



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE LA PRODUCCIÓN
DE PAPA EN LA CUENCA DEL RIO HUANCANÉ - PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JULIO CESAR CACERES CHOQUE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2023



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE
LA PRODUCCIÓN DE PAPA EN LA CUEN
CA DEL RIO HUANCANÉ - PUNO**

AUTOR

JULIO CESAR CACERES CHOQUE

RECuento DE PALABRAS

18186 Words

RECuento DE CARACTERES

94153 Characters

RECuento DE PÁGINAS

95 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.3MB

FECHA DE ENTREGA

Dec 12, 2023 12:46 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Dec 12, 2023 12:48 PM GMT-5

● **17% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base c

- 17% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossr

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 15 palabras)



Dr. EDUARDO FLORES CONDORI
REG. C.I.P. 22367



Resumen



DEDICATORIA

A la vida y a mis sueños.

Y a mí, por todo el esfuerzo invertido en mi vida universitaria para poder cumplir mis metas y seguir creciendo profesionalmente y como persona.

Julio Cesar Caceres Choque



AGRADECIMIENTOS

A mis padres Marcos y Juana por siempre animarme y apoyarme en mi etapa académica.

A mi querido hermano Edgar Carlos por brindarme siempre su apoyo en cada momento de mi formación y acompañarme en los momentos más difíciles de mi carrera.

A la Universidad Nacional del Altiplano y todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola por facilitarme los conocimientos necesarios durante mi etapa de estudiante.

Al Dr. Eduardo Flores por su confianza y generosidad para poder culminar mi investigación.

Julio Cesar Caceres Choque



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. GENERALIDADES.....	14
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2.1. Problema general	17
1.2.2. Problemas específicos.....	17
1.3. JUSTIFICACIÓN	17
1.4. HIPÓTESIS	18
1.4.1. Hipótesis general.....	18
1.4.2. Hipótesis específicas.....	19
1.5. OBJETIVOS.....	19
1.5.1. Objetivo general.....	19
1.5.2. Objetivos específicos	19



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.	ANTECEDENTES	20
2.2.	MARCO TEÓRICO	23
2.2.1.	Recurso hídrico	23
2.2.2.	Cambio climático	25
2.2.3.	Cultivo de la papa	27
2.2.4.	Huella hídrica.....	33
2.2.5.	Software CropWat	40
2.2.6.	Evapotranspiración	41
2.2.7.	Evapotranspiración de referencia (ETo).....	42
2.2.8.	Evapotranspiración potencial.....	42
2.2.9.	Métodos de determinación de evapotranspiración.....	43
2.2.10.	Métodos de cálculo de evapotranspiración potencial.....	44
2.2.11.	Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETC)	50
2.2.12.	Coefficiente de cultivo (Kc)	51
2.2.13.	Precipitación efectiva	52
2.2.14.	Demanda hídrica	53
2.2.15.	Demanda agrícola.....	54
2.2.16.	Cedula de cultivo.....	54
2.2.17.	Demanda de agua de uso agrícola	54
2.3.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	55

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DEL RIO HUANCANÉ.....	59
-------------	---	-----------



3.1.1. Ubicación administrativa	59
3.1.2. Ubicación geográfica de la cuenca del rio Huancané	59
3.1.3. Ubicación hidrográfica	60
3.1.4. Climatología.....	61
3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN POR OBJETIVOS ESPECIFICOS	68
3.2.1. Determinación de la evapotranspiración en función de los elementos climáticos del cultivo de papa	68
3.2.2. Determinación de la huella hídrica del cultivo de papa en función de los parámetros climáticos en la Cuenca del rio de Huancané.....	69
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE PAPA POR EL MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH....	73
4.1.1. Método de Penman-Monteith	74
4.2. ESTIMACIÓN DE HUELLA HÍDRICA PARA CULTIVO DE PAPA	75
4.2.1. Aplicación de modelo cropwat	75
4.2.2. Estimación de la huella hídrica método Penman-Monteith	76
4.3. DISCUSIÓN	80
V. CONCLUSIONES	82
VI. RECOMENDACIONES.....	83
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXOS.....	88

Área : Recursos Hídricos

Tema : Estimación de la huella hídrica en cultivo de papa

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 15 de diciembre de 2023



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Factor de evapotranspiración potencial MF en (mm/mes)	47
Tabla 2 Radiación extraterrestre Ra, expresada en equivalentes de evaporación en (mm/día).....	48
Tabla 3 Número de horas de sol máxima media diaria probable para latitud Sur	48
Tabla 4 Resultado de Cropwat para determinar ETo	74
Tabla 5 Penman-Monteith con aplicación de Cropwat.....	76



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Relación agua planta y suelo.....	43
Figura 2 Necesidades de agua por los cultivos.....	53
Figura 3 Ubicación de la comunidad campesina de Huancho Huancané.....	60
Figura 4 Cultivo de papa en Huancho Huancané	61
Figura 5 Mapa de ubicación de la cuenca Huancané	62



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ADT	agua disponible total en la zona radicular [mm]
AFA	agua fácilmente aprovechable de la zona radicular del suelo [mm]
CC	Capacidad de campo
CR	ascenso capilar [mm día-1]
CU	Coefficiente de uniformidad
DP	percolación profunda [mm]
DPe	percolación profunda que abandona la capa evaporante [mm]
E	evaporación [mm día-1]
ET	evapotranspiración [mm día-1]
ETc	Evapotranspiración de cultivo
ETc	evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar [mm día-1]
ETo	Evapotranspiración de cultivo referencial
ETo	evapotranspiración del cultivo de referencia [mm día-1]
FAO	Food and Agriculture Organization
INIA	Instituto Nacional de Innovación Agraria
Kc	Coefficiente de cultivo
pH	Potencial de hidrogeno
PMP	Punto de marchitez permanente



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1 Climatología De Cropwat	89
ANEXO 2 Precipitación Efectiva En Cropwat	89
ANEXO 3 Cálculo De Coeficiente Kc	90
ANEXO 4 Curva Del Coeficiente Del Cultivo De Papa	93



RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo: estimar la huella hídrica en función de los parámetros climáticos en el cultivo de papa; se ha efectuado en la comunidad de Huancho, de la provincia y distrito de Huancané Puno. Para lo cual se llevó a cabo en cuatro fases: diagnóstico del estado actual del uso del agua en el cultivo, cuantificación de la huella hídrica, análisis de resultados y formulación de alternativas. En la fase de diagnóstico se recopiló información que permitió el desarrollo del proceso de cálculo de la huella hídrica, además se utilizó como material de información climático de la estación meteorológica de Huancané y se procedió en las fases 3 y 4; se obtuvieron los valores de la huella hídrica total para la producción de papa en la campaña agrícola 2021 a 2022; el resultado para el método de Penman-Monteith (Cropwat) de la huella hídrica con componentes: de 158.36 m³/tn (azul), 217.86 m³/tn, (verde) y 48.54m³/tn (gris), haciendo un total de 424.76 m³/ton. Los valores obtenidos se compararon con otros estudios realizados las cuales muestran valores de similitud de huellas hídricas: azul, verde y gris; es necesario indicar que en el método estudiado cuyos valores de sus componentes están determinados con las variables climáticos como la precipitación pluvial y la temperatura del aire y las cuales afectan directamente a la fenología de la planta del cultivo de papa.

Palabras clave: Comunidad de Huancho, Evapotranspiración potencial, Huella hídrica, producción de la papa, Variables climáticas.



ABSTRACT

The objective of this research work is to: estimate the water footprint based on the climatic parameters in potato cultivation; It has been carried out in the community of Huancho, in the province and district of Huancané Puno. For which it was carried out in four phases: diagnosis of the current state of water use in cultivation, quantification of the water footprint, analysis of results and formulation of alternatives. In the diagnostic phase, information was collected that allowed the development of the water footprint calculation process. It was also used as climate information material from the Huancané meteorological station and proceeded in phases 3 and 4; The values of the total water footprint for potato production in the 2021 to 2022 agricultural campaign were obtained; the result for the Penman-Monteith (Cropwat) method of the water footprint with components: 158.36 m³/tn (blue), 217.86 m³/tn (green) and 48.54m³/tn (gray), making a total of 424.76 m³/ton. The values obtained were compared with other studies carried out which show similarity values of water footprints: blue, green and gray; It is necessary to indicate that in the studied method whose values of its components are determined with climatic variables such as rainfall and air temperature and which directly affect the phenology of the potato crop plant.

Keywords: Huancho communit, potential evapotranspiration, water footprint, potato production, climatic variables.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

Cabe señalar que la situación general de los recursos hídricos del mundo es alarmante y muy alarmante, considerando que estamos ante una llamada crisis del agua, porque según datos de la ONU, esta crisis afectará a tres países en 2050: un cuarto. de la población mundial a. El Perú no es ajeno a esta problemática situación, aunque paradójicamente nuestro país es uno de los 20 países con más recursos hídricos del mundo con 75.510,00 m³/ha/año. El principal problema es el desequilibrio de la estructura poblacional: el 66% de la población del país vive en zonas costeras, pero sólo se utiliza el 2% de los recursos hídricos del país.

Por lo que, para nosotros, la huella hídrica es un indicador que permite identificar el volumen de agua requerido para cualquier actividad productiva, sea directa o indirectamente, a través de la cadena de suministro de agua sea para consumo humano y para otras actividades. Esta métrica se puede utilizar para analizar la eficiencia del agua en relación con la disponibilidad de recursos en un área geográfica determinada. En otras palabras, nos ayuda a determinar si estamos utilizando los recursos de manera sostenible para satisfacer las necesidades de la población local, garantizar la producción económica local y la reposición de los ecosistemas.

Los recursos hídricos actuales en la región de Puno claramente han experimentado cambios significativos en la distribución de las precipitaciones durante la última década debido al cambio climático y factores climáticos, dado que el cultivo de papa es el principal cultivo en la región. Es científicamente importante para esta región analizar su



huella hídrica en las condiciones ambientales actuales, ya que aún no se conocen estimaciones precisas y actualizadas. Dado que la mayor parte del cultivo de papa en la región de Puno se realiza con agua de lluvia, los cálculos para estimar su huella hídrica se pueden realizar utilizando la llamada agua "verde". Comprender las relaciones hídricas entre las plantas, el suelo y el agua es esencial para comprender el cultivo de la papa. Los procesos que consumen agua tienen un valor significativo, lo que requiere una evaluación de la huella hídrica.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema central de esta investigación se ha basado en la escasez del recurso hídrico, por la variación climática y los factores climáticos del altiplano de Puno, afecta a la agricultura de determinadas zonas del altiplano de la región y que para enfrentar la baja producción de la papa y satisfacer las necesidades alimenticias de su población del medio rural tiene que abastecerse con productos alimenticios de pan llevar.

Sin embargo, A nivel mundial, la situación del agua es alarmante ya que nos enfrentamos a la llamada crisis del agua, una crisis que afectará a tres cuartas partes de la población mundial para 2050, según las Naciones Unidas. Nuestro país no es ajeno a esta situación, aunque paradójicamente es uno de los 20 países con más recursos hídricos del mundo con 75.510,00 m³/ha/año. El principal problema es el desequilibrio de la estructura poblacional: el 66% de la población del país vive en zonas costeras, pero sólo se utiliza el 2% de los recursos hídricos del país.

Alrededor del 76% de la huella hídrica de la producción total del país está relacionada con el sector agrícola, que es el único sector que utiliza agua verde y es el mayor usuario de agua azul, ya que el 70% de los recursos hídricos extraídos para riego



representan el 6% del área total del Perú, que es alrededor de 7,6 millones de acres (Pregram, y otros, 2015).

En este contexto, existe la necesidad de mejorar la eficiencia del agua de riego y racionalizar los recursos hídricos de riego, aumentando así la productividad del agua (medida como rendimiento obtenido por unidad de agua), que es una estrategia potencial para la conservación del agua de riego. Sequía radicular (PRD).

Se evaluó el efecto del PRD en una variedad de cultivos de papa en condiciones de campo. El experimento consistió en la evaluación del rendimiento y cuantificación del consumo de agua del cultivo de papa en condiciones normales de riego (T1) con una temperatura de riego del 100% del agua del cultivo. requerimiento y uno más en condiciones normales de riego (T1) Bajo el sistema PRD (T2) se utiliza un sistema de riego por goteo para cubrir el 70% del requerimiento de agua del cultivo. Los resultados respecto a los rendimientos obtenidos a la cosecha para el T1 y T2 mostraron que existe diferencias altamente significativas entre ambos tratamientos, mostrando también que el PRD incremento la eficiencia de uso de agua (Sanchez, 2001)

La evapotranspiración potencial es importante porque su evaluación implica el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos, la planificación del riego y estudios hidrológicos. A pesar de la baja disponibilidad de los recursos hídricos en el altiplano peruano, poca investigación se ha llevado adelante relacionada a la determinación de los requerimientos de riego bajo las condiciones prevalecientes de clima y suelo (Michel, 1997).



Para el presente trabajo de investigación se han formulado las siguientes interrogantes:

1.2.1. Problema general

¿De qué manera influyen los parámetros climatológicos en la determinación de la huella hídrica en el cultivo de papa en la cuenca del río Huancané de Puno?

1.2.2. Problemas específicos

¿Cuál es la influencia de los elementos climáticos en el proceso de evapotranspiración potencial en el cultivo de papa, aplicando el método de Penman-Monteith en la cuenca del río Huancané comunidad Huancho?

¿Cómo es la influencia de los parámetros climáticos en la determinación de la huella hídrica en el cultivo de papa en las cuencas del río de Huancané comunidad Huancho?

1.3. JUSTIFICACIÓN

El agua es un líquido importante en la Tierra sin el cual la vida no puede existir. Aunque nuestro planeta se llama planeta azul por su presencia, pero debido a la gran superficie de agua, es obvio que el agua dulce, la mayor parte de la tierra cultivada Las plantas utilizadas se limitan a determinadas zonas geográficas y son cada vez más raras. En este contexto, el estudio de la huella hídrica juega un papel importante en la conservación de este recurso, ya que el uso excesivo del agua puede provocar un desequilibrio en su equilibrio, especialmente en la sierra del Perú y especialmente en la región de Puno. El principal cultivo en términos de rendimiento y rendimiento son las



patatas, cuyo cultivo se desarrolló en condiciones secas, es decir, con la ayuda de la precipitación atmosférica.

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). Este estudio se basa en métodos modernos de análisis del uso del agua de los cultivos para consumo directo; Estos métodos permiten cuantificar el transporte y consumo de agua requerido para la producción de tubérculos de papa. Este estudio se centra en el análisis de la huella hídrica verde en las actividades agrícolas, por lo que hay motivos para mostrar la importancia de este indicador, que puede convertirse en una herramienta importante para una adecuada gestión del agua y de los riesgos estratégicos asociados a este elemento, tanto en producción. y a nivel de proceso, principalmente en ecosistemas donde la escasez puede ser un problema en relación al cambio climático.

La información de estas estimaciones ayudará a planificar el uso del agua en la unidad hidrológica de acuerdo con los requerimientos del cultivo de papa, con el fin de utilizar racionalmente este recurso, lo que significará una mejora en la calidad y cantidad de la producción. El análisis de la Huella Hídrica Verde proporciona a los agricultores y productores información importante, mejora su comprensión del uso del agua y les permite diseñar y evaluar estrategias de gestión para este elemento esencial.

1.4. HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis general

La huella hídrica está determinada por los parámetros climáticos en el cultivo de papa en la cuenca del río Huancané de Puno.



1.4.2. Hipótesis específicas

La evapotranspiración potencial está determinada por la temperatura del aire, precipitación pluvial, radiación solar, humedad relativa, y la velocidad del viento en la cuenca del río Huancané comunidad Huancho

La huella hídrica del cultivo de papa está determinada por los parámetros climáticos en la cuenca del río de Huancané de la comunidad Huancho

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Estimar la huella hídrica en función de los parámetros climatológicos en el cultivo de papa en la cuenca del río Huancané de Puno.

1.5.2. Objetivos específicos

Determinar la evapotranspiración en función de los elementos climático del cultivo de papa utilizando el método Penman-Monteith en la cuenca del río Huancané comunidad de Huancho.

Determinar la huella hídrica del cultivo de papa en función de los parámetros climáticos en la Cuenca del río de Huancané de la comunidad Huancho.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

En los últimos años, los consumidores han demandado no sólo productos de buena calidad, sino también productos respetuosos con el medio ambiente o silenciosos. Para ello es necesario contar con indicadores que reflejen el impacto de la producción sobre los recursos naturales del planeta (Hoekstra & Hung, 2002), introdujeron el concepto de huella hídrica al generar un indicador de consumo directo e indirecto de agua dulce, incorporando la cuantificación de su contaminación. La huella hídrica de un producto se define como “el volumen total de agua dulce que se utiliza para producirlo, a lo largo de la cadena de suministros” (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011).

Tradicionalmente, las estadísticas sobre el uso del agua se han centrado en medir las extracciones de agua y el uso directo del agua relacionados con la evapotranspiración de los cultivos. El método de estimación de la huella hídrica considera una perspectiva mucho más amplia, midiendo tanto el uso de agua directa como la indirecta, donde la segunda se refiere al uso de agua en la cadena de suministro de un producto (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011).

Todos los procesos fisiológicos de las plantas son afectados directa o indirectamente por la cantidad de agua existente en el suelo. La producción es una función de las actividades fisiológicas de los vegetales y está naturalmente subordinada a factores, que, como el agua, afecta dichas actividades. (Bear, 1963), afirma que las necesidades de agua de la planta varían primordialmente con la necesidad de la misma, fertilidad del suelo y características climáticas de la zona (humedad, radiación, temperatura, horas de



sol). Así mismo, las plantas precisan grandes cantidades de agua, material alimenticio y de transporte, siendo el agua el disolvente que permite la penetración en ellas de nitrógeno y de las sustancias minerales (Doorembos & Kassam, 1979) exponen, que, si existe un déficit riguroso de agua durante el periodo vegetativo, generalmente se retrasa el crecimiento de las plantas y ocasiona un desarrollo no uniforme.

Torres (2020), realiza una investigación con el fin de analizar el comportamiento de la huella hídrica verde en la producción de la papa ante los efectos climáticos en la subcuenca del río Buin, durante el periodo 2013-2017, utilizando estudios de suelo, cultivo (FAO) y meteorología; y apoyándose del software CropWat alcanzó valores anuales de evapotranspiración del cultivo de la papa y la precipitación efectiva dentro de la subcuenca del río Buin. A partir de estos valores obtenidos determino la huella hídrica verde (m^3 /t) utilizando la ecuación del Dr. Hoekstra. Donde concluye que, en un escenario de variabilidad climática, la variación de la temperatura durante el periodo de estudio (2013 – 2017) generó un incremento de la pérdida de agua del cultivo de la papa a través de la evapotranspiración.

Vizcarra (2022), en su investigación determinó la huella hídrica total de los cultivos de arroz y papa en el distrito de Uraca, aplicando la metodología desarrollada por Hoesktra, Chapain Aldaya y Mekonnen. Para lograr obtener esta información se desarrolló recolectando información de campo y tomando muestras, con el software CROPWAT 8.0 se realizó el modelamiento para lograr estimar los requerimientos hídricos de los dos cultivos. De las pruebas realizadas se pudo conocer el estado actual del uso del agua en el distrito de Uraca, abarcando zonas enteras donde el sistema de riego no está regulado para los usuarios y el volumen de agua que maneja la Autoridad Local de Camaná Majes para esta zona es 178.35 hm^3 para cultivos de arroz y 55.36 hm^3 para los cultivos de papa. Se utilizó el software CROPWAT 80. para determinar la huella



hídrica total y sus componentes huella hídrica azul, verdes y gris, los valores que se obtuvo fueron de 136.73 m³/t para cultivos de papa y 1069.52 m³/t para cultivos de arroz. El recurso hídrico necesario para el cultivo del arroz es una cantidad significativa, mientras que para cultivos de papa sólo requieren cantidades moderadas.

Bernuy (2018), en su estudio, centra la atención en examinar cómo los patrones climáticos influyen en la huella hídrica verde durante el cultivo de papa en la provincia de Huaros, Canta. utilizó data proporcionada por la estación meteorológica “Huaros” de los años 2013-2018 y 1971-2000 estimando la Huella Hídrica verde mediante el modelado con el software CROPWAT 8.0 y calculó el uso actual del recurso hídrico proveniente de las precipitaciones en las últimas campañas agrícolas. A través de la sistematización de datos analizó la relación entre el volumen del agua de lluvia en esa zona y el requerimiento hídrico para la producción de vegetales a lo largo del tiempo, así contribuye científicamente esta investigación, al determinar la huella hídrica verde para periodos futuros próximos en la zona de estudio. Llegando a la conclusión que, de acuerdo al escenario climático actual, no existe suficiente agua verde en la región de Huaro para cubrir las necesidades del cultivo de papa en campañas como las de 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016, 2016/2017 y 2017/2018 donde la huella hídrica verde es de 627.82 m³/ton, 681.02 m³/ton, 613.04 m³/ton, 642.74 m³/ton y 540.81 m³/ton respectivamente.

Según, (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006) recomiendan FAO Penman Monteith (PM) como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia. Además, se han desarrollado procedimientos y recomendaciones para la utilización de PM con datos climáticos limitados, se crea una base consistente y transparente para una estandarización universal de los cálculos de los



requerimientos de agua del cultivo. (Tabari, Kisi, Ezani, & Hosseinzadeh, 2012), plantearon que PM presenta dos ventajas sobre otras ecuaciones.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Recurso hídrico

“El agua tiene valor sociocultural, valor económico y valor ambiental, por lo que su uso debe basarse en la gestión integrada y en el equilibrio entre éstos” (ANA, 2019). Es importante el acceso a este recurso para la satisfacción de las necesidades primarias de la persona humana por ser un derecho fundamental sobre cualquier uso, inclusive en épocas de escasez (Arevalo, 2012).

Por ello, el estado peruano ha creado mecanismos para la participación de los usuarios y de la población organizada en la toma de decisiones que afectan el agua en cuanto a calidad, cantidad, oportunidad u otro atributo del recurso (ANA, 2009).

“El agua tiene valor sociocultural, valor económico y valor ambiental, por lo que su uso debe basarse en la gestión integrada y en el equilibrio entre éstos” (ANA, 2019).

Es importante el acceso a este recurso para la satisfacción de las necesidades primarias de la persona humana por ser un derecho fundamental sobre cualquier uso, inclusive en épocas de escasez (Arevalo, 2012).

Por ello, el estado peruano ha creado mecanismos para la participación de los usuarios y de la población organizada en la toma de decisiones que afectan el agua en cuanto a calidad, cantidad, oportunidad u otro atributo del recurso (ANA, 2009).



2.2.1.1. Disponibilidad del recurso hídrico

Los recursos hídricos se encuentran en la naturaleza en diversas formas y lugares, como la atmósfera, la superficie, el subsuelo y los océanos.

Precipitaciones

Se encuentran en forma de lluvia, nieve y rocío, que son importantes para renovar los recursos hídricos y mejorar las condiciones climáticas y la biodiversidad (Arevalo, 2012).

En función de las condiciones locales, las precipitaciones pueden alimentar ríos o lagos, recargar los suministros de aguas subterráneas o volver a la atmósfera por evaporación (UNESCO, 2015).

Glaciares

Almacenan agua en forma de nieve y hielo y liberan más o menos agua en los arroyos locales según la estación. Sin embargo, por los efectos del cambio climático, muchos de ellos están en proceso de retroceso, causando la variación de los caudales de ríos y arroyos (UNESCO, 2015).

Humedales

Representan aproximadamente el 6% de la superficie terrestre emergida y desempeñan un papel fundamental para los ecosistemas locales y los recursos hídricos (UNESCO, 2015).



Aguas subterráneas

Este tipo de agua presenta buena calidad y se extrae principalmente para satisfacer necesidades de consumo humano y agrícola en los climas áridos (UNESCO, 2015).

El agua del suelo se renueva en general por procesos activos de recarga desde la superficie. La renovación se produce lentamente cuando la comparamos con la de los depósitos superficiales, como los lagos, y los cursos de agua (Arevalo, 2012).

2.2.2. Cambio climático

Actualmente, existe mucha investigación sobre el cambio climático (CC), que se define como un cambio estadísticamente significativo en el estado medio del clima o su cambio persistente a largo plazo. Así en la actualidad todavía hay mucho que aprender respecto a sus implicancias. (Martinez, Boueri, & Escalona, 2005).

2.2.2.1. Cambio climático y el recurso hídrico

Teniendo en cuenta la relación estrecha del ciclo hidrológico y el clima surge la preocupación sobre los impactos negativos del cambio climático, como el incremento de temperatura esperado que tendría importantes repercusiones en el ciclo hidrológico, global y local, y por consiguiente en la disponibilidad de los recursos hídricos en las zonas más vulnerables (Martinez, Boueri, & Escalona, 2005).

En el informe emitido por el IPPC (2012), se indica que en las latitudes altas se espera un incremento de la precipitación y el



escurrimiento, lo que podría incrementar la oferta de agua en esas regiones, mientras que en latitudes medias y zonas subtropicales se prevén importantes disminuciones en la precipitación y el escurrimiento, lo que ocasionará un incremento en las condiciones de escasez y mayor presión sobre los recursos.

2.2.2.2. Cambio climático y la agricultura

(Parry & Fischer, 2004), mencionan que la agricultura es extremadamente vulnerable al cambio climático. En última instancia, el aumento de las temperaturas reduce el rendimiento de cultivos deseables, al tiempo que provoca la propagación de malezas y plagas. Además, los cambios en las precipitaciones aumentan la probabilidad de malas cosechas a corto plazo y pérdidas de producción a largo plazo.

Sin embargo, (Iglesias & Medina, 2009) afirman que algunos aspectos del cambio climático como el incremento de las temperaturas pueden resultar beneficiosas en algunas regiones, disminuyendo las heladas en las zonas altas; pero también tendrán impactos negativos y adversos, como la falta de disponibilidad de agua y ocurrencia de fenómenos climatológicos extremos más frecuentes.

Los potenciales beneficios y efectos negativos descritos, no se dan en todas las regiones, dependerán en buena medida de lo que el cambio climático suponga respecto a las condiciones de partida de cada región (Iglesias & Medina, 2009).

En el Perú, el estudio más amplio en evaluar el impacto del cambio climático (CC) sobre el sector agrícola fue el desarrollado por la (Autoridad Nacional del Agraria (ANA), 2009), que estimó las pérdidas frente al CC para los principales cultivos de la agricultura peruana como la papa, arroz, maíz amarillo duro, caña de azúcar, café, plátano y maíz amiláceo, los cuales concentraron el 47% del valor de la producción agrícola.

2.2.3. Cultivo de la papa

El cultivo de tubérculos andinos se ha convertido en un importante motor de la economía regional y local en las regiones productoras, generando más de 26 millones de jornadas laborales en 2021. Las papas comerciales (papas amarillas, papas blancas, papas de corte, papas de Huamantanga, etc.) se cultivan en una altitud superior a 200 metros, mientras que las patatas locales se cultivan a una altitud de 3.000 a 4.200 metros. Otros cultivos no crecen en estos lugares.

La papa (*Solanum tuberosum L.*) es un cultivo básico para los pequeños agricultores de la región andina, donde la diversidad genética de las especies de papa cultivadas y silvestres es enorme, y son una fuente importante de calorías y proteínas. Sin embargo, a pesar del alto potencial de rendimiento del cultivo de papa, los rendimientos y la productividad promedio en el Perú, especialmente en la meseta de Puno, son bajos en comparación con los rendimientos promedio de otros sectores. Actualmente la zona de Puno se encuentra bajo cultivo.

La superficie de papa es de alrededor de 40.000 hectáreas, el rendimiento es de 225.000 toneladas y el rendimiento promedio es de 9,6 toneladas/hectárea.



2.2.3.1. Taxonomía y morfología

Las patatas pertenecen a la familia de las Solanáceas y pertenecen a las especies *Solanum tuberosum* y *Solanum andigenum*. El tipo de planta es herbácea anual con raíces muy ramificadas, finas y largas, dependiendo su desarrollo de que el suelo esté o no mullido (Daniel, 2005).

2.2.3.2. Tallo

El tallo de la papa se produce en las yemas del tubérculo alcanzando a una altura que varía de 0.5 a 1m. Esta parte del cultivo es grueso, fuerte, anguloso, y consta de nueve o más foliolos, cuyo tamaño es tanto mayor cuanto más alejados se encuentran del nudo de inserción (Román Cortéz & Hurtado, 2002).

2.2.3.3. Raíz

La raíz formada es fibrosa, su mayor crecimiento lo desarrolla en los primeros 0.20 m de profundidad, extendiéndose de 0.30 hasta 0.60 m. En suelos francos y profundos las raíces laterales fibrosas pueden llegar hasta 1.20m de profundidad (Daniel, 2005).

2.2.3.4. La flor

“Las flores de la papa son bisexuales (tienen ambos sexos), y poseen las cuatro partes esenciales de una flor: cáliz, corola, estambres y pistilo” (Inostrosa et al., 2009).

2.2.3.5. El fruto

“Es una baya redondeada de color verde, que se vuelve amarilla al madurar” (Inostrosa, Mendez, & Sotomayor, 2009).



2.2.3.6. Estolones

Son tallos lindantes que crecen horizontalmente por encima del suelo a partir de yemas de la parte subterránea de los tallos. Éstos pueden formar tubérculos mediante un agrandamiento de su extremo terminal (Inostrosa, Mendez, & Sotomayor, 2009).

2.2.3.7. Tubérculos

“Son tallos modificados y constituyen los principales órganos de almacenamiento de la planta de papa. Tienen dos extremos: el basal, o extremo ligado al estolón, que se llama talón, y el extremo expuesto, que se llama extremo apical o distal” (Inostrosa, Mendez, & Sotomayor, 2009).

2.2.3.8. Semilla

La baya es ovalada alargada, de 1 a 3 cm de diámetro, de color verde y contiene semillas de patata. Su forma y color son similares a los tomates, pero diferentes a los tomates. La mitad de su tamaño; es bifoliado y pesa 0,5 mg.

2.2.3.9. Variedades del cultivo de la papa

En base al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) podemos mencionar que cuenta con 7,408 registros de variedades de papa nativa o que son oriundas del Perú. A través del Registro Nacional de la Papa Nativa del Perú se reconoce este cultivo como patrimonio del Perú, de las comunidades y agricultores que las han desarrollado y conservan este recurso genético fundamental (INIA, 2014).



El ciclo vegetativo en el cultivo de patatas puede durar de 90 a 210 días, dependiendo de la variedad. Según la duración del ciclo de nutrientes del cultivo, las variedades de papa se pueden dividir en tempranas, medias tardías y tardías. La duración del ciclo vegetativo de una variedad puede ser menor o mayor a su periodo normal debido a condiciones climáticas desfavorables, manejo agronómico inadecuado en las labores de riego (la deficiencia de agua retrasa la emergencia de las plántulas y produce una maduración precoz del cultivo), fertilización, entre otras (Cortes, 2000).

2.2.3.10. Características edáficas para la papa

Estructura del suelo

El cultivo de la papa prospera satisfactoriamente en suelos bien estructurados, los que les confiere un buen drenaje y facilidad de desarrollo del sistema radicular para la extracción de nutrientes (Alvarez, 2002).

Humedad del suelo

El suelo debe mantener un contenido de humedad relativamente alto. Los rendimientos óptimos se obtienen utilizando de 500 a 700 mm de agua durante 120 a 150 días de cultivo. En general, la falta de agua hace disminuir la producción cuando se produce a mitad o fines del período de desarrollo, más que si falta al inicio (Daniel, 2005).

Materia orgánica

La materia orgánica mejora la estructura de los suelos, pero la práctica continua de labranza destruye la agregación y deteriora la



estructura de éste, reduciendo paralelamente su contenido de ésta (Cortes, 2000).

Compactación

La compactación del suelo pertenece a la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa de suelo, debido a fuerzas externas que actúan sobre él. Estas fuerzas externas, en la actividad agrícola, tienen su origen principalmente en implementos de labranza del suelo, cargas producidas por los neumáticos de tractores e implementos de arrastre, pisoteo de animales, etc., (Inostrosa, Mendez, & Sotomayor, 2009).

Características químicas

El cultivo de la papa se desarrolla mejor en valores de pH comprendidos entre 5,5 y 7, condiciones que suelen darse más en los terrenos arenosos. También puede vegetar en terrenos arcillo-calizos, llegando a tolerar un pH igual e incluso superior a 8 (Inostrosa, Mendez, & Sotomayor, 2009).

2.2.3.11. Condiciones climáticas para la papa

Temperatura:

“La papa requiere temperaturas de 15 a 20°C para su tuberización (formación de tubérculos) y crecimiento” (Daniel, 2005).

La papa es considerada una planta termo periódica, lo que significa que es forzoso una variación, entre la temperatura diurna y la nocturna, de por lo menos 10°C. Cuando esta situación se da a menudo, a lo largo del



ciclo vegetativo, existe resultados positivos en el rendimiento y la calidad, pues las temperaturas altas son ideales para el crecimiento de tallos y hojas, y bajas para los tubérculos (Cortes, 2000).

Precipitación

Para satisfacer las necesidades de agua, la papa necesita entre 400 y 800 mm, de acuerdo con las condiciones climáticas y de la duración del cultivo (Rojas, 2001).

Los tubérculos se pueden cultivar bajo lluvia natural o bajo riego; cambios demasiado grandes en la humedad del suelo pueden afectar la calidad de los cultivos. Además, después de una sequía prolongada, el agua puede causar crecimientos de otras plantas (Faiguenbaum, 1987).

Viento

Se debe evitar sembrar la papa en zonas muy expuestas al viento con velocidades mayores a 20km/h, para evitar heridas en el follaje y efectos negativos en el rendimiento (Rojas, 2001).

Altitud

“La altitud ideal para el desarrollo y producción del cultivo de la papa para consumo se encuentra entre los 1500 a 2500 m.s.n.m., pero puede cultivarse en alturas menores como de 460 m.s.n.m.” (Daniel, 2005).



2.2.4. Huella hídrica

2.2.4.1. Definición y componentes de la huella hídrica total

La huella hídrica se deriva del concepto de agua virtual, que se define como la cantidad de agua necesaria para producir un bien o servicio. El concepto fue desarrollado por el investigador John Allen mientras investigaba la posibilidad de importar agua virtual como solución parcial a la escasez de agua en los países de Medio Oriente.

Muchos países conservan los recursos hídricos importando productos que consumen mucha agua y exportando materias primas que consumen menos agua. El ahorro nacional del agua a través de la importación de un producto puede suponer el ahorro de agua a nivel global, si el flujo es de los lugares de alta productividad hacia los sitios con baja productividad del agua, actualmente, la huella hídrica ha llegado a ser una herramienta complementaria a las convencionales para la gestión integral del recurso hídrico. (Chapagain & Hoekstra, 2007)

La huella hídrica es un indicador del uso de agua dulce y se refiere no sólo al uso directo del agua por parte de consumidores o productores, sino también al uso indirecto del agua. La huella hídrica de un bien o servicio es la cantidad total de agua necesaria para producirlo, ya sea externa (cuando los productos se importan) o interna (cuando estos productos se producen dentro del territorio de un país).

El valor final de la huella hídrica se calcula de diferentes formas según el método utilizado, puede ser la suma de los tres tipos de agua (azul,



verde o gris) o la suma de la huella hídrica directa más la suma de las indirectas. huella de agua. dependiendo de Calcular la huella hídrica de un sector de actividad o individuo o sociedad en unidades de masa (metro cúbico/kg) o de tiempo (metro cúbico/año) (Centro Nacional de Información sobre la Calidad, 2012).

La huella hídrica, también denominada huella hidrológica o huella de agua, fue introducido por (Hoekstra & Hung, 2002)), con el objetivo de desarrollar un indicador basado en el consumo del uso de agua dulce, definiéndolo como el “volumen total de agua dulce consumida directamente e indirectamente por una nación o una empresa, o en la provisión de un producto o servicio”.

En resumen, 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 (m³ /t)

HH_{VERDE} : Huella hídrica verde (m³ /t)

HH_{GRIS} : Huella hídrica gris (m³ /t)

HH_{TOTAL} : Huella hídrica total (m³ /t)

2.2.4.2. Componentes de la huella hídrica directa

En términos generales la huella hídrica es, “un indicador de la apropiación de agua dulce, medido en términos de los volúmenes de agua consumida (evaporada o incorporada a un producto) y contaminada por unidad de tiempo” (Falkenmark & Rockström, 2006).

Así, este concepto proporciona información adicional en comparación con los indicadores tradicionales, puesto que vincula el consumo humano en el espacio y tiempo de producción, contabiliza el uso del agua en todas las etapas de la cadena de suministro de un producto y es un medio útil para la estimación de los flujos de agua a través del comercio de productos y materias primas (Chenoweth, 2013).

La huella hídrica se encuentra definida más específicamente para un proceso o producto, y para cualquier grupo definido de consumidores o productores (organización pública, empresa privada, sector económico), desde la perspectiva del productor y el consumidor, la huella hídrica es un indicador del uso tanto directo como indirecto del agua (Chapagain & Hoekstra, 2007).

En este caso, los gobiernos, el mundo académico, las ONG u otras organizaciones pueden utilizar la información sobre la huella hídrica para crear conciencia o comprender los cambios y tendencias en los patrones de consumo relacionados con el agua. Además, puede ser utilizada para la gestión del agua, comparando las huellas hídricas que consumen y contaminan los sectores de la producción en una determinada área



geográfica con la disponibilidad de agua en esta área (UNEP & KOIKA, 2010).

Huella hídrica azul

La huella hídrica azul se define como el volumen de agua dulce extraído de los cuerpos de agua, que es consumido y que no retorna (Chapagain & Hoekstra, 2007). Refiriéndose principalmente al uso y consumo del agua de ríos, lagos o acuíferos para satisfacer la demanda originada en un proceso donde se requiere de intervención humana directa (Arevalo, 2012).

“La huella hídrica azul está presente en el sector agrícola por el agua consumida que es suministrada mediante riego y en todos los sectores que tienen procesos no asociados directamente con un proceso agrícola” (Arevalo, 2012).

Es un indicador del uso consuntivo de agua azul, es decir, agua dulce captada de una fuente superficial o subterránea la cual se ha incorporado en el producto o evaporado o se transvasa a otra cuenca, como resultado de la producción de un bien o servicio (Hoekstra & Hung, 2002).

$$HH_{AZUL} = \frac{UAC_{AZUL}}{Y} \left(\frac{m^3}{t} \right)$$

Donde Y = rendimiento del cultivo en (ton/ha.);

UAC = uso de agua azul del cultivo expresada en (m³ /ha.)

$$UAC_{AZUL} = 10 * \sum_{d=1}^{lgp} ETC_{AZUL}$$



Donde:

Σ = ciclo de crecimiento del cultivo, es decir, desde la siembra (día 1) hasta la cosecha;

l_{gp} = longitud, días de cada etapa del ciclo;

ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm/día).

Huella hídrica verde

Debido a los diferentes impactos ambientales y los costos de oportunidad de las diversas formas de uso del agua, la huella hídrica total a nivel nacional o del producto se divide en sub-categorías de agua verde, azul y gris (Hoekstra & Hung, 2002).

(Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011), indica que la huella hídrica verde “se refiere a la precipitación sobre la tierra que no provoque escorrentía o se sume a las aguas subterráneas, pero que se mantenga en el suelo, su superficie o la vegetación, con el tiempo, esta parte de la precipitación se evapora o transpira a través de las plantas.

La HH verde sólo está presente en el sector agrícola y pecuario, y satisface una demanda sin requerir para ello de intervención humana (Arevalo, 2012).

Representa el agua de lluvia consumida directamente por la vegetación o los cultivos a través de la evapotranspiración de la humedad almacenada en el suelo, también conocida como precipitación efectiva o productiva (Hoekstra & Mekonnen, 2012).

Es la cantidad de agua procedente de la precipitación que no se pierde por escorrentía superficial ni se añade al agua subterránea, sino que permanece en la superficie y se utiliza para la vegetación. Esta agua se almacena en los estratos superficiales del terreno, satisfaciendo la demanda natural de la vegetación y de los cultivos e incorporándose en ellos (aunque no toda el agua verde puede ser absorbida por el cultivo, ya que, siempre existirá la evaporación del agua contenida en el suelo) (Hoekstra et al. 2011). Cabe mencionar que los principales sectores que generan la huella hídrica verde es el agrícola y forestal, siendo necesario para el cálculo considerar las siguientes variables de interés:

$$HH_{VERDE} = \frac{UAC_{VERDE}}{Y} \left(\frac{m^3}{t} \right)$$

Donde:

Y (t/ha.) = rendimiento del cultivo;

UAC es el uso de agua verde del cultivo expresada en (m³ /ha).

$$UAC_{VERDE} = 10 * \sum_{d=1}^{lgp} ETC_{VERDE}$$

Donde:

Σ = ciclo de crecimiento del cultivo, es decir, desde la siembra (día 1) hasta la cosecha;

lgp = longitud, días de cada etapa del ciclo;

ETc = evapotranspiración del cultivo (mm/día).



Huella hídrica gris

La huella hídrica gris es la cantidad de agua necesaria para diluir un contaminante que llega al cuerpo de agua receptor para alcanzar un nivel de calidad específico y se estima solo para los contaminantes más importantes en cada proceso de cultivo. Estos contaminantes incluyen fertilizantes como nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), pesticidas e insecticidas. Por lo tanto, la huella hídrica gris es un indicador del grado de contaminación del agua que puede estar asociado a un proceso (Bolaños, 2011)

La huella hídrica gris de un producto o proceso debe ser calculada para cada uno de los contaminantes y considerar al que presenta mayor impacto por ser el más crítico. Se calcula dividiendo la carga contaminante que entra en un cuerpo de agua (L) sobre la diferencia entre el nivel máximo permisible de un contaminante (C_{max}) y la concentración natural del mismo (C_{nat}), multiplicado por la inversa del rendimiento (Y-1).

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

Donde:

HH_{GRIS} : Huella hídrica gris (m³ /toneladas)

L : Carga de contaminantes (masa/área)

Y : Rendimiento (toneladas/hectárea)

C_{MAX} : Concentración máxima permitida del contaminante (kg/m³)

C_{NAT} Concentración natural permitida del contaminante (kg/m^3), refiriéndose a la concentración del contaminante en el cuerpo de agua que podría ocurrir sin intervención humana.

En los sistemas agrícolas, la principal fuente de contaminación del agua es difusa mediante el uso de fertilizantes y pesticidas, de los cuales sólo una pequeña fracción puede filtrarse en las aguas subterráneas o fluir por la superficie hacia los cursos de agua superficiales. Esto hace que sea costoso cuantificar y caracterizar el agua que sale del sistema. El cálculo de la huella hídrica requiere determinar la carga (L), la cual está determinada por el coeficiente alfa (α), que determina la fracción lixiviante del compuesto y la cantidad de producto químico aplicado al suelo (Appl). (Franke et al., 2013).

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

Dónde:

a = Factor de lixiviación.

Appl = aplicación del producto.

$C_{max.}$ = Concentración máxima.

Y = Rendimiento de cultivo de papa.

2.2.5. Software CropWat

CropWat (cultivo: cultivo; wat: agua) es un programa de la FAO que utiliza el método Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de los cultivos (ETC). Es un programa informático que se puede utilizar para calcular el



clima en función de las necesidades de los cultivos y del agua. necesidades de riego y datos de rendimiento, tanto existentes como nuevos. Además, el programa permite la elaboración de calendarios de riego para diferentes condiciones de manejo y el cálculo de provisión de agua para diferentes patrones de cultivos (FAO, 2006).

Dichos procedimientos ayudan a manipular y representar factores complejos de la vida real, permitiendo generar y analizar hipótesis en diferentes aspectos, permitiendo proponer alternativas para su verificación en campo. Sin embargo, el nivel de precisión de los resultados dependerá de la disponibilidad y confiabilidad de la información requerida, añadido a esto, las limitaciones que presenta el software sólo permitirán estimaciones referenciales dependiendo de la magnitud y las características del estudio (Estrada & Dario, 2004).

2.2.5.1. Método de Penman-Monteith

Este método fue introducido por Charles Penman y John Monteith, el cual fue adoptado por la FAO en el año 1989 para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en donde se combinó un balance energético con un método de transferencia de masa a partir de datos climáticos estándar de horas de sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad del viento (FAO, 2006).

2.2.6. Evapotranspiración

Se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación (FAO, 2006).



La evaporación es el proceso mediante el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se elimina de las superficies, mientras que la transpiración es la evaporación del agua líquida del tejido vegetal. Estos procesos ocurren de manera simultánea, pero en diferente proporción a lo largo del cultivo, ya que en las fases iniciales del cultivo por la falta de follaje la mayor cantidad de agua evaporada es proveniente del suelo, mientras que cuando el cultivo se encuentra en una fase de desarrollado más avanzada la transpiración se convierte en el proceso principal (FAO, 2006).

2.2.7. Evapotranspiración de referencia (E_{T0})

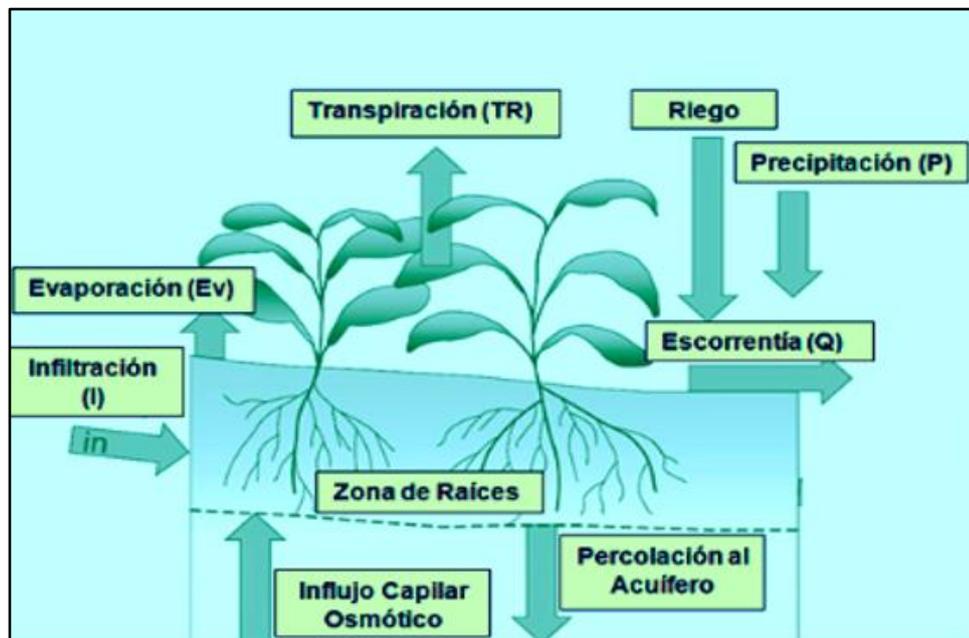
Llamada también evapotranspiración de una superficie de referencia se conoce como la tasa de evapotranspiración de una superficie sin limitaciones de agua. La superficie de referencia es un cultivo hipotético de pastos, con una altura asumida de 0.12 m, con un albedo de 0.23 teniendo condiciones muy similares a las de un cultivo de pasto verde, bien regado y de altura uniforme (FAO, 2006).

2.2.8. Evapotranspiración potencial

Se refiere a la evaporación producida por un cultivo que se encuentra en condiciones óptimas es decir que se encuentre exento de enfermedades, con unas buenas prácticas de fertilización, que tenga el espacio pertinente para su buen desarrollo y además de contener las condiciones de suelo y agua para que alcance su máxima producción (FAO, 2006).

Figura 1

Relación agua planta y suelo



Fuente: FAO (1998)

2.2.9. Métodos de determinación de evapotranspiración

Existen dos métodos para determinar a la evapotranspiración: los métodos de medición o directos y los métodos de estimación o indirectos.

2.2.9.1. Métodos directos

Los métodos de medición o directos calculan la evapotranspiración monitoreando el movimiento del agua hacia y desde la cubierta vegetal terrestre. Aunque estos métodos proporcionan mejores resultados y se acercan más a la realidad, a menudo son costosos, engorrosos y requieren mucho tiempo para obtener resultados confiables. Por otro lado, los resultados obtenidos son específicos y válidos únicamente para el cultivo o plantación relevante y las condiciones geográficas a las que se aplican. Los métodos directos son números se menciona a continuación los más



frecuentemente indicados en otras referencias: Estanques, lisímetros, parcelas y superficies naturales de ensayo y métodos de los volúmenes afluentes y efluentes del balance hidrológico (Sanchez, 2001).

2.2.9.2. Métodos indirectos

Entre los métodos indirectos se pueden distinguir dos categorías: fórmulas empíricas que relacionan la evaporación con datos climáticos y fórmulas basadas en la correlación entre la evaporación de las tierras cultivadas y la pérdida de agua de los estanques o bandejas de evaporación. Los modelos pertenecientes al primer grupo pueden clasificarse a su vez de acuerdo con la variable climática sobre la que se basa la determinación de la evapotranspiración, en función a lo cual se puede hablar de:

- a) métodos basados en la temperatura del aire y datos astronómicos: método de Thornthwaite y método de Blaney y Criddle.
- b) métodos basados en la temperatura del aire y la humedad relativa: método de Papadakis, método de Ivanov y método de Hargreaves.
- c) métodos basados en la temperatura del aire y la radiación solar: método de Turc, método de Jensen-Haise y método de la radiación.
- d) métodos basados en la ecuación de combinación del balance de energía y de la transferencia turbulenta del vapor de agua: método de Penman, método de Penman-Monteith y método de Bouzo (Sanchez, 2001).

2.2.10. Métodos de cálculo de evapotranspiración potencial

En la actualidad existen varios métodos indirectos para la valoración de la ETP, basados especialmente en la aplicación de ecuaciones matemáticas



utilizando entradas como temperatura, radiación, humedad relativa y otros elementos climáticos, de modo que las ecuaciones tengan un cierto grado de adaptabilidad y precisión. Se recomienda utilizar el que tenga más elementos climáticos para los cálculos, pero esta información no está disponible para algunas regiones, por lo que utilizamos lo que está disponible ajustado por condiciones o cantidades.

Los métodos para estimar la evaporación potencial varían en precisión y confiabilidad, y muchos solo proporcionan aproximaciones. Cada técnica se desarrolló en base a los datos climáticos disponibles para su evaluación. En la presente tesis se calculó la evapotranspiración potencial (ETP) en función de la investigación climatológica disponible, en forma referencial se ha empleado las siguientes fórmulas:

Método de Hargreaves

Por Temperatura

Por Radiación

Hargreaves Modificado

Penman Monteith - FAO

2.2.10.1. Método de Hargreaves

Por Temperatura

$$ETP = MF \times TMF \times CH \times CE$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/mes).



MF = Factor mensual de latitud (Tabla 1).

TMF = Temperatura media mensual (°F).

CH = Factor de corrección por la humedad relativa.

$$CH = 0.166(100 - HR)^{0.5}, \text{ para } HR > 64\%$$

$$CH = 1, \text{ para } HR < 64\%$$

HR = Humedad relativa media mensual (%).

CE = Factor de corrección por la altitud de la zona.

$$CE = 1.00 + \frac{0.04 E}{2000}$$

E = Altitud o elevación de la zona en estudio (msnm).

Por Radiación

$$ETP = 0.0075 \times RSM \times TMF \times FA$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/mes).

0.0075 = Constante de interrelación entre ETP y radiación.

RSM = Radiación solar equivalente en mm de evaporación mensual (mm/mes).

$$RSM = 0.075RMM(S)^{0.5}$$

RMM = Radiación extraterrestre equivalente en mm de evaporación mensual (mm/mes).



Ra = Radiación extraterrestre equivalente en mm de evaporación diaria (mm/día).

Se obtiene de acuerdo con la latitud de la zona utilizando la tabla respectiva.

DM = Número de días del mes.

S = Porcentaje de horas de insolación (%): $S = \left(\frac{n}{N}\right) 100$

n = Horas de sol media diaria de la zona.

N = Horas de sol máxima media diaria probable según la latitud (Tabla 3).

TMF = Temperatura media mensual (°F).

FA = Factor de corrección por altura: $FA = 1 + \frac{0.06H}{1000}$

H = Altitud de la zona en estudio (msnm) (Hargreaves & Samani, 1985).

Tabla 1

Factor de evapotranspiración potencial MF en (mm/mes)

L. S.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
14	2.680	2.317	2.340	1.959	1.733	1.536	1.648	1.895	2.144	2.490	2.566	2.706
15	2.707	2.328	2.334	1.937	1.700	1.500	1.612	1.867	2.131	2.496	2.588	2.738
16	2.734	2.339	2.317	1.914	1.666	1.464	1.576	1.838	2.117	2.500	2.610	2.769
17	2.760	2.348	2.319	1.891	1.632	1.427	1.540	1.809	2.103	2.504	2.631	2.799
18	2.785	2.359	2.311	1.867	1.598	1.391	1.504	1.780	2.088	2.508	2.651	2.830

Tabla 2*Radiación extraterrestre Ra, expresada en equivalentes de evaporación en (mm/día)*

LS	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
18	16.9	16.3	15.1	13.1	11.2	10.2	10.6	12.2	14.2	15.8	16.7	17.0
16	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
14	16.6	16.2	15.3	13.6	12.0	11.1	11.4	12.8	14.5	15.8	16.4	16.6
12	16.4	16.2	15.4	13.9	12.3	11.5	11.8	13.1	14.7	15.8	16.2	16.3
10	16.1	16.0	15.4	14.1	12.7	11.9	12.2	13.4	14.8	15.7	16.0	16.1

Tabla 3*Número de horas de sol máxima media diaria probable para latitud Sur*

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7
15	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0
20	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3
25	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7

2.2.10.2. Método de Hargreaves modificado

$$ETP = 0.0023Ra(T + 17.8)(TD)^{0.50}$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/día).

Ra = Radiación extraterrestre equivalente en mm de evaporación diaria (mm/día). Se obtiene de acuerdo a la latitud de la zona (Tabla 2).

T = Temperatura media mensual (°C).

TD = Temperatura máxima menos temperatura mínima (°C).



Esta ecuación sólo requiere datos de temperatura media, máxima y mínima, los cuales suelen estar generalmente disponibles. Además, esta fórmula ha probado ser precisa y confiable.

2.2.10.3. Método de Penman Monteith - FAO

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. Como resultado de una consulta de expertos celebrada en mayo de 1990, ahora se recomienda el método Penman-Monteith de la FAO como único método estándar para determinar y calcular la ETo de referencia de la evapotranspiración.

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 de la (FAO, 2006):



$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Ra - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Donde:

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

R_n = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹);

R_a = radiación extraterrestre (mm día⁻¹);

G = flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹);

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

u₂ = velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹);

e_s = presión de vapor de saturación (kPa);

e_a = presión real de vapor (kPa)

e_s-e_a = déficit de presión de vapor (kPa °C);

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

γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

Para la obtención de una nueva fórmula evapotranspiración actual se ha efectuado mediante la solución del modelo polinómico del análisis de Regresión Múltiple polinómica empleando el siguiente modelo (Flores, Silva, & Flores, 2015).

2.2.11. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETC)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ETC, y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas



amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes (FAO, 2006).

2.2.12. Coeficiente de cultivo (Kc)

El coeficiente de cultivo se define como el cociente entre la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar y la evapotranspiración de referencia:

$$Kc = ETc/ET0$$

Este coeficiente refleja las diferencias entre el cultivo y la superficie de referencia. Como las características de un cultivo cambian con las distintas fases de crecimiento, los valores del coeficiente de cultivo describen una curva a lo largo del ciclo del cultivo cuya forma refleja los cambios en la vegetación y en la cobertura vegetal debidos al crecimiento y maduración en ciclo de crecimiento del cultivo (Santos, Lorite, Allen, Tasumi, & Gavilan, 2007)

Los autores: Vasquez, Vasquez, Vasquez, & Cañamero, (2017). Indican como factor de cultivo, es un factor que indica el grado de desarrollo o cobertura del suelo por el cultivo el cual se quiere evaluar su consumo de agua. Los factores que afectan los valores de Kc son principalmente: Las características del cultivo, fecha de siembra, ritmo de desarrollo del cultivo, duración del periodo vegetativo, condiciones climáticas y la frecuencia de lluvia o riego, especialmente durante la primera fase de crecimiento.

Así mismo, Fuentes (1996), manifiesta, que el valor del coeficiente de cultivo depende de las características de la planta, y expresa la variación de su capacidad para extraer el agua del suelo durante su período vegetativo. Esta



variación es más evidente en cultivos anuales, que cubren todo su ciclo en un período reducido de tiempo.

Por otro lado, Doorenbos. (1978), indica que, el coeficiente del cultivo K_c , es la relación entre la evapotranspiración del cultivo, ET (Cultivo), y la evapotranspiración del cultivo de referencia, E_{to} , cuando ambas se dan en grandes campos en condiciones de crecimiento optimas Alcántara (1986) reporta que, los factores que afectan los valores de K_c son: la característica del cultivo, fecha de siembra, ritmo de desarrollo del cultivo, duración del período vegetativo, condiciones climáticas y la frecuencia de lluvia o riego especialmente durante la primera fase de crecimiento.

2.2.13. Precipitación efectiva

No toda el agua de lluvia que cae sobre la superficie del suelo es realmente utilizada por las plantas. Parte del agua de lluvia penetra en la superficie, mientras que otra fluye sobre el suelo como escorrentía superficial. Cuando deja de llover, parte del agua de la superficie terrestre se evapora directamente a la atmósfera, mientras que el resto se filtra lentamente hacia el suelo. Del total de agua que se infiltra, una parte penetra por debajo de la zona radicular, mientras que el resto permanece en esta zona y queda a disposición de la planta.

El agua de lluvia evaporada, las filtraciones profundas y la escorrentía superficial no pueden ser aprovechadas por los cultivos, es decir, son ineficientes. El resto se almacena en la zona de las raíces y se denomina precipitación efectiva. En otras palabras, el término "lluvia efectiva" se utiliza para definir la cantidad de lluvia que realmente está disponible para satisfacer al menos una parte de las necesidades hídricas de la planta. Este parámetro puede determinarse por

experimentos o se estima por medio de ecuaciones empíricas (FAO, 1993), que para áreas con pendientes inferiores al 4-5% se tiene:

$$Pe = 0.8 \times PP - 25 \text{ si } PP > 75 \text{ mm/mes}$$

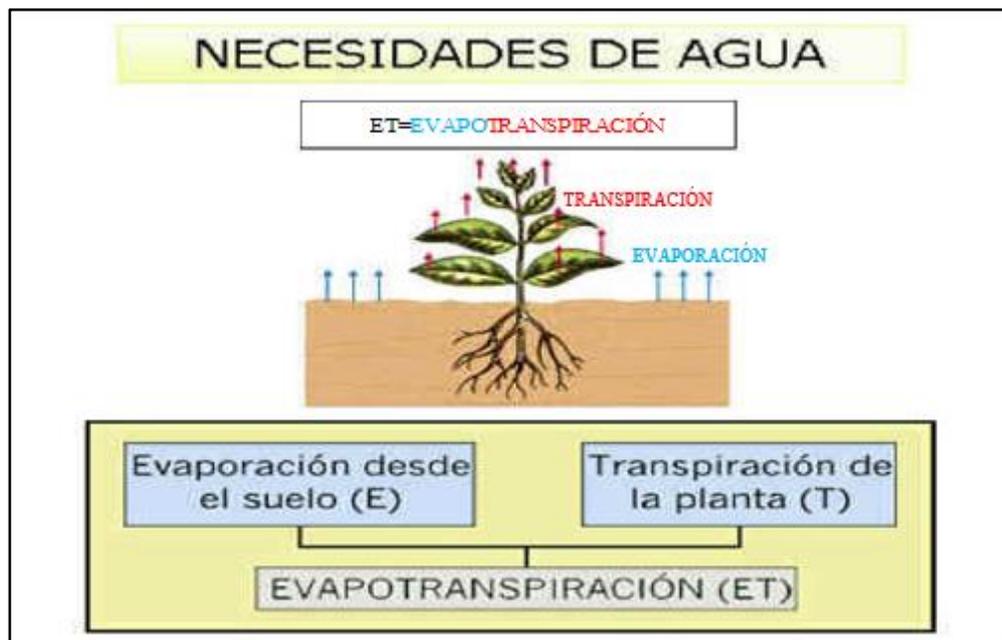
$$Pe = 0.6 \times PP - 10 \text{ si } PP < 75 \text{ mm/mes}$$

2.2.14. Demanda hídrica

Se considera demanda de agua la cantidad de agua necesaria para realizar cualquier actividad humana que requiera agua. El consumo de agua se define como la cantidad real de agua utilizada en el desarrollo de la actividad humana. En ausencia de escasez de agua, el consumo coincide con la demanda, lo que da como resultado que ambos términos se utilicen indistintamente, aunque conceptualmente son distintos. La demanda y el consumo de agua se suele dividir a nivel general en demanda o uso consuntivo y demanda o uso no consuntivo.

Figura 2

Necesidades de agua por los cultivos



Fuente: (Sanchez, 2001)



Necesidades de consumo o consumo es la necesidad de permitir actividades que requieren consumo de agua, es decir, la cantidad de agua antes de la actividad es siempre mayor que la cantidad de agua después de la actividad. En cambio, la demanda o uso de agua no consuntivo es aquella demanda o uso que permite el desarrollo de una actividad que no produce disminución del volumen de agua por el proceso realizado (IKAUR, 2004).

2.2.15. Demanda agrícola

La demanda agrícola se refiere al consumo de agua empleado en las producciones agrícolas como regadío. En el país esta demanda es de 23 166 Hm³/año, que corresponde con una superficie de riego de unos 1.64 millones de hectáreas y supone el 89 por ciento de la demanda consuntiva (MINAGRI y ANA, 2012).

2.2.16. Cedula de cultivo

El certificado de rendimiento se define como la distribución del rendimiento durante el año en función de los siguientes factores: clima, tecnología, rentabilidad, capacidad financiera del agricultor, tamaño de la unidad agrícola, demanda del mercado para el producto, disponibilidad de agua, incidencia de plagas. y enfermedades. etc. Las combinaciones de cultivos utilizadas para crear un plan de cultivo tienen en cuenta las fechas de siembra y cosecha, las etapas de crecimiento y los tipos de cultivos.

2.2.17. Demanda de agua de uso agrícola

Es la cantidad de agua requerida por la cédula de cultivo, presenta la siguiente ecuación:



$$Dp = \frac{Da}{Ef}$$

Dónde:

Dp: es la demanda de agua bruta para uso agrícola

Da: es la demanda de agua neta para uso agrícola.

Además, se complementan las siguientes ecuaciones:

$$Da = ETc - (PE + CA + N).$$

$$ETc = Kc * ET0$$

Dónde:

ETc es la evapotranspiración del cultivo (mm/mes);

Kc es el coeficiente de cultivo;

ET0 es la evapotranspiración de referencia (mm/mes);

PE es la precipitación efectiva (mm/mes);

CA es la capacidad de almacenamiento del suelo ($\theta_i - \theta_f$);

N es el aporte del nivel freático (Vasquez, Vasquez, Vasquez, & Cañamero, 2017).

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Cuenca hidrográfica

La superficie de terreno cuya esorrentía superficial fluye en su totalidad a través de una serie de corrientes, ríos y, eventualmente, lagos hacia el mar por una única desembocadura, estuario o delta (Garcia, 2013).



Agua virtual

Consumo indirecto de agua, que junto con el consumo directo de agua constituye el agua total empleada en el producto final (ANA, 2009).

Huella hídrica gris

La huella hídrica gris es el volumen de agua contaminada como resultado de los procesos de producción (Arevalo, 2012).

Textura de suelo

La textura representa el porcentaje en que se encuentran las partículas que constituyen el suelo; arena gruesa, arena media, arena fina, limo, arcilla. Se dice que un suelo tiene una buena textura cuando la proporción de los elementos que lo constituyen le dan la posibilidad de ser un soporte capaz de favorecer la fijación del sistema radicular de las plantas y su nutrición (Alvarez, 2002).

Capacidad de campo (CC)

Esta es el agua retenida en el suelo a un potencial hídrico de $-0,33$ bar. La intensidad del campo no es una variable constante para todos los suelos; depende del contenido de arcilla y limo, del porcentaje de materia orgánica y de la compactación del suelo. Matemáticamente la capacidad de campo se valora como el porcentaje en volumen de agua existente a un potencial hídrico con respecto al suelo seco (Arevalo, 2012).

Punto de marchitez permanente (PMP)

La retención de agua a una tensión de 15 bar., su valor depende del tipo de suelo.



Este es el límite de tensión hasta el cual una planta adaptada a condiciones medias de humedad, puede extraer agua (Alvarez, 2002).

Densidad aparente (Da)

La masa del suelo está definida por unidad de volumen (g/cm³ o t/m³).

Describe la compactación del suelo, representando la relación entre los sólidos y el espacio poroso (Alvarez, 2002).

Tasa máxima de infiltración

La infiltración al paso del agua está definida desde la superficie hacia el interior del suelo. Es un proceso que depende fundamentalmente del agua disponible a infiltrar, la naturaleza del suelo, el estado de la superficie y las cantidades de agua y aire inicialmente presentes en su interior (Alvarez, 2002).

Agua disponible en el suelo (ADT)

La disponibilidad de agua en el suelo se refiere a la capacidad de un suelo de retener el agua favorable para las plantas. El total de agua disponible en la zona radicular será la diferencia entre los contenidos de humedad a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (FAO, 2006).

Profundidad radicular (Pr)

La planta de la papa produce un sistema radicular fibroso y las raíces no miden más de 60 cm de largo normalmente; como resultado las papas no tienen mucha facilidad para aprovechar los nutrientes y la humedad en las profundidades de un perfil de suelo (Cortes, 2000).



Coefficiente del cultivo (K_c)

Es un valor dependiente de las características anatómicas, morfológicas y fisiológicas de la planta, por lo tanto, varía según el estado vegetativo de la planta y del clima determinado (FAO, 2006).

Fracción de agotamiento hídrico

La fracción de agotamiento hídrico (p) corresponde a la fracción promedio del agua total disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de que el cultivo presente estrés hídrico (FAO, 2006).

Factor de respuesta del rendimiento (K_y)

Este factor describe como el rendimiento del cultivo va disminuyendo según disminuye la ET_c como resultado a la falta de agua. Esta reducción relativa de la productividad es más pequeña durante las etapas de desarrollo y maduración, aumentando en las etapas de floración y formación del fruto. (FAO, 2006)

Rendimiento del cultivo

Son diversas las variables que indican la mayor o menor eficiencia de la producción agraria; una de ellas es el rendimiento físico por unidad de terreno, generalmente medido como kilogramos o toneladas por hectárea (Álvarez, 2002).



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DEL RIO HUANCANÉ

3.1.1. Ubicación administrativa

La Cuenca del Río Huancane está bajo jurisdicción de la Autoridad Local del Agua de Huancane, la cual depende técnica, funcional y administrativamente de la Agencia Nacional del Agua (ANA) ubicada en la ciudad de Lima. El Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos, como organismo rector del sistema nacional de gestión de los recursos hídricos y máxima institución de supervisión técnica, está relacionado con el Ministerio de Agricultura. La sede administrativa está ubicada en el Municipio de Huancane, Distrito y Provincia de Huancane, Región Puno (Ministerio de Agricultura (ANA), 2010).

3.1.2. Ubicación geográfica de la cuenca del río Huancané

La presente investigación se ha efectuado en la cuenca del río de Huancané de la provincia y distrito de Huancané de la comunidad campesina de Huancho, la misma que está ubicada en las coordenadas UTM (WGS84):

Este: 376030 - 468557

Norte: 8301965 - 8397410

Altitud: 3,806 - 5,100 msnm.

Figura 3

Ubicación de la comunidad campesina de Huancho Huancané



Fuente: MINAGRI

3.1.3. Ubicación hidrográfica

Los estudios hidrológicos proporcionarán insumos importantes, como las características topográficas de las cuencas, la evaluación de la disponibilidad (oferta) y la demanda de agua, el balance hídrico, los picos de inundaciones y posibles sequías. Hidrogeográficamente la Cuenca Huancané se ubica en: Región Hidrológica: Sistema hídrico TDPS del Lago Titicaca.

Figura 4

Cultivo de papa en Huancho Huancané



Fuente: propia

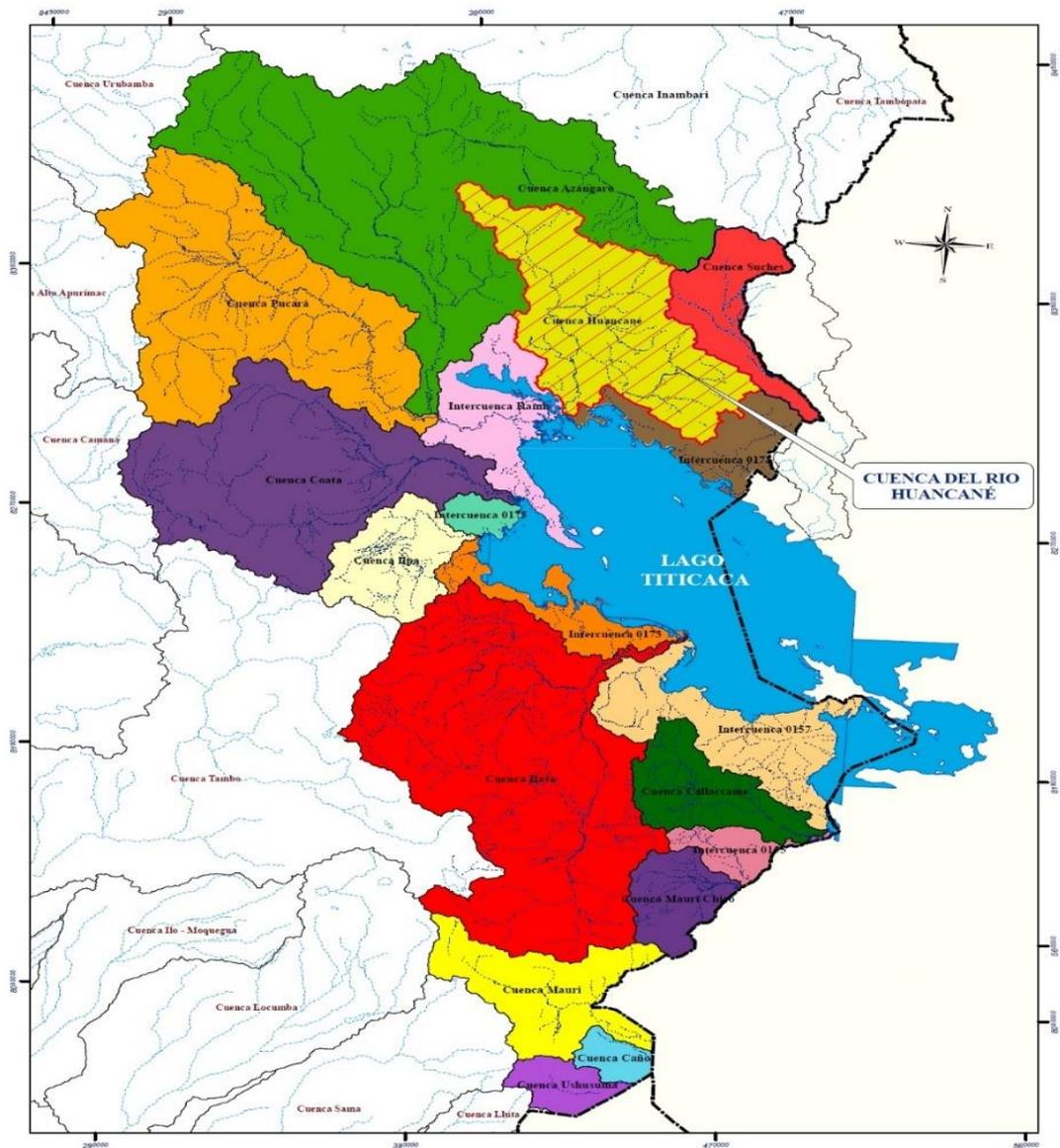
3.1.4. Climatología

Este estudio describe las principales características climáticas de la meseta. Los efectos de la altitud se caracterizan por una presión atmosférica más baja (alrededor de 620 hPa a una altitud de 4.000 metros), una densidad del aire muy inferior a los valores correspondientes al nivel del mar y una humedad más baja. Además, las temperaturas del aire son relativamente bajas debido al intenso calentamiento diurno asociado con una alta radiación solar y grandes pérdidas radiactivas nocturnas desde la superficie, y sus ciclos diurnos tienen una amplitud considerable. Las precipitaciones tienen características periódicas distintas y se concentran en el verano del hemisferio sur (diciembre a marzo), cuando la circulación atmosférica regional favorece la salida de vapor de agua desde la cuenca del Amazonas. Los eventos de precipitación están asociados

principalmente con tormentas convectivas localizadas que se desarrollan en la tarde debido al intenso calentamiento radiactivo de la superficie.

Figura 5

Mapa de ubicación de la cuenca Huancané



Fuente: Autoridad Nacional del Agua

3.1.4.1. Precipitación de la cuenca

En la cuenca del río Huancané, las características estacionales de la precipitación en las estaciones meteorológicas consideradas en este



trabajo siguen el ciclo de la temporada de lluvias, invierno y meses de transición. El período máximo de precipitaciones inicia en diciembre y se prolonga hasta marzo, el cual corresponde a la precipitación promedio en la estación, la cual constituye el total de precipitaciones anuales del 66,92% del monto. El porcentaje de lluvia de la estación meteorológica durante la temporada de inundaciones oscila entre el 62,15% y el 70,87%. Precipitación total anual en la zona de la cuenca del río Huancané. Se observó que la precipitación total anual en la cuenca oscilaba entre 644,4 mm (Muñani) y 693,2 mm (Putina); los valores más altos se encuentran en las regiones de Huaraya-Moho y Conima, mostrando la influencia del efecto termorregulador del lago Titicaca (Ministerio de Agricultura (ANA), 2010).

3.1.4.2. Temperatura

Las zonas más cálidas en la cuenca del Huancané se ubican en las estaciones Huaraya Moho 8.7°C, Muñani 8.6°C y Putina 8.5°C, mientras que en la cuenca del Suche se ubican en las estaciones Puerto Acosta 9.1°C y Escoma 8.6. estación °C; muestra la enorme capacidad de almacenamiento de energía y el posterior efecto de acondicionamiento térmico. El gradiente térmico de temperatura promedio en la Cuenca Huancané es de 0,58°C cada 100 metros sobre el nivel del mar, mientras que la temperatura promedio en la cuenca de Suches es de 0,70°C/100 metros de altitud. Cambios espaciales de la temperatura media anual (isotermas) en la cuenca de Huancané y cuenca de Suches se puede observar que la temperatura media anual en la Cuenca de Huancán varía de 5 a 8.5°C, mientras que en la Cuenca de Suches la temperatura media

anual varía de 3 a 8.5°C. 9°C, respectivamente. En la cuenca de Huancan, la temperatura más alta se registró en el área de la estación Putin, que fue de 17,0 °C, y la temperatura más baja se registró en el área de la estación Ananea que fue de 10,2 °C. En la cuenca de Suches, la temperatura más alta se da en la zona de la estación Escoma, que es de 16,0 °C, y la temperatura más baja es de 10,5 °C en la zona de la estación de Suches.

3.1.4.3. Humedad relativa

Es la humedad presente en la masa de aire, la que está relacionada con la humedad absoluta máxima permisible sin condensación, manteniendo las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica. También se define como el porcentaje de saturación de vapor de agua en el aire. El factor determinante de la humedad relativa es la temperatura, que indica cuánto vapor de agua hay en la atmósfera. Se expresa como porcentaje. La fórmula de humedad para calcular la humedad relativa viene dada por la siguiente: ecuación siguiente:

$$HR = \left(\frac{e_s - \Delta e}{e_s} \right) * 100$$

$$\Delta e = 0.00066 * (1 + 0.00115 * T_h) * P * (T_s - T_h)$$

$$e_s = 6.11 * 10^{\left(\frac{7.5 * T_s}{T_s + 237.3} \right)}$$

$$e_h = 6.11 * 10^{\left(\frac{7.5 * T_h}{T_h + 237.3} \right)}$$

Dónde:

HR= Humedad relativa (%).

T_h = Temperatura bulbo húmedo (°C).



T_s = Temperatura bulbo seco (°C).

P = Presión atmosférica de la estación (mb).

H = Altitud de la estación (msnm).

$$P = 101.3 * \left(\frac{293 - 0.00652 * H}{293} \right)^{5.26} * 10$$

En nuestro país, el SENAMHI realiza mediciones tres veces al día (7:00 a. m., 1:00 p. m. y 7:00 p. m.), es decir. temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco. Utilizando la ecuación de humedad relativa, la humedad relativa horaria y la humedad relativa promedio diaria se obtienen promediando las tres mediciones, así como el promedio mensual de la humedad relativa diaria respectiva.

En la Cuenca Huancané la humedad relativa más alta se encuentra en la zona de la estación Ananea con un 81%, y la humedad relativa más baja se encuentra en la zona de la estación Muñani con un 55%. En la cuenca de Suches, la humedad relativa más alta se encuentra en la zona de la estación Suches, que es del 85%, y la más baja en la zona de la estación Puerto Acosta y Escoma, que es del 62%. Variación espacial de la humedad relativa (contornos) en la Cuenca Huancané y Cuenca Suche, se puede observar que la humedad relativa media anual en la Cuenca Huancané varía del 50% al 82%, mientras que en la Cuenca Suche varía del 62% al 98 %, respectivamente.

3.1.4.4. Velocidad del viento

El viento es el movimiento del aire sobre la superficie terrestre. Se produce por el efecto de los gradientes de presión atmosférica como



resultado del calentamiento diferencial de superficies y masas de aire. La superficie terrestre se calienta por la radiación solar; Todas las áreas de la Tierra no reciben la intensidad de la radiación solar que observamos en el departamento de radiación, lo que provoca un calentamiento desigual de las masas de aire. El aire de las capas inferiores de la atmósfera se calienta por influencia de la superficie terrestre, en mayor o menor medida dependiendo de la temperatura alcanzada en las distintas regiones de la superficie terrestre con las que entra en contacto. En general, cualquier desequilibrio que exista en la atmósfera tiende naturalmente a equilibrarse.

Los desequilibrios causados por diferencias de presión tienden a equilibrarse naturalmente a medida que el aire se mueve desde áreas de alta presión a áreas de baja presión. Este movimiento horizontal del aire se llama viento. En la cuenca de Huacane, la mayor velocidad del viento se da en la zona de la estación Muñani con 3,8 m/s (viento moderado a fuerte), y la menor velocidad del viento se da en la zona de la estación Huaraya-Moho con 1,8 m/s (viento moderado). a medio). En la cuenca de Suche, la mayor velocidad del viento se da en la zona de la estación Cojata, que es de 3,3 m/s (viento moderado a fuerte), y la menor velocidad del viento se da en la zona de la estación de Suche, que es de 2,3 m/s (viento ligero a fuerte) (Ministerio de Agricultura (ANA), 2010)

3.1.4.5. Horas de sol

El número de horas de luz solar brillante por día, también definido como el tiempo que los registros de Campbell Stokes dejan un rastro o se queman en el hidrograma. El Servicio Meteorológico e Hidrológico



Nacional (SENAMHI) utiliza un equipo meteorológico para medir la duración de la luz solar diaria, llamado "heliógrafo".

De las dieciséis (16) estaciones meteorológicas, cuatro (4) tienen registros históricos de horas de sol, mientras que doce (12) tienen poca información. Debido a la falta de estadísticas de horas solares, se realizaron estimaciones para las estaciones de Muñani, Cojata, Suches, Crucero, Progreso, Azángaro, Arapa, Taraco, Conima, Puerto Acosta, Escoma y Chahuaya mediante análisis lineal utilizando datos de estaciones registradas existentes. Se realizó la regresión. realizado para relacionar la altitud con las horas de sol.

3.1.4.6. Precipitación efectiva

La precipitación efectiva se define como la cantidad de agua precipitada que no se pierde a través de escorrentía superficial ni por percolación profunda, por lo que queda disponible para el aprovechamiento de la planta (FAO, 2010).

Para el cálculo de este parámetro se configuró el programa CROPWAT 8.0 para que este utilizara la fórmula del AGLW (Servicio de Recursos, Fomento y aprovechamiento de Aguas de la FAO) la cual fue elaborada por un grupo de expertos del Servicio de Aguas de la FAO para climas semiáridos y subhúmedos en la cual se considera la estimación de la precipitación efectiva como un efecto combinado de la precipitación confiable (80% probabilidad de excedencia) con las pérdidas por escorrentía superficial y percolación profunda (Fao, 2010).

3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN POR OBJETIVOS ESPECIFICOS

3.2.1. Determinación de la evapotranspiración en función de los elementos climáticos del cultivo de papa

3.2.1.1. Método de Penman-Monteith

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. Como resultado de una consulta de expertos celebrada en mayo de 1990, ahora se recomienda el método Penman-Monteith de la FAO como único método estándar para determinar y calcular la ETo de referencia de la evapotranspiración.

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 de la (FAO, 2006):



$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Ra - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Donde:

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

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

R_a: radiación extraterrestre (mm/día⁻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)

3.2.2. Determinación de la huella hídrica del cultivo de papa en función de los parámetros climáticos en la Cuenca del río de Huancané.

3.2.2.1. Estimación de la huella hídrica con el programa CropWat

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 (2012)



para calcular los requerimientos de agua del cultivo y en últimas apoyar el diseño y optimización de los sistemas de irrigación. (Zarate & Kuiper, 2013)

Teniendo en cuenta el manual de evaluación de la huella hídrica desarrollado por (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2010), la estimación la huella hídrica total del proceso del cultivo de papa R12 (WF_{proc}) es la suma de los componentes verde, azul y gris.

De acuerdo con lo anterior, la huella hídrica del proceso de cultivo se calcula por medio de la Ecuación 1.

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, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2010)

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. (Barros, 2012)

A continuación, se expresa la ecuación y las variables que se tuvieron en cuenta para su cálculo.



$$HHProc, azul = \frac{CWUriego}{Y}$$

Dónde:

CWU_{riego} = requerimientos de riego de los cultivos (m)

Y = Rendimiento del cultivo (Ton/m²)

Para determinar las necesidades de agua de los cultivos, se utilizó CROPWAT 8.0 para derivar las necesidades de riego de los cultivos estimando la evaporación potencial en relación con las propiedades del cultivo y del suelo.

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, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2010). 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 papa R12 con el rendimiento del mismo (Barros, 2012).

Ecuación 4 Cálculo huella hídrica verde

$$HHproc, verde = \frac{Ppef}{Y}$$

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 puede entenderse como un "requisito" de dilución en agua; la gente tiende a no utilizar este término porque crea confusión y se entiende como una necesidad de diluir los contaminantes en lugar de reducir las emisiones contaminantes. Por supuesto, este concepto no significa eso. La huella hídrica gris es un indicador de los niveles de contaminación, cuanto menos contaminación mejor. Los principales nutrientes de los fertilizantes son el nitrógeno, el fósforo y el potasio, y el cultivo de patatas utiliza una fórmula que los combina llamada nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). Los fertilizantes utilizados durante el cultivo de patatas se enumeran a continuación.

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

Dónde:

a = Factor de lixiviación.

$appl$ = aplicación del producto.

C_{max} . = Concentración máxima.

Y = Rendimiento de cultivo de papa.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE PAPA POR EL MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

La evapotranspiración (ET) 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.

Los métodos actuales utilizados para detectar ET se pueden dividir en aquellos que utilizan información recopilada en la superficie y aquellos que utilizan información obtenida desde el espacio mediante teledetección. Los primeros pueden, a su vez, clasificarse en directos, teóricos y empíricos, siendo los primeros aquellos que calculan la ET a través del control de las entradas y salidas de agua en el suelo, mientras que los teóricos se generan fundamentalmente en la consideración de la evapotranspiración como elemento que forma parte del balance de energía y su papel en la transferencia de masa de vapor de agua entre la Tierra y la atmósfera; por último, los empíricos, los métodos más utilizados en los estudios geográficos y medioambientales, son, en general, simplificaciones de los métodos anteriores que, a través de correlaciones entre medidas

obtenidas por aquellos y medidas de una o más variables climáticas o meteorológicas, han permitido derivar fórmulas empíricas para estimar la capacidad evaporativa de un ambiente determinado, por ello también se denominan métodos climatológicos (Sanchez, 2001).

4.1.1. Método de Penman-Monteith

La fórmula Penman-Monteith FAO98 es un sustituto útil de las diversas fórmulas posibles. En este sentido, cuando se utiliza el balance hídrico del ETP estimado mediante la fórmula de Thornthwaite, se recomienda sustituirlo por la fórmula "Penman-Monteith FAO98" para obtener resultados más precisos.

Tabla 4

Resultado de Cropwat para determinar ETo

	T. Min. (°C)	T. Max. (°C)	H. R. (%)	V. (m/s)	I. (%)	Eto (mm/dia)
Ene	0.01	20.41	69.62	1.99	44.00	3.83
Feb	-0.83	19.56	73.06	2.00	42.00	3.58
Mar	-0.06	18.13	76.69	1.79	50.00	3.34
Abr	-4.44	18.19	67.25	1.58	66.00	3.30
May	-4.40	18.03	60.44	1.57	72.00	3.00
Jun	-6.02	16.48	58.00	1.84	80.00	2.82
Jul	-3.68	17.62	61.75	1.66	76.00	2.86
Ago	-5.35	19.07	53.25	1.83	73.00	3.48
Sep	-3.56	20.69	46.88	1.80	65.00	4.02
Oct	-0.95	20.58	60.75	1.89	61.00	4.12
Nov	0.61	19.94	62.81	1.82	57.00	4.15
Dic	-0.46	19.12	68.19	2.05	46.00	3.80

En la tabla 4, se observa que por el método de Penman-Monteith FAO98 son las mayores cantidades de pérdida de agua mediante el proceso de ETo es decir en los meses de setiembre, octubre y noviembre con valores de 4.02, 4.12 y 4.15 mm/día estos valores indican que 40.2, 41.2 y 41.5 m³/ha. de pérdida de agua debido probablemente por la intensidad de insolación y horas de sol que se presentan en estos meses indicados.

Consideramos que la cuenca vertiente total del lago recibe 736 mm año^{-1} de lluvia, o sea un volumen de $36,1 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$. El escurrimiento sólo representa 174 mmaño^{-1} ó $8,5 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$.

Sin embargo, en el largo plazo, la evapotranspiración efectiva (ETR) en la cuenca equivale al déficit de escorrentía (DE) debido al balance de precipitaciones. Sin embargo, todavía hay incertidumbre sobre la situación actual, ya que sería mejor considerar cambios en el almacenamiento de agua subterránea de la cuenca. Al igual que en el lago, se puede argumentar que los arpones aumentaron hacia el final del período analizado debido a los intensos eventos húmedos ocurridos entre 1984 y 1986. Se sobreestimaré la evaporación calculada utilizando el balance hídrico.

La evapotranspiración real varía entre 490 y 660 mm por año dependiendo de la gran cuenca, con un valor de 563 mm en todo el ancho del lago. El volumen de esta agua fue de $27,6 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, es decir pérdida del 76,4%, la mayor pérdida en el desfiladero (Ministerio de Agricultura (ANA), 2010).

4.2. ESTIMACIÓN DE HUELLA HÍDRICA PARA CULTIVO DE PAPA

4.2.1. Aplicación de modelo cropwat

Las herramientas de apoyo a la toma de decisiones llamadas modelos de simulación agroclimática son réplicas virtuales simples pero detalladas de procesos reales que ocurren durante el desarrollo y crecimiento de los cultivos. CROPWAT 8.0 es uno de los muchos programas de modelado agroclimático disponibles y se caracteriza por su facilidad de uso. Los modelos son particularmente importantes porque nos ayudan a comprender cómo funcionan los sistemas. El uso de modelos facilita el estudio de sistemas, aunque pueden

contener muchos componentes y mostrar un gran número de interacciones, como puede ocurrir cuando se trata de conjuntos bastante complejos y de gran tamaño.

El trabajo de modelado es una actividad técnica como cualquier otra actividad, y dicho trabajo puede ser simple o complejo dependiendo del tipo de problema que se analice. CROPWAT es un programa gratuito desarrollado por la FAO. Utilizando el método de la FAO. Penman-Monteith determina la evaporación del cultivo de referencia (ET_o). El valor de ET_o se utiliza para estimar las necesidades hídricas de los cultivos en diferentes etapas de desarrollo.

Tabla 5

Penman-Monteith con aplicación de Cropwat

Mes	ET _o (mm/mes)	Kc	ET _r (mm/mes)	Pp (mm/mes)	Pp _{efc} (mm/mes)	Demanda (mm/mes)
Ene	118.73	1.15	136.54	93.24	50.59	85.95
Feb	100.24	1.15	115.28	164.56	107.65	7.63
Mar	103.54	1.00	103.54	91.68	49.34	54.20
Abr	99.00	0.00	0.00	53.80	22.28	0.00
May	93.00	0.00	0.00	6.55	0.00	0.00
Jun	84.60	0.00	0.00	0.96	0.00	0.00
Jul	88.66	0.00	0.00	1.11	0.00	0.00
Ago	107.88	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00
Set	120.60	0.00	0.00	4.98	0.00	0.00
Oct	70.04	0.50	35.02	58.83	25.30	9.72
Nov	124.50	0.50	62.25	64.99	28.99	33.26
Dic	117.80	0.89	104.84	94.45	51.56	53.28

4.2.2. Estimación de la huella hídrica método Penman-Monteith

La huella hídrica es un indicador del consumo de agua dulce y se refiere al consumo de agua directo e indirecto. Calcular la huella hídrica es importante para comprender el impacto ambiental del uso del agua. Este concepto fue introducido por Arjen Hoekstra en 2002 y se utiliza para cuantificar la cantidad de agua dulce utilizada para producir bienes y servicios para empresas o consumida por individuos o comunidades.

4.2.2.1. Huella hídrica Azul

La Huella Hídrica Azul se calcula midiendo la cantidad de agua dulce extraída de fuentes superficiales o subterráneas consumida en los procesos productivos. Especialmente indicado para la producción agrícola. Lo más importante es calcular la evaporación del agua de riego del campo. Esta agua puede incorporarse al producto o evaporarse durante el propio proceso. Se requiere intervención manual.

El agua azul es agua de ríos, lagos o acuíferos de los que las personas obtienen productos y servicios mediante la construcción de determinadas estructuras (represas, canales, bombas) que facilitan su uso: el agua de riego es un ejemplo clásico de agua azul. Se puede decir que es agua de origen humano.

Los recursos de agua azul son generalmente más limitados y tienen costos de oportunidad más altos que el agua verde, lo que puede ser una razón para centrarse exclusivamente en actividades de agua azul. Sin embargo, los recursos de agua verde también son limitados y, por tanto, insuficientes, lo que da motivos para tenerlo en cuenta. Además, el agua verde puede sustituirse por el agua azul (y viceversa en la agricultura), por lo que sólo se puede obtener una imagen completa considerando ambas.

$$HH_{azul} = \frac{CWU_{riego}}{Y}$$

CWU_{riego} = requerimientos de riego de cultivo ($m^3/ha.$)

Y = Rendimiento del cultivo (Ton/ha.)

$$HH_{azul} = \frac{2440.30}{15.41} = 158.36 \left(\frac{m^3}{Tn} \right)$$

4.2.2.2. Huella hídrica verde

La huella hídrica verde es la cantidad de agua que se acumula en el suelo en forma de humedad de precipitación que no se convierte en escorrentía. En otras palabras, el agua de lluvia no se escurre ni llega al agua subterránea. En cambio, se almacena temporalmente en el suelo o la vegetación. Eventualmente se incorporará al producto o se evaporará durante el propio proceso. Las necesidades se satisfacen sin intervención humana.

El agua verde es agua natural retenida en áreas no saturadas de tierra para uso de vegetación natural o plantas cultivadas. Este tipo de agua es importante porque permite la existencia de vegetación y bosques naturales, cultivos de secano y pastizales, e incluso aporta parcialmente nutrientes para los cultivos de regadío.

$$HH_{verde} = \frac{P_{pef}}{Y}$$

Donde:

P_{pef} = Precipitación Efectiva en (m^3 /Ha.)

Y = Rendimiento del cultivo (Ton/Ha.)

$$HH_{verde} = \frac{3357.20}{15.41} = 217.86 \left(\frac{m^3}{Tn} \right)$$

4.2.2.3. Huella hídrica gris

La huella hídrica gris puede entenderse como un "requisito" de dilución en agua; la gente tiende a no utilizar este término porque crea confusión y se entiende como un requisito para diluir los contaminantes en

lugar de reducir las emisiones contaminantes. Por supuesto, este concepto no significa eso. La huella hídrica gris es un indicador de los niveles de contaminación, cuanta menos contaminación mejor.

Los principales nutrientes de los fertilizantes son el nitrógeno, el fósforo y el potasio, y el cultivo de patatas utiliza una fórmula que los combina llamada nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). Los fertilizantes utilizados durante el cultivo de patatas se enumeran a continuación.

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

Dónde:

a = Factor de lixiviación; se consideró 10%

$appl$ = aplicación del producto; se consideró 374 Kg/ha. (nitrato de amonio)

C_{max} . = Concentración máxima; se consideró 50 mg/l.

Y = Rendimiento de cultivo de papa; se obtuvo 15410 Kg/ha. (15.41 Tn/ha.)

HH_{gris} = 48.54 m^3 /Tn.

$$HH_{gris} = \frac{0.1 * 374}{15.41 * 50} = 48.54 \left(\frac{m^3}{Tn} \right)$$

4.2.2.4. Huella hídrica Total

$$HH = HH_{azul} + HH_{verde} + HH_{gris}$$

$$HH = 158.36 + 217.86 + 48.54 = 424.76 \left(\frac{m^3}{Tn} \right)$$



4.3. DISCUSIÓN

El potencial de evapotranspiración (ETP) es un parámetro fundamental del equilibrio energético suelo-atmósfera y juega un papel crucial en la reposición de humedad del suelo. El método más preciso, que se considera estándar, es el Penman-Monteith (PM) modificado por la FAO 56 (PM-FAO 56), pero los numerosos parámetros necesarios para su cálculo son sus limitaciones. Perú tiene dificultades para evaluar ETP por falta de registros.

A nivel mundial, la agricultura es el principal consumidor de agua y representa más del 70% del uso total de agua, con una eficiencia hídrica de alrededor del 40%. Para reducir la disponibilidad de agua para la agricultura es necesario mejorar la eficiencia de su uso. Una forma de mejorar la eficiencia es determinar con precisión las necesidades de agua de los cultivos para una gestión adecuada del riego. El agua requerida se puede calcular en base al valor de evapotranspiración (ETo) del cultivo de referencia. Entre los métodos de cálculo de ETo existentes, la ecuación FAO 56 Penan-Monteith (PM-FAO56) es el método recomendado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Sin embargo, esta ecuación requiere una gran cantidad de información que muchas veces no está disponible para los productores agrícolas. Hay otros métodos, como los propuestos por Hargreaves, que requieren datos más fácilmente disponibles. Para facilitar la gestión del agua, es importante contar con ecuaciones que no requieran mucha información para obtener estimaciones precisas de ETo.

La sequía prolongada y la necesidad de satisfacer las necesidades de una población en crecimiento, incluida la necesidad de alimentos, afectan directamente los recursos hídricos. Según Otálora y Hernández (2018), la relación entre la demanda y la oferta de



agua se ve afectada por el aumento de los períodos de sequía, cuando la disponibilidad de recursos disminuye, pero la demanda aumenta debido al crecimiento de la población.

Para que estas condiciones no afecten la agricultura, los productores deben tener acceso a sistemas de riego y estar capacitados en su uso óptimo. IICA (2014) afirma que el aumento de la producción de alimentos y el impacto del cambio climático harán que el riego sea visto como un medio esencial para asegurar la producción sin aumentar la cantidad de agua utilizada para este fin; es decir, la gestión de los recursos hídricos será más eficiente.

La huella hídrica verde para el cultivo papa, fue de 586.41 m³ /ton en promedio, siendo el valor mínimo 548.74 y el máximo 661.06 m³ /ton, durante las campañas agrícolas de 2008 al 2017. (Cauna, 2019).



V. CONCLUSIONES

Del resultado alcanzado en la estimación de la evapotranspiración del cultivo de papa en la cuenca del río Huancané considerando la metodología que recomienda el manual de la FAO, en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) así como los resultados del coeficiente de cultivo de papa (K_c), se logró obtener un resultado de evapotranspiración de cultivo de papa que asciende a 557.47 mm por toda la campaña.

La estimación de la huella hídrica total del cultivo de papa, se ha determinado huella con los componentes azul, verde y gris. Una vez realizados los cálculos se obtuvo que el valor de la huella hídrica total para la producción de papa fue de 158.36 m³/tn componente azul, la componente verde fue de 217.86 m³/tn y la componente gris fue de 48.54 m³/tn, haciendo un total de 424.76 m³/ton. Con los datos obtenidos se hizo una comparación con otros estudios, en donde se encontró la diferencia entre los valores del componente. Se debe resaltar que por el método estimado el valor del componente azul de la huella está asociado con la influencia de los elementos climáticos como la precipitación pluvial y la temperatura de aire entre otros, en donde es notorio influencia directa al desarrollo del cultivo de papa en sus diferentes fases, lo cual está generando un volumen de agua significativo para la producción de la papa en condiciones del altiplano de Puno.



VI. RECOMENDACIONES

Se están realizando nuevas investigaciones sobre el riego suplementario de la zona de las raíces, probando nuevas frecuencias de riego para ejercer más presión sobre las plantas y reducir la huella hídrica del cultivo.

Es importante monitorear el uso del agua durante la producción de cultivos y, además, también es importante monitorear la calidad del agua utilizada para la lluvia en el área de estudio.

Se recomienda realizar análisis de suelo para determinar la cantidad de materia orgánica y la dosis adecuada de fertilizante para brindar al cultivo la cantidad requerida según sus necesidades, ahorrar dinero y reducir la cantidad de agua necesaria para asimilar las concentraciones de contaminantes, reduciendo así la huella hídrica gris.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 . Ed. FAO. Italia, Roma , 3.23 p.
- Alvarez, C. (2002). Contribución a la caracterización de suelos del área basáltica alrededores de Laureles. Uruguay:: Depto. de Salto. Universidad Nacional de Uruguay. Tesis (Pregrado ingeniería agronomo).
- ANA. (2009). Huella Hidrica en el Peru: Sector Agropecuario. Lima.
- Arevalo, L. M. (2012). Proyecto institucional de lectura para una IST. Una propuesta articuladora con la EBR. Proyecto de innovación educativa para obtener el título profesional de licenciada en Educación para el desarrollo. Lima Peru: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Autoridad Nacional del Agrua (ANA). (2009). Huella Hidrica en el Peru: Sector Agropecuario. Lima.
- Cauna, M. D. (2019). Huella Hidrica para la produccion de papa y quinua para periodo 2008 a 2017 en la provincia de Puno. Puno Peru: Universidad Nacional del Altiplano Facultad de ingenieria Agricola.
- Chapagain, A., & Hoekstra, A. (2007). Water footprints of nations, Value of Water. Research Report Series N° 16, UNESCO-IHE.
- Chenoweth, J. (2013). Quantifying the human impact on water resources: a critical review of the water footprint concept. Magazine Hydrology and Earth System Sciences, 74.
- Cortes, J. (2000). Análisis del Crecimiento y de la Absorción de nutrimentos en dos Cultivares de Papa (*Solanum tuberosum*) en la Zona Norte de Cartago. Costa Rica: Tesis (Pregrado Facultad de Agronomía). Universidad de Costa Rica.



- Daniel, C. A. (2005). Guías tecnológicas de frutas y vegetales. Documento técnico. Costa Rica. Abril.
- Doorembos, J., & Kassam, A. (1979). Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma Italia.
- Estrada, D., & Dario, R. (2004). Instrumentos para la toma de decisiones en el manejo de los recursos naturales. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) Cali, Colombia, 208 p.
- FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO 56 Estudio de riego y drenaje.
- Flores, Q. E., Silva, D. C., & Flores, C. E. (2015). Modelacion de la Evapotranspiracion Potencial en el Altiplano de Puno. Ciencia y Desarrollo, 20. 83-90 / ISSN 23048891.
- Garcia, M. (2013). La huella hidrica como indicador de presiones:aplicacion a la cuenca de Duero y al sector porcino Español. España: Universidad Politécnica de Catalunya, Tesis doctoral.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Eng. in Agric. 1(2), 96 - 99.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan Londres.
- 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.



- Iglesias, A., & Medina, F. (2009). Consecuencias del cambio climático para la agricultura, ¿un problema de hoy o del futuro? *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*, pp. 45-70.
- IKAUR. (2004). Caracterización y cuantificación de la demanda de agua en la CAPV y estudio de prospectivas. País vasco.
- Inostrosa, F., Mendez, L., & Sotomayor, L. (2009). Botánica y Morfología de la papa. En INIA Fitogenéticos. En INIA Fitogenéticos: Temuco, Chile, pp 37-76.
- Martínez, R., Boueri, M., & Escalona, P. (2005). Correlación entre la evaporación en tina y la evapotranspiración de referencia en cinco estaciones climatológicas de Venezuela. *Bioagro, Barquisimeto*, v.17, n.2, p.79-83.
- Michel, T. (1997). Zonificación Agroclimática del Altiplano Paceño. La Paz, Bolivia.: Facultad de Agronomía, UMSA y Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
- MINAGRI y ANA. (2012). MINAGRI, & ANA. 2012. Plan nacional de recursos hídricos . Lima. Lima Peru: Ministerio de Agricultura y Riegos.
- Ministerio de Agricultura (ANA). (2010). Estudio Hidrológico de las Cuencas Huancané y Suches. Lima peru: Área de Aguas Superficiales (Administración Local de Agua Huancané) Informe final.
- Parry, M., & Fischer, M. (2004). Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Magazine Global Environmental Change*, 53-67p.
- Pregram, G., Conyngam, S., Orr, S., Germana, C., Alvarez, C., Riveros, J., & LLerena, C. (2015). Huella Hídrica del Perú Sector Agropecuario 3(1). Recuperado de http://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/ANA/521/ANA0000307_3.pdf?sequence=2, 10–21.



- Ramirez, V. H., Marin, E. V., Mejia, A., & Arango, R. (2011). Evaluation of models for estimating the reference evapotranspiration in colombian coffee zone. *Agron. Colomb.* 29 (1), 107-114.
- Sanchez, M. (2001). Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. *Revista de Geografía Norte Grande.*
- Santos, R. C., Lorite, T. I., Allen, R., Tasumi, M., & Gavilan, Z. P. (2007). Mejora de la gestión de los recursos hídricos por medio de la integración de técnicas de teledetección y modelos de simulación. *Andalucía.*
- Tabari, H., Kisi, O., Ezani, A., & Hosseinzadeh, T. P. (2012). Svm, anfis, regression and climate based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment . *J. Hydrol* 444-445, 78-89 pp.
- UNEP, & KOIKA. (2010). *Water Footprint and Corporate Water Accounting for Resource Efficiency.* <http://www.waterfootprint.org/Reports/UNEP-2011.pdf>.
- UNESCO. (2015). *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas.* Palaisdes Nations en Ginebra - Suiza. Ginebra - Suiza: Ediciones WWDR. Value of Water Research Report Series No.48 - UNESCO-IHE, Delft. No.12, UNESCO-IHE, Delft, 2010.
- Vasquez, V. A., Vasquez, R. I., Vasquez, C., & Cañamero, K. M. (2017). *Fundamento de la Ingeniería de Riegos.* Lima Peru: Universidad nacional Agraria La Molina.
- 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.* Quito uito : Universidad san Francisco .



ANEXOS

ANEXO 1. Climatología de CropWat

ETo Penman-Monteith Mensual - untitled

País Estación

Altitud m. Latitud °S Longitud °W

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento m/s	Insolación %	Rad MJ/m²/día	ETo mm/día
Enero	0.0	20.4	69	1.9	44	19.2	3.83
Febrero	-0.8	19.5	73	2.0	42	18.3	3.58
Marzo	0.0	18.1	76	1.7	50	18.6	3.34
Abril	-4.4	18.1	67	1.5	66	19.1	3.30
Mayo	-4.4	18.0	60	1.5	72	17.6	3.00
Junio	-6.0	16.4	58	1.8	80	17.3	2.82
Julio	-3.6	17.6	61	1.6	76	17.4	2.86
Agosto	-5.3	19.0	53	1.8	73	19.1	3.48
Septiembre	-3.5	20.6	46	1.8	65	20.3	4.02
Octubre	-0.9	20.5	60	1.8	61	21.5	4.12
Noviembre	0.6	19.9	62	1.8	57	21.6	4.15
Diciembre	-0.4	19.1	68	2.0	46	19.6	3.80
Promedio	-2.4	18.9	63	1.8	61	19.1	3.52

ANEXO 2. Precipitación efectiva en CropWat

Precipitación mensual - untitled

Estación Método Prec. Ef

	Precipit. mm	Prec. efec mm
Enero	93.2	50.6
Febrero	164.6	107.6
Marzo	91.7	49.3
Abril	53.8	22.3
Mayo	6.5	0.0
Junio	1.0	0.0
Julio	1.1	0.0
Agosto	0.9	0.0
Septiembre	5.0	0.0
Octubre	107.3	61.8
Noviembre	65.0	29.0
Diciembre	94.5	51.6
Total	684.5	372.2



ANEXO 3. Cálculo de coeficiente Kc

CALCULO DE Kc. DIARIO				KC DEL MES
MES	DIA	ACUM	KC	
OCT	15	1	0.5	0.5
	16	2	0.5	
	17	3	0.5	
	18	4	0.5	
	19	5	0.5	
	20	6	0.5	
	21	7	0.5	
	22	8	0.5	
	23	9	0.5	
	24	10	0.5	
	25	11	0.5	
	26	12	0.5	
	27	13	0.5	
	28	14	0.5	
	29	15	0.5	
	30	16	0.5	
	31	17	0.5	
NOV	1	18	0.5	0.50
	2	19	0.5	
	3	20	0.5	
	4	21	0.5	
	5	22	0.5	
	6	23	0.5	
	7	24	0.5	
	8	25	0.5	
	9	26	0.5	
	10	27	0.5	
	11	28	0.5	
	12	29	0.5	
	13	30	0.5	
	14	31	0.5	
15	32	0.5		
16	33	0.5		
17	34	0.5		
18	35	0.5		
19	36	0.5		
20	37	0.5		
21	38	0.5		
22	39	0.5		
23	40	0.5		
24	41	0.5		
25	42	0.5		
26	43	0.5		
27	44	0.5		
28	45	0.5		
29	46	0.52		
30	47	0.54		



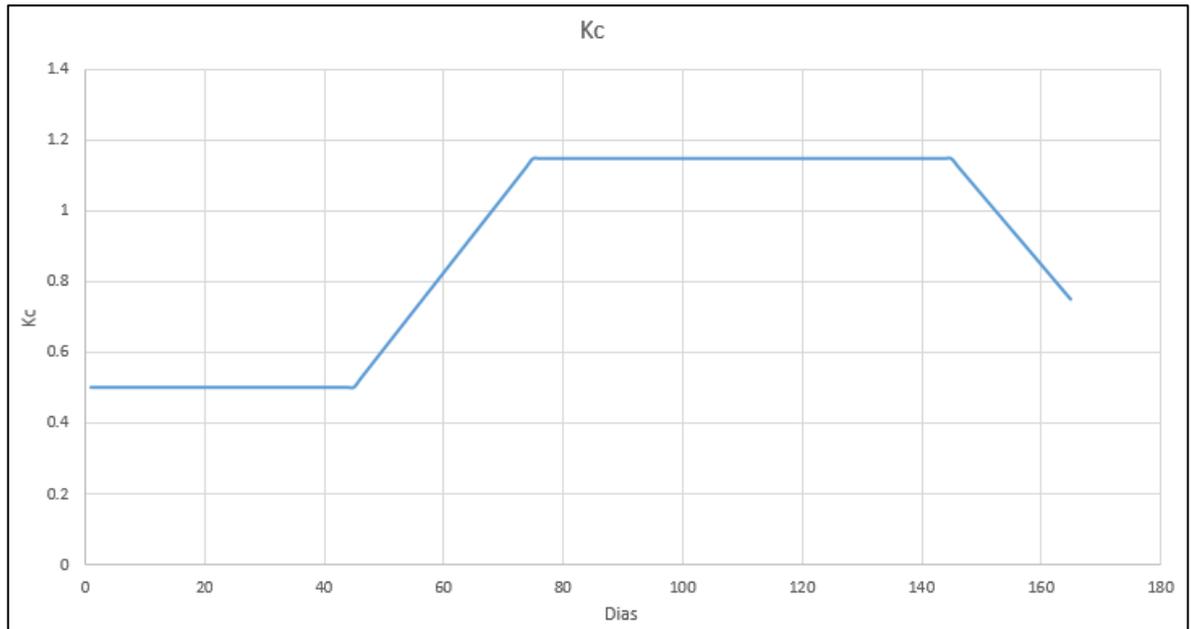
MES	CALCULO DE Kc. DIARIO			KC DEL MES
	DIA	ACUM	KC	
DIC	1	48	0.57	0.89
	2	49	0.59	
	3	50	0.61	
	4	51	0.63	
	5	52	0.65	
	6	53	0.67	
	7	54	0.70	
	8	55	0.72	
	9	56	0.74	
	10	57	0.76	
	11	58	0.78	
	12	59	0.80	
	13	60	0.83	
	14	61	0.85	
	15	62	0.87	
	16	63	0.89	
	17	64	0.91	
	18	65	0.93	
	19	66	0.96	
	20	67	0.98	
	21	68	1.00	
	22	69	1.02	
	23	70	1.04	
	24	71	1.06	
	25	72	1.09	
	26	73	1.11	
	27	74	1.13	
	28	75	1.15	
	29	76	1.15	
	30	77	1.15	
	31	78	1.15	
ENE	1	79	1.15	1.15
	2	80	1.15	
	3	81	1.15	
	4	82	1.15	
	5	83	1.15	
	6	84	1.15	
	7	85	1.15	
	8	86	1.15	
	9	87	1.15	
	10	88	1.15	
	11	89	1.15	
	12	90	1.15	
	13	91	1.15	
	14	92	1.15	
	15	93	1.15	
	16	94	1.15	
	17	95	1.15	
	18	96	1.15	
	19	97	1.15	
	20	98	1.15	
	21	99	1.15	
	22	100	1.15	
	23	101	1.15	
	24	102	1.15	
	25	103	1.15	
	26	104	1.15	
	27	105	1.15	
	28	106	1.15	
	29	107	1.15	
	30	108	1.15	
	31	109	1.15	



MES	CALCULO DE Kc. DIARIO			KC DEL MES
	DIA	ACUM	KC	
FEBRERO	1	110	1.15	1.15
	2	111	1.15	
	3	112	1.15	
	4	113	1.15	
	5	114	1.15	
	6	115	1.15	
	7	116	1.15	
	8	117	1.15	
	9	118	1.15	
	10	119	1.15	
	11	120	1.15	
	12	121	1.15	
	13	122	1.15	
	14	123	1.15	
	15	124	1.15	
	16	125	1.15	
	17	126	1.15	
	18	127	1.15	
	19	128	1.15	
	20	129	1.15	
	21	130	1.15	
	22	131	1.15	
	23	132	1.15	
	24	133	1.15	
	25	134	1.15	
	26	135	1.15	
	27	136	1.15	
	28	137	1.15	
MARZO	1	138	1.15	1
	2	139	1.15	
	3	140	1.15	
	4	141	1.15	
	5	142	1.15	
	6	143	1.15	
	7	144	1.15	
	8	145	1.15	
	9	146	1.13	
	10	147	1.11	
	11	148	1.09	
	12	149	1.07	
	13	150	1.05	
	14	151	1.03	
	15	152	1.01	
	16	153	0.99	
	17	154	0.97	
	18	155	0.95	
	19	156	0.93	
	20	157	0.91	
	21	158	0.89	
	22	159	0.87	
	23	160	0.85	
	24	161	0.83	
	25	162	0.81	
	26	163	0.79	
	27	164	0.77	
	28	165	0.75	



ANEXO 4. Curva del coeficiente del cultivo de papa





DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo JULIO CESAR CACERES CHOQUE,
identificado con DNI 45436956 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA AGRÍCOLA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA
DE LA PRODUCCIÓN DE PAPA EN LA CUENCA
DEL RIO HUANCANÉ - PUNO. ”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 12 de DICIEMBRE del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo JULIO CESAR CACERES CHOQUE,
identificado con DNI 45436956 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA AGRÍCOLA,
informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA
DE LA PRODUCCIÓN DE PAPA EN LA CUENCA
DEL RIO HUANCANÉ - PUNO. ”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

- También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 12 de DICIEMBRE del 2023


FIRMA (obligatoria)



Huella