropwat 8.0 | 47 |

RESUMEN

La huella hídrica juega un papel importante dentro de la planificación y conservación del recurso agua, por lo que el estudio tuvo por objetivo evaluar la huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en relación a las variables climáticas en la región Puno en el periodo octubre 2019 a marzo 2020. La metodología utilizada fue la propuesta por la FAO mediante el cálculo del requerimiento de agua del cultivo (RAC), mediante la utilización del software Cropwat 8.0 de dicha institución, la información climática fue obtenida del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), la producción del cultivo e información complementaria de la Dirección Regional de Agricultura (DRA-Puno), el análisis estadístico fue descriptivo y las prueba de hipótesis mediante correlación lineal y prueba Z para una variable. Los resultados fueron que las variables climáticas relacionadas con la huella hídrica del cultivo de la papa en la región Puno, fueron temperatura mínima $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura máxima $16.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, humedad relativa de 64%, velocidad de viento 2.2 m/s, insolación de 8.4 horas y precipitación acumulada de 748.3 mm y precipitación efectiva de 417.2 mm; la evapotranspiración potencial fue en promedio 3.55 mm/día. La evapotranspiración verde fue estimada en 383.6 mm/periodo, el uso de agua del cultivo en 3836 m³/t, el rendimiento del cultivo en 12.62 t/ha, la huella hídrica del cultivo de la papa fue estimada en 303.96 m³/t y su valorización económica en 522.81 soles. Se concluye que la huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) está en relación directa a las variables climáticas en la región Puno 2020.

Palabras clave: clima, huella hídrica, papa, verde.

ABSTRACT

The water footprint plays an important role in the planning and conservation of the water resource, for which reason the study aimed to evaluate the water footprint of the potato (*Solanum tuberosum*) crop in relation to the climatic variables in the Puno region in the period October 2019 to March 2020. The methodology used was the one proposed by FAO by calculating the crop water requirement (RAC), using the Cropwat 8.0 software of said institution, the climatic information was obtained from the National Meteorological Service and Hydrology (SENAMHI), crop production and complementary information from the Regional Directorate of Agriculture (DRA-Puno), statistical analysis was descriptive and hypothesis testing using linear correlation and Z test for one variable. The results were that the climatic variables related to the water footprint of the potato crop in the Puno region were minimum temperature -0.4°C , maximum temperature 16.3°C , relative humidity of 64%, wind speed 2.2 m / s, insolation of 8.4 hours and accumulated precipitation of 748.3 mm and effective precipitation of 417.2 mm; the potential evapotranspiration averaged 3.55 mm / day. The green evapotranspiration was estimated at 383.6 mm / period, the use of crop water at 3836 m³ / t, the crop yield at 12.62 t / ha, the water footprint of the potato crop was estimated at 303.96 m³ / t and its recovery. economic at 522.81 soles. It is concluded that the water footprint of the potato crop (*Solanum tuberosum*) is directly related to the climatic variables in the Puno 2020 region.

Keywords: climate, water footprint, potato, green.

INTRODUCCIÓN

El agua es el líquido vital del planeta Tierra, sin ella no sería posible la vida, si bien debido a su presencia nuestro planeta es denominado el planeta azul, por la gran superficie que ocupa el agua, queda claro que el agua dulce que es aquella que utilizan la mayoría de plantas cultivables está restringida a ciertas áreas geográficas y se vuelve cada vez más escasa.

Bajo esta situación el estudio de la huella hídrica juega un papel importante dentro de la conservación de este recurso, debido a que un uso excesivo del mismo puede generar un desequilibrio en su balance, en el caso particular del altiplano peruano y específicamente de la región Puno, el principal cultivo en términos de producción y productividad es la papa, su cultivo se desarrolla en condiciones de secano, es decir con la precipitación pluvial de la atmósfera.

La comprensión de la cadena productiva de un cultivo de tanta importancia, en términos de su huella hídrica, permitirá identificar el uso del agua en términos cuantitativos, en todas las fases de desarrollo del cultivo (Vernaza, 2014). El estudio se justifica en el enfoque moderno de análisis del uso consuntivo del agua por los cultivos destinados para el consumo humano directo, son metodologías que permiten determinar de forma cuantitativa el tránsito y consumo del agua, que se requiere para producir los tubérculos de papa.

Por lo que el utilizar conceptos modernos como la huella hídrica, son pertinentes en los estudios que siguen el método científico. El contar con un componente del balance hídrico como es la huella permitirá identificar la huella hídrica para planificar una cédula de cultivos apropiada a las condiciones ambientales, los resultados podrán ser expresados en términos monetarios, puesto que el agua tiene un valor económico implícito. Respecto a las implicancias prácticas los resultados del estudio serán de utilidad para un balance hídrico en la región Puno, identificando si el cultivo de la papa es

un cultivo con una huella hídrica sostenible o como estrategia de manejo se podría importar y dar paso a otros cultivos que presenten una menor huella hídrica.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel del mundo el balance hídrico permite afirmar que actualmente la actividad agrícola es la que utiliza la mayor parte del agua dulce disponible, en términos porcentuales esta actividad utiliza cerca del 70% de la misma, es decir se corresponde con una elevada huella hídrica para la actividad de la agricultura en el mundo, por lo que analizar este proceso en términos del consumo de agua para producir alimentos es un aspecto de interés dentro de la planificación racional del uso del recurso agua (Arabi, A *et al.*, 2012).

A nivel de la región Puno en la actualidad debido al cambio climático y a razones de ubicación geográfica, se evidencia variaciones importantes en la distribución de la precipitación pluvial en los últimos años, además considerando que el cultivo de la papa es el más importante de esta región (Dirección Regional Agraria, 2019), se hace de interés científico analizar la huella hídrica del mismo bajo las condiciones ambientales actuales, puesto que se desconoce una estimación precisa y actualizada de la misma.

Considerando que la mayor parte del cultivo de la papa en la región Puno se realiza con el agua de lluvia, por lo que los cálculos para estimar su huella hídrica se pueden realizar con la denominada agua “verde”, el comprender las relaciones hídricas entre la planta, el suelo y el agua, son de mucho valor para entender los procesos de uso del agua por el cultivo de la papa, lo cual implica una estimación de la huella hídrica, es

decir conocer la cantidad de agua utilizada por este cultivo para producir una cosecha de tubérculos.

La falta de la planificación de una cédula de cultivos siguiendo los criterios de uso óptimo del agua, no permite una adecuada planificación, puesto que se realizan las campañas agrícolas sin ningún criterio técnico, si bien la agricultura en la región Puno es de pequeña escala y básicamente para el autoconsumo, se debe utilizar la huella hídrica para realizar una planificación de los cultivos dentro de una programación anual, entre ellos destaca la papa, no solo por ser extensivo en la región, sino también por los bajos rendimientos observados en los últimos años.

La información climática disponible (precipitación pluvial, horas de sol, viento y otras) facilitan analizar de forma adecuada su efecto sobre la huella hídrica del cultivo de la papa, por lo que aprovechar su disponibilidad, así como la información del suelo permitirán consolidar y generar información de primera mano sobre la huella hídrica y las implicancias de la misma en una adecuada formulación de un programa de uso racional del agua.

Por lo expuesto el principal problema es estimar la huella hídrica del cultivo de la papa en la región Puno bajo las condiciones climáticas actuales, por lo cual se pretende realizar este estudio, planteando lo siguiente.

Considerando lo expuesto se planteó las siguientes interrogantes:

Problema general:

¿Cuál será la huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en relación a las variables climáticas en la región Puno en 2019 - 2020?

Problemas específicos:

- ¿Cómo se relacionan las variables climáticas con la huella hídrica de la papa en la región Puno en 2019 - 2020?
- ¿Cuánto será la huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región Puno en 2019 - 2020?

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. A nivel internacional.

Higuera & Julian (2017) en su estudio “Evaluación de indicadores de huella hídrica en la producción de un cultivo de cebolla de bulbo y papa en los municipios de Duitama y Samaca Boyacá”, realizó un análisis comparativo entre el indicador de huella hídrica aplicado al sector agrícola, generando información detallada que permite precisar, disponibilidad, demanda, contaminación y alternativas para el uso sostenible del recurso hídrico, todo, a través de la metodología de la FAO para el cálculo de huella hídrica, donde por medio del software CROPWAT 8.0 se puede conocer la huella hídrica azul, verde y gris en la producción de un cultivo de papa y cebolla en los municipios de Samaca y Duitama. La investigación determinó que para un cultivo de papa y cebolla con un ciclo fenológico entre mayo a septiembre se tienen un indicador de huella hídrica de 494,93 m³/Ton y 591,32 m³/ton respectivamente, siendo el componente gris el que mayor incidencia tiene en el resultado total de dicho indicador. La comparación con el Estudio Nacional De Agua 2014- ENA-, donde se pudo establecer que para el caso de la papa son muy aproximados los datos obtenidos, pero al momento de analizar y comparar los resultados del cultivo de cebolla, hubo diferencias significativas entre ambos, adicionalmente, se formularon alternativas que respondieron a las problemáticas definidas en esta investigación, enfocándose principalmente en aspectos agronómicos y de gobernanza del agua.

López & Millán (2017) en la investigación “Evaluación teórica de la huella hídrica en el cultivo de papa en Boyacá (fase 1)”, señala que en Colombia, la producción de

papa es una de las actividades agrícolas más importantes, siendo el departamento de Boyacá el segundo productor nacional (719.289, 43 T, 2015). El sistema de producción tradicional del cultivo se realiza con prácticas agrícolas poco sostenibles y uso excesivo de productos de control fitosanitario y fertilizantes, los que al ser arrastrados por escorrentía a los ríos y aguas subterráneas, producen eutrofización y contaminación hídrica. El objetivo de este estudio es utilizar el indicador de Huella Hídrica como una herramienta de gestión ambiental que permita determinar la afectación de la producción del cultivo de papa sobre el recurso hídrico. Para la evaluación de la Huella Hídrica, se emplea la metodología de Hoekstra et al. (2011) establecida en el Manual de la Red Internacional de Huella Hídrica Water Footprint Network (WFN) comprendiendo 4 etapas: Establecimiento de objetivos y alcance, Contabilización, Evaluación de Sostenibilidad y Formulación de propuestas. Para la estimación de este indicador, se requiere información de tipo climático, datos del cultivo y del suelo. Para el procesamiento de estos parámetros se utiliza el modelo CROPWAT 8.0 de la FAO, que permite el cálculo de la precipitación efectiva (PPef), la Evapotranspiración de Referencia (ET_o), y el requerimiento hídrico del cultivo, variables a partir de las cuales se lleva a cabo la estimación de la Huella hídrica.

Cabello *et al.*, (2016) en el estudio “Water footprint from growing potato crops in Cuba”, en esta investigación evalúa el cálculo de la huella hídrica en el momento de la cosecha, para el periodo de 2009 y 2012, como metodología utiliza la desarrollada por la FAO mediante el modelo CROPWAT. La información del clima, de productividad y uso de fertilizantes, fueron identificados como específicos para cada zona evaluada, posteriormente realiza una comparación con resultados de anteriores trabajos en otros países de América Latina y el Caribe. Indica que para el caso cubano los resultados muestran indican diferencias de hasta un 25% respecto a otros estudios internacionales. Considerando países cercanos de la misma región se estimó valores similares de huella hídrica, pero con un menor componente de agua

gris y un relativo mayor componente de agua verde, respecto al uso de agua se determinó que en Cuba este cultivo ocupa un cuarto lugar en consumo de agua.

González (2016) en su tesis “Análisis comparativo de la huella hídrica en agroecosistemas de la microcuenca Alto Río Ubaté”, estudio realizado en Colombia, estimó el valor de la huella hídrica de los cultivos de papa y pastos en el periodo de 2009 al 2014 para dos grupos de agroecosistemas evaluados. Se utilizó también información de naturaleza cualitativa para analizar los aspectos culturales relacionados con la utilización del agua en el ámbito de estudio, señalando que los agricultores arrendatarios siembran básicamente papa y su principal objetivo es lograr su rentabilidad en el mercado. Realizan hasta dos cosechas al año y el valor promedio estimado como huella hídrica para este cultivo fue de 430,2 m³/t. Además se identificó el valor de la huella hídrica para el cultivo de papa manejado por los arrendatarios es mayor comparado al de los propietarios, puesto que estos últimos destinan parte de la cosecha para su propio consumo y muestran un mayor compromiso con el uso del agua y cuidado del suelo. Los propietarios obtienen una cosecha de papa al año y el valor promedio estimado de huella hídrica por ciclo de cultivo de papa es de 422,2 m³/t.

Amézquita & Motta (2015) en el estudio “Evaluación de huella hídrica en la producción de un cultivo de papa R12 ubicado en el municipio El Rosal Cundinamarca”, realizado en Colombia, indica que en el primer paso la recopilación de información de variables del clima, suelo y planta, que permitieron la realización de los cálculos necesarios para estimar la huella hídrica, como metodología siguió lo desarrollado por la FAO mediante el programa Cropwat 8.0, luego en las fases 3 y 4 desarrollo el modelo y determinó que el valor de la huella hídrica total para la producción de papa R12 para el periodo de julio a noviembre del 2014 fue de 400.42 m³/t. Siendo el componente gris del agua el que tuvo el mayor contribución sobre la

huella hídrica con una cantidad de 190.99 m³/t, seguido del agua verde y azul, con valores de 176.63 m³/t y 32.80 m³/t respectivamente.

Bolaños (2011) en la investigación “Determinación de la huella hídrica y comercio de agua virtual de los principales productos agrícolas de Honduras”, señala que utilizando la metodología descrita por Hoekstra *et al.* y el modelo CROPWAT 8.0 para determinar los requerimientos de agua del cultivo. En los resultados indican que Honduras posee 95.93 km³ de recursos hídricos renovables totales, de los cuales 6.60 km³ corresponde a la huella hídrica de los 15 cultivos y 2.92 km³ de agua virtual se exporta en 13 productos agrícolas. Éste último significa que 2.63 Km³ de agua proveniente de la precipitación y 0.12 Km³ proveniente del riego se exportó el año 2008. Para valorar el agua se estimó su productividad aparente, este es el valor económico de la producción agrícola por metro cúbico de agua utilizado, siendo el cultivo de tabaco con 2.68 \$/m³ el cultivo más rentable desde el punto de vista de valor del agua. A partir de estos valores, el agricultor podría determinar qué cultivos producir.

1.2.2. A nivel nacional.

Mallma (2015) en la investigación “Huella hídrica de los productos agrícolas de la región Junín comercializadas en la ciudad de Lima”, recopiló información climática, en base a estos datos se estimó la evapotranspiración de referencia (ET_o), erigiéndose luego los cultivos a los cuales se asignaron los valores del coeficiente de cultivo (K_c) según estudios realizados en dicha zona. Con ello, se ha determinado la evapotranspiración del cultivo (ET_c), que conjuntamente con la superficie del terreno (por unidad de hectárea), sirvió para estimar el requerimiento de agua del cultivo (RAC). Con este resultado y el rendimiento de cada cultivo (RC) se ha determinado el contenido de agua virtual (V) de cada producto agrícola, el cual es expresado en litros de agua virtual por kilo del producto. Con este valor y la cantidad de producto

comercializado (Ej) se estimó el agua virtual que es transferida (AVt) hacia el mercado de la ciudad de Lima. Los valores de agua virtual de los productos agrícolas como la papa, trigo, choclo, maíz grano, haba verde, haba grano, arveja verde, alcachofa, zanahoria, cebolla, ajo, cebada, quinua y olluco, fluctúan entre 0,008 a 75,52 Hm³, siendo la huella hídrica total de 161,28 Hm³/año para los 14 cultivos estudiados.

Quispe *et al.* (2020) El objetivo fue determinar los coeficientes de uso consuntivo (Kc) para el cultivo de la papa en condiciones del valle del Mantaro, utilizó el método de instalación de lisímetros volumétricos de tipo cilindro y de material de concreto armado. Los resultados señalan que los valores de Kc varían de acuerdo a la fenología (desarrollo) del cultivo, así a la emergencia el Kc = 0.20 a máxima cobertura el Kc = 1.13 a 1.17 al momento de la cosecha el Kc=0.65. Se concluye que el uso de lisímetros garantiza precisión y confiabilidad en condiciones de campo y teniendo el mismo cultivo de cobertura.

Torres (2019) El estudio se realizó empleando datos de fuentes secundarias, de suelo (Laboratorio de suelos-UNASAM), cultivo (FAO) y meteorología (Centro de Investigación Ambiental para el Desarrollo-CIAD); y con ayuda del software CropWat se obtuvo estimaciones anuales de evapotranspiración del cultivo de papa y precipitación efectiva dentro de la subcuenca del río Buin. A partir de estas estimaciones se cuantificó la huella hídrica verde empleando la ecuación del Dr. Hoekstra. En el año 2017 el volumen total de consumo de agua proveniente de las precipitaciones para la producción de la papa fue el máximo con un valor de 401.7 m³/t, mientras que en el 2016 se calculó el total mínimo de consumo de agua verde con un valor de 341.9 m³/t.

1.2.3. A nivel local.

(Cauna, 2019) en la investigación “Huella hídrica verde para producción de la papa y quinua para el periodo 2008 – 2017 en la provincia de Puno”, señala que siguió la metodología: 1) Estimar la evapotranspiración de referencia en función al método indirecto Penman Montheit modificado, 2) Estimar el requerimiento hídrico de los cultivos papa y quinua y 3) Se determinó la huella hídrica verde de los cultivos papa y quinua en el ámbito de la provincia de Puno. La evapotranspiración de referencia varía de 1315.91 a 1424 mm, respectivamente en promedio anual de 1378.42 mm, el coeficiente de cultivo (K_c) para esta investigación se asumió según las investigaciones realizadas con anterioridad. La evapotranspiración real de los cultivos en global de papa y quinua es 645.97 mm y 614.66 mm, el requerimiento hídrico promedio global de los cultivos de papa es 5831.21 m^3/ha y quinua es 5530.20 m^3/has , el rendimiento promedio global del cultivo de papa es 10085.80 Kg/ha, y quinua es 1157.73 kg/ha, la huella hídrica verde del cultivo papa en global es 586.41 m^3/ton y quinua es 4822.96 m^3/t , para el ámbito de la provincia de Puno en condiciones de una agricultura en secano. La huella hídrica verde, según los resultados muestran un equilibrio entre el uso y la disponibilidad, además se encontró que la productividad de dichos cultivos es alta frente a otros productos en términos productivos como socioeconómicamente.

Vilca (2018) en el estudio “Huella hídrica de cultivos andinos de la región Puno comercializados en la región Arequipa”, formuló un modelo que permitió determinar la huella hídrica de cultivos andinos, que incorpora la evapotranspiración de referencia, coeficiente de cultivo, superficie de terreno, rendimiento de cultivo y volumen de comercialización. El cultivo de papa tuvo la mayor huella (6,660.69 m^3/ha), el tarwi tuvo la menor huella (3,750.45 m^3/ha). Los demás cultivos tuvieron valores intermedios como oca (5,449.75), olluco (4,762.52), haba (4,091.39), quinua (6,179.58), kañiwa (5,466.55), cebada (4,159.33) y mashua (5,387.82 m^3/ha). El

volumen de agua virtual estimado procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa, fue también mayor para la papa (145,175,163.13 m³/año) y menor para mashua (1,098,284.76 m³/año). En general se traslada de Puno hacia la ciudad de Arequipa un valor de 90,764,178.56 de soles en agua virtual contenida en productos de cultivos andinos. Se concluye que, a partir de la determinación de la huella hídrica es posible demostrar que existe un tránsito importante de agua virtual de la región Puno hacia la ciudad de Arequipa contenida en los cultivos andinos comercializados.

Cahuana & Arcos (2002) en el documento “Variedades nativas y mejoradas de papa en Puno”, señala que en la región Puno, durante el período de 1981 y 2000, se cosecharon en promedio 29839 ha por año, con un rendimiento promedio de 6.1 t/ha. Este rendimiento que es considerado bajo, fue afectado por las continuas variaciones de las condiciones climáticas adversas que se presentan en esta región (heladas, sequías, granizadas e inundaciones) que provocaron una disminución tanto en área cosechada como en la producción.

Canllahui (2013) en el estudio “Determinación de la evapotranspiración y coeficiente de cultivo (kc) en la producción de papa (*Solanum tuberosum* L.) Var. Silver en el CIP-IIIpa-Puno”, indica que la papa presenta una evapotranspiración, por el método de lisímetro, de 610.76 mm de lámina hídrica; con los métodos indirectos de Hargreaves y Serruto estimó 588.87, 429.81 y 579.42 mm, siendo cercanos al método directo. El coeficiente de cultivo (Kc) obtenido por el método del lisímetro fue de 0.46 en fase de emergencia, 0.96 para formación de estolones, 1.27 a inicios de la tuberización, 1.41 a inicios de floración, en la fase final de floración Kc de 1.8, desciende a Kc de 1.35 en fase final de tuberización y 0.96 en madurez fisiológica, comparando con el método FAO, los resultados presentan similitud.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la huella hídrica del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en relación a las variables climáticas en la región Puno 2019 - 2020.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar las variables climáticas relacionadas con la huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región Puno 2019 - 2020.
- Determinar la huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región Puno 2019 - 2020.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. El agua (azul, verde, gris)

El enfoque de estimación de huella hídrica, está formado por tres categorías de agua: azul, verde y gris, en el caso de la agricultura de secano como es la de del altiplano, es de particular importancia el agua verde, puesto que bajo estas condiciones, es el principal componente dentro del uso consuntivo de los cultivos de esta zona, este tipo de agua al precipitarse desde la atmósfera a la tierra se almacena dentro de la estructura del suelo (Arévalo, 2017), de este modo esta agua retenida en ella puede ser utilizada por las plantas a través de las raíces, además el costo de uso del agua verde es muy baja comparativamente con el tipo de agua azul, pues no requiere de estructuras de ingeniería (canales de riego y otros), sin embargo también está sujeto a variaciones importantes que dan lugar a periodos de inundación y sequía (Earle, 2001).

Mientras que el agua azul se conceptúa como aquella que puede tener un origen superficial o subterráneo y que es utilizada en algún momento en un proceso productivo (como la agricultura) (Costantini, 2016), pero que requiere de infraestructura física para su traslado, en la agricultura el agua azul hace

referencia básicamente a la distribución del agua mediante canales de conducción y que son aplicados en los cultivos mediante diversos sistemas de riego (Rocha, 2016) (Arabi, *et. al.*, 2012).

En el caso del agua gris, se refiere a aquella que ha sufrido un proceso de contaminación por la actividad productiva o de otro tipo, por lo que se interpreta como el volumen de agua que es requerido para conseguir la asimilación de alguna sustancia contaminante que es vertida sobre un cuerpo de agua receptor (Cabello *et al.*, 2016), dependiendo de la propia naturaleza de dicho cuerpo la forma y el tiempo de depuración natural. Este tipo de agua para su tratamiento requiere de costos importantes, para devolverle las capacidades de aptitud para el riego u otros usos, por lo que económicamente incrementan fuertemente los costos de producción de los cultivos que usan este tipo de agua (Hoekstra & Hung, 2002).

En términos generales en el caso del cultivo de la papa, bajo las condiciones de una agricultura de secano, como es la que se practica en el altiplano peruano, el balance hídrico se realiza básicamente con el tipo de agua verde, puesto que es factible medirla a través de la precipitación pluvial, ya sea en forma líquida o sólida, considerando de forma particular los meses de duración del cultivo (Cahuana & Arcos, 2002).

2.1.2. Huella hídrica

Haciendo una revisión de la literatura disponible, se tiene que este término fue acuñado por Arjen Hoekstra en el Instituto para Educación en Agua de la UNESCO a inicios del año 2002, posteriormente el concepto inicial fue desarrollado en la Universidad de Twente en Holanda por la Red de Huella Hídrica (WFN). Su desarrollo se debió a la búsqueda de un indicador objetivo para realizar la medición de uso de agua que se produce en cualquier proceso

productivo, en el caso de la agricultura se refiere básicamente a aquella cantidad de agua necesaria para producir un producto cosechable y que será comercializado ya sea en el mismo lugar de origen o trasladado a otro mercado nacional o internacional (Hoekstra & Hung, 2002).

El concepto de huella hídrica fue trabajado bajo el mismo enfoque que la huella ecológica y de carbono ya anteriormente desarrollados, pero mientras que la huella de carbono es la cantidad de carbono emitido a lo largo de los pasos de un proceso de producción, la huella hídrica se entiende como el volumen de agua requerido a través de la cadena de suministro para elaborar un producto. Pero existe una diferencia importante entre ambos enfoques, mientras la huella de carbono es de carácter global, la huella de agua es de naturaleza local, por lo que se corresponde con el enfoque de cuencas hídricas que ha sido utilizado en nuestro país para la planificación del uso del agua (Gilmont *et al.*, 2016).

Se debe entender que la utilización del concepto de huella hídrica (HH) es de mayor amplitud, puesto que no solo se refiere al volumen de agua que se halla dentro de un producto, sino que además puede distinguir el origen que tuvo el agua y también el lugar en el cual se originó (Cabezas & Gonzáles, 2017). Además, el término de HH puede ser aplicado a nivel de productores como consumidores, ya sean particulares o en un área geográfica establecida. Por lo tanto es preferible complementar los estudios de huella hídrica con aspectos como la medición de la presión generada por una actividad sobre los recursos hídricos, mientras que el término de agua virtual (AV) será de utilidad cuando se desee referirse a los flujos asociados al intercambio de productos agrícolas (González, 2016). En cuanto a la determinación de la HH existen dos métodos como son los directos e indirectos, en el primero se requiere de mediciones en campo mediante el uso de equipos específicos como lisímetros,

mientras que los indirectos utilizan las variables del clima, ambos realizan mediciones cercanas entre sí (Canllahui, 2013).

2.1.3. Motivos para calcular la huella hídrica

Se requiere el cálculo de la huella hídrica, puesto que permite identificar dentro de un país zonas en las cuales la agricultura realiza un gasto excesivo de agua para la producción de un cultivo, el mismo que se puede relacionar con el costo final del producto cosechable (Cauna, 2019), por lo que la planificación de una cédula de cultivo que permita la optimización del agua es una estrategia de sostenibilidad. Es así que muchos países formulan sus estrategias de cultivo dando prioridad a cultivos de bajo consumo de agua pero con un alto precio de comercialización (Amézquita & Motta, 2015).

De forma adicional la realización de los cálculos parciales de la huella hídrica nos permiten identificar de manera clara, cuáles son los puntos de la producción en los cuales se debe optimizar el uso del agua, mediante la aplicación de técnicas del desarrollo sostenible (Gilmont *et al.*, 2016). Adicionalmente siguiendo la metodología de cálculo de la huella hídrica es posible relacionar el consumo diario de agua y los problemas de contaminación y distribución del mismo en aquellos lugares donde se producen los bienes y por tanto seguir los principios de optimización del uso de agua en las diversas etapas de los procesos productivos (Cabezas & Gonzáles, 2017).

2.1.4. Reducción de la huella hídrica

Las medidas que se deben tomar para conseguir una reducción de la huella hídrica son:

- Modificar el modelo de consumo de productos, cambiando los productos con alta huella hídrica por otros con menor huella de agua.

- Seleccionar el producto con menor huella hídrica o que la huella del producto se dé en un área geográfica donde no haya escasez de agua.
- Realizar el reciclaje y reutilización del agua como una herramienta para reducir la huella hídrica gris (Costantini, 2016).

2.1.5. Formas de medir la huella hídrica

El Manual de Evaluación de Huella Hídrica de la Red de Huella Hídrica (WFN) presenta el enfoque predominante para realizar evaluaciones de huella hídrica, la metodología de la WFN ha guiado el enfoque de huella hídrica utilizado por muchas de las organizaciones que han realizado evaluaciones de huella hídrica (Arévalo, 2017). Sin embargo, si bien los conceptos básicos son seguidos ampliamente, han surgido muchos matices y retos en relación a la metodología. Cada sector, doméstico, industrial y agrícola, tiene distintos índices de uso de agua, por tipo y en total. En los sectores doméstico e industrial, destaca el uso de agua azul y gris, y si bien el agua verde puede estar presente dentro del uso total de agua en estos sectores, suele resultar insignificante, mientras que en el aspecto rural este si es componente importante (González, 2016).

Por lo general, el sector agrícola es el que más agua utiliza, con grandes volúmenes de uso de agua verde y azul, dependiendo de la disponibilidad de agua y patrones de precipitación. Siendo el mayor contribuyente a la huella hídrica de este sector la producción de cultivos. La huella hídrica de un cultivo principal se calcula como el índice del volumen de agua requerido para hacer crecer el cultivo hasta su cosecha (Chapagain et al., 2016). La huella hídrica azul y verde total de un cultivo es señalada como el uso de agua verde (m^3/ha) es la evapotranspiración de agua del suelo proveniente de la lluvia (agua utilizada por la planta que deriva de agua del suelo y que es devuelta a la atmósfera a través

de la evapotranspiración), mientras que el uso de agua azul (m^3/ha) es la evaporación del agua proveniente de riego de la tierra de cultivo (Higuera & Julian, 2017).

El uso de agua para el cultivo que viene representado por el numerador en la fórmula, viene influenciado por el tipo de cultivo y el medio climático donde se cultiva. Estos dos grandes factores son agrupados de manera general en parámetros de cultivo y parámetros del clima (Canllahui, 2013). Una vez que se conoce el tipo de cultivo y el lugar geográfico es posible calcular los requisitos de agua (a través de la evapotranspiración a medida que se desarrolla el cultivo). El agua para el cultivo se obtiene ya sea de la lluvia o por riego, conociendo la ubicación del cultivo se puede determinar el promedio de lluvia en ese lugar, al mismo tiempo que se puede calcular el volumen complementario de agua de riego (si fuese necesario) que requiere el cultivo y compararlo con el volumen de agua de riego que recibe. Una vez que se conoce la cantidad de lluvia y de riego, puede calcularse el uso de agua verde y azul que requerirá el cultivo (López & Millán, 2017).

La cosecha (el denominador en la fórmula) está influenciada por factores tales como fertilizantes, estructura del suelo y otros, así como por el riego (si fuese el caso) y la eficiencia del mismo. Al ser la huella hídrica el ratio de uso de agua para el cultivo hasta la cosecha, es, por lo tanto, una medida de la eficiencia productiva del agua. Sin embargo, permite diferenciar entre uso de agua verde (uso de agua de lluvia) y uso de agua azul (uso de agua superficial) (Ministerio de Agricultura y Riego, 2016).

2.1.6. El cultivo de la papa

La papa (*Solanum tuberosum*): es el principal cultivo de la región andina, no solo por su amplia distribución dentro de esta región, sino también por su

elevado consumo por la población humana de esta región (Cahuana & Arcos, 2002), por lo que el consumo de sus tubérculos forman parte principal de la alimentación diaria, puesto que es rico en hidratos de carbono y también en proteínas, sin embargo puede ser sensible a déficits de agua dentro de su periodo de desarrollo, de forma particular en la época de tuberización, este cultivo necesita de una precipitación pluvial de 600 mm para lograr una producción adecuada (Mallma, 2015).

Estudio en la región Puno, señala que la evapotranspiración obtenida para el cultivo de papa fue de 610.76 mm de lámina hídrica (6107.6 m³/ha), teniendo en cuenta que la fase fenológica de mayor consumo de agua es al final de la floración con 157.73 mm de lámina de agua, seguido con el inicio de tuberización con 90.45 mm de lámina de agua, observando de esta forma, que en estas fases el cultivo presenta un mayor requerimiento hídrico, debido a que el cultivo se encuentra en pleno desarrollo y la planta cuenta con mayor cantidad de follaje, es por ello que los procesos de evaporación y transpiración son mayores; mientras que, la fase con menor consumo de agua es en la madurez fisiológica con 47,14 mm de lámina hídrica, puesto que en esta fase las hojas empiezan ya a marchitarse (Vilca, 2018) (Mallma, 2015).

Las etapas en que el cultivo requiere mayor cantidad de agua, son desde el inicio de la tuberización hasta el final de la misma; es decir en el momento que las plantas han logrado su máximo desarrollo fenológico. En la papa los coeficientes de cultivo Kc presentaron variaciones a lo largo del periodo vegetativo, siendo el promedio del mismo de 1.17 (Canllahui, 2013).

2.2. MARCO CONCEPTUAL

Agua verde: Llamada también agua de suelo, la cual se evapora debido a la transpiración de las plantas. Este tipo de agua se ha consumido de forma eficiente

cuando ha sido transpirada por los cultivos y la vegetación, y es no productiva si se evapora directamente del suelo (Chapagain *et al.*, 2016).

Evapotranspiración: Transporte de agua absorbida por las plantas, que circula por sus tejidos y pasa a través de los estomas y de la cutícula hacia la atmósfera. Tan solo una fracción mínima del agua permanece en la planta para aportar nutrientes a la misma.

Huella hídrica: Indicador multidimensional del agua sobre el consumo directo e indirecto dado por los consumidores y los productores. No solo estudia el volumen de agua a ser utilizado, sino que también analiza la ubicación del estudio, las fuentes de agua y la fecha de utilización del agua (Hoekstra, A & Hung, P, 2002).

Precipitación Efectiva: Fracción de la precipitación que va a ser usada de forma efectiva por el cultivo, la que depende de factores tales como: el clima, características del suelo (porosidad, conductividad) y del terreno, humedad del suelo. La absorción del agua del suelo va a ser diferente en climas secos que en climas húmedos.

Rendimiento del cultivo: Cantidad de cultivo obtenido (producto cosechable expresado en ton) en relación al espacio (ha) de producción.

2.3. HIPÓTESIS

2.3.1. Hipótesis general

La huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) se encuentra en relación a las variables climáticas.

2.3.2. Hipótesis específicas

- Las variables climáticas se relacionan con la huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región Puno 2019-2020.

- La huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región Puno es mayor a los 2500 m³/Ha.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en la región de Puno, que está ubicado al extremo sur este del Perú, entre los $13^{\circ}00'00''$ y $17^{\circ}17'30''$ de latitud sur y los $71^{\circ}06'57''$ y $68^{\circ}48'46''$ de longitud oeste del meridiano de Greenwich; cuenta con una extensión territorial de $71\,999,0\text{ km}^2$ (6% del territorio nacional), siendo el quinto departamento más grande en el ámbito nacional. Limita por el norte con la región Madre de Dios, por el este con la República de Bolivia, por el sur con la región Tacna y la República de Bolivia y por el oeste con las regiones de Moquegua, Arequipa y Cusco.



Figura 01. Mapa de ubicación del ámbito de estudio
Fuente: Google maps

En general el clima de Puno varía entre frío y cálido, en las orillas del lago Titicaca y en los valles formados por sus afluentes hasta los 4.000 msnm. es frío, aunque, atemperado por la influencia del lago; a mayores alturas es muy frío y glacial; por otro lado, en la selva el clima es cálido con precipitaciones pluviales y temperaturas muy superiores a las de la sierra. La temperatura promedio máxima es de 22°C y la mínima de 1,4°C (Dirección Regional Agraria, 2019).

Las precipitaciones pluviales en el altiplano obedecen a una periodicidad anual de cuatro meses (diciembre a marzo); sin embargo, esta periodicidad, a pesar de determinar las campañas agrícolas, puede variar según las características pluviales del año, originando inundaciones o sequías, así como la presencia de heladas y granizadas, las mismas que tienen repercusiones también en la producción de los cultivos (Cahuana & Arcos, 2002).

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población y muestra de estudio se consideró al cultivo de la papa en la zona de estudio en la región Puno, cuya área cultivada es de 59,981.00 Has (DRA, 2019).

3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación fue descriptivo, partiendo del principio que no se modificó ninguna de las variables de estudio, el enfoque fue cuantitativo porque se utilizó valores numéricos y ecuaciones de cálculo (Hernández *et al.*, 2010).

3.4. METODOLOGÍA

3.4.1. Para analizar las variables climáticas relacionadas con la huella hídrica

Para analizar el comportamiento de las variables climáticas necesarias para realizar los cálculos de la huella hídrica, se utilizó los registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), para ello se utilizó estadística descriptiva para variables continuas (precipitación pluvial, temperatura), mediante

la media o promedio como estadístico de tendencia central y el valor máximo, mínimo y desviación estándar como medidas de dispersión.

La representación gráfica se realizó mediante diagramas de barras y líneas, además de climagramas para su mejor comprensión y análisis de las variables climáticas.

Los cálculos se realizaron en el software Cropwat el ingreso de información de las variables del clima para un año calendario, posteriormente los cálculos se realizaron con los meses propios de desarrollo del cultivo de la papa (octubre 2019 a marzo 2020).

3.4.2. Para determinar la huella hídrica del cultivo de la papa

Fundamento: La metodología para obtener la huella hídrica fue seguida bajo los fundamentos teóricos de (Chapagain *et al.*, 2016), la cual da inicio con la obtención de los registros climáticos, en nuestro caso de la región de estudio (Puno), los mismos que permitieron determinar la evapotranspiración de referencia (potencial), también fueron considerados los parámetros propios del cultivo de la papa como el coeficiente de cultivo (K_c), el mismo que fue obtenido a partir de la literatura específica del tema (FAO y estudios locales) (Trezza, 2014). Una vez recolectada la información necesaria se iniciaron los cálculos con la estimación de la evapotranspiración del cultivo (real), en este caso se utilizó el procedimiento incorporado en el software CROPWAT de la FAO (Ramírez & Montiel, 2011) (Huatay *et al.*, 2019), el cual permitió calcular el requerimiento de agua del cultivo (RAC), con este parámetro y el rendimiento del cultivo de la papa, que fue obtenido de registros de la Dirección Regional de Agricultura (DRA-Puno), se determinó el agua que se encuentra contenida en el cultivo (tubérculos), con lo cual se fue hallado el indicador de la huella hídrica para este cultivo (Arévalo, 2017) (Clarke, 1998).

Los cálculos requirieron de variables de ingreso (input) y como salida del proceso computacional (output), se obtuvieron la huella hídrica, los pasos lógicos y sus ecuaciones las señalamos a continuación:

VARIABLES DE ENTRADA: Evapotranspiración de referencia (ET_0), coeficiente de cultivo (K_c), superficie de terreno (ST), rendimiento del cultivo (RC), en la región Puno (Ej) (Arévalo, 2017).

Modelo general:

$$Y = f(ET_0, K_c, ST, RC, Ej)$$

Donde Y es la huella hídrica del cultivo.

Operador: Evapotranspiración del cultivo:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

Donde:

ET_0 : Evapotranspiración de referencia

K_c : Coeficiente de cultivo

Requerimiento de agua del cultivo:

$$RAC = ET_c \times ST \quad (2)$$

Donde:

ET_c : Evapotranspiración del cultivo

ST: Superficie de terreno

Contenido de agua virtual:

$$V = \frac{RAC}{RC} \quad (3)$$

Donde:

RAC: Requerimiento de agua del cultivo

RC: Rendimiento del cultivo

Contenido de agua del producto:

$$V_j = V \quad (4)$$

Donde:

V: Contenido de agua

La realización de las ecuaciones mostradas, fueron procesadas siguiendo la metodología expuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), haciendo uso del software informático CROPWAT en su versión 8.0 para la plataforma de Windows.

3.5. Operacionalización de variables

| Variab Independientes | Indicadores | Unidad | Tipo de variable |
|----------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------------------------|
| Climáticas | Precipitación pluvial | mm | Numérica |
| | Temperatura | °C | continua |
| Edáficas | Tipo de suelo | Unidad edáfica | Categórica |
| Planta | Requerimiento de agua por cultivo. | mm de agua | Numérica continua |

| Variable Dependiente | Indicadores | Unidad | Tipo de variable |
|---------------------------------|-------------------------------------|---------------|-----------------------------|
| Huella hídrica | Uso consuntivo de agua del cultivo. | mm de agua | Numérica continua |

3.6. Análisis estadístico

Se utilizó estadística descriptiva y para las pruebas de hipótesis se analizaron mediante el coeficiente de correlación de Pearson y la prueba de Z para una muestra, el nivel de confianza utilizado fue del 95% ($\alpha=0.05$) en ambos casos.

CAPÍTULO IV

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. Variables climáticas relacionadas.

Tabla 01. Variables climáticas relacionadas con la huella hídrica de la papa.

| Mes | Temp. Min | Temp. Max | Humedad | Viento | Insolación |
|------------|-------------|-------------|-----------|------------|------------|
| | °C | °C | % | m/s | horas |
| Enero | 4.7 | 15.0 | 80 | 2 | 6.5 |
| Febrero | 3.6 | 15.5 | 73 | 1.6 | 6.9 |
| Marzo | 2.9 | 16.6 | 70 | 1.6 | 6.9 |
| Abril | 1.4 | 16.6 | 69 | 2.6 | 8.3 |
| Mayo | -5.4 | 16.3 | 53 | 1.8 | 9.3 |
| Junio | -6.1 | 14.2 | 92 | 2 | 9.2 |
| Julio | -5.9 | 14.7 | 57 | 1.8 | 9.3 |
| Agosto | -3.1 | 14.5 | 60 | 2.9 | 9.3 |
| Septiembre | -1.8 | 16.1 | 58 | 1.9 | 9.3 |
| Octubre | -0.4 | 18.1 | 50 | 2.7 | 8.7 |
| Noviembre | 0.9 | 19.0 | 52 | 2.8 | 8.7 |
| Diciembre | 4 | 18.7 | 58 | 2.5 | 7.9 |
| Promedio | -0.4 | 16.3 | 64 | 2.2 | 8.4 |

Fuente: SENAMHI (2020) <https://www.senamhi.gob.pe/>

En la Tabla 01, se muestra las variables climáticas promedio de la región Puno, se tiene para la temperatura mínima el menor valor de -6.1 °C en el mes de junio, característico de la época de heladas meteorológicas, mientras que los meses en los cuales se desarrolla el cultivo de la papa las temperaturas mínimas presentan valores positivos lo cual permite su desarrollo fenológico. En el caso de la temperatura máxima se observa el mayor valor de 19.0 °C en el mes de

Noviembre. La humedad relativa presenta su mayor valor en el mes de junio con 92% debido a la menor temperatura del ambiente. La insolación de mayor longitud se produce durante los meses de julio a septiembre con 9.3 horas de duración del día.

Como lo señala también (González, 2016) por lo general el sector agrícola es el que más agua utiliza, con grandes volúmenes de uso de agua verde y azul, dependiendo de la disponibilidad de agua y patrones de precipitación, en el caso de la región Puno la mayor parte de la agricultura se realiza con el agua de la precipitación pluvial y que corresponde al agua verde de la huella hídrica, si bien es posible irrigar algunas zonas con disponibilidad de agua de otras fuentes (ríos, lagunas), una limitantes son las bajas temperaturas como se muestra en nuestros resultados con temperaturas mínimas por debajo de cero grados, por lo que la agricultura se restringe a una sola cosecha anual.

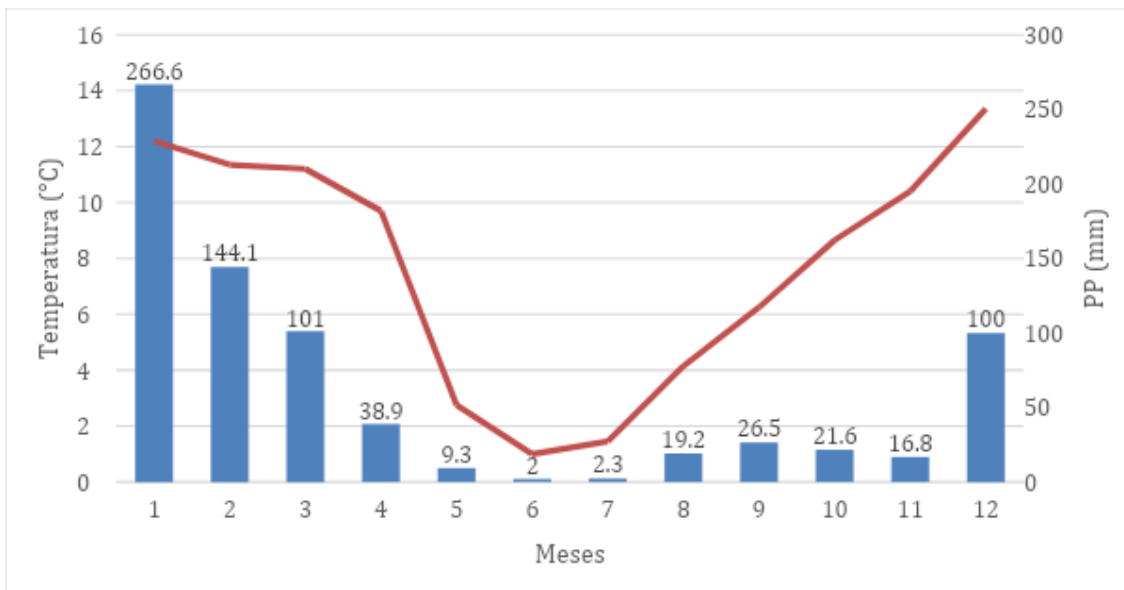


Figura 02. Climograma de la región Puno

En la Figura 02, se observa los valores de precipitación pluvial y temperatura promedio, los meses de mayo a agosto presentan las temperaturas promedio más bajas, las mismas que limitan la producción de cultivos en esta

época del año, mientras que los meses que se corresponden con el cultivo de la papa de octubre a marzo las temperaturas son más elevadas y permiten por lo tanto el desarrollo de los mismos, esto es característico de la región Puno donde la mayor parte de las actividades agrícolas se desarrollan en esta época.

Tabla 02. Precipitación pluvial real y efectiva relacionada con la huella hídrica de la papa.

| Meses | Precipitación | Precipitación efectiva |
|------------|---------------|------------------------|
| | mm | mm |
| Enero | 266.6 | 189.3 |
| Febrero | 144.1 | 91.3 |
| Marzo | 101 | 56.8 |
| Abril | 38.9 | 13.3 |
| Mayo | 9.3 | 0 |
| Junio | 2 | 0 |
| Julio | 2.3 | 0 |
| Agosto | 19.2 | 1.5 |
| Septiembre | 26.5 | 5.9 |
| Octubre | 21.6 | 3.0 |
| Noviembre | 16.8 | 0.1 |
| Diciembre | 100 | 56 |
| Total | 748.3 | 417.2 |

Fuente: SENAMHI (2020) y cálculos Cropwat 8.0

En la Tabla 02, los valores de la precipitación pluvial (mm), que servirá más adelante para los cálculos de la huella hídrica verde, se tiene que la mayor precipitación se presenta en el mes de enero con 266.6 mm, mientras que los valores más bajos se presenta en junio con solo 2 mm de precipitación. Adicionalmente se muestra los valores de la precipitación pluvial efectiva, que es aquella que es aprovechable por el cultivo de la papa como componente del agua verde, del mismo modo los meses de desarrollo del cultivo (octubre a marzo) presentan una distribución con valores que permiten el desarrollo del mismo,

mientras que en meses extremos (mayo a julio) no existe disponibilidad de agua aprovechable.

De manera similar a lo señalado (Bolaños, M, 2011) indica que como segundo paso en la estimación de la huella hídrica se tiene a la precipitación efectiva, que se refiere a la parte de la precipitación retenida en el suelo y que está disponible para el aprovechamiento de la planta, no toda la precipitación pluvial está a disposición de los cultivos, ya que una parte se pierde a través de la escorrentía superficial y la percolación profunda, lo que explica porque en nuestros resultados los meses con mínima precipitación pluvial presentan cero de precipitación efectiva, es decir el agua disponible en estos meses sería insuficiente para el desarrollo de los cultivos.

Tabla 03. Radiación solar y evapotranspiración potencial relacionada con la huella hídrica de la papa.

| Mes | Radiación | ETo |
|------------|------------------------|-------------|
| | MJ/m ² /día | mm/día |
| Enero | 20.6 | 3.4 |
| Febrero | 20.9 | 3.52 |
| Marzo | 19.9 | 3.43 |
| Abril | 20 | 3.44 |
| Mayo | 19.1 | 3.21 |
| Junio | 17.8 | 2.3 |
| Julio | 18.4 | 2.8 |
| Agosto | 20.4 | 3.28 |
| Septiembre | 22.7 | 3.69 |
| Octubre | 23.3 | 4.43 |
| Noviembre | 23.9 | 4.66 |
| Diciembre | 22.7 | 4.42 |
| Promedio | 20.8 | 3.55 |

Fuente: SENAMHI (2020) y cálculos Cropwat 8.0 (Anexo 1)

En la Tabla 03, se muestra la radiación solar calculada para las condiciones de la región Puno, se tiene el mayor valor en el mes de noviembre con 23.9 MJ/m²/día, así mismo los valores que corresponden a los meses de desarrollo del cultivo de la papa (octubre a marzo) presentan valores altos, esto indica la cantidad de energía solar promedio mensual que recibe una superficie horizontal, en nuestro caso esta energía permite el proceso de la fotosíntesis, lo que finalmente se expresará como la productividad del cultivo de la papa, con interrelación con el resto de condiciones ambientales como son la precipitación pluvial efectiva, la evapotranspiración y el tipo de suelo.

También se muestra la evapotranspiración calculada por el método de Penman-Monteith, que nos permite expresar la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración del cultivo, el valor más alto se presenta en el mes de noviembre con 4.66 mm y se corresponde con los meses de mayor precipitación. Si realizamos los cálculos de la evapotranspiración potencial anual tenemos un valor de 1278 mm.

Así también (Cauna, 2019) para su estudio en las condiciones del altiplano peruano indica que la evapotranspiración de referencia varía de 1315.91 a 1424 mm, respectivamente, con un promedio anual de 1378.42 mm, valores que se encuentran cercanos a los obtenidos en nuestro estudio, indicando que reflejan las condiciones propias del clima de la región Puno.

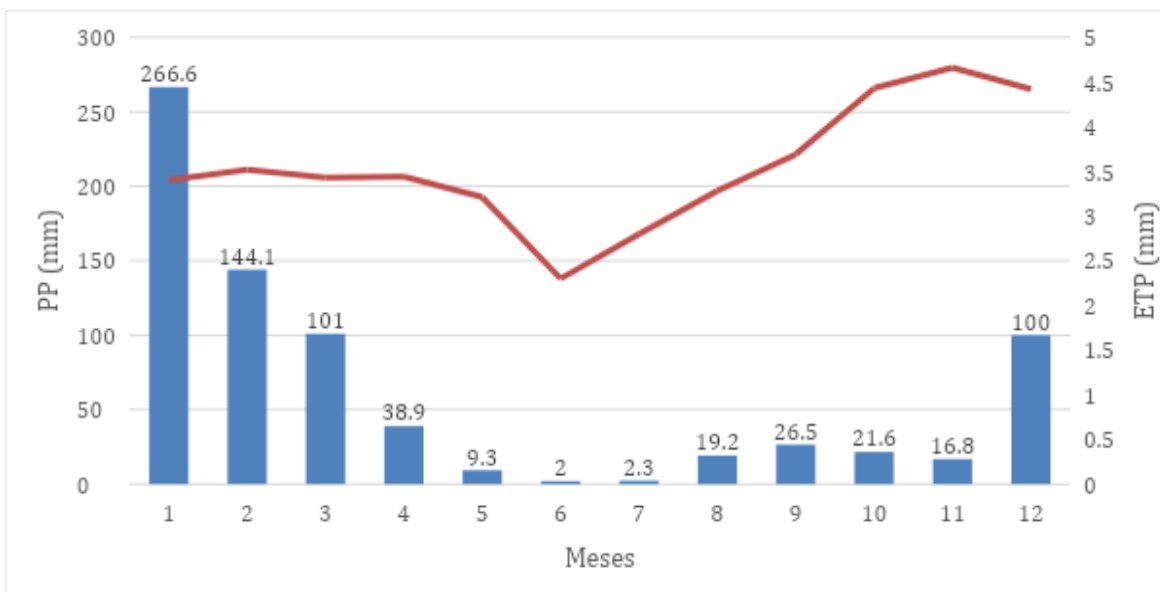


Figura 03. Relación entre la precipitación pluvial y la evapotranspiración

En la Figura 03, se muestra la relación entre la precipitación pluvial y la evapotranspiración, se observa que en los meses de mayor precipitación también este valor se incrementa, porque en los mismos se produce la mayor evaporación del agua precipitada de la atmósfera, además de la pérdida de agua por parte del cultivo de papa, mientras que los meses de menor precipitación muestran valores bajos de evapotranspiración por la menor disponibilidad de agua. Como lo señala Cahuana y Arcos (2002) en el departamento de Puno los cultivos se realizan mayormente en la época lluviosa.

4.2. Huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*).

Una vez concluido los cálculos de las variables ambientales, se consideró los parámetros del cultivo y del suelo.

Tabla 04. Parámetros del cultivo de la papa

| Parámetro | Etapas | Valor |
|-----------------------------|------------------|-------|
| Coeficiente de cultivo (Kc) | Inicial | 0.50 |
| | Medio | 1.11 |
| | Final | 0.93 |
| Etapa (días) | Inicial | 32 |
| | Desarrollo | 37 |
| | Medio | 44 |
| | Fin de temporada | 39 |
| Profundidad radicular (m) | Inicio | 0.40 |
| | Desarrollo | 0.60 |

Fuente: FAO y otros.

En la Tabla 04, se muestra los parámetros del cultivo de la papa, se tiene el coeficiente de cultivo (Kc) que representa un valor que expresa la relación entre la evapotranspiración real (ETc) del cultivo de la papa y la evapotranspiración de referencia ET0 bajo las mismas condiciones climáticas, este número adimensional (normalmente entre 0.1 y 1.2) permite calcular la evapotranspiración del cultivo. La etapa en días de las fases del cultivo de la papa se fijó mediante revisiones y visitas de campo expresado en días, la profundidad radicular fue también considerando antecedentes. Los parámetros del suelo fueron los característicos para un cultivo de papa (suelo franco), bajo las condiciones climáticas del altiplano peruano.

Los parámetros del cultivo son propios en nuestro caso para el cultivo de la papa, se tomaron de referencias de estudios anteriores y de visitas de campo, como lo señala (Mallma, 2015) Mallma estos valores presentan variaciones según cada zona climática y de las etapas fenológicas del cultivo.

Tabla 05. Evapotranspiración verde del cultivo de la papa, Puno octubre 2019 - marzo 2020

| Mes | Década | Etapa | Kc | ETc | ETc | Prec. efec | Req.Riego | ET verde |
|-----|--------|-------|------|--------|--------|------------|-----------|--------------|
| | | | coef | mm/día | mm/dec | mm/dec | mm/dec | mm/dec |
| Oct | 3 | Inic | 0.5 | 2.25 | 20.3 | 0.5 | 19.6 | 0.5 |
| Nov | 1 | Inic | 0.5 | 2.29 | 22.9 | 0 | 22.9 | 0 |
| Nov | 2 | Inic | 0.5 | 2.33 | 23.3 | 0 | 23.3 | 0 |
| Nov | 3 | Des | 0.55 | 2.5 | 25 | 0.2 | 24.8 | 0.2 |
| Dic | 1 | Des | 0.7 | 3.16 | 31.6 | 10 | 21.6 | 10 |
| Dic | 2 | Des | 0.86 | 3.82 | 38.2 | 15 | 23.2 | 15 |
| Dic | 3 | Med | 1.03 | 4.21 | 46.3 | 31 | 15.3 | 31 |
| Ene | 1 | Med | 1.1 | 4.04 | 40.4 | 55.6 | 0 | 55.6 |
| Ene | 2 | Med | 1.1 | 3.63 | 36.3 | 74 | 0 | 74 |
| Ene | 3 | Med | 1.1 | 3.71 | 40.8 | 59.5 | 0 | 59.5 |
| Feb | 1 | Med | 1.1 | 3.83 | 38.3 | 39.3 | 0 | 39.3 |
| Feb | 2 | Fin | 1.08 | 3.82 | 38.2 | 27.4 | 10.7 | 27.4 |
| Feb | 3 | Fin | 1.04 | 3.65 | 29.2 | 24.6 | 4.6 | 24.6 |
| Mar | 1 | Fin | 1 | 3.48 | 34.8 | 23 | 11.8 | 23 |
| Mar | 2 | Fin | 0.96 | 3.3 | 33 | 19.3 | 13.7 | 19.3 |
| Mar | 3 | Fin | 0.93 | 3.2 | 9.6 | 3.9 | 2.4 | 3.9 |
| | | | | | 508 | 383.6 | 193.7 | 383.6 |

Fuente: SENAMHI y cálculos Cropwat 8.0

En la Tabla 05, se muestran los resultados de los cálculos realizados con el software Cropwat 8.0, los mismos que fueron realizados considerando las condiciones climáticas, del suelo y del cultivo de papa, de estas interrelaciones se obtuvo la evapotranspiración de agua verde del cultivo, el mayor valor se obtuvo en el mes de enero que se corresponde con el mayor desarrollo del cultivo y también la mayor precipitación pluvial observada, mientras que el menor valor se obtuvo en noviembre por la existencia de un déficit hídrico temporal (veranillo). En total se estimó un total de 383.6 mm/periodo de evapotranspiración verde para este cultivo.

Como también lo había señalado (Cauna, 2019) la evapotranspiración de referencia para las condiciones del altiplano varía en un rango de 1315.91 a 1424 mm, respectivamente, con promedio anual de 1378.42 mm que presenta similitud con lo encontrado en nuestro estudio.

Tabla 06. Huella hídrica verde del cultivo de la papa, Puno octubre 2019 - marzo 2020

| ET (mm/periodo de crecimiento) | | Rendimiento | Huella Hídrica | Valoración |
|--------------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------|------------|
| Verde | UAC m ³ /ton | Ton/Ha | (m ³ /ton) | S/. |
| 383.6 | 3836 | 12.62 | 303.96 | 522.81 |

Fuente: Elaboración propia en base a MINAGRI

En la Tabla 06, se exponen los resultados de los cálculos para la huella hídrica verde del cultivo de la papa, inicialmente se obtuvo la evapotranspiración verde que fue estimada en 383.6 mm/periodo, el uso de agua del cultivo (UAC) fue de 3836 m³/t, según reporte de la Dirección Regional Agraria de Puno, se tiene un rendimiento promedio del cultivo de la papa de 12.62 t/Ha, con lo cual se obtiene que la huella hídrica de este cultivo bajo las condiciones de la región Puno es de 303.96 m³/t, siendo esta interpretada como el componente verde del agua. La valorización de esta huella fue estimada considerando un valor referencial de 0.0004% de una UIT, siendo el mismo para nuestro estudio de 522.81 soles.

Como lo han señalado (Higuera & Julian, 2017) indican que en su estudio determinaron que para un cultivo de papa en un ciclo fenológico completo entre mayo a septiembre en Colombia, se tiene un indicador de huella hídrica de 494.93 m³/t, valor que es algo superior al obtenido en nuestro estudio de 303.96 m³/t, sin embargo las diferencias son atribuibles a las condiciones climáticas de nuestra zona, a la fisiología de cultivo y el tipo de suelo.

Respecto al uso de la metodología de cálculo (López & Millán, 2017) y también (Cabello *et al.*, 2016) señalan como adecuada el cálculo de la huella hídrica mediante la técnica propuesta por la FAO, haciendo uso del aplicativo Cropwat estimando hasta en un 25% las diferencias entre estudios, atribuibles a diferentes condiciones climáticas y del propio cultivo, nuestros resultados concuerdan en ello, puesto que como lo señala (Cabezas & Gonzáles, 2017)

determinaron una huella hídrica por ciclo de cultivo de papa de 422,2 m³/t, valor algo superior al reportado en nuestro estudio.

Así mismo (Amézquita & Motta, 2015) para las condiciones climáticas de Colombia indica una huella hídrica para el cultivo de la papa de 400.42 m³/ton, valor algo por encima también de lo obtenido en nuestro estudio.

A nivel local (Cauna, 2019) reporta para el cultivo de la papa en global una huella hídrica de 586.41 m³/t, valor por encima del hallado en nuestro estudio, atribuible en parte al menor rendimiento del cultivo reportado en dicho estudio. Así mismo (Vilca, 2018) indica un valor similar para la huella hídrica y manifiesta que dentro de los cultivos andinos la papa es la que presenta el mayor consumo de agua y por ende la mayor huella hídrica, lo cual se explicaría por la alta acumulación de agua a nivel de los tubérculos.

4.3. Pruebas de hipótesis

4.3.1. Hipótesis específica 1

Planteamiento:

Ha: Las variables climáticas determinan la huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región Puno.

Ho: Las variables climáticas no determinan la huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región Puno.

Estadístico de prueba:

Coeficiente de correlación de Pearson, permite analizar la existencia de correlación entre un conjunto de variables cuantitativas, en nuestro caso entre las variables climáticas y la huella hídrica del cultivo.

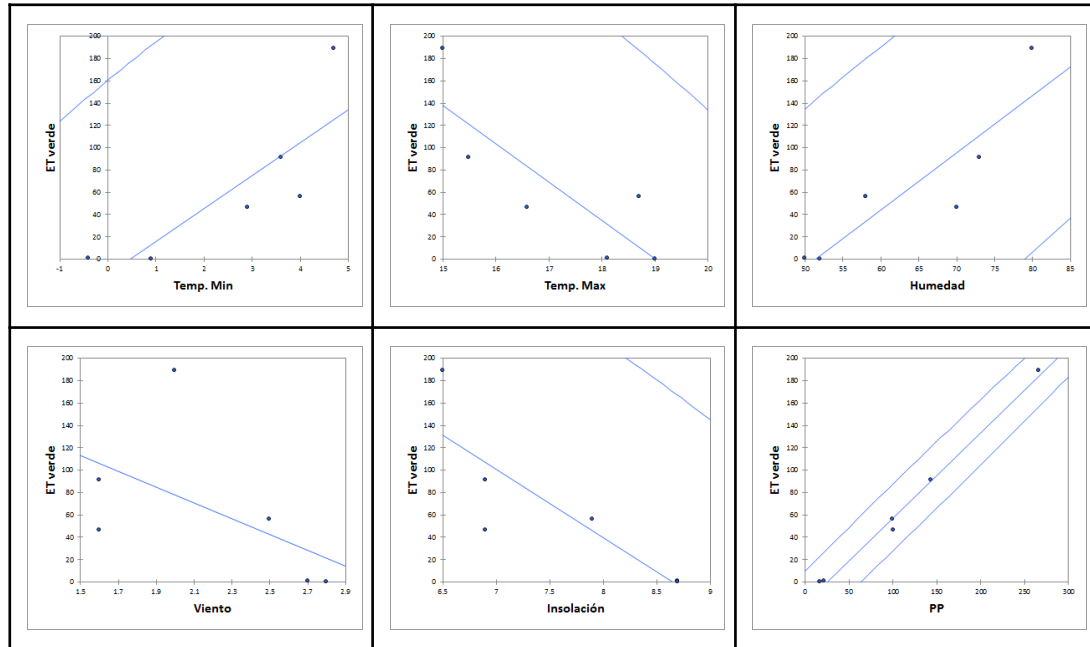
Nivel de confianza:

El nivel de confianza del estadístico de prueba es de 95% ($\alpha=0.05$).

Resultados:

| Variables | Temp. Min | Temp. Max | Humedad | Viento | Insolación | PP |
|-----------|--------------|---------------|--------------|--------|---------------|--------------|
| ET verde | 0.825 | -0.828 | 0.890 | -0.541 | -0.838 | 0.996 |

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0.05



Interpretación:

Cinco variables climáticas presentan relación con la huella hídrica verde, de lo cual se acepta la hipótesis planteada en el estudio (Ha), es decir: las variables climáticas determinan la huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región Puno. La temperatura mínima, humedad y precipitación pluvial se relacionan positivamente con la ET verde y temperatura máxima e insolación de forma negativa.

4.3.2. Hipótesis específica 2

Planteamiento:

Ha: La huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región Puno es mayor a los 2500 m³/Ha.

Ho: La huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región Puno es menor a los 2500 m³/Ha.

Estadístico de prueba:

Prueba Z para una muestra: permite analizar si un conjunto de datos es diferente a un valor puntual o parámetro (250 dividido en 5 en nuestro caso).

Nivel de confianza:

El nivel de confianza del estadístico de prueba es de 95% ($\alpha=0.05$).

Resultados:

| | |
|----------------------|--------|
| Diferencia | 45.650 |
| z (Valor observado) | 1.807 |
| z (Valor crítico) | 1.645 |
| valor-p (unilateral) | 0.035 |
| alfa | 0.05 |

Si el valor de $p < 0.05$ se asume diferencia significativa.

Interpretación:

Puesto que el valor de $p=0.035$ es menor al valor de $\alpha=0.05$, se acepta la hipótesis planteada para este objetivo, es decir: La huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región Puno es mayor a los 2500 m³/Ha.

CONCLUSIONES

PRIMERA: Las variables climáticas relacionadas con la huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región Puno 2019, fueron temperatura mínima $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura máxima $16.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, humedad relativa de 64%, velocidad de viento 2.2 m/s , insolación de 8.4 horas y precipitación acumulada de 748.3 mm y precipitación efectiva de 417.2 mm; la evapotranspiración potencial fue en promedio 3.55 mm/día .

SEGUNDA: La evapotranspiración verde fue estimada en 383.6 mm/periodo , el uso de agua del cultivo en $3836\text{ m}^3/\text{Ton}$, el rendimiento del cultivo en 12.62 t/ha , la huella hídrica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) fue estimada en $303.96\text{ m}^3/\text{t}$ y su valorización económica en 522.81 soles.

TERCERA: La huella hídrica del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) está en relación directa a las variables climáticas en la región Puno 2019-2020, las variables relacionadas fueron la temperatura mínima, máxima, la humedad, la insolación y la precipitación pluvial, el viento no presentó relación significativa.

RECOMENDACIONES

PRIMERA: Al Ministerio de Agricultura, identificar cultivos que puedan suplir de forma parcial a los tubérculos de papa en el consumo de la población y que presenten una menor huella hídrica (olluco, oca).

SEGUNDA: A Universidades, realizar estudios complementarios de la huella hídrica azul y gris para aquellos lugares que cuenten con riego como aporte de agua en el cultivo de la papa e información detallada sobre el uso de fertilizantes químicos, pesticidas y otros.

TERCERA: Realizar estudios comparativos en campo, buscando identificar variedades de papa con menor huella hídrica, como indicador de resistencia a periodos de sequía.

BIBLIOGRAFÍA

- Amézquita, V., & Motta, D. (2015). Evaluación de huella hídrica en la producción de un cultivo de papa R12 ubicado en el municipio El Rosal Cundinamarca. *Ingeniería Ambiental y Sanitaria*, 1(1), 76.
- Arabi, A, Alizadeh, A, Rajaei, Y, Jam, K, & Niknia, N. (2012). Agricultural water foot print and virtual water budget in Iran related to the consumption of crop products by conserving irrigation efficiency. *Journal of Water Resource and Protection*, 4, 318-324.
- Arévalo, D. (2017). *Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica* (IICA, Ed.; Primera).
- Bolaños, M. (2011). *Determinación de la huella hídrica y comercio de agua virtual de los principales productos agrícolas de Honduras*. Universidad de Honduras.
- Cabello, J., López, E., Vandecasteele, C., & Hens, L. (2016). Water footprint from growing potato crops in Cuba. *Tecnología y Ciencia del Agua*, VII(1), 107–116.
- Cabezas, M., & Gonzáles, D. (2017). *Determinación de la huella hídrica y del agua virtual en una plantación de banano como producto de exportación en la finca Santa Narcisa; en el Cantón La Concordia, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas* [PhD Thesis]. Escuela Politécnica Nacional.
- Cahuana, R., & Arcos, J. (2002). *Variedades nativas y mejoradas de papa en Puno* (Primera). Instituto Nacional de Investigación Agraria.
- Canllahui, M. (2013). *Determinación de la evapotranspiración y coeficiente de cultivo (kc) en la producción de papa (Solanum tuberosum L.) Var. Silver en el CIP-Illpa-Puno*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Cauna, D. (2019). *Huella hídrica verde para producción de la papa y quinua para el periodo 2008 – 2017 en la provincia de Puno* [PhD Thesis]. Universidad Nacional del Altiplano.
- Chapagain, A, Hoekstra, A, & Savenije, H. (2016). Water saving through international

- trade of agricultural products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 455-468.
- Clarke, D. (1998). *CropWat for Windows: User Guide*. University of Southampton.
- Costantini, F. (2016). *Agua virtual y huella hídrica: Novísimos criterios sobre la utilización del agua en el mundo* (Vol. 1). IAEE.
- Dirección Regional Agraria. (2019). *Estadísticas agropecuarias, Puno, Perú, 2019* (p. 85). DRA.
- Earle, A. (2001). The role of virtual water in food. *ater Issues Study Group School of Oriental and African Studies*, 33(1), 25.
- Gilmont, M, Antonelli, M, & Greco, F. (2016). Opportunity costs of virtual water: A justification for green-water based agricultural capacity growth for economic, social and environmental sustainability. *Environmental Change Institute*, 1(1), 1-14.
- González, M. (2016). *Análisis comparativo de la huella hídrica en agroecosistemas de la microcuenca Alto Rio Ubaté* [PhD Thesis, Universidad nacional de Colombia]. <http://www.bdigital.unal.edu.co/54617/>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2010). *Metodología de la investigación* (Quinta). McGRAW-HILL.
- Higuera, C., & Julian, O. (2017). Evaluación de indicadores de huella hídrica en la producción de un cultivo de cebolla de bulbo y papa en los municipios de Duitama y Samaca Boyacá. *Journal Universidad Católica de Colombia*, 1(1), 15.
- Hoekstra, A, & Hung, P. (2002). A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Water Research*, 49(11), 203-209.
- Huatay, M., Padilla, A., & Carranza, C. (2019). *Evapotranspiración y requerimientos de agua para la programación de riego de los cultivos Saccharum officinarum L. (Poaceae) "caña de azúcar", Zea mays L. (Poaceae) "maíz" y Asparagus officinalis L. (Asparagaceae) "espárrago" en el valle Chicama, Perú*. 22.
- López, L., & Millán, G. (2017). Evaluación teórica de la huella hídrica en el cultivo de papa en Boyacá (fase 1). *Congreso Internacional de Educación a Distancia y Virtual*,

1(1), 3.

- Mallma, T. (2015). *Huella hídrica de los productos agrícolas de la región Junín comercializadas en la ciudad de Lima* [PhD Thesis, Universidad Nacional Agraria La Molina].
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2166/P10-M34-T.pdf?sequence=1>
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2016). *Huella hídrica en papa*. Ministerio de Agricultura.
- Quispe, J., Quispe, U., Hinojosa, R., & Quispe, J. (2020). Determinación de coeficientes de uso consuntivo (Kc) en cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) por el método lisimétrico en el valle del Mantaro. *PURIQ*, 2(3), 291-306.
<https://doi.org/10.37073/puriq.2.3.88>
- Ramírez, R., & Montiel, V. (2011). Programa Cropwat para planeación y manejo del recurso hídrico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1, 179-195.
- Rocha, A. (2016). El agua virtual en el mundo del siglo XXI. *Universidad Ricardo Palma*, 1(1), 12-18.
- Torres, F. (2019). *Análisis de la huella hídrica verde en la producción de la papa ante los efectos del cambio climático en la subcuenca del río Buin, 2013-2017*. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
- Trezza, R. (2014). *CROPWAT para Windows*.
- Vernaza, E. (2014). *La Huella Hídrica y el Agua Virtual de las Rosas: Como el uso, consumo y aprovechamiento del agua tiene impacto dentro de la cadena de suministro de la industria florícola* [PhD Thesis]. Universidad san Francisco de Quito.
- Vilca, J. (2018). *Huella hídrica de cultivos andinos de la región Puno comercializados en la región Arequipa* [PhD Thesis]. Universidad Nacional del Altiplano.

ANEXOS

Anexo 1. Ventanas de cálculo con el software Cropwat 8.0

ETo Penman-Monteith Mensual - D:\Tesis_Microbiologia\BIOLOGIA_2020\S...

País Estación

Altitud m. Latitud °S Longitud °W

| Mes | Temp Min °C | Temp Max °C | Humedad % | Viento km/día | Insolación horas | Rad MJ/m²/día | ETo mm/día |
|-----------------|----------------|----------------|--------------|------------------|---------------------|------------------|---------------|
| Enero | 4.7 | 15.0 | 80 | 173 | 6.5 | 20.6 | 3.40 |
| Febrero | 3.6 | 15.5 | 73 | 138 | 6.9 | 20.9 | 3.52 |
| Marzo | 2.9 | 16.6 | 70 | 138 | 6.9 | 19.9 | 3.43 |
| Abril | 1.4 | 16.6 | 69 | 225 | 8.3 | 20.0 | 3.44 |
| Mayo | -5.4 | 16.3 | 53 | 156 | 9.3 | 19.1 | 3.21 |
| Junio | -6.1 | 14.2 | 92 | 173 | 9.2 | 17.8 | 2.30 |
| Julio | -5.9 | 14.7 | 57 | 156 | 9.3 | 18.4 | 2.80 |
| Agosto | -3.1 | 14.5 | 60 | 251 | 9.3 | 20.4 | 3.28 |
| Septiembre | -1.8 | 16.1 | 58 | 164 | 9.3 | 22.7 | 3.69 |
| Octubre | -0.4 | 18.1 | 50 | 233 | 8.7 | 23.3 | 4.43 |
| Noviembre | 0.9 | 19.0 | 52 | 242 | 8.7 | 23.9 | 4.66 |
| Diciembre | 4.0 | 18.7 | 58 | 216 | 7.9 | 22.7 | 4.42 |
| Promedio | -0.4 | 16.3 | 64 | 189 | 8.4 | 20.8 | 3.55 |

Figura 4. Módulo de clima en el software Cropwat 8.0

Precipitación mensual - D:\Tesis_Microbiologia\BIOLOGIA_2020\S...

Estación Método Prec. Ef

| | Precipit. mm | Prec. efec mm |
|--------------|-----------------|------------------|
| Enero | 266.6 | 189.3 |
| Febrero | 144.1 | 91.3 |
| Marzo | 101.0 | 56.8 |
| Abril | 38.9 | 13.3 |
| Mayo | 9.3 | 0.0 |
| Junio | 2.0 | 0.0 |
| Julio | 2.3 | 0.0 |
| Agosto | 19.2 | 1.5 |
| Septiembre | 26.5 | 5.9 |
| Octubre | 21.6 | 3.0 |
| Noviembre | 16.8 | 0.1 |
| Diciembre | 100.0 | 56.0 |
| Total | 748.3 | 417.2 |

Figura 5. Módulo de precipitación pluvial real y efectiva en el software Cropwat 8.0

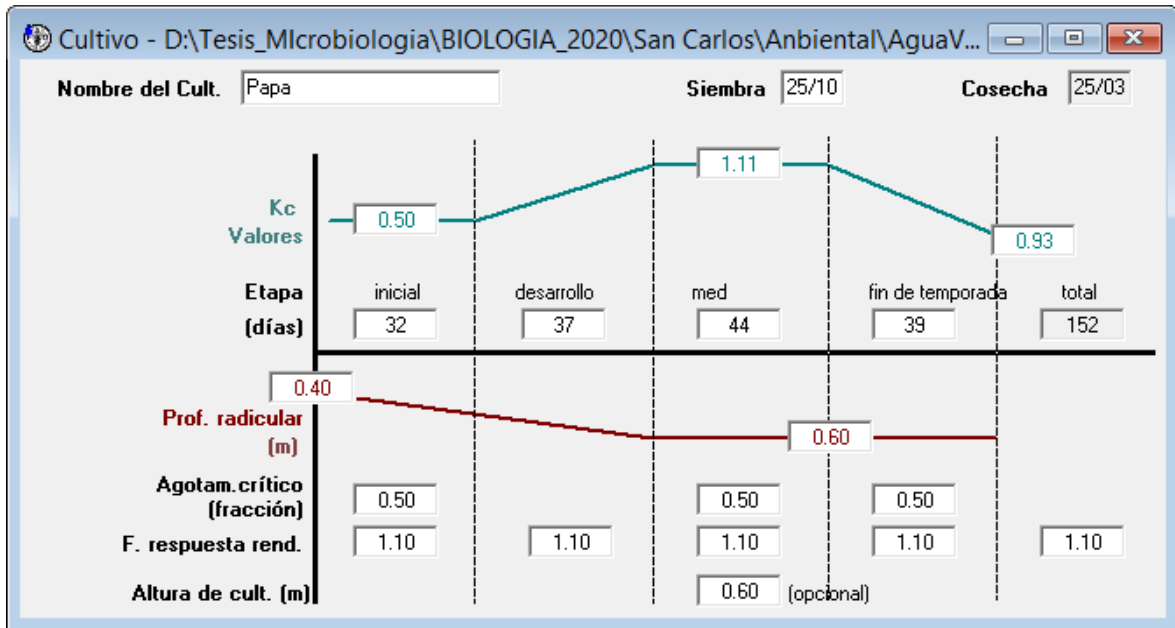


Figura 6. Módulo del cultivo en el software Cropwat 8.0

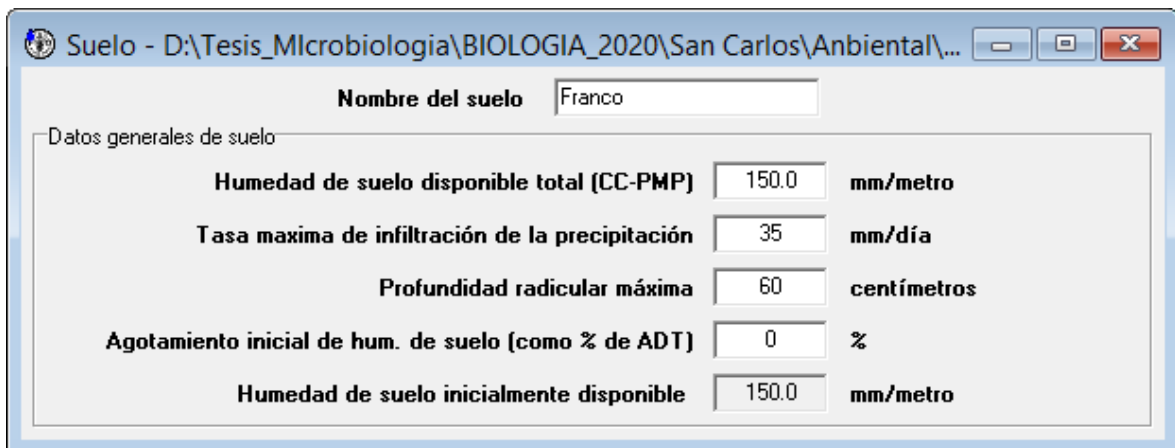


Figura 7. Módulo del suelo en el software Cropwat 8.0

Requerimiento de Agua del Cultivo

Estación ET Cultivo
 Est. de lluvia Fecha de siembra

| Mes | Decada | Etapa | Kc | ETc | ETc | Prec. efec | Req.Riego |
|-----|--------|-------|------|--------|--------------|--------------|--------------|
| | | | coef | mm/día | mm/dec | mm/dec | mm/dec |
| Oct | 3 | Inic | 0.50 | 2.25 | 15.8 | 0.4 | 15.4 |
| Nov | 1 | Inic | 0.50 | 2.29 | 22.9 | 0.0 | 22.9 |
| Nov | 2 | Inic | 0.50 | 2.33 | 23.3 | 0.0 | 23.3 |
| Nov | 3 | Des | 0.52 | 2.40 | 24.0 | 0.2 | 23.8 |
| Dic | 1 | Des | 0.67 | 3.01 | 30.1 | 10.0 | 20.1 |
| Dic | 2 | Des | 0.83 | 3.67 | 36.7 | 15.0 | 21.7 |
| Dic | 3 | Des | 1.00 | 4.08 | 44.9 | 31.0 | 13.9 |
| Ene | 1 | Med | 1.10 | 4.03 | 40.3 | 55.6 | 0.0 |
| Ene | 2 | Med | 1.10 | 3.63 | 36.3 | 74.0 | 0.0 |
| Ene | 3 | Med | 1.10 | 3.71 | 40.8 | 59.5 | 0.0 |
| Feb | 1 | Med | 1.10 | 3.82 | 38.2 | 39.3 | 0.0 |
| Feb | 2 | Fin | 1.09 | 3.84 | 38.4 | 27.4 | 10.9 |
| Feb | 3 | Fin | 1.05 | 3.68 | 29.4 | 24.6 | 4.8 |
| Mar | 1 | Fin | 1.01 | 3.51 | 35.1 | 23.0 | 12.1 |
| Mar | 2 | Fin | 0.97 | 3.33 | 33.3 | 19.3 | 14.0 |
| Mar | 3 | Fin | 0.94 | 3.22 | 16.1 | 6.5 | 8.9 |
| | | | | | 505.6 | 386.1 | 191.8 |

Figura 8. Resultados de requerimiento de agua del cultivo (RAC) en el software Cropwat 8.0

Anexo 2. Matriz de consistencia

| TÍTULO | EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DEL CULTIVO DE LA PAPA (<i>Solanum tuberosum</i>) EN LA REGIÓN PUNO, 2019 - 2020 | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| | MATRIZ DE CONSISTENCIA | | | | | |
| Problema general | Objetivo general | Hipótesis general | Metodología | Variables | Dimensión | Indicador |
| ¿Cuál será la huella hídrica del cultivo de la papa (<i>Solanum tuberosum</i>) en relación a las variables climáticas en la región Puno en 2019 - 2020? | Evaluar la huella hídrica del cultivo de papa (<i>Solanum tuberosum</i>) en relación a las variables climáticas en la región Puno 2019 - 2020. | La huella hídrica del cultivo de la papa (<i>Solanum tuberosum</i>) se encuentra en función de las variables climáticas. | <p>Tipo de investigación: El tipo de investigación será descriptivo, puesto que no se interviene o modifica las variables de estudio, se tomará información existente del SENAMHI y Dirección Regional de Agricultura, siguiendo la metodología de la FAO para hallar la huella hídrica y agua virtual.</p> <p>Diseño de investigación:</p> <p>Diseño descriptivo simple: El investigador busca y recoge información relacionada con el objeto de estudio, no presentándose la administración o control de un tratamiento.</p> <p>Donde:</p> <p>M: Muestra.</p> <p>O: Información (observaciones) relevante o de interés que recogemos de la muestra.</p> | <p>Independientes</p> <p>Climáticas</p> <p>Edáficas</p> <p>Planta</p> | <p>Precipitación pluvial</p> <p>Temperatura</p> <p>Tipo de suelo</p> <p>Requerimiento de agua por el cultivo.</p> | <p>mm</p> <p>°C</p> <p>Unidad edáfica</p> <p>mm de agua</p> |
| Problemas específicos | Objetivos específicos | Hipótesis específicas | | | | |
| <p>¿Cómo se comportan las variables climáticas relacionadas con la huella hídrica en la región Puno?</p> <p>¿Cuál será la huella hídrica del cultivo de la papa (<i>Solanum tuberosum</i>) en la región Puno en 2019 - 2020?</p> | <p>Determinar las variables climáticas relacionadas con la huella hídrica del cultivo de la papa (<i>Solanum tuberosum</i>) en la región Puno.</p> <p>Determinar la huella hídrica del cultivo de la papa (<i>Solanum tuberosum</i>) en la región Puno, 2019 -</p> | <p>Las variables climáticas determinan la huella hídrica del cultivo de la papa (<i>Solanum tuberosum</i>) en la región Puno.</p> <p>La huella hídrica del cultivo de la papa (<i>Solanum tuberosum</i>) en la región Puno es mayor a los</p> | | | | |

| | | | | | |
|--|-------|--------------------------|--|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | 2020. | 2500 m ³ /Ha. | | | |
| | | | | <p>Dependientes</p> <p>Huella hídrica</p> <p>Agua virtual</p> | <p>Uso consuntivo de agua del cultivo.</p> <p>Agua transferida en tubérculos de papa.</p> <p>mm de agua</p> <p>lt/kg</p> |