



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



**ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA DETERMINACIÓN DE LAS
NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS DE PAPA,
QUINUA Y CEBADA MEDIANTE MÉTODOS INDIRECTOS -
CUENCA ILAVE**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JHON ANDERSON GOMEZ RUELAS

PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO - PERÚ

2020



DEDICATORIA

A DIOS y a la VIRGEN MARIA, por guiarme en el camino de la vida, dándome muchas fortalezas para seguir adelante y alcanzar mis metas.

A mis creadores JUAN y NILDA, por ser los promotores en el logro de mi profesión e inculcarme con buenos valores y principios.

A mis hijos ANDERSON, BEYHAN y ANTUANE, por ser el motivo de continuar en el camino del éxito.

Jhon Gomez



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano, Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por la formación Académica de Ingeniero Agrícola.

A mi Director M.Sc. Percy Arturo Ginez Choque, por guiarme en la ejecución de la investigación.

A mi hogar por su gran apoyo, paciencia y comprensión que contribuyeron a la culminación de mis estudios superiores.

Jhon Gomez



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN..... 11

ABSTRACT..... 12

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. 13

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... 15

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO 15

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION..... 18

1.4.1. Objetivo general 18

1.4.2. Objetivos específicos 18

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO 19

2.1.1. Cuenca hidrográfica..... 19

2.1.2. Descripción de los cultivos. 19

2.1.3. Elementos climáticos. 28

2.1.4. Transpiración 31

2.1.5. Evapotranspiración 32

2.1.6. Evapotranspiración de referencia 32



2.1.7. Coeficiente de cultivo	35
2.1.8. Evapotranspiración real	36
2.1.9. Necesidades hídricas de los cultivos	36
2.2. ANTECEDENTES	37
CAPÍTULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	40
3.2 METODOLOGÍA.....	40
3.2.1. Información climatológica.	40
3.2.2. Evapotranspiración de referencia.....	40
3.2.3. Estimación de la evapotranspiración real de cultivo.....	46
3.2.4. Análisis estadístico.....	48
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1 INFORMACION CLIMATOLÓGICA.....	50
4.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA.....	58
4.2.1. Método de Penman Monteith.....	58
4.2.2. Método del tanque de evaporación clase A.	65
4.3 COEFICIENTE DE CULTIVO	67
4.3.1. Cedula de cultivo y periodo vegetativo.....	67
4.3.2. Coeficiente de cultivo Kc considerados	69
4.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO.	70
4.5 ANÁLISIS ESTADISTICO.....	74
V. CONCLUSIONES.....	78
VI. RECOMENDACIONES	80
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	81



ANEXOS	88
Anexo A. Información meteorológica.....	88
Anexo B. Evapotranspiración de referencia método tanque evaporímetro clase A.....	91
Anexo C. Evapotranspiración de referencia método Penman Monteith.....	93

Área: Ingeniería y tecnología.

Línea: Recursos hídricos.

FECHA DE SUSTENTACION: 14 de enero de 2020



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Coeficiente del tanque evaporímetro (Kp) para el tanque clase A.	45
Tabla 2.	Temperatura máxima promedio mensual (°C) – cuenca Ilave.....	50
Tabla 3.	Temperatura mínima promedio mensual (°C) – cuenca Ilave.....	52
Tabla 4.	Humedad relativa promedio mensual (%) – cuenca Ilave.	53
Tabla 5.	Velocidad del viento promedio mensual (m/s) – cuenca Ilave.....	55
Tabla 6.	Horas de sol promedio mensual (horas/día) – cuenca Ilave.....	57
Tabla 7.	Evaporación total promedio mensual (mm) – cuenca Ilave.....	58
Tabla 8.	Evapotranspiración de referencia (mm) – estación Mazo cruz.	59
Tabla 9.	Evapotranspiración de referencia (mm) – estación Laraqueri.....	60
Tabla 10.	Evapotranspiración de referencia (mm) – estación Juli.....	61
Tabla 11.	Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Ilave.	62
Tabla 12.	Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Puno.....	63
Tabla 13.	Resumen evapotranspiración de referencia (mm) - Penman Monteith.	64
Tabla 14.	Resultados del coeficiente de tanque.	65
Tabla 15.	Resumen de evapotranspiración de referencia (mm) -tanque de evaporac. clase A	66
Tabla 16.	Cédula de cultivo y periodo vegetativo.	69
Tabla 17.	Coeficiente de cultivo.....	69
Tabla 18.	Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de papa-Penman-Monteith.....	70
Tabla 19.	Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de quinua-Penman-Monteith.....	71
Tabla 20.	Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de cebada-Penman-Monteith.....	71
Tabla 21.	Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de papa-tanque clase A.....	72
Tabla 22.	Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de quinua-tanque clase A.....	73
Tabla 23.	Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de cebada-tanque clase A.....	73
Tabla 24.	Resultados de la prueba estadística T de Student - cultivo de papa.....	74



Tabla 25. Resultados de la prueba estadística T de Student - cultivo de quinua.....	75
Tabla 26. Resultados de la prueba estadística T de Student - cultivo de cebada.....	76
Tabla 27. Necesidades hídricas de los cultivos en la cuenca del río Ilave.	76



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ubicación geográfica del río Ilave.....	41
Figura 2.	Configuración del tanque de evaporación clase A, dos casos típicos.....	44
Figura 3.	Variación mensual de la temperatura máxima (°C) – cuenca Ilave.....	51
Figura 4.	Variación mensual de la temperatura mínima (°C) – cuenca Ilave	52
Figura 5.	Variación mensual de la humedad relativa (%) – cuenca Ilave.	54
Figura 6.	Variación mensual de la velocidad del viento (m/s) – cuenca Ilave.....	55
Figura 7.	Variación mensual de horas de sol (horas/día) – cuenca Ilave.	56
Figura 8.	Variación mensual de la evapotranspiración de referencia – Penman Monteith. ..	65
Figura 9.	Variación mensual de la evapotranspirac. de ref. - tanque evaporímetro clase A..	67



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- DRA** : Dirección Regional Agraria.
- MINAGRI** : Ministerio de Agricultura y Riego.
- ANA** : Autoridad Nacional del Agua.
- SENAMHI** : Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
- Kc** : Coeficiente de cultivo
- Kt** : Coeficiente de tanque clase A.
- ETo** : Evapotranspiración de referencia
- ETc** : Evapotranspiración real del cultivo.
- FAO** : Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la
Agricultura
- OMS** : Organización Mundial de la Salud.



RESUMEN

Los requerimientos de cultivos son muy importantes para el diseño y la programación de riego, por lo que es imprescindible conocer estos métodos y aplicarlos a los principales cultivos andinos. El estudio se realizó en la cuenca del río Ilave y tuvo como objetivo realizar el análisis comparativo en la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos papa, quinua y cebada. La metodología empleada fue: obtener información meteorológica de las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno, estimación de la evapotranspiración de referencia mediante los métodos Penman Monteith y Tanque clase A, determinar la evapotranspiración real de los cultivos mediante los métodos indirectos y realizar el análisis estadístico, mediante la prueba estadística *t* de student. Los resultados nos indican que la evapotranspiración de referencia anual, estimados mediante el método de Penman Monteith es de 1301.84 mm y 1276.53 mm mediante el método de Tanque clase A, las necesidades hídricas del cultivo de papa es de 450.5 mm a través del método de Penman-Monteith y 437.6 mm mediante el método tanque clase A, para el cultivo de quinua es de 424.0 mm y 416.6 mm y para el cultivo de cebada es de 408.0 mm y 384.7 mm y la prueba estadística *t* de Student, nos indica que la estimación de la evapotranspiración de los cultivos papa, quinua y cebada mediante el método Penman Monteith y Tanque clase A, estadísticamente son iguales.

Palabras clave: Cebada, cultivo, evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real, papa, quinua.



ABSTRACT

Crop requirements are very important for irrigation design and scheduling, so it is essential to know these methods and apply them to the main Andean crops. The study was carried out in the Ilave river basin and its objective was to carry out a comparative analysis to determine the water requirements of potato, quinoa and barley crops. The methodology used was: to obtain meteorological information from the Mazo Cruz, Laraqueri, Juli, Ilave and Puno stations, estimate the reference evapotranspiration using the Penman Monteith and Class A pan methods, determine the real evapotranspiration of the crops using indirect methods and perform the statistical analysis using the Student's t-test. The results indicate that the annual reference evapotranspiration, estimated by the Penman Monteith method is 1301.84 mm and 1276.53 mm by the method of class A pan, the water needs of the potato crop is 450.5 mm through the Penman-Monteith method and 437.6 mm using the class A pan method, for the quinoa crop it is 424.0 mm and 416.6 mm and for the barley crop it is 408.0 mm and 384.7 mm and the Student's t-test statistic indicates that the estimation of evapotranspiration of the potato, quinoa and barley crops using the Penman Monteith and class A pan methods are statistically equal.

Keywords: Barley, crop, reference evapotranspiration, actual evapotranspiration, potato, quinoa.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2015), las principales tareas de la gestión del agua son satisfacer las necesidades de la producción agrícola, aliviar la pobreza y proporcionar seguridad alimentaria, y contribuir a la sostenibilidad medioambiental aplicando políticas que permitan una gestión eficiente de los recursos hídricos disponibles. Dado que la producción de alimentos y otros productos agrícolas absorbe casi el 70% de las extirpes globales de agua dulce, la agricultura es un elemento crucial y decisivo.

Para definir una usanza más eficaz del agua en la agricultura, una de las variables que hay que determinar es la evapotranspiración real o uso consuntivo, de ahí la necesidad de realizar estimaciones definitivas. Pero, debido a la complejidad de la estimación de la evapotranspiración, se han desarrollado un gran número de métodos, los cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos: por un lado, están los métodos directos que miden la evapotranspiración por medio de dispositivos, en cualquier cultivo para las condiciones de suelo, clima y disponibilidad de agua en la zona de investigación, y universalmente se consiguen resultados; sin embargo, estos métodos suelen ser costosos porque requieren la instalación y mantenimiento de equipos (Ponce, 1989). Por otra parte, existen enfoques indirectos; estos métodos teóricos y empíricos se utilizan ampliamente en la actualidad; se basan principalmente en el balance energético, mientras que otros utilizan datos meteorológicos; y su principal inconveniente es que fueron diseñados para determinadas situaciones (Aroni *et al.*, 2021; Jensen *et al.*, 1990).



La evapotranspiración está causada por dos fenómenos que se producen en el enlace cultivo-suelo: la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo. Estos fenómenos representan la pérdida fundamental de agua, a partir de la cual se determinan las necesidades hídricas de los cultivos. En investigaciones climatológicas, hidrológicas, agrícolas y forestales, la evapotranspiración es un típico parámetro de interés (Melesse *et al.*, 2007).

Las altas de tasas de evaporación que se producen en la región del Altiplano, sumado a sus características de ser un clima semiárido, que frecuentemente se presentan sequías (Condori *et al.*, 2021; Ponce, 2000) y otros desastres como heladas, es muy importante la determinación de usos consuntivos de los cultivos que son determinantes en la economía de la agricultura de la región Puno. En ese sentido, la papa, la quinua y la cebada constituyen el núcleo de la alimentación de los habitantes, en particular en el Altiplano andino que les genera mayores ingresos económicos.

La actual investigación tiene como objetivo cotejar los requerimientos hídricos de los cultivos de papa, quinua y cebada en la cuenca del río Ilave, mediante el cálculo de los coeficientes de cultivo (K_c) y la evapotranspiración potencial o de referencia (E_{To}) utilizando los métodos indirectos de Penman-Monteith y un tanque evaporímetro clase A, teniendo como variables meteorológicas principales la temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, velocidad del viento, insolación y evaporación.



1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Las preguntas a resolver en la investigación son:

Pregunta general:

¿Hay diferencias en la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos papa, quinua y cebada mediante los métodos indirectos Penman Monteith y Tanque evaporímetro clase A, en la cuenca del río Ilave, a través de la prueba estadística T de Student?

Preguntas específicas:

¿Cuánto es la evapotranspiración de referencia determinado mediante los métodos indirectos de Penman Monteith y Tanque evaporímetro clase A en la cuenca del río Ilave?

¿Cuánto son las necesidades hídricas de los cultivos papa, quinua y cebada estimadas mediante los métodos indirectos Penman Monteith y Tanque evaporímetro clase A, en la cuenca del río Ilave?

¿Es posible comparar los resultados de las necesidades hídricas de los cultivos papa, quinua y cebada estimados mediante los métodos indirectos de Tanque evaporímetro clase A y Penman Monteith, mediante la prueba estadística T de Student?

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Según el Ministerio de Agricultura (2012), la papa (*Solanum tuberosum L.*) es uno de los cultivos más importantes de la nación debido al enorme número de hectáreas



dedicadas a su cultivo, su disponibilidad durante todo el año como fuente de alimento y su versatilidad en la cocina peruana. La papa se cultiva en 19 regiones de la nación, entre el grado del mar y los 4.100 m. sobre el grado del mar, y constituye la base de la alimentación de la población, sobre todo en la sierra. Este cultivo proporciona más dinero en efectivo que ningún otro a los agricultores andinos.

En cotejo con el maíz, el arroz y trigo, la quinoa produce semillas con un mayor contenido proteínico (del 12 al 20%) que estos otros cereales. Una composición equilibrada de aminoácidos hace que el contenido proteínico sea equivalente al de la leche, lo que convierte a la quinoa en un sustituto adecuado de la carne y la leche; conjuntamente, la quinoa no contiene gluten, lo que resulta ventajoso en la elaboración comercial de platos sin gluten (Álvarez *et al.*, 2009).

Según la “Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS)”, la quinua es un alimento excelente por su alto importe nutritivo, que le consiente suplantar a las proteínas animales, y por su contenido equilibrado de proteínas y vitaminas. El altiplano del Perú es el foco de principio y domesticación de este fruto, que varía según la variedad en tamaño, color y sabor. El cultivo de quinua se identifica por la superioridad de diminutos agricultores con componentes agrícolas menores a 3,0 ha, alta variabilidad climática y la usanza de tecnología media o tradicional, lo que se traduce en actividades agrícolas elevadamente variadas como situación de eficacia mercantil que les admite reducir el peligro climático, de plagas y enfermedades (FAO, 2012); asimismo, el Ministerio de Agricultura y Riego (2013) señala que las condiciones naturales del altiplano andino permiten el cultivo de quinua. El departamento Puno sigue produciendo el 80% de la quinua en la nación.



El departamento Puno produce una variedad de cultivo alimenticio y forrajero ya que recibe lluvias de diciembre a abril, con una altura promedio anual de precipitaciones de 600 a 700 milímetros. Como consecuencia, los ríos y manantiales se recargan asiduamente y el recurso de agua es alta (Miranda *et al.* 2022), conjuntamente, la agricultura es una industria importante en el departamento de Puno, que ha florecido gracias a la disposición de suficientes recursos hídricos, a diferencia de la costa, donde las precipitaciones son escasas y cada vez más escasas debido al entorno árido de la región.

La distribución del agua y el aprovechamiento del suelo son diligencias fundamentales para la administración sensato del cultivo alimenticio y forrajero, así como la administración de los pastizales naturales, lo que incrementaría la calidad de vida de los pobladores de la cuenca peruana del lago Titicaca. Las principales tipologías del altiplano del Perú son que la mayor parte de su terreno es apto para la agricultura y el pastoreo, las lluvias se producen en “diciembre, enero, febrero, marzo y abril, y de mayo a noviembre son meses secos” (Argote, 2004).

Teniendo en cuenta que la papa, quinua y cebada son cultivo alimenticio esenciales para los agricultores de la región Puno, es obligatorio ejecutar una investigación para establecer los requerimientos hídricos o evapotranspiración real del cultivo de papa, quinua y cebada.

Los profesionales formuladores de proyectos de riego, los funcionarios de los organismos agrarios de la región Puno para planificar sus actividades agrícolas, los funcionarios del “Ministerio de Agricultura y Riego para planificar la ampliación de la frontera agrícola bajo riego en la región Puno, y los agricultores de la cuenca del río Ilave utilizarán los resultados del estudio”.



1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

1.4.1. Objetivo general

Realizar el análisis comparativo en la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos papa, quinua y cebada estimados mediante los métodos indirectos Penman Monteith y Tanque evaporímetro clase A, a través de una prueba estadística, en la cuenca del río Ilave.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Determinar la evapotranspiración de referencia mediante los métodos indirectos de Penman Monteith y Tanque evaporímetro clase A, en la cuenca del río Ilave.
2. Determinar las necesidades hídricas de los cultivos papa, quinua y cebada mediante los métodos empíricos Penman Monteith y Tanque evaporímetro clase A, en la cuenca del río Ilave.
3. Comparar los resultados de las necesidades hídricas de los cultivos papa, quinua y cebada estimados mediante los métodos indirectos Tanque evaporímetro clase A y Penman Monteith, mediante la prueba estadística T de Student



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEORICO

2.1.1. Cuenca hidrográfica.

Vásquez et al. (2016) define como la zona territorial limitada por una división topográfica (*divortium aquarum*) que recoge las precipitaciones y drena las aguas de escorrentía hacia el río primordial. Es un área geográfica natural adonde se produce el ciclo hidrológico. Es la zona drenada por un río, identificable por sus topografías y limitada por su cuenca hidrográfica (Gonzales & Alejo, 2008).

Villon (2002), la cuenca de drenaje de un arroyo es el ambiente de terreno donde convergen toda agua de precipitación para constituir un único cauce. Para cada punto de su curso, c/ curso de agua posee una cuenca determinada.

2.1.2. Descripción de los cultivos.

a. Cultivo de papa.

Según el Ministerio de agricultura y riego (2017), según cifras de la FAO, la producción de la nación en 2014 ocupó el decimocuarto lugar entre las 150 naciones que cultivan este producto, ocupando el segundo lugar en América detrás de Estados Unidos y el primero en Sudamérica. En términos de área cosechada, Perú se ubicó en el octavo lugar a nivel mundial en el mismo año, prevaleciendo a naciones “como Alemania, Francia, Polonia y Holanda”, que se encuentran entre los diez principales fabricantes globales. En términos de productividad por ha, el



Perú se ubicó en el puesto 122, con un rendimiento media de 14,778 kg/ha, 26.0% menor al promedio mundial e incluso inferior a los rendimientos conseguidos por nuestros semejantes, que van desde 18,449 kg/ha (Ecuador) a 20,042 kg/ha (Colombia) pasando por 27941 kg/ha (Brasil) y 21675 kg/ha (Chile). En Europa, como Francia, Alemania y los Países Bajos, y en Estados Unidos, los rendimientos alcanzan los 45.000 kg por hectárea.

Según el Ministerio de Agricultura (2012), la papa (*Solanum tuberosum* L.) por sus enormes hectáreas instaladas, su disponibilidad durante todo el año como producto alimenticio y su riqueza en la gastronomía peruana, la patata es considerada un cultivo muy significativo de la nación. La patata se cultiva en 19 regiones del país, entre el grado del mar y los 4.100 m. de altitud, y compone el fundamento de la nutrición de la población, sobre todo en la sierra. Los tipos de patata son sensibles a la deshidratación del suelo y requieren un riego frecuente y poco profundo. Las patatas tienen un periodo vegetativo de 120 a 180 días, requieren de 500 a 700 mm de agua y su rendimiento reduce si se drena más del 50% del agua total utilizable en el suelo durante la temporada de incremento.

Según Tapia y Fries (2007) a continuación figura una descripción botánica del cultivo:

La patata es una planta herbácea de 0,30 a 1 m de altura, según la variedad, de desarrollo erecto o semierecto.

Los tubérculos son tallos reformados que actúan como órgano de reserva de las plantas; varía en tamaños, formas y colores de la piel y la pulpa.



Las yemas u ojos de un tubérculo maduro persisten inactivos (en estado de latencia) hasta que producen un estolón a partir del cual se desarrolla una nueva planta. Antes de plantar, los almacenes de luz difusa impiden el crecimiento de los estolones. Presenta hojas compuestas.

La flor es bisexual, formada por estambres (masculinos) y pistilos (femeninos). El fruto maduro es una baya que suele ser de tono verde e incluye semilla botánica, para distinguirlas de las semillas de tubérculo.

La descripción del cultivo es:

- “Nombre científico”.

“*Solanum tuberosum*”

Según Ochoa (1990), “existen nueve especies diferentes de papas: *S. goniocalyx*, *S. phureja*, *S. stenotomum*, *S. tuberosum*, *S. ajanhuiri*, *S. chaucha*, *S. juzepczukii*, *S. curtilobum* y *S. tuberosum* ssp. *Andigenum*”

- “Nombres comunes”.

“Papa en español, ch’oqe en quechua y kea en aymara”.

Distribución por todo el planeta y necesidades climáticas. Cada una de las nueve especies posee rasgos físicos únicos y adaptaciones a altitudes de hasta 4.300 m. sobre el grado del mar. En este sentido, puede que sea la planta con mayor adaptabilidad climáticas y ecológicas.

- “Época de siembra”.



Según el Ministerio de Agricultura (2006) el tiempo de siembra de la papa va de octubre a diciembre, siendo noviembre el mes más importante.

- “Periodo vegetativo”.

“140 a 180 días”.

b. Cultivo de quinua.

Según el ministerio de agricultura y riego (2017), la quinua es un cereal andino que se labra en Perú desde hace generaciones. En la década de 1990, el producir hundió por bajo de las 20.000 tn; pero desde 2000, el contenido nutricional de la quinua ha aumentado. En contestación al incremento del demandar interna y externa, la producción aumentó a unas 30.000 toneladas y se iniciaron las exportaciones. Así, la producción superó las 40 mil toneladas en 2010 y las 44,2 mil toneladas en 2012, con diez mil toneladas exportadas. A partir de 2013, hubo una importante demanda externa, lo que llevó a extender el cultivo a la costa para aumentar la oferta, por lo que en 2013 se cosecharon 52 mil toneladas. Así, la tasa de incremento anual de la producción entre 2005 y 2013 fue del 5%. Luego, en 2014, se alcanzó un máximo histórico de 114,7 mil tn. debido a una mayor superficie cosechada, mayores rendimientos y más comercialización de este cultivo andino. En los años sucesivos, la producción nacional se reduce en 7,9% en 2015 y en 25% en 2016, debido primariamente a la baja de los precios locales y externos. Asimismo, Arequipa y Lambayeque fueron los que más disminuyeron sus rendimientos en ese periodo de tiempo. Puno, con 35,166 toneladas de producción de quinua en 2016, concentra el 44,4% de la producción nacional, seguido de las “regiones de Ayacucho (21%), Apurímac (8,1%),



Arequipa (7,8%), Cusco (5%) y Junín (4,6%). En Puno destacan las provincias de Azángaro (20,7%), El Collao (15,1%) y San Román (14,1%)”.

El Ministerio de agricultura y riego (2013) señala que las circunstancias oriundas de las franjas altoandinas son propicias para la producción de quinua, siendo Puno, Cusco, Junín, Apurímac y Ayacucho las principales regiones productoras. La región de Puno sigue produciendo el 80% de la quinua del Perú.

Según Tapia y Fries (2007) a continuación se ofrece una descripción botánica del cultivar:

La raíz es increíblemente fibrosa y mantiene eficazmente la planta; solamente cuando existe una abundancia de humedad las fuertes ráfagas pueden hacer que la planta se caiga. Dependiendo del tipo de suelo, una raíz completamente formada puede alcanzar una profundidad de hasta 1,50 m cuando alcanza la madurez.

El tallo es cilíndrico cuando es joven y se vuelve anguloso al madurar; el componente interior, o médula, es tierno cuando es joven y esponjoso, hueco y típicamente de color crema cuando madura. En las tierras altas del sur, puede alcanzar una altura de 1,80 metros.

En una misma planta, las hojas son polimorfas; las de la base son romboidales, mientras que las que están por encima de la inflorescencia son lanceoladas.

La inflorescencia de la quinua es racemosa, y la disponibilidad de las flores se conoce como panícula. Hay 2 variedades fundamentales de panícula: “la glomerulada, que es más compacta, y la amarantiforme, en la que el eje glomerular



se desarrolla recto a partir del eje principal”. Esta característica y el largo de la panícula están directamente asociadas al rendimiento de la cosecha. Las inflorescencias más densas y grandes (70 cm) pueden producir 220 g por planta.

Las flores de la quinoa son imperfectas, no posee pétalo, y puede ser pistolada, o femenina, o hermafrodita, masculina y femenina al mismo tiempo.

“Al fruto se denomina aquenio, mal llamado grano o pseudocereal, que consta de un perigonio lo que se desprende con facilidad con dos capas internas: episperma exterior y polisperma interior, difíciles de separar”.

La descripción del cultivo es:

- “Nombre científico”: “Chenopodium quinoa Willd.
- Familia: quenopodiáceas”.
- “Denominaciones comunes”: “Quinoa, quinua; kiwna (quechua); jiura (aymara)”.
- “Repartición geográfica”: La quinua es un cereal nutritivo labrado habitualmente en la zona del ande, desde el norte de Argentina has el norte de Colombia, en contextos generalmente de gran altitud y terreno montañoso.
- “Época de siembra”: Según el Ministerio de Agricultura (2013), la temporada de cultivo de la quinua abarca de septiembre a diciembre, siendo octubre el mes más importante.
- Periodo vegetativo: 150 a 180 días.



c. Cultivo de cebada.

En Perú, la cebada es uno de los cultivos alimentarios más extendidos en términos de superficie. Se cultiva principalmente por encima de los 3.000 metros de altitud y, junto con la patata, es uno de los alimentos más importantes en estas zonas. Puno, Cusco, Junín y Huancavelica son las principales regiones cerealistas, generando el 48% de la cantidad total. Su producción se ha incrementado en casi 50% en las novísimas dos décadas, debido principalmente a un incremento de 35% en el área cosechada, pasando de 101,177 ha en 1993 a 154,127 ha en 2013. Entre 1992 y 2013, la producción media nacional de cebada aumentó un 45%, pasando de 0,84 toneladas por hectárea a 1,5 toneladas por hectárea (Ministerio de agricultura y riego, 2013).

Según Muñoz (2007), la clasificación científica (taxonomía) de la cebada es el siguiente:

- Clase: *Liliopsida* (= *Monocotyledonae*).
- Subclase: Liliidae.
- Orden: Poales (= *Glumiflorae*)
- Familia: Poaceae (= *Gramineae*).
- Sub familia: Pooideae (= *Festucoideae*).
- Tribu: Triticeae (= *Hordeae*)
- Género: *Hordeum*
- Especie: *Hordeum vulgare* L

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) es resistente a varios factores de estrés abiótico y tiene un periodo de progreso breve. Estos indicadores admiten que la cebada se cultive en entornos en los que otros cultivos no pueden prosperar.



Según Muñoz (2007), existen numerosas formas de clasificar la cebada, siendo la más frecuente:

Hábito de crecimiento: la cebada consigue cultivarse en invierno o en primavera. Las cebadas de invierno, también llamados de ciclo extenso, requieren vernalización para prosperar, pero las cebadas de primavera, también llamados de ciclo breve, no lo requieren.

La morfología de la espiga: en caso de la cebada puede tener 2 o 6 filas. En la primera, la espiguilla lateral es estéril y la central fértil, mientras que en la cebada de seis filas “todas las espiguillas son fértiles”.

Uso final: la cebada puede tipificarse en cebada cervecera, alimentaria o forrajera. Las 1eras se usan en la fabricación de malta, que se utiliza en la creación de cerveza y otros líquidos con alcohol, azúcares y preparados alimenticios. Debido a su mayor contenido en proteínas, fibra dietética (betaglucanos) y alto contenido en hidrato de carbono, las segundas se emplean como granos perlados y harina panadera en la cocina humana. Las 3ras se emplean principalmente como alimento para algún animal.

“Según la cubierta de su grano: existen cebadas con cariósides vestidas o descascarilladas (lemma y palea – en este caso, las vainas florales no se desprenden o separan durante la trilla), en tanto que las cebadas con cariósides desnudas o descascarilladas (lemma y palea se desprenden del fruto durante la trilla)”.

La morfología de la cebada según Muñoz (2007), es el siguiente:



Sistema radicular: En comparación con otros cereales, el sistema radicular es fibroso, fasciculado y poco profundo. Se calcula que el 60% del peso de las raíces se halla en los 25 centímetros superiores del suelo y que las raíces alcanzan una profundidad máxima de 1,20 metros. “El grado de ramificación y la hondura del sistema radicular vienen determinados por la profundidad de plantación, el tipo de suelo, la humedad, la temperatura y la fertilidad del suelo”.

Tallos: Tienen una estructura erguida, cilíndrica, enmarañada y a menudo lisa. Los nudos son sólidos, mientras que los entrenudos son huecos; puede haber siete u ocho entrenudos, y suelen ser más extensos a grado que el tallo se eleva desde la base. La planta posee un tallo primordial, así como ramas o ramificaciones. La altura de la planta de cebada, incluida la espiga, oscila entre 0,30 m como mínimo y alcanzando más de 2 metros. Siendo la altura un aspecto muy importante en la producción, debido a que puede influir en el método o la conveniencia de la cosecha y en su vinculación con el encamado. La cantidad de tallos con espigas es crucial para el rendimiento de grano por hectárea.

Hojas. Están compuestas por la vaina basal y la lámina, que están unidas por la lígula, truncada y corta en la cebada, y muestran largas prolongaciones membranosas y envolventes denominadas aurículas. Un collar o pulvinus, que es una protuberancia en la superficie de la hoja, conecta las hojas con los nudos del tallo. El número de hojas por tallo oscila entre cinco y diez, y varían en tamaño, forma, recubrimiento ceroso y color, que se intensifica en zonas frías por la presencia de pigmento antocianico, que da a algunas hojas un tono púrpura.

Inflorescencias. La cebada tiene flores que se congregan formando lo que se denomina espiga. “La espiga consta de un eje central o raquis formado por



nudos y entrenudos, así como de tres espiguillas por nudo del raquis. Las espiguillas, que son la unidad morfológica fundamental, se organizan alternativamente a ambos lados del raquis, están sentadas y están formadas por dos brácteas o glumas y flores, cuyo número viene determinado por el genotipo”. Si todas las espiguillas del nudo son fértil, se desarrolla una espiga con seis filas; si sólo las espiguillas centrales son fértiles, de cada nudo se desarrolla una espiga con dos filas.

Fruto o grano. El fruto con su semilla forma los granos o carióspsides, que son secos e indehiscentes ya que el pericarpio del fruto se encuentra firmemente unido al envoltorio de la semilla. “El endospermo se compone por la membrana de semilla, el embrión, la aleurona y el endospermo. La forma conica del grano de cebada es característica, siendo el centro más grueso que los extremos. En el caso de la cebada vestida, las vainas florales de la lemma y la palea están unidas al pericarpio. La cáscara de la cebada (en los tipos de grano vestido) resguarda el grano de los depredadores y es útil en los procedimientos de malteado y elaboración de cerveza; representa el 13% del peso del grano”, dependiendo del cultivar del grano y de la latitud de la plantación.

2.1.3. Elementos climáticos.

a. Temperatura.

Allen *et al.* (2006) no duplicar El calor sensible del aire circundante transporta energía al cultivo y regula posteriormente la tasa de evaporación. En un día cálido y luminoso, la evapotranspiración dará lugar a una mayor pérdida de agua que en un día fresco y nublado. La temperatura máxima y mínima diarias



(medias) en grados Celsius son necesarias para el aplicar de metodologías de valor de la evapotranspiración de referencias.

Breña y Jacobo (2006) la temperatura es una medida de la velocidad media de traslación de las moléculas de un sistema, que en este ejemplo son moléculas de aire. Para evitar las perturbaciones causadas por el impacto directo de los rayos del sol sobre los termómetros, éstos se alojan en un refugio meteorológico con paredes perforadas.

b. Humedad relativa.

“El parámetro de humedad relativa caracteriza el contenido de humedad de la atmósfera como el enlace entre la densidad del vapor de agua en un volumen de aire y la densidad del vapor de agua en situaciones de saturación” (Breña y Jacobo, 2006).

Guevara y Cartaya (2004) definimos la humedad como la proporción de la atmósfera que consiste en vapor de agua; es insignificante en comparación con los demás componentes, sin embargo, es crucial porque influye en las condiciones meteorológicas predominantes. El contenido de humedad del aire es además una influencia crucial en el proceso de evaporación local, por lo que el hidrólogo debe conocer las condiciones atmosféricas y comprender las implicaciones termodinámicas de la humedad atmosférica.

c. Radiación solar.

Allen *et al.* (2006), la radiación solar es la característica más importante, según los hidrólogos, porque es una fuente de energía en el planeta y convierte una cantidad considerable de agua líquida en vapor de agua, influyendo en el



proceso de evapotranspiración. La ubicación y la estación del año determinan la posible cantidad de radiación que puede llegar a una base que facilita la evaporación o que se está evaporando. Al calcular el impacto de la radiación solar en la evapotranspiración, hay que tener en cuenta además “Parte de la energía solar se utiliza para calentar la atmósfera y la tierra, ya que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua”.

d. Velocidad del viento.

El viento se produce cuando hay discrepancias de temperatura entre punto geográfico vecinos o cuando se producen permutas en la presión atmosférica. En consecuencia, en un lugar determinado se producen diferencias sustanciales en intervalos breves. Los cerros se hielan más rápido que las tierras abajo circundantes, por lo que por la noche los aires soplarán en dirección descendente; por la mañana, como las elevaciones más altas reciben primero los rayos del sol, los vientos soplarán en dirección ascendente (Ponce, 1989).

Allen *et al.* (2006) el viento y la turbulencia del aire mueven gran cantidad de aire hacia el plano de evaporación; por lo tanto, el aire por encima del plano de evaporación se rebosa cada vez más de vapor de agua.

e. Precipitación.

Vásquez *et al.* (2016) de forma similar, explican que las precipitaciones se producen cuando las minúsculas gotas de agua que forma la nube se enfrían y condensan, lo que da lugar a la alianza de la minúscula gota de agua para constituir gotas más grandes y pesadas, que luego caen a el plano terrestre. “La precipitación consiste en lluvia, granizo, nieve, niebla y rocío”.



Pérez (2015) la precipitación es cualquier tipo de humedad que comienza en las nubes y llega a la superficie de la tierra, adopta diversas formas, como lluvia, granizo, aguanieve y nevada. La precipitación es otro nombre para el agua que se origina en la humedad atmosférica y cae a el plano terrestre, primariamente en forma líquida como lluvia y llovizna o en forma sólida como escarcha, nieve o granizo.

La altura de las precipitaciones en un punto concreto varía con respecto a la zona circundante. Para varias aplicaciones hidrológicas, es necesario conocer la altura media de precipitación de una región, que puede ser diaria, mensual, anual, media mensual o media anual (Lanza *et al*, 2022; Teegavarapu, 2022).

f. Evaporación.

Vásquez *et al.* (2017) la evaporación se describe como la transformación física del agua de etapa líquida a vapor. La evaporación es una fase del ciclo hidrológico que está regulada por una serie de elementos, como el viento, la temperatura, la humedad relativa, la radiación y el suelo.

La evaporación es el sumario por el que el agua pasa de su estado líquido en el almacenamiento, el suelo y las capas cercanas a el plano a su estado gaseoso en situaciones naturales y se transmite a la atmósfera (Corradini *et al.* 2022).

2.1.4. Transpiración

El proceso de transpiración implica la evaporación del agua líquida de los tejidos vegetales y su posterior eliminación a la atmósfera. La mayor parte del perder de agua de la planta se produce mediante las estomas. Se trata de grietas microscópicas en la hoja que permiten que los gases y el vapor de agua salgan de



las plantas y entren en la atmósfera. Además de transportar agua y alimentos por toda la planta, sus raíces absorben y transportan agua y nutrientes. La vaporización se origina adentro de la hoja, en el espacio intercelular, y la apertura estomática regula la permuta de vapor con la atmósfera. Sólo una pequeña parte del agua absorbida del suelo pasa a formar parte del tejido de las plantas (Allen et al., 2006).

2.1.5. Evapotranspiración

Gámez (2010) la evapotranspiración se precisa como la cantidad de agua consumida por las plantas para llevar a cabo sus ocupaciones de transpiración más la cantidad de agua que se evapora del plano del suelo.

Allen et al. (2006) los autores señalan que la evaporación y la transpiración se producen juntamente y que no existe una forma sencilla de diferenciar ambos procesos. Además de la disposición de agua en los horizontes superficiales, la fracción de radiación solar que llega al plano del suelo es el primordial determinante de la evaporación del suelo cultivado.

2.1.6. Evapotranspiración de referencia

Allen et al. (2006) precisa que la evapotranspiración de referencia (ET_o) es la tasa de evapotranspiración de un plano de referencia que se produce en ausencia de limitaciones hídricas. El plano de referencia incumbe a un hipotético cultivo de hierba con las siguientes tipologías: “una altura supuesta de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23; también es importante señalar que sólo los parámetros climáticos influyen en la evapotranspiración de referencia”.



Vásquez et al. (2017) indica que la evapotranspiración potencial o de referencia, es la que se origina en un cultivo corto (a menudo gramíneas) que cubre todo el plano del suelo, en una fase activa de incremento y con una provisión adecuada y continua de agua. “Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, el comité técnico de requisitos de riego de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) ha adoptado la alfalfa como hierba estándar”.

Los métodos directos o lisímetros, el método del tanque evaporímetro y los métodos indirectos o fórmulas empíricas son las técnicas para apreciar la evapotranspiración de referencia.

a. Método del Lisímetro.

Gámez (2010) menciona que el método del lisímetro consiste en calcular la evapotranspiración utilizando tecnologías de control de la pérdida de agua en recipientes llenos de tierra sembrados con el cultivo de referencia. El lisímetro se define como una estructura que incluye una masa de suelo y está diseñada para computar el agua que drena mediante el perfil del suelo. Los lisímetros se dividen en lisímetros de drenaje, lisímetros de pesaje y lisímetros de compensación en función del sistema de medición.

Vásquez *et al.* (2017) el método del lisímetro es un método directo y preciso para computar la evapotranspiración potencial o de referencia de un lisímetro durante un espacio de tiempo explícito. En el interior del lisímetro se halla el cultivo o césped de referencia en el que se centra el análisis de la evaporación o la transpiración. Este método suele emplearse en investigación, pero rara vez se emplea en los análisis de las necesidades de agua de los cultivos para los sistemas de riego en curso.



b. Método del tanque evaporímetro.

Allen *et al.* (2006) señalan que el tanque evaporímetro ha demostrado su utilidad práctica y se ha utilizado eficazmente “para estimar la evapotranspiración de referencia observando la pérdida por evaporación de una superficie de agua y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con la evapotranspiración de referencia”.

Un tanque evaporímetro es de forma circular de 120,7 cm de diámetro y 25 cm de profundidad, “generalmente es de material hierro galvanizado o de chapa metálica (0,8 mm). Para que tenga ventilación, el tanque se sitúa a 15 cm del suelo sobre una plataforma de rejilla de madera. El tanque debe estar horizontal. Una vez instalado, el tanque se llena de agua hasta una profundidad de 5 centímetros por debajo del borde, y el grado del agua nunca debe descender por debajo de 7,5 centímetros por debajo del borde”. Para eliminar la turbidez, el agua debe cambiarse periódicamente, al menos una vez por semana. Si el tanque está galvanizado, debe aplicarse cada año pintura de aluminio. Para evitar que los animales accedan a los tanques, deben instalarse redes de seguridad (Allen *et al.*, 2006).

La parte de instalación debe ser preferiblemente una zona de hierba de 20 por 20 metros con laterales abiertos para favorecer la circulación del aire. Lo mejor es que la estación esté puesta en el centro de zonas agrícolas amplias o entre ellas (Ertek, 2011; Gültekin & Ertek, 2021).



c. Método indirecto de Penman Monteith.

Según Allen *et al.* (2006), el método Penman-Monteith fue normalizado por los expertos de la “Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación” (FAO). Esta ecuación emplea datos climáticos sobre radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento. Debido a la complejidad de este procedimiento, se requieren hojas de cálculo o el programa CROPWAT, creado por la Dirección de Fomento de Tierras y Aguas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Allen *et al.*, 2006).

2.1.7. Coeficiente de cultivo

Vásquez *et al.* (2017) define el coeficiente de cultivo (K_c) como un elemento que señala el nivel de progreso del suelo por el cultivo cuyo consumo de agua debe determinarse. En los niveles de K_c influyen primariamente las tipologías del cultivo, la fecha de siembra, la tasa de desarrollo del cultivo, la duración del período vegetativo, las circunstancias meteorológicas específicas, además de la frecuencia de las precipitaciones o agua de riego aplicado, en particular en la etapa inicial del período de desarrollo.

El coeficiente de cultivo (K_c) representa el nivel de progreso del suelo por el cultivo cuyo uso del agua se está midiendo. Los impactos de la transpiración del cultivo y de la evaporación del suelo se integran en un único coeficiente K_c que tiene en cuenta los cambios en la evaporación del suelo y en la tasa de transpiración del cultivo entre el cultivo y la zona de pastos de referencia (Allen *et al.*, 2006).



2.1.8. Evapotranspiración real

La evapotranspiración real del cultivo se relaciona a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando está independiente de enfermedades, bien fertilizado, cultivado en amplias parcelas en contextos ideales de suelo y agua, y produce su mayor rendimiento en las circunstancias meteorológicas imperantes. El demandar de agua de los cultivos se precisa como la cantidad de agua necesaria para compensar la pérdida por evapotranspiración de los cultivos; por lo tanto, “el requerimiento de riego simboliza la diferencia entre la necesidad de agua de los cultivos y la precipitación efectiva”. En condiciones climáticas idénticas, las divergencias en las anatomías de la hoja, las tipologías de las estomas, “las cualidades aerodinámicas e incluso el albedo hacen que la evapotranspiración del cultivo (ET_c) difiera de la evapotranspiración del cultivo de referencia” (Allen et al., 2006).

2.1.9. Necesidades hídricas de los cultivos

Calera et al. (2015) se ha sugerido que la disposición de agua en el suelo es con frecuencia el elemento restrictivo de la expansión del dosel en las situaciones semiáridas del clima mediterráneo. “Cuando el contenido de agua de la capa de suelo a la que acceden las raíces disminuye por debajo de un umbral determinado, la planta es incapaz de extraer agua en la tasa requerido por el sistema planta-atmósfera y entra en un estado de estrés hídrico”. En este caso que la presencia de estrés hídrico tiene muchas consecuencias en el desarrollo de la planta: los valores inferiores de estrés provocan una reducción del incremento vegetativo, lo que se vuelve en una disminución del incremento y progreso de la hoja.



FAO (2002a) el moderno sistema de riego por goteo permite aplicar cualquier cantidad de agua y fertilizante a la banda radicular de las plantas en el momento necesario. Esto sugiere que, en situaciones estrictamente controladas, es un método con un alto potencial de eficiencia en el aplicar de agua y su uso por las plantas; en situaciones convenientes y para cultivo adecuados, brinda la posibilidad de obtener mayor rendimiento que los métodos de riego convencionales.

Van den Berg, et al. (2022) nos indica que la demanda de agua de los cultivos es la cantidad de agua que requiere una planta a lo largo de toda su temporada de crecimiento para producir una cantidad determinada de materia seca. También se incluye en este consumo el agua que se evapora del suelo.

2.2. ANTECEDENTES

A nivel Internacional:

Sáez (2016) se señala que la evapotranspiración de reseña se determinó por el método del tanque evaporímetro tipo A, para su validación, y el valor que resulta se comparó con el método Penman-Monteith presentado por la FAO; observándose un comportar análogo entre el resultado de las dos operaciones, así como correspondencia con el informe fenológico del cultivo de papa. Se da por concluyente que la metodología que se emplea cuenta convenientemente los fenómenos de evapotranspiración del cultivo de papas en Riobamba, Ecuador.

Marín (2010) las fórmulas examinadas estiran a sobreestimar los valores de evapotranspiración potencial en comparación con los de evaporación real registrados en el tanque Clase A. Las fórmulas de mejor desempeño en Colombia son “las ecuaciones



de Hargreaves, Christiansen y Penman-Monteith”, las cuales incorporan el mayor número “de variables climatológicas como radiación solar, insolación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa”.

Utilizando “los métodos de Penman-Monteith y de la cuba de evaporación”, se calcularon los valores de evapotranspiración (ET_o) de referencia de los cultivos en la “zona semiárida de Qubor, estado Lara, en la región centro-occidental de Venezuela”. Dos períodos (abril-julio y julio-noviembre de 2001) para los que se generaron estimaciones utilizando ambos enfoques mostraron una correlación superior al 75% y al 80%, respectivamente. En el primer período, los valores de ET_o fue comparables para los dos procedimientos, sin embargo, en la segunda fase, el método de la cuba de evaporación produjo mayores valores de ET_o.

A nivel nacional:

Mallma (2015) indica que en el altiplano del departamento Junín, para todo el ciclo del cultivo de quinua, la demanda hídrica mínima oscila entre 300 a 500 mm hasta un máximo de 600 a 800 mm de lámina de agua, y que se debe determinar la fecha correcta de siembra (para efectos de aprovechar el agua de lluvia, la siembra coincide con estaciones de lluvia y la cosecha con estaciones de estiaje). Asimismo, la patata se cultiva en régimen de secano; proporciona el mayor rendimiento cuando recibe al menos 600 mm de precipitaciones. Se calcula que la evapotranspiración del cultivo de la patata es de 470,6 mm para una etapa vegetativa de cinco meses, mientras que la evapotranspiración del cultivo de la quinua es de 758 mm para un tiempo vegetativo de seis meses.



A nivel regional o local

Canllahui (2013) investigó la evapotranspiración y el coeficiente de cultivo (K_c) para producir papa (*Solanum tuberosum* L. Var. Silver) en el Centro Experimental CIP-ILLPA-Puno en 2013 y alcanzó a las sucesivas conclusiones: Utilizando el enfoque del lisímetro, “la evapotranspiración del cultivo de papa es de 610,76 mm, 588,87 mm cuando se utiliza el método de Hargreaves basado en la temperatura, 429,81 mm cuando se utiliza el método de Hargreaves basado en la radiación solar y 579,42 mm cuando se utiliza el método de Serruto. El coeficiente de cultivo (K_c) para el cultivo de la patata obtenido por el método del lisímetro fue el siguiente 0,46 en la etapa de emergencia, 0,96 para la formación de estolones, 1,27 al inicio de la tuberización, 1,41 al inicio de la floración, 1,80 en la etapa final de la floración, 1,35 en la etapa final de la tuberización y 0,96 en la etapa de madurez fisiológica”; este resultado se compara a los valores que se asumen en la propuesta de la FAO.

Flores (2013) en el altiplano del Perú se utilizaron 42 estaciones meteorológicas para analizar la evapotranspiración en función de las condiciones climáticas y de los elementos; en nueve estaciones con datos completos se calculó la evapotranspiración de referencia (E_{To}) utilizando los métodos de Penman-Monteith, Hargreaves-Samani y del tanque clase "A". La evapotranspiración anual de referencia en Ilave fue de 1542,6 milímetros, en Juli de 1232,2 milímetros y en Puno de 1431,4 milímetros. En la mayoría de las estaciones se encontró un coeficiente de correlación entre las técnicas de Hargreaves-Samani y Penman-Monteith que osciló entre 0,70 y 0,88. En la mayoría de las estaciones se encontró un coeficiente de correlación entre las técnicas de Hargreaves-Samani y Penman-Monteith.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Ilave forma parte del sistema Titicaca, Desaguadero, Poopó y Salar de Coipasa (TDPS) y su ubicación geográfica es 352,353 E a 452,052 E con 8'104,770 N a 8'248,751 N en coordenadas UTM (WGS84), en el territorio peruano, correspondiente a la región Puno, provincias: Chucuito, El Collao y Puno; distritos: Ilave, Chucuito, Acora, Platería, Huacullani, Juli, Capaso, Santa Rosa (Mazocruz), Conduriri, Laraqueri, Puno y San Antonio. La cuenca del río Ilave es una cuenca endorreica, que desemboca al lago Titicaca, en la figura 1 se presenta la gráfica de ubicación geográfica.

3.2 METODOLOGÍA.

3.2.1 Información climatológica.

Los datos climáticos para la investigación tales como temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, velocidad del viento, insolación y evaporación a nivel mensual, fueron registradas en las estaciones meteorológicas de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno, los mismos que se obtuvieron procesadas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología Puno (SENAMHI).

3.2.2 Evapotranspiración de referencia (Objetivo específico 1)

“Para determinar la evapotranspiración de referencia se utilizan los métodos indirectos de Penman Monteith y Tanque evaporímetro clase A”.

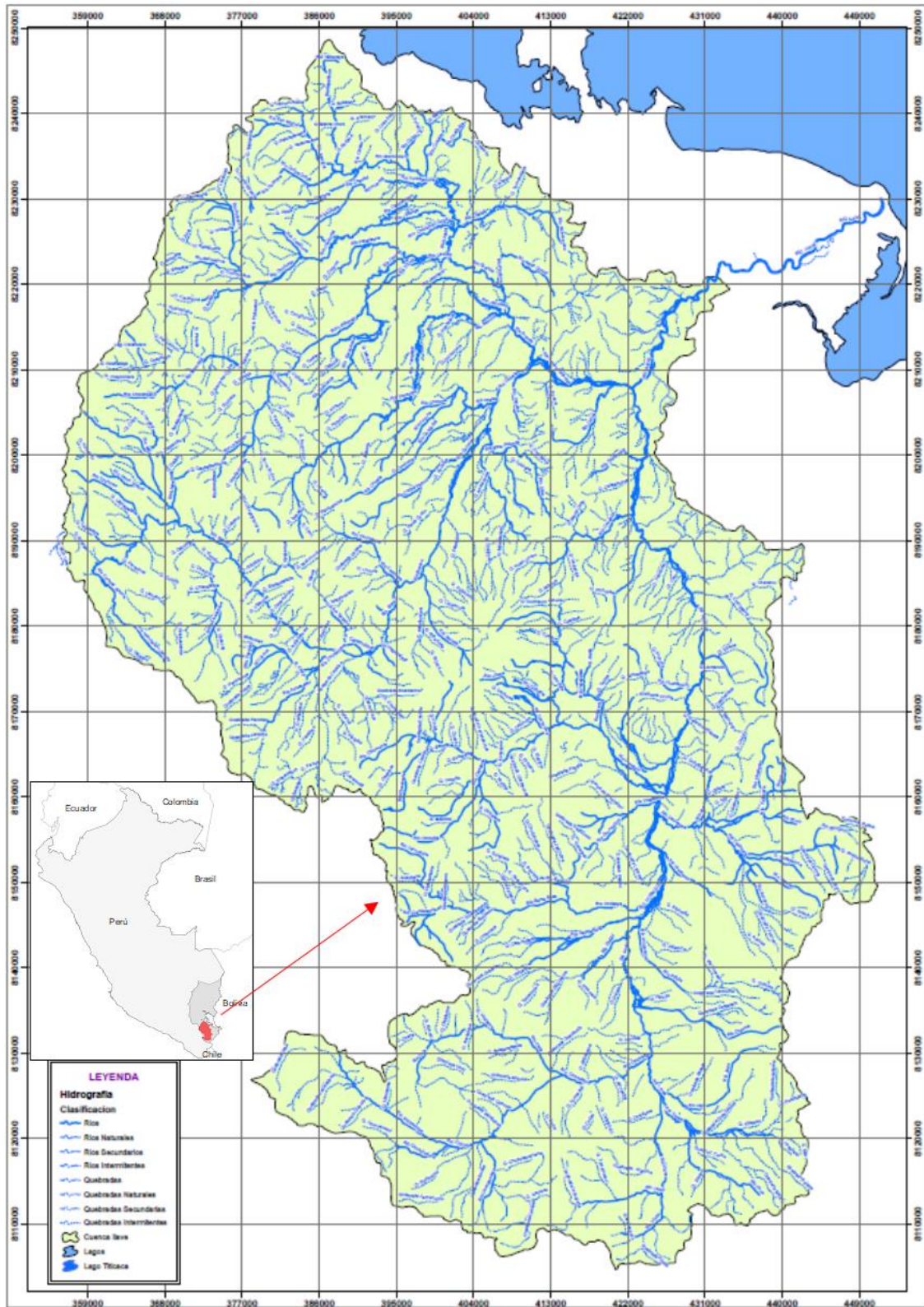


Figura 1. Ubicación geográfica del río Ilave.

Fuente: Ministerio de Agricultura (2009).

a. Método Penman Monteith

“Para estimar la evapotranspiración de referencia se emplean datos meteorológicos mensuales de temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento y horas de sol. Según Allen *et al.* (2006) este método utiliza la siguiente ecuación”:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

Donde:

ET_0 : Evapotranspiración de referencia (mm día-1)

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

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

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

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

e_s : Presión de vapor de saturación (kPa)

e_a : Presión real de vapor (kPa)

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

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

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

Para estimar “la evapotranspiración de referencia se emplea el software CROPWAT 8.0, es un programa de computación que utiliza el método indirecto Penman-Monteith”.



b. Método del tanque evaporímetro clase A.

Según Allen et al. (2006), “la ecuación que utiliza este método es el siguiente”:

$$E_{To} = K_p \times E_{pan}$$

Donde:

E_{To} : evapotranspiración de referencia (mm/día).

K_p : coeficiente del tanque evaporímetro.

E_{pan} : evaporación del tanque evaporímetro Clase A (mm/día).

Para determinar el coeficiente K_p adecuado para un tanque evaporímetro en particular, hay que tener en cuenta no sólo el tipo de tanque, sino además la cubierta del suelo donde se encuentra el tanque, sus alrededores, así como las condiciones de viento y humedad general. Los resultados también se ven afectados por la posición del tanque evaporímetro y su entorno (Allen *et al.*, 2006).

Para determinar la localización del tanque evaporímetro clase A, se tienen dos casos: “Caso A en que el tanque evaporímetro se localiza” sobre una superficie cultivada y “Caso B en que el tanque evaporímetro” está situado sobre un suelo desnudo. “En la figura 2 se muestra la ubicación” del tanque evaporímetro clase A, para los casos A y B.

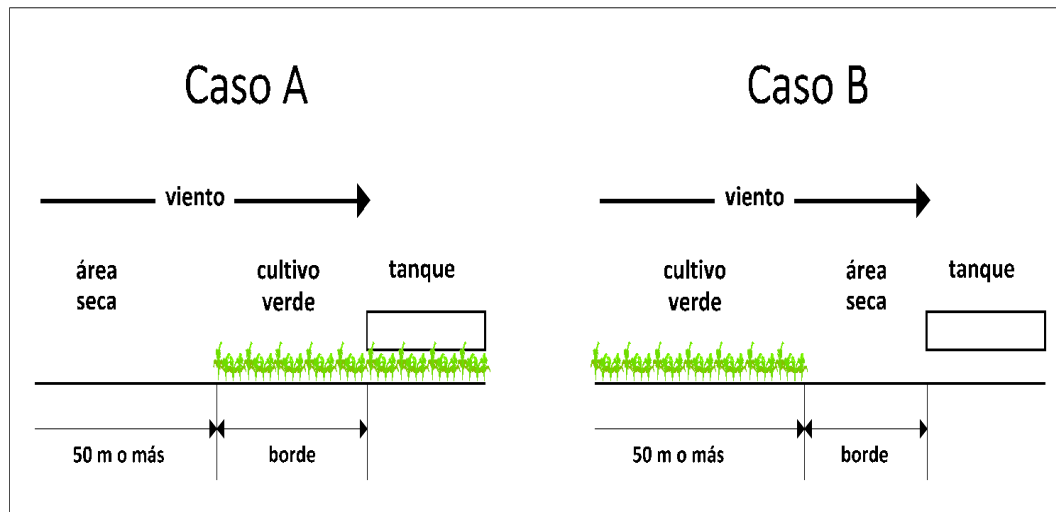


Figura 2. Configuración del tanque de evaporación clase A, dos casos típicos.

Fuente: Allen *et al.* (2006).

El coeficiente (K_p) del tanque evaporímetro clase se obtiene de la Tabla 1, con la siguiente información:

- Primero definir la localización del tanque clase A.
- Velocidad de viento.
- El distanciamiento del cultivo al barlovento o distancia del barbecho a barlovento.
- Humedad relativa media.

Tabla 1. Coeficiente del tanque evaporímetro (K_p) para el tanque clase A.

Velocidad del viento (m/s)	CASO A: Tanque situado en una superficie cultivada				CASO B: Tanque situado en un suelo desnudo			
	Distancia del cultivo a barlovento (m)	Humedad relativa media (%)			Distancia del barbecho a barlovento (m)	Humedad relativa media (%)		
		Bajo < 40	Medio 40-70	Alto > 70		Bajo < 40	Medio 40-70	Alto > 70
	Ligero: < 2	0	0.55	0.65	0.75	0	0.70	0.80
10		0.65	0.75	0.85	10	0.60	0.70	0.80
100		0.70	0.80	0.85	100	0.55	0.65	0.75
1000		0.75	0.85	0.85	1000	0.50	0.60	0.70
Moderado: 2 - 5	0	0.50	0.60	0.65	0	0.65	0.75	0.80
	10	0.60	0.70	0.75	10	0.55	0.65	0.70
	100	0.65	0.75	0.80	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.70	0.80	0.80	1000	0.45	0.55	0.60
Fuerte: 5 - 8	0	0.45	0.50	0.60	0	0.60	0.65	0.70
	10	0.55	0.60	0.65	10	0.50	0.55	0.65
	100	0.60	0.65	0.70	100	0.45	0.50	0.65
	1000	0.65	0.70	0.75	1000	0.45	0.45	0.55
Muy fuerte: > 8	0	0.40	0.45	0.50	0	0.50	0.60	0.65
	10	0.45	0.55	0.60	10	0.45	0.50	0.55
	100	0.50	0.60	0.65	100	0.40	0.45	0.50
	1000	0.55	0.60	0.65	1000	0.35	0.40	0.45

Fuente: Allen *et al.*, (2006).



3.2.3 Estimación de la evapotranspiración real del cultivo (Objetivo específico 2)

Según Aroni *et al* (2021), “el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) es la multiplicación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) con el coeficiente del cultivo (K_c)”:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Donde:

ET_c : evapotranspiración del cultivo (mm/mes),

K_c : coeficiente del cultivo (adimensional),

ET_o : evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/mes).

Coeficiente del cultivo

Para Vásquez *et al.*, (2017) el coeficiente de cultivo muestra el nivel de progreso o cambio de la cobertura del suelo por el cultivo cuyo consumo de agua debe determinarse. De esta manera, los valores de K_c vienen determinados por el tipo de cultivo, la fecha de plantación, el ritmo de progreso del cultivo, la duración del período vegetativo, el clima y la frecuencia de riego. El coeficiente K_c de cada cultivo fluctuará estacionalmente en función de los siguientes períodos de desarrollo del cultivo:

“Fase 1, Fase inicial”: Alcanza la etapa de gestación y desarrollo temprano cuando el plano del suelo está poco o nada cubierta por el cultivo, desde el cultivo hasta una cubierta vegetal del 10%.



“Fase 2, Fase de desarrollo del cultivo”: Alcanza el tiempo entre la finalización del período primero y la consecución de una cobertura de sombra efectiva del 70-80%.

“Fase 3, Fase de mediados del periodo (Maduración)”: Alcanza el tiempo entre el momento en que se logra la plena cubierta de sombra práctica y el comienzo de la maduración, indicada por el desplome de la hoja.

“Fase 4, Fase final del periodo vegetativo (cosecha)”: Alcanza el período entre el final de la etapa preliminar y la cosecha o madurez completa.

En la publicación n° 56 de la FAO se tabulan y presentan los valores del coeficiente de cultivo (Kc) para las siembras de patata, quinoa y cebada (Allen et al., 2006).

Según Allen et al. (2006), a continuación, se presenta el proceso para estimar el factor Kc del cultivo:

Se especifica el cultivo que se va a plantar.

Se determina la duración de la etapa vegetativa y de c/ periodo de desarrollo del cultivo: “inicio, desarrollo, maduración y cosecha”.

Utilizando el gráfico entre la frecuencia de riego y la evapotranspiración potencial, se calcula el valor de Kc para el periodo primero del cultivo (ETP). Por ello, se considera una asiduidad de riego práctica basada en el cultivo y la región de crecimiento.



El valor de K_c para las fases de maduración y recolección se obtiene mediante tablas que relacionan K_c con la humedad relativa y la velocidad del viento.

La curva K_c se desarrolla correlacionando los valores K_c con las fases de crecimiento del cultivo. La planificación se ejecuta del siguiente modo:

- El valor de K_c de la “fase inicial” corresponde a la conclusión de la fase.
- El valor K_c de la fase de maduración se correlacionará con la fase completa.
- El valor K_c de la fase de cosecha se correlacionará con la conclusión de la fase.
- Conecte “los valores K_c de las diversas etapas tales como la finalización de la etapa inicial con el comienzo de la siguiente etapa de maduración y la parte última o final de la etapa de maduración con el tramo final de la etapa de cosecha” utilizando líneas rectas.
- Trace la curva representativa y suavizada. La línea delineada representará la curva K_c para el cultivo analizado.

3.2.4 Análisis estadístico (Objetivo específico 3)

Se utilizará la prueba t de Student para cotejar los resultados de la apreciación de la evapotranspiración real de los cultivos de papa, quinua y repollo utilizando “los métodos de Penman-Monteith y del tanque clase A”, según Villón (2002):

- a. “Establecer la hipótesis planteada y la alterna y nivel de significancia”:

$$H_p: \mu_1 = \mu_2 \quad (\text{media poblacional})$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$$

$$\alpha = 0.05$$



b. “Desviación estándar de las diferencias de promedio (Sd)”:

$$S_d = S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$$

c. “Desviación estándar ponderada (Sp)”:

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

d. “Cálculo del valor de T calculado (Tc), según la siguiente ecuación”:

$$T_c = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_d}$$

e. “Empleando tablas estadísticas, Encuentre el valor de Tt en las tablas; ingresando con”:

Considerar: $\alpha = 0.05$ y G.L. = $n_1 + n_2 - 2$

Donde:

α : Nivel de significación-°

G.L. : Grados de libertad

f. “Conclusión”

Si $|T_c| \leq T_t$ (95%) \rightarrow No hay diferencias.

Si $|T_c| > T_t$ (95%) \rightarrow Hay diferencias significativas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 INFORMACION CLIMATOLOGICA.

En la tabla 2, se muestra la información de temperatura máxima promedio mensual en el área de la cuenca del río Ilave, registradas en las estaciones meteorológicas de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno, durante el periodo 2008 al 2017.; en ella se puede apreciar que la variación mensual de la temperatura máxima es de 12.8 a 19.2 °C, que pertenecen a los meses de julio y noviembre, respectivamente; la temperatura máxima anual en promedio es de 17.6 °C. En la figura 3, se muestra gráficamente la variación mensual de la temp. máx. en las estac Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno.

Tabla 2. Temperatura máxima promedio mensual (°C) – Cuenca Ilave.

Mes	Ilave	Juli	Laraqueri	Mazo cruz	Puno	Promedio
Enero	14.9	14.0	15.3	16.2	16.3	15.3
Febrero	14.9	14.0	15.4	16.0	16.0	15.3
Marzo	15.0	14.1	15.5	16.4	15.9	15.4
Abril	15.2	14.2	15.9	16.6	15.8	15.5
Mayo	14.8	13.7	15.9	16.2	15.6	15.2
Junio	14.3	13.1	15.7	15.6	15.3	14.8
Julio	14.1	12.8	15.4	15.3	15.1	14.6
Agosto	14.9	13.4	16.2	16.4	15.8	15.3
Septiembre	15.5	14.1	17.0	17.4	16.6	16.1
Octubre	16.3	14.8	17.7	18.5	17.3	16.9
Noviembre	17.0	15.4	18.5	19.2	17.9	17.6
Diciembre	16.1	14.6	17.4	17.7	17.3	16.6
Promedio	15.3	14.0	16.3	16.8	16.2	15.7

Fuente: SENAMHI

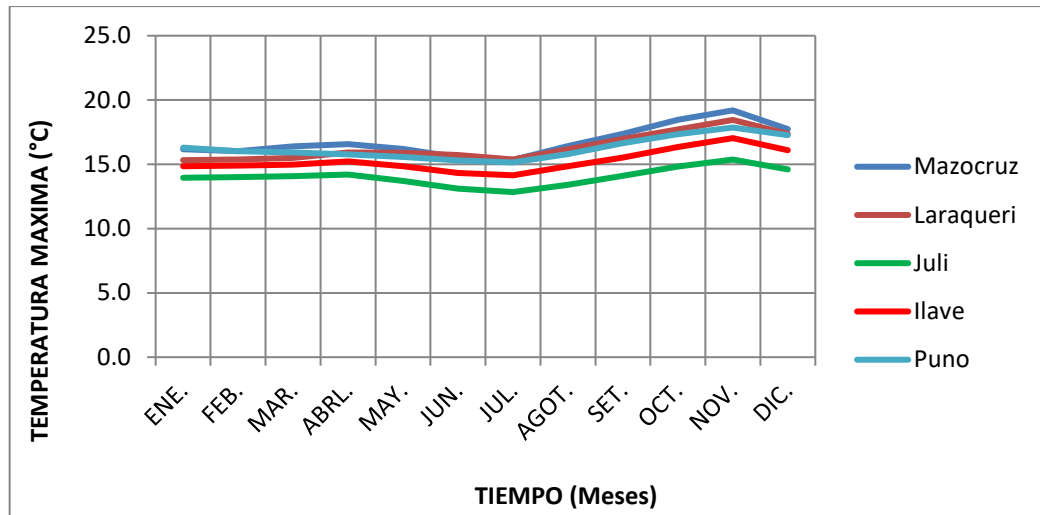


Figura 3. Variación mensual de la temperatura máxima (°C) – Cuenca Ilave.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 3, se presenta la información meteorológica de temperatura mínima promedio mensual, registradas en las estaciones meteorológicas de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno; en ella se puede apreciar que la variación mensual de la temperatura mínima es de -13.3 a 5.4 °C, que incumben a los meses de julio y enero, correspondientemente; la temperatura mínima anual en promedio es de - 0.2 °C. En la figura 4, se muestra gráficamente el comportamiento mensual de la temperatura mínima en las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno, considerando la información de temperatura mínima del periodo 2008 al 2017.

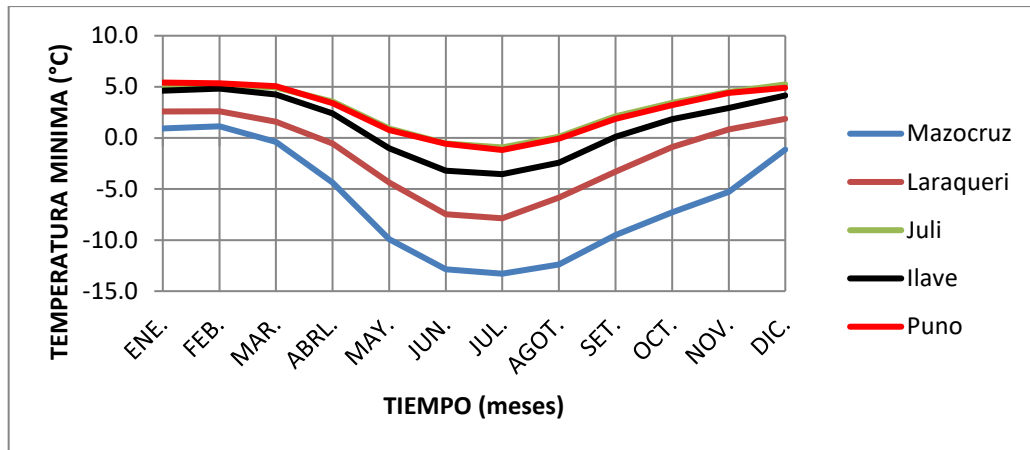


Figura 4. Variación mensual de la temperatura mínima (°C) – Cuenca Ilave

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3. Temperatura mínima promedio mensual (°C) – Cuenca Ilave.

Mes	Ilave	Juli	Laraqueri	Mazo cruz	Puno	Promedio
Enero	4.6	5.2	2.6	0.9	5.4	3.7
Febrero	4.8	5.2	2.6	1.1	5.3	3.8
Marzo	4.3	4.9	1.6	-0.4	5.1	3.1
Abril	2.4	3.6	-0.5	-4.4	3.4	0.9
Mayo	-1.0	0.9	-4.4	-9.9	0.8	-2.7
Junio	-3.2	-0.5	-7.5	-12.9	-0.6	-4.9
Julio	-3.6	-0.9	-7.9	-13.3	-1.2	-5.4
Agosto	-2.4	0.1	-5.8	-12.4	-0.1	-4.1
Septiembre	0.1	2.1	-3.3	-9.5	1.9	-1.7
Octubre	1.8	3.4	-0.9	-7.3	3.2	0.1
Noviembre	2.9	4.5	0.8	-5.3	4.4	1.5
Diciembre	4.2	5.2	1.9	-1.2	4.9	3.0
Promedio	1.2	2.8	-1.7	-6.2	2.7	-0.2

Fuente: SENAMHI

En la tabla 4, se muestra la información meteorológica de humedad relativa promedio mensual en el contorno de la cuenca del río Ilave, registradas en las estaciones meteorológicas de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno; en ella se puede apreciar que la variación mensual de la humedad relativa es de 50 a 75 % que corresponden a los meses de junio y febrero, respectivamente; la humedad relativa anual en promedio es de 59 %. En la figura 5, se muestra gráficamente el comportar mensual de la humedad relativa en las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno; en ella se puede apreciar que la tendencia de la variación mensual de la humedad relativa en las 05 estaciones es similar. Considerando la información de humedad relativa del periodo 2008 al 2017.

Tabla 4. Humedad relativa promedio mensual (%) – Cuenca Ilave.

Estación	Ilave	Juli	Laraqueri	Mazo cruz	Puno	Promedio
Enero	73	70	70	67	66	69
Febrero	75	71	70	68	68	70
Marzo	75	70	71	67	67	70
Abril	68	62	65	61	60	63
Mayo	57	53	56	54	52	54
Junio	55	50	56	55	47	53
Julio	56	51	53	46	47	51
Agosto	57	52	52	47	48	51
Septiembre	58	56	54	52	51	54
Octubre	57	54	51	48	53	53
Noviembre	57	57	53	49	52	54
Diciembre	64	64	60	59	59	61
Promedio	63	59	59	56	56	59

Fuente: SENAMHI

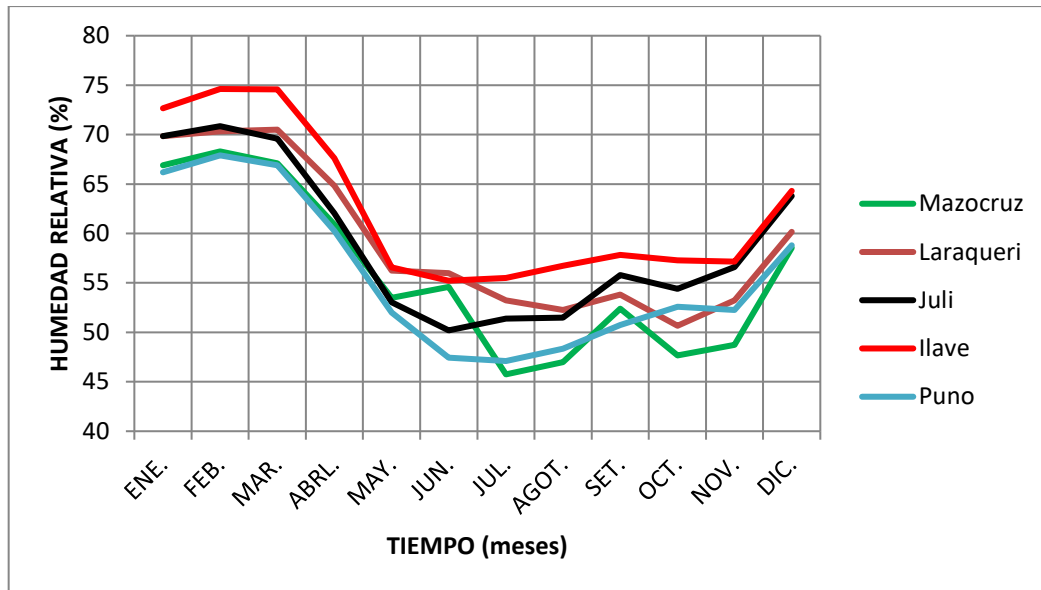


Figura 5. Variación mensual de la humedad relativa (%) – Cuenca Ilave.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 5, se presenta la información meteorológica de velocidad del viento (m/s) promedio mensual en el ámbito en estudio, registradas en las estaciones meteorológicas de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno; en ella se puede apreciar que la variación mensual de la velocidad del viento es de 2.0 a 4.0 m/s, que incumben a los meses de junio y noviembre, individualmente; la velocidad del viento anual en promedio es de 2.5 m/s. En la figura 6, se muestra gráficamente el comportamiento mensual de la velocidad del viento en las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno, considerando la información de velocidad del viento del periodo 2008 al 2017.

Tabla 5. Velocidad del viento promedio mensual (m/s) – Cuenca Ilave.

Mes	Ilave	Juli	Laraqueri	Mazo cruz	Puno	Promedio
Enero	3.4	2.4	2.6	1.7	2.5	2.5
Febrero	3.4	2.3	2.4	1.8	2.4	2.5
Marzo	3.2	2.1	2.4	1.7	2.3	2.4
Abril	3.2	2.2	2.4	1.6	2.2	2.3
Mayo	3.4	2.2	2.3	1.7	2.1	2.3
Junio	3.4	2.2	2.3	1.7	2.0	2.3
Julio	3.7	2.5	2.4	1.9	2.1	2.5
Agosto	3.8	2.5	2.5	1.8	2.2	2.6
Septiembre	3.8	2.8	2.7	2.2	2.5	2.8
Octubre	3.9	2.9	2.9	2.1	2.5	2.8
Noviembre	4.0	2.9	2.7	2.0	2.5	2.8
Diciembre	3.8	2.8	2.8	1.9	2.5	2.8
Promedio	3.6	2.5	2.5	1.8	2.3	2.5

Fuente: SENAMHI

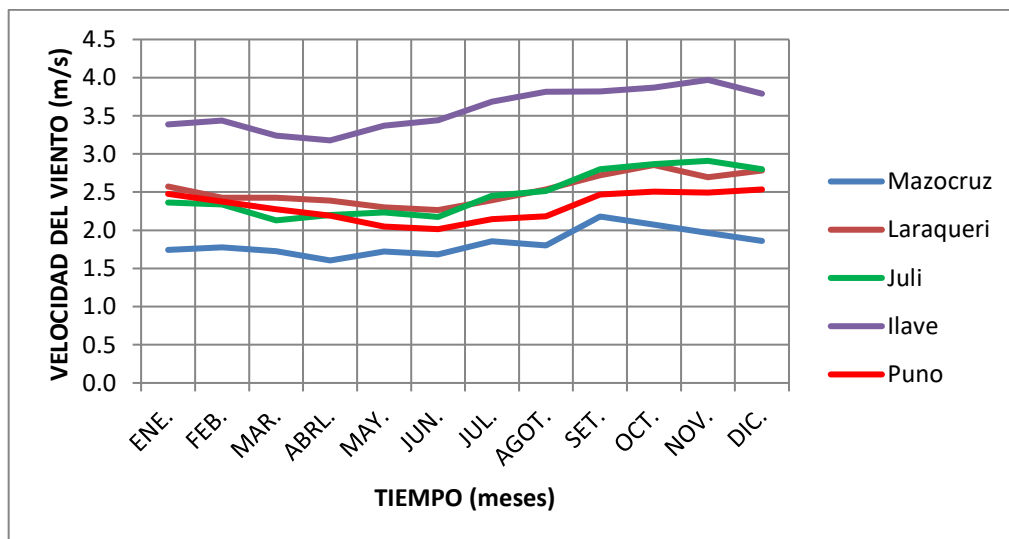


Figura 6. Variación mensual de la velocidad del viento (m/s) – Cuenca Ilave.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 6, se muestra la información de horas de sol (hr/día) promedio mensual en el ámbito en estudio, inscritas en los tiempos meteorológicos de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno; en ella se puede apreciar que la variación mensual de las horas de sol es de 5.4 a 9.5 hr/día, que incumben a los meses de enero y junio, respectivamente; las horas de sol anual en promedio es de 8.0 horas por día. En la figura 7, se aprecia gráficamente el comportamiento mensual de las horas de sol en las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno, considerando la información de horas de sol del periodo 2008 al 2017.

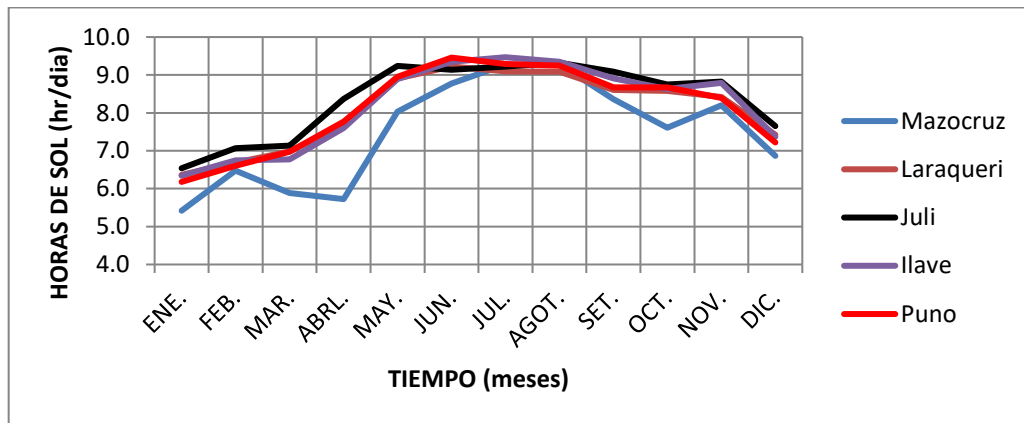


Figura 7. Variación mensual de horas de sol (horas/día) – Cuenca Ilave.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6. Horas de sol promedio mensual (horas/día) – Cuenca Ilave.

Mes	Ilave	Juli	Laraqueri	Mazo cruz	Puno	Promedio
Enero	6.3	6.5	6.4	5.4	6.2	6.2
Febrero	6.7	7.1	6.7	6.5	6.6	6.7
Marzo	6.8	7.1	7.0	5.9	7.0	6.8
Abril	7.6	8.4	7.7	5.7	7.8	7.4
Mayo	8.9	9.2	8.9	8.0	9.0	8.8
Junio	9.4	9.1	9.2	8.8	9.5	9.2
Julio	9.5	9.2	9.1	9.3	9.3	9.3
Agosto	9.3	9.3	9.1	9.3	9.2	9.3
Septiembre	8.9	9.1	8.6	8.4	8.7	8.7
Octubre	8.6	8.7	8.6	7.6	8.7	8.4
Noviembre	8.8	8.8	8.4	8.2	8.4	8.5
Diciembre	7.4	7.6	7.4	6.9	7.2	7.3
Promedio	8.2	8.4	8.1	7.5	8.1	8.0

Fuente: SENAMHI

En la tabla 7, se muestra la información meteorológica de evaporación total (mm) promedio mensual en el ámbito en estudio, registradas en las estaciones meteorológicas de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno; en ella se puede apreciar que la variación mensual de la evaporación total es de 89.6 a 185.1 mm, que incumben a los meses de abril y noviembre, correspondientemente; la evaporación total anual en promedio es de 139.9 mm, considerando la información de evaporación total del periodo 2008 al 2017.

Tabla 7. Evaporación total promedio mensual (mm) – Cuenca Ilave.

Mes	Ilave	Juli	Laraqueri	Mazo cruz	Puno	Promedio
Enero	152.0	142.4	116.2	144.7	148.0	140.7
Febrero	134.4	121.3	104.4	138.3	133.7	126.4
Marzo	140.8	126.7	107.5	143.9	142.5	132.3
Abril	134.7	121.2	89.6	131.2	135.4	122.4
Mayo	140.0	122.7	105.7	134.9	129.8	126.6
Junio	120.8	106.5	96.1	119.7	116.9	112.0
Julio	126.9	112.8	105.6	121.2	123.5	118.0
Agosto	141.6	134.6	127.2	128.2	145.7	135.5
Septiembre	159.1	154.9	130.1	144.4	159.1	149.5
Octubre	180.0	178.8	166.4	180.5	185.0	178.1
Noviembre	182.1	170.4	160.2	172.7	185.1	174.1
Diciembre	178.1	159.1	145.7	162.5	172.0	163.5
Promedio	149.2	137.6	121.2	143.5	148.1	139.9

Fuente: SENAMHI

4.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

4.2.1. Metodología de Penman Monteith.

Los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia en el ámbito de la estación Mazo cruz; nos indican que la evapotranspiración de referencia mensual fluctúa de 82.4 a 133.09 mm que involucra a los meses de junio y noviembre principalmente, mientras que la evapotranspiración de referencia anual promedio es de 1268.15 mm (tabla 8); se ha considerado información meteorológica de “temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento y horas”, del periodo 2008 al 2017.

Tabla 8. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Mazo cruz.

Mes	Temp	Temp	Insolación	Humedad	Viento	Rad	ET _o
	Max	Min					
	°C	°C	horas	%	m/s	MJ/m ² /día	mm/mes
Enero	16.2	0.9	5.4	67.0	1.7	18.9	107.2
Febrero	16.0	1.1	6.5	68.0	1.8	20.3	100.0
Marzo	16.4	-0.4	5.9	67.0	1.7	18.2	102.3
Abril	16.6	-4.4	5.7	61.0	1.6	16.1	90.3
Mayo	16.2	-9.9	8.0	54.0	1.7	17.0	92.1
Junio	15.6	-12.9	8.8	55.0	1.7	16.8	82.4
Julio	15.3	-13.3	9.3	46.0	1.9	17.9	92.0
Agosto	16.4	-12.4	9.3	47.0	1.8	20.0	103.6
Septiembre	17.4	-9.5	8.4	52.0	2.2	21.1	114.4
Octubre	18.5	-7.3	7.6	48.0	2.1	21.5	128.7
Noviembre	19.2	-5.3	8.2	49.0	2.0	23.2	133.1
Diciembre	17.7	-1.2	6.9	59.0	1.9	21.3	123.1
Promedio	16.8	-6.2	7.5	56.0	1.8	19.4	1269.2

Fuente: SENAMHI

En la tabla 9 se muestran los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia en el ámbito de la estación Laraqueri, en ella se puede observar que la evapotranspiración de referencia mensual fluctúa de 88.51 a 136.46 mm que involucran a los meses de junio y noviembre, en tanto que la evapotranspiración de referencia anual promedio está en 1322.55 mm; se ha considerado información meteorológica de “temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento y horas”, del periodo 2008 al 2017.

Tabla 9. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Laraqueri.

Mes	Temp Max	Temp Min	Insolacion horas	Humedad %	Viento m/s	Rad MJ/m ² /día	ETo mm/mes
	°C	°C					
Enero	15.3	2.6	6.4	70.0	2.6	20.5	111.2
Febrero	15.4	2.6	6.7	70.0	2.4	20.6	99.8
Marzo	15.5	1.6	7.0	71.0	2.4	20.0	105.3
Abril	15.9	-0.5	7.7	65.0	2.4	18.9	98.7
Mayo	15.9	-4.4	8.9	56.0	2.3	18.3	98.2
Junio	15.7	-7.5	9.2	56.0	2.3	17.4	88.5
Julio	15.4	-7.9	9.1	53.0	2.4	17.8	94.0
Agosto	16.2	-5.8	9.1	52.0	2.5	19.8	107.1
Septiembre	17.0	-3.3	8.6	54.0	2.7	21.5	116.9
Octubre	17.7	-0.9	8.6	51.0	2.9	23.1	136.2
Noviembre	18.5	0.8	8.4	53.0	2.7	23.5	136.5
Diciembre	17.4	1.9	7.4	60.0	2.8	22.1	130.3
Promedio	16.3	-1.7	8.1	59.0	2.5	20.3	1322.6

Fuente: SENAMHI

En la tabla 10 se muestran los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia en el ámbito de la estación Juli, donde se logra visualizar que la evapotranspiración de referencia mensual fluctúa de 83.86 a 128.65 mm que incumben a los meses de junio y noviembre, respectivamente, mientras que la evapotranspiración de referencia promedio anual está en 1267.62 mm, se ha considerado información meteorológica de “temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento y horas”, del periodo 2008 al 2017.

Tabla 10. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Juli.

Mes	Temp	Temp	Insolación	Humedad	Viento	Rad	ET _o
	Max	Min					
	°C	°C	horas	%	m/s	MJ/m ² /día	mm/mes
Enero	14.0	5.2	6.5	70.0	2.4	20.6	109.2
Febrero	14.0	5.2	7.1	71.0	2.3	21.3	98.8
Marzo	14.1	4.9	7.1	70.0	2.1	20.1	103.4
Abril	14.2	3.6	8.4	62.0	2.2	19.9	98.9
Mayo	13.7	0.9	9.2	53.0	2.2	18.7	94.6
Junio	13.1	-0.5	9.1	50.0	2.2	17.3	83.9
Julio	12.8	-0.9	9.2	51.0	2.5	17.9	89.7
Agosto	13.4	0.1	9.3	52.0	2.5	20.1	101.0
Septiembre	14.1	2.1	9.1	56.0	2.8	22.2	111.1
Octubre	14.8	3.4	8.7	54.0	2.9	23.3	127.2
Noviembre	15.4	4.5	8.8	57.0	2.9	24.1	128.7
Diciembre	14.6	5.2	7.6	64.0	2.8	22.4	121.3
Promedio	14.0	2.8	8.3	59.0	2.5	20.7	1267.6

Fuente: SENAMHI

En la tabla 11 se muestran los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia en el ámbito de la estación Ilave, donde se logra visualizar que la evapotranspiración de referencia a nivel mensualizada varía de 92.68 a 136.76 mm que incumben a los meses de junio y noviembre, respectivamente y la evapotranspiración de referencia anual promedio es de 1317.50 mm; se ha considerado información meteorológica de “temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento y horas”, del periodo 2008 al 2017.

Tabla 11. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Ilave.

Mes	Temp	Temp	Insolación	Humedad	Viento	Rad	ET _o
	Max	Min					
	°C	°C	horas	%	m/s	MJ/m ² /día	mm/mes
Enero	14.9	4.6	6.3	73.0	3.4	20.3	108.6
Febrero	14.9	4.8	6.7	75.0	3.4	20.6	96.5
Marzo	15.0	4.3	6.8	75.0	3.2	19.7	101.8
Abril	15.2	2.4	7.6	68.0	3.2	18.8	97.8
Mayo	14.8	-1.0	8.9	57.0	3.4	18.3	101.5
Junio	14.3	-3.2	9.4	55.0	3.4	17.7	92.7
Julio	14.1	-3.6	9.5	56.0	3.7	18.3	97.9
Agosto	14.9	-2.4	9.3	57.0	3.8	20.1	108.6
Septiembre	15.5	0.1	8.9	58.0	3.8	21.9	116.4
Octubre	16.3	1.8	8.6	57.0	3.9	23.1	132.5
Noviembre	17.0	2.9	8.8	57.0	4.0	24.1	136.8
Diciembre	16.1	4.2	7.4	64.0	3.8	22.0	126.5
Promedio	15.3	1.2	8.2	63.0	3.6	20.4	1317.5

Fuente: SENAMHI

En la tabla 12 se muestran los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia en el ámbito de la estación Puno, notándose que que la evapotranspiración de referencia mensualizada fluctua de 88.26 a 135.96 mm que incumben a los meses de junio y noviembre, respectivamente, en tanto que la evapotranspiración de referencia promedio anual es de 1332.35 mm, se ha considerado información meteorológica de “temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento y horas”, del periodo 2008 al 2017.

Tabla 12. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Puno.

Mes	Temp	Temp	Insolación	Humedad	Viento	Rad	ETo
	Max	Min					
	°C	°C	horas	%	m/s	MJ/m ² /día	mm/mes
Enero	16.3	5.4	6.2	66.0	2.5	20.2	116.9
Febrero	16.0	5.3	6.6	68.0	2.4	20.5	103.1
Marzo	15.9	5.1	7.0	67.0	2.3	19.9	109.6
Abril	15.8	3.4	7.8	60.0	2.2	19.0	100.9
Mayo	15.6	0.8	9.0	52.0	2.1	18.3	97.3
Junio	15.3	-0.6	9.5	47.0	2.0	17.6	88.3
Julio	15.1	-1.2	9.3	47.0	2.1	17.9	93.3
Agosto	15.8	-0.1	9.2	48.0	2.2	19.8	106.2
Septiembre	16.6	1.9	8.7	51.0	2.5	21.5	117.7
Octubre	17.3	3.2	8.7	53.0	2.5	23.2	133.4
Noviembre	17.9	4.4	8.4	52.0	2.5	23.5	136.0
Diciembre	17.3	4.9	7.2	59.0	2.5	21.8	129.8
Promedio	16.2	2.7	8.1	56.0	2.3	20.3	1332.4

Fuente: SENAMHI

Se ha preparado un resumen donde se muestra los resultados del cálculo/estimación de la evapotranspiración de referencia mediante el método de Penman Monteith, en el ámbito de la cuenca del río Ilave, donde se puede distinguir que en promedio la evapotranspiración de referencia mensual fluctúa de 96.74 a 134.18 mm que incumben a los meses de mayo y noviembre correspondientemente y la evapotranspiración de referencia promedio anual para la cuenca es de 1301.84 mm (Tabla 13); se ha considerado información meteorológica de “temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento y horas”, del periodo 2008 al 2017.

Tabla 13. Resumen evapotranspiración de referencia (mm) - Penman Monteith.

Mes	Ilave	Juli	Laraqueri	Mazo cruz	Puno	Promedio
Enero	108.60	109.18	111.19	107.18	116.92	110.61
Febrero	96.52	98.77	99.81	100.02	103.07	99.64
Marzo	101.81	103.41	105.25	102.29	109.56	104.46
Abril	97.80	98.92	98.72	90.34	100.89	97.33
Mayo	101.53	94.57	98.20	92.09	97.29	96.74
Junio	92.68	83.86	88.51	82.40	88.26	87.14
Julio	97.87	89.68	93.97	91.96	93.28	93.35
Agosto	108.60	100.98	107.10	103.55	106.17	105.28
Septiembre	116.37	111.09	116.88	114.44	117.71	115.30
Octubre	132.50	127.20	136.17	128.65	133.44	131.59
Noviembre	136.76	128.65	136.46	133.09	135.96	134.18
Diciembre	126.46	121.33	130.30	123.14	129.80	126.21
Total	1317.50	1267.64	1322.56	1269.15	1332.35	1301.84

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 8, se muestra gráficamente el comportamiento mensual de la evapotranspiración de referencia en los tiempos Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno, en ella se puede observar que el comportamiento mensual de la evapotranspiración de referencia es similar en las 05 estaciones, durante todo el año.

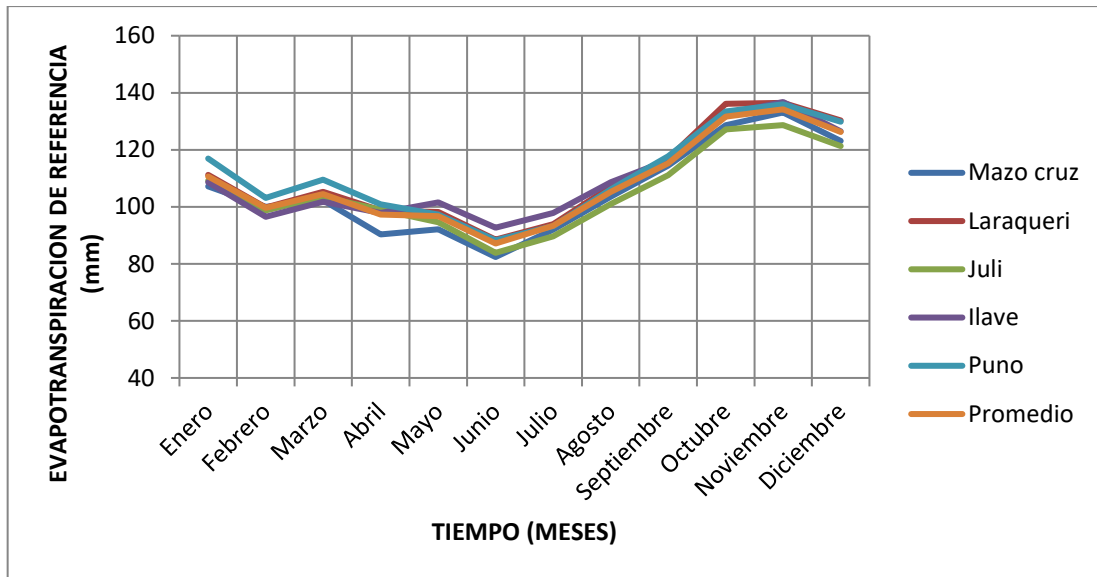


Figura 8. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia-Penman Monteith.

Fuente: Elaboración Propia

4.2.2. Método del tanque de evaporación clase A

Los resultados de la determinación de los coeficientes del tanque evaporímetro clase A, se muestran en la tabla 14, donde se distingue que los mismos están en función de la ubicación del tanque evaporímetro, la humedad relativa y velocidad del viento; asimismo, en ella se puede distinguir que para la estación Mazo cruz se tiene un coeficiente de tanque de 0.80; mientras que para las estaciones Laraqueri, Juli, Ilave y Puno se tiene un coeficiente de tanque de 0.75.

Tabla 14. Resultados del coeficiente de tanque.

Parámetro	Ilave	Juli	Laraqueri	Mazo cruz	Puno
Velocidad viento (m/s)	3.6	2.5	2.5	1.8	2.3
Humedad relativa (%)	63	59	59	56	56
Distancia al barlovento (m)	100	100	100	100	100
Coeficiente tanque Kt	0.75	0.75	0.75	0.8	0.75

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 15 se muestran los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia en el ámbito de la cuenca Ilave, estimados mediante el método Tanque evaporímetro clase A, en ella se puede observar que la evapotranspiración de referencia mensual varía de 67.2 mm que corresponde al mes de abril en la estación Laraqueri a 144.4 mm que corresponde al mes de octubre en la estación Mazo cruz y la evapotranspiración de referencia promedio anual es de 106.4 mm y una evapotranspiración de referencia total anual de 1276.5 mm.

Tabla 15. Resumen de evapotranspiración de referencia (mm)- Tanque de evaporación clase A

Mes	Ilave	Juli	Laraqueri	Mazo cruz	Puno	Promedio
Enero	114.0	106.8	87.1	115.8	111.0	106.9
Febrero	100.8	91.0	78.3	110.6	100.3	96.2
Marzo	105.6	95.0	80.6	115.1	106.9	100.6
Abril	101.0	90.9	67.2	105.0	101.6	93.1
Mayo	105.0	92.0	79.2	107.9	97.3	96.3
Junio	90.6	79.9	72.0	95.8	87.7	85.2
Julio	95.2	84.6	79.2	97.0	92.6	89.7
Agosto	106.2	101.0	95.4	102.6	109.3	102.9
Septiembre	119.3	116.2	97.6	115.5	119.3	113.6
Octubre	135.0	134.1	124.8	144.4	138.7	135.4
Noviembre	136.6	127.8	120.2	138.2	138.8	132.3
Diciembre	133.6	119.3	109.2	130.0	129.0	124.2
Promedio	111.9	103.2	90.9	114.8	111.0	106.4

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 9, se muestra gráficamente el comportamiento mensual de la evapotranspiración de referencia en las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave, Puno y el promedio, en ella se puede observar que el comportamiento mensual de la

evapotranspiración de referencia en las cinco estaciones es similar, la estación Laraqueri tiene valores menores.

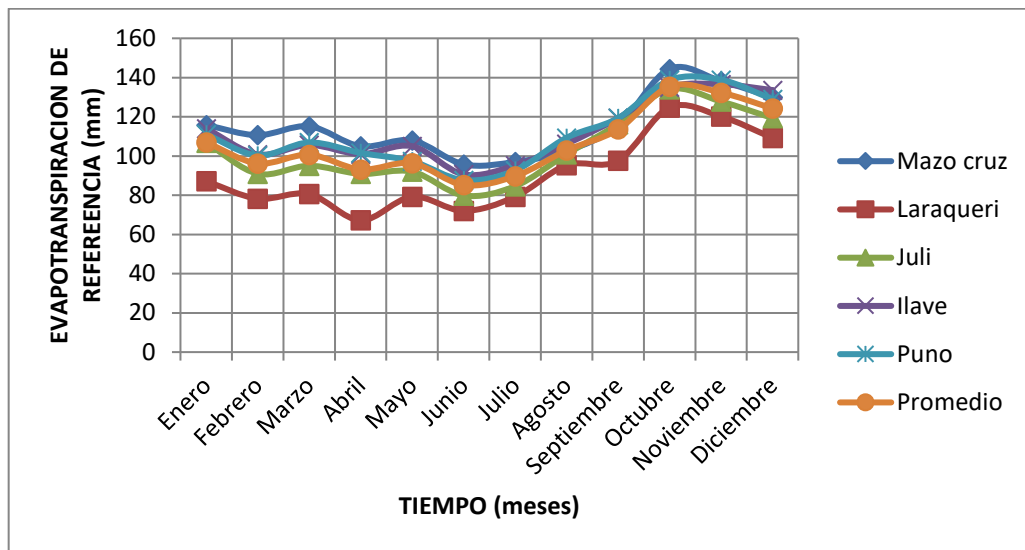


Figura 9. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia - Tanque evaporímetro clase A.

Fuente: Elaboración Propia

4.3 COEFICIENTE DE CULTIVO

4.3.1. Cedula de cultivo y periodo vegetativo.

El calendario de siembra y cosecha de los cultivos más importantes en la región de Puno está determinado por el comportamiento de los cultivos y los parámetros ecológicos y agroclimáticos. Debido a las variables de progreso vegetativo y a la disposición de recursos hídricos, se ha determinado que la temporada agrícola ocurre entre agosto de un año y julio del año siguiente (Condori *et al.*, 2010).

La fecha de siembra en las tierras altas oscila entre principios de septiembre y finales de noviembre, dependiendo de la duración del ciclo vegetativo de los distintos tipos y de la temperatura local, sobre todo cuando el



suelo está justamente húmedo para la germinación. El progreso fenológico varía mucho según los tipos (Geerts et al., 2008).

La investigación estudió el cultivo cedula, que consiste en los cultivos camote, quinua blanca y cebada.

Cahuana y Arcos (1993) y el Ministerio de Agricultura (2012) consideraron que el periodo vegetativo del cultivo de camote es de 150 días; para el cultivo de quinua blanca se consideró una fase de 150 días por los estudiosos Mujica et al. (2001), Argote (2004), Condori et al. (2010), FAO (2012a), FAO (2016) y el Ministerio de Agricultura (2012a); y para el cultivo de cebada se ha estimado un espacio vegetativo de 150 días Agricultura de secano para los tres cultivos.

Según recomendaciones de Tapia y Fried (2007) y Ministerio de Agricultura (2013), se ha considerado el mes de noviembre para la siembra del cultivo de papa; para el cultivo de quinua, el espacio de siembra varía de septiembre a noviembre (FAO, 2002); para la investigación se ha estimado el mes de octubre; y para el cultivo de cebada, el periodo de siembra varía de octubre a diciembre; para la investigación se ha considerado el mes de noviembre.

En la tabla 16 se exhibe la cedula de cultivos y el calendario de la etapa vegetativo de los cultivos papa, quinua y cebada; en ella se observa que los cultivos papa y cebada se siembran en el mes de noviembre y se cosecha el mes de marzo; mientras que en el cultivo de quinua la época de siembra es el mes de octubre y la cosecha es en febrero. El periodo vegetativo para los tres cultivos es de 150 días. El periodo vegetativo se refiere a la siembra en un determinado año y la cosecha se realiza al año siguiente, de allí la nomenclatura de la campaña

agrícola es por ejemplo campaña 2018/19, se siembra el año 2018 y se cosecha el año 2019.

Tabla 16. Cédula de cultivo y periodo vegetativo de la zona.

Cultivo	Periodo vegetativo (días)	Meses											
		Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Papa	150				S	S	S	S	S				
Quinoa	150				S	S	S	S	S				
Cebada	150				S	S	S	S	S				

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2. Coeficiente de cultivo Kc considerados.

Los coeficientes de cultivo (Kc) considerados en la investigación para los cultivos de papa, quinua y alfalfa se muestran en la tabla 17, los mismos fueron estimados siguiendo de cerca el método propuesto por la publicación FAO N° 56.

Tabla 17. Coeficiente de cultivo Kc.

Cultivo	Meses											
	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Papa				0.35	0.7	1.15	1.1	0.75				
Quinoa				0.33	0.7	1.0	1.0	0.5				
Cebada				0.35	0.8	1.1	1.0	0.25				

Fuente: Elaboración Propia

4.4 EVAPOTRANSPIRACION DEL CULTIVO.

Los resultados de la evapotranspiración mensual del cultivo de papa, estimados mediante la técnica Penman-Monteith, se presenta en la tabla 18, mostrándose que para el periodo vegetativo considerado de 150 días, fluctúa de 442.8 a 568.5 mm, correspondientes a las estaciones Mazo cruz y Puno, respectivamente. Para para la cuenca del rio Ilave en promedio es de 450.5 mm. La evapotranspiración real del cultivo se refiere para toda la campaña agrícola en donde la siembra se realiza en el primer año y la cosecha en el siguiente año.

Tabla 18. Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de papa-Penman-Monteith.

ESTACION	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
Mazo cruz	46.6	86.2	123.3	110.0	76.7	442.8
Laraqueri	47.8	91.2	127.9	109.8	78.9	455.6
Juli	45.0	84.9	125.6	108.6	77.6	441.7
Ilave	47.9	88.5	124.9	106.2	76.4	443.8
Puno	47.6	90.9	134.5	113.4	82.2	468.5
Promedio	47.0	88.3	127.2	109.6	78.3	450.5

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de la evapotranspiración mensual del cultivo de quinua estimados considerando el método de Penman-Monteith (tabla 19), indican que en el ámbito en estudio la evapotranspiración de cultivo de quinua, fluctúa de 411.9 a 437.5 mm, para el periodo vegetativo de 150 días, que corresponden a las estaciones Juli y Puno, respectivamente. Mientras que el promedio para la cuenca del rio Ilave alcanza un valor de 424.0 mm.

Tabla 19. Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de quinua-Penman-Monteith.

ESTACION	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
Mazo cruz	42.5	93.2	123.1	107.2	50.0	415.9
Laraqueri	44.9	95.5	130.3	111.2	49.9	431.9
Juli	42.0	90.1	121.3	109.2	49.4	411.9
Ilave	43.7	95.7	126.5	108.6	48.3	422.8
Puno	44.0	95.2	129.8	116.9	51.5	437.5
Promedio	43.4	93.9	126.2	110.6	49.8	424.0

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de la evapotranspiración mensual del cultivo de cebada, considerando el método de Penman-Monteith (tabla 20) nos revela que en el área de estudio la evapotranspiración de cultivo de cebada, fluctua de 398.9 a 423.5 mm, para un periodo vegetativo de 150 días, correspondientes a las estaciones Juli y Puno, respectivamente. En tanto que el promedio a nivel de cuenca del rio Ilave, alcanza un valor de 408.0 mm.

Tabla 20. Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de cebada-Penman-Monteith.

ESTACION	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
Mazo cruz	46.6	110.8	117.9	100.0	25.6	400.9
Laraqueri	47.8	117.3	122.3	99.8	26.3	413.5
Juli	45.0	109.2	120.1	98.8	25.9	398.9
Ilave	47.9	113.8	119.5	96.5	25.5	403.1
Puno	47.6	116.8	128.6	103.1	27.4	423.5
Promedio	47.0	113.6	121.7	99.6	26.1	408.0

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de la evapotranspiración mensual del cultivo de papa considerando el método de Tanque clase A (tabla 21), nos revelan que en el área en estudio la evapotranspiración de cultivo de papa, varía de 365.2 a 480.5 mm, para un periodo vegetativo de 150 días, correspondientes a las estaciones Laraqueri y Mazo cruz, respectivamente. Mientras que a nivel de cuenca del río Ilave se tiene en promedio 437.6 mm.

Tabla 21. Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de papa-Tanque clase A.

ESTACION	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
Mazo cruz	48.4	91.0	133.1	121.7	86.3	480.5
Laraqueri	42.1	76.5	100.2	86.1	60.4	365.2
Juli	44.7	83.5	122.8	100.1	71.3	422.4
Ilave	47.8	93.5	131.1	110.9	79.2	462.5
Puno	48.6	90.3	127.7	110.3	80.2	457.1
Promedio	46.3	87.0	123.0	105.8	75.5	437.6

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de la evapotranspiración mensual del cultivo de quinua considerando el método de Tanque clase A (tabla 22), nos revelan que en el área de estudio la evapotranspiración de cultivo de quinua, fluctúa de 360.8 a 445.4 mm, para un periodo vegetativo de 150 días, correspondientes a las estaciones Laraqueri y Mazo cruz, respectivamente. En tanto que a nivel de cuenca del río Ilave en promedio es de 416.6 mm. La evapotranspiración real del cultivo de quinua se refiere para toda la campaña agrícola en donde la siembra se realiza en el primer año y la cosecha en el siguiente año.

Tabla 22. Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de quinua-Tanque clase A.

ESTACION	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
Mazo cruz	47.7	96.7	130.0	115.8	55.3	445.4
Laraqueri	41.2	84.1	109.2	87.1	39.1	360.8
Juli	44.3	89.5	119.3	106.8	45.5	405.3
Ilave	44.6	95.6	133.6	114.0	50.4	438.2
Puno	45.8	97.2	129.0	111.0	50.2	433.1
Promedio	44.7	92.6	124.2	106.9	48.1	416.6

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de la evapotranspiración mensual del cultivo de cebada considerando el método de Tanque clase A (tabla 23), nos revelan que en el área de estudio la evapotranspiración de cultivo de cebada, varía de 323.7 a 419.1 mm, para un periodo vegetativo de 150 días, correspondientes a las estaciones Laraqueri y Mazo cruz, respectivamente. Mientras tanto a nivel de cuenca del río Ilave en promedio es 384.7 mm.

Tabla 23. Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de cebada-Tanque clase A.

ESTACION	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
Mazo cruz	48.4	104.0	127.3	110.6	28.8	419.1
Laraqueri	42.1	87.4	95.8	78.3	20.1	323.7
Juli	44.7	95.5	117.5	91.0	23.8	372.4
Ilave	47.8	106.9	125.4	100.8	26.4	407.3
Puno	48.6	103.2	122.1	100.3	26.7	400.9
promedio	46.3	99.4	117.6	96.2	25.2	384.7

Fuente: Elaboración Propia

4.5 ANALISIS ESTADISTICO

En la tabla 24 se muestran los resultados de la prueba estadística T de Student, en ella se puede observar que para las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno, la evapotranspiración real del cultivo de papa estimado a través de los métodos Penman-Monteith y tanque clase A, estadísticamente son iguales, dado que el valor de T calculado es 0.61 y el valor de T tabular es de 2.31; Por tanto, se puede concluir par el cultivo de papa no existe diferencia significativa entre los valores de evapotranspiración estimados con los métodos considerados.

Tabla 24. Resultados de la prueba estadística T de Student - cultivo de papa.

Parámetro	ETc Penman Monteith	ETc Tanque clase A
Media	450.46	437.55
Desviación estándar	11.50	45.57
Observaciones	5	
Sp	33.24	
Sd	21.02	
Estadístico Tc	0.61	
Valor critico Tt	2.31	
Conclusión	No hay diferencias	

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 25 se visualizan los resultados de la prueba estadística T de Student, donde se observa que para las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno, la evapotranspiración real del cultivo de quinua estimado mediante los métodos Penman-

Monteith y tanque clase A, estadísticamente son iguales, dado que el valor de T calculado es 0.46 y el valor de T tabular es de 2.31; Por tanto se puede concluir que para el cultivo de quinua, no existe diferencia significativa entre los valores de evapotranspiración estimados con los métodos considerados.

Tabla 25. Resultados de la prueba estadística T de Student - cultivo de quinua.

Parámetro	ETc Penman Monteith	ETc Tanque clase A
Media	423.99	416.57
Desviación estándar	10.67	34.69
Observaciones	5	5
Sp	25.66	
Sd	16.23	
Estadístico Tc	0.46	
Valor critico Tt	2.31	
Conclusión	No hay diferencias	

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 26 se detalla los resultados de la prueba estadística T de Student, lo que nos revela que para las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno, la evapotranspiración del cultivo de cebada estimado mediante los métodos Penman-Monteith y tanque clase A, estadísticamente son iguales, dado que el valor de T calculado es 1.32 y el valor de T tabular es de 2.31; Por tanto, se puede concluir que para el cultivo de cebada, no existe diferencia significativa entre los valores de evapotranspiración estimados con los métodos considerados.

Tabla 26. Resultados de la prueba estadística T de Student - cultivo de cebada.

Parámetro	ETc Penman Monteith	ETc Tanque clase A
Media	450.46	437.55
Desviación estándar	11.50	45.57
Observaciones	5	
Sp	33.24	
Sd	21.02	
Estadístico Tc	0.61	
Valor crítico Tt	2.31	
Conclusión	No hay diferencias	

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 27 se muestra el resumen de las necesidades hídricas de los cultivos papa, quinua y cebada en la cuenca del río Ilave.

Tabla 27. Necesidades hídricas de los cultivos en la cuenca del río Ilave.

Cultivo	Penman Monteith (mm)	Tanque clase A (mm)
Papa	450.50	437.60
Quinua	424.00	416.60
Cebada	408.00	384.70

Fuente: Elaboración Propia

La evapotranspiración real para el cultivo de papa en la cuenca del río Ilave es de 450.5 mm estimado a través del método de Penman Montheit y 437.60 mm mediante el método de Tanque clase A, para un periodo vegetativo de 150 días, valores coherentes con las investigaciones realizadas por Canllahui (2013) quien encontró para el Centro experimental Illpa un valor de 421.8 mm estimados a través del método de Hargreaves en fundamento a radiación, Mallma (2015) en la región Junín estimo un valor de 470.6 mm.

La evapotranspiración real para el cultivo de quinua en la cuenca del río Ilave es de 424.0 mm estimado a través del método de Penman Montheit y 416.6 mm a través del



método de Tanque clase A, para un periodo vegetativo de 150 días, valor coherente con la investigación realizada por Mallma (2015) quien estimó para en la región Junín un valor de 758.0 mm para un periodo vegetativo de 180 meses.

La evapotranspiración de los cultivos de papa, quinua y cebada estimados mediante los métodos Penman-Monteith y tanque clase A, son estadísticamente iguales, dado que los resultados de la prueba estadística T de Student nos indica que el valor de T calculado es menor que el valor de T tabulado, en consecuencia, se concluye que no hay discrepancia significativa entre los distintos valores estimados de evapotranspiración mediante los métodos Penman Monteith y Tanque clase A.



V. CONCLUSIONES

- Para el ámbito de la cuenca del río Ilave, la evapotranspiración de referencia anual, estimado mediante el método Penman Monteith es de 1301.84 mm, valor mayor que el estimado mediante el método de Tanque evaporímetro clase A, que es de 1276.53 mm, lo que significa que el comportamiento de la evapotranspiración de referencia durante todo el año es similar estimando mediante ambos métodos.
- Las necesidades hídricas del cultivo de papa estimado empleando el método de Penman-Monteith, en promedio para toda la cuenca es de 450.5 mm y mediante el método tanque evaporímetro clase A, es de 437.6 mm, para un periodo vegetativo de 150 días, lo que significa que el valor de la evapotranspiración del cultivo de papa estimado mediante el método de Penman Monteith es mayor en 2.9 %.
- Las necesidades hídricas del cultivo de quinua estimado mediante el método de Penman-Monteith, en promedio para la cuenca es de 424.0 mm y mediante el método tanque evaporímetro clase A es de 416.6 mm, para un periodo vegetativo de 150 días, lo que significa que el valor de la evapotranspiración del cultivo de quinua estimado mediante el método de Penman Monteith es mayor en 1.77 %.
- Las necesidades hídricas del cultivo de cebada estimado mediante el método de Penman-Monteith, para un periodo vegetativo de 150 días, en promedio para toda cuenca es de 408.0 mm y mediante el método tanque clase A es de 384.7 mm, lo que significa que el valor de la evapotranspiración del cultivo de cebada estimado mediante el método de Penman Monteith es mayor en 6.0 %.



- Los resultados de la prueba estadística T de Student, nos indican que la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos papa, quinua y cebada mediante el método Penman Monteith y Tanque clase A, estadísticamente son iguales, lo que significa que es indiferente calcular la evapotranspiración de los cultivos papa, quinua y cebada mediante los métodos Penman Monteith y Tanque clase A.



VI. RECOMENDACIONES

- Estimar la evapotranspiración de referencia utilizando métodos directos (lisímetros) para compararla con los resultados del presente estudio.
- Calcular el coeficiente de cultivo utilizando métodos directos (lisímetros) y cotejar los resultados con los del presente estudio.
- Estimar la evapotranspiración de los cultivos utilizando métodos directos o de campo (lisímetros) y comparar con los resultados del presente estudio.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, G. R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. (2006). *Estudio FAO Riego y drenaje 56. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Serie Cuadernos Técnicos. Roma, Italia. FAO. 298 p.
- Álvarez, L., Arendt, E.K., Gallagher, E. (2009). *Nutritive value of pseudo cereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. Trends in Food Science & Technology* 21: 106-113.
- Argote, G. (2004). *Cultivo de alfalfa, instalación, producción y manejo*. Estación Experimental Illpa. INIA. Boletín N° 01-2004. Puno, Perú.
- Aroni-Quispe, D. X., Alfaro-Alejo, R., Huaman-Gutierrez, H. A., & Belizario-Quispe, G. (2021, September). Comparative analysis of evapotranspiration using the SEBAL model and the evaporimeter pan method in the Huancane basin of Puno, Peru. In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXIII* (Vol. 11856, pp. 74-84). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2600821>
- Breña, A. y Jacobo, M. (2006). *Principios y fundamentos de la Hidrología Superficial*. México D.F. Universidad Autónoma Metropolitana. www.uamenlinea.uam.mx.
- Cahuana, R. y J. Arcos. (1993). *Variedades de papas más importantes en Puno*. Programa Interinstitucional Waru Waru. Puno, Perú. CIP, 1980. Compendio de enfermedades de la papa. CIP, Lima.
- Calera, A., Campos, I. y Garrido, J. (2015). Determinación de las necesidades de agua y riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes



multiespectrales. Sección de Teledetección y SIG. Universidad de Castilla La Mancha. España.

Canllahui, M. (2013), *Determinación de la evapotranspiración y coeficiente de cultivo (Kc) en la producción de papa (Solanum tuberosum L.) Var. Silver en el CIP-ILLPA-Puno*. (Tesis para optar el título de Ingeniero Agrónomo). Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.

Coloma-Paxi, B. P., Alfaro-Alejo, R., & Ginez-Choque, P. A. (2018). Comportamiento geomorfológico de dos cuencas endorreicas de la región de Puno.

Condori, B. Hijmans, R.J., Quiroz, R. y Ledent, J.-F. (2010). Quantifying the expression of potato genetic diversity in the high Andes through growth analysis and modelling. *Field Crops Research* 119(1):135-144.

Condori-Apaza, V., Mamani-Luque, O. R., Alfaro-Alejo, R., Laqui, W., & Condori, W. F. (2021). Analysis and impact of meteorological droughts in the agriculture of Puno region, Peru. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 304, 03002). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130403002>

Corradini, C., Morbidelli, R., Saltalippi, C., & Flammini, A. (2022). Meteorological systems producing rainfall. In *Rainfall* (27-48). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822544-8.00011-1>

Ertek, Ahmet (2011). Importance of pan evaporation for irrigation scheduling and proper use of crop-pan coefficient (Kcp), crop coefficient (Kc) and pan coefficient (Kp). *African Journal of Agricultural Research*, 6(32), 6706-6718. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.1522>



- FAO (2002). *Quinoa (Chenopodium quinoa). Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro*. Editores: Mujica A., S. Jacobsen, J. Izquierdo y J.P Marathee. Santiago de Chile.
- FAO (2012a). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*, 00153 Roma, Italia, 210 p.
- FAO (2015). AQUASTAT Ecuador. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ECU/indexesp.stm
- FAO. (2012). *El Estado Mundial de la Agricultura y la alimentación 2010 – 2011*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.
- FAO. (2016). *Guía del cultivo de la quinua*. FAO-Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 130 pág.
- Flores, E. (2013). *Evapotranspiración en función de factores y elementos del clima en el altiplano peruano*. (Tesis para optar grado de Doctor). Universidad Nacional del Altiplano. Puno.
- Gamez W. (2010). *Texto básico de hidrología*. Universidad Nacional Agraria, Managua. 150 pág.
- Geerts, S., Raes, D., García, M., Mendoza, J. y Huanca, R. (2008). Indicators to quantify the flexible phenology of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to drought stress. *Field Crops Research* 108, 150-156.



- Gonzales, V. A. G., & Alejo, R. A. (2008). *Desarrollo de cuencas de alta montaña*. UNA Puno.
- Guevara, E. y Cartaya, H. (2004) *Hidrología ambiental*. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela.
- Gültekin, R., & Ertek, A. (2021). Crop pan coefficients for potato (*Solanum tuberosum* L.) according to the irrigation program created by monitoring soil moisture. *Journal of Plant Nutrition*, 45(1), 49-58.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1952218>
- Jensen, M., Burman, R. & Allen, R. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. Committee on Irrigation Water Requirements of the Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers, 121(1), pp.133-34.
- Lanza, L. G., Cauteruccio, A., & Stagnaro, M. (2022). Rain gauge measurements. In *Rainfall* (77-108). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822544-8.00002-0>
- López, J. y Dennett, M. (2005). *Comparación de dos métodos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) en una zona semiárida de Venezuela*. *Bioagro* 17(1): 41-46.
- Mallma, T. (2015). *Huella hídrica de los productos agrícolas de la región Junín comercializadas en la ciudad de Lima*. (Tesis para optar el grado de Doctoris Philosophiae). Universidad Nacional Agraria La Molina.



- Marín, V. (2010). *Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y valle del Cauca*. (Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil). Pontificia Universidad Javeriana Bogotá D.C.
- Melesse, A.M., Weng, Q., Thenkabail, P.S. & Senay, G.B. (2007). *Remote Sensing Sensors and Applications in Environmental Resources Mapping and Modelling*. Sensors, 7(12), pp.3209-41.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2013). *Valor Bruto de la producción Agropecuaria*. Oficina de Estudios Económicos y Estadísticos. Lima, Perú.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2017). *Papa: Características de la producción nacional y de la comercialización en Lima metropolitana*. Dirección de estudios económicos e información agraria. Lima, Perú.
- Ministerio de Agricultura. (2012). *La Papa, Principales aspectos de la cadena productiva*. Dirección General De Competitividad Agraria, Lima Perú. 1ra Edición: agosto 2012.
- Ministerio de Agricultura. (2012a). *Quinua: Perú campo fértil para sus inversiones y desarrollo de sus exportaciones*. Dirección General de Competitividad Agraria. Lima, Perú.
- Ministerio de Agricultura. (2013). *Quinua: Principales aspectos de la cadena productiva*. Dirección General de Competitividad Agraria. Lima, Perú
- Miranda, E. A., Alejo, R. A., & Navarro, W. M. (2022). *Sostenibilidad de la cosecha de agua pluvial como alternativa de abrevadero para ganado en zona rural del distrito*



- de Ilave-Perú. *Ñawparisun-Revista de Investigación Científica*, 4(1).
<http://doi.org/10.47190/nric.v4i1.6>
- Muñoz, M. (2007). Control genético y variación transcripcional de la embriogénesis de la microspora en cebada. Tesis Doctoral. Departamento de Genética y Producción Vegetal. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Zaragoza.
- Pérez, G. (2015). Manual de hidrología aplicada. Lima, Peru. 227 pag.
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering hydrology: Principles and practices* (Vol. 640). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Ponce, V. M., Pandey, R. P., & Ercan, S. (2000). Characterization of drought across climatic spectrum. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 222-224.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:2\(222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:2(222))
- Sáez, M. (2016). *Determinación de la evapotranspiración mediante imágenes aéreas en bandas del espectro visible e infrarrojo cercano para cultivos de papa solanum spp.* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias. Ecuador.
- Tapia, M. y Fried, A. (2007). *Guía de campo de los cultivos andinos*. FAO y ANPE. Lima. 222 pág.
- Teegavarapu, R. S. (2022). Mean areal precipitation estimation: methods and issues. In *Rainfall* (217-260). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822544-8.00001-9>
- Van den Berg, T. E., Dutta, S., Kaiser, E., Vialet-Chabrand, S., van der Ploeg, M., van Emmerik, T., ... & ten Veldhuis, M. C. (2022). Plants, vital players in the terrestrial water cycle. In *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle*



Management (pp. 223-250). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_10

Vásquez, A. Mejía, A., Faustino J., Terán R., Vásquez I., Díaz J., Vásquez C., Castro A., Tapia M. y Alcántara J. (2016). Manejo y gestión de cuencas hidrográficas. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima-Perú. 707 p.

Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C. y Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de la Ingeniería de riego*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima-Perú. 442 p.

Villon, M. (2002). *Hidrología Estadística*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Ediciones Villon. Lima-Perú. 478 p.



ANEXOS

Anexo A. Información meteorológica.

Tabla A.1. Información meteorológica Estación Mazo cruz.

Mes	Tmin.	Tmax.	Humedad R.	Vel.viento	Horas sol	Evaporacion
	°C	°C	%	m/s	hr	mm
Enero	0.9	16.2	67.0	1.7	5.4	144.7
Febrero	1.1	16.0	68.0	1.8	6.5	138.3
Marzo	-0.4	16.4	67.0	1.7	5.9	143.9
Abril	-4.4	16.6	61.0	1.6	5.7	131.2
Mayo	-9.9	16.2	54.0	1.7	8.0	134.9
Junio	-12.9	15.6	55.0	1.7	8.8	119.7
Julio	-13.3	15.3	46.0	1.9	9.3	121.2
Agosto	-12.4	16.4	47.0	1.8	9.3	128.2
Septiembre	-9.5	17.4	52.0	2.2	8.4	144.4
Octubre	-7.3	18.5	48.0	2.1	7.6	180.5
Noviembre	-5.3	19.2	49.0	2.0	8.2	172.7
Diciembre	-1.2	17.7	59	1.9	6.9	162.5

Fuente: SENAMHI

Tabla A.2. Información meteorológica Estación Laraqueri.

Mes	Tmin.	Tmax.	Humedad R.	Vel.viento	Horas sol	Evaporacion
	°C	°C	%	m/s	hr	mm
Enero	2.6	15.3	70.0	2.6	6.4	116.2
Febrero	2.6	15.4	70.0	2.4	6.7	104.4
Marzo	1.6	15.5	71.0	2.4	7.0	107.5
Abril	-0.5	15.9	65.0	2.4	7.7	89.6
Mayo	-4.4	15.9	56.0	2.3	8.9	105.7
Junio	-7.5	15.7	56.0	2.3	9.2	96.1
Julio	-7.9	15.4	53.0	2.4	9.1	105.6
Agosto	-5.8	16.2	52.0	2.5	9.1	127.2
Septiembre	-3.3	17.0	54.0	2.7	8.6	130.1
Octubre	-0.9	17.7	51.0	2.9	8.6	166.4
Noviembre	0.8	18.5	53.0	2.7	8.4	160.2
Diciembre	1.9	17.4	60	2.8	7.4	145.7

Fuente: SENAMHI

Tabla A.3. Información meteorológica Estación Juli.

Mes	Tmin.	Tmax.	Humedad R.	Vel.viento	Horas sol	Evaporacion
	°C	°C	%	m/s	hr	mm
Enero	5.2	14.0	70.0	2.4	6.5	142.4
Febrero	5.2	14.0	71.0	2.3	7.1	121.3
Marzo	4.9	14.1	70.0	2.1	7.1	126.7
Abril	3.6	14.2	62.0	2.2	8.4	121.2
Mayo	0.9	13.7	53.0	2.2	9.2	122.7
Junio	-0.5	13.1	50.0	2.2	9.1	106.5
Julio	-0.9	12.8	51.0	2.5	9.2	112.8
Agosto	0.1	13.4	52.0	2.5	9.3	134.6
Septiembre	2.1	14.1	56.0	2.8	9.1	154.9
Octubre	3.4	14.8	54.0	2.9	8.7	178.8
Noviembre	4.5	15.4	57.0	2.9	8.8	170.4
Diciembre	5.2	14.6	64.0	2.8	7.6	159.1

Fuente: SENAMHI

Tabla A.4. Información meteorológica Estación Ilave.

Mes	Tmin.	Tmax.	Humedad R.	Vel.viento	Horas sol	Evaporacion
	°C	°C	%	m/s	hr	mm
Enero	4.6	14.9	73.0	3.4	6.3	152.0
Febrero	4.8	14.9	75.0	3.4	6.7	134.4
Marzo	4.3	15.0	75.0	3.2	6.8	140.8
Abril	2.4	15.2	68.0	3.2	7.6	134.7
Mayo	-1.0	14.8	57.0	3.4	8.9	140.0
Junio	-3.2	14.3	55.0	3.4	9.4	120.8
Julio	-3.6	14.1	56.0	3.7	9.5	126.9
Agosto	-2.4	14.9	57.0	3.8	9.3	141.6
Septiembre	0.1	15.5	58.0	3.8	8.9	159.1
Octubre	1.8	16.3	57.0	3.9	8.6	180.0
Noviembre	2.9	17.0	57.0	4.0	8.8	182.1
Diciembre	4.2	16.1	64.0	3.8	7.4	178.1

Fuente: SENAMHI

Tabla A.5. Información meteorológica Estación Puno.

Mes	Tmin.	Tmax.	Humedad R.	Vel.viento	Horas sol	Evaporacion
	°C	°C	%	m/s	hr	mm
Enero	5.4	16.3	66.0	2.5	6.2	148.0
Febrero	5.3	16.0	68.0	2.4	6.6	133.7
Marzo	5.1	15.9	67.0	2.3	7.0	142.5
Abril	3.4	15.8	60.0	2.2	7.8	135.4
Mayo	0.8	15.6	52.0	2.1	9.0	129.8
Junio	-0.6	15.3	47.0	2.0	9.5	116.9
Julio	-1.2	15.1	47.0	2.1	9.3	123.5
Agosto	-0.1	15.8	48.0	2.2	9.2	145.7
Septiembre	1.9	16.6	51.0	2.5	8.7	159.1
Octubre	3.2	17.3	53.0	2.5	8.7	185.0
Noviembre	4.4	17.9	52.0	2.5	8.4	185.1
Diciembre	4.9	17.3	59.0	2.5	7.2	172.0

Fuente: SENAMHI



Anexo B. Evapotranspiración de referencia método Tanque evaporímetro clase A.

Evaporación mensual.

Mes	Mazo cruz	Laraqueri	Juli	Ilave	Puno
Enero	144.7	116.2	142.4	152	148
Febrero	138.3	104.4	121.3	134.4	133.7
Marzo	143.9	107.5	126.7	140.8	142.5
Abril	131.2	89.6	121.2	134.7	135.4
Mayo	134.9	105.7	122.7	140	129.8
Junio	119.7	96.1	106.5	120.8	116.9
Julio	121.2	105.6	112.8	126.9	123.5
Agosto	128.2	127.2	134.6	141.6	145.7
Septiembre	144.4	130.1	154.9	159.1	159.1
Octubre	180.5	166.4	178.8	180	185
Noviembre	172.7	160.2	170.4	182.1	185.1
Diciembre	162.5	145.7	159.1	178.1	172
Promedio	143.5	121.2	137.6	149.2	148.1
Coefficiente tanque Kt	0.8	0.75	0.75	0.75	0.75

Fuente: Elaboración Propia



Evapotranspiración de referencia.

Mes	Mazo cruz	Laraqueri	Juli	Ilave	Puno
Enero	115.76	92.96	113.92	121.60	118.40
Febrero	110.64	83.52	97.04	107.52	106.96
Marzo	115.12	86.00	101.36	112.64	114.00
Abril	104.96	71.68	96.96	107.76	108.32
Mayo	107.92	84.56	98.16	112.00	103.84
Junio	95.76	76.88	85.20	96.64	93.52
Julio	96.96	84.48	90.24	101.52	98.80
Agosto	102.56	101.76	107.68	113.28	116.56
Septiembre	115.52	104.08	123.92	127.28	127.28
Octubre	144.40	133.12	143.04	144.00	148.00
Noviembre	138.16	128.16	136.32	145.68	148.08
Diciembre	130.00	116.56	127.28	142.48	137.60
Promedio	114.81	96.98	110.09	119.37	118.45

Fuente: Elaboración Propia

Anexo C. Evapotranspiración de referencia método Penman Monteith.

Tabla C.1. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Mazo cruz.

ETo Penman-Monteith Mensual - untitled							
País		PERU		Estación		MAZOCRUZ	
Altitud		4003 m.		Latitud		16.73 °S	
				Longitud		69.70 °W	
Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m ² /día	mm/mes
Enero	0.9	16.2	67	1.7	5.4	18.9	107.18
Febrero	1.1	16.0	68	1.8	6.5	20.3	100.02
Marzo	-0.4	16.4	67	1.7	5.9	18.2	102.29
Abril	-4.4	16.6	61	1.6	5.7	16.1	90.34
Mayo	-9.9	16.2	54	1.7	8.0	17.0	92.09
Junio	-12.9	15.6	55	1.7	8.8	16.8	82.40
Julio	-13.3	15.3	46	1.9	9.3	17.9	91.96
Agosto	-12.4	16.4	47	1.8	9.3	20.0	103.55
Septiembre	-9.5	17.4	52	2.2	8.4	21.1	114.44
Octubre	-7.3	18.5	48	2.1	7.6	21.5	128.65
Noviembre	-5.3	19.2	49	2.0	8.2	23.2	133.09
Diciembre	-1.2	17.7	59	1.9	6.9	21.3	123.14
Promedio	-6.2	16.8	56	1.8	7.5	19.4	1269.15

Fuente: Elaboración Propia

Tabla C.2. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Laraqueri.

ETo Penman-Monteith Mensual - untitled							
País		PERU		Estación		LARAQUERI	
Altitud		3900 m.		Latitud		16.15 °S	
				Longitud		69.05 °W	
Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m ² /día	mm/mes
Enero	2.6	15.3	70	2.6	6.4	20.5	111.19
Febrero	2.6	15.4	70	2.4	6.7	20.6	99.81
Marzo	1.6	15.5	71	2.4	7.0	20.0	105.25
Abril	-0.5	15.9	65	2.4	7.7	18.9	98.72
Mayo	-4.4	15.9	56	2.3	8.9	18.3	98.20
Junio	-7.5	15.7	56	2.3	9.2	17.4	88.51
Julio	-7.9	15.4	53	2.4	9.1	17.8	93.97
Agosto	-5.8	16.2	52	2.5	9.1	19.8	107.10
Septiembre	-3.3	17.0	54	2.7	8.6	21.5	116.88
Octubre	-0.9	17.7	51	2.9	8.6	23.1	136.17
Noviembre	0.8	18.5	53	2.7	8.4	23.5	136.46
Diciembre	1.9	17.4	60	2.8	7.4	22.1	130.30
Promedio	-1.7	16.3	59	2.5	8.1	20.3	1322.55

Fuente: Elaboración Propia

Tabla C.3. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Juli.

ETo Penman-Monteith Mensual - untitled

País PERU Estación JULI

Altitud 3812 m. Latitud 16.20 °S Longitud 69.45 °W

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento m/s	Insolación horas	Rad MJ/m ² /día	ETo mm/mes
Enero	5.2	14.0	70	2.4	6.5	20.6	109.18
Febrero	5.2	14.0	71	2.3	7.1	21.3	98.77
Marzo	4.9	14.1	70	2.1	7.1	20.1	103.41
Abril	3.6	14.2	62	2.2	8.4	19.9	98.92
Mayo	0.9	13.7	53	2.2	9.2	18.7	94.57
Junio	-0.5	13.1	50	2.2	9.1	17.3	83.86
Julio	-0.9	12.8	51	2.5	9.2	17.9	89.68
Agosto	0.1	13.4	52	2.5	9.3	20.1	100.98
Septiembre	2.1	14.1	56	2.8	9.1	22.2	111.09
Octubre	3.4	14.8	54	2.9	8.7	23.3	127.20
Noviembre	4.5	15.4	57	2.9	8.8	24.1	128.65
Diciembre	5.2	14.6	64	2.8	7.6	22.4	121.33
Promedio	2.8	14.0	59	2.5	8.3	20.7	1267.62

Fuente: Elaboración Propia

Tabla C.4. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Ilave.

ETo Penman-Monteith Mensual - untitled

País PERU Estación ILAVE

Altitud 3880 m. Latitud 16.08 °S Longitud 69.64 °E

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento m/s	Insolación horas	Rad MJ/m ² /día	ETo mm/mes
Enero	4.6	14.9	73	3.4	6.3	20.3	108.60
Febrero	4.8	14.9	75	3.4	6.7	20.6	96.52
Marzo	4.3	15.0	75	3.2	6.8	19.7	101.81
Abril	2.4	15.2	68	3.2	7.6	18.8	97.80
Mayo	-1.0	14.8	57	3.4	8.9	18.3	101.53
Junio	-3.2	14.3	55	3.4	9.4	17.7	92.68
Julio	-3.6	14.1	56	3.7	9.5	18.3	97.87
Agosto	-2.4	14.9	57	3.8	9.3	20.1	108.60
Septiembre	0.1	15.5	58	3.8	8.9	21.9	116.37
Octubre	1.8	16.3	57	3.9	8.6	23.1	132.50
Noviembre	2.9	17.0	57	4.0	8.8	24.1	136.76
Diciembre	4.2	16.1	64	3.8	7.4	22.0	126.46
Promedio	1.2	15.3	63	3.6	8.2	20.4	1317.50

Fuente: Elaboración Propia

Tabla C.5. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Puno.

ETo Penman-Monteith Mensual - untitled

País PERU Estación PUNO

Altitud 3820 m. Latitud 16.82 °S Longitud 70.00 °W

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento m/s	Insolación horas	Rad MJ/m ² /día	ETo mm/mes
Enero	5.4	16.3	66	2.5	6.2	20.2	116.92
Febrero	5.3	16.0	68	2.4	6.6	20.5	103.07
Marzo	5.1	15.9	67	2.3	7.0	19.9	109.56
Abril	3.4	15.8	60	2.2	7.8	19.0	100.89
Mayo	0.8	15.6	52	2.1	9.0	18.3	97.29
Junio	-0.6	15.3	47	2.0	9.5	17.6	88.26
Julio	-1.2	15.1	47	2.1	9.3	17.9	93.28
Agosto	-0.1	15.8	48	2.2	9.2	19.8	106.17
Septiembre	1.9	16.6	51	2.5	8.7	21.5	117.71
Octubre	3.2	17.3	53	2.5	8.7	23.2	133.44
Noviembre	4.4	17.9	52	2.5	8.4	23.5	135.96
Diciembre	4.9	17.3	59	2.5	7.2	21.8	129.80
Promedio	2.7	16.2	56	2.3	8.1	20.3	1332.35

Fuente: Elaboración Propia